



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตร์การอาหาร

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลของกระบวนการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกต่อคุณสมบัติของข้าวหนึ่งกล้อง
และผลิตภัณฑ์ข้าวพอง

Effect of Pre-Germinated Paddy Rice Production on Parboiled Brown Rice and
Expanded Rice Product Qualities

นางผู้วิจัย นางสาวกนกกาญจน์ ปานจันทร์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์อรอนงค์ นัยวิกุล, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มาศอุบล ทองงาม, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนะบุลย์ สัจจอนันตกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของกระบวนการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกต่อคุณสมบัติของข้าวหนึ่งกล้องและผลิตภัณฑ์ข้าวพอง

Effect of Pre-Germinated Paddy Rice Production on Parboiled Brown Rice
and Expanded Rice Product Qualities

โดย

นางสาวกนกกาญจน์ ปานจันทร์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

พ.ศ. 2554

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กนกกาญจน์ ปานจันทร์ 2554: ผลของกระบวนการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกต่อคุณสมบัติของข้าวหนึ่งกล้อง และ
ผลิตภัณฑ์ข้าวพอง ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร
ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศาสตราจารย์
อรอนงค์ นัยวิกุล, Ph.D. 181 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพพะแตกต่างกัน 3 ระดับ
ต่อคุณสมบัติของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าว 3 พันธุ์ คือ สุพรรณบุรี 1 (สพ 1) สีนเหล็ก (สล) และกะ 6 โดยแช่น้ำที่
30 °ซ เป็นเวลา 14 ชม. แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลาจนกว่าข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์มี
ความยาวคัพพะแตกต่างกัน 3 ระยะ คือ 0.5-1, 1-2 และ 2-3 มม. ซึ่งข้าวสพ 1 และข้าวกะ 6 ใช้เวลารวมตั้งแต่การแช่น้ำ และการเพาะ
ให้เริ่มงอกจนมีความยาวคัพพะเริ่มงอกแตกต่างกัน 3 ระยะที่เวลา 28, 32 และ 38 ชม. ตามลำดับ ส่วนข้าวสล ใช้เวลารวมที่ 30, 38
และ 42 ชม. ตามลำดับ จากนั้นนำข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพพะแตกต่างกันนี้ส่วนหนึ่งไปนึ่งที่ 121 °ซ ความดัน 15
ปอนด์ นาน 10 นาที แล้วตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี พบว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (PGBR) จากข้าวทั้ง 3 พันธุ์ เมื่อ
มีคัพพะเริ่มงอกยาวขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิซ (37.81-80.68 มก./100 ก.) กรดแกมมา แอมิโนบิวทริก (4.13-19.08 มก./100 ก.)
เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากข้าวสาร (WR) ข้าวกล้อง (BR) และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (PBR) แต่มีค่าลดลงเมื่อนำไป
ผลิตเป็นข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (PPGBR) ส่วนปริมาณโปรตีน (ร้อยละ 6.64-8.66) และธาตุเหล็ก (0.54-1.98 มก./100
ก.) ของ PGBR ทั้ง 3 ระยะ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจาก WR, BR และ PBR และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่อนำ PGBR ไปผ่าน
กระบวนการนี้ ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด ปรากฏว่า ในข้าวสพ 1 และข้าวสล เมื่อข้าวเปลือกมีคัพพะเริ่มงอกยาวขึ้น
ส่งผลให้ค่าความหนืด โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าความหนืดสูงสุด (1,480-1,718 เซนติปีวส์) ลดลงจาก WR และ BR และมีค่าลดลงอีก
เมื่อนำ PGBR ไปผ่านกระบวนการนี้ ส่วนข้าวกะ 6 พบว่า ค่าความหนืดสูงสุดของ PGBR (95-343 เซนติปีวส์) มีค่าต่ำกว่า WR,
BR และ PBR แต่เมื่อนำ PGBR ไปผ่านกระบวนการนี้ ทำให้ค่าความหนืดของ PPGBR มีค่าสูงกว่า PGBR แต่ยังมีค่าต่ำกว่า WR, BR
และ PBR จากนั้นนำ WR, BR, PBR, PGBR ทั้ง 3 ระยะ และ PPGBR ทั้ง 3 ระยะ ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวพอง และตรวจสอบ
คุณภาพ พบว่า ข้าวพองจาก PGBR มีอัตราส่วนการพองตัว (1.51-2.68 เท่า) สูงกว่าข้าวพองจาก BR โดยข้าวพองจาก PGBR มี
อัตราส่วนการพองตัวเพิ่มขึ้นเมื่อ PGBR มีความยาวคัพพะเริ่มงอกยาวขึ้น และเมื่อนำ PGBR ไปผ่านกระบวนการนี้ พบว่า ข้าว
พองจาก PPGBR มีอัตราส่วนการพองตัวสูงกว่าข้าวพองจาก PGBR โดยอัตราส่วนการพองตัวแปรผกผันกับปริมาณแอมิโลส ส่วน
ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวพอง พบว่า กระบวนการผลิต PGBR ทำให้ค่าความแข็ง (22.18-27.55 นิวตัน) ของข้าวพองลดลงต่ำ
กว่าข้าวพองจาก BR และค่าความแข็งลดลงอีกเมื่อนำ PGBR ไปผ่านกระบวนการนี้ก่อนผลิตเป็นข้าวพอง โดยค่าความแข็ง
แปรผกผันกับอัตราส่วนการพองตัว สำหรับผลทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวพองชนิดต่างๆ ด้วยช่วงคะแนน 1-5 (1 = ไม่
ชอบมากที่สุด และ 5 = ชอบมากที่สุด) พบว่า ข้าวพองที่ผลิตจาก PPGBR มีคะแนนความชอบทางด้านกลิ่นรสในช่วงปานกลางถึง
ดี (3.63-4.25 คะแนน) ความกรอบในช่วงพองพอใช้ถึงดี (3.00-4.50 คะแนน) และความชอบรวมในช่วงปานกลางถึงมาก (3.25-4.13
คะแนน) โดยมีคะแนนความชอบทั้ง 3 ด้านนี้มากกว่าผลิตภัณฑ์ข้าวพองจากข้าวชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ ข้าวพองทุกชนิดที่ผลิตได้มี
ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา น้อยกว่า 10 โคโลนีต่อกรัม ซึ่งอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการบริโภค

Kanokkan Panchan 2011: Effect of Pre-Germinated Paddy Rice Production on Parboiled Brown Rice and Expanded Rice Product Qualities. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Professor Onanong Naivikul, Ph.D. 181 pages.

This research was aimed to investigate effects of pre-germinated paddy rice process conditions on properties of parboiled pre-germinated brown rice in 3 rice cultivars, Suphan Buri 1 (SB 1), Sinlek (SL) and Rice Division6 (RD6). Paddy rice samples were soaked in water at 30 °C for 14 hours, and then incubated at 30 °C with 85% relative humidity until all three cultivars of paddy rice had three stages of embryonic growth lengths, 0.5-1, 1-2 and 2-3 mm. Pre-germination time of SB 1 and RD6 to achieve 3 stages of embryonic growth lengths were 28, 32, and 38 hours, respectively, while those of SL were 30, 38 and 42 hours, respectively. All pre-germinated paddy rice was parboiled at 121 °C, 15 psi for 10 minutes and analyzed for chemical compositions. The results showed that pre-germinated brown rice (PGBR) of 3 cultivars had significantly higher reducing sugar (37.81-80.68 mg/100 g) and gamma-amino butyric acid (GABA) (4.13-19.08 mg/100 g) contents than white rice (WR), brown rice (BR) and parboiled brown rice (PBR) when embryonic growth lengths increased. However, reducing sugar and GABA contents in parboiled pre-germinated brown rice (PPBGR) were less than before parboiling process. Amount of protein (6.64-8.66 %) and iron (0.54-1.98 mg/100 g) in all three stages of PGBR were significantly higher than in WR, BR and PBR and were further increased in PPBGR. Pasting behaviors of 3 rice cultivars were observed, especially peak viscosity value, pre-germination and parboiling processes in SB 1 and SL reduced peak viscosity (1,480-1,718 cP) comparing to WR, BR and PBR. Pre-germination process in RD6 also decreased peak viscosity (95-343 cP), interestingly, parboiling process increased viscosity in PPBGR. However, viscosity of PPBGR was still lower than WR, BR and PBR. To evaluate expanding ability, WR, BR, PBR, PGBR and PPBGR were produced expanded-rice product and investigated properties. Results showed that PGBR (1.51-2.68 time) provided higher expansion ratio than BR and expansion ratio increased with increasing embryonic growth length, moreover, parboiling process also enhanced expansion ratio. When comparing among 3 rice cultivars, SB 1 gave the lowest expansion ratio because its amylose content is higher than the others. The expansion ratio was inverse amylose content and hardness of expanded rice. The hardness of expanded rice which was made from PGBR (22.18-27.55 N) was lower than BR. According to effect of parboiling process, expanded rice made from PPBGR would have low hardness. Sensory evaluation by using 1-5 points score (1 = extremely dislike and 5 = extremely like) displayed that expanded rice from PPBGR gained sensory scores from moderately to good (3.63-4.25 points) for flavor, from fair to good (3.00-4.50 points) for crispiness and from moderately to mostly (3.25-4.13 points) for overall liking. All these 3 attributes scores of expanded rice from PPBGR were more than others. Moreover, total plate counts, yeast and mold counts were less than 10 CFU/g in all samples which were in the safe range for consumption.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์อรอนงค์ นัยวิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก เป็นอย่างสูง ที่เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า กรุณาให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำที่ดีมาตลอดในการศึกษาเล่าเรียน และการดำเนินงานวิจัยของข้าพเจ้า ตลอดจนความช่วยเหลือ ในการตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อย

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์มาศอุบล ทองงาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะที่ดี และความช่วยเหลือที่เอื้อประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ปาริฉัตร หงสประภาส ประธานการสอบ และ รองศาสตราจารย์สายสนม ประดิษฐ์ดวง ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้วิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำ จนวิทยานิพนธ์สำเร็จเรียบร้อย และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่ๆ (ชุตินา ททัษรัตน์ ภัควัฒน์ กุรอชียะห์ จิราภา) เพื่อนๆ (นฤชยา สุชญญา ศศิกา สิริธร) และน้องๆ (เพราเพ็ญ วารุณี) ผู้ซึ่งเป็นสมาชิก และอดีตสมาชิกห้องแบ่ง ที่คอยให้กำลังใจ คำแนะนำ และความช่วยเหลือที่ดีเสมอมา รวมทั้งเพื่อนๆ ร่วมรุ่นปริญญาตรี (กนกวรรณ ธิดา อัญชลี อรุณ สายฝน คุษดี จุฑาทิพย์ เบญญา วิศุดา ชัยวัฒน์ สุตินेत्र พนิดา สรวุฒิ) ที่ยังคงอยู่เคียงข้างให้กำลังใจ และร่วมเดินทางไปด้วยกันเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ พ่อประสาท แม่ดวงแข เป็นอย่างสูงที่มอบชีวิต ความรัก ความปรารถนาดี ความช่วยเหลือ และคำสั่งสอนที่ดีๆ ให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนสนับสนุนทุนทรัพย์เพื่อการศึกษาเล่าเรียนของข้าพเจ้าเสมอมา และขอขอบคุณพี่จรัสศักดิ์ และญาติ ที่ให้ความรัก ความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

กนกกาญจน์ ปานจันทร์

เมษายน 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	42
อุปกรณ์	42
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	56
สรุปและข้อเสนอแนะ	131
สรุป	131
ข้อเสนอแนะ	138
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	140
ภาคผนวก	153
ภาคผนวก ก การตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางฟิสิกส์	154
ภาคผนวก ข การตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี	158
ภาคผนวก ค การตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีเชิงฟิสิกส์	169
ภาคผนวก ง การตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์	171
ภาคผนวก จ การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส	173
ภาคผนวก ฉ ภาพและตารางผลการทดลอง	176
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	181

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เอนไซม์ไฮโดรลิติกที่ใช้ย่อยอาหารสะสม และสารโมเลกุลเล็กที่ย่อยได้ในกระบวนการเคลื่อนย้ายอาหารสะสมในเมล็ด	28
2	คุณภาพทางฟิสิกส์ของเมล็ดข้าวเปลือกในข้าว 3 พันธุ์	57
3	องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์	58
4	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ของข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ หลังแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 0-36 ชั่วโมง และจำนวนเท่าของการดูดซึมน้ำหลังสิ้นสุดการแช่ข้าวเปลือก (36 ชั่วโมง) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่ยังไม่ผ่านการแช่	61
5	ร้อยละการเริ่มงอกของเมล็ดข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 เมื่อแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 2-36 ชั่วโมง	64
6	ร้อยละการเริ่มงอกของเมล็ดข้าวเปลือกสินเหล็ก เมื่อแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 2-36 ชั่วโมง	65
7	ร้อยละการเริ่มงอกของเมล็ดข้าวเปลือกกข6 เมื่อแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 2-36 ชั่วโมง	66
8	เวลาที่ทำให้ข้าวเปลือกเริ่มงอกมีความยาวคัพกะแตกต่างกัน 3 ระยะ ในข้าว 3 พันธุ์ หลังแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85	68
9	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ของข้าวเปลือก 3 พันธุ์ หลังแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 14-28 ชั่วโมง	69
10	ค่าลี L* ในข้าว 3 พันธุ์	70
11	ค่าลี a* ในข้าว 3 พันธุ์	73
12	ค่าลี b* ในข้าว 3 พันธุ์	74
13	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ในข้าว 3 พันธุ์ หลังอบแห้งที่ 45 ± 5 °ซ เป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง	88
14	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่างข้าว โดยน้ำหนักแห้ง) ในข้าว 3 พันธุ์	90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	ปริมาณโปรตีน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง) ในข้าว 3 พันธุ์	92
16	ปริมาณ GABA (มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่างข้าวโดยน้ำหนักแห้ง) ในข้าว 3 พันธุ์	94
17	ปริมาณธาตุเหล็ก (มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่างข้าวโดยน้ำหนักแห้ง) ในข้าว 3 พันธุ์	96
18	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวสุพรรณบุรี 1	100
19	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวลินเหล็ก	101
20	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าว กข6	102
21	อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวก่อนผลิตเป็นข้าวพองชนิดต่างๆ	114
22	อัตราส่วนการพองตัวของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์	116
23	ลักษณะเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) ของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์	118
24	ผลทางประสาทสัมผัสด้านค่าสีของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์	121
25	ผลทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์	123
26	ผลทางประสาทสัมผัสด้านความกรอบของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์	125
27	ผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบรวมของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์	127
28	ปริมาณจุลินทรีย์ของข้าวพองในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังทอดที่ 220 °ซ เป็นเวลา 10 วินาที	130
ตารางผนวกที่		
ก1	เปรียบเทียบขนาดของเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร	155
ก2	รูปร่างของเมล็ดข้าว	156
ข1	สารละลายกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้น 0-200 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร	165
ข2	สารละลายเหล็กมาตรฐานความเข้มข้น 0-4.5 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร	166
ค1	สภาวะที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลา	170

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างของเมล็ดข้าว ก) ข้าวเปลือกทั้งเมล็ด และ ข) ข้าวกล้อง	5
2	โครงสร้างโมเลกุลของเอมิโลเพกทิน และคลัสเตอร์ของสายเอมิโลเพกทิน	8
3	ขั้นตอนการย่อยสลายสตาร์ชในเมล็ดขณะงอก โดยผ่านกระบวนการฟอสฟอโรลิติก (Phosphorolytic breakdown) และไฮโดรลิติก (Hydrolytic breakdown)	25
4	ขั้นตอนการย่อยสลายโปรตีนในเมล็ดขณะงอก	26
5	การย่อยสลายไขมันในเมล็ดขณะงอก	27
6	วิถีไกลโคไลซิส (Glycolysis pathway)	29
7	วัฏจักรเครปส์ (Kreb cycle or citric acid cycle)	30
8	การผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ	48
9	การผลิตข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ	50
10	การผลิตข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก	51
11	การผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวพอง	52
12	ลักษณะของข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ ในข้าวสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และ กข6 โดยข้าวพันธุ์เดียวกันเรียงจากซ้ายไปขวา คือ เริ่มงอกระยะที่ 1 (0.5-1 มม.), เริ่มงอกระยะที่ 2 (1-2 มม.) และเริ่มงอกระยะที่ 3 (2-3 มม.) ตามลำดับ	67
13	ลักษณะเมล็ดข้าว และสตาร์ชบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวกล้องในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1; ก) ข้าวกล้อง ข) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1 ค) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2 และ ง) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3 ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ	78
14	ลักษณะเมล็ดข้าว และสตาร์ชบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวหนึ่งในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1; ก) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1 ค) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2 และ ง) ข้าวกล้องเริ่มงอกระยะที่ 3 ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ	79
15	ลักษณะเมล็ดข้าว และสตาร์ชบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวกล้องในข้าวพันธุ์สินเหล็ก; ก) ข้าวกล้อง ข) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1 ค) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2 และ ง) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3 ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ	81

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ลักษณะเมล็ดข้าว และสสารชบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวนึ่งในข้าวพันธุ์สินเหล็ก; ก) ข้าวนึ่งกลิ้งจากข้าวเปลือก ข) ข้าวนึ่งกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ค) ข้าวนึ่งกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2 และ ง) ข้าวกลิ้งเริ่มงอระยะที่ 3 ผ่านกลิ้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ	82
17	ลักษณะเมล็ดข้าว และสสารชบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวกลิ้งในข้าวพันธุ์กข6; ก) ข้าวกลิ้ง ข) ข้าวกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ค) ข้าวกลิ้งจากข้าวเปลือก เริ่มงอระยะที่ 2 และง) ข้าวกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ผ่านกลิ้งจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ	84
18	ลักษณะเมล็ดข้าว และสสารชบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวนึ่งในข้าวพันธุ์กข6; ก) ข้าวนึ่งกลิ้งจากข้าวเปลือก ข) ข้าวนึ่งกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ค) ข้าวนึ่งกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2 และ ง) ข้าวกลิ้งเริ่มงอระยะที่ 3 ผ่านกลิ้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ	85
19	ลักษณะเมล็ดข้าวนึ่งกลิ้งจากข้าวเปลือกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 จาก กลิ้งถ่ายภาพระยะใกล้	86
20	ลักษณะ (1) ข้าวนึ่งกลิ้งจากข้าวเปลือก, (2) ข้าวนึ่งกลิ้งจากข้าวเปลือกหุงสุก, (3) ข้าวนึ่งกลิ้งจากข้าวเปลือกหุงสุกอบแห้ง และ (4) ข้าวพองจากข้าวนึ่งกลิ้งจาก ข้าวเปลือก ในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6	115
ภาพผนวกที่		
ฉ1	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ของข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ หลังแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 0-36 ชั่วโมง	177
ฉ2	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ของข้าวเปลือก 3 พันธุ์ หลังแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 14-28 ชั่วโมง	177

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
ฉ3	ร้อยละการงอกของเมล็ดข้าวเปลือก 3 พันธุ์; ก) สุพรรณบุรี 1, ข) สินเหล็ก และ ค) กข6 เมื่อแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 2-36 ชั่วโมง	178
ฉ4	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวสุพรรณบุรี 1	179
ฉ5	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวสินเหล็ก	179
ฉ6	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวกข6	180

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

คำย่อ	คำศัพท์	ความหมาย
WR	ข้าวสาร	เมล็ดข้าวที่ผ่านการกะเทาะเปลือก และขัดผิว
BR	ข้าวกล้อง	เมล็ดข้าวที่ผ่านการกะเทาะเปลือก และไม่ได้ขัดผิว
PBR	ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก	ข้าวที่ผลิตจากข้าวเปลือก นำมาแช่น้ำ นึ่ง ทำให้แห้ง และกะเทาะเปลือกโดยไม่ได้ขัดผิว
PGBR 1	ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1	การนำข้าวเปลือกมาทำให้เริ่มงอก ด้วยการแช่น้ำระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำมาเพาะให้เริ่มงอกจนคัพเพาะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 0.5-1 มิลลิเมตร ทำให้แห้ง และกะเทาะเปลือกโดยไม่ขัดผิว
PGBR 2	ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2	การนำข้าวเปลือกมาทำให้เริ่มงอก ด้วยการแช่น้ำระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำมาเพาะให้เริ่มงอกจนคัพเพาะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 1-2 มิลลิเมตร ทำให้แห้ง และกะเทาะเปลือกโดยไม่ขัดผิว
PGBR 3	ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3	การนำข้าวเปลือกมาทำให้เริ่มงอก ด้วยการแช่น้ำระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำมาเพาะให้เริ่มงอกจนคัพเพาะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 2-3 มิลลิเมตร ทำให้แห้ง และกะเทาะเปลือกโดยไม่ขัดผิว
PPGBR 1	ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1	การนำข้าวเปลือกมาทำให้เริ่มงอก ด้วยการแช่น้ำระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำมาเพาะให้เริ่มงอกจนคัพเพาะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 0.5-1 มิลลิเมตร นำไปนึ่ง ทำให้แห้ง และกะเทาะเปลือกโดยไม่ขัดผิว
PPGBR 2	ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2	การนำข้าวเปลือกมาทำให้เริ่มงอก ด้วยการแช่น้ำระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำมาเพาะให้เริ่มงอกจนคัพเพาะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 1-2 มิลลิเมตร นำไปนึ่ง ทำให้แห้ง และกะเทาะเปลือกโดยไม่ขัดผิว
PPGBR 3	ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3	การนำข้าวเปลือกมาทำให้เริ่มงอก ด้วยการแช่น้ำระยะเวลาหนึ่ง แล้วนำมาเพาะให้เริ่มงอกจนคัพเพาะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 2-3 มิลลิเมตร นำไปนึ่ง ทำให้แห้ง และกะเทาะเปลือกโดยไม่ขัดผิว

ผลของกระบวนการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกต่อคุณสมบัติของข้าวหนึ่งกล้อง และผลิตภัณฑ์ข้าวพอง

Effect of Pre-Germinated Paddy Rice Production on Parboiled Brown Rice and Expanded Rice Product Qualities

คำนำ

ข้าวหนึ่ง เป็นสินค้าส่งออกประเภทข้าวของไทย ถึงแม้จะไม่มี การบริโภครภายในประเทศ แต่ปี หนึ่งๆ ประเทศไทยส่งออกข้าวหนึ่งประมาณ 7 แสน ถึง 1 ล้านเมตริกตัน คิดเป็นมูลค่าหลายพันล้านบาท (กรมวิชาการเกษตร, 2550) กรรมวิธีการผลิตข้าวหนึ่งมีจุดประสงค์เพื่อลดปริมาณข้าวหักระหว่างการสี และช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของข้าวในระหว่างขั้นตอนของการผลิตข้าวหนึ่ง ซึ่งช่วยลดการสูญเสีย สารอาหารบางส่วนของเมล็ดข้าวระหว่างการสี ตลอดจนช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของข้าว และเพิ่มคุณค่า การใช้ประโยชน์จากข้าวเปลือกคุณภาพการสีต่ำ (Bhattacharya, 1985; Champagne, 2004) นอกเหนือจาก กระบวนการผลิตข้าวหนึ่งที่ช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของข้าวแล้ว อีกแนวทางหนึ่งของการเพิ่มคุณค่า ทางโภชนาการของข้าวนั้น มีรายงานว่า การทำข้าวให้เริ่มงอก ก่อนนำไปบริโภคช่วยทำให้สารอาหารของ ข้าว เช่น น้ำตาล กรดแอมิโน โปรตีน (Moongngarm and Saetung, 2010; Saman *et al.*, 2008; Usansa *et al.*, 2009) วิตามิน แร่ธาตุ เส้นใยอาหาร กรดเฟอรูลิก และกรดไฟติก (Hunt *et al.*, 2002; Kayahara and Tukahara, 2000) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดแกมมา แอมิโนบิวทีริก (Gamma Amino Butyric Acid; GABA) มีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงกว่าข้าวกล้องปกติ หรือข้าวสาร (Komatsuzaki *et al.*, 2007; Ohtsubo *et al.*, 2005) นอกจากนี้แล้วข้าวกล้องเริ่มงอกหุงสุกยังมีเนื้อสัมผัสนุ่ม และรสชาติดีกว่าข้าวกล้องหุงสุกด้วย (Ito and Ishikawa, 2004) ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารธัญชาติชนิดพองกรอบพร้อมบริโภคเพื่อสุขภาพ (Puffed cereal breakfast) ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น จึงมีแนวคิดในการใช้ประโยชน์จากข้าวเต็มเมล็ดของข้าวหนึ่ง กล้องเริ่มงอกมาเป็นวัตถุดิบหลัก เพื่อผลิตอาหารชนิดพองกรอบ พร้อมทั้งตรวจสอบคุณภาพเบื้องต้นของ ผลิตภัณฑ์ทางด้านฟิสิกส์ ทางด้านประสาทสัมผัส และทางด้านจุลินทรีย์

วัตถุประสงค์

1. ตรวจสอบผลของกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระดับ ต่อสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ ในข้าว 3 พันธุ์ คือ ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 1, ข้าวเจ้าพันธุ์สินเหล็ก และข้าวเหนียวพันธุ์กข6 เปรียบเทียบกับข้าวสาร ข้าวกล้อง และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก
2. ตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ ของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระดับ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ เปรียบเทียบกับข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระดับ
3. ผลิตอาหารพองกรอบจากเมล็ดข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระดับ และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระดับ พร้อมทั้งตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และผลทางด้านประสาทสัมผัส

การตรวจเอกสาร

ข้าวเป็นธัญพืชในวงศ์หญ้าแกรมินีอี (*Gramineae*) โดยข้าวที่ปลูกในทวีปเอเชียมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa L.* แบ่งตามสภาพภูมิอากาศ และสายพันธุ์ข้าวได้เป็นสามกลุ่ม คือ กลุ่มข้าวอินดิกา (*Indica*) ปลูกทั่วไปในเขตร้อน เช่น ไทย อินเดีย Philipines เมล็ดข้าวมีลักษณะยาวเรียว กลุ่มข้าวจาปอนิกา (*Japonica*) ปลูกทั่วไปในเขตกึ่งร้อน อบอุ่น และเย็น เช่น ญี่ปุ่น เกาหลี จีนตอนเหนือ เมล็ดข้าวมีลักษณะป้อมสั้น และกลุ่มข้าวจาวานิกา (*Javanica*) ปลูกทั่วไปบริเวณเส้นศูนย์สูตร เช่น อินโดนีเซีย และพม่า เมล็ดข้าวมีลักษณะอ้วนป้อม มีลักษณะผสมระหว่างพันธุ์อินดิกา และจาปอนิกา (อรอนงค์, 2550)

1. พันธุ์ข้าว

พันธุ์ข้าวที่มาจากท้องถิ่นต่างกัน ทั้งภายในและภายนอกประเทศ ส่วนใหญ่จะเป็นพันธุ์ที่มีลักษณะดีเพียงลักษณะหนึ่งลักษณะใดเท่านั้น เช่น พันธุ์ที่ต้านทานโรคมักจะให้ผลผลิตต่ำหรือคุณภาพเมล็ดไม่ได้มาตรฐาน หรือพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงก็มักจะไม่ต้านทานโรค ฉะนั้น จึงต้องเลือกเอาพันธุ์ที่มีลักษณะดีแต่ละอย่างมาผสมกัน เพื่อจะได้รวมเอาลักษณะดีต่าง ๆ ไว้ในต้นหรือพันธุ์เดียวกัน ซึ่งจะได้เป็นพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงคุณภาพเมล็ดได้มาตรฐาน และต้านทานโรค (ประพาส, 2552) โดยพันธุ์ข้าวที่เลือกมาดำเนินงานวิจัย มีดังนี้

1.1 ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 1 (Suphan Buri 1)

ได้มาจากการผสมพันธุ์ระหว่างกลุ่มผสม 3 ทางของ IR25393-57-2-3 / RD 23 // R27316-96-3-2-2 และกลุ่มผสมเดี่ยวของ SPRLR77205-3-2-1-1 / SPRLR79134-51-2-2 ที่สถานีทดลองข้าวสุพรรณบุรี เมื่อปี พ.ศ. 2528 ลักษณะโดยทั่วไปของข้าวพันธุ์นี้ คือ เป็นข้าวเจ้านาสวน ต้นสูงประมาณ 125 เซนติเมตร มีลักษณะทรงกอตั้ง ต้นแข็งไม่ล้ม ใบสีเขียวเข้ม มีขนคาบใบ และปล้อง สีเขียว ใบธงยาว ค่อนข้างตั้งตรง คอรวงยาว รวงค่อนข้างแน่น เมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง มีลักษณะที่ไม่ไวต่อช่วงแสง อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 120 วัน ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 22 วัน เมล็ดข้าวกล้องมีขนาดความกว้าง × ยาว × หนา ประมาณ $2.2 \times 7.3 \times 1.8$ มิลลิเมตร มีปริมาณแอมิโลส ประมาณร้อยละ 29 ให้คุณภาพข้าวสุก ร่วนแข็ง ให้ผลผลิตต่อไร่สูง ประมาณ 806 กิโลกรัมต่อไร่ คณะกรรมการวิจัยและพัฒนากรมวิชาการเกษตร มีมติให้เป็นพันธุ์รับรอง เมื่อวันที่ 28 ตุลาคม 2537 (กรมวิชาการเกษตร, 2549)

1.2 ข้าวเจ้าพันธุ์ลินเหล็ก (Sinlek)

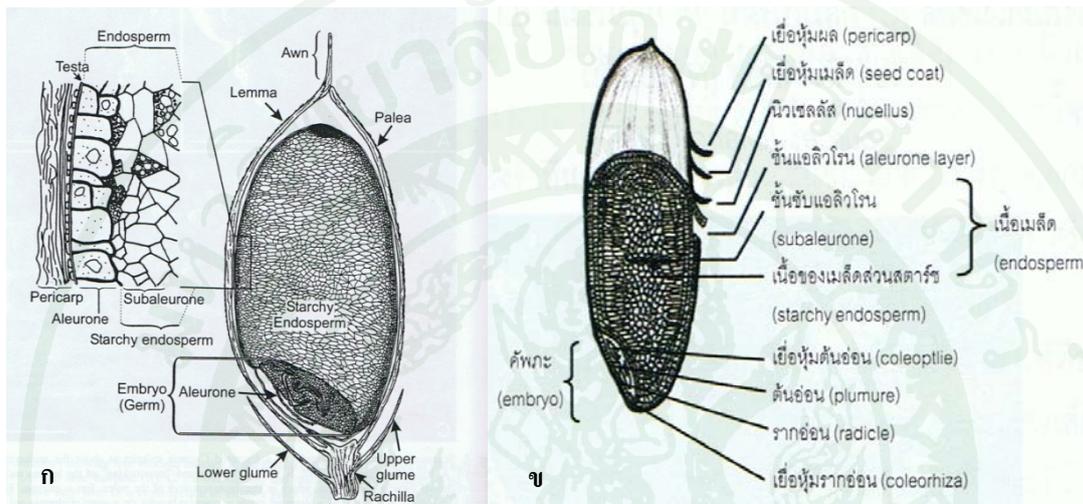
ได้มาจากการผสมข้ามพันธุ์ระหว่างข้าวเจ้าหอมนิลกับข้าวเจ้าขาวดอกมะลิ 105 ลักษณะโดยทั่วไปของข้าวพันธุ์นี้ คือ ต้นสูงประมาณ 148 เซนติเมตร เป็นข้าวสีขาวยาวที่มีกลิ่นหอม รูปร่างเมล็ดข้าวเปลือกเรียวยาวประมาณ 11 มิลลิเมตร มีลักษณะไม่ไวต่อช่วงแสง ปลูกได้ตลอดทั้งปี อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 120 วัน ให้ผลผลิตต่อไร่สูง ประมาณ 600-800 กิโลกรัมต่อไร่ มีความต้านทานต่อโรคไหม้ ข้าวลินเหล็กเป็นข้าวหอมนุ่มที่มีดัชนีน้ำตาลต่ำ-ปานกลาง (58) เมื่อนำมาทดลองบริโภคในกลุ่มผู้ป่วยเบาหวาน พบว่า การบริโภคข้าวกล้องลินเหล็กช่วยแก้ปัญหาเบาหวานได้ ทำให้สถานะคือต่ออินซูลินลดลง และการทำงานของตับอ่อนดีขึ้น รวมทั้งทำให้ค่าเฉลี่ยของไตรกลีเซอไรด์ลดลง นอกจากนี้ข้าวลินเหล็กยังมีธาตุเหล็กในเมล็ดสูง ข้าวพันธุ์นี้ได้ผ่านการประเมินคุณสมบัติความเป็นประโยชน์ของธาตุเหล็กทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและในมนุษย์ โดยพบว่า การส่งเสริมการบริโภคข้าวลินเหล็กในเด็กนักเรียนที่มีภาวะพร่องธาตุเหล็กทำให้ระดับฮีโมโกลบินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ข้าวลินเหล็ก ถือเป็นหนึ่งตัวอย่างของพืชเสริมสารอาหาร (Biofortification Crop) โดยคุณสมบัติทางโภชนาการในข้าวกล้องลินเหล็กประกอบด้วยปริมาณแอมิโลสร้อยละ 16.5, อุณหภูมิแป้งสุก 70-74 °ซ, ธาตุเหล็ก 15-21 มิลลิกรัม/กิโลกรัม, ธาตุสังกะสี 26.9 มิลลิกรัม/กิโลกรัม, โอเมก้า-3 22.4 มิลลิกรัม/ 100 กรัม, แกมมา-ออร์ซานอล 372 ไมโครกรัม/กรัม, วิตามิน อี 680 ไมโครกรัม/100 กรัม และโฟเลต 20.35 ไมโครกรัม/100 กรัม (ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว, ม.ป.ป.)

1.3 ข้าวเหนียวพันธุ์กข6 (RD6)

ได้จากการปรับปรุงพันธุ์ โดยการใช้รังสีซิกน้าให้เกิดการกลายพันธุ์ โดยใช้รังสีแกมมาขนาด 20 กิโลเรด ฉายเมล็ดพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ให้กลายเป็นพันธุ์ข้าวเหนียว แล้วนำมาปลูกคัดเลือกที่สถานีทดลองข้าวบางเขน และสถานีทดลองข้าวพิมาย จากการคัดเลือกได้ข้าวเหนียวหลายสายพันธุ์ แต่สายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตสูงสุด คือ สายพันธุ์ KDML 105'65-G₂U-68-254 นับว่าเป็นข้าวพันธุ์ดีพันธุ์แรกของประเทศไทยที่ค้นคว้าได้ โดยใช้วิธีชักนำพันธุ์ให้เปลี่ยนกรรมพันธุ์โดยใช้รังสี ลักษณะโดยทั่วไปของข้าวพันธุ์นี้ ได้แก่ ต้นสูงประมาณ 150-160 ซม. มีลักษณะไวต่อช่วงแสง ปลูกได้เฉพาะฤดูนาปี และเป็นพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทรงกอกระจายเล็กน้อย ใบยาวสีเขียวเข้ม ใบธงตั้ง เมล็ดยาวเรียวยาว เมล็ดข้าวเปลือกสีน้ำตาล อายุเก็บเกี่ยวประมาณเดือนพฤศจิกายนของทุกปี ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 5 สัปดาห์ เมล็ดข้าวกล้องมีขนาดความกว้าง × ยาว × หนา = 2.2 × 7.2 × 1.7 มิลลิเมตร คุณภาพข้าวสุก นุ่มเหนียว หอม มีผลผลิตประมาณ 666 กิโลกรัมต่อไร่ คณะกรรมการวิจัยและพัฒนากรมวิชาการเกษตร มีมติให้เป็นพันธุ์รับรอง เมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม 2520 (กรมวิชาการเกษตร, 2549)

2. โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ 1) ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว เรียกว่า แกลบ (Husk หรือ hull) และ 2) ส่วนเนื้อผล หรือผลแท้ (True fruit หรือ Caryopsis grain) โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วน แสดงดังภาพที่ 1 (Champagne, 2004; อรอนงค์, 2550) ดังนี้



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเมล็ดข้าว ก) ข้าวเปลือกทั้งเมล็ด และ ข) ข้าวกล้อง

ที่มา: Champagne (2004); อรอนงค์ (2550)

2.1 แกลบ ประกอบด้วยเปลือกใหญ่ (Lemma) เปลือกเล็ก (Palea) ขน หาง ข้าวเมล็ด และกลีบรองเมล็ด ซึ่งเชื่อมต่อกัน โดยเปลือกมีหน้าที่ป้องกันอันตรายให้ส่วนประกอบอื่นๆ ของเมล็ดที่อยู่ภายใน ป้องกันการดูดซึมน้ำ อากาศ ป้องกันไม่ให้เชื้อโรค และแมลงเข้าทำลายเมล็ด

2.2 ข้าวกล้องหรือเนื้อผล ประกอบด้วย

2.2.1 เยื่อหุ้มผล เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอก ห่อหุ้มผลอยู่ในมีสาร์ลีหรือรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่างๆ นอกจากนี้ยังมี โปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบสำคัญ เยื่อหุ้มผลนี้แบ่งย่อยได้เป็น 3 ชั้นย่อย ได้แก่ 1) เอกโซคาร์พ (Exocarp) หรือเอพิการ์พ (Epicarp) เป็นผิวเปลือกที่อยู่นอกสุด 2) เมโซคาร์พ (Mesocarp) หรือไฮพอดิร์ม (Hypoderm) เป็นผนังผลชั้นกลาง และ 3) เอนโดคาร์พ (Endocarp) เป็นเนื้อเยื่อชั้นใน

2.2.2 เยื่อหุ้มเมล็ด อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้ามา ภายในเซลล์มีไขมัน และสารสีเช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผล ทำให้ข้าวกล้องมีสี

2.2.3 นิวเซลลัส (Nucellus) เป็นเซลล์ชั้นที่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด

2.2.4 เยื่อชั้นแอลิวโรน (Aleurone layer) เป็นเยื่อชั้นถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ด เซลล์แอลิวโรนจะไม่เชื่อมติดกับคัพภะ แบ่งลักษณะของเซลล์แอลิวโรนเป็น 2 ลักษณะ คือ 1) เซลล์ส่วนที่ห่อหุ้มรอบเนื้อของเมล็ด มีไซโทพลาซึมอยู่หนาแน่น มีกลุ่มโปรตีนที่มีรูปร่าง (Protein bodies) กลุ่มไขมัน และสารอื่นๆ 2) เซลล์ส่วนที่ห่อหุ้มคัพภะ มีลักษณะบาง มีไซโทพลาซึมน้อย มีกลุ่มไขมัน และกลุ่มโปรตีนน้อย

2.2.4.1 คัพภะ หรือเชื้อชีวิต จะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ มีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน (Radicle) ยอดอ่อน (Plumule) เยื่อหุ้มรากอ่อน (Coleorhiza) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (Coleoptile) ท่อน้ำท่ออาหาร (Epiblast) และใบเลี้ยง (Cotyledone) คัพภะเป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อน จึงอุดมด้วยโปรตีน และไขมันในส่วนต่างๆ

2.2.4.2 เนื้อเมล็ด หรือเนื้อข้าว (Endosperm) มีมากที่สุด ในเมล็ดข้าว (ประมาณร้อยละ 80 ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนชั้นชั้นแอลิวโรน และส่วนที่เป็นสตาร์ชในเนื้อของเมล็ด

3. องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดพันธุ์ มีความสำคัญในด้านต่างๆ ได้แก่ เป็นแหล่งอาหารของมนุษย์ และสัตว์ เป็นแหล่งของเวชกรรม และยาต่างๆ เป็นแหล่งสะสมอาหาร เพื่อใช้ในการงอกและการเจริญเติบโตของต้นอ่อน (วันชัย, 2537) ปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดพันธุ์นั้นขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลัก คือ ปัจจัยทางพันธุกรรม ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ และปัจจัยทางสภาพแวดล้อม ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามอิทธิพลของสภาพแวดล้อมและการปฏิบัติดูแลรักษา องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ (วันชัย, 2537; อรอนงค์, 2550) ได้แก่

3.1 คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) เป็นสารอินทรีย์หลักที่พบในเมล็ดข้าว คาร์โบไฮเดรตที่พบในเมล็ดข้าวส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสตาร์ช (Starch) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

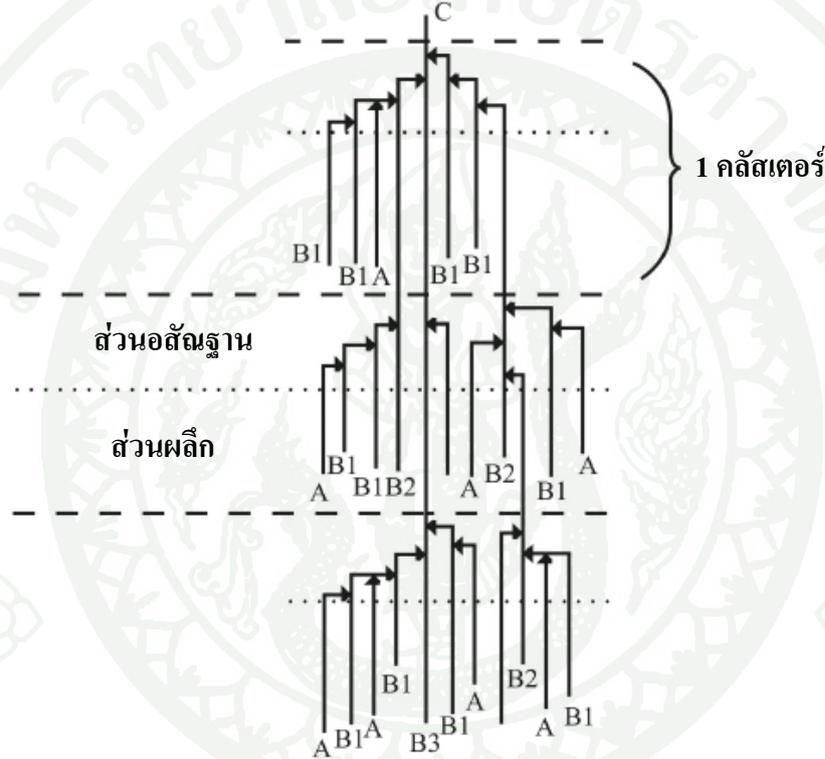
3.1.1 สตาร์ช (Starch) เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุด ในเนื้อเมล็ดของข้าว (ประมาณร้อยละ 90) โมเลกุลของสตาร์ชรวมตัวกันเม็ดสตาร์ช (Starch granule) มีขนาด 3-5

โมโครเมตร รูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมหลายเหลี่ยม รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนกลมหรือยาวรี เมล็ดข้าวจะเก็บสตาร์ชไว้ในรูปเนื้อเยื่อต่อการทำปฏิกิริยา (Inactive) จนกว่าจะถึงกระบวนการงอก โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ลักษณะ คือ แอมิโลส และแอมิโลเพกทิน ซึ่งโมเลกุลทั้ง 2 จะจัดเรียงตัวกันแน่นจนเป็นเม็ดสตาร์ช โดยมีโครงสร้างลักษณะเป็นรัศมีจากจุดกลางแบบกิ่งผลึก โดยบางส่วนจะอยู่ร่วมกับลิพิด (อรอนงค์, 2550)

3.1.1.1 แอมิโลส (Amylose) ในหนึ่งหน่วยโมเลกุลของแอมิโลสนี้ จะมี 10,000-100,000 หน่วยโมเลกุลย่อย ซึ่งแต่ละหน่วยโมเลกุลย่อยนี้ประกอบด้วยกลูโคส จำนวน 200-1,000 หน่วย เชื่อมต่อกันเป็นสายโดยพันธะแอลฟา 1, 4-กลูโคซิดิก (α -1,4 glucosidic bond) กลายเป็นหนึ่งหน่วยน้ำหนั โมเลกุล โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลสมีหลายรูปแบบ เช่น สายตรง สายพันเป็นเกลียว (Helix) เดี่ยวหรือคู่ มีลักษณะเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัวหรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Whistler and Daniel, 1984) แอมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของแอมิโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) และจากการที่สายแอมิโลสมักอยู่ในรูปเกลียว ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลของกลูโคส ส่วนที่เหลือจะอยู่บนผิวด้านนอกของเกลียว ทำให้ช่องกลางภายในเกลียวมีลักษณะเป็นพื้นที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) แอมิโลสจึงสามารถยึดเกาะกับสารพวกที่ไม่ชอบน้ำภายในเกลียวของแอมิโลสด้วยแรงวันเดอร์วาลส์ได้ (Godet *et al.*, 1993) เช่น เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิด (Amylose-lipid complex) หรือจับกับไอโอดีนเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีน้ำเงิน เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารประกอบอื่นๆ เช่น บิวทานอล กรดไขมัน สารลดแรงตึงผิว ฟีนอล และไฮโดรคาร์บอน สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายน้ำ โดยแอมิโลสจะเกลียวล้อมรอบสารเหล่านี้ โมเลกุลแอมิโลสสามารถถูกย่อยได้หมดด้วยเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลส (α -amylase) ตัวอย่างของแอมิโลสที่พบมากในเมล็ดข้าว คือ เมล็ดข้าวเจ้า

3.1.1.2 แอมิโลเพกทิน (Amylopectin) เป็น โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าแอมิโลสมาก เพราะมีถึง 50,000-1,000,000 หน่วยโมเลกุลย่อย และต่อกันเป็นรูปกิ่งก้านสาขา ไม่ได้เป็นสายตรงยาวแบบแอมิโลส ในหนึ่งหน่วยโมเลกุลย่อยนั้น ประกอบด้วยกลูโคส 20-25 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา 1, 4-กลูโคซิดิก และแอลฟา 1, 6-กลูโคซิดิก ในรูปที่เป็นกิ่ง ลักษณะ โครงสร้างแบบกิ่งของแอมิโลเพกทินประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ A-chain เป็นสายโซ่ที่เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายนี้ B-chain มีโครงสร้างแบบกิ่ง เชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า C-chain เป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ที่เป็นอิสระและถูกแทนที่เพียงจุดคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 (Primary hydroxyl group) ซึ่งในแอมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น เนื่องจากการเชื่อมต่อ A-chain, B-chain และ C-chain ภายในโมเลกุลของแอมิโลเพกทินด้วยพันธะแอลฟา 1, 6-กลูโคซิดิก ซึ่งมีสาย C เพียงหนึ่งสายต่อหนึ่งโมเลกุล ขนาดโมเลกุลของแอมิโลเพกทินมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ อยู่รวมตัวกันเป็นก้อนหรือที่เรียกว่า คลัสเตอร์ (Cluster) บริเวณที่มีการ

จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่า ส่วนผลึก (Crystalline region) และบริเวณที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า ส่วนอสัณฐาน (Amorphous region) โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน และคลัสเตอร์ของสายแอมิโลเพกทิน แสดงดังภาพที่ 2 โมเลกุลแอมิโลเพกทินสามารถถูกย่อยได้ประมาณร้อยละ 50 ด้วยเอนไซม์บีตา-แอมิเลส (β -amylase) ตัวอย่างของแอมิโลเพกทินที่พบมากในเมล็ดข้าว คือ เมล็ดข้าวเหนียว



ภาพที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกทิน และคลัสเตอร์ของสายแอมิโลเพกทิน

ที่มา: คัดแปลงจาก Donald (2004)

3.1.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ในเมล็ด อาจพบในเอนโดสเปิร์ม และใบเลี้ยงในรูปของอาหารที่เก็บสะสมไว้ได้

นอกจากคาร์โบไฮเดรตทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว อาจพบคาร์โบไฮเดรตในรูปอื่นๆ ได้อีก แต่จะพบในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย ได้แก่ มิวซิเลจ (Mucilages) เพกทิน (Pectin) น้ำตาลอื่นๆ เช่น สตาร์ชีโอส (Starchyose) ซูโครส (Sucrose) ราฟฟิโนส (Raffinose) เป็นต้น

3.2 ไขมัน (Lipid) เป็นสารเอสเทอร์ (ซึ่งหมายถึง สารที่มีโมเลกุลใหญ่ซับซ้อนไม่มีขั้ว ไม่ละลายน้ำ มวลโมเลกุลมาก ระเหยง่าย) ของกรดไขมัน (Fatty acid) หรือของกลีเซอรอล (Glycerol) ไขมันในเมล็ด พบได้ 2 รูปแบบ ได้แก่

3.2.1 ไตรกลีเซอไรด์ (Triglycerides) เป็นโมเลกุลของกลีเซอรอลหนึ่งโมเลกุลรวมกับกรดไขมันอีก 3 โมเลกุล ไตรกลีเซอไรด์ที่พบในเมล็ดนั้น อาจพบในรูปแบบต่อไปนี้ ได้แก่ ไขมัน (Fat) น้ำมัน (Oil) ไข (Wax) ฟอสโฟลิพิดส์ (Phospholipids) และแอลกอฮอล์ (Alcohol)

3.2.2 กรดไขมัน (Fatty acid) เป็นส่วนที่เล็กที่สุดของไขมัน แบ่งย่อยออกได้เป็น

3.2.2.1 กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) เช่น กรดโอเลอิก (Oleic acid) กรดลินอเลอิก (Linoleic acid) กรดลินolenic (Linolenic acid) เป็นต้น

3.2.2.2 กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) พบไม่มากนัก เช่น กรดพาลมิติก (Palmitic acid) เป็นต้น

ข้าวกล้องโดยทั่วไปมีปริมาณไขมันร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก ประเภทของไขมันในข้าวส่วนใหญ่นั้น คือ ไตรกลีเซอไรด์ รองลงมา คือ ฟอสโฟลิพิด โดยพบมากที่เยื่อหุ้มเมล็ด ชั้นแอลิวโรน และคัพพะ ไขมันส่วนใหญ่เป็นไขมันที่ไม่ได้เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (Nonstarch lipids) ส่วนไขมันที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (Starch lipids) มักพบในเอนโดสเปิร์ม โดยอยู่รวมเป็นกลุ่มไขมันที่มีรูปร่าง (Lipid bodies) หรือหยดกลม (Sperosomes) ไขมันมีความสัมพันธ์กับเม็ดสตาร์ช 3 ลักษณะ คือ ไขมันอยู่ชิดกันกับโปรตีน ซึ่งอยู่ที่ผิวของเม็ดสตาร์ชภายนอก หรืออาจอยู่รวมกับโครงสร้างเอมิโลเพกทินภายนอก เช่น สาย A หรือ B1 ลักษณะที่สองไขมันอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช โดยเกาะเกี่ยวกับสตาร์ช และลักษณะที่สามอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช แต่ไม่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช ไขมันเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อการเสื่อมเสียขณะเก็บรักษาเมล็ด รวมทั้งเมล็ดที่แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ (อรอนงค์, 2550; Juliano, 1972)

Heinemann *et al.* (2005) วิเคราะห์ปริมาณไขมันในข้าวอินดิกา 1 สายพันธุ์ใน 4 รูป คือ ข้าวกล้อง ข้าวสาร ข้าวหนึ่งกล้อง และข้าวสารหนึ่ง โดยมีค่าร้อยละ 2.65, 0.50, 2.69 และ 0.38 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ข้าวหนึ่งกล้อง และข้าวกล้องมีปริมาณไขมันสูงกว่าข้าวสารหนึ่ง และข้าวสาร แสดงให้เห็นว่าไขมันส่วนใหญ่อยู่บริเวณผิวด้านนอกของเมล็ดข้าว คือ เยื่อหุ้มเมล็ดชั้น แอลิวโรน เมื่อข้าวกล้องถูกขัดผิวเอาชั้นแอลิวโรนออกไปจึงเป็นผลทำให้ไขมันหลุดออกไปด้วย

3.3 โปรตีน (Protein) เป็นสารที่มีในโตรเจนเป็นส่วนประกอบในโมเลกุลเป็นจำนวนมาก โปรตีนที่มีในข้าวพบได้ตามส่วนต่างๆ ของเมล็ด โดยพบมากในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด และเนื้อเมล็ดด้านนอกซึ่งมีมากกว่าในใจกลางเมล็ด โมเลกุลของโปรตีนที่รวมตัวกันเป็นรูปร่างโปรตีน (Protein bodies) มี 3 รูปแบบ คือ แบบผลึก แบบรูปร่างกลมขนาดเล็ก และรูปร่างกลมขนาดใหญ่ ซึ่งโปรตีนที่กระจายตัวอยู่ทั่วไปในเนื้อเมล็ดเป็นโปรตีนรูปร่างกลมขนาดเล็ก ซึ่งแทรกอยู่ระหว่างเม็ดสตาร์ช อาจมีผลต่อการเกิดเจลลิตินซ์ของเม็ดสตาร์ชโดยทำให้การพองตัวของเม็ดสตาร์ชไม่เสถียรรูปร่างได้ง่าย โดยโครงสร้างของโปรตีนส่วนที่มีพันธะซัลไฟด์คู่ที่เกาะเกี่ยวกับเม็ดสตาร์ช จะขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ทำให้ความหนืดต่ำ (อรอนงค์, 2550) โปรตีนที่สะสมอยู่ในเมล็ดนั้น สะสมอยู่ในส่วนที่เรียกว่า โปรตีนที่มีรูปร่าง (Protein bodies) ซึ่งพบว่ามีอยู่ 4 ชนิด คือ

3.3.1 แอลบูมิน (Albumin) เป็นโปรตีนซึ่งละลายได้ในน้ำที่มีสภาพเป็นกลาง หรือกรดเล็กน้อย และสามารถทำให้แข็งตัวได้โดยความร้อน ตัวอย่างของโปรตีนชนิดนี้ในเมล็ดข้าว คือ ไลซีน (Lysine) โดยพบในเมล็ดข้าวคิดเป็นร้อยละ 2-5 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Juliano, 1985)

3.3.2 โกลบูลิน (Globulin) เป็นโปรตีนที่ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ แต่ละลายได้ในน้ำเกลือ ซึ่งละลายได้ง่ายยิ่งขึ้นในสารละลายที่เป็นส่วนผสมของกรด และน้ำเกลือเข้มข้น โกลบูลินพบในเมล็ดข้าวคิดเป็นร้อยละ 2-10 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Juliano, 1985)

3.3.3 กลูเทลิน (Glutelin) เป็นโปรตีนที่สามารถละลายได้ในน้ำ หรือน้ำเกลือ หรือในเอทิลแอลกอฮอล์ กลูเทลินที่พบในเมล็ดข้าว คือ ออริซานิน (Oryzanin) ซึ่งเป็นโปรตีนหลักที่พบในเมล็ดข้าว โดยคิดเป็นร้อยละ 75-90 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Juliano, 1985)

3.3.4 โพรลามิน (Prolamin) เป็นโปรตีนที่สามารถละลายได้ในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้นร้อยละ 70-90 ไม่สามารถละลายได้ในน้ำ แต่ก็สามารถละลายได้ในสารละลายของเกลือที่เกิดจากกรดหรือด่างในน้ำ โพรลามินพบในเมล็ดข้าวคิดเป็นร้อยละ 1-5 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด (Juliano, 1985)

Sujatha *et al.* (2004) วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในข้าว 2 พันธุ์ ได้แก่ Jaya และ Kayame ซึ่งเพาะปลูกในฤดูกาลที่แตกต่างกัน 3 ฤดู แล้วนำมาตรวจวัดปริมาณโปรตีนในรูปของข้าวกล้อง ข้าวสาร ข้าวหนึ่งกล้อง และข้าวสารหนึ่ง โดยพบว่า ข้าวทั้ง 2 พันธุ์มีช่วงของปริมาณโปรตีนสูงสุดในรูปของข้าวหนึ่งกล้อง (ร้อยละ 9.24-10.4 และ 6.94-7.68) รองลงมา คือ ข้าวกล้อง (ร้อยละ 8.43-9.46 และ 5.88-7.18) ข้าวสารหนึ่ง (ร้อยละ 7.75-8.71 และ 5.58-7.21) และข้าวสาร (ร้อยละ 6.71-7.33 และ 5.18-6.71) ตามลำดับ

แสดงให้เห็นว่า เมื่อข้าวกล้องถูกขัดผิวเอาชั้นแอลิวโรนซึ่งมีโปรตีนอยู่มากออกไป จึงเป็นผลทำให้ข้าวสารและข้าวสารนึ่งมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าข้าวกล้อง และข้าวนึ่งกล้อง

3.4 สารประกอบอื่นๆ พบในปริมาณที่ไม่มากนัก ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ ได้แก่ สารเร่งการเจริญเติบโตของพืช (Growth regulator) วิตามิน (Vitamin) รงควัตถุ (Pigment) แร่ธาตุต่างๆ (Minerals) เป็นต้น (วันชัย, 2537) ปริมาณเถ้าของข้าวกล้องแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ปริมาณแร่ธาตุในดินที่ปลูกข้าว และการให้น้ำในขณะเพาะปลูก เป็นต้น โดยทั่วไปข้าวกล้องมีปริมาณเถ้าร้อยละ 1.0-1.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบมากในบริเวณคัพภะและชั้นแอลิวโรน แร่ธาตุหลักที่พบในข้าวกล้อง ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ส่วนแร่ธาตุรองอื่นๆ ที่พบได้ในข้าวกล้อง ได้แก่ สังกะสี เหล็ก โซเดียม แมงกานีส ทองแดง เป็นต้น (อรอนงค์, 2550; Champagne, 2004)

Heinemann *et al.* (2005) วิเคราะห์ปริมาณเถ้าในข้าวอินดิกา 1 สายพันธุ์ใน 4 รูป คือ ข้าวกล้อง ข้าวสาร ข้าวนึ่งกล้อง และข้าวสารนึ่ง มีค่าร้อยละ 1.21, 0.47, 1.18 และ 0.55 ตามลำดับ โดยพบว่า ข้าวนึ่งกล้อง และข้าวกล้องมีปริมาณเถ้าใกล้เคียงกัน และมีค่าสูงกว่าข้าวสารนึ่ง และข้าวสาร อย่างไรก็ตาม ข้าวสารนึ่งมีร้อยละการสูญเสียเถ้าไปในระหว่างกระบวนการขัดสีต่ำกว่าข้าวสาร เนื่องจากกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งช่วยรักษาแร่ธาตุที่มีในข้าวหนึ่งไม่ให้สูญเสียไปในระหว่างการขัดสีได้

4. คุณภาพในการแปรรูป

คุณภาพในการแปรรูป หมายถึง คุณภาพของข้าวที่เหมาะสมในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ข้าว มีความเกี่ยวข้องกับคุณภาพการหุงต้มและคุณภาพการรับประทาน โดยใช้ค่าวัดนั้นมาประเมินคุณภาพของข้าวในการแปรรูปได้ หรือใช้วิธีการทางอ้อมในการประเมินคุณภาพของข้าวโดยใช้วิธีการตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวและแป้งข้าว เช่น องค์ประกอบทางเคมี อุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน ลักษณะความหนืด เป็นต้น (อรอนงค์, 2550)

4.1 การเกิดเจลลิตินในเซชัน (Gelatinization)

การที่โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีการจัดเรียงตัวเป็นแบบกึ่งผลึก เนื่องจากการยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในสายโพลีเมอร์ จึงทำให้เม็ดสตาร์ชไม่สามารถละลายในน้ำได้ แต่เมื่อใส่สตาร์ชลงในน้ำ สตาร์ชจะดูดซึมน้ำได้บางส่วน และถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ปริมาณน้ำที่สตาร์ชสามารถดูดซึมน้ำได้จะเพิ่มขึ้น การเกิดเจลลิตินในเซชันเป็นการทำลายโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ช โดยการให้ความร้อนแก่เม็ดสตาร์ชในสภาวะที่มีน้ำอย่างเพียงพอ เม็ดสตาร์ชในร่างแหไมเซลล์เกิดการพองตัวเนื่องจากดูดซึมน้ำเข้าไป น้ำจะเข้าไปในส่วนอสัณฐานได้ก่อน ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างสาย

โมเลกุลในส่วนออสซิลเลชันอ่อนแอลง การพองตัวที่เกิดขึ้นนี้ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดความเครียด แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโมเลกุลอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย น้ำสามารถเข้าไปในส่วนของโครงสร้างผลึกทำให้เม็ดสตาร์ชดูดน้ำได้มากขึ้นพร้อมกับการพองตัวที่เกิดขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งโครงสร้างผลึกสลายไป การพองตัวที่เกิดขึ้นเป็นปรากฏการณ์ที่ผันกลับไม่ได้ พร้อมกับมีสายโมเลกุลแอมิโลสที่กระจายออกมา (Whistler and BeMiller, 1999) สามารถอธิบายการเกิดเจลาทีนเซชันของเม็ดสตาร์ชได้ 3 ระยะ (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) คือ ระยะแรก เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัด และเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเลกุลยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของส่วนผสมไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดสตาร์ชยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิกระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ ระยะที่สอง เม็ดสตาร์ชพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชอ่อนแอลงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เม็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและรูปร่างแบบที่เกิดการบิกระนาบแสงโพลาไรซ์ไม่ได้ ความหนืดของส่วนผสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แอมิโลสละลายออกมา ระยะที่สาม เมื่อให้ความร้อนต่อไปอีกรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจะไม่แน่นอน การละลายของสตาร์ชเพิ่มขึ้น เมื่อทำให้เย็นลงจะเกิดเป็นเจล การเกิดเจลาทีนเซชันของสตาร์ชทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยโดยเอนไซม์ต่างๆ ได้ดี

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลาทีนเซชันมีหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ความเป็นผลึกของสตาร์ช ปริมาณโปรตีนและไขมัน เป็นต้น การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิดจะยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชในระหว่างการให้ความร้อน และลดความสามารถของเม็ดสตาร์ชในการจับกับน้ำ (Tester and Karkalas, 1996)

4.2 ความหนืด (Viscosity)

การเปลี่ยนแปลงความหนืด (Viscosity) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชกับน้ำที่มีปริมาณมากเพียงพอ ในสถานะที่มีการให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ความร้อนทำให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชคลายตัวลง โครงสร้างผลึกถูกทำลาย โมเลกุลน้ำเข้าไปเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแอมิโลส และแอมิโลเพกทินด้วยพันธะไฮโดรเจน เป็นสาเหตุให้เม็ดสตาร์ชพองตัว เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำแล้วพองตัวขยายใหญ่ขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่รอบๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยาก ทำให้เกิดความหนืดขึ้น (Smith, 1982; Wurzburg, 1986; Lai and Kokini, 1991; Eliasson and Gudmundsson, 1996) เมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาทีนเซชันแล้วจะพองตัวมีขนาดเพิ่มขึ้นกว่าเดิมหลายเท่าตัว (Singh *et al.*, 2003) โมเลกุลของแอมิโลสที่ละลายได้บางส่วนหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช และเมื่อให้ความร้อนต่อไปเม็ดสตาร์ชที่พองตัวเต็มที่แล้วจะแตกออกในที่สุด ในช่วงนี้ความหนืดของส่วนผสมจะลดลง ซึ่งการลดลงของความหนืดมี

ความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงหรือเปราะบางของเม็ดสตาร์ชที่เกิดการพองตัว (Han and Hamaker, 2001) และเมื่อค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงความหนืดของส่วนผสมจะเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการยึดเกาะกันของเม็ดสตาร์ชที่พองตัว ส่วนที่แตกของเม็ดสตาร์ช และ โมเลกุลของสตาร์ชที่แขวนลอยหรือกระจายอยู่ในส่วนผสม (Singh *et al.*, 2003) เรียกว่า การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation)

4.3 การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation)

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจลาทิไนเซชัน (Gelatinization temperature) แล้วให้ความร้อนต่อไป เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวเต็มที่ และแตกออกในที่สุด ทำให้ความหนืดลดลง จากนั้นเมื่ออุณหภูมิในระบบลดต่ำลง โมเลกุลแอมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหที่มีโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มี การดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว การเกิดรีโทรกราเดชันเป็นการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชที่เกิดการเจลาทิไนเซชันแล้ว คือ ในส่วนของอสังฐานจะมีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบมากขึ้นหรือจัดเรียงกันเป็นผลึก รีโทรกราเดชันของสตาร์ชที่เกิดเจลาทิไนซ์แล้ว มีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดเรียงตัวใหม่อีกครั้งของทั้งแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน ซึ่งแอมิโลสมีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันได้เร็วกว่าแอมิโลเพกทินมาก ซึ่งแบ่งข้าวจากจากข้าวพันธุ์ที่มีเมล็ดขนาดกลาง และมีปริมาณแอมิโลสต่ำ จะมีอัตราการเกิดรีโทรกราเดชันต่ำกว่าข้าวพันธุ์ที่มีเมล็ดขนาดยาว (Fan and Marks, 1998)

5. ข้าวหนึ่ง (Parboiled rice)

ข้าวหนึ่ง เป็นสินค้าส่งออกประเภทข้าวของไทย โดยเฉพาะข้าวหนึ่งคุณภาพดี ประเทศไทยส่งข้าวหนึ่งคุณภาพดีสู่ต่างประเทศปีละประมาณ 2 แสนตัน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 1,300 ล้านบาทประเทศที่สั่งซื้อข้าวหนึ่งจากไทย ได้แก่ ประเทศต่างๆ ในแถบแอฟริกา และตะวันออกกลาง เช่น โมซัมบิก แคนเมอรูน โชมเลีย ไนจีเรีย เบนิน ซาอุดีอาระเบีย เยเมน โอมาน คูเวต บาห์เรน อิสราเอล และเลบานอน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอีกหลายๆ ประเทศในทวีปยุโรป และอเมริกา เช่น อิตาลี เยอรมนี ฝรั่งเศส และบางประเทศในทวีปเอเชีย เช่น บังกลาเทศ และศรีลังกา เป็นต้น (กรมวิชาการเกษตร, 2550) ข้าวหนึ่งเป็นข้าวที่มีปริมาณการผลิตเป็นหนึ่งในสี่ของปริมาณข้าวทั้งหมดที่ผลิตได้ทั่วโลก (Saifullah *et al.*, 2004) กรรมวิธีการผลิตข้าวหนึ่งมีจุดประสงค์เพื่อลดปริมาณข้าวหักระหว่างการสี ลดการสูญเสียสารอาหารบางส่วนของเมล็ดข้าวระหว่างการสี เพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของข้าวในระหว่างขั้นตอนของการผลิตข้าวหนึ่ง ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของข้าว และเพิ่มคุณค่าการใช้ประโยชน์จากข้าวเปลือกคุณภาพการสีต่ำ (Bhattacharya, 1985; Champagne, 2004)

5.1 วิธีการผลิตข้าวนึ่ง

วิธีการผลิตข้าวนึ่งได้มีการพัฒนาเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น วิธีล่าสุดของการพัฒนาก่อนถึงการใช้เครื่องจักรกล คือ Parboiled process ซึ่งประกอบด้วย 2 วิธี คือ Cold soaking method หรือ Single boiling method และวิธีที่ 2 คือ Double boiling method โดยวิธี Single boiling ทำโดยแช่ข้าวในถังน้ำเย็นธรรมดาเป็นถังซีเมนต์ขนาดใหญ่ มีการหมุนเวียนของน้ำตลอดเวลาเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง ตามด้วยนำข้าวเปลือกที่แช่แล้วไปต้มอุณหภูมิน้ำเดือด 2 ชั่วโมง ขณะต้มมีการคนตลอดเวลาหรือทุกๆ 20 นาที แล้วนำไปทำให้แห้งโดยการตากแดด ส่วนวิธี Double boiling ได้พัฒนาจากวิธีแรก โดยแช่ข้าวเปลือกในน้ำอุ่น (60 °ซ) เพื่อให้แบคทีเรีย และจุลินทรีย์อื่นๆ ตาย จากนั้นลดอุณหภูมิเหลือ 30-40 °ซ เพื่อให้สปอร์ของจุลินทรีย์ต่างๆ เกิดขึ้นมาอีก แล้วจึงนำไปต้มมาเชื้อจุลินทรีย์อีกครั้ง ตามด้วยการทำแห้ง วิธีนี้ช่วยลดกลิ่นไม่พึงประสงค์ได้ ซึ่งทำให้สีข้าวนึ่งที่ได้มีสีเหลืองแดงแทนสีน้ำตาลคล้ำ (กรมวิชาการเกษตร, 2550)

น้ำฝน และอรอนงค์ (2546) ทดลองหาสภาวะการผลิตข้าวเปลือกนึ่งระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อเปรียบเทียบกับข้าวนึ่งทางการค้า โดยใช้ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิต คือ แช่ข้าวเปลือกที่ 70 °ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำมานึ่งด้วยไอน้ำที่ความดันสูงอุณหภูมิ 121 °ซ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำมาทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 120 °ซ จนข้าวเปลือกนึ่งมีความชื้นร้อยละ 16 แล้วพักข้าวไว้ 24 ชั่วโมง แล้วนำข้าวเปลือกนึ่งมาทำแห้งอีกครั้งจนมีความชื้นเหลือร้อยละ 14 จึงพักข้าวเปลือกไว้เป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำไปขัดสีเป็นข้าวสารนึ่งระดับห้องปฏิบัติการ

ข้าวนึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวแปรรูปชนิดหนึ่งที่ได้จากการนำข้าวเปลือกมาผ่านกระบวนการที่เรียกว่า กระบวนการผลิตข้าวเปลือกนึ่ง จากนั้นนำข้าวเปลือกที่ผ่านกระบวนการนี้มากะเทาะเปลือก และขัดสีเป็นข้าวสาร เรียกว่า ข้าวสารนึ่ง หรือข้าวนึ่ง เกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเกรดทางการค้าของเมล็ดข้าวนึ่ง คือ สีของเมล็ดข้าว โดยเมล็ดข้าวนึ่งที่ดีต้องมีสีเหลืองอ่อนที่สุด (Luh and Mickus, 1991) ซึ่งขั้นตอนที่มีผลต่อคุณภาพของข้าวนึ่ง คือ ขั้นตอนการผลิตข้าวนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยกรรมวิธีพื้นฐาน 3 ขั้นตอนที่ต้องต่อเนื่องกัน (น้ำฝน, 2548) ดังนี้

5.1.1 การแช่ข้าวเปลือก (Soaking หรือ Steeping)

การแช่ข้าวเปลือก เป็นผลทำให้น้ำแช่ซึมผ่านผิวเปลือกแข็งเข้าสู่เนื้อในเมล็ด โดยเข้าแทนที่รูอากาศภายในเมล็ดข้าว เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำโดยสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างแอมิโลส และแอมิโลเพกทินของสตาร์ช และเกิดการพองตัวขึ้น หากแช่น้ำเย็น (อุณหภูมิห้อง) เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำและพองตัวได้ในระดับหนึ่ง ใช้เวลาแช่ 2-3 วัน ถ้าใช้น้ำที่อุณหภูมิสูงในการแช่ข้าวทำให้ระยะเวลาการแช่ข้าวลดลง เนื่องจากน้ำที่อุณหภูมิสูงช่วยเร่งอัตราการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าว โดยช่วย

ส่งผ่านความร้อนจากผิวเปลือกเข้าสู่ใจกลางเนื้อในเมล็ด และความร้อนของน้ำไปยับยั้งการเกิดพันธะไฮโดรเจนของเม็ดสตาร์ช แต่น้ำที่ใช้แช่ต้องมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชในเมล็ดข้าวเกิดเจลาทิไนซ์ เนื่องจากถ้าใช้น้ำที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนซ์ เป็นผลให้เปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวปริแตก ปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้สารต่างๆ ที่อยู่ในเมล็ดข้าวละลายลงสู่ น้ำที่แช่ โดยทั่วไปอุณหภูมิ น้ำที่ใช้แช่ข้าวอยู่ที่ประมาณ 60-70 °C ร่วมกับการหมุนเวียนน้ำ เพื่อเติมอากาศในการป้องกันไม่ให้เกิดสีและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ ซึ่งเร่งการดูดซึมน้ำทำให้ข้าวเปลือกมีความชื้นประมาณร้อยละ 30-40 และทำให้เมล็ดข้าวสามารถเจลาทิไนซ์ได้ในขณะนี้ (กรมวิชาการเกษตร, 2550; Luh and Mickus, 1991; Islam *et al.*, 2004) นอกจากนี้ อุณหภูมิของน้ำ ระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือก และคุณสมบัติในด้านความเป็นกรด-เบส ยังมีผลต่อสี กลิ่น และรสชาติของข้าวหนึ่ง โดยข้าวหนึ่งมีสีเข้มขึ้นเมื่อแช่ข้าวในน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนซ์ของสตาร์ช ซึ่งไม่ควรเกิน 70 °C และระยะเวลาการแช่อย่างน้อย 3 ชั่วโมง แต่ไม่ควรเกิน 5 ชั่วโมง โดยพบว่าสีของข้าวหนึ่งมีค่าเข้มสุดเมื่อแช่ข้าวเปลือกที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 5 ชั่วโมง (อรอนงค์, 2550; Luh and Mickus, 1991) ส่วนความเป็นกรด-เบสของน้ำที่ใช้แช่ควรประมาณ 5 ซึ่งทำให้ข้าวหนึ่งมีสีอ่อน แต่ถ้าความเป็นกรด-เบส เพิ่มขึ้นทำให้ได้ข้าวหนึ่งสีเข้มขึ้น (อรอนงค์, 2550) นอกจากนี้ อุณหภูมิที่ใช้ และระยะเวลาที่แช่นาน มีผลต่อการย่อยสลายสารอาหารในเมล็ดข้าว เช่น ที่อุณหภูมิ 60 °C เอนไซม์เอมิเลสสามารถย่อยสตาร์ชทำให้ได้น้ำตาลมอลโทส และกลูโคส เพิ่มขึ้นได้ และน้ำช่วยสลายโปรตีนชนิดแอลบีวามินไปเป็นกรดเอมิโน ซึ่งน้ำตาล และกรดเอมิโนนี้เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลเนื่องจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด เมื่อได้รับความร้อนระหว่างการทำแห้ง ส่วนกลิ่น และรสชาติของข้าวหนึ่งมีผลจากอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือกเช่นกัน โดยกรดเอมิโนที่ได้จากการสลายตัวของโปรตีนถ้ามีธาตุซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบเมื่อได้รับความร้อนเกิดสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารซัลไฟด์อินทรีย์ ซึ่งสามารถรวมตัวกับสารประเภทแอลกอฮอล์ที่ได้จากการสลายตัวของลิกนินในส่วนของเปลือกกลายเป็นสารประกอบที่ให้กลิ่นรสเฉพาะในข้าวหนึ่ง (อรอนงค์, 2550)

5.1.2 การให้ความร้อน หรือการนึ่ง (Heat treatment หรือ Steaming)

การนึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สตาร์ชในข้าวเปลือกเจลาทิไนซ์ด้วยไอน้ำร้อนซึ่งการใช้ไอน้ำร้อน เป็นวิธีการให้ความร้อนที่ดีกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องจากไม่ต้องเอาความชื้นออกจากข้าวที่แช่ และยังเพิ่มความชื้นด้วยการควบแน่นของไอน้ำนั้นซึ่งเพิ่มปริมาณความชื้นทั้งหมดในเมล็ดความร้อนอาจเป็นระดับความดันบรรยากาศหรือภายใต้ความดันบรรยากาศ ส่วนใหญ่อุณหภูมิไอน้ำร้อนของระบบมักสูงกว่าอุณหภูมิเจลาทิไนซ์ ซึ่งต้องควบคุมระยะเวลา และอุณหภูมิในการให้ความร้อนเพียงพอทำให้สตาร์ชเจลาทิไนซ์อย่างสมบูรณ์ ถ้าสตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์ที่ไม่สมบูรณ์ ลักษณะข้าวสารหนึ่งที่ให้มีสีขาวขุ่นที่ใจกลางของเมล็ดข้าวหนึ่ง และเมื่อนำมาหุงให้สุกใช้เวลานาน (น้ำฝน, 2548) ข้าวหนึ่งที่สมบูรณ์ (Fully parboiled rice) หมายถึง ข้าวหนึ่งที่สตาร์ชภายในเนื้อในเมล็ดเกิดการเจลาทิไนซ์สมบูรณ์ โดยเฉพาะใจกลาง

เมล็ดข้าว และข้าวึ่งบางส่วน (Partially parboiled rice) หมายถึง ข้าวึ่งที่สตาร์ชบริเวณผิวนอกของเนื้อเมล็ดเกิดการเจลาทิไนซ์ แต่สตาร์ชส่วนใจกลางเมล็ดยังไม่เจลาทิไนซ์ซึ่งทำให้มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น (อรอนงค์, 2550)

ผลของการนึ่งช่วยเพิ่มปริมาณผลผลิตหลังการขัดสี เนื่องจากสตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์ ซึ่งสตาร์ชที่เจลาทิไนซ์นี้กระจายตัวและมีโปรตีนแทรกตัวอยู่เกาะกันแน่น และแทนที่ช่องว่างรอบๆ ในเมล็ดข้าว เป็นผลให้เกิดการแยกจากกันน้อยลง นอกจากนี้สารอาหารที่ละลายน้ำได้ เช่น วิตามิน เกลือแร่ น้ำตาล ริคิวิซ์ รวมทั้งเมล็ดสีจากส่วนเปลือก และเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นนอกซึมเข้าสู่เนื้อในเมล็ดเพิ่มขึ้น และความร้อนจากขั้นตอนการนึ่งนี้ยังเป็นผลทำให้ รา สปอร์ ไข่แมลงและตัวอ่อน ถูกทำลาย ถือเป็น การสเทอร์ริไลซ์ข้าวเปลือกทางหนึ่งด้วย (Bhattacharya, 1985, 1996) ส่วนไขมันซึ่งไม่สามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้เหมือนวิตามิน และเกลือแร่ที่ละลายน้ำ ไขมันจึงแยกออกจากเมล็ดไปสู่เยื่อหุ้มเมล็ดเนื่องจากความร้อนจากการนึ่งทำให้โครงสร้างสเฟียโร โซมถูกทำลายเป็นผลให้รำข้าวมีปริมาณไขมันสูง เมื่อสิ้นสุดการเจลาทิไนซ์ข้าวเปลือกมีความชื้นประมาณร้อยละ 45-50 จากนั้นนำไปทำให้แห้ง (Bhattacharya, 1985)

ลักษณะคุณภาพของข้าวึ่งที่มีผลจากกระบวนการนึ่งด้วยไอน้ำ คือ สี ปริมาตรของเมล็ด และส่วนของสตาร์ชที่ละลายได้ กล่าวคือ เมื่อข้าวเปลือกผ่านการแช่น้ำและได้รับความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และกายภาพที่มีต่อสารอาหารที่มีอยู่ในข้าวเปลือก เช่น สีนํ้าตาลจากเปลือกหุ้มแข็งละลายในน้ำ และซึมเข้าสู่เนื้อในเมล็ดจากความร้อน และความดันของไอน้ำ นอกจากนี้สตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์แล้วเย็นลง และทำให้แห้งจึงเกิดการจัดเรียงโมเลกุลใหม่ น้ำตาลริคิวิซ์ที่เกิดจากเอนไซม์ย่อยสลายสตาร์ชในขั้นตอนการแช่ ทำปฏิกิริยากับกรดแอมิโนในกระบวนการเกิดสีน้ำตาลแบบเมลลาร์ด และเพิ่มสีน้ำตาลเข้มขึ้นเป็นลำดับเมื่อเพิ่มอุณหภูมิไอน้ำร้อนจาก 100 ถึง 120 °ซ และส่วนของสตาร์ชที่ละลายได้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของไอน้ำเพิ่มขึ้นจาก 65 ถึง 135 °ซ (อรอนงค์, 2550) กระบวนการนึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเมล็ดข้าว ซึ่งปรากฏมีในงานวิจัยหลายงาน ดังนี้

Bhattacharya (1996) ตรวจวัดค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ของข้าวสารนึ่งสายพันธุ์ IR 20 ที่ได้จากการนำข้าวเปลือกแช่น้ำที่อุณหภูมิ 70 °ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนนำไปให้ความร้อนที่ความดันระดับต่างๆ ในช่วง 101.3-303.9 kPa เป็นเวลา 0-60 นาที ปรากฏว่า ข้าวสารนึ่งมีค่าความสว่าง (L^* ; 82.3-94.4) ลดลงจากข้าวสารปกติ (95.0) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของข้าวสารนึ่ง คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ข้าวที่เพิ่มขึ้น ส่วนความดันไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างของข้าวสารนึ่ง การเปลี่ยนแปลงค่าสี b^* พบว่า ข้าวสารนึ่ง (5.6-12.8) มีค่าเพิ่มขึ้นจากข้าวสารปกติ (5.4) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า b^* คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน และความดันที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* พบว่า ข้าวสารนึ่ง (-0.2) มีค่า a^* เพิ่มขึ้นจากข้าวสารปกติ (-1.4) เมื่อใช้ความดันระดับสูง แต่ระยะเวลาที่ใช้ในการนึ่งข้าวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี a^*

Lamberts *et al.* (2006) ตรวจสอบค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ของข้าวหนึ่งกล้องพันธุ์ Puntal หลังจากนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการหนึ่งที่ใช้ระดับการให้ความร้อนแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ต่ำ กลาง และสูง ปรากฏว่า ข้าวกล้องปกติ (85.6) มีแนวโน้มของค่าความสว่าง (L^*) ลดลงตามระดับการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น (78.9, 79.1 และ 77.1 ตามลำดับ) ส่วนค่า a^* และ b^* ของข้าวกล้องปกติ (0.9 และ 12.4 ตามลำดับ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น (ค่า a^* ; 2.4, 2.6 และ 3.1 กับค่า b^* ; 16.5, 18.1 และ 19.7) เช่นเดียวกัน

Lamberts *et al.* (2008) ตรวจสอบค่าสี (L^* , a^* และ b^*) ของข้าวกล้อง 5 สายพันธุ์ คือ Puntal, Cocodrie, XL8, Jacinto และ Red rice หลังจากนำไปผ่านกระบวนการหนึ่งที่ใช้ระดับการให้ความร้อนแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ ต่ำ กลาง และสูง ปรากฏว่า ข้าวกล้องทุกสายพันธุ์ มีแนวโน้มของค่าความสว่าง (L^*) ลดลงตามระดับการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า a^* และ b^* ของข้าวกล้องทุกสายพันธุ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ยกเว้นในข้าวพันธุ์ Red rice ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อใช้ระดับการให้ความร้อนที่สูงขึ้น

5.1.3 การทำแห้ง (Drying)

หลังจากนึ่งแล้ว นำข้าวเปลือกไปทำให้แห้งซึ่งอาจตากแดดธรรมดา หรือผ่านเครื่องอบแห้ง การทำแห้งมีจุดประสงค์เพื่อลดความชื้นข้าวเปลือกให้เหลือร้อยละ 12-14 ให้เหมาะสมต่อการเก็บรักษา และให้ได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ดหลังการสีมากที่สุด ข้าวที่ผ่านการนึ่งแล้วมีความชื้นสูงประมาณร้อยละ 45-50 และเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวแตกต่างเพราะในเนื้อเมล็ดข้าวเกิดการเจลาไทไนซ์ ทำให้ลักษณะเนื้อแน่น เกาะตัวกัน ต้องใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 100°C ในการทำแห้งระยะแรกจนข้าวเปลือกหนึ่งมีความชื้นประมาณร้อยละ 16 ดังนั้นจึงต้องระวังไม่ให้ข้าวสารหนึ่งเกิดการแตกร้าว (Luh and Mickus, 1991) โดยควรหยุดพักการให้ความร้อนประมาณ 2-4 ชั่วโมงเพื่อทำให้เกิดการปรับสภาพของความชื้นภายในเมล็ดของข้าวเปลือกหนึ่ง (Tempering) เมล็ดข้าวที่ทำแห้งมากเกินไปเมื่อนำไปหุงสุก รูปร่างของเมล็ดข้าวสุกบานแตกหรือหักมีรอยแตกทั้งแนวขวางและแนวยาว เมล็ดข้าวหักเป็นชิ้นเล็กๆ (Noomhom, 2001)

น้ำฝน (2548) พบว่า สภาพการแช่ การนึ่ง และการทำแห้งที่เหมาะสมต่อการผลิตข้าวเปลือกหนึ่งในข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 คือ แช่ข้าวเปลือกที่ 70°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (ความชื้นร้อยละ 37) แล้วนำมาหนึ่งที่ 120°C เป็นเวลา 8 และ 10 นาที นำไปอบแห้งจนได้ความชื้นร้อยละ 14 แล้วพักข้าวหนึ่งไว้เป็นเวลา 7 วัน ก่อนขัดสี ทำให้อาหารหนึ่งที่ได้มีร้อยละข้าวเต็มเมล็ดสูง และสีใกล้เคียงกับข้าวหนึ่งทางการค้า โดยสีของข้าวหนึ่งที่ผลิตได้จากทั้ง 2 สภาพ มีความเข้มมากกว่าข้าวหนึ่งทางการค้า แต่ยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

5.2 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากกรรมวิธีการผลิตข้าวหนึ่ง (กรมวิชาการเกษตร, 2550)

5.2.1 เปลือกเมล็ดปริเนื่องจากข้าวกล้องขยายตัว

5.2.2 การแช่ข้าวเปลือกในน้ำเย็นหลายๆ วัน ทำให้เกิดการหมัก (Fermentation) ส่งผลให้ข้าวหนึ่งมีกลิ่นเหม็น สามารถแก้ไขโดยแช่ข้าวเปลือกในน้ำอุ่นหรือน้ำร้อนแทนน้ำเย็น

5.2.3 ขณะแช่ข้าวเปลือก ความดันในน้ำสูงกว่าในเมล็ดข้าวทำให้แร่ธาตุและสารอาหารต่างๆ ซึ่งอยู่ในเนื้อเยื่อชั้นนอกๆ ของเมล็ดซึมเข้าไปในส่วนของเนื้อข้าว ทำให้ข้าวหนึ่งมีคุณค่าอาหารเพิ่มขึ้น

Sujatha *et al.* (2004) วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในข้าว 2 พันธุ์ ได้แก่ Jaya และ Kayame ซึ่งได้รับการเพาะปลูกในฤดูกาลที่แตกต่างกัน 3 ฤดู แล้วนำมาตรวจวัดปริมาณโปรตีนในรูปของข้าวกล้อง ข้าวสาร ข้าวหนึ่งกล้อง และข้าวสารหนึ่ง โดยพบว่า ข้าวทั้ง 2 พันธุ์มีช่วงของปริมาณโปรตีนสูงสุดในรูปของข้าวหนึ่งกล้อง (ร้อยละ 9.24-10.4 และ 6.94-7.68) รองลงมา คือ ข้าวกล้อง (ร้อยละ 8.43-9.46 และ 5.88-7.18) ข้าวสารหนึ่ง (ร้อยละ 7.75-8.71 และ 5.58-7.21) และข้าวสาร (ร้อยละ 6.71-7.33 และ 5.18-6.71) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า เมื่อข้าวกล้องถูกขัดผิวชั้นเอนโดสเปิร์มซึ่งมีโปรตีนอยู่มากออกไป จึงเป็นผลทำให้ข้าวสาร และข้าวสารหนึ่งมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าข้าวกล้อง และข้าวหนึ่งกล้อง

5.2.4 ในขั้นตอนหนึ่ง เม็ดสตาร์ชที่สุกเป็นกาวประสานเชื่อมรอยแตกร้าวภายในเมล็ดให้หายไป พร้อมทั้งเม็ดสตาร์ชขยายตัว จับเป็นเนื้อเดียวกันทำให้ช่องว่างภายในเมล็ดข้าวสารที่มองเห็นเป็นลักษณะท้องไขหายไปด้วย ดังนั้น ข้าวหนึ่งเมื่อทำให้แห้ง แล้วนำไปสีจึงได้ปริมาณข้าวเต็มเมล็ด และต้นข้าวสูง ข้าวหักน้อย ข้าวสารใสไม่เป็นท้องไข

5.2.5 ข้าวเปลือกเมื่อแช่น้ำ แร่ธาตุและสารอาหารต่าง ๆ เช่น น้ำตาลอิสระ (Free sugar) และกรดแอมิโน (Amino acid) ซึมเข้าไปส่วนที่เป็นสตาร์ช เมื่อนำไปนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารเหล่านี้เรียกว่า ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดเมลลาร์ด ทำให้ข้าวสารมีสีน้ำตาลอ่อนหรือคล้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการแช่ และนึ่ง

การเปลี่ยนแปลงอีกอย่างหนึ่ง คือ การเกิดริโทเกรเดชันของข้าวหนึ่ง ซึ่งเกิดเมื่อเก็บรักษาข้าวไว้นานๆ หรือ เกิดในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตข้าวเปลือกหนึ่ง ซึ่งส่งผลต่อความแข็ง คุณภาพการขัดสี อัตราเร็วการหุงสุก การละลายของสตาร์ช ความหนืด เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้เกี่ยวข้องกับการรวมตัวกันใหม่ของสตาร์ช (Starch - reassociation) ซึ่งจากการตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ (X-ray diffraction) แสดงถึงมีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและลิพิด (Amylose-

lipid complex) ในข้าวสารนึ่ง (Ramesh *et al.*, 2000) โดยสภาวะที่ใช้ในการผลิตที่แตกต่างกันมีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและลิพิดของข้าวสารนึ่ง โดยรูปแบบของสารประกอบเชิงซ้อนที่พบในสตาร์ชข้าวสารนึ่งมี 5 แบบ (Ramesh *et al.*, 2000) คือ

1. สตาร์ชธรรมชาติที่หลงเหลือ (Residual unmodified starch) หรือเป็นข้าวที่นึ่งสุกเพียงบางส่วน (Partially parboiled rice) มีอุณหภูมิการหลอมของผลึก (Crystal melting temperature ; Tm) เท่ากับ 75 °ซ และให้ลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ A
2. เม็ดสตาร์ชอ่อนตัว (Annealed starch granule) เกิดขึ้นเนื่องจากการเจลาติไนซ์ด้วยความร้อน ทำให้สตาร์ชเกิดการอบผานเนื้อ (Annealed) และมีอุณหภูมิการหลอมของผลึกสูงเท่ากับ 85 °ซ และให้ลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ A
3. ผลึกใหม่ของแอมิโลเพกทิน (Recrystallized หรือ Retrograded amylopectin) มีอุณหภูมิการหลอมของผลึกเท่ากับ 50 °ซ และให้ลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ B
4. สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและลิพิด แบบที่ 1 (Amylose-lipid inclusion complex type I) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างแบบโซ่เกลียวที่กระจายอย่างสุ่ม และพบสารประกอบแบบที่ 1 นี้เพียงเล็กน้อย มีอุณหภูมิการหลอมของผลึกต่ำกว่า 100 °ซ ให้ลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ V
5. สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและลิพิด แบบที่ 2 (Amylose-lipid inclusion complex type II) เป็นสารประกอบที่อัดตัวกันภายในโครงสร้างผลึก มีอุณหภูมิการหลอมของผลึกมากกว่า 100 °ซ ให้ลักษณะรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ V

กระบวนการที่ใช้น้ำร่วมกับความร้อน (Hydrothermal treatment) เช่น กระบวนการผลิตข้าวนึ่ง ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและลิพิด (Amylose-lipid complex) เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการให้ความร้อนของกระบวนการนึ่งข้าว (Priestley, 1976) เนื่องจากกระบวนการนึ่งข้าวเป็นสภาวะที่ประกอบด้วยความร้อนและน้ำจึงไปทำลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกทินในสตาร์ชข้าว โดยมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ชข้าว และสภาวะที่ใช้ในการนึ่งข้าวเป็นปัจจัยที่ใช้บังคับ และระดับการเกิดสารประกอบนี้ (Biliaderis *et al.*, 1993) หากสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิตแตกต่างกัน จะมีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและลิพิดที่ต่างกัน สารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิพิดของข้าวสารนึ่งแสดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ V ซึ่งแตกต่างจากข้าวสารธรรมชาติที่แสดงแบบอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แบบ A และเกิดขึ้นทั้ง 2 แบบ คือ

สารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิพิด แบบที่ 1 และ 2 โดยพบว่า สารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิพิด แบบที่ 1 มักเกิดในข้าวที่มีอุณหภูมิการเกิดเจลลาคีไนซ์ต่ำ ส่วนข้าวที่มีค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาคีไนซ์ปานกลาง และสูง แสดงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแอมิโลสและลิพิด แบบที่ 2 เป็นผลให้ข้าวสารนึ่งทุกพันธุ์ที่ผ่านการนึ่งที่อุณหภูมิเกิน 100 °ซ แสดงลักษณะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสและลิพิด แบบที่ 2 (Biliaderis *et al.*, 1993)

กระบวนการผลิตข้าวหนึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้าง และสมบัติของเมล็ดข้าวหลายประการ ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านความหนืดของข้าว โดยพบว่า กระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง ทำให้ข้าวมีความหนืดลดลง ซึ่งเป็นผลจากเมล็ดสตาร์ชเกิดการเจลลาคีไนซ์ โดยสูญเสียลักษณะความเป็นผลึก

น้ำฝน (2548) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านความหนืด และความคงตัวของสตาร์ชข้าวสารนึ่งเปรียบเทียบกับข้าวธรรมดา ปรากฏว่า ข้าวสารนึ่งมีความหนืดต่ำกว่าข้าวธรรมดา และความหนืดลดลงมากขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิการนึ่งสูงมากขึ้น และสตาร์ชข้าวสารนึ่งซึ่งเป็นสตาร์ชที่เจลลาคีไนซ์ไปแล้วนั้นมีลักษณะของความหนืดสูงสุดที่ต่ำกว่าสตาร์ชข้าวธรรมดาซึ่งยังไม่เจลลาคีไนซ์อย่างมาก และเมื่อใช้อุณหภูมิการนึ่งที่สูงลักษณะกราฟลดต่ำลงมากขึ้นแสดงว่าเกิดการเจลลาคีไนซ์มากขึ้น

Lai (2001) พบว่า การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งข้าวภายหลังการแช่ข้าวและนึ่งข้าวด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ และระยะเวลาต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของข้าวซึ่งมีปริมาณแอมิโลสแตกต่างกัน ในแป้งข้าวเหนียวที่มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 1.2 พบว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อใช้ระดับความชื้นต่ำ แต่ที่ระดับความชื้นสูง พบว่าค่าความหนืดสูงสุด และค่าความหนืดลดลงของแป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการนึ่งที่อุณหภูมิ 85 และ 95 °ซ มีค่าลดลง แต่ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบคสูงขึ้น ซึ่งการที่ความหนืดสุดท้ายมีค่าสูงขึ้น แสดงว่าความเป็นระเบียบของโมเลกุลภายในเมล็ดสตาร์ชถูกทำลายไปในระหว่างการนึ่ง เป็นสาเหตุให้เกิดความสูญเสียความสมบูรณ์ของเมล็ดสตาร์ช และโครงสร้างผลึกถูกทำลาย ส่งผลให้เกิดสมบัติการละลายได้ในน้ำเย็น ดังนั้นค่าความหนืดจึงสูงขึ้นไปได้อุณหภูมิต่ำ สำหรับแป้งข้าวแอมิโลสต่ำ (ร้อยละ 17.9) และแป้งข้าวแอมิโลสสูง (ร้อยละ 28.8) พบว่าค่าความหนืดสูงสุด และค่าความหนืดลดลงมีค่าต่ำลงเช่นกัน แต่ในแป้งข้าวแอมิโลสต่ำมีค่าความหนืดสุดท้ายสูงขึ้นไป ส่วนค่าเซตแบคลดลงเนื่องจากค่าความหนืดต่ำสุดมีค่าสูงขึ้นไป ซึ่งต่างจากในแป้งข้าวแอมิโลสสูงจะมีค่าความหนืดสุดท้ายสูงขึ้นไปเมื่ออัดแปร โดยใช้ระดับความชื้น อุณหภูมิต่ำ และเวลาสั้น แต่ถ้าทำที่ระดับความชื้นสูงพร้อมทั้งนึ่งด้วยอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานค่าความหนืดสูงสุดจะลดลง ส่วนค่าเซตแบคมีค่าสูงขึ้นไปในทุกๆระดับของการทรีทเมนท์ ซึ่งการที่ค่าความหนืดสูงสุดลดลง และค่าความหนืดสุดท้ายเพิ่มขึ้นในแป้งข้าวทั้งสองชนิด เป็นผลจากการที่โมเลกุลของแอมิโลสถูกชะออกมา จึงทำให้เกิดรีโทรเกรเดชันได้อย่างรวดเร็วภายหลังการเกิดเจลลาคีไนซ์ และระหว่างการทำแห้งในขั้นตอนของการ

ทริทเมนต์ การยึดเกาะกันของโมเลกุลเอมิโลสของแป้งข้าวที่เกิดเจลลาทีในชั้นนี้จะมีความแข็งแรงมาก และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในแป้งข้าวทั้งสามชนิดเมื่อใช้ระดับความชื้นและอุณหภูมิต่ำ แสดงให้เห็นว่า ส่วนออสติฐานของเมล็ดศตวรรษเป็นส่วนแรกที่ได้รับผลกระทบจากการตัดแปรรูป

Himmelsbach *et al.* (2008) ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวสารนึ่งในข้าวพันธุ์ TOX 3108 ซึ่งเตรียมจากแช่ข้าวเปลือกในน้ำที่อุณหภูมิ 30°C และให้ความร้อนเป็นเวลา 4, 8 และ 12 นาที พบว่า เมื่อระยะเวลาการนึ่งนานขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืด ได้แก่ ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และความหนืดคืนตัว มีค่าลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากตัวอย่างข้าวสารปกติ ส่วนค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด และเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการนึ่งที่นานขึ้น ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากข้าวสารปกติ

5.3 คุณภาพข้าวนึ่ง

ข้าวนึ่งคุณภาพที่ดี พิจารณาจากสิ่งต่าง ๆ ดังนี้ คือ สี ควรเป็นสีเหลืองอ่อน หรือน้ำตาลอ่อน เมื่อหุงสุกแล้วควรมีกลิ่นน้อยที่สุด เมล็ดร่วนไม่ติดกัน คุณภาพการสีควร ได้ข้าวเต็มเมล็ด มีข้าวหักน้อย ลักษณะเมล็ด สี แกร่ง ไม่มีท้องไข ขนาดรูปร่างเมล็ดเหมือนข้าวธรรมดา (กรมวิชาการเกษตร, 2550)

6. กระบวนการงอกของเมล็ดข้าว

Bewley and Black (1985) กล่าวว่า กระบวนการงอก คือ กระบวนการที่เริ่มต้นตั้งแต่การดูดน้ำของเมล็ด และสิ้นสุดที่การยึดตัวของแกนคัพพะ (โดยปกติเป็นราก) ในระหว่างการงอกมีเหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น ได้แก่ การดูดน้ำของโปรตีน การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างต่างๆ ภายในเซลล์ การหายใจ การสังเคราะห์สารโมเลกุลใหญ่ และการยึดตัวของเซลล์ เหตุการณ์เหล่านี้มีผลให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจากคัพพะแห่งที่อยู่ในระยะพักตัว (Resting or quiescent embryo) ไปสู่คัพพะที่มีเมแทบอลิซึมสูงจนปรากฏการเจริญเติบโตให้เห็น ดังนั้นกระบวนการงอกในความหมายนี้ ไม่ได้หมายถึงการเจริญเติบโตของต้นกล้า (Seedling growth) ซึ่งเริ่มต้นหลังจากที่รากอ่อนแทงทะลุเปลือกเมล็ดออกมา ส่วนการงอกของเมล็ดข้าวที่ทำให้ส่วนของคัพพะมีความยาวประมาณ 0.5-1 มิลลิเมตร เรียกว่า ข้าวกล้องเริ่มงอก (Pre-germinated brown rice) (Kayahara *et al.*, 2001; Tsukahara, 2004)

เมล็ดข้าวปกติมีความชื้นต่ำ และยังไม่มีการงอกเกิดขึ้น จัดว่าอยู่ในระยะพักตัว (Quiescent state) ในภาวะดังกล่าวนี้ เมล็ดสามารถดำรงความมีชีวิตอยู่ได้เป็นเวลานานนับปี โดยแทบจะไม่มีการเมแทบอลิซึมเกิดขึ้นเลย และในที่สุดก็สามารถกลับมาเริ่มเมแทบอลิซึมได้อย่างปกติอีกครั้ง

เมื่อได้รับปัจจัยที่เหมาะสม และจำเป็นต่อการงอกของเมล็ดปกติที่มีหรือไม่มีการพักตัวมี 4 ปัจจัย (วันชัย, 2537) คือ

1. น้ำหรือความชื้น (Water) ทำให้เปลือกเมล็ดอ่อนนุ่ม จึงดูดซึมน้ำออกซิเจนเข้าไปภายในเมล็ด ได้สะดวกขึ้น ทำให้เมล็ดหายใจเพิ่มขึ้น เป็นตัวละลายโปรตีน โดพลาซิม ทำให้กิจกรรมทางชีวเคมีต่างๆ ในเมล็ด ที่เคยหยุดนิ่งหรือเกิดขึ้นช้าๆ นั้นมีกิจกรรมมากขึ้น และอัตราเร็วขึ้น เช่น การย่อยสาร โมเลกุลใหญ่ไปเป็น โมเลกุลเล็ก ทำให้สะดวกในการขนย้าย ได้พลังงานออกมา และเป็นพาหนะช่วยในการขนย้าย อาหารต่างๆ ที่เมล็ดเก็บสะสมไว้ให้นำไปใช้ได้อย่างรวดเร็วขึ้น ในระยะแรก โมเลกุลของน้ำเข้าสู่เมล็ดโดยการแพร่ (Diffusion) แรงดูดน้ำของเมล็ดที่เกิดขึ้นในระยะแรกนี้ เรียกว่า อิมบิบิชัน (Imbibition force) แรงดูดน้ำแบบนี้ลดลงเมื่อเมล็ดดูดน้ำเข้าไปมากขึ้น ต่อมามีการดูดน้ำโดยกระบวนการออสโมซิส (Osmosis) ซึ่งมีผลต่อความชื้นสุดท้ายของเมล็ดขณะสิ้นสุดกระบวนการดูดน้ำ ซึ่งโดยทั่วไปความชื้นของเมล็ดที่ระยะนี้อาจผันแปรอยู่ในช่วงร้อยละ 30-60 การดูดน้ำของเมล็ดปกติเกิดขึ้นรอบเปลือกเมล็ด โดยเนื้อเยื่อแต่ละส่วนของเมล็ดมีอัตราการดูดน้ำต่างกัน โดยทั่วไปเนื้อเยื่อคัพภะดูดน้ำได้ในอัตราที่เร็วกว่าการดูดน้ำของส่วนเนื้อเมล็ด ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อเยื่อคัพภะเก็บสะสม โปรตีน ในขณะที่ส่วนเนื้อเมล็ดมีการโบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ เหตุผลอีกประการหนึ่งก็คือ คัพภะต้องการน้ำมากเพื่อกระตุ้นปฏิกิริยาของเอนไซม์ โดยทั่วไปเมล็ดข้าวสามารถงอกได้เมื่อได้รับความชื้นถึงร้อยละ 32-35 ในระหว่างที่เมล็ดดูดน้ำนั้น น้ำกระตุ้นเอนไซม์บางชนิดที่มีอยู่แล้วในเมล็ดให้ทำงาน ขณะเดียวกัน ก็สังเคราะห์เอนไซม์ชนิดใหม่ที่จำเป็นต้องใช้ขึ้นมา เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ ส่วนใหญ่มีอยู่แล้วในเมล็ดแห้ง ต้องการเพียงน้ำมากกระตุ้นให้สามารถทำงานได้เท่านั้น ในบรรดาเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการหายใจนี้ เอนไซม์ไฮโดรลิติก (Hydrolytic enzyme) พบว่าถูกสร้างขึ้นมาใหม่

2. ออกซิเจน (Oxygen) แม้ว่ากระบวนการดูดน้ำของเมล็ดไม่ต้องการออกซิเจนช่วย แต่ในเมล็ดพืชทั่วไปก็ต้องการออกซิเจนในกระบวนการงอก ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการหายใจ เพื่อย่อยสลายอาหาร แล้วให้ได้พลังงานออกมาใช้สำหรับการงอก ถ้าไม่มีออกซิเจน หรือออกซิเจนมีไม่เพียงพอ ก็จะมีกระบวนการหายใจที่ไม่ใช้ออกซิเจนเกิดขึ้น และเกิดสะสมสารพิษขึ้นในเมล็ด เช่น แอซีตัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) เอทานอล (Ethanol) และแล็กเตต (Lactate) แต่เมล็ดพืชพวกที่ปรับตัวกับการงอกในน้ำ เช่น ข้าวจะงอก และเจริญเติบโตได้ แม้ในสภาพที่ขาดออกซิเจน โดยทั่วไปเมล็ดงอกได้ในบรรยากาศที่มีออกซิเจนประมาณร้อยละ 20 ถ้าบรรยากาศรอบเมล็ดมีออกซิเจนมากขึ้น อัตราการงอกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์ก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับการงอกเช่นกัน โดยปกติ เมล็ดงอกได้ดีถ้าบรรยากาศรอบเมล็ด มีคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 0.03 แต่ถ้าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น มีผลทำให้อัตราการงอกของเมล็ดลดลง และถ้ามีในปริมาณที่สูงมากทำให้เมล็ดไม่งอกเลย

3. อุณหภูมิที่พอเหมาะ (Favorable temperature) เมล็ดพืชแต่ละชนิดมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการงอก และการเจริญเติบโตระยะแรกแตกต่างกันไป ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าระดับที่เหมาะสม เมล็ดอาจจมน้ำได้แต่จะไม่งอก ในขณะที่อุณหภูมิสูงเกินไป เมล็ดก็อาจจมน้ำได้เช่นกัน แต่ไม่มีการเจริญเติบโตของคัพภะ โดยทั่วไปเมล็ดพันธุ์สามารถงอกได้ดีที่อุณหภูมิระหว่าง 10-35 °C ระดับของอุณหภูมิ แบ่งออกได้เป็น ดังนี้

3.1 อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด (Optimum temperature) คือ อุณหภูมิที่เมล็ดงอกได้เร็วที่สุด และมากที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 15-35 °C

3.2 อุณหภูมิต่ำสุด (Minimum temperature) คือ อุณหภูมิระดับต่ำสุด ที่เมล็ดสามารถงอกได้ ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้เมล็ดไม่งอก แต่จะยังคงมีชีวิตอยู่โดยไม่ได้รับอันตราย โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิต่ำทำให้เมล็ดงอกช้าลง

3.3 อุณหภูมิสูงสุด (Maximum temperature) คือ ระดับของอุณหภูมิสูงสุด ที่เมล็ดสามารถงอกได้ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เมล็ดไม่งอก และได้รับอันตรายด้วย

3.4 อุณหภูมิที่ทำให้ตาย (Lethal temperature) คือ ระดับของอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งเมล็ดพันธุ์ไม่สามารถที่จะมีชีวิตอยู่ได้ จึงกลายเป็นเมล็ดตาย (Dead seed)

4. แสง (Light) มีผลในการกระตุ้น หรือยับยั้งการงอกนั้น เมล็ดจะต้องดูดน้ำเสียก่อน และแสงนั้นจะต้องเป็นแสงที่เมล็ดได้รับเป็นครั้งสุดท้าย แสงที่กระตุ้น (Promote) ให้เมล็ดงอกนี้ คือ แสงสีแดง ซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 5,600-7,000 อังสตรอม สาเหตุที่แสงสีแดงกระตุ้นให้เมล็ดงอกได้คือนั้น เนื่องจากแสงสีแดงนี้ไปทำลายการพักตัวของเมล็ดได้ โดยการชักนำให้เกิดการสังเคราะห์ฮอร์โมนจิบเบอเรลลิน (Gibberellin) ขึ้น ฮอร์โมนจิบเบอเรลลินกระตุ้นการงอกของเมล็ด โดยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ 3 ชนิด ผ่านทางชั้นแอลิวโรน คือ

4.1 กระตุ้นเอนไซม์โปรติโอไลติก (Proteolytic enzyme) ซึ่งไปช่วยย่อยโปรตีนให้สลายกลายเป็นกรดแอมิโน

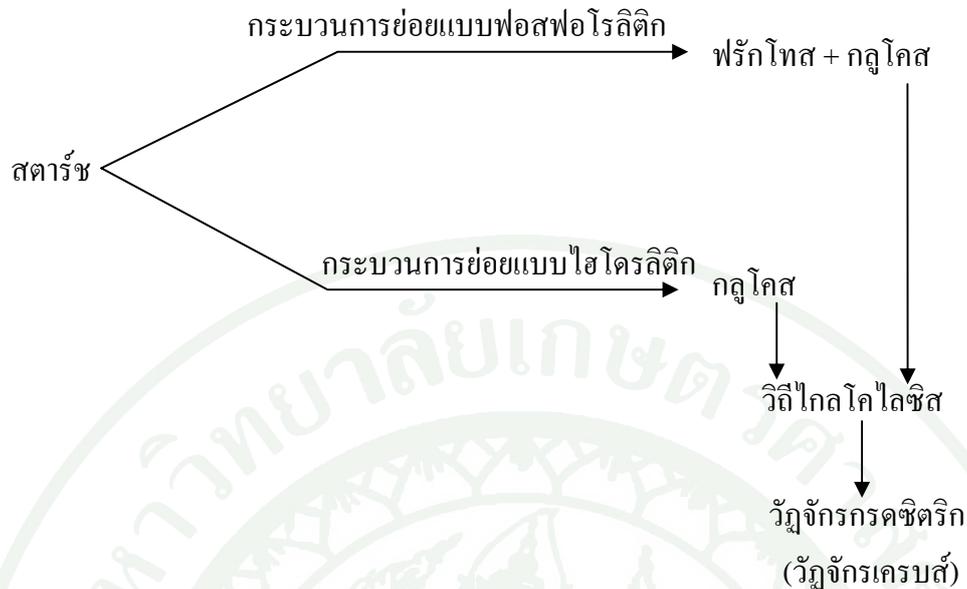
4.2 กระตุ้นเอนไซม์ไซโตไลติก (Cytolytic enzyme) ซึ่งทำให้ผนังเซลล์ของเมล็ดอ่อนตัวลง น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปภายในเมล็ดได้มากขึ้น

4.3 กระตุ้นเอนไซม์ไฮโดรลิติก (Hydrolytic enzyme) เช่น เอนไซม์แอมิเลส ซึ่งช่วยเปลี่ยนสตาร์ชให้เป็นน้ำตาล ซึ่งใช้ในกระบวนการเมแทบอลิซึมหลายกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต

ในระหว่างการงอกของเมล็ด สารที่มีโมเลกุลใหญ่ ถูกย่อยให้เป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กๆ ซึ่งประกอบด้วยการย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ 3 กลุ่ม คือ คาร์โบไฮเดรต (สตาร์ช) โปรตีน และไขมัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. การย่อยสตาร์ช ในระหว่างการงอกของเมล็ดการย่อยสตาร์ชให้เป็นกลูโคสนั้น อาจผ่านกระบวนการย่อยแบบฟอสฟอโรลิติก (Phosphorolytic breakdown) หรือการย่อยแบบไฮโดรลิติก (Hydrolytic breakdown) ก็ได้ (ภาพที่ 3) แต่ส่วนใหญ่มักเป็นการย่อยแบบไฮโดรลิติกมากกว่า มีส่วนน้อยเท่านั้นที่ย่อยสตาร์ชแบบฟอสฟอโรลิติก ซึ่งเกิดขึ้นในระยะแรกๆ ของกระบวนการงอกโดยมีเอนไซม์ฟอสฟอริเลส (Phosphorylase) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการย่อยแบบไฮโดรลิติกของสตาร์ชนั้น มีเอนไซม์ที่สำคัญ 3 ชนิด คือ แอลฟา-แอมิเลส (α -amylase) บีตา-แอมิเลส (β -amylase) และ มอลเทส (Maltase) โดยเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลส เป็นเอนโดเอนไซม์ (Endoenzyme) สามารถย่อยพันธะแบบ α -1,4 กลูโคซิติก แบบสุ่มอย่างไม่เป็นระเบียบ เป็นเหตุทำให้โมเลกุลของสตาร์ชมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็ว และทำให้สตาร์ช (Starch slurry) มีความหนืดลดลง ส่วนบีตา-แอมิเลส เป็นเอกโซเอนไซม์ (Exoenzyme) สามารถย่อยพันธะแบบ α -1,4 กลูโคซิติก อย่างเป็นระเบียบจากนอน-รีดิวซิง เอนด์ (Non-reducing end) ที่ละ 2 หน่วย ผลที่ได้คือ มอลโทส (Maltose) (Hoseney, 1998) ทั้งเอนไซม์แอลฟา- และบีตา-แอมิเลสนี้ไม่สามารถย่อยสตาร์ชได้ทั้งสาย เนื่องจากไม่สามารถย่อยพันธะ α -1,6 กลูโคซิติก ซึ่งเชื่อมต่อแขนงของเอมิโลเพกทินไว้ ซึ่งผลจากการย่อยนอกจากจะได้เป็นน้ำตาลกลูโคส มอลโทสแล้ว ยังได้พอลิเมอร์สายสั้นที่เรียกว่า ลิมิท-เดกซ์ทริน (Limit dextrin) ด้วย ส่วนมอลโทสที่ได้จะถูกย่อยต่อด้วยมอลเทสได้เป็นกลูโคสในที่สุด สำหรับในธรรมชาติ กลูโคสถูกเคลื่อนย้ายผ่านสคูเทลลัม (Scutellum) เข้าไปในแกนคัพพะ โดยมี การเปลี่ยนรูปเป็นซูโครส และเปลี่ยนกลับเป็นกลูโคสเมื่อเข้าสู่จุดเจริญแล้ว

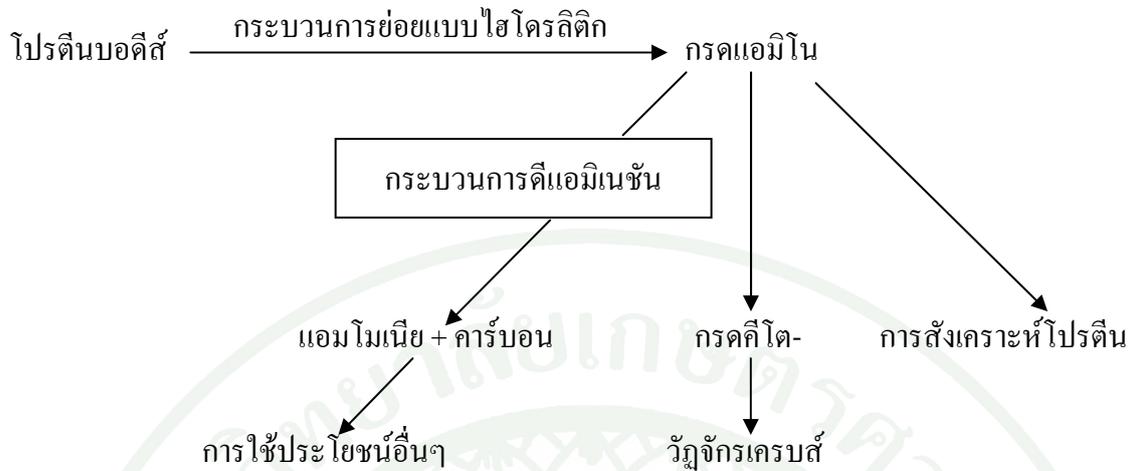
ในระหว่างกระบวนการงอกของข้าว เซลล์ในเอนโดสเปิร์มซึ่งมีสตาร์ชเป็นหลัก สตาร์ชถูกย่อยโดยเอนไซม์แอลฟา- และบีตา-แอมิเลสที่ปลดปล่อยออกมาจากเยื่อชั้นแอลิวโรนเนื่องจากการกระตุ้นของฮอร์โมนจิบเบอเรลลิน ที่ส่งมาจากคัพพะ โดยเอนไซม์แอมิเลสย่อยสตาร์ชในเนื้อเมล็ดให้กลายเป็นน้ำตาลผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการย่อยสตาร์ช คือ กลูโคส นอกจากนี้ยังพบฟรักโทส มอลโทส ซูโครส มอลโทไทรโอส ไอโซมอลโทไทรโอส และราฟฟิโนส เป็นต้น (Palmiano and Juliano, 1972; Saman *et al.*, 2008) ซึ่งถูกสคูเทลลัมดูดเข้าไปเพื่อการเจริญเติบโตของคัพพะ



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการย่อยสลายสตาร์ชในเมล็ดคางคก โดยผ่านกระบวนการฟอสฟอโรลิติก (Phosphorolytic breakdown) และไฮโดรลิติก (Hydrolytic breakdown)

ที่มา: วันชัย (2537)

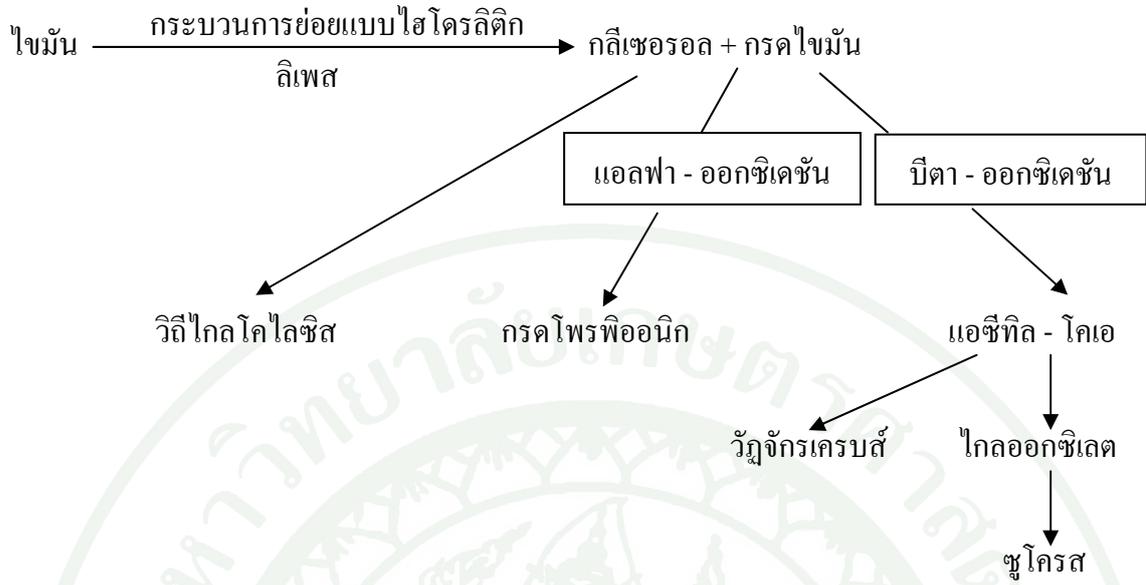
2. การย่อยโปรตีน ในระหว่างการงอกของเมล็ดการย่อยโปรตีนเกี่ยวข้องกับการทำงานของ เอนไซม์พวกโปรทีเนส (Proteinase) (ภาพที่ 4) ซึ่งย่อยโปรตีนให้เป็นกรดแอมิโนกับเปปไทด์ และ สารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน และเอนไซม์พวกเพปติเดส (Peptidases) ซึ่งย่อยเปปไทด์ให้เป็น กรดแอมิโน จากนั้นกรดแอมิโนถูกส่งไปยังแกนคัพกะ เพื่อใช้สร้างโปรตีนชนิดใหม่หรือใช้สังเคราะห์ เอนไซม์ที่จำเป็นอื่นๆ อีก กรดแอมิโนบางส่วนอาจผ่านกระบวนการดีแอมิเนชัน (Deamination) ได้ แอมโมเนียกับสารประกอบคาร์บอน นอกจากนี้กรดแอมิโนยังอาจเปลี่ยนไปเป็นกรดคีโต- (Keto- acid) และเข้าสู่วิถีไกลโคไลซิส และหรือวัฏจักรแลคเตต



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการย่อยสลายโปรตีนในเมล็ดขมิ้นงอก

ที่มา: วันชัย (2537)

3. การย่อยไขมัน ในระหว่างการงอกของเมล็ดการย่อยไขมันเกิดขึ้นในส่วนของไซโทพลาซึม ขั้นตอนการย่อยไขมันแสดงในภาพที่ 5 โดยมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง คือ ลิเพส (Lipase) โดยลิเพสย่อยไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งได้กลีเซอรอล (Glycerol) กับกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) กลีเซอรอลนั้นผ่านเข้าสู่กระบวนการไกลโคไลซิส และวัฏจักรกรดซิตริก ส่วนกรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับ CoASH แล้วถูกออกซิไดส์โดยกระบวนการบีตา-ออกซิเดชัน (β -oxidation) ได้แอสिटิล-โคเอ แล้วเข้าสู่วัฏจักรไกลออกซีเลต (Glyoxylate) ได้เป็นซูโครสกับคาร์บอนไดออกไซด์ กรดไขมันอิสระบางส่วนอาจถูกออกซิไดส์โดยกระบวนการแอลฟา-ออกซิเดชัน (α -oxidation) ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide; H_2O_2) ซึ่งถูกใช้ไปสร้างกรดโพรพิโอนิก (Propionic acid)



ภาพที่ 5 การย่อยสลายไฮมันในเมล็ดขณะงอก

ที่มา: วันชัย (2537)

การย่อยสาร โมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารประกอบ โมเลกุลเล็ก โดยกระบวนการย่อยแบบไฮโดรลิติก สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

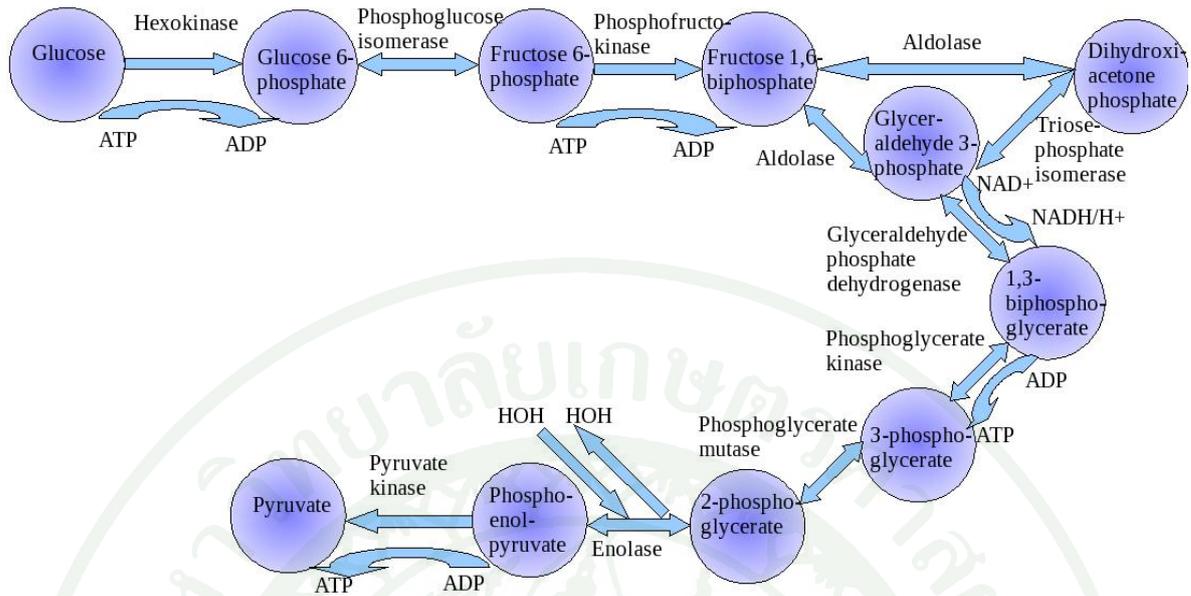
ตารางที่ 1 เอนไซม์ไฮโดรลิติกที่ช่วยย่อยอาหารสะสม และสารโมเลกุลเล็กที่ย่อยได้ ในกระบวนการเคลื่อนย้ายอาหารสะสมในเมล็ด

อาหารสะสม	เอนไซม์	สารประกอบที่ได้จากการย่อย
สตาร์ช	แอลฟา- และ บีตา-แอมิเลส	มอลโทส กลูโคส
	มอลเทส	กลูโคส
	ฟอสฟอริเลส	กลูโคส-1-ฟอสเฟต
เฮมิเซลลูโลส	ไซเทส	เฮกโซส เพนโทส
ไขมัน	ลิเพส (เอสเทอเรส)	กรดไขมัน กลีเซอรอล
โปรตีน	โปรทีเนส	กรดแอมิโน เปปไทด์
	เพปติเดส	กรดแอมิโน
ไฟทิน (Phytin)	ไฟเทส	ฟอสเฟตอนินทรีย์ (Inorganic phosphate) อินซิทอล
กรดไรโบนิวคลีอิก (Ribonucleic acid)	ไรโบนิวคลีเอส	ไรโบนิวคลีโอไทด์
เซลลูโลส	เซลลูเลส	เซลโลไบโอส
	เซลโลไบโอส	กลูโคส

ที่มา: วันชัย (2537)

ในการเปลี่ยนกลูโคสเป็นพลังงานของเมล็ดที่มีการคูดน้ำ และเกิดการงอกนั้น มีกระบวนการหายใจที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีไกลโคไลซิส และวัฏจักรเครบส์

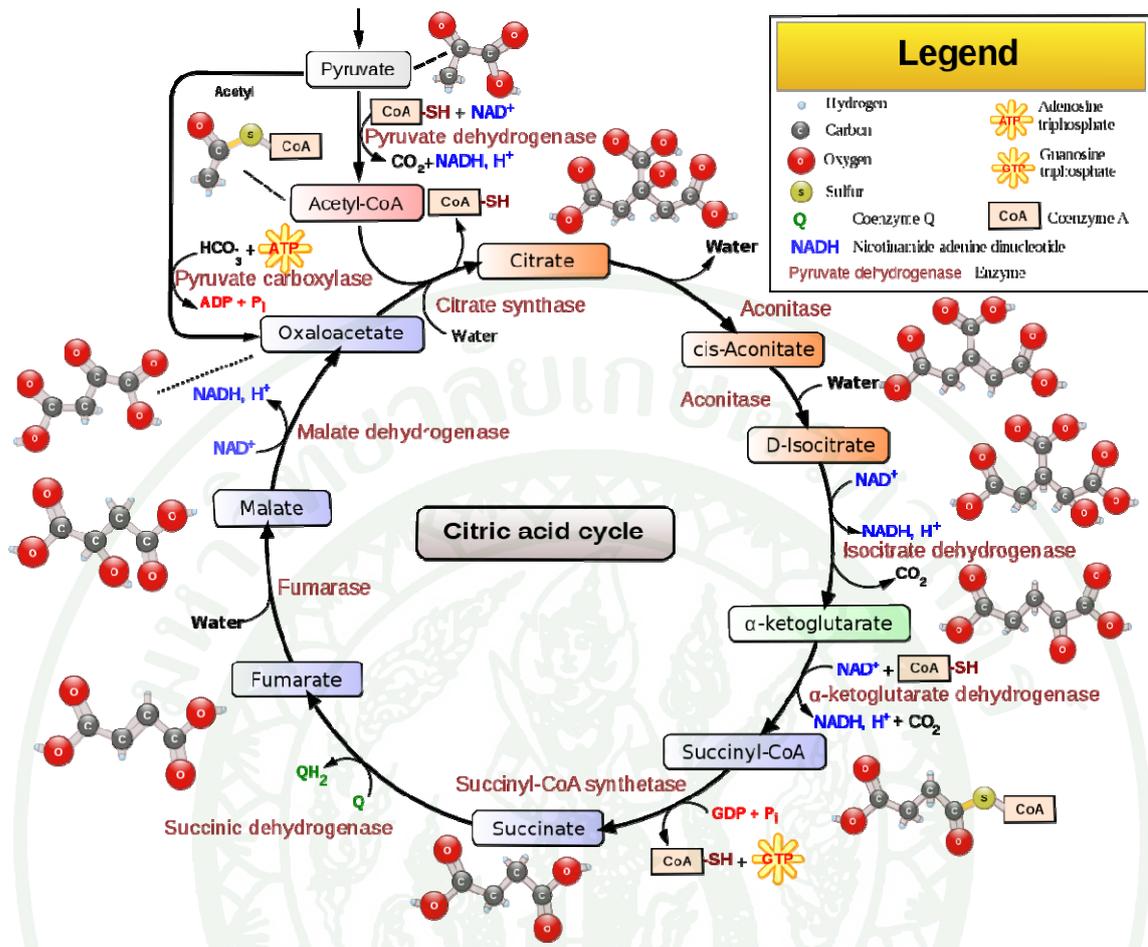
1. วิธีไกลโคไลซิส (Glycolysis pathway) เป็นกระบวนการผลิตพลังงานจากการสลายกลูโคสในสถานะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งผลิตผลที่ได้ขึ้นอยู่กับสิ่งมีชีวิต เช่น ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตชั้นสูงผลิตผลที่ได้คือ ไพรูเวต และถ้าถูกเผาผลาญต่อไปในกระบวนการหายใจได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน แผนภาพวิธีไกลโคไลซิส แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 วิธีไกลโคไลซิส (Glycolysis pathway)

ที่มา: Anonymous (2011b)

2. วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle or Citric acid cycle) และออกซิเดทีฟ ฟอสฟอริเลชัน (Oxidative phosphorylation) เป็นปฏิกิริยาร่วมกันขั้นสุดท้ายในการสลายกลูโคส ในสภาวะที่มีออกซิเจนเกิดขึ้นในไมโทคอนเดรีย วัฏจักรเครบส์ เริ่มต้นขึ้นเมื่อไพรูเวตจากไซโทพลาซึมผ่านเข้าสู่ไมโทคอนเดรีย และถูกออกซิไดส์ได้เป็นแอซิติล-โคเอ (Acetyl-CoA) แผนภาพวัฏจักรเครบส์ แสดงดังภาพที่ 7 วัฏจักรเครบส์นอกจากให้พลังงานแล้ว สารตัวกลาง (Intermediate product) ในวัฏจักรมีทั้งโมเลกุลที่มีคาร์บอน 6, 5 และ 4 อะตอม จึงเป็นแหล่งของสารตั้งต้นสำหรับสังเคราะห์สารที่สำคัญ ตัวอย่างเช่น แอลฟา-คีโทกลูทาเรต ออกซาโลแอซิติต ซักซินเนต สามารถนำไปสังเคราะห์เป็นกรดแอมิโนชนิดต่างๆ ได้ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ฉะนั้นในทางตรงข้าม อาจกล่าวได้ว่า กรดแอมิโนบางชนิดสามารถเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ได้ และให้พลังงานได้ นอกจากนี้ ซิทรตสามารถสังเคราะห์เป็นกรดไขมันได้



ภาพที่ 7 วัฏจักรเครปส์ (Kreb cycle or citric acid cycle)

ที่มา: Anonymous (2011a)

ในกระบวนการหายใจของเมล็ดโดยใช้ออกซิเจนอาจแบ่งได้เป็น 4 ระยะ (วันชัย, 2537) ดังนี้

ระยะที่ 1 การใช้ออกซิเจนเป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่วนหนึ่งมาจากการคูดน้ำ และการกระตุ้นของเอนไซม์ไมโทคอนเดรีย ที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรกรดซิตริก และการส่งผ่านอิเล็กตรอน การหายใจของเมล็ดในระยะนี้เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเส้นตรงตามระดับการคูดน้ำของเนื้อเยื่อในเมล็ด

ระยะที่ 2 การใช้ออกซิเจนเป็นไปอย่างช้าๆ การคูดน้ำของเมล็ดสิ้นสุดที่ระยะนี้ และเอนไซม์ที่สะสมอยู่ในเมล็ดถูกกระตุ้นให้ทำงานหมด การใช้ออกซิเจนอย่างช้าๆ ในระยะนี้ของเมล็ดบางชนิด อาจเป็นเพราะเปลือกเมล็ดไม่ยอมให้ออกซิเจนผ่านเข้าสู่ภายในคัพภะ และส่วนเนื้อเมล็ด ทำให้เมล็ดต้องการออกซิเจนในระยะนี้น้อยลง ที่จุดสิ้นสุดระยะ 2 และต่อระยะ 3 นี้ มีรากอ่อนงอกออกมาให้เห็น

ระยะที่ 3 เป็นระยะที่มีการหายใจสูงขึ้น เนื่องจากไมโทคอนเดรีย และเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการหายใจต่างๆ ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ในคัพภะทำงานสูงขึ้น ในส่วนเนื้อเมล็ดก็มีจำนวนไมโทคอนเดรียเพิ่มขึ้นด้วย และสัมพันธ์กับการเคลื่อนย้ายอาหารสะสม อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การหายใจในระยะนี้สูงก็คือ เปลือกเมล็ดถูกรากอ่อนแทงทะลุออกมา ทำให้ออกซิเจนผ่านเข้าสะดวกยิ่งขึ้น

ระยะที่ 4 เกิดในส่วนของเนื้อเมล็ดเท่านั้น ซึ่งสัมพันธ์กับการใช้หมดไปของอาหารที่สะสมไว้

เมื่อส่วนของต้นอ่อนในเมล็ด ได้รับพลังงานและแร่ธาตุอาหารต่างๆ ต้นอ่อนก็เริ่มสร้างหรือสังเคราะห์อาหาร และสารประกอบต่างๆ ขึ้นมาใหม่ เพื่อใช้สำหรับการเจริญเติบโตต่อไป ส่วนของต้นอ่อนมีการยืดตัว ซึ่งเกิดเนื่องจากการแบ่งเซลล์ และการยืดตัวของเซลล์ โดยทั่วไปส่วนของรากอ่อน (Radicle) เจริญเติบโตปรากฏให้เห็นก่อน โดยโผล่ออกมาจากเปลือกที่หุ้มเมล็ดแล้วดันให้เปลือกหุ้มเมล็ดแตกออก จากนั้นติดตามด้วยการเจริญของยอดอ่อน

7. ข้าวกล้องเริ่มงอก (Pre-germinated brown rice)

กระบวนการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอก สามารถใช้วัตถุดิบได้ทั้งข้าวเปลือก และข้าวกล้อง กระบวนการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอก ทำได้โดยการนำวัตถุดิบข้าวมาแช่น้ำ และทำให้งอก โดยควบคุมอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการแช่ข้าวต่างๆ กันไป กระบวนการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอก สามารถทำได้จากทั้งข้าวเปลือก และข้าวกล้อง โดยสภาวะการผลิตต่างๆ ไป ทำโดยนำข้าวมาแช่น้ำที่อุณหภูมิในช่วง 30-40 °C เป็นเวลา 10-12 ชั่วโมง หรือจนเมล็ดข้าวดูดน้ำจนอืดตัวหรือมีปริมาณความชื้นมากกว่าร้อยละ 30 เพื่อกระตุ้นให้เกิดการงอกขึ้น จากนั้นนำเมล็ดข้าวขึ้นจากน้ำแช่มาเพาะให้เริ่มงอกเป็นเวลาในช่วง 20-24 ชั่วโมงในสภาวะที่มีอากาศ (Capanzana and Buckle, 1997; Zhang *et al.*, 2005; Saman *et al.*, 2008; Usansa *et al.*, 2009) โดยข้าวกล้องที่ผ่านกระบวนการงอกจนมีส่วนของคัพภะเริ่มงอกยาวประมาณ 0.5-1 มิลลิเมตร เรียกว่า ข้าวกล้องเริ่มงอก (Pre-germinated brown rice) (Kayahara *et al.*, 2001; Tsukahara, 2004)

7.1 กระบวนการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอก

กระบวนการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอก ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการแช่ข้าว การเพาะให้เริ่มงอก และการอบแห้งเมล็ดข้าวหลังเพาะให้เริ่มงอก โดยมีรายละเอียด ดังนี้

7.1.1 การแช่เมล็ดข้าว

การแช่ข้าวในน้ำ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้น้ำเข้าไปภายในเมล็ด โดยกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และสิ้นสุดลงเมื่อเมล็ดข้าวดูดซึมน้ำจนถึงจุดอิ่มตัว ขณะที่เมล็ดข้าวแช่อยู่ในน้ำ องค์ประกอบต่างๆ ของเมล็ดดูดซึมน้ำ โดยน้ำเคลื่อนที่ไปยังใจกลางเมล็ดด้วยกระบวนการแพร่ ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าว เช่น เปลือกของเมล็ดข้าว ซึ่งขัดขวางการดูดซึมน้ำ จึงเป็นสาเหตุทำให้ข้าวเปลือกต้องใช้เวลาานกว่าข้าวกล้องในการทำให้เมล็ดข้าวดูดซึมน้ำจนถึงจุดอิ่มตัว เป็นต้น ส่วนปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการแช่เมล็ดข้าว (Hoseney, 1998) การแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูงสามารถทำให้เมล็ดข้าวดูดซึมน้ำได้เร็ว แต่อุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้เมล็ดข้าวตายจนไม่สามารถงอกได้ และอุณหภูมิสูงนี้ยังเร่งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย ดังนั้น อุณหภูมิที่เลือกใช้ในการแช่ข้าว จึงควรเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เมล็ดข้าวยังสามารถงอกได้ ซึ่งพบว่า เมล็ดข้าวสามารถงอกได้ดีที่อุณหภูมิในช่วง 30-40 °C ส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการแช่เมล็ดข้าวควรนานเพียงพอที่ทำให้เมล็ดข้าวดูดซึมน้ำเข้าถึงใจกลางเมล็ด เพราะถ้าเมล็ดข้าวดูดซึมน้ำไม่เพียงพอทำให้บริเวณใจกลางของเมล็ดข้าวยังแห้ง ซึ่งส่งผลให้ข้าวกล้องเริ่มงอกมีคุณภาพต่ำ อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาที่ใช้แช่ข้าวควรเป็นระยะเวลาที่ทำให้เมล็ดข้าวมีการดูดซึมน้ำจนถึงจุดอิ่มตัวก็เพียงพอ ไม่จำเป็นต้องแช่ให้นานหลังเลยจุดอิ่มตัวของเมล็ดข้าว เนื่องจากเมล็ดข้าวไม่มีการดูดซึมน้ำเข้าไปอีก การแช่เมล็ดข้าวานเกินไประหว่างผ่านจุดอิ่มตัวของเมล็ดข้าวนี้ เป็นผลทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ และส่งผลให้เมล็ดข้าวเกิดกลิ่นเหม็นได้ ดังนั้นในระหว่างการแช่เมล็ดข้าว จึงควรเปลี่ยนน้ำแช่เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์สะสมด้วย

7.1.2 การเพาะให้เริ่มงอก

การเพาะข้าวให้เริ่มงอกมีจุดประสงค์เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารชีวโมเลกุลที่สะสมในเมล็ดด้วยการย่อยสลายของเอนไซม์ เมล็ดข้าวที่สมบูรณ์และเจริญเต็มที่เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีปริมาณความชื้น ออกซิเจน และอุณหภูมิที่เหมาะสมสามารถงอกเป็นต้นอ่อนได้ อัตราการงอกของข้าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิ โดยข้าวงอกได้ในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม เพราะอุณหภูมิที่ต่ำหรือสูงเกินไป ส่งผลยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่กระตุ้นให้เกิดการงอก ระยะเวลาในการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกนั้นไม่ควรเกิน 2 วัน เนื่องจากข้าวที่เพาะให้งอกเกิน 2 วัน เริ่มปรากฏรากอ่อนออกมา ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เลยระยะเริ่มงอก (Pre-germination) ไปแล้ว กระบวนการงอกสิ้นสุดลงเมื่อรากอ่อนของข้าวงอกออกมาจากเมล็ด มีความยาวประมาณหนึ่งในสาม หรือสามในสี่ของความยาวเมล็ด ซึ่งหมายถึงเป็นการเจริญเติบโตของต้นกล้า (Seedling growth) (Bewley and Black, 1985; Hoseney, 1998)

ความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการงอกของเมล็ดข้าว เมื่อนำข้าวกล้องที่ผ่านการแช่น้ำมาเพาะให้เริ่มงอก ความชื้นที่เมล็ดข้าวดูดซึมน้ำเข้าไปในระหว่างแช่ เร่งให้เมล็ดมีอัตราการหายใจสูงขึ้น และ

เกิดการงอก รวมทั้งยังช่วยสร้างและเคลื่อนย้ายเอนไซม์ที่สังเคราะห์ขึ้นจากชั้นแอลิวโรนไปยังเอนโดสเปิร์ม เพื่อย่อยสลายสารชีวโมเลกุลที่เมล็ดเก็บสะสมไว้ ได้แก่ สตาร์ช พอลิแซ็กคาไรด์อื่นๆ และโปรตีน เป็นต้น การย่อยสลายสารชีวโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้ปริมาณ โอลิโกแซ็กคาไรด์ น้ำตาลกรดเอมิโน และสารอื่นที่มีประโยชน์หลายชนิดเพิ่มขึ้น เพื่อใช้สำหรับการเจริญเติบโตของคัพภะ ในขณะที่เดียวกันภายในเมล็ดก็เกิดการสังเคราะห์น้ำตาล และกรดนิวคลีอิกบางชนิด เพื่อใช้ในการพัฒนาโครงสร้างของคัพภะในขณะที่เมล็ดกำลังงอก (Palmiano and Juliano, 1972)

เอนไซม์แอลฟา- และบีตา-เอมิเลส เป็นเอนไซม์หลักที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสตาร์ชในระหว่างข้าวเริ่มงอก ส่งผลให้สตาร์ชมีความหนืดต่ำลง โดยเอนไซม์ดังกล่าวมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระหว่างข้าวเริ่มงอก นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์ชนิดอื่นอีกที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสตาร์ช ได้แก่ เอนไซม์ย่อยโมเลกุลกิ่ง (Debranched enzyme) และแอลฟา-กลูโคซิเดส ซึ่งกิจกรรมของเอนไซม์ทั้งสองเพิ่มขึ้นหลังจากกิจกรรมของเอนไซม์เอมิเลสลดลง (Akazawa, 1972) ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดจากการสลายตัวของสตาร์ช คือ กลูโคส นอกจากนี้ยังพบฟรักโทส มอลโทส ซูโครส มอลโทไทรโอส และราฟฟิโนส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของสตาร์ชดังกล่าว ส่งผลให้ข้าวกล้องเริ่มงอกมีรสชาติหวานขึ้น และมีกลิ่นรสเฉพาะตัว (Awazuhara *et al.*, 2000; Smith *et al.*, 2005)

Okamoto and Akazawa (1979) ติดตามกิจกรรมของเอนไซม์เอมิเลสของข้าวที่เพาะให้งอกที่อุณหภูมิ 30 °C ในสภาวะมืด ปรากฏว่า เมื่อข้าวงอกเป็นเวลา 2 วัน กิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-เอมิเลสเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 7 เท่า ส่วนกิจกรรมของเอนไซม์บีตา-เอมิเลสเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 4 เท่า และสามารถตรวจพบกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าวเมื่อข้าวงอกเป็นเวลา 6 วัน แต่กิจกรรมของเอนไซม์นี้ค่อยๆ ลดลงหลังจากข้าวงอกเป็นเวลา 2 วัน

Ayemor and Ocloo (2007) นำข้าวเปลือกแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเพาะให้งอกเป็นเวลา 5, 7 และ 9 วัน ที่อุณหภูมิ 32 °C จากนั้นนำมาวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ช และน้ำตาลรีดิวิซ์ ปรากฏว่า เมื่อเพาะตัวอย่างให้งอกเป็นเวลา 5, 7 และ 9 วัน ตัวอย่างมีปริมาณสตาร์ชลดลงจากเดิม 1.5, 2.2 และ 2.8 เท่า ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับปริมาณของน้ำตาลรีดิวิซ์ที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่เพาะเป็นเวลา 5, 7 และ 9 วัน มีปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์เพิ่มขึ้นจากเดิม 2.1, 3.7 และ 3.8 เท่า ตามลำดับ

Saman *et al.* (2008) เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ทั้งหมด และกิจกรรมของเอนไซม์กลุ่มเอมิโลลิติก เช่น เอนไซม์แอลฟา-เอมิเลส และแอลฟา-กลูโคซิเดส ระหว่างข้าวเจ้าข17 กับข้าวเหนียวข6 หลังแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะงอกที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 1-7 วัน ปรากฏว่า ข้าวเหนียวข6 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ทั้งหมดสูงกว่าข้าวเจ้าข17 โดยมีปริมาณสูงสุดใน

วันที่ 3 ของการเพาะงอก ซึ่งสอดคล้องกับกิจกรรมของเอนไซม์กลุ่ม ไฮโดรลิติกที่มีค่าสูงสุดในวันที่ 3 ของการเพาะงอกเช่นกัน

Charoenthaikij *et al.* (2009) ที่ตรวจสอบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวกล้องเริ่มงอก จากข้าว 2 พันธุ์ คือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าว กข6 ซึ่งแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35 °ซ นาน 24, 48 และ 72 ชั่วโมง สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ส่วนข้าว กข6 แช่น้ำที่อุณหภูมิ 35 °ซ นาน 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ปรากฏว่า ข้าวกล้องเริ่มงอกขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์อยู่ในช่วง 58.81-485.98 กรัม/100 กรัม ส่วนข้าวกล้องเริ่มงอกกข6 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์อยู่ในช่วง 28.62-324.64 กรัม/100 กรัม โดยพบว่าเมื่อระยะเวลาแช่ข้าวกล้องทั้ง 2 พันธุ์นานขึ้น ส่งผลให้ข้าวกล้องเริ่มงอกทั้ง 2 พันธุ์มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มสูงกว่าข้าวกล้องปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ส่วนการเปลี่ยนแปลงความหนืด พบว่า ข้าวกล้องเริ่มงอกขาวดอกมะลิ 105 เมื่อระยะเวลาการทำให้เริ่มงอกมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความหนืด ได้แก่ ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดต่ำสุด ความหนืดลดลง ความหนืดสุดท้าย และความหนืดคืนตัว มีค่าลดลงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากตัวอย่างข้าวกล้องปกติ ส่วนเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดไม่แตกต่างทางสถิติจากข้าวกล้องปกติ ส่วนในข้าวกล้องเริ่มงอกกข6 นั้น มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับในข้าวขาวดอกมะลิ 105 แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ค่าความหนืดทุกค่า และเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดในข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าสูงกว่าข้าว กข6

Usansa *et al.* (2009) ตรวจสอบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในข้าวเจ้า จำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ข้าวปทุมธานี 60 และข้าวป่า (Wild rice) กับข้าวเหนียว จำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวสันป่าตอง ข้าว กข6 และข้าวเหนียวดำ ที่ผ่านการแช่น้ำนาน 24 ชั่วโมง แล้วเพาะในหิ้งอกที่อุณหภูมิ 30 °ซ เป็นเวลา 6 วัน พบว่า ข้าวเหนียวทั้ง 3 พันธุ์ (150, 175 และ 170 $\mu\text{mole/g}$) มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าข้าวเจ้าทั้ง 3 พันธุ์ (125, 125 และ 120 $\mu\text{mole/g}$)

สิริธร (2552) ได้ตรวจสอบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าว 2 พันธุ์ คือ ข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 และข้าวกล้อง กข6 ซึ่งแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 °ซ นาน 3 ชั่วโมง แล้วเพาะให้เริ่มงอกเป็นเวลา 8-26 ชั่วโมง พบว่า ข้าวกล้องเริ่มงอกขาวดอกมะลิ 105 มีค่าอยู่ในช่วง 619.07-1,387.54 ไมโครกรัม/กรัม ส่วนข้าวกล้องเริ่มงอกกข6 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์อยู่ในช่วง 706.58-1,849.01 ไมโครกรัม/กรัม โดยเมื่อระยะเวลาเพาะข้าวกล้องทั้ง 2 พันธุ์นานขึ้น ส่งผลให้ข้าวกล้องเริ่มงอกมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มสูงกว่าข้าวกล้องปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากข้าวกล้องเริ่มงอกขาวดอกมะลิ 105 มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องเริ่มงอกกข6 ในทุกช่วงเวลาเพาะให้เริ่มงอก

นอกจากการย่อยสลายสตาร์ชในระหว่างข้าวงอกแล้ว ยังมีการย่อยสลายโปรตีนสะสมภายในเมล็ดข้าวด้วยเอนไซม์โปรติเอส ซึ่งเอนไซม์กลุ่มซิสทีอินโปรตีนเอส (Cysteine proteinase) ซึ่งเป็นเอนโด-โปรทีโอไลติกเอนไซม์ เป็นเอนไซม์หลักที่ทำหน้าที่ย่อยสลายโปรตีนสะสมในเมล็ดข้าว การสังเคราะห์เอนไซม์โปรติเอสเกิดขึ้นที่ชั้นแอลลิวโรน และเคลื่อนย้ายไปยังเอนโดสเปิร์มในระหว่างข้าวงอก กระบวนการเมแทบอลิซึมของสารประกอบไนโตรเจนจะเกิดขึ้นก่อนการย่อยสลายสตาร์ช ซึ่งการเริ่มต้นของกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อกลไกการป้องกันการย่อยสลายของโปรตีนสะสมในเมล็ดสิ้นสุดลง (พ้นระยะพักตัวของเมล็ด) ทำให้เกิดการกรดแอมิโน และเพปไทด์สายสั้นๆ จึงส่งผลให้ข้าวกล้องเริ่มงอกมีกลิ่นรสเฉพาะตัว ในระหว่างเมล็ดงอกนอกจากจะมีการย่อยสลายโปรตีนแล้ว ยังเกิดการสังเคราะห์โปรตีนควบคู่กันไปด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของสารประกอบไนโตรเจน ได้แก่ สายพันธุ์ ปริมาณสารประกอบไนโตรเจนเริ่มต้น และกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอส โดยเฉพาะเอนไซม์คาร์บอกซีเพปติเดส (Abe *et al.*, 1987; Muntz *et al.*, 2001; Yamada *et al.*, 2005)

Palmiano and Juliano (1972) ติดตามกระบวนการเมแทบอลิซึมในระหว่างข้าวงอก ปรากฏว่า เกิดการย่อยสลายโปรตีนและอาร์เอ็นเอ (RNA) โดยเอนไซม์โปรติเอส และไรโบนิวคลีเอส (Ribonuclease; RNase) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นก่อนการย่อยสลายสตาร์ช ส่งผลให้ปริมาณกรดแอมิโน และโปรตีนที่ละลายได้เพิ่มขึ้น เมื่อข้าวงอกในสภาวะมืดเป็นเวลา 3 วัน มีปริมาณกรดแอมิโนและโปรตีนที่ละลายได้สูงขึ้นจากเดิมเป็น 4.5 และ 1.0 เท่า ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสที่เพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 1.6 เท่า ส่วนปริมาณอาร์เอ็นเอของตัวอย่างลดลงจากเดิมเป็น 2.4 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับกิจกรรมของเอนไซม์ไรโบนิวคลีเอสที่เพิ่ม ขึ้นจากเดิมถึง 14 เท่า

Ohtsubo *et al.* (2005) เปรียบเทียบปริมาณโปรตีนในข้าว Koshihikari ระหว่างข้าวสาร ข้าวกล้อง และข้าวกล้องเริ่มงอก ปรากฏว่า ปริมาณโปรตีนมีค่าสูงสุดในรูปของข้าวกล้องเริ่มงอก (8.2 กรัม/100 กรัม) รองลงมา คือ ข้าวกล้อง (7.8 กรัม/100 กรัม) และข้าวสาร (6.6 กรัม/100 กรัม) ตามลำดับ

Yamada *et al.* (2005) นำข้าวกล้องสายพันธุ์จาปอนิกามาเพาะให้เริ่มงอก โดยแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้ววิเคราะห์ปริมาณสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมด และกิจกรรมของเอนไซม์โปรทีโอไลติก รวมทั้งกลุ่มโปรตีนที่ก่ออาการแพ้ เช่น 14-16-kDa และ 26-kDa ปรากฏว่า ข้าวกล้องเริ่มงอกมีปริมาณสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดต่ำกว่าข้าวกล้องปกติเล็กน้อย แต่กิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสในข้าวกล้องเริ่มงอกสูงกว่าข้าวกล้องปกติ 1.5 เท่า ส่วนโปรตีนที่ก่อให้เกิดการแพ้ มีปริมาณลดลงในระหว่างข้าวเริ่มงอก ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายด้วยซิสทีอินโปรตีนเอสในระหว่างข้าวเริ่มงอก

Charoenthaikij *et al.* (2009) ตรวจสอบปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าว 2 พันธุ์ คือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าว กข 6 ซึ่งแช่น้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35 °ซ นาน 24, 48 และ 72 ชั่วโมง สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ส่วนข้าว กข 6 แช่น้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35 °ซ นาน 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ปรากฏว่า ข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีปริมาณโปรตีนในช่วงร้อยละ 6.75-6.94 ส่วน ข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ กข 6 มีปริมาณโปรตีนในช่วงร้อยละ 7.51-7.89 โดยพบว่าเมื่อระยะเวลาแช่ ข้าวกล้องทั้ง 2 พันธุ์นานขึ้น ส่งผลให้ข้าวกล้องเริ่มงอกทั้ง 2 พันธุ์มีแนวโน้มของปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น และสูงกว่าข้าวกล้องปกติ

7.1.3 การอบแห้ง

เพื่อลดความชื้นของข้าวกล้องเริ่มงอกให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการเก็บรักษา เนื่องจากปริมาณความชื้นเป็นตัวชี้วัดคุณภาพ และความคงตัวต่อการเสื่อมเสีย ข้าวกล้องเริ่มงอกมีความชื้นสูงและอุดมไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์หลายชนิด ส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์เจริญและเพิ่มจำนวนมากขึ้น ดังนั้นควรนำข้าวกล้องเริ่มงอกไปผ่านการทำแห้งก่อนนำไปเก็บรักษา โดยควรลดความชื้นของข้าวลงให้เหลือไม่เกินร้อยละ 13 นอกจากนี้ยังมีวิธีการอื่นๆ ที่สามารถลดจำนวนจุลินทรีย์ในข้าวกล้องเริ่มงอกได้ เช่น การใช้ความดันสูง (Kinefuchi *et al.*, 1999) การฉายรังสียูวี (Suzuki and Maekawa, 1999) การแช่ในแอลกอฮอล์ (Komatsuzaki *et al.*, 2007) เป็นต้น

7.2 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังการทำข้าวให้เริ่มงอก

การทำข้าวให้เริ่มงอกพบว่า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารอาหารที่มีในเมล็ดข้าว เช่น น้ำตาล กรดแอมิโน โปรตีน (Saman *et al.*, 2008; Usansa *et al.*, 2009; Moongngarm and Saetung, 2010) วิตามิน แร่ธาตุ เส้นใยอาหาร กรดเฟอรูลิก และกรดไฟติก (Kayahara and Tukahara, 2000; Hunt *et al.*, 2002) เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะสารอาหารสำคัญที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำข้าวเริ่มงอก คือ กรดแกมมา แอมิโน บิวทิริก หรือเรียกว่า GABA (γ -Amino Butyric Acid; GABA)

Watanabe *et al.* (2004) ตรวจสอบปริมาณธาตุเหล็กในข้าวกล้องพันธุ์ Koshihikari ซึ่งผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 °ซ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการเริ่มงอก พบว่า ข้าวกล้องเริ่มงอก (3.2 มก./100 กรัม) มีปริมาณธาตุเหล็กแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากข้าวกล้องปกติ (3.1 มก./100 กรัม)

Heinemann *et al.* (2005) วิเคราะห์ปริมาณธาตุเหล็กในข้าวสายพันธุ์อินดิคาหนึ่ง สายพันธุ์ใน 4 รูป คือ ข้าวกล้อง ข้าวสาร ข้าวเน็งกล้อง และข้าวสารเน็ง มีค่า 0.57, 0.40, 0.55 และ 0.43 มิลลิกรัม/100

กรัม ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ปริมาณธาตุเหล็กของข้าวทั้ง 4 รูปแบบ มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

Ohtsubo *et al.* (2005) เปรียบเทียบปริมาณสารอาหารในข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ Koshihikari หลังจากแช่ข้าวกล้องที่อุณหภูมิ 30 °ซ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง กับข้าวสาร และข้าวกล้องปกติ ปรากฏว่า ข้าวกล้องเริ่มงอกมีปริมาณกรดเฟอรูลิก โยอาหารทั้งหมด ออริซานอล และ GABA เพิ่มขึ้นสูงกว่าทั้งข้าวกล้อง และข้าวสาร

Zhang *et al.* (2005) เปรียบเทียบปริมาณสารอาหารระหว่างข้าวกล้องที่มีลักษณะขนาดปกติ กับข้าวกล้องที่มีการเหนียวทำให้มีขนาดคัพพะใหญ่ขึ้น ในข้าว 2 สายพันธุ์ คือ II32B และ Xiushui 110 โดยนำข้าวกล้องที่มีคัพพะทั้ง 2 แบบไปผ่านการทำให้เริ่มงอก โดยการแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ข้าวกล้องเริ่มงอกมีปริมาณสารอาหาร 6 ชนิดที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากข้าวกล้องปกติ คือ GABA ไลซีน แมกนีเซียม วิตามินบี 1 วิตามินอี และแคลเซียม โดยข้าวกล้องที่มีการเหนียวทำให้มีขนาดคัพพะใหญ่ขึ้น มีปริมาณสารอาหารสูงกว่าข้าวกล้องที่มีขนาดคัพพะปกติ

GABA เป็นอนุพันธ์ของกรดไขมัน ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายโซ่คาร์บอน 4 ตัวเกาะกับหมู่เอมีน GABA ประกอบด้วยหมู่เอมีน และคาร์บอนซิกลิกบนโมเลกุลเดียวกัน แต่ไม่จัดเป็นกรดเอมีน เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของ GABA ไม่มีอะตอมคาร์บอนชนิดแอลฟา (α -carbon atom) และไม่ได้เป็นหน่วยย่อยของโปรตีน (วิสิฐ และคณะ, 2552) เนื่องจาก GABA มีหมู่เอมีนจับตัวอยู่กับอะตอมคาร์บอนชนิดแกมมา (γ -carbon atom) ทำให้ฟอร์มตัวอยู่ในรูปอิสระ ละลายน้ำได้ดี และมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นทำให้สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้เมื่อละลายน้ำ ในพืชโดยทั่วไปมี GABA เพียงเล็กน้อย แต่เมื่อได้รับความเครียด เช่น ความร้อน ออกซิเจนที่มาก และฮอร์โมน จะเกิดการสะสมของ GABA มากขึ้น (Reggiani *et al.*, 1988; Kinnersley and Turano, 2000) สาร GABA นี้ พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท (Neurotransmitter) ในสมอง และไขสันหลังของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เกิดขึ้นจากกระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ของกรดกลูตามิก (L-glutamic acid) โดย Cytosolic enzyme glutamate decarboxylase (GAD) ซึ่งเปลี่ยนกรดกลูตามิกไปเป็น GABA และคาร์บอนไดออกไซด์ (Lui *et al.*, 2005) เอนไซม์ GAD นี้พบได้ทั่วไปในสัตว์ พืชชั้นสูง และจุลินทรีย์ (Zhang *et al.*, 2007) สาร GABA มีบทบาทสำคัญเกี่ยวข้องกับระบบประสาทส่วนกลาง มีคุณสมบัติในด้านช่วยรักษาโรคทางด้านระบบประสาท เช่น โรควิตกกังวล นอนไม่หลับ โรคลมชัก ช่วยลดความดันโลหิต ลด LDL ลดอาการอัลไซเมอร์ ลดน้ำหนัก ทำให้ผิวพรรณดี กระบวนการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอก นอกจากช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดข้าวแล้ว ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางด้านเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวด้วยเช่นกัน โดยเมื่อนำข้าวกล้องเริ่ม

งอกไปหุงสุก ข้าวกล้องเริ่มงอกหุงสุกที่ได้มีเนื้อสัมผัสนุ่ม และรสชาติที่ดีกว่าข้าวกล้องปกติหุงสุกอีกด้วย (Ito and Ishikawa, 2004)

Watanabe *et al.* (2004) ตรวจสอบปริมาณ GABA ในข้าวกล้องพันธุ์ Koshihikari ซึ่งผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 8, 16 และ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการเริ่มงอก พบว่า ข้าวกล้อง (3.2 มก./100 กรัม) มีปริมาณ GABA เพิ่มขึ้นตามชั่วโมงการแช่ข้าวที่นานขึ้น (9.0, 9.6 และ 13.0 มก./100 กรัม ตามลำดับ)

Banchuen *et al.* (2009) ตรวจสอบปริมาณ GABA ในข้าวพันธุ์แสงยอดเมืองพัทลุง ซึ่งผ่านการแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ พีเอช 3 ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกเป็นเวลา 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ปรากฏว่า ข้าวกล้อง (2.64 มก. /100 กรัม) มีปริมาณ GABA เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเพาะให้เริ่มงอกนานขึ้น (9.12-44.53 มก. /100 กรัม) โดยมีค่าสูงสุดที่ชั่วโมงการเพาะให้เริ่มงอกที่ 36 ชั่วโมง (44.53 มก. /100 กรัม) แต่มีค่าลดลงเมื่อเพาะให้เริ่มงอกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (39.04 มก. /100 กรัม)

Banchuen *et al.* (2010) ตรวจสอบปริมาณ GABA ในข้าว 3 พันธุ์ ได้แก่ เหนียวดำเปลือกดำ แสงยอดเมืองพัทลุง และเชิงพัทลุง ซึ่งผ่านการแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ พีเอช 3 ที่อุณหภูมิ 30 ± 2 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกเป็นเวลา 12, 24, 36 และ 48 ชั่วโมง ปรากฏว่า ข้าวแสงยอดเมืองพัทลุง และข้าวเชิงพัทลุง (9.12-44.53 และ 16.91-29.25 มก. /100 กรัม ตามลำดับ) มีปริมาณ GABA เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเพาะให้เริ่มงอกที่นานขึ้น (9.12-44.53 มก. /100 กรัม) โดยมีค่าสูงสุดที่ชั่วโมงการเพาะให้เริ่มงอกที่ 36 ชั่วโมง แต่มีปริมาณลดลงเมื่อเพาะให้เริ่มงอกเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ส่วนข้าวเหนียวดำเปลือกดำ มีปริมาณ GABA เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเพาะให้เริ่มงอกที่นานขึ้นเช่นกัน (8.49-40.72 มก. /100 กรัม) แต่มีค่าสูงสุดที่ชั่วโมงการเพาะให้เริ่มงอกที่ 48 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตาม ข้าวที่ผ่านการทำให้เริ่มงอกมีความชื้นสูง และอุดมด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์หลายชนิด ซึ่งเอื้อต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี จากรายงานของ Trachoo *et al.* (2006) พบว่า เมื่อนำข้าวกล้องมาผ่านกระบวนการทำงอกที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำไปทำแห้ง และบดเป็นแป้ง จากนั้นนำไปเป็นส่วนประกอบในอาหารเลี้ยงเชื้อของโพรไบโอติกแบคทีเรีย (Probiotic bacteria) คือ *L. plantarum* พบว่า เชื้อแบคทีเรียตัวนี้สามารถเจริญได้ดีที่สุดในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีการเติมแป้งข้าวงอกดังกล่าว นอกจากนี้ Kimanya *et al.* (2003) พบว่า หลังจากงอก Finger millet และ Kidney bean แล้วนำไปทำแห้งโดยการใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคได้ อย่างไรก็ตาม การปนเปื้อนของ *B. cereus* และ *S. aureus* ในช่วงก่อนหรือระหว่างกระบวนการทำงอก เป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของจุลินทรีย์ทั้ง

สองชนิดได้ ซึ่งการเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคในระหว่างการเพาะเมล็ดพืชวงศ์ถั่ว และธัญชาติหลายๆ ชนิดให้เริ่มงอก เป็นผลทำให้เกิดการผลิตสารพิษที่สามารถทนต่อความร้อนได้ ซึ่งทำให้ไม่ปลอดภัยที่จะบริโภคเมล็ดพืชที่งอกได้ การเพิ่มขึ้นหรือการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์นี้ จึงมีผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค ดังนั้น ก่อนการนำข้าวงอกไปบริโภคจึงควรลดความชื้นของข้าวลงให้เหลือไม่เกินร้อยละ 14 โดยกระบวนการทำแห้ง ซึ่งยังมีวิธีการอื่นๆ ที่ช่วยลด และป้องกันจำนวนจุลินทรีย์ในข้าวงอกได้ เช่น การใช้ความร้อนจากไอน้ำ วิธีการหนึ่ง คือ การประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตข้าวึ่ง (Parboiled rice) หลังการทำข้าวงอก กระบวนการผลิตข้าวึ่งถือว่าเป็นกระบวนการสเตอริไรซ์เมล็ดข้าวทางหนึ่ง จึงน่าจะเป็นวิธีที่สามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ลงได้ (Bhattacharya, 1985, 1996)

8. ขนมขบเคี้ยว (Snack food) และผลิตภัณฑ์อาหารว่างแบบกรอบพอง

8.1 ขนมขบเคี้ยว (Snack food)

ขนมขบเคี้ยว ตามความหมายจัดเป็นอาหารว่าง หรืออาหารที่บริโภคในระหว่างมื้อหลัก โดยไม่ใช่เป็นอาหารหลัก เป็นอาหารที่บริโภคได้ง่าย สะดวก สามารถนำติดตัวไปได้ทุกที่ทุกเวลา ทั้งยังเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง เนื่องจากมีส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรตในปริมาณสูงจึงช่วยให้อิ่มท้องได้ การจัดแบ่งประเภทของขนมขบเคี้ยวไม่ชัดเจนนัก สามารถแบ่งประเภทของผลิตภัณฑ์โดยอาศัยเกณฑ์ต่างๆ ได้หลายแบบ (กฤตลักษณ์, 2553) ได้แก่ 1) แบ่งตามประเภทของส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการผลิต 2) แบ่งประเภทตามอุณหภูมิอาหารขณะเสิร์ฟ เป็นประเภทร้อน หรือประเภทเย็น 3) แบ่งประเภทตามอายุการเก็บรักษา เป็นประเภทที่มีอายุการเก็บรักษาสั้น และประเภทที่มีอายุการเก็บรักษานาน 4) แบ่งประเภทตามกรรมวิธีการผลิต

อย่างไรก็ตาม ขนมขบเคี้ยวแต่ละชนิดใช้กรรมวิธีการผลิตหลายวิธีด้วยกัน จึงทำให้ยากต่อการจัดแบ่งที่ชัดเจน ในปัจจุบันตลาดขนมขบเคี้ยวจัดเป็นตลาดขนาดใหญ่ มีอัตราการเติบโตอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ซึ่งทำรายได้และมีมูลค่านับหมื่นล้านบาทต่อปี ขนมขบเคี้ยวแต่เดิมมักจะถูกเรียกกันว่าเป็นอาหารขยะ เนื่องจากวัตถุดิบส่วนใหญ่มีคุณค่าทางอาหารน้อย ขาดสารสำคัญที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพและทำให้เกิดโรคอ้วน แต่ปัจจุบันผู้บริโภคมีความสนใจต่อสุขภาพมากขึ้นทำให้เริ่มมองหาผลิตภัณฑ์อาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการและดีต่อสุขภาพ เน้นการปรุงแต่งโดยใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการในอนาคตที่การผลิตขนมขบเคี้ยวต้องคำนึงถึงสุขภาพและการควบคุมน้ำหนัก นอกเหนือไปจากรสชาติ เนื้อสัมผัส และรูปลักษณ์ที่สนองความต้องการของผู้บริโภค รวมทั้งมีคุณค่าทางโภชนาการตามหลักมาตรฐานสากล (จุพาลักษณ์, 2550)

สำหรับขนมขบเคี้ยวที่เคี้ยวโตอย่างมากในปัจจุบัน และเป็นที่ยุติกันอย่างแพร่หลาย คือ ขนมขบเคี้ยวจากแป้ง/ธัญชาติ หรือขนมขบเคี้ยวรูป ส่วนใหญ่อยู่ในรูปพอง เบาและกรอบ มีทั้งชนิดที่พองตัวด้วยไอน้ำที่เกิดจากแรงอัด ทอดหรืออบ หรือกลุ่มขนมปังกรอบซึ่งมีการพองตัวเนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นขณะทำการอบ (กฤตลักษณ์, 2553)

8.2 ผลิตภัณฑ์อาหารว่างแบบกรอบพอง: ผลิตภัณฑ์ข้าวพอง (Expanded rice)

ในประเทศที่พัฒนาแล้ว ผลิตภัณฑ์อาหารเข้าธัญชาติพร้อมบริโภคครอบคลุมถึงผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ Rice flakes, oven-puffed, gun-puffed or extruder-puffed rice, shredded rice cereal and multi grain cereals (Brockington and Kelly, 1972; Luh and Bhumiratana, 1980) ผลิตภัณฑ์เหล่านี้อยู่ในกลุ่มผลิตภัณฑ์พร้อมบริโภค (Ready-to-eat) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของสตาร์ชข้าว

ข้าวพอง หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำข้าวเจ้าหรือข้าวเหนียวมาหุงให้สุก ผึ่งแดดหรืออบให้แห้ง นำมาทอดหรือคั่วให้พอง คลุกกับส่วนผสมของน้ำ น้ำตาล และเบะแซ่ที่เกี่ยวข้องจนเหนียวพอเหมาะ อาจเติมสีผสมอาหาร หรือส่วนประกอบอื่น เช่น งาดำ อัดเป็นแผ่น ตัดเป็นชิ้น (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2548)

ข้าวกรอบพอง เป็นอาหารเข้าธัญชาติชนิดดั้งเดิม และเป็นผลิตภัณฑ์อาหารว่าง (Juliano and Sakurai, 1985) กรรมวิธีการผลิตข้าวกรอบพองแบบดั้งเดิม ทำโดยให้ความร้อนแก่ข้าวเปลือก ซึ่งมีความชื้นร้อยละ 13-17 ที่อุณหภูมิประมาณ 240°C เป็นเวลา 30-35 วินาที หรือที่ 275°C เป็นเวลา 40-45 วินาที หรือทอดในน้ำมันอุณหภูมิ $215-230^{\circ}\text{C}$ (Juliano, 1998)

ข้าวพองเตรียมได้จากการนำข้าวไปให้ความร้อนขึ้นด้วยน้ำ (Hydro-heated) จากนั้นอบแห้งให้มีความชื้นในระดับที่เหมาะสมต่อการพองตัวของเมล็ดข้าว โดยปริมาณความชื้นที่เหมาะสมต่อการพองตัวของข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้วอยู่ที่ประมาณร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนักเปียก (Chinnaswamy and Bhattacharya, 1983) ซึ่งถ้าต้องการทำข้าวให้พองด้วยวิธีการทอดในน้ำมัน เมล็ดข้าวต้องมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8-14 (Roberts *et al.*, 1951) หลังจากอบแห้งข้าวจนมีความชื้นในระดับที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นจึงนำข้าวไปทำให้พองด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงด้วยอากาศ น้ำมัน หรือทราย เป็นต้น ซึ่ง Robert *et al.* (1951) พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำข้าวให้พองด้วยการทอดในน้ำมันมีค่าอยู่ในช่วง $200-220^{\circ}\text{C}$ ในระหว่างกระบวนการพองตัวนั้น เมล็ดข้าวจะมีปริมาตรที่เพิ่มขึ้นหลายเท่า และเมื่อให้ความร้อนอย่างเต็มที่แล้ว เมล็ดข้าวจะกรอบ มีความพรุน และสามารถบริโภคได้ทันที

ข้าวสารหนึ่งสามารถทำเป็นข้าวพองกรอบได้โดยการให้ลมร้อนแก่ข้าวสารหนึ่ง หรือนำข้าวสารหนึ่งไปคั่วด้วยทรายร้อน (Juliano and Sakuri, 1985; Villareal and Juliano, 1987) การนำข้าวสารหนึ่งมาผลิตเป็นข้าวพองกรอบนั้น ปริมาตรของข้าวพองกรอบแปรผันโดยตรงกับระดับความรุนแรงของระดับความร้อนที่ให้กับเมล็ดข้าวในระหว่างกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง โดยปริมาตรของข้าวพองมีค่ามากที่สุดที่ในข้าวเหนียว (Antonio and Juliano, 1973)

น้ำฝน (2548) พบว่า เมล็ดข้าวหนึ่งมีลักษณะคงรูปได้ดีกว่าข้าวสารหุงสุก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการผลิตข้าวเปลือกหนึ่ง ซึ่งทำให้สตาร์ชข้าวหนึ่งเจลาติไนซ์กระจายตัวแทรกอยู่ในโปรตีน แทนที่ช่องว่างรอบๆ เป็นผลให้เนื้อสัมผัสของข้าวแน่น และแข็งกว่าข้าวสาร ข้าวหนึ่งจึงมีลักษณะคงรูปได้ดีกว่าข้าวสาร ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของโปรตีน สตาร์ชและลิพิดในระหว่างกระบวนการผลิตข้าวเปลือกหนึ่ง ซึ่งอาจมีการเชื่อมโยงระหว่างโปรตีนกับเม็ดสตาร์ชและการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสบางส่วนที่ซึมออกมาจากเม็ดสตาร์ชกับฟิสิกส์จึงส่งผลทำให้ผิวรอบของเมล็ดข้าวหนึ่งมีความคงรูปร่างได้ดีกว่าเมล็ดข้าวขาว เปรียบเสมือนมีฟิล์มหรือผนังหุ้มเมล็ดข้าวอีกหนึ่งชั้นหนึ่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 วัตถุดิบข้าวเปลือกจำนวน 3 สายพันธุ์

1.1.1 ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 1 จาก สำนักวิจัยและพัฒนา กรมการข้าว เก็บเกี่ยวเดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2550

1.1.2 ข้าวเจ้าพันธุ์สินเหล็ก จากศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เก็บเกี่ยวเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2551

1.1.3 ข้าวเหนียวพันธุ์กข6 จากสำนักวิจัย และพัฒนา กรมการข้าว เก็บเกี่ยวเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2550

1.2 น้ำมันพืช (น้ำมันรำข้าว ยี่ห้อคิง)

2. อุปกรณ์ผลิตแป้ง/ ข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และ ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

2.1 ตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18 °ซ รุ่น SF-C95 ผลิตโดยบริษัทซันโย ประเทศไทย

2.2 ตู้เย็นอุณหภูมิ 4 °ซ รุ่น SRF-F215A ผลิตโดยบริษัทซันโย ประเทศไทย

2.3 อ่างน้ำที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ (Water bath) รุ่น UM-WB20L ผลิตโดยบริษัท UMAC Scientific ประเทศไทย

2.4 ตู้ควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ (Controlled temperature & humidity oven) รุ่น WTB ผลิตโดยบริษัท Binder ประเทศเยอรมนี

2.5 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ผลิตโดยบริษัท Binder ประเทศเยอรมนี

2.6 ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray drier) ผลิตโดยบริษัท Reliance Tech-Service ประเทศไทย

2.7 หม้อนึ่งความดันไอน้ำ ผลิตโดยบริษัท FAGOR ประเทศสเปน

2.8 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter) รุ่น Microcomputer pH-vision 6071 ผลิตโดยบริษัท Jenco Electronics Limited ประเทศจีน

2.9 เครื่องบดตัวอย่างแบบค้อน (Hammer mill) รุ่น ZM 1 ผลิตโดยบริษัท Retsch ประเทศเยอรมนี

2.10 เครื่องบดของแห้ง (Blender) รุ่น Moulinex ประเทศอินโดนีเซีย

2.11 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น GT4100 ผลิตโดยบริษัท OHAUS ประเทศสหรัฐอเมริกา

2.12 ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช ผลิตโดยบริษัท Retsch ประเทศเยอรมนี

2.13 เทอร์โมมิเตอร์

2.14 นาฬิกาจับเวลา

2.15 เครื่องกะเทาะเปลือก

2.16 เครื่องขัดขาว

2.17 ถุงผ้าดิบ

2.18 ผ้าขาวบาง

2.19 แผ่นพลาสติกใสสำหรับห่อหุ้มอาหาร

2.20 ตะแกรงร่อนสแตนเลส

2.21 ถาดสแตนเลส

2.22 เต้าแก๊ส

2.23 อุปกรณ์เครื่องครัว

3. อุปกรณ์วิเคราะห์คุณภาพของแป้ง/ เมล็ดข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

3.1 วิเคราะห์คุณภาพทางฟิสิกส์

3.1.1 เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์

3.1.2 เครื่องวัดสี (Colorimeter) รุ่น CR-310 ผลิตโดยบริษัท Minolta ประเทศญี่ปุ่น

3.1.3 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น GT4100 ผลิตโดยบริษัท OHAUS ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.4 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AP210S ผลิตโดยบริษัท OHAUS ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.5 กล้องถ่ายภาพระยะใกล้

3.1.6 กระจายกราฟ

3.1.7 เครื่องปิดผนึก

3.1.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) JEOL, JSM, 5600 LV ประเทศอังกฤษ

3.2 วิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

3.2.1 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ผลิตโดยบริษัท Binder ประเทศเยอรมนี

3.2.2 เครื่องมือหุควิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ประกอบด้วย เครื่องย่อย (K-435 Digestion Unit) และเครื่องกลั่น (B-324 Distillation Unit) ผลิตโดยบริษัท Labortechnik AG ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2.3 เครื่องหุควิเคราะห์ปริมาณไขมัน (Soxtec System) รุ่น HT 1043 ผลิตโดยบริษัท Tecator ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2.4 เตาเผา (Muffle furnace) รุ่น Tactical 308 ผลิตโดยบริษัท Gallenkamp ประเทศอังกฤษ

3.2.5 เครื่องปั่นเหวี่ยงตกตะกอนพร้อมระบบควบคุมความเย็น (Refrigerated Centrifuge) รุ่น Himac CR 20 B2 ผลิตโดยบริษัท Hitachi Koki ประเทศญี่ปุ่น

3.2.6 เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) รุ่น Thermo Genesys 10 series ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.7 เครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) รุ่น Agilent 1100 series ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.8 เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส (pH meter) รุ่น Microcomputer pH-vision 6071 ผลิตโดยบริษัท Jenco Electronics Limited ประเทศจีน

3.2.9 Vortex mixer รุ่น G-560E ผลิตโดยบริษัท Scientific industries ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.10 ถ้วยสำหรับเผาถ้ำ (Crucible)

3.2.11 ตะเกียงเบนเสน

3.2.12 โถดูดความชื้น (Desiccator)

3.2.13 อุปกรณ์เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ

3.3 วิเคราะห์คุณภาพทางเคมีเชิงฟิสิกส์

3.3.1 เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) รุ่น RVA3D บริษัท Newport Scientific Instruments & Engineering ประเทศออสเตรเลีย

4. อุปกรณ์ผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวพอง

4.1 ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray drier) ผลิตโดยบริษัท Reliance Tech-Service ประเทศไทย

4.2 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น GT4100 ผลิตโดยบริษัท OHAUS ประเทศสหรัฐอเมริกา

4.3 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น AP210S ผลิตโดยบริษัท OHAUS ประเทศสหรัฐอเมริกา

4.4 เครื่องวัดอุณหภูมิอาหาร (Digital thermocouple)

4.5 หม้อหุงข้าวไฟฟ้า

- 4.6 เครื่องปิดผนึก
- 4.7 นาฬิกาจับเวลา
- 4.8 ถังรีทอร์ต
- 4.9 กระดาษดูดซับน้ำมัน
- 4.10 เตาแก๊ส
- 4.11 อุปกรณ์เครื่องครัว

5. อุปกรณ์วิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวพอง

- 5.1 วิเคราะห์คุณภาพทางฟิสิกส์
 - 5.1.1 ชุดเครื่องมือวัดความหนาแน่นของอาหารขบเคี้ยว: กระทบดวง เครื่องชั่งน้ำหนัก และเมล็ดงาขาว
 - 5.1.2 เครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer) รุ่น TA-XT Plus ผลิตโดยบริษัท Stable Systems ประเทศอังกฤษ
- 5.2 วิเคราะห์คุณภาพทางจุลินทรีย์
 - 5.3.1 อุปกรณ์การทดสอบทางจุลินทรีย์
- 5.3 วิเคราะห์คุณภาพทางประสาทสัมผัส
 - 5.3.1 อุปกรณ์การทดสอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ แก้วน้ำ ถาดสแตนเลส ช้อน ด้วยพลาสติก

6. อุปกรณ์ประมวลผลข้อมูล

- 6.1 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์
- 6.2 โปรแกรมวิเคราะห์ผลทางสถิติ SPSS

วิธีการ

1. การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบข้าวเปลือกจำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวเจ้าพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ข้าวเจ้าพันธุ์สินเหล็ก และข้าวเหนียวพันธุ์กข6 นำมาร่อนผ่านตะแกรงอะลูมิเนียม เพื่อแยกสิ่งแปลกปลอมทางกายภาพ และแมลงออก แล้วแบ่งบรรจุใส่ถุงพลาสติกชนิดเย็น ถุงละ 2 กิโลกรัม ปิดผนึกถุง นำไปเก็บในตู้แช่เยือกแข็งที่

อุณหภูมิ -18 °ซ เป็นเวลา 6 เดือน ก่อนนำข้าวแต่ละพันธุ์มาเตรียมเป็นข้าว 5 ชนิด คือ ข้าวสาร (White rice; WR) ข้าวกล้อง (Brown Rice; BR) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (Pre-Germinated Brown Rice; PGBR) ข้าวึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (Parboiled Brown Rice; PBR) และข้าวึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (Parboiled Pre-Germinated Brown Rice; PPGBR) เพื่อวิเคราะห์คุณภาพทางด้านต่างๆ ต่อไป

2. การเตรียมเมล็ดข้าว /แป้งข้าว

2.1 การเตรียมข้าวกล้อง

ข้าวเปลือกแต่ละพันธุ์ จำนวน 2 กิโลกรัม นำไปกะเทาะเปลือกออกโดยเครื่องกะเทาะเปลือกขนาดเล็ก ได้เป็นเมล็ดข้าวกล้อง

2.2 การเตรียมข้าวสาร

ข้าวเปลือกแต่ละพันธุ์ จำนวน 2 กิโลกรัม นำเข้าเครื่องขัดขาว เพื่อได้เป็นเมล็ดข้าวสาร

2.3 การเตรียมแป้งข้าวกล้อง และข้าวสาร

แป้งข้าวกล้อง และข้าวสาร ที่เตรียมได้นำมาบดลดขนาดเบื้องต้นด้วยเครื่องบดของแห้ง (Blender) แล้วบดละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างแบบค้อน (Hammer mill) จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ได้เป็นแป้งข้าวกล้อง และแป้งข้าวสาร บรรจุแป้งข้าวแต่ละชนิดในถุงพลาสติก และเก็บในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 °ซ) ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพต่างๆ

3. ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

3.1 การดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าวเปลือก

แป้งเมล็ดข้าวแต่ละพันธุ์ชั่งน้ำหนัก ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปา (พีเอช 7.2) แยกเมล็ดลึบ เมล็ดเสีย และเมล็ดอ่อนออก เลือกเฉพาะเมล็ดที่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถคัดได้โดยนำเมล็ดข้าวเปลือกใส่ลงในสารละลายน้ำเกลือที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.08 เตรียมได้โดยนำโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 1.7 กิโลกรัม ผสมกับน้ำ 10 ลิตร (ประพาส, 2526) จากนั้นช้อนเมล็ดที่ลอยอยู่บนผิวน้ำเกลือทิ้งไป นำเมล็ดที่จมอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ล้างด้วยน้ำประปาหลายๆ ครั้ง บรรจุเมล็ดข้าวลงในถุงผ้าดิบ นำไปแช่ในอ่าง

น้ำควบคุมอุณหภูมิที่มีระบบหมุนเวียนน้ำที่ 30°C ที่ระยะเวลาต่างๆ ในช่วง 2-36 ชั่วโมง สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวขึ้นจากน้ำแช่ทุกๆ 2 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AACC, 2000) เพื่อตรวจสอบการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าวเปลือกโดยเปลี่ยนน้ำที่ใช้แช่ทุกๆ 6 ชั่วโมง

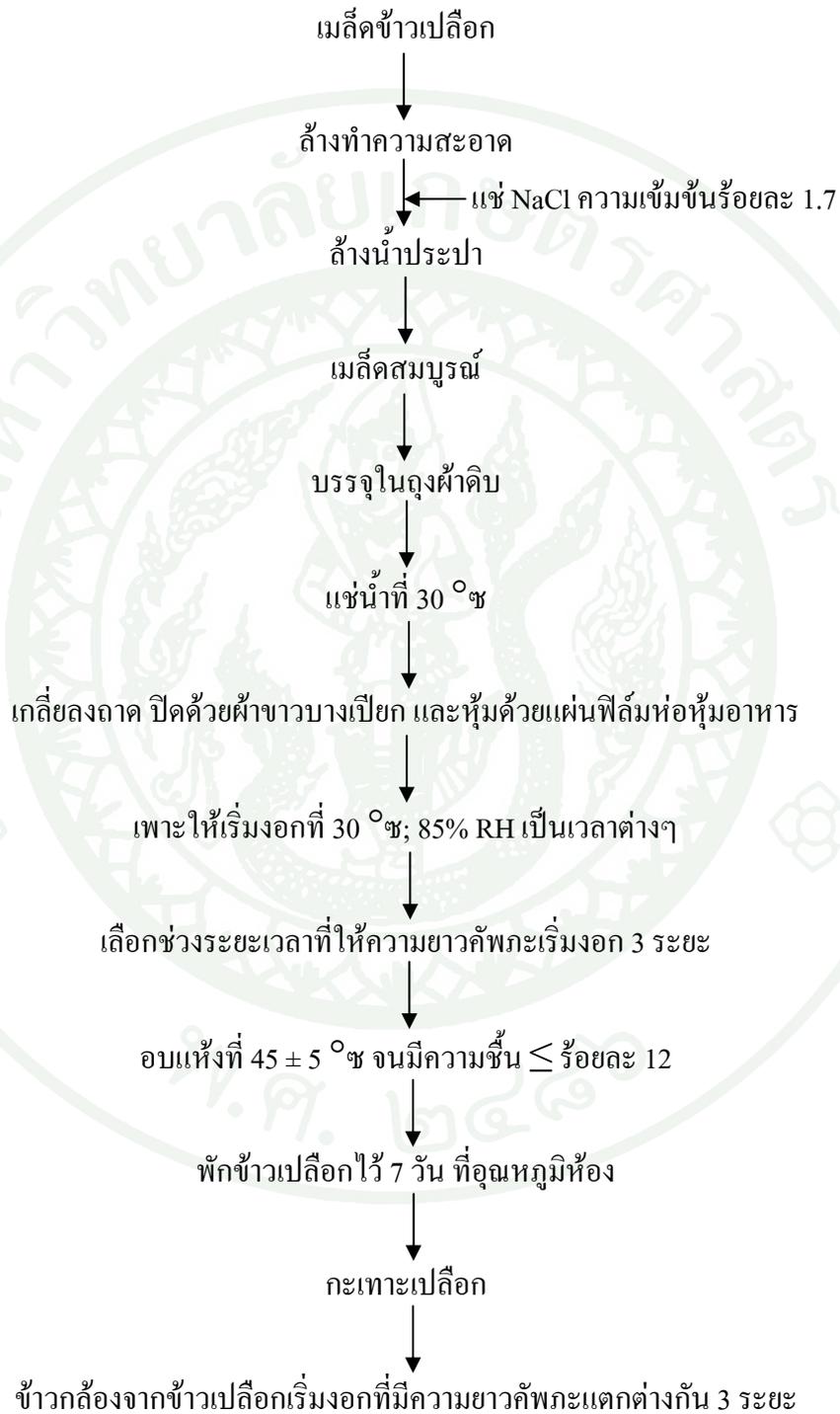
3.2 ร้อยละการเริ่มงอก (ดัดแปลงจากวิธีการของสุพัตรา, 2546)

นำเมล็ดข้าวเปลือกแต่ละพันธุ์จากข้อ 3.1 ที่แช่น้ำ 30°C เป็นเวลา 2-36 ชั่วโมง ซึ่งมีกระบวนการเปลี่ยนน้ำที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือกทุกๆ 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างข้าวขึ้นจากน้ำแช่ทุกๆ 2 ชั่วโมง แล้วเกลี่ยเมล็ดข้าวเปลือกลงในถาดที่ปูทับด้วยผ้าขาวบางเปียกชื้น และปิดบริเวณผิวหน้าของเมล็ดข้าวเปลือกด้วยผ้าขาวบางที่เปียกชื้นอีกชั้นหนึ่ง หุ้มถาดด้วยแผ่นพลาสติกใสสำหรับห่อหุ้มอาหาร นำไปเพาะให้เริ่มงอกในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่เวลา 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 และ 36 ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบร้อยละการเริ่มงอกซึ่งสุ่มนับจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้งหมดจำนวน 100 เมล็ด โดยคัดเลือกระยะเวลาการแช่ร่วมกับระยะเวลาการเพาะข้าวเปลือกให้เริ่มงอกที่สั้นที่สุดที่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีร้อยละการเริ่มงอกที่ดี คือ ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 (กรมการข้าว, 2553)

3.3 การผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (ดัดแปลงจากวิธีการของสิริธร, 2552; Komatsuzaki *et al.*, 2007)

หลังจากคัดเลือกระยะเวลาการแช่ที่สั้นที่สุดที่ให้ร้อยละการเริ่มงอกของเมล็ดข้าวเปลือกมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 หลังนำไปเพาะให้เริ่มงอกได้แล้ว จากนั้นจึงหาระยะเวลาการเพาะเมล็ดข้าวเปลือกที่ให้ส่วนคัพภะเริ่มงอกมีความยาวแตกต่างกัน 3 ระยะ คือ 1) คัพภะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 0.5-1 มิลลิเมตร 2) คัพภะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 1-2 มิลลิเมตร และ 3) คัพภะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 2-3 มิลลิเมตร โดยนำเมล็ดข้าวเปลือกที่สมบูรณ์ บรรจุลงในถุงผ้าดิบ นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่มีระบบหมุนเวียนน้ำที่ 30°C เป็นเวลาเท่ากับเวลาการแช่ที่สั้นที่สุดที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.2 จากนั้นนำข้าวเปลือกเกลี่ยลงในถาดที่ปูทับด้วยผ้าขาวบางเปียกชื้น และปิดบริเวณผิวหน้าของเมล็ดข้าวเปลือกด้วยผ้าขาวบางที่เปียกชื้นอีกชั้นหนึ่ง หุ้มถาดด้วยแผ่นพลาสติกใสสำหรับห่อหุ้มอาหาร นำไปเพาะให้เริ่มงอกในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 ที่ระยะเวลาต่างๆ จนข้าวเปลือกมีความยาวคัพภะเริ่มงอกแตกต่างกัน 3 ระยะดังกล่าว ซึ่งข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะที่ได้นี้ต้องมีร้อยละการเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะเริ่มงอกของแต่ละระยะมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 พร้อมทั้งสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือกเพื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้น แล้วนำไปอบแห้งที่ตู้อบลมร้อนชนิดถาด ที่อุณหภูมิ $45 \pm 5^{\circ}\text{C}$ จนตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มงอกมีความชื้นน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 12 จึงพักตัวอย่างข้าวเปลือกเริ่มงอกอบแห้งไว้

เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (30°C) ก่อนนำไปกะเทาะเปลือกออกเป็นข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน การผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ

ที่มา: ดัดแปลงจากวิธีการของสิริธร (2552) และ Komatsuzaki *et al.* (2007)

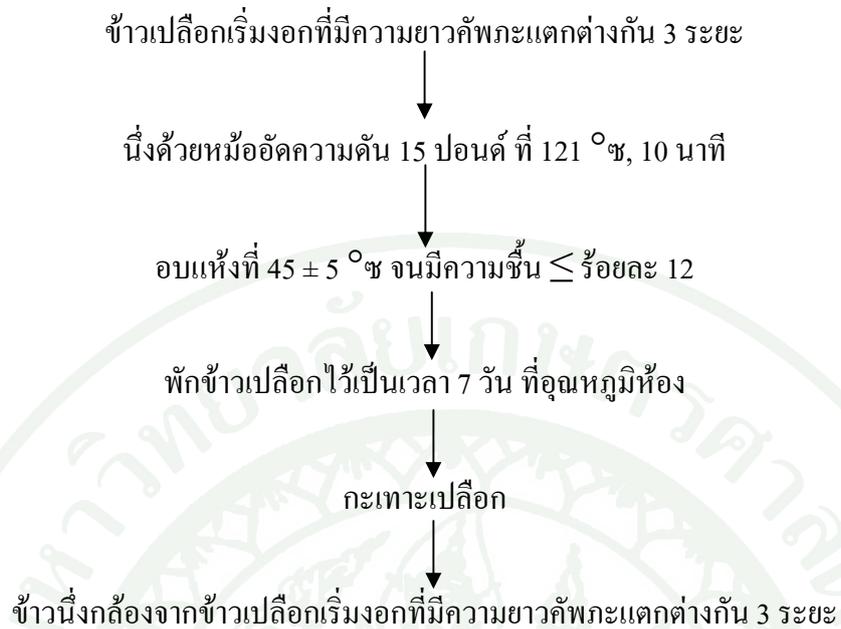
3.4 การเตรียมแป้งข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

นำเมล็ดข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ ของข้าวแต่ละพันธุ์ที่เตรียมได้มาบดลดขนาดเบื้องต้นด้วยเครื่องบดของแห้ง (Blender) แล้วบดละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างแบบค้อน (Hammer mill) จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ได้เป็นแป้งข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก บรรจุแป้งข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในถุงพลาสติก และเก็บในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพ

4. ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก คัดแปลงจากวิธีการของน้ำฝน (2548)

4.1 การผลิตข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

หลังจากผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกได้ทั้ง 3 ระยะแล้ว นำมาเข้ากระบวนการนี้ต่อไป เพื่อผลิตเป็นข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก โดยนำข้าวเปลือกที่เริ่มงอก หนึ่งด้วยหม้ออัดความดัน 15 ปอนด์ ที่ 121°C เป็นเวลา 10 นาที และทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนชนิดถาด อุณหภูมิ $45 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ได้ความชื้นน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 12 พักข้าวหนึ่งจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไว้เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนกะเทาะเปลือกเป็นข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ การผลิตข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 9

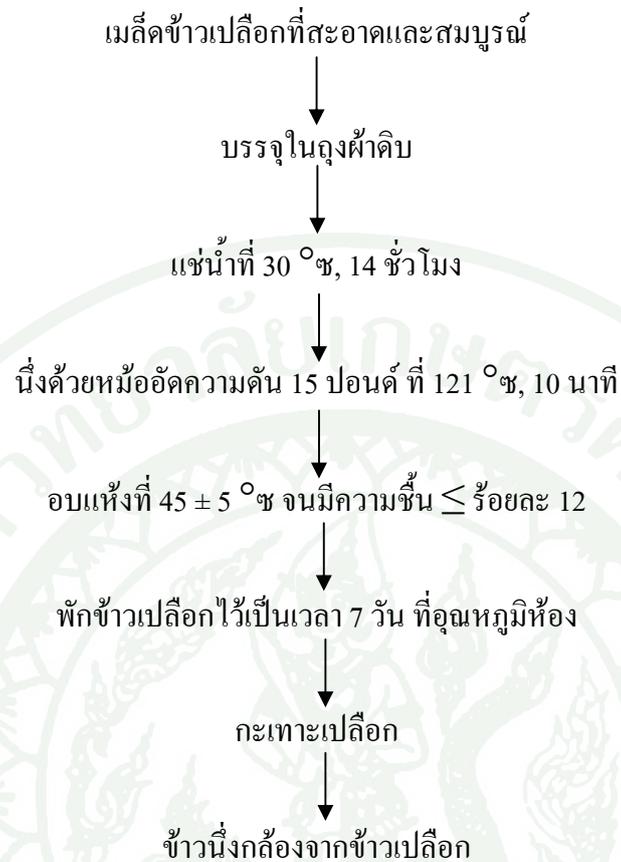


ภาพที่ 9 การผลิตข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพพะแตกต่างกัน 3 ระยะ

ที่มา: ดัดแปลงจากวิธีการของน้ำฝน (2548)

4.2 การผลิตข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือก

นำเมล็ดข้าวแต่ละพันธุ์ที่ผ่านการล้างทำความสะอาด และคัดเลือกเฉพาะเมล็ดที่สมบูรณ์แล้วนำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่มีระบบหมุนเวียนน้ำที่ 30 °ซ โดยเลือกใช้ระยะเวลาแช่ข้าวเปลือกตามข้อ 3.2-3.3 จากนั้นนำมานึ่ง เพื่อผลิตเป็นข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือก โดยใช้หม้ออัดความดัน 15 ปอนด์ ที่ 121 °ซ เป็นเวลา 10 นาที และทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อนชนิดถาด อุณหภูมิ 45 ± 5 °ซ จนได้ความชื้นน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 12 พักข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือกไว้เป็นเวลา 7 วัน ที่อุณหภูมิห้องก่อนกะเทาะเปลือกเป็นข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือก 3 พันธุ์ การผลิตข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือก สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 การผลิตข้าวนึ่งกล็องจากข้าวเปลือก

ที่มา: ดัดแปลงจากวิธีการของน้ำฝน (2548)

4.3 การเตรียมแป้งข้าวนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และแป้งข้าวนึ่งกล็องจากข้าวเปลือก

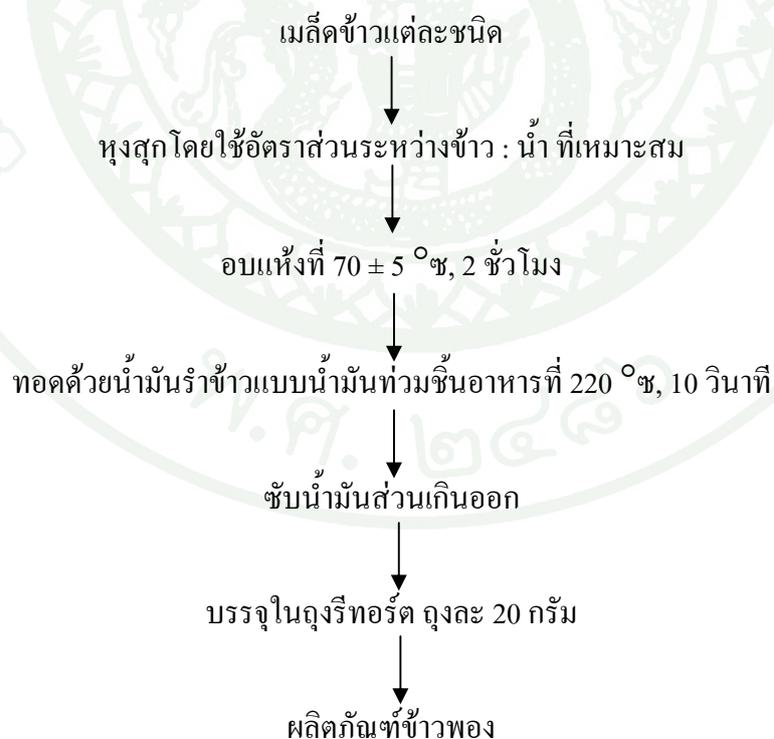
นำเมล็ดข้าวนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพทะแตกต่างกัน 3 ระยะ และเมล็ดข้าวนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกของข้าวแต่ละพันธุ์ที่เตรียมได้มาบดลดขนาดเบื้องต้นด้วยเครื่องบดของแห้ง (Blender) แล้วบดละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างแบบค้อน (Hammer mill) จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 ไมค์ ได้เป็นแป้งข้าวนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และข้าวนึ่งกล็องจากข้าวเปลือก บรรจุแป้งข้าวทั้งสองชนิดในถุงพลาสติก และเก็บในโถสุญญากาศที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพ

5. การผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวพอง

5.1 การผลิตข้าวพอง (ดัดแปลงจากวิธีการของจรรยา, 2542)

หาอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวแต่ละชนิดในข้าวแต่ละพันธุ์ เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมในการเตรียมวัตถุดิบของการทำผลิตภัณฑ์ข้าวพอง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างข้าว : น้ำ ในช่วงต่อไปนี้ คือ 1 : 1, 1 : 1.5 และ 1 : 2 โดยคัดเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างข้าวต่อน้ำ ที่ทำให้เมล็ดข้าวหุงสุก มีลักษณะเป็นตัวไม่บานแตก และใจกลางเมล็ดข้าวต้องไม่มีไตแข็งหลงเหลือ จากนั้นนำข้าวหุงสุกที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 ± 5 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง บรรจุใส่ถุงพลาสติก เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

นำข้าวหุงสุกที่อบแห้งแล้ว ไปทอดด้วยน้ำมันรำข้าวแบบน้ำมันท่วมขึ้นอาหาร (Deep frying) ที่อุณหภูมิ 220 °ซ เป็นเวลา 10 วินาที ซับน้ำมันส่วนเกินออก ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้ว นำมาบรรจุถุงรีทอร์ต ถุงละ 20 กรัม ปิดผนึกถุง และนำไปตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางด้านฟิสิกส์ เคมี และการยอมรับจากผู้บริโภค การผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวพอง สามารถสรุปได้ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวพอง

ที่มา: ดัดแปลงจากวิธีการของจรรยา (2542)

6. การตรวจสอบคุณภาพทางด้านฟิสิกส์ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์

6.1 วัตถุประสงค์

6.1.1 วิเคราะห์คุณภาพทางด้านฟิสิกส์

6.1.1.1 นำหนักเมล็ดข้าวจำนวน 1,000 เมล็ด ตามวิธีการของอรอนงค์ (2550) ภาคผนวก ก

6.1.1.2 ขนาด และรูปร่างของเมล็ดข้าว ตามวิธีการของอรอนงค์ (2550) ภาคผนวก ก

6.1.2 วิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมี

6.1.2.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AACC (2000) Method 44-15A ภาคผนวก ข

6.1.2.2 ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีการของ Juliano (1971) ภาคผนวก ข

6.1.2.3 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด ตามวิธีการของ A.O.A.C. (2000) ภาคผนวก ข

6.1.2.4 ปริมาณโปรตีน ตามวิธีการของ A.O.A.C. (2000) ภาคผนวก ข

6.1.2.5 ปริมาณไขมัน ตามวิธีการของ A.O.A.C. (2000) ภาคผนวก ข

6.1.2.6 ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ A.O.A.C. (2000) ภาคผนวก ข

6.2 ข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

6.2.1 วิเคราะห์คุณภาพทางด้านฟิสิกส์

6.2.1.1 ค่าสี L^* , a^* และ b^* ภาคผนวก ก

6.2.1.2 ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเมล็ดข้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดัดแปลงจากวิธีการของน้ำฝน (2548) ภาคผนวก ก และภาพจากกล้องถ่ายภาพระยะใกล้

6.2.2 วิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมี

6.2.2.1 ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AACC (2000) Method 44-15A ภาคผนวก ข

6.2.2.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ คัดแปลงจากวิธีการของ Chang (1979) และ Somogyi and Nelson (1952) ภาคผนวก ข

6.2.2.3 ปริมาณโปรตีน ตามวิธีการของ A.O.A.C. (2000) ภาคผนวก ข

6.2.2.4 ปริมาณกรดแกมมา แอมิโนบิวทีริก ตามวิธีการของ Varanyanond *et al.* (2005) ภาคผนวก ข

6.2.2.5 ปริมาณธาตุเหล็ก ตามวิธีการของ AACC (2000) Method 40-41B ภาคผนวก ข

6.2.3 วิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมีเชิงฟิสิกส์

6.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงความหนืด ตามวิธีการของ AACC (2000) Method 61-02 ภาคผนวก ค

6.3 ผลិតภัณฑ์ข้าวพอง

6.3.1 วิเคราะห์คุณภาพทางด้านฟิสิกส์

6.3.1.1 อัตราส่วนการพองตัว คัดแปลงจากวิธีการของธงชัย (2535) ภาคผนวก ก

6.3.1.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวพอง คัดแปลงตามวิธีการของ TA-XT2 application study (1995) ภาคผนวก ก

6.3.2 วิเคราะห์คุณภาพทางด้านจุลินทรีย์

6.3.2.1 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count) ตามวิธีการของ BAM (2001) ภาคผนวก ง

6.3.2.2 ยีสต์ และรา ตามวิธีการของ BAM (2001) ภาคผนวก ง

6.3.3 วิเคราะห์คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส

6.3.3.1 คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสของข้าวพอง (27 ตัวอย่าง) คัดแปลงจากมาตรฐานข้าวพองของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2541 (ภาคผนวก จ)

หลังจากหาอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวแต่ละชนิดในข้าวแต่ละพันธุ์ เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมในการเตรียมวัตถุดิบของการทำผลิตภัณฑ์ข้าวพอง จากนั้นนำข้าวหุงสุกที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 ± 5 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำไปทอดด้วยน้ำมันรำข้าวแบบน้ำมันท่วมขึ้นอาหาร (Deep frying) ที่อุณหภูมิ 220 °ซ เป็นเวลา 10 วินาที ชับน้ำมันส่วนเกินออก ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15 นาที แล้วนำมาตรวจสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีทดสอบแบบให้คะแนนความชอบ 1 ถึง 5 คะแนน (5-points score) ประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้าน สี กลิ่นรส ความกรอบ และความชอบรวมต่อผลิตภัณฑ์ ซึ่งใช้แบบทดสอบความชอบผลิตภัณฑ์ เพื่อหาการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อข้าวพองที่ผลิตจากข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพพะแตกต่างกัน และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพพะแตกต่างกันในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ (คัดแปลงจากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2541) (ภาคผนวก จ) โดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 15 คน

7. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ผลของการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกต่อคุณภาพทางฟิสิกส์ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Complete Randomized Design; CRD) ทำการทดลอง 2 ซ้ำ ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) ถ้าพบนัยสำคัญทางสถิติทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistics Package for the Social Sciences; SPSS ส่วนการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวพอง ใช้การวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

8. สถานที่ทดลอง

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตบางเขน

9. ระยะเวลาการทดลอง

ตั้งแต่ปีการศึกษา 2551 ถึงปีการศึกษา 2553

ผลและวิจารณ์

1. ผลการตรวจสอบคุณภาพทางฟิสิกส์ และเคมีของวัตถุดิบ

ผลการวิเคราะห์คุณภาพของข้าว 3 พันธุ์ คือ สุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 เป็นดังนี้

1.1 คุณภาพทางฟิสิกส์

1.1.1 น้ำหนักเมล็ดข้าวจำนวน 1,000 เมล็ด

น้ำหนักเมล็ดข้าวประเมินได้สองรูปแบบ คือ น้ำหนักต่อปริมาตร และน้ำหนักต่อจำนวนเมล็ด จากผลการทดลอง พบว่า น้ำหนักเมล็ดข้าวจำนวน 1,000 เมล็ด ของข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 ข้าวเปลือกสินเหล็ก และข้าวเปลือกกข6 มีน้ำหนักเท่ากับ 26.85, 28.14 และ 24.53 กรัม ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2 ผลจากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่า น้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือกจำนวน 1,000 เมล็ด ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยข้าวสินเหล็กมีน้ำหนักเมล็ดมากที่สุด รองลงมา คือ ข้าวสุพรรณบุรี 1 ส่วนข้าวกข6 มีน้ำหนักเมล็ดน้อยที่สุด ซึ่งให้ผลทำนองเดียวกับน้ำหนักเมล็ดในข้าวกล้อง ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 21.12-22.50 กรัม และข้าวสารมีค่าอยู่ในช่วง 19.08-19.80 กรัม โดยน้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง และข้าวสารในข้าวสินเหล็กมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวกข6 ซึ่งน้ำหนักเมล็ดมีค่าลดลงเมื่อนำเมล็ดข้าวเปลือกไปกะเทาะเป็นข้าวกล้อง และขัดขาวเป็นข้าวสาร ตามลำดับ

ผลการสำรวน้ำหนักข้าวเปลือก 1,000 เมล็ดของข้าวไทยจำนวน 344 พันธุ์ พบว่า มีน้ำหนักอยู่ในช่วงระหว่าง 16.20-41.68 กรัม โดยข้าวพันธุ์ดีของไทยมีน้ำหนัก 1,000 เมล็ดระหว่าง 22.5-36.7 กรัม (เครือวัลย์, 2534) จากผลการตรวจสอบน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก 1,000 เมล็ด ของข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ บ่งชี้ได้ว่าจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของข้าวพันธุ์ดี เหมาะสำหรับนำไปผลิตเป็นข้าวเปลือกเริ่มงอก เนื่องจากเมล็ดที่มีน้ำหนักมาก มักมีร้อยละการงอก และควมมีชีวิตสูง สามารถงอกได้เร็ว และยังเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ไว้ได้นานด้วย (จวงจันทร์, 2529; วันชัย, 2537) น้ำหนักเมล็ดถือเป็นลักษณะหนึ่งที่ใช้ในการจำแนกพันธุ์ข้าว เพราะควบคุมด้วยลักษณะทางพันธุกรรม เป็นลักษณะคงที่มากที่สุด อาจแปรปรวนได้บ้างจากสภาวะแวดล้อม เช่น ชนิดของดิน การใส่ปุ๋ย หรือสภาพภูมิอากาศ (อรอนงค์, 2550)

ตารางที่ 2 คุณภาพทางฟิสิกส์ของเมล็ดข้าวเปลือกในข้าว 3 พันธุ์

คุณภาพเมล็ดข้าวเปลือก	พันธุ์ข้าว*		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
น้ำหนัก 1,000 เมล็ด (กรัม)			
ข้าวเปลือก	26.85 ± 0.10 B	28.14 ± 0.15 A	24.53 ± 0.15 C
ข้าวกล้อง	21.12 ± 0.49 B	22.50 ± 0.23 A	21.47 ± 0.38 B
ข้าวสาร	19.36 ± 0.16 B	19.80 ± 0.08 A	19.08 ± 0.16 B
ขนาดเมล็ดข้าว			
ความกว้าง (ซม.)	0.22 ± 0.01 C	0.27 ± 0.00 A	0.25 ± 0.01 B
ความยาว (ซม.)	0.99 ± 0.01 B	1.05 ± 0.03 A	1.01 ± 0.02 B
ความหนา (ซม.)	0.19 ± 0.01 B	0.21 ± 0.00 A	0.20 ± 0.01 B
อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง	4.42 ± 0.15 A	3.90 ± 0.09 B	4.05 ± 0.22 B
ขนาดเมล็ด	ยาวมาก	ยาวมาก	ยาวมาก
รูปร่างเมล็ด	เรียวยาว	เรียวยาว	เรียวยาว

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวนอนของแต่ละคุณภาพของเมล็ดข้าว
แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
($p \leq 0.05$)

1.1.2 ขนาด และรูปร่างเมล็ดข้าว

การจำแนกขนาด และรูปร่างเมล็ดข้าวของข้าวสุพรรณบุรี 1 ข้าวสินเหล็ก และข้าวกข6 แสดงในตารางที่ 2 พบว่า ขนาดของเมล็ดข้าวเปลือกของข้าวสุพรรณบุรี 1 ข้าวเปลือกสินเหล็ก และข้าวเปลือกกข6 มีความกว้างของเมล็ดเท่ากับ 0.22, 0.27 และ 0.25 เซนติเมตรตามลำดับ มีความยาวเท่ากับ 0.99, 1.05 และ 1.01 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนความหนามีค่าเท่ากับ 0.19, 0.21 และ 0.20 เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งความกว้าง ความยาว และความหนาของเมล็ดข้าวเปลือกมีค่ามากที่สุดในการข้าวสินเหล็ก และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวกข6

เมื่อพิจารณาความยาวของเมล็ดข้าวเปลือก (0.99-1.05 เซนติเมตร) และอัตราส่วนความกว้างต่อความยาว (3.90-4.42) ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ซึ่งตามเกณฑ์ของ USDA (1982) (อ้างโดยอรอนงค์, 2550) จัดเป็นข้าวที่มีขนาดของเมล็ดยาวมาก และมีรูปร่างเรียวยาว ซึ่งอยู่ในข้าวกลุ่มอินดิกา จากการ

ตรวจสอบขนาดรูปร่างโดยทั่วไปเมล็ดที่มีขนาดใหญ่ มักจะมีคุณภาพดีกว่าเมล็ดขนาดเล็ก เพราะเป็นเมล็ดที่เจริญเติบโตเต็มที่จึงมีอาหารสะสมในเมล็ดสูง (จวงจันทร, 2529; วันชัย, 2537)

จากผลการตรวจสอบคุณภาพทางด้านฟิสิกส์ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ สามารถสรุปได้ว่า น้ำหนักเมล็ดของข้าวทั้ง 3 พันธุ์จัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของข้าวพันธุ์ดี เหมาะสำหรับนำไปเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นข้าวเปลือกเริ่มงอก ส่วนขนาดรูปร่างโดยทั่วไป พบว่า อยู่ในกลุ่มของเมล็ดที่มีขนาดใหญ่

1.2 คุณภาพทางเคมี

1.2.1 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไป ใช้วิธีการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ เพื่อให้ทราบองค์ประกอบทางเคมีหรือสารอาหารหลักที่มีในข้าว รวมถึงวิเคราะห์คุณค่าทางอาหารและโภชนาการ องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์

พันธุ์ข้าว	ความชื้น* (ร้อยละ)	แอมิโลส* (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)*			
			คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า
สป 1	9.32 ± 0.05 B	25.12 ± 0.00 A	79.57 ± 0.30 A	7.75 ± 0.00 B	2.08 ± 0.18 B	1.32 ± 0.11 B
สล	9.98 ± 0.11 A	15.17 ± 0.24 B	77.47 ± 0.21 B	8.57 ± 0.23 A	2.35 ± 0.04 B	1.56 ± 0.06 A
กข6	9.95 ± 0.07 A	5.46 ± 0.03 C	79.13 ± 0.12 A	6.75 ± 0.07 C	2.90 ± 0.03 A	1.33 ± 0.02 AB

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

1.2.1.1 ปริมาณความชื้น

จากตารางที่ 3 ข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 9.32-9.98 โดยข้าวสินเหล็กมีปริมาณความชื้นสูงสุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับข้าวสุพรรณบุรี 1 โดยความชื้นของข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์ จัดอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา การ

ที่ข้าวทั้ง 3 พันธุ์มีปริมาณความชื้นที่แตกต่างกัน อาจเป็นเพราะการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน ความชื้นเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ โดยเกี่ยวข้องกับคุณภาพของเมล็ดข้าว และสามารถบ่งชี้ถึงอายุ การเก็บรักษา หรือความปลอดภัยในการเก็บรักษาข้าวให้มีคุณภาพที่ดีได้ โดยข้าวที่มีความชื้นสูงเสื่อมเสียเร็วกว่าข้าวที่มีความชื้นต่ำกว่า ระดับความชื้นทั่วไปของข้าวที่ยอมรับว่าปลอดภัยต่อการเก็บรักษา คือ ร้อยละ 13 นอกจากนี้ ข้าวเปลือกที่มีความชื้นที่เหมาะสมเมื่อนำไปสีข้าวเปลือกให้ข้าวเต็มเมล็ดสูง ได้ข้าวหักน้อย (อรอนงค์, 2550) ในการขัดสีข้าวที่มีความชื้นสูงเกิดการแตกร้าวมาก ทำให้ได้ข้าวเต็มเมล็ดต่ำลง นอกจากนี้ข้าวที่มีความชื้นต่ำสามารถดูดซึมน้ำในระหว่างการล้างและแช่ได้มากกว่าข้าวที่มีความชื้นสูง (Webb and Stermer, 1972; Heinemann *et al.*, 2005)

1.2.1.2 ปริมาณแอมิโลส

ข้าวกล้องสุพรรณบุรี 1 ข้าวกล้องสินเหล็ก และข้าวกล้องกข6 มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 25.12, 15.17 และ 5.46 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งข้าวสุพรรณบุรี 1 จัดเป็นข้าวเจ้าแอมิโลสสูง (แอมิโลสมากกว่าร้อยละ 25) ข้าวสินเหล็กเป็นข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำ (แอมิโลสในช่วงร้อยละ 12.1-20.0) และข้าวกข6 เป็นข้าวเหนียว (แอมิโลสในช่วงร้อยละ 0-3) (อรอนงค์, 2550 อ้างถึง Juliano, 1993) ปริมาณแอมิโลสของข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยอัตราส่วนของแอมิโลส และแอมิโลเพกทินในสตาร์ชข้าวเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพทางฟิสิกส์และเคมีเชิงฟิสิกส์ของแป้งข้าว ตลอดจนมีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากเป็นแหล่งสะสมพลังงาน (อรอนงค์, 2550; Champagne *et al.*, 2004) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว

1.2.1.3 ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด

ข้าวกล้องสุพรรณบุรี 1 ข้าวกล้องสินเหล็ก และข้าวกล้องกข6 มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดร้อยละ 79.53, 77.54 และ 79.07 โดยน้ำหนักแห้งตามลำดับ โดยข้าวกข6 มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดมากที่สุด และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับข้าวสินเหล็ก คาร์โบไฮเดรตที่พบในเมล็ดข้าว ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสตาร์ช ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของแอมิโลส และแอมิโลเพกทิน โดยมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 80 ของน้ำหนักเมล็ด ส่วนใหญ่พบสตาร์ชอยู่บริเวณแอนโดสเปิร์ม ส่วนคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นที่พบ ได้แก่ กลูโคส ฟรักโทส ซูโครส เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น

1.2.1.4 ปริมาณโปรตีน

ข้าวกล้องสุพรรณบุรี 1 ข้าวกล้องสินเหล็ก และข้าวกล้องกข6 มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 7.75, 8.57 และ 6.75 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยข้าวสินเหล็ก มีปริมาณโปรตีนมากที่สุด รองลงมา คือ ข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวกข6 ซึ่งปริมาณโปรตีนในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ปริมาณโปรตีนพบมากที่บริเวณคัพภะ ชั้นเปลือกหุ้มเมล็ด และเนื้อเมล็ดด้านนอก ปริมาณโปรตีนในข้าวมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ สถานที่เพาะปลูก เป็นต้น โดยทั่วไปข้าวกล้องมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 7-9 โปรตีนที่สะสมอยู่ในเมล็ดนั้น ส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในรูปที่เรียกว่า โปรตีนที่มีรูปร่าง (Protein bodies)

1.2.1.5 ปริมาณไขมัน

ข้าวกล้องสุพรรณบุรี 1 ข้าวกล้องสินเหล็ก และข้าวกล้องกข6 มีปริมาณไขมันร้อยละ 2.08, 2.35 และ 2.90 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยข้าวกข6 มีปริมาณไขมันสูงสุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวสินเหล็ก

1.2.1.6 ปริมาณเถ้า

ข้าวกล้องสุพรรณบุรี 1 ข้าวกล้องสินเหล็ก และข้าวกล้องกข6 มีปริมาณเถ้าร้อยละ 1.32, 1.56 และ 1.33 ตามลำดับ โดยข้าวสินเหล็กมีปริมาณเถ้าสูงที่สุด และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 กับข้าวสุพรรณบุรี 1 การที่ข้าวสินเหล็กมีปริมาณเถ้าสูงที่สุดจากข้าวพันธุ์อื่นๆ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะข้าวสินเหล็กเป็นข้าวที่มีการปรับปรุงพันธุ์ให้มีปริมาณธาตุเหล็กสูง จึงทำให้ข้าวสินเหล็กมีปริมาณเถ้าสูงกว่าข้าวอีก 2 พันธุ์

จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของเมล็ดข้าวกล้องสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 สามารถสรุปได้ว่า เมล็ดข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณความชื้นอยู่ที่ช่วงร้อยละ 9.32-9.98 ปริมาณแอมิโลสมีค่าแตกต่างกันโดยจัดอยู่ในกลุ่มข้าวเจ้าแอมิโลสสูง ข้าวเจ้าแอมิโลสต่ำ และข้าวเหนียว ตามลำดับ ส่วนปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดมีค่าสูงถึงร้อยละ 77.47-79.57 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณโปรตีนในช่วงร้อยละ 6.75-8.57 โดยน้ำหนักแห้ง ส่วนไขมันมีปริมาณเล็กน้อยในช่วงร้อยละ 2.08-2.90 โดยน้ำหนักแห้ง และปริมาณเถ้าร้อยละ 1.32-1.56 โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งความแตกต่างทางด้านการประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวนี้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของเมล็ดข้าวหลังผ่านกระบวนการแปรรูป ทำให้มีค่าแตกต่างกันไป

2. ผลการหาสภาวะการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน

2.1 การดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าวเปลือก

แช่ข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ ที่อุณหภูมิ 30 °ซ เป็นระยะเวลาต่างๆ ในช่วง 0-36 ชั่วโมง โดยสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวในแต่ละระยะเวลาแช่มาวิเคราะห์ปริมาณความชื้นที่เมล็ดข้าวเปลือกดูดซึมเข้าไปภายในเมล็ด จากตารางที่ 4 (ภาพผนวกที่ ๑1) พบว่า ข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 ข้าวเปลือกสินเหล็ก และข้าวเปลือกกข6 ซึ่งมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 12.05, 10.78 และ 11.35 มีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่ที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 29.62-33.77, 28.97-37.74 และ 29.70-38.95 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ของข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ หลังแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 0-36 ชั่วโมง และจำนวนเท่าของการดูดซึมน้ำหลังสิ้นสุดการแช่ข้าวเปลือก (36 ชั่วโมง) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกที่ยังไม่ผ่านการแช่

ระยะเวลาที่แช่ ข้าวเปลือก (ชั่วโมง)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)*		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ไม่ผ่านการแช่	12.05 ± 0.02 E	10.78 ± 0.08 H	11.35 ± 0.08 G
2	29.62 ± 0.31 D	28.97 ± 0.40 G	29.70 ± 0.54 F
4	31.03 ± 0.99 C	31.87 ± 0.02 F	30.83 ± 0.44 EF
6	31.06 ± 0.14 C	33.51 ± 0.60 E	31.68 ± 0.37 E
8	31.51 ± 0.46 C	33.75 ± 0.66 E	34.87 ± 0.95 D
10	32.54 ± 0.24 B	34.04 ± 1.25 E	35.17 ± 0.64 D
12	33.07 ± 0.23 AB	35.74 ± 0.37 D	36.85 ± 0.51 C
14	33.15 ± 0.04 AB	36.41 ± 0.27 CD	37.18 ± 0.98 BC
16	33.23 ± 0.63 AB	36.48 ± 0.25 BCD	38.18 ± 0.40 AB
18	33.31 ± 0.04 AB	36.72 ± 0.16 ABCD	38.47 ± 0.05 A
24	33.42 ± 0.32 AB	37.15 ± 0.27 ABC	38.62 ± 0.79 A
30	33.58 ± 0.60 A	37.59 ± 0.37 AB	38.71 ± 0.06 A
36	33.77 ± 0.22 A	37.74 ± 0.53 A	38.95 ± 0.80 A
จำนวนเท่าโดยเฉลี่ย	2.80	3.50	3.43

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

การดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ มีลักษณะการดูดซึมน้ำแบบเดียวกัน คือ ในช่วงแรกของการแช่น้ำ (ชั่วโมงที่ 2-14) ข้าวเปลือกมีการดูดซึมน้ำอย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากคัพภะของเมล็ดข้าวสามารถดูดซึมน้ำได้ดี หลังจากช่วงเวลานี้ น้ำแพร่เข้าไปยังบริเวณเนื้อในเมล็ดอย่างช้าๆ เนื่องจากเยื่อหุ้มผล และเยื่อหุ้มเมล็ดเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำ ส่งผลให้ปริมาณความชื้นของเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเข้าสู่จุดอิ่มตัวชั่วโมงที่ 12, 18 และ 16 ในข้าวสุพรรณบุรี 1, สีนเหล็ก และกข6 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า ข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 มีการดูดซึมน้ำต่ำสุด รองลงมา คือ ข้าวสินเหล็ก ส่วนข้าวกข6 มีการดูดซึมน้ำสูงสุด ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างของปริมาณแอมิโลสที่มีในเมล็ดข้าวทั้ง 3 พันธุ์ โดยข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูงดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำ (Juliano, 1972) ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลแอมิโลเพกทินมีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากกว่าโมเลกุลแอมิโลส จึงพบว่า ข้าวสุพรรณบุรี 1 ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 25.12 โดยน้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 3) มีการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าข้าวสินเหล็ก และข้าวกข6 ที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำกว่า (ร้อยละ 15.17 และ 5.46) จากผลการทดลองให้ผลที่คล้ายคลึงกับศิริธร (2552) ซึ่งตรวจสอบการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าวกล้องในข้าว 2 พันธุ์ คือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวกข6 โดยแช่น้ำที่อุณหภูมิ 30 °C ในช่วงเวลา 0.5-24 ชั่วโมง ปรากฏว่า ปริมาณความชื้นที่เมล็ดข้าวดูดซึมเข้าไปในข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 (ร้อยละ 30.20-38.57) มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องกข6 (ร้อยละ 31.09-46.12) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งเป็นผลจากปริมาณแอมิโลสในข้าวขาวดอกมะลิ 105 สูงกว่าข้าวกข6

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจำนวนเท่าโดยเฉลี่ยของการดูดซึมน้ำของข้าวเปลือกเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการแช่ที่ 36 ชั่วโมง พบว่า ข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 ข้าวเปลือกสินเหล็ก และข้าวเปลือกกข6 มีจำนวนเท่าโดยเฉลี่ยของการดูดซึมน้ำเท่ากับ 2.80, 3.50 และ 3.43 ตามลำดับ โดยข้าวเปลือกสินเหล็ก มีจำนวนเท่าโดยเฉลี่ยของการดูดซึมน้ำสูงที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะข้าวสินเหล็กมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่ำกว่าข้าวอีก 2 พันธุ์ จึงทำให้อัตราการดูดน้ำสูงกว่า และสืบเนื่องจากข้าวสินเหล็กมีปริมาณ โปรตีน ร้อยละ 8.57 โดยน้ำหนักแห้ง (ตารางที่ 3) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำได้ดี จึงเป็นผลทำให้ข้าวสินเหล็ก มีจำนวนเท่าโดยเฉลี่ยของการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าข้าวอีก 2 พันธุ์ นอกเหนือจากองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวที่มีผลต่ออัตราการดูดซึมน้ำแล้ว เปลือกของเมล็ดข้าวยังมีผลต่อการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าว โดยเปลือกขัดขวางการดูดซึมน้ำ ทำให้เมล็ดข้าวดูดซึมน้ำได้น้อยลง (Abhay and Gupta, 2006) เมื่อเทียบกับข้าวกล้อง และข้าวสาร ส่วนปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าว ได้แก่ สารที่เคลือบอยู่ที่ผิวเปลือก ความเข้มข้นของน้ำ อุณหภูมิ และการสุกแก่ของเมล็ดข้าว เป็นต้น (วันชัย, 2537)

2.2 ร้อยละการเริ่มงอก และการหาสภาวะการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ

การหาสภาวะการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกให้มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การหาสภาวะการแช่ข้าวเปลือกให้อิ่มตัวด้วยน้ำ และสภาวะการทำข้าวเปลือกให้เริ่มงอกจนมีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ โดยประเมินจากร้อยละของเมล็ดที่เริ่มงอก ดังนี้

หลังจากแช่ข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ ที่อุณหภูมิ 30 °ซ เป็นระยะเวลาต่างๆ คือ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 และ 24 ชั่วโมง ซึ่งมีการเปลี่ยนน้ำที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือกทุกๆ 6 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดในแต่ละระยะการแช่แล้ว จึงนำข้าวเปลือกไปเพาะให้เริ่มงอกที่อุณหภูมิ 30 °ซ และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30 และ 36 ชั่วโมง แล้วนับจำนวนร้อยละของเมล็ดที่เริ่มงอกจำนวน 100 เมล็ดในแต่ละช่วงเวลา แสดงดังตารางที่ 5-7 (ภาพผนวกที่ ๓3) ปรากฏว่าระยะเวลาขั้นต่ำสุดที่ใช้ในการแช่ข้าวเปลือก และเพาะให้เริ่มงอกจนทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีร้อยละการเริ่มงอกสูงสุดในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ คือ ต้องแช่ข้าวเป็นเวลา 14 ชั่วโมง และเพาะให้เริ่มงอกเป็นเวลา 26 ชั่วโมง ซึ่งรวมระยะเวลาเพาะให้เริ่มงอกทั้งสิ้น 40 ชั่วโมง จึงทำให้ข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 ลินเหล็ก และกข6 มีร้อยละการเริ่มงอกสูงสุดเท่ากับ 97, 94 และ 98 ตามลำดับ และที่ระดับร้อยละการเริ่มงอกสูงสุดของข้าวทั้ง 3 พันธุ์นี้ พบว่า มีค่าสูงกว่ามาตรฐานกำหนดของการเริ่มงอกที่ดี คือ ไม่ต่ำกว่า 80 (กรมการข้าว, 2553)

เมื่อตรวจสอบระยะเวลาของการแช่ข้าวเปลือกที่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกมีร้อยละการเริ่มงอกมากกว่า 80 เวลาแรกรวมทั้งเป็นเวลาที่ทำให้เมล็ดข้าวเปลือกแต่ละพันธุ์มีจำนวนร้อยละการเริ่มงอกสูงสุด หลังจากนำไปเพาะบ่มให้เริ่มงอก พบว่า ต้องแช่ข้าวเปลือกแต่ละพันธุ์เป็นเวลา 14 ชั่วโมง และนำไปเพาะให้เริ่มงอกจนมีร้อยละการเริ่มงอกมากกว่าร้อยละ 80 เริ่มแรกในชั่วโมงที่ 14 ของข้าวสุพรรณบุรี 1 (ระยะเวลารวมการเพาะให้เริ่มงอกเท่ากับ 28 ชั่วโมง ซึ่งมีร้อยละการเริ่มงอกเท่ากับ 80; ตารางที่ 5) กับข้าวกข6 (ระยะเวลารวมการเพาะให้เริ่มงอกเท่ากับ 28 ชั่วโมง ซึ่งมีร้อยละการเริ่มงอกเท่ากับ 82; ตารางที่ 7) และข้าวลินเหล็กในชั่วโมงที่ 16 (ระยะเวลารวมการเพาะให้เริ่มงอกเท่ากับ 30 ชั่วโมง ซึ่งมีร้อยละการเริ่มงอกเท่ากับร้อยละ 80; ตารางที่ 6) โดยถือว่าที่ระยะเวลาดังกล่าวนี้ (ระยะเวลารวมของการเพาะให้เริ่มงอก) ของข้าวแต่ละพันธุ์ เป็นระยะเวลาขั้นต่ำที่เหมาะสมต่อการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอก ซึ่งนอกจากใช้เวลาในการผลิตสั้นแล้วยังให้ร้อยละผลได้ของการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกจากข้าวสุพรรณบุรี 1 (ร้อยละ 97) ลินเหล็ก (ร้อยละ 94) และกข6 (ร้อยละ 98) มีค่าสูงสุดอีกด้วย

ตารางที่ 5 ร้อยละการเริ่มงอกของเมล็ดข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 เมื่อแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 2-36 ชั่วโมง

ระยะเวลาแช่ (ชั่วโมง)	ระยะเวลาเพาะบ่ม (ชั่วโมง)															
	การเริ่มงอกของเมล็ดข้าว (ร้อยละ)															
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	36
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	6	8	8	14	22	31	56	77	82	84	84	85
8	0	0	0	2	4	23	35	42	60	66	71	87	92	92	92	94
10	0	0	12	11	26	39	42	45	63	69	72	86	93	92	93	94
12	0	0	8	12	49	58	62	66	72	80	90	93	93	94	94	94
14	0	0	17	36	66	69	80	85	87	85	90	95	97	97	97	97
16	5	18	22	38	70	75	83	88	90	92	95	97	97	97	97	97
18	10	22	39	57	72	81	88	90	95	97	97	97	97	97	97	97
24	18	25	43	64	77	82	89	95	95	97	97	97	97	97	97	97

ตารางที่ 6 ร้อยละการเริ่มงอกของเมล็ดข้าวเปลือกสีนเหล็ก เมื่อแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 2-36 ชั่วโมง

ระยะเวลาแช่ (ชั่วโมง)	ระยะเวลาเพาะบ่ม (ชั่วโมง)															
	การเริ่มงอกของเมล็ดข้าว (ร้อยละ)															
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	36
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	2	4	6	10	22	28	49	63	77	84	85	84
8	0	0	2	4	8	10	22	29	46	61	69	75	78	83	87	87
10	0	0	4	12	26	28	39	42	55	63	69	78	83	85	87	88
12	0	0	10	25	44	48	60	68	72	76	80	82	87	88	89	90
14	0	0	15	22	49	66	72	80	83	85	87	90	94	94	94	94
16	2	10	20	24	50	52	73	78	85	90	90	92	94	94	94	94
18	5	18	30	49	66	78	82	88	92	93	94	94	94	94	94	94
24	15	22	38	57	70	81	85	92	94	94	94	94	94	94	94	94

ตารางที่ 7 ร้อยละการเริ่มงอกของเมล็ดข้าวเปลือกกข6 เมื่อแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 2-36 ชั่วโมง

ระยะเวลาแช่ (ชั่วโมง)	ระยะเวลาเพาะบ่ม (ชั่วโมง)															
	การเริ่มงอกของเมล็ดข้าว (ร้อยละ)															
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	36
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	8	8	10	15	20	32	56	71	75	81	82	85
8	0	0	0	2	10	28	36	42	60	67	71	88	90	91	92	92
10	0	0	13	18	29	42	46	50	60	70	75	87	93	92	93	93
12	0	2	10	19	38	58	66	70	75	82	89	93	93	92	94	94
14	1	5	17	33	59	69	82	87	92	93	95	95	98	98	98	98
16	5	16	28	44	70	80	86	88	90	92	96	98	98	98	98	98
18	13	27	39	60	66	79	89	91	96	98	98	98	98	98	98	98
24	16	27	48	66	80	82	91	95	95	97	97	98	98	98	98	98

จากสภาวะการแช่ข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ก่อนนำมาเพาะให้เริ่มงอกที่เวลาต่างๆ จนทำให้ได้จำนวนร้อยละเมล็ดที่เริ่มงอกมีค่าสูงสุดนั้น จึงคัดเลือกระยะเวลาการแช่ข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ที่เวลา 14 ชั่วโมง ก่อนนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่อุณหภูมิ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 2-36 ชั่วโมงต่อ เพื่อคัดเลือกระยะเวลาที่ใช้ในการเพาะข้าวเปลือกให้เริ่มงอกจนมีความยาวคัพภะเริ่มงอกแตกต่างกัน 3 ระยะ คือ 1) คัพภะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 0.5-1 มิลลิเมตร 2) คัพภะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 1-2 มิลลิเมตร และ 3) คัพภะเริ่มงอกมีความยาวอยู่ในช่วง 2-3 มิลลิเมตร (ภาพที่ 12) พบว่า เวลาการเพาะข้าวเปลือกให้เริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าว กข6 ที่ให้ความยาวคัพภะเริ่มงอกแตกต่างกัน 3 ระยะ และมีร้อยละการเริ่มงอกของแต่ละระยะมากกว่า 80 คือ 14, 18 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ (ระยะเวลารวมของการเพาะให้เริ่มงอกตั้งแต่การแช่น้ำ และการเพาะให้เริ่มงอก คือ 28, 32 และ 38 ชั่วโมง) ในขณะที่ข้าวสินเหล็กใช้เวลาการเพาะให้เริ่มงอกที่ให้ความยาวคัพภะเริ่มงอกแตกต่างกัน 3 ระยะ และมีร้อยละการเริ่มงอกของแต่ละระยะมากกว่า 80 เท่ากับ 16, 24 และ 28 ชั่วโมง ตามลำดับ (ระยะเวลารวมของการเพาะให้เริ่มงอกตั้งแต่การแช่น้ำ และการเพาะให้เริ่มงอก คือ 30, 38 และ 42 ชั่วโมง) ซึ่งสามารถสรุประยะเวลา รวมของการเพาะข้าวเปลือกให้เริ่มงอกจนมีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ แสดงดังตารางที่ 8



ภาพที่ 12 ลักษณะของข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ ในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และ กข6 โดยข้าวพันธุ์เดียวกันเรียงจากซ้ายไปขวา คือ เริ่มงอกระยะที่ 1 (0.5-1 มม.), เริ่มงอกระยะที่ 2 (1-2 มม.) และเริ่มงอกระยะที่ 3 (2-3 มม.) ตามลำดับ

ตารางที่ 8 เวลาที่ทำให้ข้าวเปลือกเริ่มงอกมีความยาวคัพพะแตกต่างกัน 3 ระยะ ในข้าว 3 พันธุ์ หลังแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85

ความยาวคัพพะเริ่มงอก*	สุวรรณบุรี 1			สินเหล็ก			กข6		
	เวลาแช่น้ำ (ชม.)	เวลาเพาะให้เริ่มงอก (ชม.)	เวลาทั้งหมดของการทำให้เริ่มงอก (ชม.)	เวลาแช่น้ำ (ชม.)	เวลาเพาะให้เริ่มงอก (ชม.)	เวลาทั้งหมดของการทำให้เริ่มงอก (ชม.)	เวลาแช่น้ำ (ชม.)	เวลาเพาะให้เริ่มงอก (ชม.)	เวลาทั้งหมดของการทำให้เริ่มงอก (ชม.)
ระยะที่ 1	14	14	28	14	16	30	14	14	28
ระยะที่ 2	14	18	32	14	24	38	14	18	32
ระยะที่ 3	14	24	38	14	28	42	14	24	38

หมายเหตุ *ระยะที่ 1 มีความยาวคัพพะเริ่มงอกเท่ากับ 0.5-1 มิลลิเมตร และมีร้อยละการเริ่มงอกจนมีความยาวคัพพะเริ่มงอกอยู่ในระยะที่ 1 มากกว่า 80
 ระยะที่ 2 มีความยาวคัพพะเริ่มงอกเท่ากับ 1-2 มิลลิเมตร และมีร้อยละการเริ่มงอกจนมีความยาวคัพพะเริ่มงอกอยู่ในระยะที่ 2 มากกว่า 80
 ระยะที่ 3 มีความยาวคัพพะเริ่มงอกเท่ากับ 2-3 มิลลิเมตร และมีร้อยละการเริ่มงอกจนมีความยาวคัพพะเริ่มงอกอยู่ในระยะที่ 3 มากกว่า 80

เมื่อนำข้าวเปลือกที่ผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 14 ชั่วโมง และเพาะให้เริ่มงอกจนได้ความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ ซึ่งอยู่ในช่วงชั่วโมงที่ 14-28 นั้นมาตรวจสอบปริมาณความชื้น แสดงดังตารางที่ 9 (ภาพผนวกที่ ๑2)

ตารางที่ 9 ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ของข้าวเปลือก 3 พันธุ์ หลังแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 14-28 ชั่วโมง

ระยะเวลาเพาะงอก (ชั่วโมง)	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)*		
	สุพรรณบุรี 1 ^{1/}	สินเหล็ก ^{1/}	กข6 ^{1/}
14	33.18 ± 0.03	36.40 ± 0.01	37.25 ± 0.27
16	33.18 ± 0.07	36.41 ± 0.02	37.36 ± 0.08
18	33.19 ± 0.04	36.40 ± 0.03	37.42 ± 0.04
24	33.21 ± 0.03	36.43 ± 0.10	37.63 ± 0.05
28	33.21 ± 0.01	37.40 ± 0.04	37.65 ± 0.04

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{1/} ตัวเลขค่าเฉลี่ยในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p>0.05)

จากผลการตรวจสอบ พบว่า ข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 ซึ่งมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 33.15 หลังจากแช่ข้าวเปลือกเป็นเวลา 14 ชั่วโมง มีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อนำไปเพาะให้เริ่มงอกจนมีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ (ร้อยละ 33.18-33.21) เช่นเดียวกันกับข้าวเปลือกสินเหล็ก ซึ่งมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 36.41 หลังจากแช่ข้าวเปลือกเป็นเวลา 14 ชั่วโมง มีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อนำไปเพาะให้เริ่มงอกจนมีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ (ร้อยละ 36.40-37.40) และในข้าวเปลือกกข6 ซึ่งมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 37.18 หลังจากแช่ข้าวเปลือกเป็นเวลา 14 ชั่วโมง มีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อนำไปเพาะให้เริ่มงอกจนมีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระยะ (ร้อยละ 37.25-37.65) ซึ่งแสดงว่าผู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่ใช้ในการเพาะข้าวเปลือกให้เริ่มงอกสามารถช่วยควบคุมปริมาณความชื้นของข้าวเปลือกไม่ให้สูญเสียได้ และปริมาณความชื้นที่ได้ซึ่งมากกว่าร้อยละ 30 ยังเหมาะสมต่อกระบวนการนึ่งข้าวที่ทำให้เมล็ดสารถเกิดการเจลาทิไนซ์สมบูรณ์ (Islam et al., 2004)

3. ผลการตรวจสอบคุณภาพของข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์

หลังจากเตรียมตัวอย่างข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ใน 9 รูปแบบ คือ ข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ แล้วนำมาตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางด้านฟิสิกส์ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ ให้ผลดังนี้

3.1 คุณภาพทางด้านฟิสิกส์

3.1.1 ค่าสี

3.1.1.1 ค่าสี L*

การเปลี่ยนแปลงค่าสี L* ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ แสดงดังตารางที่ 10 โดยค่าสี L* แสดงถึงค่าความสว่างของตัวอย่างที่นำมาตรวจวัด

ตารางที่ 10 ค่าสี L* ในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	ค่าสี (L*) ^{1/}		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร	81.35 ± 1.65 Ab	73.21 ± 0.93 Ac	84.99 ± 0.34 Aa
ข้าวกล้อง	68.46 ± 0.21 Bb	64.32 ± 0.91 Bc	76.43 ± 0.78 Ba
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก	60.83 ± 1.29 Ca	55.74 ± 1.20 Db	61.37 ± 0.74 Ea
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	67.91 ± 0.89 Bb	64.23 ± 0.98 Bc	75.33 ± 0.80 Ca
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	67.69 ± 0.47 Bb	63.43 ± 0.10 Bc	75.26 ± 0.85 Ca
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	67.49 ± 0.48 Bb	61.00 ± 0.46 Cc	69.53 ± 0.46 Da
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	58.83 ± 0.55 Db	55.62 ± 0.80 Dc	61.07 ± 0.16 EFa
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	58.70 ± 0.93 Db	55.27 ± 0.63 Dc	61.06 ± 0.17 EFa
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	58.48 ± 0.65 Db	55.06 ± 0.50 Dc	60.33 ± 0.47 Fa

หมายเหตุ ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่างของข้าวสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 ระหว่างข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวสารทั้ง 3 พันธุ์มีค่าความสว่างเท่ากับ 81.35, 73.21 และ 84.99 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง (68.46, 64.32 และ 76.43) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้เนื่องจากข้าวสารถูกขัดสีส่วนของเนื้อเยื่อชั้นนอกๆ ของเมล็ดข้าว ซึ่งมีสารรงควัตถุ และองค์ประกอบทางเคมีตัวอื่นๆ ที่มีผลต่อสีของเมล็ดข้าว เช่น โพรตีน ออกไปเหลือส่วนใหญ่ที่เป็นสตาρχซึ่งมีสีขาว จึงทำให้ข้าวสารมีค่าความสว่างสูงกว่าข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกซึ่งมีค่าความสว่างเท่ากับ 60.83, 55.74 และ 61.37 ตามลำดับ มีค่าลดลงจากข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะผลของกระบวนการนี้ กล่าวคือ ในระหว่างขั้นตอนการแช่ข้าวเปลือก เอนไซม์กลุ่มไฮโดรลิติกถูกกระตุ้นให้ทำงานเพื่อย่อยสลายสตาρχบางส่วนให้เป็นน้ำตาล ตลอดจนย่อยโปรตีนบางส่วนให้เป็นกรดแอมิโน เมื่อนำไปผ่านขั้นตอนการนึ่ง น้ำตาลอิสระ และกรดแอมิโนที่ได้จากการย่อยสลายทำปฏิกิริยากันเกิดสารประกอบที่มีสีน้ำตาลจากปฏิกิริยามัลลาร์ด (Maillard type) รวมไปถึงสารอาหารต่างๆ ที่สามารถละลายน้ำได้ซึ่งอยู่ในเนื้อเยื่อชั้นนอกๆ ของเมล็ด เกิดการแพร่เข้าไปในส่วนของเนื้อเมล็ด ร่วมกับเกิดการควบแน่นของไอน้ำที่ผิวของข้าวเปลือกระหว่างขั้นตอนการนึ่ง อาจทำให้สีของเปลือกที่หุ้มเมล็ดข้าวซึมเข้าสู่เนื้อเมล็ดข้าว จึงเป็นสาเหตุทำให้ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีสีน้ำตาลอ่อนหรือคล้ำ และส่งผลให้ค่าความสว่างของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกลดต่ำลง

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 67.49-67.91, 61.00-64.23 และ 69.53-75.33 ตามลำดับ ลดลงจากข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว เอนไซม์กลุ่มไฮโดรลิติก ได้แก่ แอมิเลส และ โปรติเอส ถูกสร้างและกระตุ้นให้ทำงาน ซึ่งแอมิเลสย่อยสตาρχให้เป็นน้ำตาลบางส่วน และ โปรติเอสย่อยโปรตีนให้เป็นกรดแอมิโนบางส่วน ซึ่งโมเลกุลน้ำตาล และกรดแอมิโนที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดปฏิกิริยามัลลาร์ดโดยอาศัยความร้อนระหว่างการอบแห้งเมล็ดข้าว นอกจากนี้สารรงควัตถุซึ่งมีสีเหลืองและแดง ซึ่งมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งเมล็ดข้าว โดยพบมากในส่วนของเนื้อเยื่อส่วนนอกของเมล็ดข้าว เกิดการแพร่จากเนื้อเยื่อส่วนนอกเข้าไปยังเนื้อในเมล็ด (Tian *et al.*, 2010) ในระหว่างขั้นตอนการแช่ข้าว จึงเป็นผลทำให้ค่าความสว่างของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่างระหว่างข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ ปรากฏว่า ค่าความสว่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคัพภะเริ่มงอกมากขึ้น (จากระยะที่ 1-3) ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อคัพภะเริ่มงอกยาวขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลสตาρχ และ โปรตีน ถูกย่อยไปเป็นน้ำตาล และกรดแอมิโนเพิ่มมากขึ้น จึงอาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยามัลลาร์ดได้เพิ่มขึ้นและเป็นผลทำให้ค่าความสว่างลดลง

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ ซึ่งมีค่าความสว่างอยู่ในช่วง 58.48-58.83, 55.06-55.62 และ 60.33-61.07 ตามลำดับ มีค่าลดลงจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว สารสีถูกย่อยไปเป็นน้ำตาล และโปรตีนถูกย่อยไปเป็นกรดแอมิโน เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการหนึ่งทำให้ค่าความสว่างของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าลดลงทั้งนี้เพราะน้ำตาล และกรดแอมิโนที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการงอก เกิดปฏิกิริยามเมลลาร์ดในขั้นตอนการหนึ่งของกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง รวมไปถึงกระบวนการหนึ่งที่ทำให้เกิดการสลายตัวของน้ำตาลซูโครสไปเป็นน้ำตาลรีดิคซ์ จึงทำให้ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกเกิดปฏิกิริยามเมลลาร์ดได้มากกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ทำให้ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีสีน้ำตาลอ่อนหรือคล้ำ ส่งผลให้มีค่าความสว่างต่ำกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่างระหว่างข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ระยะต่างๆ ปรากฏว่า ค่าความสว่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคัพพะเริ่มงอกมากขึ้น (จากระยะที่ 1-3) ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ และเมื่อพิจารณาค่าความสว่างระหว่างข้าวแต่ละพันธุ์ พบว่า ข้าวสินเหล็กมีค่าความสว่างต่ำกว่าข้าวอีก 2 พันธุ์ ทั้งนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างทางด้านสายพันธุ์ องค์ประกอบทางเคมี และรงควัตถุที่มีอยู่ในข้าวแต่ละพันธุ์ที่มีมากน้อยแตกต่างกัน

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีค่าความสว่างลดลงจากข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอก พบว่า ค่าความสว่างมีค่าลดลงจากข้าวกล้อง โดยลดลงตามระดับความยาวคัพพะที่เพิ่มมากขึ้น จากนั้นเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความสว่างลดลง ส่วนเมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่างระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ข้าวกข6 มีค่าความสว่างสูงสุด รองลงมา คือ ข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวสินเหล็ก ตามลำดับ

3.1.1.2 ค่าสี a*

การเปลี่ยนแปลงค่าสี a* ของข้าวสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 11 โดยค่าสี a* แสดงถึงความเป็นสีเขียว (-a) และความเป็นสีแดง (+a) ของตัวอย่างที่นำมาตรวจวัด จากผลการทดลอง พบว่า ข้าวสารสุพรรณบุรี 1 (0.25) มีความเป็นสีแดง แต่มีความเป็นสีเขียวเมื่ออยู่ในรูปข้าวกล้อง (-1.69) และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (-0.46) และเมื่อนำข้าวเปลือกไปผลิตเป็นข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (-1.56 ถึง -1.51) ปรากฏว่า ค่าความเป็นสีเขียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากข้าวกล้อง ส่วนข้าวสารสินเหล็ก (0.20) มีความเป็นสีแดง และค่าความเป็นสีแดงเพิ่มมากขึ้นเมื่ออยู่ในรูปของข้าวกล้อง (1.35) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (2.95) และข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

(1.53-1.82) ส่วนข้าวสารกข6 (-3.06) จะอยู่ในรูปสีเขียว และมีค่าความเป็นสีเขียวเพิ่มมากขึ้นเมื่ออยู่ในรูปข้าวกล้อง (-2.77) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (-0.10) และข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (-2.64 ถึง -0.60) ค่าความเป็นสีเขียวและสีแดงนี้ เป็นผลจากสารรงควัตถุที่เกิดขึ้นในข้าวแต่ละพันธุ์มีความแตกต่างกัน โดยมีความเข้มที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้มีสีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 11 ค่าสี a* ในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	ค่าสี (a*) ^{1/}		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร	0.25 ± 0.02 Aa	0.20 ± 0.04 Fa	-3.06 ± 0.08 Fb
ข้าวกล้อง	-1.69 ± 0.07 Eb	1.35 ± 0.20 Ea	-2.77 ± 0.03 Ec
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก	-0.46 ± 0.08 Cc	2.95 ± 0.22 Aa	-0.10 ± 0.11 Ab
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	-1.56 ± 0.06 Db	1.53 ± 0.08 DEa	-2.64 ± 0.16 DEc
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	-1.55 ± 0.13 Db	1.71 ± 0.10 CDa	-2.52 ± 0.15 Dc
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	-1.51 ± 0.09 Dc	1.82 ± 0.25 Ca	-0.60 ± 0.03 Cb
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	-0.43 ± 0.05 Cb	2.16 ± 0.13 Ba	-0.40 ± 0.04 Bb
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	-0.41 ± 0.09 Cb	2.17 ± 0.08 Ba	-0.39 ± 0.06 Bb
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	-0.23 ± 0.08 Bb	2.19 ± 0.11 Ba	-0.28 ± 0.14 Bb

หมายเหตุ ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี a* ในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอทั้ง 3 ระยะ มีค่าความเป็นสีเขียว หรือสีแดงเพิ่มมากขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือก เริ่มงอก ขึ้นอยู่กับว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกอยู่ในรูปของสีใด ถ้าอยู่ในรูปสีเขียว เมื่อไปผ่านกระบวนการหนึ่งจะทำให้ค่าความเป็นสีเขียวเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าอยู่ในรูปสีแดง ก็ให้ค่าความเป็นสีแดงเพิ่มมากขึ้น

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า การนำข้าวเปลือกผลิตเป็นข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกทำให้ค่าความเป็นสีเขียวหรือแดงเพิ่มขึ้น โดยให้ผลในทำนองเดียวกันกับข้าวเปลือกที่นำไปทำให้เริ่มงอก ซึ่งพบว่า ค่าความเป็นสีเขียวหรือสีแดงมีค่าเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องเช่นกัน โดยเพิ่มขึ้นตามระดับ

ความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการนี้ พบว่า ข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความเป็นสีเขียวหรือแดงเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเป็นสีเขียวหรือแดงระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ข้าวสุพรรณบุรี 1 และ กข6 มีค่าสีอยู่ทางด้านความเป็นสีเขียว แต่ข้าวสินเหล็กมีค่าสีอยู่ทางด้านความเป็นสีแดง

3.1.1.3 ค่าสี b*

การเปลี่ยนแปลงค่าสี b* ของข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และ กข6 แสดงดังตารางที่ 12 โดยค่าสี b* แสดงถึงค่าความเป็นสีน้ำเงิน (-b) และความเป็นสีเหลือง (+b) ของตัวอย่างที่นำมาตรวจวัด

ตารางที่ 12 ค่าสี b* ในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	ค่าสี (b*) ^{1/}		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร	9.84 ± 0.19 Cc	12.01 ± 0.20 Fa	11.03 ± 0.22 Fb
ข้าวกล้อง	22.81 ± 0.07 Ba	20.58 ± 0.22 Ec	22.50 ± 0.18 Eb
ข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือก	28.86 ± 0.42 Ab	25.02 ± 0.21 Ac	33.00 ± 0.18 Aa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	22.94 ± 0.17 Bb	20.62 ± 0.09 Ec	24.67 ± 0.43 Da
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	23.00 ± 0.22 Bb	21.06 ± 0.27 Dc	24.91 ± 0.18 Da
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	23.13 ± 0.18 Bb	21.34 ± 0.27 Dc	25.63 ± 0.22 Ca
ข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	28.89 ± 0.61 Ab	24.41 ± 0.14 Cc	32.37 ± 0.13 Ba
ข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	29.06 ± 0.25 Ab	24.63 ± 0.30 BCc	32.45 ± 0.41 Ba
ข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	29.32 ± 0.28 Ab	24.80 ± 0.13 ABc	32.59 ± 0.18 Ba

หมายเหตุ ^{1/} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าสี b* ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสาร และข้าวกล้อง ซึ่งมีค่าสีอยู่ทางด้านความเป็นสีเหลือง พบว่า ข้าวสารมีค่าเท่ากับ 9.84, 12.01 และ 11.03 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง (22.81, 20.50 และ 22.81) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยค่าความเป็นสีเหลืองนี้แปรผกผันกับค่าความสว่าง (L*) และเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการนี้ พบว่า ข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือกซึ่งมีค่าเท่ากับ 28.86, 25.02 และ 33.00 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก

ข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะผลของกระบวนการหนึ่งที่ทำให้เกิดปฏิกิริยามอลต์คาร์ด และการซึมผ่านของสารรงควัตถุเข้าสู่เนื้อในเมล็ด จึงทำให้ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีสีน้ำตาลอ่อนหรือคล้ำ และให้ค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี b* ปรากฏว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีค่าความเป็นสีเหลืองอยู่ในช่วง 22.94-23.13, 20.62-21.34 และ 24.67-25.63 ตามลำดับ มีค่าเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคัพพะเริ่มงอกมากขึ้น (จากระยะที่ 1-3) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากเมื่อระยะคัพพะเริ่มงอกยาวขึ้น โมเลกุลสตาร์ช และ โปรตีน ถูกย่อยไปเป็นน้ำตาล และกรดแอมิโนเพิ่มมากขึ้น จึงอาจเกิดปฏิกิริยามอลต์คาร์ดได้มากขึ้น

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีค่าความเป็นสีเหลืองอยู่ในช่วง 28.89-29.32, 24.41-24.80 และ 32.37-32.59 ตามลำดับ มีค่าเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นผลจากในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว เกิดการย่อยสลายของสตาร์ช และ โปรตีน ไปเป็นน้ำตาล และกรดแอมิโน เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง ทำให้เกิดปฏิกิริยามอลต์คาร์ดระหว่างน้ำตาล และกรดแอมิโน นอกจากนี้ขั้นตอนการนี้ยังทำให้ซูโครสสลายไปเป็นน้ำตาลรีดิซซ์ เกิดปฏิกิริยามอลต์คาร์ดได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าความเป็นสีเหลืองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือก เริ่มงอก และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเป็นสีเหลืองระหว่างข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ระยะต่างๆ ปรากฏว่า ค่าความเป็นสีเหลืองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคัพพะเริ่มงอกมากขึ้น (จากระยะที่ 1-3) ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกให้ค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอก พบว่า มีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง โดยเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพพะที่เพิ่มมากขึ้น จากนั้นเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ส่วนเมื่อเปรียบเทียบค่าความเป็นสีเหลืองระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ข้าวกข6 มีค่าความเป็นสีเหลืองสูงสุด รองลงมา คือ ข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวสิบเหล็ก ตามลำดับ

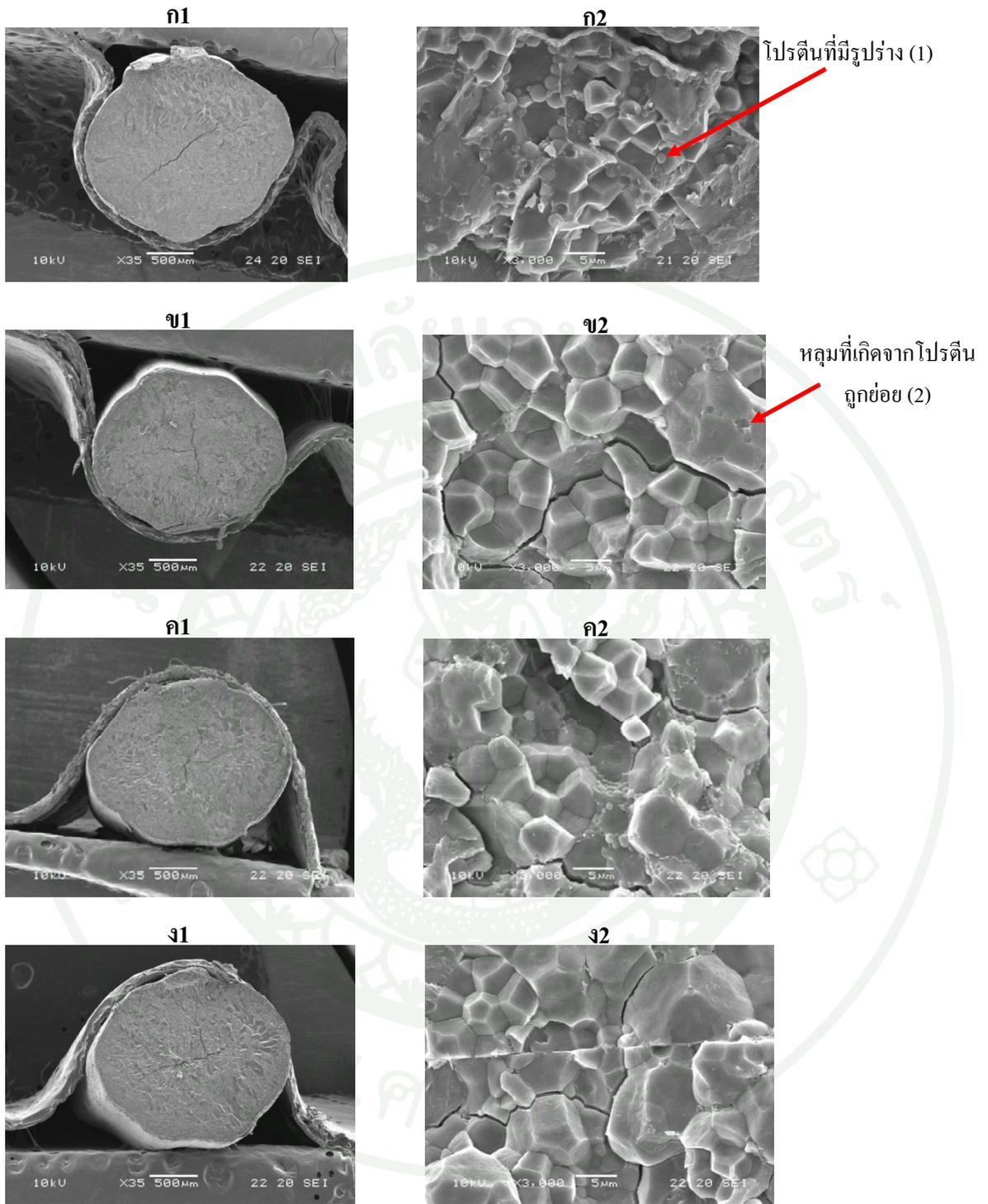
3.1.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเมล็ดข้าว

ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเมล็ดข้าวที่ส่วนตัดขวางในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM หรือกล้องเอสอีเอ็ม) ที่กำลังขยาย 35 (ข้าวเต็มเมล็ดหักครึ่งท่อน) และ 3,000 เท่า (บริเวณใจกลางของข้าวเต็มเมล็ดหักครึ่งท่อน) และลักษณะของเมล็ดข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกด้วยกล้องถ่ายภาพระยะใกล้ ปรากฏลักษณะดังภาพที่ 13-19

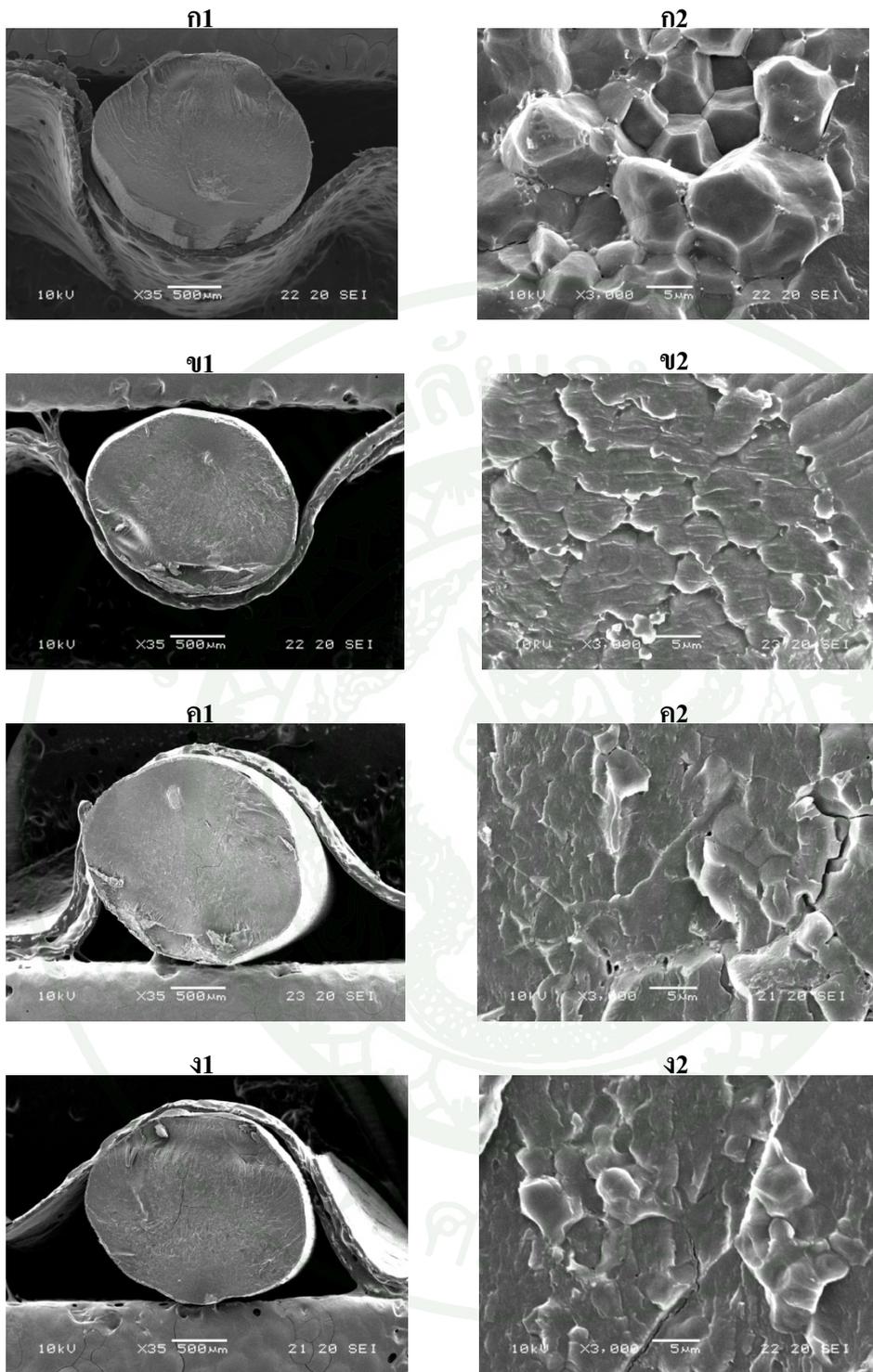
3.1.2.1 ข้าวสุพรรณบุรี 1

ลักษณะเมล็ดข้าว และลักษณะเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้อง และข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะ 1-3 ที่กำลังขยาย 35 และ 3,000 เท่า ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 13 ที่กำลังขยาย 35 เท่าซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเมล็ดข้าว พบว่า เมล็ดข้าวกล้องมีรูปร่างค่อนข้างกลม เมื่อนำเมล็ดข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอก ปรากฏว่า ลักษณะของเมล็ดข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีรูปร่างค่อนข้างกลมคล้ายคลึงกับเมล็ดข้าวกล้อง และที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเม็ดสตาร์ช ปรากฏว่า เม็ดสตาร์ชข้าวกล้องมีขนาด และรูปร่างไม่แตกต่างกัน คือ มีขนาดโดยเฉลี่ย 5 ไมโครเมตร ลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมโดยมองเห็นเหลี่ยมไม่ชัดเจน เม็ดสตาร์ชอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (Compound starch) ที่บริเวณผิวหน้า และบริเวณระหว่างกลุ่มของเม็ดสตาร์ชมีโปรตีนแทรกตัวอยู่ (ลูกศรชี้ 1; แสดงในภาพที่ 13) ส่วนลักษณะเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ระยะต่างๆ นั้น พบว่า มีความแตกต่างไม่ชัดเจนระหว่างเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ เม็ดสตาร์ชโดยส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมที่มีเหลี่ยมคมชัดมากขึ้นกว่าเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้อง เม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4.5-5 ไมโครเมตร ซึ่งลดลงจากเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องเล็กน้อย เม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่ยังคงอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม และที่ผิวของกลุ่มเม็ดสตาร์ชมีหลุมอยู่ (ลูกศรชี้ 2; แสดงในภาพที่ 13) ซึ่งหลุมดังกล่าวอาจเป็นหลุมของโปรตีนที่ถูกย่อยไปในระหว่างกระบวนการงอกของเมล็ดข้าว นอกเหนือจากโปรตีนที่ถูกย่อยแล้ว เม็ดสตาร์ชซึ่งถูกย่อยในระหว่างกระบวนการผลิตข้าวกล้อง ซึ่งเป็นผลจากกิจกรรมของเอนไซม์ไฮโดรลิติก ที่สร้างจากเชื้อชั้นแอลิเวโรนแล้ว เคลื่อนย้ายไปยังเนื้อในเมล็ดในระหว่างข้าวงอก โดยเอนไซม์ดังกล่าวเริ่มย่อยเอมิโลพลาสต์ ซึ่งห่อหุ้มเม็ดสตาร์ชไว้ภายในก่อน จากนั้นเกิดการย่อยสลายเม็ดสตาร์ชจากด้านนอก จนกระทั่งเกิดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายได้ (Soluble polysaccharide) แล้วย่อยสลายพอลิแซ็กคาไรด์ดังกล่าวต่อจนได้เป็นน้ำตาล (Zakaria *et al.*, 2000) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มองเห็นรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเป็นเหลี่ยมคมมากขึ้นเมื่อนำเมล็ดข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการงอก

ลักษณะเมล็ดข้าว และลักษณะเมล็ดสตาร์ชของข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือก และข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะ 1-3 ที่กำลังขยาย 35 และ 3,000 เท่า ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 14 ที่กำลังขยาย 35 เท่า พบว่า เมล็ดข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือกมีรูปร่างค่อนข้างกลม ส่วนลักษณะของเมล็ดข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีรูปร่างค่อนข้างกลมคล้ายคลึงกับเมล็ดข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือก และที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ปรากฏว่า เม็ดสตาร์ชที่บริเวณใจกลางเมล็ดของข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือก ยังคงหลงเหลือลักษณะของเม็ดสตาร์ชที่มีเหลี่ยมคมอยู่บ้าง แต่เม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่หลอมรวมกันบางส่วนเนื่องจากเกิดการเจลาติไนซ์โดยเฉพาะบริเวณผิวหนังของกลุ่มเม็ดสตาร์ช แสดงให้เห็นว่า เมล็ดข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือกนี้จัดอยู่ในกลุ่มของข้าวนี้บางส่วน (Partially parboiled rice) เนื่องจากเม็ดสตาร์ชไม่เกิดการเจลาติไนซ์ทั้งหมด (อรอนงค์, 2550) ส่วนลักษณะเม็ดสตาร์ชของข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ นั้น พบว่า เม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ยังไม่สมบูรณ์ เพราะยังสามารถมองเห็นลักษณะของเม็ดสตาร์ชอยู่บ้างแต่อยู่ในรูปที่หลอมรวมกัน ไม่มีเหลี่ยมคม ซึ่งเมล็ดข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ นี้จัดอยู่ในกลุ่มของข้าวนี้บางส่วนเช่นเดียวกับเมล็ดข้าวนี้กล็องจากข้าวเปลือก



ภาพที่ 13 ลักษณะเมล็ดข้าว และสัณฐานบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวกล้องในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1;
 ก) ข้าวกล้อง ข) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ค) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอ
 ระยะที่ 2 และ ง) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
 แบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ

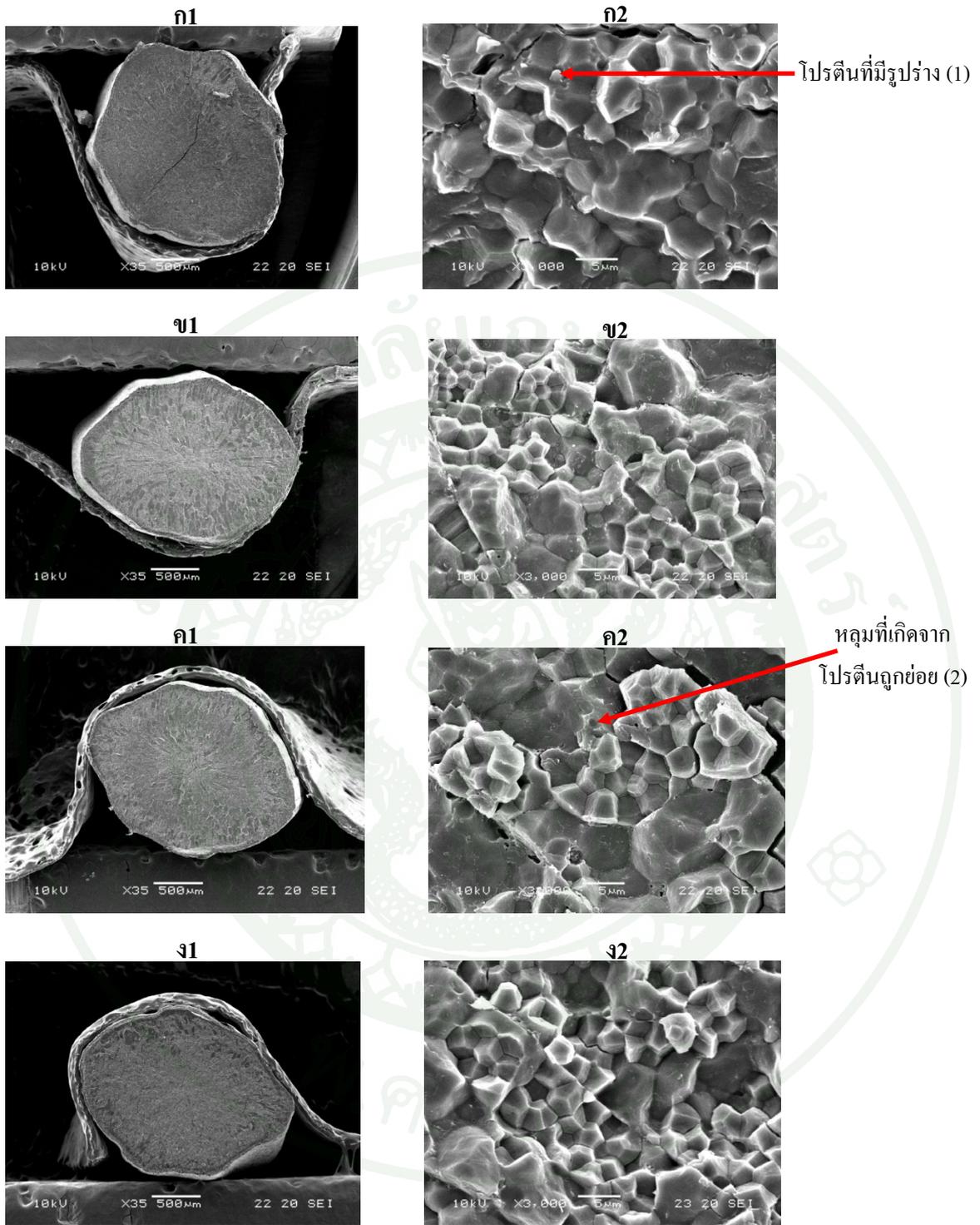


ภาพที่ 14 ลักษณะเมล็ดข้าว และสัณฐานบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวนึ่งในข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1; ก) ข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข) ข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ค) ข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2 และ ง) ข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ

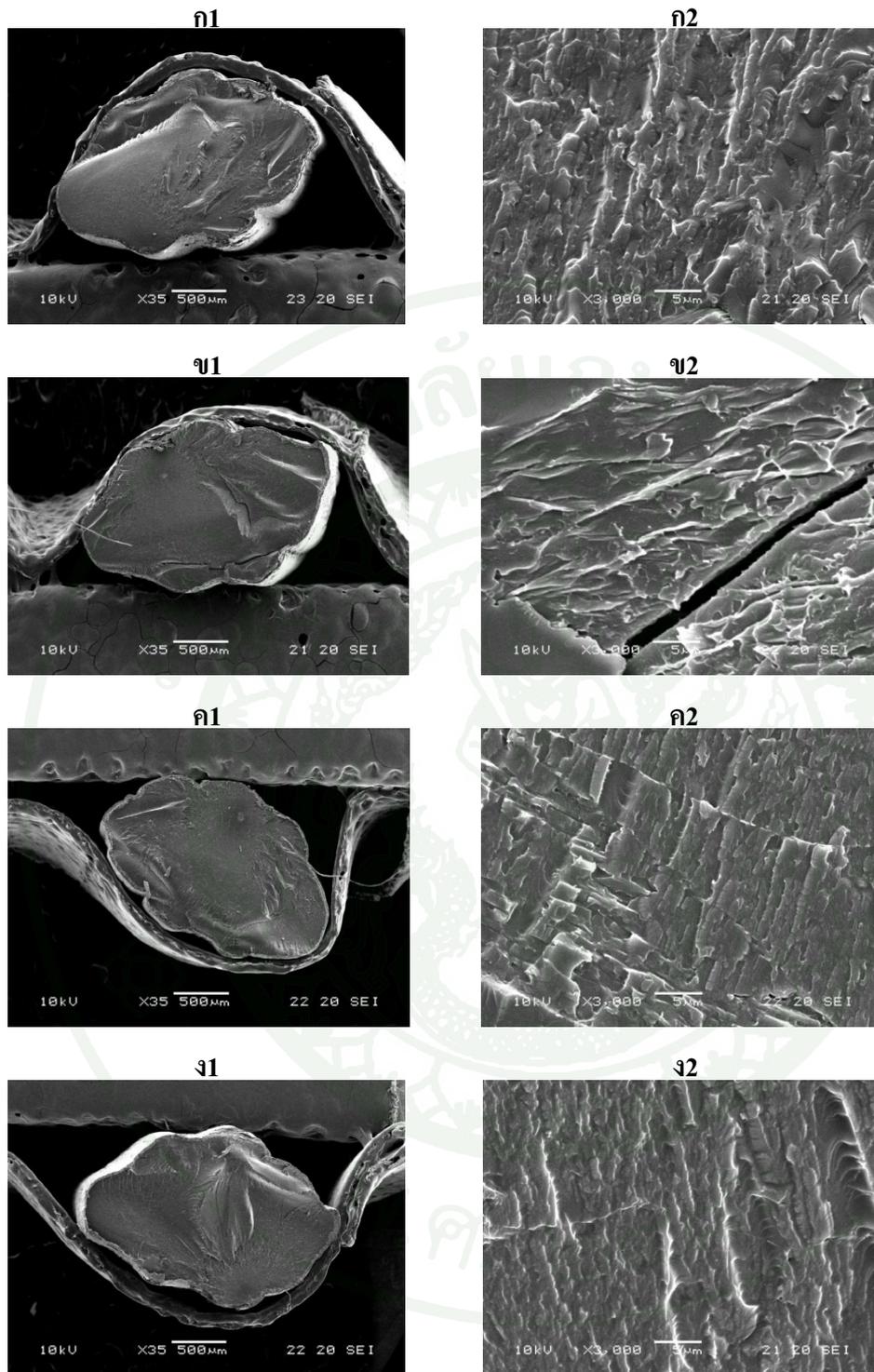
3.1.2.2 ข้าวสินเหล็ก

ลักษณะเมล็ดข้าว และลักษณะเมล็ดสตาร์ชของข้าวกล้อง และข้าวกล้องจากข้าวเปลือก เริ่มงอกระยะ 1-3 ที่กำลังขยาย 35 และ 3,000 เท่า ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 15 ที่กำลังขยาย 35 เท่าซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเมล็ดข้าว พบว่า เมล็ดข้าวกล้องมีรูปร่างค่อนข้างกลม เมื่อนำเมล็ดข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอก ปรากฏว่า ลักษณะของเมล็ดข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีรูปร่างค่อนข้างเป็นวงรีแตกต่างจากเมล็ดข้าวกล้อง และที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเมล็ดสตาร์ช ปรากฏว่า เม็ดสตาร์ชข้าวกล้องมีขนาด และรูปร่างไม่แตกต่างกัน คือ มีขนาดโดยเฉลี่ย 5 ไมโครเมตร ลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมโดยมองเห็นเหลี่ยมไม่ชัดเจน เม็ดสตาร์ชอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม บริเวณผิวหน้า และบริเวณระหว่างกลุ่มของเม็ดสตาร์ชมีโปรตีนแทรกตัวอยู่บ้าง (ลูกศรชี้ 1; แสดงในภาพที่ 15) ส่วนลักษณะเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ระยะต่างๆ นั้น พบว่า มีความแตกต่างระหว่างเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ ไม่ชัดเจน เม็ดสตาร์ชโดยส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมที่มีเหลี่ยมคมชัดมากขึ้นกว่าเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้อง แต่มีขนาดเล็กลง (มีขนาดโดยเฉลี่ย 3-4 ไมโครเมตร) จากเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องเล็กน้อย เม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่ยังคงอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม และบางส่วนของบริเวณผิวหน้าของกลุ่มเม็ดสตาร์ชมีหลุมอยู่ (ลูกศรชี้ 2; แสดงในภาพที่ 15) ซึ่งหลุมดังกล่าวอาจเป็นหลุมของโปรตีนที่ถูกย่อยไปในระหว่างกระบวนการงอกของเมล็ดข้าว

ลักษณะเมล็ดข้าว และลักษณะเม็ดสตาร์ชของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะ 1-3 ที่กำลังขยาย 35 และ 3,000 เท่า ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 16 ที่กำลังขยาย 35 เท่า พบว่า เมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีรูปร่างเป็นวงรี เกิดรอยหยักที่บริเวณขอบของเมล็ดข้าวเนื่องจากเกิดการหดตัว ส่วนลักษณะของเมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายคลึงกับเมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ปรากฏว่า เม็ดสตาร์ชที่บริเวณใจกลางเมล็ดของทั้งข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ ไม่หลงเหลือลักษณะเม็ดสตาร์ชแล้ว เม็ดสตาร์ชหลอมรวมกันเนื่องจากเกิดการเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ แสดงให้เห็นว่าเมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และเมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกเหล่านี้อาจจัดอยู่ในกลุ่มของข้าวหนึ่งสมบูรณ์ (Fully parboiled rice) เนื่องจากสตาร์ชทั้งหมดที่มองเห็นเกิดการเจลาติไนซ์ทั้งหมด โดยเฉพาะในใจกลางของเมล็ดข้าว (อรอนงค์, 2550)



ภาพที่ 15 ลักษณะเมล็ดข้าว และสตราชั้นบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวในข้าวกล้องพันธุ์สินเหล็ก; ก) ข้าวกล้อง ข) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ค) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2 และ ง) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ

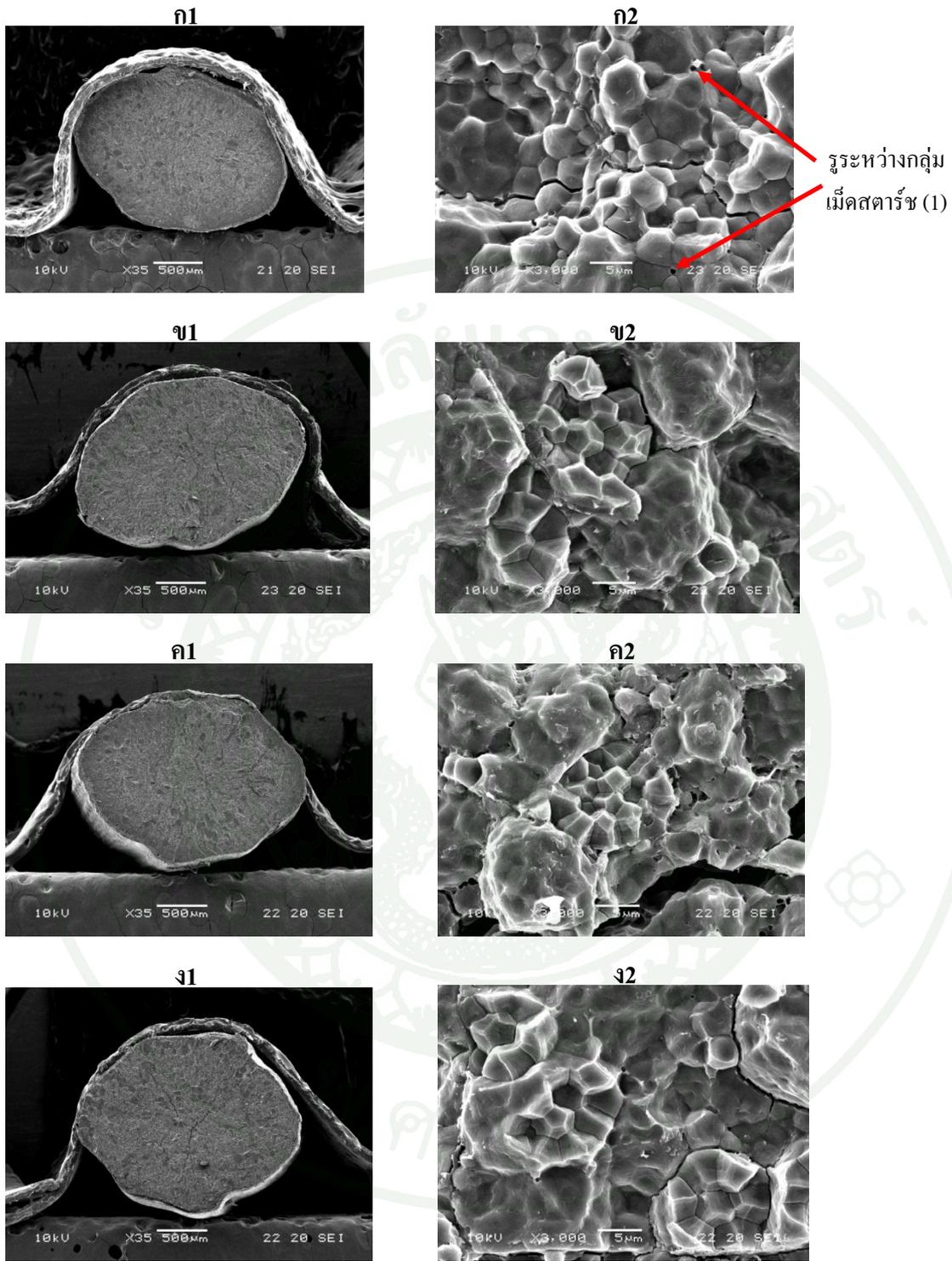


ภาพที่ 16 ลักษณะเมล็ดข้าว และสตาเรชบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวในข้าวหนึ่งพันธุ์สินเหล็ก 1; ก) ข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือก ข) ข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1 ค) ข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2 และ ง) ข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3 ผ่านกล็องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ

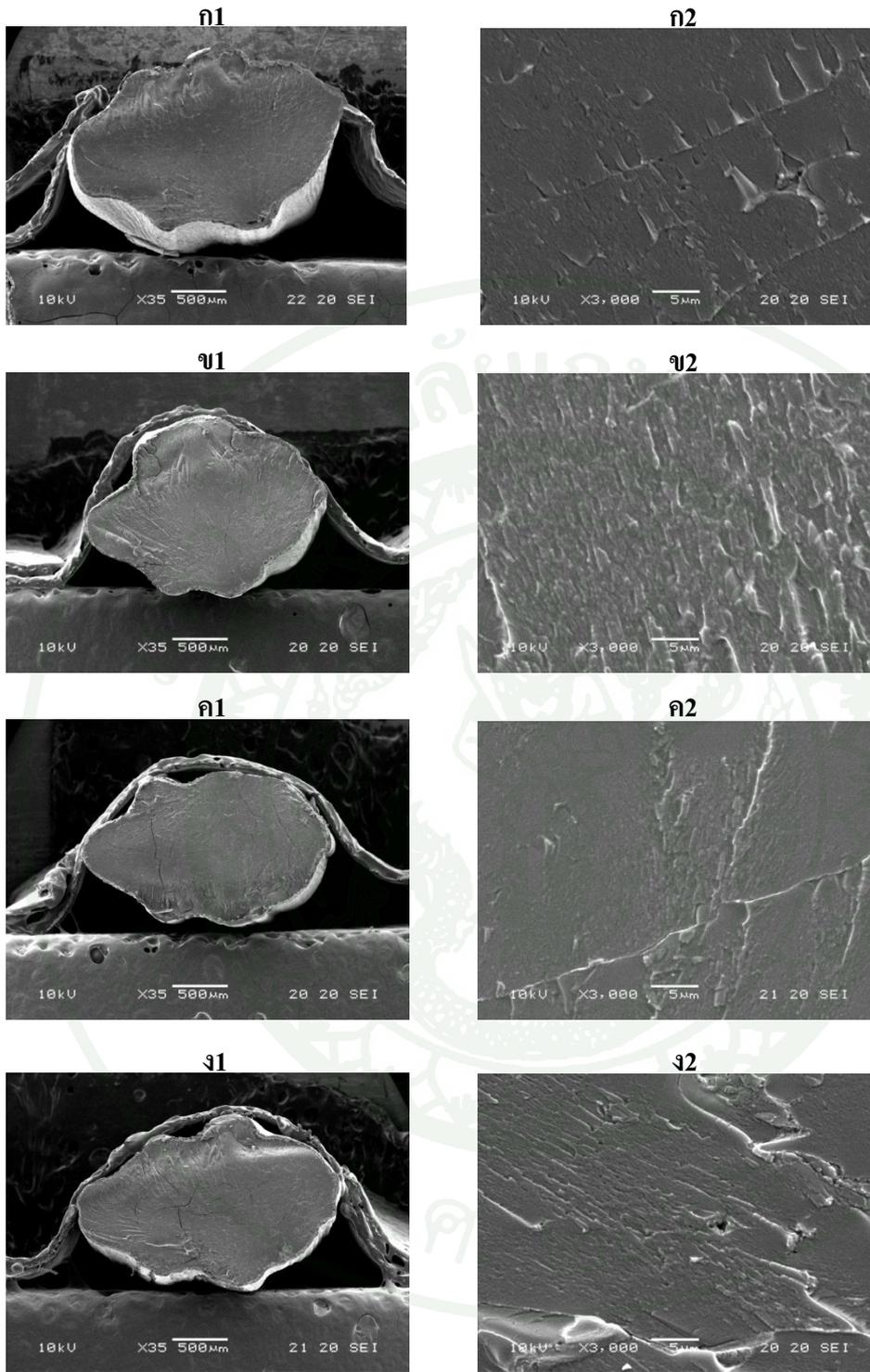
3.1.2.3 ข้าวภข6

ลักษณะเมล็ดข้าว และลักษณะเมล็ดสตาร์ชของข้าวกล้อง และข้าวกล้องจากข้าวเปลือก เริ่มงอกระยะ 1-3 ที่กำลังขยาย 35 และ 3,000 เท่า ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 17 ที่กำลังขยาย 35 เท่าซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเมล็ดข้าว พบว่า เมล็ดข้าวกล้องมีรูปร่างค่อนข้างกลมรี เมื่อนำเมล็ดเปลือกไปทำให้เริ่มงอก ปรากฏว่า ลักษณะของเมล็ดข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีรูปร่างค่อนข้างกลมรีคล้ายคลึงกับเมล็ดข้าวกล้อง และที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงลักษณะของเมล็ดสตาร์ช ปรากฏว่า เมล็ดสตาร์ชข้าวกล้องมีขนาด และรูปร่างไม่แตกต่างกัน คือ มีขนาดโดยเฉลี่ย 4 ไมโครเมตร ลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยม โดยมองเห็นเหลี่ยมไม่ชัดเจน เมล็ดสตาร์ชอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม บริเวณผิวหน้า และบริเวณระหว่างกลุ่มของเมล็ดสตาร์ชมีโปรตีนแทรกตัวอยู่บ้าง แต่มีลักษณะเด่น คือ ระหว่างกลุ่มของเมล็ดสตาร์ชมีรูขนาดเล็กๆ ประปนอยู่ (ลูกศรชี้ 1; แสดงในภาพที่ 17) ส่วนลักษณะเมล็ดสตาร์ชของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ระยะต่างๆ นั้น พบว่า มีความแตกต่างระหว่างเมล็ดสตาร์ชของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ ไม่ชัดเจน แต่ขนาดโดยเฉลี่ยของเมล็ดสตาร์ชในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ (ขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4-5 ไมโครเมตร) มีขนาดใหญ่กว่าเมล็ดสตาร์ชจากข้าวกล้องเล็กน้อย เมล็ดสตาร์ชโดยส่วนใหญ่เกาะกลุ่มกันในลักษณะที่เกิดการหลอมรวมตัวกันบางส่วนที่บริเวณผิวหน้าของเมล็ดสตาร์ช และระหว่างกลุ่มของเมล็ดสตาร์ชมีรูขนาดเล็กๆ ประปนอยู่ด้วยเช่นเดียวกันกับข้าวกล้อง

ลักษณะเมล็ดข้าว และลักษณะเมล็ดสตาร์ชของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะ 1-3 ที่กำลังขยาย 35 และ 3,000 เท่า ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 18 ที่กำลังขยาย 35 เท่า พบว่า เมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีรูปร่างเป็นวงรี เกิดรอยหยักที่บริเวณขอบของเมล็ดข้าวเนื่องจากเกิดการหดตัว ส่วนลักษณะของเมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีรูปร่างเป็นวงรีคล้ายคลึงกับเมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และที่กำลังขยาย 3,000 เท่า ปรากฏว่า เมล็ดสตาร์ชที่บริเวณใจกลางเมล็ดของทั้งข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทุกระยะ ไม่หลงเหลือลักษณะเมล็ดสตาร์ชแล้ว เมล็ดสตาร์ชหลอมรวมกันเนื่องจากเกิดการเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ แสดงให้เห็นว่าเมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และเมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกเหล่านี้อาจจัดอยู่ในกลุ่มของข้าวหนึ่งสมบูรณ์ (Fully parboiled rice) เนื่องจากสตาร์ชทั้งหมดที่มองเห็นเกิดการเจลาติไนซ์ทั้งหมด โดยเฉพาะในใจกลางของเมล็ดข้าว (อรอนงค์, 2550)



ภาพที่ 17 ลักษณะเมล็ดข้าว และสตาเรอชบริเวณใจกลางเมล็ดข้าวในข้าวกล้องพันธุ์กข6; ก) ข้าวกล้อง
ข) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ค) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2 และ
ง) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ



ภาพที่ 18 ลักษณะเมล็ดข้าว และสตรูคเจอร์บริเวณใจกลางเมล็ดข้าวในข้าวหนึ่งพันธุ์กข6; ก) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ค) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2 และ ง) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย (1) 35 และ (2) 3,000 เท่า ตามลำดับ

การจัดประเภทของข้าวหนึ่งว่าเป็นข้าวหนึ่งสมบูรณ์หรือข้าวหนึ่งบางส่วน สามารถพิจารณาได้จากลักษณะความเป็นเมล็ดสตาร์ชที่หลงเหลืออยู่บริเวณใจกลางของเมล็ดข้าว (ภาพจากกล้อง SEM) ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะการเกิดสีข้าวขุ่นที่บริเวณใจกลางของเมล็ดข้าว (ภาพจากกล้องถ่ายภาพระยะใกล้) โดยข้าวหนึ่งที่เป็นข้าวหนึ่งสมบูรณ์นั้น ลักษณะความเป็นเมล็ดสตาร์ชไม่หลงเหลืออยู่ทั่วทั้งเมล็ดข้าว และไม่มีส่วนที่เป็นสีข้าวขุ่นอยู่ภายในเมล็ดข้าว แต่ข้าวหนึ่งที่เป็นข้าวหนึ่งบางส่วนนั้น พบว่า ยังคงหลงเหลือลักษณะความเป็นเมล็ดสตาร์ชอยู่บ้าง และสามารถตรวจพบลักษณะสีข้าวขุ่นอยู่ภายในเมล็ดข้าวได้ จากผลการตรวจสอบลักษณะเมล็ดสตาร์ชของเมล็ดข้าวด้วยกล้อง SEM และภาพจากกล้องถ่ายภาพระยะใกล้ (ภาพที่ 19) ของงานวิจัยนี้ สามารถระบุได้ว่าข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือก และข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 จัดเป็นข้าวหนึ่งบางส่วน เนื่องจากเมล็ดข้าวมีทั้งลักษณะความเป็นเมล็ดสตาร์ชที่ยังหลงเหลือ และส่วนที่เป็นสีข้าวขุ่นอยู่ภายในเมล็ดข้าว (ลูกศรชี้ 1; แสดงในภาพที่ 19) ส่วนข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือก และข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสินเหล็ก และข้าว กข6 จัดเป็นข้าวหนึ่งสมบูรณ์ เนื่องจากเมล็ดข้าวไม่หลงเหลือลักษณะความเป็นเมล็ดสตาร์ชอยู่ และไม่มีส่วนที่เป็นสีข้าวขุ่นอยู่ในเมล็ดข้าว การที่ข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือก และข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 ให้ลักษณะที่เป็นข้าวหนึ่งกล็องบางส่วนนั้น อาจเป็นผลจากข้าวสุพรรณบุรี 1 มีปริมาณน้ำที่เมล็ดข้าวดูดซึมเข้าไปในเมล็ดอยู่เพียงร้อยละ 33.15-33.21 (จากตารางที่ 4 และ 9) ซึ่งอาจไม่เพียงพอที่ทำให้เมล็ดสตาร์ชทั้งหมดเกิดการเจลาทิไนซ์ได้สมบูรณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวสินเหล็ก และข้าว กข6 ที่จัดเป็นข้าวหนึ่งสมบูรณ์ ซึ่งข้าวทั้ง 2 พันธุ์นี้ มีปริมาณน้ำที่เมล็ดข้าวดูดซึมเข้าไปสูงกว่าข้าวสุพรรณบุรี 1 โดยปริมาณน้ำที่ข้าวสินเหล็กดูดซึมได้มีค่าสูงถึงร้อยละ 36.40-37.40 (จากตารางที่ 4 และ 9) และข้าว กข6 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงถึงร้อยละ 37.18-37.65 (จากตารางที่ 4 และ 9) นั้น จึงพบว่า ทั้งข้าวสินเหล็ก และ กข6 มีปริมาณน้ำที่เมล็ดข้าวดูดซึมเข้าไปเพียงพอที่ทำให้เมล็ดสตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์ได้สมบูรณ์จนจัดเป็นข้าวหนึ่งสมบูรณ์

ลักษณะข้าวขุ่นภายในเมล็ดข้าว (1)



ภาพที่ 19 ลักษณะเมล็ดข้าวหนึ่งกล็องจากข้าวเปลือกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และ กข6 จากกล้องถ่ายภาพระยะใกล้

จากภาพที่ 13-19 สามารถสรุปได้ว่า เม็ดสตาร์ชของข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์ มีขนาด และรูปร่าง คล้ายคลึงกัน คือ มีขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4-5 ไมโครเมตร ลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยม เม็ดสตาร์ชมีทั้ง ที่เป็นเม็ดเดี่ยว และอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม และมีโปรตีนที่บริเวณผิวหน้า และระหว่างกลุ่มของเม็ดสตาร์ช เมื่อนำข้าวเปลือกไปผลิตเป็นข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ระยะต่างๆ ทำให้มองเห็นเหลี่ยมคมของ เม็ดสตาร์ชชัดเจนขึ้น แต่เม็ดสตาร์ชมีขนาดโดยเฉลี่ยเล็กลงจากเม็ดสตาร์ชของข้าวกล้อง ที่บริเวณผิวหน้า ระหว่างกลุ่มของเม็ดสตาร์ชมีหลุมของโปรตีนที่ถูกย่อยออกไปปรากฏให้เห็น และเมื่อนำข้าวเปลือกไป ผลิตเป็นข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก หรือเป็นข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะต่างๆ พบว่า ข้าวหนึ่ง กล้องจากข้าวเปลือก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะต่างๆ ในข้าวสินเหล็ก และข้าวข6 อาจ จัดอยู่ในกลุ่มของข้าวหนึ่งสมบูรณ์เนื่องจากสตาร์ชที่มองเห็นที่ส่วนใจกลางของเมล็ดข้าวไม่หลงเหลือ ลักษณะเม็ดสตาร์ชอยู่แล้ว ส่วนข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะ ต่างๆ ในข้าวสุพรรณบุรี 1 อาจจัดอยู่ในกลุ่มของข้าวหนึ่งบางส่วนเพราะที่ใจกลางของเมล็ดข้าวยังหลงเหลือ ลักษณะของเม็ดสตาร์ชอยู่

3.2 คุณภาพทางด้านเคมี

3.2.1 ปริมาณความชื้นหลังอบแห้ง

ผลการตรวจสอบปริมาณความชื้นของข้าวชนิดต่างๆ ในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และข6 หลังอบแห้ง แสดงดังตารางที่ 13 โดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นระหว่างข้าวสาร ข้าวกล้อง และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า ข้าวสารมีปริมาณความชื้น (ร้อยละ 11.48-12.11) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่ออยู่ในรูปข้าวกล้อง (ร้อยละ 9.32-9.98) และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (ร้อยละ 8.70-10.50)

ตารางที่ 13 ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ในข้าว 3 พันธุ์ หลังอบแห้งที่ 45 ± 5 °ซ เป็นเวลา 4-5 ชั่วโมง

ตัวอย่างข้าว	ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)*		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร	12.11 ± 0.11 Aa	11.48 ± 0.47 Aa	11.54 ± 0.17 Ca
ข้าวกล้อง	9.32 ± 0.05 Cb	9.98 ± 0.11 Ca	9.95 ± 0.07 Da
ข้าวนี้้งกล้องจากข้าวเปลือก	10.50 ± 0.00 Ba	9.47 ± 0.18 Db	8.70 ± 0.01 Fc
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1	9.08 ± 0.00 Db	9.05 ± 0.03 Db	9.65 ± 0.06 Ea
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2	8.96 ± 0.01 Dc	10.64 ± 0.09 Bb	12.12 ± 0.06 Ba
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3	9.45 ± 0.08 Cc	9.94 ± 0.12 Cb	12.64 ± 0.01 Aa
ข้าวนี้้งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1	9.52 ± 0.15 Ca	9.33 ± 0.02 Da	8.17 ± 0.02 Gb
ข้าวนี้้งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2	9.02 ± 0.00 Dc	9.27 ± 0.07 Db	9.62 ± 0.04 Ea
ข้าวนี้้งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3	9.44 ± 0.16 Ca	9.08 ± 0.06 Db	8.57 ± 0.00 Fc

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

ปริมาณความชื้นของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 พบว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพพะแตกต่างกัน (ร้อยละ 8.96-9.45, 9.05-10.64 และ 9.65-12.64) มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความแตกต่างทางด้านปริมาณความชื้นของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความยาวคัพพะที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ ระยะเวลาการเพาะข้าวให้เริ่มงอกที่นานขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวของความชื้นได้ทั่วถึงทั้งเมล็ดมากกว่า จึงทำให้เมล็ดข้าวสามารถกักเก็บความชื้นไว้ภายในเมล็ดได้สูงเมื่อระยะเวลาการเพาะให้เริ่มงอกนานขึ้น และเมื่อนำไปอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิ (45 °ซ) และระยะเวลาที่ใกล้เคียงกัน (4-5 ชั่วโมง) ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีการกระจายตัวของความชื้นทั่วถึงทั้งเมล็ดมากกว่า (ระยะเวลาเพาะให้เริ่มงอกนานๆ) เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำออกจากเมล็ดข้าวในระหว่างการอบแห้งได้ช้ากว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีการกระจายตัวของความชื้นที่อาจยังไม่ทั่วถึง (ระยะเวลาเพาะให้เริ่มงอกสั้นๆ) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ข้าวกข6 มีแนวโน้มของปริมาณความชื้นในเมล็ดสูงกว่าข้าวสินเหล็ก และสุพรรณบุรี 1 ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะข้าวกข6 มีการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเมล็ดในรูปของปริมาณความชื้นสุดท้ายหลังเพาะให้เริ่มงอก (ร้อยละ 37.25-37.65; ตารางที่ 9) ก่อนที่จะนำมาอบแห้งมีค่าสูงกว่าข้าวอีก 2 พันธุ์ ส่วนปริมาณความชื้นของข้าวนี้้งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 พบว่า ข้าวนี้้งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มี

ความยาวคัพภะแตกต่างกัน (ร้อยละ 9.02-9.52, 9.08-9.33 และ 8.17-9.62) มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากตารางที่ 13 สามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างข้าวทั้งหมด 27 ตัวอย่าง มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8.17-12.64 โดยแนวโน้มมีค่าสูงขึ้นเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอก และมีค่าสูงตามระดับความยาวคัพภะที่มากขึ้น ซึ่งปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวทั้งหมดดังกล่าวนี้ว่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา คือ ร้อยละ 13 ปริมาณความชื้นของข้าวสัมพันธ์กับอายุการเก็บรักษาข้าวอย่างมาก เนื่องจากความชื้นเร่งปฏิกิริยาเคมีและการเจริญของจุลินทรีย์ โดยปริมาณความชื้นบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในการเก็บรักษาข้าว หรือแบ่งข้าวให้มีคุณภาพดี (อรอนงค์, 2550) ถ้าแป้งมีความชื้นสูง อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะ (Glass transition temperature, Tg) จะลดต่ำลง คุณภาพของแป้งมีโอกาสเปลี่ยนแปลงได้ง่ายขึ้น (Kaletunc, 2003) และส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

3.2.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar)

การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 14 จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสารและข้าวกล้อง พบว่า ข้าวสารซึ่งมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เท่ากับ 7.46, 11.17 และ 10.02 มก./100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง (18.44, 20.34 และ 18.00 มก./100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้เนื่องจากข้าวสารถูกขัดผิวเอาชั้นแอลิวโรนและส่วนของเอมบริโอซึ่งมีน้ำตาลรีดิวซ์อยู่มากออกไป จึงเป็นผลทำให้ข้าวกล้องมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าข้าวสาร และเมื่อนำข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ไปผ่านกระบวนการนี้ พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (25.10, 30.11 และ 17.42 มก./100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะในขั้นตอนการแช่ข้าวของกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง เอนไซม์ที่มีในเมล็ดข้าวจะถูกกระตุ้นให้ทำงานและเปลี่ยนซูโครสให้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ (Ali and Bhattacharya, 1980) จึงทำให้ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับ Sujatha *et al.* (2004) ที่วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในข้าว 2 พันธุ์ ได้แก่ Jaya และ Kayame ซึ่งได้รับการเพาะปลูกในฤดูกาลที่แตกต่างกัน 3 ฤดู แล้วนำมาตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในรูปของข้าวกล้อง ข้าวสาร ข้าวหนึ่งกล้อง และข้าวสารหนึ่ง โดยพบว่า ข้าวทั้ง 2 พันธุ์มีช่วงของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดในรูปของข้าวหนึ่งกล้อง รองลงมา คือ ข้าวสารหนึ่ง ข้าวกล้อง และข้าวสาร ตามลำดับ

ตารางที่ 14 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่างข้าวโดยน้ำหนักแห้ง) ในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (มิลลิกรัม/ 100 กรัมตัวอย่างข้าวโดยน้ำหนักแห้ง)*		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร	7.46 ± 0.86 Gb	11.17 ± 0.99 Ga	10.02 ± 0.06 Ga
ข้าวกล้อง	18.44 ± 2.30 Fa	20.34 ± 1.18 Fa	18.00 ± 1.05 Fa
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก	25.10 ± 1.17 Eb	30.11 ± 1.35 Ea	17.42 ± 0.01 Fc
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	37.81 ± 1.69 Cc	43.89 ± 0.42 Cb	68.07 ± 2.17 Ca
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	41.28 ± 0.55 Bc	47.29 ± 0.22 ABb	73.57 ± 0.46 Ba
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	52.24 ± 2.28 Ab	48.69 ± 1.12 Ab	80.68 ± 3.12 Aa
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	31.44 ± 0.30 Dc	37.12 ± 0.05 Db	41.86 ± 0.69 Ea
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	36.52 ± 1.21 Cb	43.83 ± 1.01 Ca	42.63 ± 2.96 Eab
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	39.65 ± 0.57 BCc	45.67 ± 0.01 BCb	46.87 ± 0.30 Da

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์อยู่ในช่วง 37.81-52.24, 43.89-48.69 และ 68.07-80.68 มก./100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว เอนไซม์กลุ่มต่างๆ ถูกกระตุ้นให้ทำงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายให้เป็นน้ำตาล หรือลิมิตเดกซ์ทริน จึงทำให้ตรวจพบน้ำตาลรีดิวซ์ปริมาณสูงในขณะที่เมล็ดข้าวเริ่มงอก ซึ่งกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลสนี้มีรายงานว่า มีกิจกรรมสูงสุดในข้าวเหนียวดำที่ผ่านการแช่น้ำเป็นเวลา 72 ชั่วโมง แล้วเพาะให้เริ่มงอกที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 6 วัน (Usansa *et al.*, 2009) และเนื่องจากกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลสที่สูงขึ้นนี้เอง จึงเป็นผลทำให้ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นเมื่อมีระยะเริ่มงอกมากขึ้น (ระยะเริ่มงอกที่ 1-3) เมื่อพิจารณาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ระหว่างข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าสูงสุดในข้าวกข6 รองลงมา คือ สินเหล็ก และสุพรรณบุรี 1 ตามลำดับ โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นนี้แปรผันโดยตรงกับปริมาณแอมิโลเพกทินในเมล็ดสตาร์ช กล่าวคือ ในระหว่างที่เมล็ดข้าวเกิดการงอก เอนไซม์ตัวหลักที่

เกิดขึ้นและทำหน้าที่ย่อยสลาย คือ แอลฟา-เอมิเลส และบีตา-เอมิเลส โดยแอลฟา-เอมิเลสเป็นเอนไซม์ที่ช่วยโมเลกุลของสสารแบบส่ม สามารถย่อยได้ทั้งโมเลกุลของเอมิโลส และเอมิโลเพกทิน แต่ไม่ย่อยส่วนที่เป็นกิ่งของเอมิโลเพกทิน เป็นผลทำให้ได้น้ำตาลกลูโคส มอลโทส และลิมิต-เดคซ์ทริน ที่มีหมู่รีดิวซ์ ส่วนบีตา-เอมิเลสเป็นเอนไซม์ที่ช่วยโมเลกุลของสสารจากปลายของนอน-รีดิวซิงเอนด์ (Non-reducing end) เข้ามาทีละ 2 หน่วยกลูโคส แต่ไม่ย่อยกิ่งเช่นเดียวกันทำให้ได้มอลโทส โดยเอนไซม์จะเข้าย่อยสลายในส่วนอสัณฐานก่อน ซึ่งเป็นส่วนที่มีความยืดหยุ่นสูง และไม่แข็งแรง และเมื่อเปรียบเทียบระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของโมเลกุลเอมิโลเพกทิน พบว่า มีค่าสูงกว่าโมเลกุลของเอมิโลสมาก จึงเป็นสาเหตุทำให้ข้าวเหนียวกข6 ซึ่งมีเอมิโลเพกทินอยู่มาก เมื่อนำไปทำให้เริ่มงอก เอมิโลเพกทินมีแนวโน้มของการโค่นย่อยแบบส่มด้วยเอนไซม์จำนวนมากกว่า จึงทำให้ตรวจพบน้ำตาลรีดิวซ์ในข้าวเหนียวกข6 สูงกว่าข้าวอีก 2 พันธุ์ ซึ่งมีปริมาณเอมิโลเพกทินต่ำกว่า

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่าข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในช่วง 31.44-39.65, 37.12-45.67 และ 41.86-46.87 มก./100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ที่ลดลงจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกนั้น อาจเป็นผลเนื่องจากการสูญเสียน้ำตาลรีดิวซ์จากปฏิกิริยาเมลลาร์ด และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก 3 ระยะ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเริ่มงอกเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง เมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอก พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง โดยเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพพะที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ส่วนเมื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ข้าวกข6 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด รองลงมา คือ ข้าวสิบเหล็ก และข้าวสุพรรณบุรี 1 ตามลำดับ

3.2.3 ปริมาณโปรตีน

การเปลี่ยนแปลงปริมาณ โปรตีนของข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 แสดง

ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ปริมาณโปรตีน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง) ในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	ปริมาณโปรตีน (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)*		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร	7.27 ± 0.17 Ea	7.55 ± 0.03 Ca	6.21 ± 0.06 Db
ข้าวกล้อง	7.75 ± 0.00 Bb	8.57 ± 0.23 Ba	6.75 ± 0.07 BCc
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก	7.75 ± 0.04 Bb	8.46 ± 0.07 Ba	6.80 ± 0.00 BCc
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1	7.56 ± 0.00 CDb	8.38 ± 0.12 Ba	6.64 ± 0.06 Cc
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2	7.68 ± 0.07 BCDb	8.66 ± 0.07 Ba	6.91 ± 0.07 Bc
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3	7.54 ± 0.07 Db	8.55 ± 0.00 Ba	6.91 ± 0.00 Bc
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1	7.75 ± 0.10 Bb	8.40 ± 0.27 Ba	6.85 ± 0.13 Bc
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2	8.27 ± 0.07 Ab	9.54 ± 0.33 Aa	7.50 ± 0.13 Ac
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3	7.73 ± 0.00 BCb	9.39 ± 0.00 Aa	7.42 ± 0.00 Ac

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ โปรตีนของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวสารมีปริมาณ โปรตีนร้อยละ 7.27, 7.55 และ 6.21 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง (ร้อยละ 7.75, 8.57 และ 6.75 โดยน้ำหนักแห้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงให้เห็นว่าการที่ข้าวสารมีปริมาณ โปรตีนน้อยกว่าข้าวกล้องนั้น เกิดจากข้าวสารถูกขัดเอาผิวชั้นแอลิวโรน และส่วนของเอมบริโอซึ่งมีโปรตีนอยู่มากออกไป จึงเป็นผลทำให้ข้าวสารมีปริมาณ โปรตีนน้อยกว่าข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกจากข้าวทั้ง 3 พันธุ์ไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ซึ่งมีปริมาณ โปรตีนร้อยละ 7.75, 8.46 และ 6.80 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ โปรตีนปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสินเหล็ก (ร้อยละ 8.38-8.66 โดยน้ำหนักแห้ง) และกข6 (ร้อยละ 6.64-6.91 โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณ โปรตีนแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติจากข้าวกล้อง (ร้อยละ 8.57 และ 6.75 โดยน้ำหนักแห้ง) ยกเว้นในข้าวสุพรรณบุรี 1 ที่ปริมาณ โปรตีนในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (ร้อยละ 7.54-7.68 โดยน้ำหนักแห้ง) มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจาก

ข้าวกล้อง (ร้อยละ 7.75 โดยน้ำหนักแห้ง) เมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนระหว่างข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1 ซึ่งมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 7.56, 8.38 และ 6.64 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง ส่วนปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2 พบว่า มีปริมาณโปรตีนเท่ากับร้อยละ 7.68, 8.66 และ 6.91 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง แต่ปริมาณโปรตีนมีค่าลดลงอีกในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3 (ร้อยละ 7.54, 8.55 และ 6.91 โดยน้ำหนักแห้ง) ในระหว่างที่เมล็ดข้าวเริ่มงอก การย่อยโปรตีนในเมล็ดจะเกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์โปรติเอส ซึ่งย่อยโปรตีนสะสมในเมล็ดข้าวให้เป็นกรด แอมิโนกับเพปไทด์สายสั้นๆ และถูกสกุเทิลล์ดูดเข้าไปใช้เพื่อเป็นพลังงานให้กับต้นอ่อน นอกจากนี้ยังเกิดการสังเคราะห์โปรตีนควบคู่ไปกับการย่อยสลายโปรตีนด้วย (Palmiano and Juliano, 1972) จึงเป็นสาเหตุของการเพิ่มขึ้น และลดลงของปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนระหว่างข้าว 3 พันธุ์ พบว่า ข้าวสินเหล็กมีปริมาณโปรตีนสูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องจากข้าวสินเหล็กมีปริมาณโปรตีนเริ่มต้นสูงกว่าข้าวอีก 2 พันธุ์

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณโปรตีนในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 7.73-8.27, 8.40-9.54 และ 6.85-7.50 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ซึ่งปริมาณโปรตีนของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ที่เพิ่มขึ้นนี้ เป็นผลจากการนี้ทำให้เมล็ดสารถเกิดการเจลาทิไนซ์ และโปรตีนเสียสภาพกระจายตัวแทรกอยู่ในเมล็ดสารถที่เจลาทิไนซ์แล้ว (Bhattacharya, 1996) ทำให้โปรตีนเกาะกับสารถที่เจลาทิไนซ์แน่น และแยกออกจากสารถชยากขึ้นในระหว่างการขัดสี และบดเป็นแป้งข้าว จึงทำให้ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก มีปริมาณโปรตีนที่สูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีปริมาณโปรตีนมากกว่าข้าวกล้อง เมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอก พบว่า ปริมาณโปรตีนมีทั้งเพิ่มขึ้น และลดลงจากข้าวกล้อง โดยมีค่าลดลงในระยะเริ่มงอกที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้นในระยะเริ่มงอกที่ 2 และมีค่าลดลงในระยะเริ่มงอกที่ 3 และเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก มีปริมาณโปรตีนสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ส่วนเมื่อเปรียบเทียบปริมาณโปรตีนระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ข้าวสินเหล็กมีปริมาณโปรตีนสูงสุด รองลงมา คือ ข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวกข6 ตามลำดับ เพราะฉะนั้น หากต้องการบริโภคข้าวโดยหวังผลที่ปริมาณโปรตีน จึงควรเลือกบริโภคในรูปของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2 ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากข้าวสินเหล็ก

3.2.4 ปริมาณกรดแกมมา แอมิโนบิวทีริก (Gamma Amino Butyric Acid; GABA)

การเปลี่ยนแปลงปริมาณ GABA ของข้าวสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ปริมาณ GABA (มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่างข้าวโดยน้ำหนักแห้ง) ในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	ปริมาณ GABA (มิลลิกรัม/ 100 กรัมตัวอย่างข้าวโดยน้ำหนักแห้ง)*		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร	0.13 ± 0.02 Gb	0.32 ± 0.15 Ga	0.09 ± 0.01 Hb
ข้าวกล้อง	0.82 ± 0.19 Fb	1.89 ± 0.15 Fa	0.91 ± 0.06 Gb
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก	2.31 ± 0.14 Eb	2.76 ± 0.20 Eb	3.41 ± 0.01 Da
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	4.13 ± 0.38 Cc	6.54 ± 0.32 Ba	4.87 ± 0.10 Cb
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	4.82 ± 0.33 Bb	6.60 ± 0.15 Ba	6.67 ± 0.36 Ba
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	6.71 ± 0.37 Ab	7.23 ± 0.18 Ab	19.08 ± 0.08 Aa
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	2.79 ± 0.26 Db	3.60 ± 0.13 Da	2.45 ± 0.04 Fc
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	3.18 ± 0.15 Db	4.44 ± 0.03 Ca	2.88 ± 0.08 Ec
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	6.32 ± 0.15 Aa	4.62 ± 0.22 Cb	6.85 ± 0.30 Ba

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ GABA ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสารและข้าวกล้อง พบว่า ข้าวสารซึ่งมีปริมาณ GABA เท่ากับ 0.13, 0.32 และ 0.09 มก./100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง (0.82, 1.89 และ 0.91 มก./100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้เนื่องจากข้าวสารถูกขัดผิวเอาชั้นแอลิวโรน และส่วนของเอมบริโอซึ่งมี GABA สะสมอยู่ในส่วนนี้ออกไป จึงเป็นผลทำให้ข้าวกล้องมีปริมาณ GABA มากกว่าข้าวสาร และเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกซึ่งมีปริมาณ GABA เท่ากับ 2.32, 2.76 และ 3.41 มก./100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะในขั้นตอนการแช่ข้าวของกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง เอนไซม์ที่มีในเมล็ดข้าวจะถูกกระตุ้นให้ทำงานและเปลี่ยนโปรตีนให้เป็นกรดแอมิโนชนิดต่างๆ เช่น เอนไซม์

Glutamate decarboxylase (GAD) ซึ่งถูกกระตุ้นให้ทำงานในระหว่างการแช่น้ำของเมล็ดข้าว ทำหน้าที่เปลี่ยนกรดกลูตามิก (Glutamic acid) ไปเป็น GABA จึงทำให้ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีปริมาณ GABA สูงขึ้น (Komatsuzaki *et al.*, 2005)

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ GABA ปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณ GABA เท่ากับ 4.13-6.71, 6.54-7.23 และ 4.87-19.08 มก./100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว เอนไซม์ต่างๆ ที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวจะถูกกระตุ้นหรือถูกสร้างขึ้นใหม่ เอนไซม์เหล่านี้จะย่อยองค์ประกอบทางเคมีหลักของเมล็ดข้าว เช่น สตาร์ช และ โปรตีน เพื่อเป็นสารอาหารลำดับที่ 2 (Secondary metabolites) เช่น GABA และสารพวกฟีนอลิก เป็นต้น เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของต้นอ่อน การเพิ่มขึ้นของปริมาณ GABA เกิดขึ้นจากเอนไซม์ Glutamate decarboxylase (GAD) ซึ่งเปลี่ยนกรดกลูตามิก (Glutamic acid) ไปเป็น GABA โดยกระบวนการ Decarboxylation ในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว จึงเป็นผลทำให้เมื่อนำเมล็ดข้าวไปผ่านกระบวนการงอกแล้วมีปริมาณ GABA เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณ GABA ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก 3 ระยะ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า ปริมาณ GABA ของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเริ่มงอกเพิ่มขึ้น ส่วนเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ GABA ระหว่างข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า ข้าวกข6 มีแนวโน้มของปริมาณ GABA สูงสุด

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณ GABA ในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่าข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีปริมาณ GABA เท่ากับ 2.79-6.32, 3.60-4.62 และ 2.45-6.85 มก./100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณลดลงจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งปริมาณ GABA ของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ที่ลดลงจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก อาจเป็นผลจากเกิดการสูญเสียเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในการนึ่งข้าว และเกิดการสูญเสียเนื่องจากปฏิกิริยาเมตาบอลิซึมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง (Lamberts *et al.*, 2008) และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ GABA ของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก 3 ระยะ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า ปริมาณ GABA ของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเริ่มงอกเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีปริมาณ GABA สูงกว่าข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอก พบว่า ปริมาณ GABA มีค่าเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง โดยเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น จากนั้นเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีปริมาณ GABA ต่ำกว่าข้าวกล้อง

จากข้าวเปลือกเริ่มงอก แสดงว่า ความร้อน และความดันจากกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งมีผลทำให้ค่า GABA ของข้าวหนึ่งลดลงจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าลดลง ส่วนเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ GABA ระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ข้าวข6 มีปริมาณ GABA สูงสุด รองลงมา คือ ข้าวสินเหล็ก และข้าวสุพรรณบุรี 1 ตามลำดับ เพราะฉะนั้น หากต้องการบริโภคข้าวโดยหวังผลที่ปริมาณ GABA จึงควรเลือกบริโภคในรูปของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากข้าวข6

3.2.5 ปริมาณธาตุเหล็ก

การเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุเหล็กของข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และข6 แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ปริมาณธาตุเหล็ก (มิลลิกรัม/100 กรัมตัวอย่างข้าวโดยน้ำหนักแห้ง) ในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	ปริมาณธาตุเหล็ก (มิลลิกรัม/ 100 กรัมตัวอย่างข้าวโดยน้ำหนักแห้ง)*		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	ข6
ข้าวสาร	ND	ND	ND
ข้าวกล้อง	0.96 ± 0.02 Fb	1.27 ± 0.04 Da	0.15 ± 0.04 Fc
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก	1.11 ± 0.01 Eb	1.32 ± 0.04 Da	0.47 ± 0.04 Ec
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	1.20 ± 0.03 Db	1.90 ± 0.04 Ca	0.54 ± 0.02 DEc
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	1.27 ± 0.02 Cb	1.98 ± 0.01 BCa	0.55 ± 0.05 CDc
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	1.29 ± 0.01 Cb	1.92 ± 0.06 Ca	0.60 ± 0.02 BCDc
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	1.35 ± 0.04 Bb	2.06 ± 0.08 ABa	0.62 ± 0.01 BCc
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	1.39 ± 0.03 ABb	2.16 ± 0.05 Aa	0.66 ± 0.00 ABc
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	1.44 ± 0.02 Ab	2.08 ± 0.04 ABa	0.70 ± 0.03 Ac

หมายเหตุ ND = Not detected (ไม่สามารถตรวจพบได้)

* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวนอน และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอน แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

จากผลการทดลอง พบว่า ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณธาตุเหล็กในเมล็ดข้าวสารทั้ง 3 พันธุ์ได้ ส่วนข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.96, 1.27 และ 0.15

มก./100 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ เนื่องจากโดยธรรมชาติ เมล็ดข้าวเป็นธัญชาติที่มีปริมาณธาตุเหล็กในเมล็ดต่ำ เมื่อเทียบกับข้าวโพด หรือข้าวสาลี (Graham *et al.*, 2001) เมล็ดข้าวโดยทั่วไปมีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ในช่วงระหว่าง 0.63-2.44 มก./100 กรัม โดยข้าวพันธุ์ที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง มีธาตุเหล็กอยู่ในช่วง 1.8-2.2 มก./100 กรัม (Gregorio *et al.*, 2000) จากผลการทดลอง ธาตุเหล็กในข้าวสารที่ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณได้นั้น เนื่องจากธาตุเหล็กเป็นแร่ธาตุที่พบมากในส่วนเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด และชั้นแอลิวโรนของเมล็ดข้าว โดยจะอยู่ร่วมกับ โปรตีน เมื่อข้าวกล้องถูกขัดสีเอาชั้นผิวดังกล่าวออกไปเป็นข้าวสาร จึงอาจเป็นผลทำให้ข้าวสารมีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ในระดับที่น้อยมากจนวิธีที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์ไม่สามารถตรวจพบได้ และเมื่อนำข้าวเปลือกจากข้าวทั้ง 3 พันธุ์ไปผ่านกระบวนการนี้ พบว่าข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก มีปริมาณธาตุเหล็กเท่ากับ 1.11, 1.32 และ 0.47 มก./100 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในข้าวสุพรรณบุรี 1 และกข6 แต่ในข้าวสินเหล็ก ปรากฏว่า ปริมาณธาตุเหล็กระหว่างข้าวกล้อง และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ในขั้นตอนการแช่ข้าวของกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง แร่ธาตุที่สามารถละลายน้ำได้จะถูกดูดซึมเข้าสู่เนื้อในเมล็ดระหว่างการแช่น้ำ และการนึ่งของเมล็ดข้าว จึงทำให้ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีปริมาณธาตุเหล็กสูงจึ้นกว่าข้าวกล้อง

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุเหล็ก ปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ในช่วง 1.20-1.29, 1.90-1.98 และ 0.54-0.60 มก./100 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุเหล็กระหว่างข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า ข้าวสินเหล็ก มีปริมาณธาตุเหล็กสูงสุด เนื่องจากข้าวสินเหล็กเป็นข้าวที่ได้จากการปรับปรุงพันธุกรรมให้มีปริมาณธาตุเหล็กในเมล็ดสูง ประมาณ 1.5-2.1 มิลลิกรัม/100 กรัม (ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว, ม.ป.ป.) ซึ่งความแตกต่างของปริมาณธาตุเหล็กขึ้นอยู่กับความแตกต่างของสายพันธุ์ และพื้นที่เพาะปลูก เป็นต้น

ธาตุเหล็กที่พบในอาหารต่างๆ ไปจะอยู่ในรูป Heme iron (ร้อยละ 40) และ Non-heme iron (ร้อยละ 60) กลุ่มของ Heme พบในอาหารจำพวกเนื้อสัตว์ ส่วน Non-heme พบในพืช ผัก และธัญพืช ซึ่งปัญหาของการดูดซึมธาตุเหล็กที่อยู่ในรูป Non-heme iron โดยร่างกายมนุษย์สามารถย่อย ดูดซึม และนำธาตุเหล็กเหล่านี้ไปใช้ได้ค่อนข้างน้อย เพราะในพืชมีสารขัดขวางคุณค่าทางโภชนาการ เช่น สารขัดขวางการดูดซึมของธาตุเหล็ก ได้แก่ ไฟเตต แทนนิน เป็นต้น ทำให้ร่างกายนำธาตุเหล็กที่มีอยู่ในพืชไปใช้ประโยชน์ได้น้อย มีงานวิจัยหลายเรื่อง บ่งชี้ว่า การทำเมล็ดข้าวให้เริ่มงอกส่งผลทำให้ปริมาณไฟเตตลดลงได้ ซึ่ง Banhuen *et al.* (2010) พบว่า ข้าวเหนียวดำเปลือกดำ ข้าวแสงยอดเมืองพัสดุ และข้าวเชิงพัสดุ หลังเพาะให้เริ่มงอกมีปริมาณไฟเตตลดลงถึง 0.73, 0.71 และ 0.72 เท่าจากข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว มีเอนไซม์ไฟเตส (Phytase) ที่ย่อยไฟเตตเกิดขึ้น ทำให้

ปริมาณไฟฟ้ในเมล็ดข้าวลดลง ซึ่งจากตัวอย่างงานวิจัยดังกล่าว สามารถกล่าวได้ว่า การทำข้าวให้เริ่มงอกสามารถช่วยทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุเหล็กมากยิ่งขึ้น โดยร่างกายสามารถดูดซึมธาตุเหล็กไปใช้ได้ดีและมากขึ้น

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สิ้นเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุเหล็ก ปรากฏว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ในช่วง 1.35-1.44, 2.06-2.16 และ 0.62-0.70 มก./100 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งช่วยเก็บธาตุเหล็กไว้ในเมล็ดข้าว และเมื่อเปรียบเทียบข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ พบว่า ปริมาณธาตุเหล็ก ในข้าวสุพรรณบุรี 1 และกข6 ระหว่างระยะเริ่มงอกต่างๆ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในข้าวสิ้นเหล็ก ปริมาณธาตุเหล็กของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีปริมาณธาตุเหล็กสูงกว่าข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอก พบว่า ปริมาณ ธาตุเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง โดยเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพพะที่เพิ่มมากขึ้น จากนั้นเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีปริมาณธาตุเหล็กสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก แสดงว่า กระบวนการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเปลือก ร่วมกับกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งมีผลทำให้ปริมาณธาตุเหล็กของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนเมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุเหล็กระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ข้าวสิ้นเหล็ก มีปริมาณธาตุเหล็กสูงสุด รองลงมา คือ ข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวกข6 ตามลำดับ เพราะฉะนั้น หากต้องการบริโภคข้าวโดยหวังผลที่ปริมาณธาตุเหล็กจึงควรเลือกบริโภคในรูปของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3 จากข้าวทั้ง 3 พันธุ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากข้าวสิ้นเหล็ก

3.3 คุณภาพทางด้านเคมีเชิงฟิสิกส์

3.3.1 การเปลี่ยนแปลงความหนืด

การให้ความร้อนกับน้ำแป้งส่งผลทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและมีเอมิโลสกระจายตัวออกจากเม็ดสตาร์ช ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA พบการเปลี่ยนแปลงความหนืดเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากเม็ดสตาร์ชที่พองตัวดังกล่าว และต่อมาเกิดการลดลงของความหนืดซึ่งเป็นผลมาจากการการแตกของเม็ดสตาร์ชที่เกิดเจลลาทีไนซ์แล้ว (Whistler and BeMiller, 1999) ซึ่งการลดลงของความหนืดนี้ มีความแตกต่าง

กันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงหรือความเปราะของเม็ดสตาร์ชที่เกิดการพองตัว (Han and Hamaker, 2001) ความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชเป็นสัดส่วนที่ผกผันกับกำลังการพองตัว และขึ้นอยู่กับปริมาณแอมิโลสของสตาร์ช (Lii *et al.*, 1996) ส่วนความหนืดที่สูงขึ้นในช่วงสุดท้ายเมื่อลดอุณหภูมิ แสดงถึงการยึดเกาะกันหรือเกิดรีโทรเกรดของส่วนประกอบต่างๆ คือ เม็ดสตาร์ชที่พองตัว ส่วนที่แตกของเม็ดสตาร์ชที่พองตัว และโมเลกุลของสตาร์ชที่แขวนลอยหรือกระจายอยู่ในส่วนผสม (Singh *et al.*, 2003)

การวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าว 3 พันธุ์ คือ สุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) แล้ววิเคราะห์ผลของกราฟความหนืดเพื่อหาค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (Pasting temperature) เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (Pasting time) ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Trough) ความหนืดลดลง (Breakdown) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และความหนืดคืนตัว หรือค่าเซตแบค (Setback) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 18-20 (ภาพผนวกที่ ๓4-6)

ตารางที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวสุพรรณบุรี 1

ตัวอย่างข้าว ^{2/}	อุณหภูมิที่เริ่มเกิด ความหนืด (°ซ)	เวลาที่เกิดความหนืด สูงสุด (นาท)	การเปลี่ยนแปลงความหนืด (เซนติปัวส์)*				
			ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง ^{1/}	ความหนืดสุดท้าย	ความหนืดคืนตัว ^{1/}
WR	79.90 C	5.46 C	2,221 A	1,320 A	901 A	2,613 B	1,293 D
BR	80.65 C	5.99 B	1,810 B	1,211 B	599 B	2,728 B	1,517 B
PBR	85.60 B	6.73 A	131 EF	128 D	3 D	225 E	97 E
PGBR 1	79.90 C	5.73 B	1,577 C	1,001 C	576 B	2,481 D	1,480 C
PGBR 2	80.65 C	5.79 B	1,577 C	1,008 C	569 B	2,572 C	1,564 BC
PGBR 3	81.45 C	5.86 B	1,488 D	1,046 C	442 C	3,187 A	2,141 A
PPGBR 1	87.85 A	6.93 A	161 E	156 D	5 D	249 E	93 E
PPGBR 2	89.45 A	6.93 A	122 F	114 D	8 D	216 E	102 E
PPGBR 3	89.45 A	6.86 A	119 F	110 D	9 D	209 E	99 E

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

^{1/} ความหนืดลดลง = ความหนืดสูงสุด - ความหนืดต่ำสุด, ความหนืดคืนตัว = ความหนืดสุดท้าย - ความหนืดต่ำสุด

^{2/} WR = ข้าวสาร, BR = ข้าวกล้อง, PBR = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก, PGBR 1 = ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1, PGBR 2 = ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2, PGBR 3 = ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3, PPGBR 1 = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1, PPGBR 2 = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2, PPGBR 3 = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3

ตารางที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวสาลีหลัก

ตัวอย่างข้าว ^{2/}	อุณหภูมิที่เริ่มเกิด ความหนืด (°ซ)	เวลาที่เกิดความหนืด สูงสุด (นาท)	การเปลี่ยนแปลงความหนืด (เซนติปัวส์) [*]				
			ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง ^{1/}	ความหนืดสุดท้าย	ความหนืดคืนตัว ^{1/}
WR	75.95 E	5.86 E	3,700 A	2,378 A	1,322 A	3,621 A	1,243 B
BR	76.80 E	6.66 B	1,833 B	1,379 B	454 D	2,518 B	1,139 D
PBR	79.90 D	6.73 AB	477 F	465 F	12 E	796 F	331 E
PGBR 1	82.35 BC	6.26 CD	1,718 C	1,175 C	543 B	2,340 D	1,165 C
PGBR 2	81.45 CD	6.19 D	1,624 D	1,165 D	459 C	2,485 C	1,320 A
PGBR 3	82.35 BC	6.33 CD	1,480 E	1,033 E	447 D	2,170 E	1,137 D
PPGBR 1	84.00 AB	6.53 C	511 F	481 F	30 E	834 F	353 E
PPGBR 2	85.60 A	6.19 D	362 G	351 G	11 E	648 G	297 F
PPGBR 3	83.00 BC	6.93 A	376 G	374 G	2 E	652 G	278 F

หมายเหตุ ^{*} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

^{1/} ความหนืดลดลง = ความหนืดสูงสุด - ความหนืดต่ำสุด, ความหนืดคืนตัว = ความหนืดสุดท้าย - ความหนืดต่ำสุด

^{2/} WR = ข้าวสาร, BR = ข้าวกล้อง, PBR = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก, PGBR 1 = ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1, PGBR 2 = ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2, PGBR 3 = ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3, PPGBR 1 = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1, PPGBR 2 = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2, PPGBR 3 = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3

ตารางที่ 20 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวหกข6

ตัวอย่างข้าว ^{2/}	อุณหภูมิที่เริ่มเกิด ความหนืด (°ซ)	เวลาที่เกิดความหนืด สูงสุด (นาท)	การเปลี่ยนแปลงความหนืด (เซนติปัวส์)*				
			ความหนืดสูงสุด	ความหนืดต่ำสุด	ความหนืดลดลง ^{1/}	ความหนืดสุดท้าย	ความหนืดคืนตัว ^{1/}
WR	68.10 B	3.93 D	3,071 A	1,512 A	1,559 A	1,845 A	333 C
BR	67.25 B	3.99 D	2,017 B	1,087 C	930 B	1,307 D	220 D
PBR	50.25 D	4.99 C	1,667 C	1,373 B	294 C	1,916 A	543 A
PGBR 1	65.70 C	3.47 E	343 E	82 D	261 D	126 E	44 E
PGBR 2	67.25 B	3.33 E	183 F	59 D	124 E	85 EF	26 E
PGBR 3	70.45 A	3.30 E	95 G	33 D	62 E	45 F	12 E
PPGBR 1	50.30 D	5.53 B	1,412 D	1,289 B	123 E	1,627 B	338 C
PPGBR 2	50.25 D	4.99 C	1,374 D	1,087 C	287 D	1,596 BC	509 B
PPGBR 3	50.25 D	5.86 A	1,330 D	1,242 B	88 E	1,581 C	339 C

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง แสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

^{1/} ความหนืดลดลง = ความหนืดสูงสุด - ความหนืดต่ำสุด, ความหนืดคืนตัว = ความหนืดสุดท้าย - ความหนืดต่ำสุด

^{2/} WR = ข้าวสาร, BR = ข้าวกล้อง, PBR = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก, PGBR 1 = ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1, PGBR 2 = ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2, PGBR 3 = ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3, PPGBR 1 = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1, PPGBR 2 = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2, PPGBR 3 = ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3

3.3.1.1 อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด ($^{\circ}\text{C}$)

อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของข้าวสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 18-20 จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสารและข้าวกล้อง พบว่า ข้าวสารมีค่าเท่ากับ 79.90, 75.95 และ 68.10 $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง (80.65, 76.80 และ 67.25 $^{\circ}\text{C}$) อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดในข้าวกล้อง เกิดขึ้นเนื่องจากข้าวกล้องมีโปรตีนสูงกว่าข้าวสาร ซึ่งโปรตีนนี้เป็นตัวขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำลดลง และพองตัวได้ช้า จึงทำให้มีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดในข้าวกล้องสูงกว่าข้าวสาร เมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 และสินเหล็ก ซึ่งมีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดเท่ากับ 85.60 และ 79.90 $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการหนึ่งทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์ และทำให้โปรตีนแตกตัวหลอมรวมเชื่อมติดกันแน่นกับสตาร์ชที่เจลาทิไนซ์แล้ว มีผลทำให้ความสามารถในการจับกับน้ำของสตาร์ชลดลง รวมไปถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิด (Amylose-lipid complex) ในกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง จึงทำให้อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีค่าเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง แต่ในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกกข6 กลับพบว่า อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกกข6 มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องกข6 อาจบ่งชี้ถึงความเป็นระเบียบของโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลายไปในระหว่างการหนึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดความสูญเสียความสมบูรณ์ของเม็ดสตาร์ช และโครงสร้างผลึกถูกทำลาย ส่งผลให้เกิดสมบัติละลายได้ในน้ำเย็น (Lai, 2001) ดังนั้นข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกกข6 จึงมีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดต่ำกว่าข้าวกล้องกข6

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด ปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ จากข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีค่าอยู่ในช่วง 79.90-81.45, 81.45-82.35 และ 65.70-70.45 $^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นเพราะในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว เอนไซม์กลุ่มไฮโดรไลติกถูกกระตุ้นให้ทำงาน และย่อยโมเลกุลสตาร์ชซึ่งอาจทำให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็กลง ซึ่งเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กนี้พองตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ (Franco *et al.*, 1992) หรือผลของการย่อยทำให้สายพอลิเมอร์ของสตาร์ชมีขนาดสั้นลง และมีความเป็นผลึกมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากส่วนออสันฐานถูกทำลายไปก่อนในระหว่างการย่อย เหลือแต่ส่วนที่เป็นผลึกซึ่งมีความแข็งแรง (Aggarwal and Dollimore, 1998) จึงส่งผลให้ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอมีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดระหว่างข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ พบว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอทั้ง 3 ระยะของข้าวสุพรรณบุรี 1 และ

ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะของข้าวสินเหล็ก มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะของข้าวทข6

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และทข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 และสินเหล็ก มีค่าอยู่ในช่วง 87.85-89.45 และ 84.00-85.60 °ซ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง และข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการหนึ่ง ที่ทำให้สสารเกิดการเจลาติไนซ์ รวมไปถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิดในกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งจึงทำให้อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 และสินเหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทข6 พบว่า อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก แสดงให้เห็นว่าความเป็นระเบียบของโมเลกุลภายในเม็ดสสารจะถูกทำลายไปในระหว่างการหนึ่ง ส่งผลให้เกิดสมบัติละลายได้ในน้ำเย็น ดังนั้นข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทข6 จึงมีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดต่ำกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทข6

3.3.1.2 เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (นาท)

เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดของข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และทข6 แสดงดังตารางที่ 18-20 จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวสารซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.46, 5.86 และ 3.93 นาที ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง (5.99, 6.66 และ 3.99 นาที) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในข้าวสุพรรณบุรี 1 และสินเหล็ก แต่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติในข้าวทข6 การเพิ่มขึ้นของเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดในข้าวกล้อง เกิดขึ้นเนื่องจากข้าวกล้องมีโปรตีนอยู่มากกว่าข้าวสาร ซึ่งโปรตีนนี้เป็นตัวขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเม็ดสสาร ทำให้เม็ดสสารดูดซึมน้ำ และพองตัวได้ช้า จึงทำให้มีเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดในข้าวกล้องสูงกว่าข้าวสาร เมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และทข6 ซึ่งมีเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดเท่ากับ 6.73, 6.73 และ 4.99 นาที ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการหนึ่งทำให้เม็ดสสารหลอมรวมกันเชื่อมติดกันแน่นเนื่องจากเกิดเจลาติไนซ์ ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปในสสารที่เจลาติไนซ์แล้วได้ยาก จึงทำให้เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้อง จากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด ปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีค่าอยู่ในช่วง 5.73-5.86, 6.19-6.33 และ 3.26-3.46 นาที ตามลำดับ มีแนวโน้มต่ำกว่าข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว เอนไซม์กลุ่มไฮโดรลิติก ถูกกระตุ้นให้ทำงาน และย่อยโมเลกุลสตาร์ชซึ่งอาจทำให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็กลง ซึ่งเมื่อเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กนี้ดูดน้ำจนพองตัวเต็มที่จนมีความหนืดสูงสุด จึงใช้เวลาสั้นกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่กว่า จึงส่งผลให้ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดต่ำกว่าข้าวกล้อง และเมื่อพิจารณาเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดระหว่างข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ ในข้าว 3 พันธุ์ พบว่า มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดในข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าอยู่ในช่วง 6.86-6.93, 6.19-6.93 และ 4.99-5.86 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการนึ่ง รวมไปถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิดในกระบวนการผลิตข้าวนึ่ง จึงทำให้เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดของข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าเพิ่มขึ้น

3.3.1.3 ความหนืดสูงสุด (เซนติปัวส์)

ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการพองตัวของเม็ดสตาร์ชในน้ำเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งความหนืดสูงสุดของเม็ดสตาร์ชที่พองตัวได้ดีจะมีค่าสูง

ความหนืดสูงสุดของข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 18-20 จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบความหนืดสูงสุดของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวสารมีค่าเท่ากับ 2,221, 3,700 และ 3,071 เซนติปัวส์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง (1,810, 1,833 และ 2,017 เซนติปัวส์) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 การเพิ่มขึ้นของความหนืดสูงสุดในข้าวกล้อง เกิดขึ้นเนื่องจากข้าวกล้องมีโปรตีนอยู่มากกว่าข้าวสาร ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำลดลง และพองตัวได้ช้า จึงทำให้ค่าความหนืดสูงสุดในข้าวกล้องสูงกว่าข้าวสาร เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนืดสูงสุดของข้าวสารหรือข้าวกล้องระหว่างข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า ข้าวกข6 มีค่าความหนืดสูงสุดสูงกว่าข้าวอีก 2 ชนิด ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชข้าวเหนียวมีปริมาณแอมิโลเพกทินมาก จึงเกิดการดูดซึมน้ำ และพองตัวได้ดีกว่า รวมไปถึงเม็ดสตาร์ชของข้าวเหนียวมีความแข็งแรงน้อยกว่าเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้า ซึ่งให้ผลสอดคล้องจากการศึกษาลักษณะของเม็ดสตาร์ชโดยใช้

กล้องจุลทรรศน์ พบว่า ลักษณะของเมื่อดสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสต่ำจะอ่อนแอ และเปราะบาง ในระหว่างการหุงต้มจึงเกิดการพองตัวและแตกออกได้ง่าย ต่างจากสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณแอมิโลสสูง ซึ่งเมื่อดสตาร์ชมีความแข็งแรงและทนทานต่อการพองตัวจึงไม่เกิดการแตกได้ง่าย (Rani and Bhattacharya, 1995) และจากผลการทดลองเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการนี้ พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก สุพรรณบุรี 1 และสินเหล็กซึ่งมีค่าความหนืดสูงสุดเท่ากับ 131 และ 477 เซนติปัวส์ ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่า ข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการนี้ทำให้เมื่อดสตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์ รวมไปถึงการเกิด สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกิดในเมื่อดสตาร์ชของข้าวที่มีปริมาณ แอมิโลสสูง และกลาง ตามลำดับทำให้เมื่อดสตาร์ชพองตัวลดลง เป็นผลทำให้ความหนืดสูงสุดของข้าวหนึ่ง กล้องจากข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 และสินเหล็กมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง แต่สารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง แอมิโลสกับลิพิดนี้แทบไม่เกิดในสตาร์ชของข้าวเหนียว จึงพบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกกข6 ยังคงให้ ค่าความหนืดสูงสุดค่อนข้างสูง

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้อง จากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืด สูงสุด ปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีค่าอยู่ในช่วง 1,488- 1,577, 1,480-1,718 และ 95-343 เซนติปัวส์ ตามลำดับ โดยค่ามีแนวโน้มต่ำกว่าข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นเพราะ ในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว เอนไซม์กลุ่มไฮโดรลิติกถูกกระตุ้นให้ทำงาน เอนไซม์กลุ่มนี้ได้แก่ เอนไซม์แอมิเลส ซึ่งทำหน้าที่หลักในการย่อยสตาร์ช ประกอบด้วย 2 ชนิด คือ แอลฟา- และบีตา- โดย แอลฟา-แอมิเลส ย่อยสตาร์ชแบบสุ่ม ทำให้ความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนบีตา-แอมิเลส ย่อยสตาร์ช จากปลายน้ำตาลกลูโคสที่ไม่มีหมู่รีดิวซ์เข้ามาที่ละ 2 ตัว จึงไม่ค่อยมีผลในการทำให้ความหนืดของสตาร์ช เปลี่ยนแปลงมากนัก (อรอนงค์, 2550) และผลของการย่อยนี้เองอาจทำให้เมื่อดสตาร์ชมีขนาดเล็กกลง หรือ เกิดจากผลของการย่อยทำให้สายพอลิเมอร์ของสตาร์ชมีขนาดสั้นลง และมีความเป็นผลึกมากขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากส่วนอสัณฐานซึ่งเป็นส่วนที่มีความยืดหยุ่น ไม่แข็งแรงถูกทำลายไปก่อนในระหว่างการย่อย (Aggarwal and Dollimore, 1998) เหลือแต่ส่วนที่เป็นผลึก ซึ่งมีความแข็งแรงกว่า จึงส่งผลให้ข้าวกล้องจาก ข้าวเปลือกเริ่มงอกมีความหนืดสูงสุดลดลง

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่าน กระบวนการนี้เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดสูงสุดในข้าวหนึ่ง กล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 และสินเหล็ก มี ค่าอยู่ในช่วง 119-161, 362-511 และ 1,330-1,412 เซนติปัวส์ ตามลำดับ มีความหนืดสูงสุดต่ำกว่าข้าวกล้อง จากข้าวเปลือกเริ่มงอก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการนี้ ที่ทำให้เมื่อดสตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์ รวมไปถึง การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิด ทำให้เมื่อดสตาร์ชพองตัวลดลงจึงทำให้ความ หนืดสูงสุดของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 และสินเหล็ก มีค่าลดต่ำลงจากข้าวกล้อง

จากข้าวเปลือกเริ่มงอก แต่ในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกกข6 กลับพบว่า ค่าความหนืดสูงสุดของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก มีค่าสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก แสดงให้เห็นว่าความเป็นระเบียบของโมเลกุลภายในเมล็ดสารถูกทำลายไปในระหว่างการนี้ ส่งผลให้เกิดสมบัติละลายได้ในน้ำเย็น ดังนั้นข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกกข6 จึงมีความหนืดสูงสุดต่ำกว่าข้าวกล้อง

การผลิตข้าวเปลือกหนึ่ง ทำให้โครงสร้างภายในเมล็ดข้าวเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเมล็ดสารถูกเกิดเจลลาทีไนซ์ หลอมรวมกับ โปรตีน และลิพิด ทำให้ภายในเมล็ดมีลักษณะข้น (Pasty) และเกาะกันแน่นมากขึ้น ปิดช่องว่างระหว่างเมล็ดสารถัดก่อนเจลลาทีไนซ์ (Bhattacharya, 1985) และทำให้โมเลกุลของแอมิโลสไม่ซึมผ่านออกจากเมล็ดสารถัดได้มากเท่ากับเมล็ดสารถัดข้าวขาว อย่างไรก็ตาม ยังมีแอมิโลสบางส่วนที่ซึมออกมาจากเมล็ดสารถัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับฟิสิกัลในระหว่างกระบวนการผลิตข้าวหนึ่ง ซึ่งกระบวนการผลิตข้าวสารหนึ่งที่ต่างกันมีผลต่อลักษณะรูปแบบของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลส และไขมันด้วย จึงส่งผลต่อการพองตัวของเมล็ดสารถัด และเนื้อสัมผัสเจลสารถัดข้าวหนึ่ง ทำให้มีโครงสร้างร่างแหของแอมิโลสน้อยกว่าเจลสารถัดข้าวขาว (น้ำฝน, 2548)

3.3.1.4 ความหนืดต่ำสุด (เซนติปี๊วส์)

ค่าความหนืดต่ำสุด เป็นค่าความหนืดที่เกิดขึ้นหลังจากการให้ความร้อนแก่ของผสมสารถัดบางส่วนซึ่งพองตัวเต็มที่จากกระบวนการเจลลาทีไนเซชันเกิดการแตกออก ทำให้ความหนืดลดลงจนมีความหนืดต่ำสุด

ความหนืดต่ำสุดของข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 18-20 จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบความหนืดต่ำสุดของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่าข้าวสารซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,320, 2,378 และ 1,512 เซนติปี๊วส์ ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง (1,211, 1,379 และ 1,087 เซนติปี๊วส์) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 การลดลงของความหนืดต่ำสุดในข้าวกล้อง เกิดขึ้นเนื่องจากข้าวกล้องมีโปรตีนอยู่มากกว่าข้าวสาร ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเมล็ดสารถัด และช่วยทำให้เมล็ดสารถัดทนต่อแรงเฉือนได้ดี ทำให้เมล็ดสารถัดดูดซึมน้ำลดลงและพองตัวได้ช้า เม็ดสารถัดจึงค่อยๆ แตกออก ทำให้ความหนืดลดลงจนเกิดเป็นความหนืดต่ำสุด เมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการนี้ พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 128, 465 และ 1,373 เซนติปี๊วส์ ตามลำดับ มีความหนืดต่ำสุดต่ำกว่าข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการนี้ทำให้เมล็ดสารถัดเกิดการเจลลาทีไนซ์ และสูญเสียความหนืด

เมื่อนำข้าวเปลือกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปทำให้เริ่มงอกเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความค่าความหนืดต่ำสุดในข้าวกล้องจากข้าวเปลือก

เริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าอยู่ในช่วง 1,001-1,046, 1,033-1,175 และ 33-82 เซนติปาว์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความหนืดต่ำสุดต่ำกว่าข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการย่อยทำให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็กลง เมื่อเกิดการพองตัว จนกระทั่งเม็ดสตาร์ชแตกจนมีความหนืดต่ำสุดจึงมีค่าต่ำกว่าเม็ดสตาร์ชในข้าวกล้อง

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่ำสุดในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 และสิบเหล็กมีค่าอยู่ในช่วง 110-156 และ 374-481 เซนติปาว์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการงอกหนึ่งที่ทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาไทไนซ์และสูญเสียความหนืด จึงทำให้ความหนืดต่ำสุดของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 และสิบเหล็ก มีค่าลดลง แต่ในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกกข6 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1,087-1,289 เซนติปาว์ กลับพบว่า ค่าความหนืดต่ำสุดของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก มีค่าสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก แสดงให้เห็นว่าความเป็นระเบียบของโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลายไปในระหว่างการนี้ ส่งผลให้เกิดสมบัติละลายได้ในน้ำเย็น ดังนั้น ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกกข6 จึงมีความหนืดต่ำสุดสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

3.3.1.5 ความหนืดลดลง (เซนติปาว์)

ความหนืดลดลง (Breakdown) เป็นค่าที่แสดงถึงความคงทนต่ออุณหภูมิ และแรงกวนหรือแรงเฉือนของเม็ดสตาร์ชที่พองตัวแล้ว ความแตกต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและต่ำสุด เรียกว่าความหนืดลดลง หรือเบรคดาวน์ (Breakdown)

ความหนืดลดลงของข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 18-20 จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าเบรคดาวน์ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่าข้าวสารมีค่าเท่ากับ 901, 1,322 และ 1,559 เซนติปาว์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้าวกล้อง (599, 454 และ 930 เซนติปาว์) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 การลดลงของค่าเบรคดาวน์ในข้าวกล้อง เกิดขึ้นเนื่องจากข้าวกล้องมีโปรตีนมากกว่าข้าวสาร ซึ่งเป็นตัวขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำลดลง และพองตัวได้ช้า และช่วยทำให้เม็ดสตาร์ชที่พองตัวแล้วมีความคงทนต่ออุณหภูมิ และแรงเฉือนได้ดี เม็ดสตาร์ชจึงค่อยๆ แตกออก โดยถ้าเม็ดสตาร์ชใดมีค่าเบรคดาวน์อยู่สูง บ่งบอกถึงเม็ดสตาร์ชของตัวอย่างไม่แข็งแรง เนื่องจากหลังเม็ดสตาร์ชเกิดความหนืดสูงสุดแล้วแต่ยังมีการให้ความร้อนและแรงเฉือนต่อไป แล้วทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการแตกออกอย่างรวดเร็ว และทำให้ความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว จึงบ่งบอกได้ว่าเม็ดสตาร์ชนั้นไม่แข็งแรงซึ่งได้แก่เม็ดสตาร์ชของ

ข้าวสาร และเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการนี้ พบว่า ข้าวนี้กลิ้งจากข้าวเปลือก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3, 12 และ 294 เซนติปีวส์ ตามลำดับ มีค่าเบรคคาวนต่ำกว่าข้าวกลิ้ง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการนี้ ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์ เกิดการสูญเสียความหนืด รวมไปถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิด

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้อง จากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเบรคคาวน ปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีค่าอยู่ในช่วง 442-576, 447-543 และ 62-261 เซนติปีวส์ ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มต่ำกว่าข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะ ในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว เอนไซม์กลุ่มไฮโดรลิติกถูกกระตุ้นให้ทำงาน และย่อยโมเลกุล สตาร์ชซึ่งอาจทำให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดเล็กลง ซึ่งเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กนี้จะพองตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าเม็ด สตาร์ชขนาดใหญ่ หรือผลของการย่อยทำให้สายพอลิเมอร์ของสตาร์ชมีขนาดสั้นลง และมีความเป็นผลึก มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากส่วนอสัณฐานถูกทำลายไปก่อนในระหว่างการย่อย เหลือแต่ส่วนที่เป็นผลึก ซึ่งน้ำ เข้าไปได้ยาก จึงทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวได้น้อยลง และแตกออกยาก จึงส่งผลให้ข้าวกล้องจากข้าวเปลือก เริ่มงอกมีค่าเบรคคาวนลดลง

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่าน กระบวนการนี้เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเบรคคาวนในข้าวนี้ ปรากฏว่า ข้าวนี้กลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าอยู่ในช่วง 5-9, 2-30 และ 88-287 เซนติปีวส์ ตามลำดับ มีค่าเบรคคาวนต่ำกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจาก กระบวนการนี้ทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์และสูญเสียความหนืด รวมไปถึงการเกิดสารประกอบ เชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิด ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวลดลง เกิดความแตกต่างระหว่างค่าความหนืด สูงสุด และค่าความหนืดต่ำสุดมีค่าน้อย จึงทำให้ค่าเบรคคาวนของข้าวนี้กลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่า ลดลง

3.3.1.6 ความหนืดสุดท้าย (เซนติปีวส์)

เมื่อลดอุณหภูมิระบบลงจาก 95 เป็น 50 °C โมเลกุลพอลิเมอร์ต่างๆ จัดเรียงตัวใหม่ เกิดขึ้น โดยเฉพาะ โมเลกุลของแอมิโลสเกิดการเรียงตัวเป็นร่างแหสามมิติขึ้น เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้น ระหว่างโมเลกุลของแอมิโลสทำให้ได้ลักษณะโครงสร้างใหม่เกิดเป็นเจล ซึ่งมีผลทำให้ความหนืดของ ส่วนผสมเพิ่มขึ้นอีกครั้งเรียกว่า ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) (พิณทิพย์, 2547) โดยทั่วไปแล้วค่า ความหนืดสุดท้ายมักจะแปรผันตรงกับค่าการคืนตัวหรือค่าเซตแบค (Setback from trough) ซึ่งเกิดจากการ จัดเรียงตัวกันใหม่ของ โมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกทินเมื่อทำการลดอุณหภูมิลง

ความหนืดสุดท้ายของข้าวสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 18-20 จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบความหนืดสุดท้ายของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่าข้าวสารซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 2,613, 3,621 และ 1,845 เซนติปัวส์ ตามลำดับ มีแนวโน้มสูงกว่าข้าวกล้อง (2,728, 2,518 และ 1,307 เซนติปัวส์) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 การลดลงของค่าความหนืดสุดท้ายในข้าวกล้อง เกิดขึ้นเนื่องจากข้าวกล้องมีโปรตีนอยู่มากกว่าข้าวสาร ซึ่งโปรตีนนี้เป็นตัวขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชดูดซึมน้ำลดลง และพองตัวได้ช้า หลังจากเม็ดสตาร์ชแตก โมเลกุลของแอมิโลสที่กระจัดกระจายอยู่ในส่วนผสมเกิดการเคลื่อนที่มาเรียงตัวกันใหม่จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดความหนืดขึ้นอีกครั้ง เมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการหนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกซึ่งมีค่าเท่ากับ 225, 796 และ 1,916 เซนติปัวส์ ตามลำดับ มีความหนืดสุดท้ายต่ำกว่าข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการหนึ่งทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ จึงทำให้สูญเสียความหนืด และเมื่อลดอุณหภูมิของแอมิโลสสามารถกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่เกิดความหนืดขึ้นอีกครั้ง

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนืดสุดท้าย ปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีค่าอยู่ในช่วง 2,481-3,187, 2,170-2,485 และ 45-126 เซนติปัวส์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็นเพราะในระหว่างการงอกของของเมล็ดข้าว เอนไซม์กลุ่มไฮโดรลิติกถูกกระตุ้นให้ทำงาน และย่อยโมเลกุลสตาร์ชที่บริเวณอณูฐานซึ่งมีแอมิโลสอยู่มากก่อน ทำให้เม็ดสตาร์ชเหลือแต่ส่วนที่เป็นผลึก และมีปริมาณแอมิโลสที่จะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่เกิดเป็นโครงร่างสามมิติน้อย จึงทำให้ค่าความหนืดสุดท้ายมีค่าต่ำลง

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสุดท้ายในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 และสินเหล็ก มีค่าอยู่ในช่วง 209-249 และ 648-834 เซนติปัวส์ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการหนึ่งที่ทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์และสูญเสียความหนืด จึงทำให้ความหนืดสุดท้ายของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 และสินเหล็ก มีค่าลดลง แต่ในข้าวกข6 พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (1,581-1,627 เซนติปัวส์) มีค่าความหนืดสุดท้ายสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก แสดงให้เห็นว่าเป็นระเบียบของโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลายไปในระหว่างการหนึ่ง เมื่อลดอุณหภูมิลงทำให้โมเลกุลของสตาร์ชกลับมาเรียงตัวกันได้เร็วส่งผลให้เกิดความหนืดขึ้นอีกครั้ง

3.3.1.7 ความหนืดคืนตัว (เซนต์ปีวส์)

ค่าความแตกต่างระหว่างความหนืดต่ำสุดกับความหนืดสุดท้าย เรียกว่า ค่าความหนืดคืนตัว หรือเซตแบค (Setback) ซึ่งเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดรีโทรเกรเดชัน หรือกระบวนการที่มีการจัดระเบียบใหม่ของโมเลกุล (พินทิพย์, 2547) การเกิดรีโทรเกรเดชันเป็นกระบวนการเกิดผลึกของสสารซึ่งเจลาทีนไปแล้วเมื่อมีอุณหภูมิลดลง เนื่องจากสสารที่เกิดการเจลาทีนไปแล้วนั้น ยังคงมีการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ เมื่อนำมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ โมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแห 3 มิติ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลแอมิโลสในสสารจากเดิมที่เป็นอสัณฐานไปเป็นผลึก (Eliasson, 1996)

ค่าเซตแบคของข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 18-20 จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าเซตแบคของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวสาร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,293, 1,243 และ 333 เซนต์ปีวส์ ตามลำดับ มีแนวโน้มของค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง (1,517, 1,139 และ 220 เซนต์ปีวส์) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยกเว้นในข้าวสุพรรณบุรี 1 ที่มีค่าสูงกว่าข้าวสาร การลดลงของค่าเซตแบคในข้าวกล้อง เกิดขึ้นเนื่องจากข้าวกล้องมีโปรตีนอยู่มากซึ่งเป็นตัวขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแอมิโลสที่จัดกระจายอยู่ในส่วนผสมเพื่อมาจัดเรียงตัวกันใหม่หลังจากที่มีดสสารแตก จึงทำให้ข้าวกล้องมีค่าเซตแบคต่ำกว่าข้าวสาร เมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการนี้ พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 97, 331 และ 543 เซนต์ปีวส์ ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการนี้ทำให้เม็ดสสารเกิดการเจลาทีน จึงทำให้เมล็ดข้าวสูญเสียความหนืดเริ่มต้นไปแล้ว รวมถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิดในสสารข้าวที่มีแอมิโลสสูง หรือปานกลาง ทำให้เหลือแอมิโลสอิสระที่ไม่ได้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับลิพิดที่จะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลมีจำนวนน้อยกว่าจึงทำให้ค่าเซตแบคของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกสิบเหล็ก มีค่าลดต่ำกว่าข้าวกล้อง ส่วนค่าเซตแบคของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกกข6 มีค่าสูงกว่าข้าวกล้องทั้งนี้เนื่องจากข้าวกข6 อาจไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับลิพิดหรือเกิดได้น้อยมาก จึงทำให้โมเลกุลสสารสามารถกลับมาเรียงตัวกันใหม่ได้มากกว่าจนทำให้เกิดความหนืดขึ้นอีกครั้ง

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าเซตแบคปรากฏว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะต่างๆ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีค่าอยู่ในช่วง 1,480-2,141, 1,137-1,320 และ 12-44 เซนต์ปีวส์ ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้เป็น

เพราะในระหว่างการงอกของของเมล็ดข้าว เอนไซม์กลุ่มไฮโดรลิติกถูกกระตุ้นให้ทำงาน และย่อยโมเลกุลสตาร์ชที่บริเวณออสันฐานซึ่งมีเอมิโลสอยู่มากก่อน ทำให้เมล็ดสตาร์ชเหลือแต่ส่วนที่เป็นผลึก ทำให้มีเอมิโลสที่จะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติน้อย ทำให้ค่าเซตแบคมีค่าต่ำลง

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งเพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเซตแบคในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 และสิบเหล็ก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 93-102 และ 278-353 เซนติปัวส์ ตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากกระบวนการหนึ่งที่ทำให้สตาร์ชเกิดการเจลาทิไนซ์และสูญเสียความหนืด รวมไปถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเอมิโลสกับลิพิดในสตาร์ชข้าวที่มีเอมิโลสสูง หรือปานกลางจึงทำให้ค่าเซตแบคของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 และสิบเหล็ก มีค่าลดลง แต่ในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกกข6 (338-509 เซนติปัวส์) พบว่า ค่าเซตแบคของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก มีค่าสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก แสดงให้เห็นว่าความเป็นระเบียบของโมเลกุลภายในเมล็ดสตาร์ชถูกทำลายไปในระหว่างการหนึ่ง และอาจไม่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเอมิโลสกับลิพิด เมื่อลดอุณหภูมิลงจึงทำให้โมเลกุลของสตาร์ชกลับมาเรียงตัวกันได้เร็วส่งผลให้เกิดความหนืดขึ้นอีกครั้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางด้านความหนืดของสตาร์ช ได้แก่ ปริมาณเอมิโลส และลิพิด ซึ่งสตาร์ชที่มีเอมิโลสเพกทินสูงส่วนใหญ่มีอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด และค่าเซตแบคต่ำกว่าสตาร์ชปกติ แต่มีค่าความหนืดสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของสตาร์ชเป็นเอมิโลสเพกทินจึงพองตัวได้ดี อีกทั้งไม่มีสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างเอมิโลสกับลิพิดที่มีผลยับยั้งการพองตัว และจากการที่มีปริมาณเอมิโลสต่ำ จึงไม่เกิดโครงสร้างตาข่ายเจลของเอมิโลส ส่งผลให้เซตแบคมีค่าต่ำ และการที่สตาร์ชมีปริมาณเอมิโลส และลิพิดสูง มีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด และเซตแบคสูงขึ้น แต่ค่าความหนืดสูงสุด และเบรคคาวนซ์ของเมล็ดสตาร์ชเมื่อได้รับแรงเฉือนมีค่าต่ำลง (Jane *et al.*, 1999)

ค่าความหนืดสูงสุดของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าสูง เนื่องจากมีการพองตัวของเมล็ดสตาร์ชมาก และส่วนที่ละลายออกมาในน้ำร้อนมีความเข้มข้นสูง (Wang and Wang, 2002) ส่วนอุณหภูมิที่เกิดความหนืดสูงสุดของสตาร์ชข้าวเหนียวมีค่าต่ำกว่าของสตาร์ชข้าวเจ้า (Lai *et al.*, 2001) ค่าความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวยังเป็นผลจากการมีอนุภาคขนาดเล็ก และมีปริมาณลิพิดที่ต่ำด้วย (Chiang and Yeh, 2002) และจากงานวิจัยของ Vandeputte *et al.* (2003) พบว่า เอมิโลสมีผลต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าว คือ ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดลดลงมีค่าต่ำลง แต่ค่าความหนืดสุดท้าย และเซตแบคมีค่าสูงขึ้น สำหรับพันธะไคซัลไฟด์ของโปรตีนในแป้งข้าวยังมีผลทำให้การพองตัวของเมล็ดสตาร์ชถูกจำกัดในระหว่างการเจลาทิไนเซชัน และทำให้เมล็ดสตาร์ชที่พองตัวมีความคงทนต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น (Hamaker and Griffin, 1993)

จากผลการทดลอง สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงความหนืดได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของข้าวเจ้า และกลุ่มของข้าวเหนียว โดยในกลุ่มของข้าวเจ้า ซึ่งได้แก่ ข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวสินเหล็ก ค่าความหนืดโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าความหนืดสูงสุด พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีค่าลดลงจากข้าวกล้อง เมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอก ทำให้มีค่าความหนืดสูงสุดลดลงจากข้าวกล้อง โดยมีค่าลดลงตามความยาวคัพวะที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีค่าความหนืดสูงสุดลดลงจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ส่วนการเปลี่ยนแปลงความหนืดในข้าวเหนียวข6 พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีค่าความหนืดสูงสุดลดลงจากข้าวกล้อง เมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอกทำให้ค่าความหนืดสูงสุดลดลงจากข้าวกล้อง โดยมีค่าลดลงตามความยาวคัพวะที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

4. ผลการผลิต และตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวพองในข้าวทั้ง 3 พันธุ์

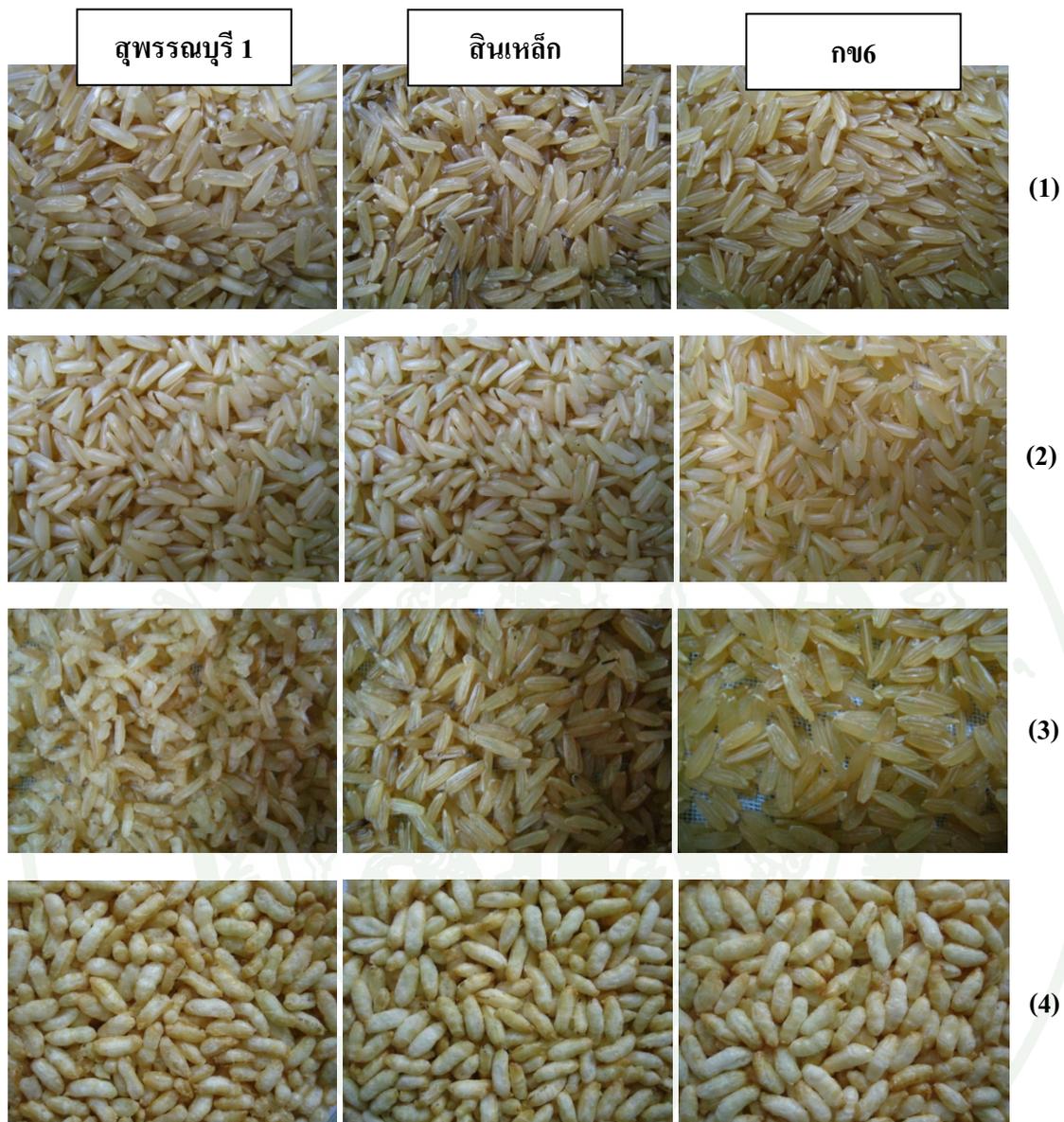
4.1 การหาอัตราส่วนระหว่างข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าว

อัตราส่วนระหว่างข้าวต่อน้ำที่ใช้หุงข้าวแต่ละชนิดของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมวัตถุดิบของการทำผลิตภัณฑ์ข้าวพอง โดยคัดเลือกอัตราส่วนที่ทำให้เมล็ดข้าวหุงสุก มีลักษณะเป็นตัวไม่บานแตก แสดงดังตารางที่ 21 โดยในข้าวสุพรรณบุรี 1 อัตราส่วนระหว่างข้าวต่อน้ำที่ใช้หุงในข้าวทุกชนิด (ข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทุกระยะ และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทุกระยะ) คือ 1.0 : 2.0 ในข้าวสินเหล็กทำนองเดียวกันกับข้าวสุพรรณบุรี 1 ที่ใช้ข้าวต่อน้ำที่อัตราส่วนเดียวในข้าวทุกชนิด คือ 1.0 : 1.5 ส่วนข้าวข6 นั้น ปริมาณข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวมี 2 อัตราส่วน คือ อัตราส่วน 1.0 : 1.5 สำหรับข้าวสาร และข้าวกล้อง และอัตราส่วน 1.0 : 1.0 สำหรับข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทุกระยะ และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทุกระยะ

ตารางที่ 21 อัตราส่วนข้าวต่อน้ำที่ใช้ในการหุงข้าวก่อนผลิตเป็นข้าวพองชนิดต่างๆ

ตัวอย่างข้าว	อัตราส่วน ข้าว : น้ำ (กรัมน้ำหนักแห้ง : กรัม)		
	สูตรอนุกรม 1	ลินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร	1.0 : 2.0	1.0 : 1.5	1.0 : 1.5
ข้าวกล้อง	1.0 : 2.0	1.0 : 1.5	1.0 : 1.5
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก	1.0 : 2.0	1.0 : 1.5	1.0 : 1.0
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	1.0 : 2.0	1.0 : 1.5	1.0 : 1.0
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	1.0 : 2.0	1.0 : 1.5	1.0 : 1.0
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	1.0 : 2.0	1.0 : 1.5	1.0 : 1.0
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	1.0 : 2.0	1.0 : 1.5	1.0 : 1.0
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	1.0 : 2.0	1.0 : 1.5	1.0 : 1.0
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	1.0 : 2.0	1.0 : 1.5	1.0 : 1.0

หลังจากหาอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมในการหุงข้าวแต่ละชนิดของข้าวแต่ละพันธุ์ เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนน้ำที่เหมาะสมในการเตรียมวัตถุดิบของการทำผลิตภัณฑ์ข้าวพอง จากนั้นนำข้าวหุงสุกที่ได้อบแห้งที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำข้าวหุงสุกที่อบแห้งแล้ว ทอดด้วยน้ำมันรำข้าวแบบน้ำมันท่วมชั้นอาหาร (Deep frying) ที่อุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 10 วินาที ซับน้ำมันส่วนเกินออก ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15 นาที ลักษณะของเมล็ดข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกหุงสุก ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกหุงสุกอบแห้ง และข้าวพองจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ แสดงดังภาพที่ 20 จากนั้นนำข้าวพองที่ผลิตได้ตรวจสอบคุณภาพในด้านอัตราส่วนการพองตัว ลักษณะเนื้อสัมผัส (ค่าความแข็ง) ผลทางด้านประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีทดสอบแบบให้คะแนนความชอบ 1 ถึง 5 คะแนน (5-Points score) โดยประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้านสี กลิ่นรส ความกรอบ และความชอบรวมต่อผลิตภัณฑ์ โดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 15 คน รวมทั้งตรวจสอบผลทางด้านจุลินทรีย์ แสดงผล ดังนี้



ภาพที่ 20 ลักษณะ (1) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก, (2) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกหุงสุก, (3) ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกหุงสุกอบแห้ง และ (4) ข้าวพองจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6

4.2 อัตราส่วนการพองตัว

อัตราส่วนการพองตัวของข้าวพองสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 22 จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการพองตัวของข้าวพองจากข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวพองจากข้าวสารซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.88, 1.60 และ 2.80 เท่า ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง (1.58, 1.48 และ 1.72 เท่า) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น

ร้อยละ 95 ทั้งนี้เนื่องจากข้าวสารถูกขัดเอาเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด และชั้นแอลิวโรนของเมล็ดข้าวซึ่งมีองค์ประกอบที่เป็นตัวขัดขวางการดูดซึมน้ำของเมล็ดข้าวออกไป จึงเป็นผลทำให้เมื่อนำข้าวสารไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวพอง ข้าวพองจากข้าวสารจึงมีการพองตัวได้ดี มีปริมาตรเพิ่มขึ้น และมีอัตราส่วนการพองตัวสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการนึ่งก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกซึ่งมีอัตราส่วนการพองตัวเท่ากับ 2.04, 2.56 และ 2.85 เท่า ตามลำดับ มีค่าสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นเพราะในขั้นตอนการผลิตข้าวหนึ่ง สตาร์ชที่มีในเมล็ดข้าวถูกทำให้เจลาทิไนซ์ เมื่อนำข้าวหนึ่งไปผ่านการหุงสุก และอบแห้งอีกครั้ง ทำให้เกิดชั้นแห้งที่ผิวด้านนอกของเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดความดันในเมล็ดข้าว หลังจากนั้นเมื่อนำเมล็ดข้าวหนึ่งหุงสุกอบแห้งไปทอดในน้ำมันที่ร้อนมากทำให้ผิวข้าวแตก น้ำที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวระเหยทันทีและดันให้เมล็ดข้าวเกิดการพองตัวได้ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ข้าวพองจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีอัตราส่วนการพองตัวที่สูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง

ตารางที่ 22 อัตราส่วนการพองตัวของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	อัตราส่วนการพองตัว (เท่า)*		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร	1.88 ± 0.10 Db	1.60 ± 0.03 Dc	2.80 ± 0.06 Da
ข้าวกล้อง	1.58 ± 0.06 Fab	1.48 ± 0.06 Eb	1.72 ± 0.05 Fa
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก	2.04 ± 0.06 Cc	2.56 ± 0.01 Cb	2.84 ± 0.05 Da
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	1.62 ± 0.02 EFb	1.51 ± 0.06 DEb	1.82 ± 0.04 Fa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	1.64 ± 0.07 EFb	1.57 ± 0.07 DEb	2.59 ± 0.05 Ea
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	1.73 ± 0.03 Eab	1.60 ± 0.02 Db	2.68 ± 0.04 Ea
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	2.18 ± 0.02 Bc	2.86 ± 0.04 Bb	3.02 ± 0.03 Ca
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	2.24 ± 0.06 Bc	2.91 ± 0.04 Bb	3.15 ± 0.05 Ba
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	2.45 ± 0.04 Ac	3.07 ± 0.02 Ab	3.36 ± 0.05 Aa

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่าตัวเลขค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่ออัตราส่วนการพองตัวของข้าวพองจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวพองของข้าวกล้องจาก

ข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีอัตราส่วนการพองตัวอยู่ในช่วง 1.62-1.73, 1.51-1.60 และ 1.82-2.68 เท่า ตามลำดับ ซึ่งมีความมากกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง และเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการพองตัวของข้าวพองในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ พบว่า อัตราส่วนการพองตัวเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเริ่มงอกเพิ่มขึ้น อัตราส่วนการพองตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อระยะงอกเพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลจากระหว่างการงอกของเมล็ดข้าวเอนไซม์กลุ่มต่างๆ เช่น แอมิเลส โปรติเอส เฮมิเซลลูเลส และฟอสฟาเทส เป็นต้น ถูกสร้าง และกระตุ้นให้ทำงาน (Yoshizawa, 2004) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต เป็นน้ำตาล เพื่อใช้เป็นพลังงานในการเจริญเติบโตของราก และยอด (Kaneko *et al.*, 2002) เอนไซม์ที่ถูกสร้างหรือถูกกระตุ้นให้ทำงานเหล่านี้ ย่อยสลายส่วนของเอนโดสเปิร์ม และทำให้ส่วนของเยื่อหุ้มผลเยื่อหุ้มเมล็ด อ่อนตัวลง น้ำสามารถซึมเข้าไปภายในเมล็ดได้ง่าย จึงเป็นผลทำให้ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสามารถดูดซึมน้ำได้ง่าย เม็ดสตรัทซ์พองตัวได้รวดเร็ว หุงสุกได้ง่ายในขั้นตอนการหุงข้าว และส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสามารถพองตัวได้รวดเร็ว

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการนึ่งก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนการพองตัวของข้าวพองจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวพองในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีอัตราส่วนการพองตัวอยู่ในช่วง 2.18-2.45, 2.87-3.07 และ 3.02-3.37 เท่า ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าข้าวพองในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการพองตัวของข้าวพองจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก 3 ระยะ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า อัตราส่วนการพองตัวของข้าวพองจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะเริ่มงอกเพิ่มขึ้น

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวพองจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีอัตราส่วนการพองตัวสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง เมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอกแล้วผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า อัตราส่วนการพองตัวของข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่ามากกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง โดยอัตราส่วนการพองตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการนึ่งแล้วนำไปผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีอัตราส่วนการพองตัวสูงกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก แสดงว่า กระบวนการทำให้ข้าวเริ่มงอกร่วมกับกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งมีผลทำให้ข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีอัตราส่วนการพองตัวเพิ่มขึ้น ส่วนเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการพองตัวระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า อัตราส่วนการพองตัวมีความสัมพันธ์กับปริมาณเอนไซม์อะไมเลส โดยพบว่า ข้าวพองที่ผลิตจากข้าวกข6 มีอัตราส่วนการพองตัวมากที่สุด รองลงมา คือ สิบเหล็ก และสุพรรณบุรี 1 ตามลำดับ

4.3 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวพอง

ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวพองด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสโดยใช้หัววัดแบบทรงกระบอก (6 mm cylinder probe; P/6) กดลงบนเมล็ดข้าวพองจำนวน 1 เมล็ดตรงกลางแท่นวางตัวอย่าง ทำการวัดโดยให้หัววัดกดทับเมล็ดข้าวพองเป็นระยะทางร้อยละ 50 ของความหนาเมล็ดข้าวพอง (50% Strain) ซึ่งค่าแรงสูงสุด (Peak force) ที่อ่านได้จากกราฟ เป็นค่าความแข็งของตัวอย่าง แสดงในหน่วยนิวตัน (N) ได้ผลแสดงดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 ลักษณะเนื้อสัมผัส (ความแข็ง) ของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าวพอง	ความแข็ง (นิวตัน)*		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร	28.08 ± 5.08 Ba	22.63 ± 2.76 BCb	21.43 ± 2.28 BCb
ข้าวกล้อง	30.81 ± 1.39 Aa	28.80 ± 0.70 Aab	26.82 ± 3.58 Ab
ข้าวนี้่กกล้องจากข้าวเปลือก	24.86 ± 0.67 Ca	22.07 ± 2.12 BCb	21.41 ± 1.93 BCb
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	27.55 ± 0.83 Ba	23.53 ± 2.30 Bb	23.58 ± 2.37 Bb
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	25.80 ± 1.24 BCa	23.33 ± 3.42 Ba	23.48 ± 0.35 Ba
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	25.56 ± 0.59 BCa	22.18 ± 1.55 BCb	23.35 ± 1.85 Bb
ข้าวนี้่กกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	23.45 ± 0.65 CDa	20.97 ± 2.21 BCb	20.88 ± 1.70 BCb
ข้าวนี้่กกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	23.10 ± 0.85 CDa	20.82 ± 1.18 BCb	20.27 ± 1.83 Cb
ข้าวนี้่กกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	21.19 ± 0.94 Da	20.07 ± 1.93 Ca	19.41 ± 0.92 Ca

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 10 ซ้ำ ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่าตัวเลขค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

^{1/} ตัวเลขค่าเฉลี่ยในแนวนอนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

การเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของข้าวพองจากข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 แสดงดังตารางที่ 23 จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของข้าวพองทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวพองจากข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวพองจากข้าวสารซึ่งมีค่าเท่ากับ 28.08, 22.63 และ 21.41 นิวตันตามลำดับ มีค่าต่ำกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง (30.81, 28.80 และ 26.82 นิวตัน) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทั้งนี้เนื่องจากข้าวสารถูกขัดเอาเยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด และชั้นเอนโดสเปิร์มของ

เมล็ดข้าวซึ่งเป็นตัวขัดขวางการดูดซึมน้ำของเมล็ดสารถออกไป จึงเป็นผลทำให้เมื่อนำข้าวสารไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวพอง ข้าวพองจากข้าวสารจึงมีการพองตัวได้ดี เนื้อสัมผัสมีลักษณะกรอบพอง เมื่อนำไปวัดค่าเนื้อสัมผัสจึงมีค่าความแข็งน้อยกว่าข้าวพองที่ผลิตจากข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการนี้ก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองของข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกซึ่งมีค่าเท่ากับ 24.86, 22.07 และ 20.88 นิวตัน ตามลำดับ มีค่าความแข็งน้อยกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นเพราะในขั้นตอนการผลิตข้าวนึ่ง สารถที่มีในเมล็ดข้าวถูกทำให้เจลาทิไนซ์ เมื่อนำไปผ่านการหุงสุก อบแห้งอีกครั้ง ทำให้เกิดชั้นแข็งที่ผิวด้านนอกของเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดความดันในเมล็ดข้าว หลังจากนั้นเมื่อนำเมล็ดข้าวหุงสุกอบแห้งไปทอดในน้ำมันที่ร้อนมากจะทำให้ผิวข้าวแตก ทำให้น้ำที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวระเหยทันทีและดันให้เมล็ดข้าวเกิดการพองตัวได้ จึงทำให้ข้าวพองของข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกพองตัวได้ดี และมีความแข็งน้อยกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีความแข็งอยู่ในช่วง 25.56-27.55, 22.18-23.53 และ 23.35-23.58 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง และเมื่อเปรียบเทียบความแข็งของข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ พบว่า ค่าความแข็งมีค่าลดลงตามระดับการเริ่มงอกที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าวทำให้เกิดการสร้าง หรือกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ที่มีในเมล็ดข้าว ซึ่งเอนไซม์เหล่านี้ ย่อยสลายส่วนของเอนโดสเปิร์ม และทำให้ส่วนของเยื่อหุ้มผลเยื่อหุ้มเมล็ด อ่อนตัวลง น้ำสามารถซึมเข้าไปภายในเมล็ดได้ง่าย ทำให้ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสามารถดูดซึมน้ำได้ง่าย เม็ดสารถพองตัวได้รวดเร็ว หุงสุกได้ง่ายในขั้นตอนการหุงข้าว และส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสามารถพองตัวได้รวดเร็ว มีความแข็งน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีระยะเริ่มงอกมากขึ้น ทั้งนี้เมื่อระยะเริ่มงอกมากขึ้นเกิดการย่อยสลายได้มาก เมล็ดข้าวสามารถดูดน้ำได้ง่ายยิ่งขึ้น การพองตัวจึงสูงขึ้น และมีความแข็งน้อย

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการนี้ก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งของข้าวพองในข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวพองของข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 21.19-23.45, 20.07-20.96 และ 19.41-21.43 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวพองของข้าวนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกให้ค่าความแข็งน้อยกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง เมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอกแล้วผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า

ค่าความแข็งมีค่าน้อยกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง โดยค่าความแข็งมีค่าลดลงตามระดับความยาวคัพพะที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการนึ่งแล้วผลิตเป็นข้าวพอง พบว่าข้าวพองของข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีค่าความแข็งต่ำกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก แสดงว่า กระบวนการทำข้าวให้เริ่มงอกร่วมกับกระบวนการผลิตข้าวนี้จะมีผลทำให้ข้าวพองของข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความแข็งลดลง ส่วนเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ค่าความแข็งแปรผกผันกับอัตราส่วนการพองตัว โดยพบว่า ข้าวพองที่ผลิตจากข้าวสุพรรณบุรี 1 มีค่าความแข็งมากที่สุด รองลงมา คือ สีนเหล็ก และกข6 ตามลำดับ

4.4 ลักษณะทางประสาทสัมผัสของข้าวพอง

นำตัวอย่างข้าวแต่ละพันธุ์ที่ผ่านการหุงให้สุก อบแห้งที่ 70°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทอดที่อุณหภูมิ 220°C เป็นเวลา 10 วินาที ชับน้ำมันส่วนเกินออก จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15 นาที แล้วนำมาประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสทางด้าน สี กลิ่นรส ความกรอบ และความชอบรวมต่อผลิตภัณฑ์ข้าวพองโดยใช้วิธีทดสอบแบบให้คะแนนความชอบ 1 ถึง 5 คะแนน (5-Points score) จากผู้ทดสอบชิมจำนวน 15 คน ได้ผล ดังนี้

4.4.1 สีของผลิตภัณฑ์ข้าวพอง

คะแนนการยอมรับทางด้านค่าสีที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวพองจากข้าวสุพรรณบุรี 1 สีนเหล็ก และกข6 ของผู้ทดสอบชิม แสดงดังตารางที่ 24 เมื่อเปรียบเทียบคะแนนด้านค่าสีของข้าวพองทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวพองจากข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวพองจากข้าวสารจัดอยู่ในเกณฑ์สีมีความสม่ำเสมอคือ 4.13, 4.00 และ 4.50 คะแนน ตามลำดับ และมีคะแนนสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง (3.50, 3.13 และ 4.25 คะแนน) อย่างไรก็ตามมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และจากผลการทดลองเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการนึ่งก่อนนำมาผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองที่ผลิตจากข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือก มีคะแนนทางด้านค่าสีเท่ากับ 3.25, 4.00 และ 4.25 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มของคะแนนเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติกับข้าวพองจากข้าวกล้อง แสดงว่าผลของกระบวนการผลิตข้าวนี้ก่อนนำมาแปรรูปเป็นข้าวพองทำให้ความสม่ำเสมอของค่าสีไม่เปลี่ยนแปลงจากข้าวกล้อง

ตารางที่ 24 ผลทางประสาทสัมผัสด้านค่าสีของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	ค่าสี (คะแนน 1-5) [*]		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กข6
ข้าวสาร ^{1/}	4.13 Aa	4.00 Aa	4.50 Aa
ข้าวกล้อง	3.50 ABb	3.13 ABCb	4.25 ABa
ข้าวนี้่กกล้องจากข้าวเปลือก ^{1/}	3.25 ABa	4.00 Aa	4.25 ABa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ^{1/}	2.75 Ba	3.13 ABCa	3.25 CDEa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2 ^{1/}	3.38 ABa	2.50 Ca	2.88 DEa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ^{1/}	2.75 Ba	2.75 BCa	2.50 Ea
ข้าวนี้่กกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ^{1/}	2.75 Ba	3.75 ABa	3.25 CDEa
ข้าวนี้่กกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2 ^{1/}	2.88 Ba	3.75 ABa	3.50 BCDA
ข้าวนี้่กกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ^{1/}	2.63 Bb	3.63 ABa	3.88 ABCa

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 15 ซ้ำ

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

^{1/} ตัวเลขค่าเฉลี่ยในแนวนอนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

5 คะแนน คือ สีสม่ำเสมอดีมาก, 4 คะแนน คือ สีสม่ำเสมอดี, 3 คะแนน คือ สีสม่ำเสมอปานกลาง, 2 คะแนน คือ สีสม่ำเสมอพอใช้ และ 1 คะแนน คือ สีไม่สม่ำเสมอ

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอ ก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคะแนนค่าสี ปรากฏว่า ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีคะแนนทางด้านค่าสีในช่วงสีสม่ำเสมอพอใช้ จนถึงสีสม่ำเสมอปานกลาง คือ อยู่ในช่วง 2.75-3.38, 2.50-3.13 และ 2.50-3.25 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งคะแนนทางด้านค่าสีมีแนวโน้มน้อยกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง ทั้งนี้เป็นเพราะในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว เอนไซม์ไฮโดรลิติกย่อยสลายให้ป็นน้ำตาล และย่อยโปรตีนให้เป็นครดเอมิโน ซึ่งสารทั้ง 2 นี้สามารถเกิดปฏิกิริยามেলลาร์ดในระหว่างการทอด ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำลง และกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ จึงอาจเป็นสาเหตุทำให้คะแนนความชอบทางด้านค่าสีในข้าวพองที่ผลิตจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอ มีคะแนนต่ำกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง และเมื่อเปรียบเทียบคะแนนทางด้านค่าสีที่ระยะเริ่มงอต่างๆ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า คะแนนทางด้านค่าสีของ

ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ระยะต่างๆ มีคะแนนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อนำข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเปลือก ในข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการหนึ่งก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคะแนนค่าสีในข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีคะแนนอยู่ในช่วง 2.63-2.88, 3.63-3.75 และ 3.25-3.88 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มของคะแนนสูงกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และเมื่อเปรียบเทียบคะแนนทางด้านค่าสีของข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก 3 ระยะ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่าคะแนนทางด้านค่าสีของข้าวพองในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ มีคะแนนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ โดยข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 มีคะแนนค่าสีอยู่ในช่วงสีส้มเข้มเสมอพอใช้ ส่วนคะแนนค่าสีของข้าวพองในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก สินเหล็ก และกข6 มีคะแนนค่าสีอยู่ในช่วงสีส้มเข้มเสมอปานกลาง

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก มีคะแนนทางด้านค่าสีต่ำกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอกแล้วผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า คะแนนทางด้านค่าสีมีค่าน้อยกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง จากนั้นเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ไปผ่านกระบวนการหนึ่งแล้วผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีคะแนนทางด้านค่าสีสูงกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ส่วนเมื่อเปรียบเทียบคะแนนทางด้านค่าสีระหว่างพันธุ์ข้าว พบว่า ข้าวพองที่ผลิตจากข้าวกข6 มีคะแนนทางด้านค่าสีสูงสุด รองลงมา คือ สินเหล็ก และสุพรรณบุรี 1 ตามลำดับ

4.4.2 กลิ่นรส

คะแนนการยอมรับทางด้านกลิ่นรส ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวพองจากข้าวสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ของผู้ทดสอบชิม แสดงดังตารางที่ 25 เมื่อเปรียบเทียบคะแนนด้านกลิ่นรสของข้าวพองทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวพองจากข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวพองจากข้าวสารจัดอยู่ในเกณฑ์มีกลิ่นรสปานกลาง ไม่มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้ คือ มีคะแนนเท่ากับ 3.50, 3.75 และ 3.75 คะแนน ตามลำดับ และมีค่าต่ำกว่าข้าวพองที่ผลิตจากข้าวกล้อง (3.63, 3.88 และ 4.00 คะแนน) อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการหนึ่งก่อนนำมาผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองที่ผลิตจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ซึ่งมีคะแนนเท่ากับ 3.88, 4.00 และ 4.00 คะแนน ตามลำดับ มีแนวโน้มของคะแนนสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้องอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าผล

ของกระบวนการผลิตข้าวหนึ่งก่อนนำมาแปรรูปเป็นข้าวพองทำให้คะแนนด้านกลิ่นรส ไม่เปลี่ยนแปลงจากข้าวกล้อง ซึ่งมีคะแนนในช่วงกลิ่นรสปานกลาง ถึงกลิ่นรสดีตามธรรมชาติ ไม่มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้

ตารางที่ 25 ผลทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	กลิ่นรส (คะแนน 1-5) [*]		
	สุพรรณบุรี 1 ^{1/}	สินเหล็ก ^{1/}	กข6
ข้าวสาร ^{2/}	3.50 Aa	3.75 Aa	3.75 ABa
ข้าวกล้อง ^{2/}	3.63 Aa	3.88 Aa	4.00 Aa
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ^{2/}	3.88 Aa	4.00 Aa	4.00 Aa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1 ^{2/}	3.88 Aa	4.25 Aa	3.75 ABa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2 ^{2/}	3.88 Aa	3.50 Aa	3.50 ABa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3	3.88 Aa	3.88 Aa	2.88 Cb
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1 ^{2/}	3.63 Aa	4.25 Aa	4.13 Aa
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2 ^{2/}	4.13 Aa	4.13 Aa	4.25 Aa
ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3 ^{2/}	4.00 Aa	4.25 Aa	4.25 Aa

หมายเหตุ ^{*} ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 15 ซ้ำ

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

^{1/} ตัวเลขค่าเฉลี่ยในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

^{2/} ตัวเลขค่าเฉลี่ยในแนวนอนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

5 คะแนน คือ กลิ่นรสดีมากตามธรรมชาติ ไม่มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้, 4 คะแนน คือ กลิ่นรสดีตามธรรมชาติ ไม่มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้, 3 คะแนน คือ กลิ่นรสปานกลาง ไม่มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้, 2 คะแนน คือ กลิ่นรสพอใช้ มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้เล็กน้อย และ 1 คะแนน คือ กลิ่นรสไม่ดี มีกลิ่นหืน กลิ่นอับ หรือกลิ่นไหม้

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคะแนนทางด้านกลิ่นรส ปรากฏว่า ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 (3.88 คะแนนในทุกๆระยะเริ่มงอก) และสินเหล็ก (3.50-4.25 คะแนน) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ

ทางสถิติจากข้าวกล้อง ส่วนข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกกข6 ซึ่งมีคะแนนอยู่ในช่วง 2.88-3.75 คะแนน มีคะแนนลดลงจากข้าวกล้อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3 มีคะแนนทางด้านกลิ่นรสในช่วงกลิ่นรสพอใช้ มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้เล็กน้อย ซึ่งคะแนนทางด้านกลิ่นรสที่ลดลงนี้อาจมีสาเหตุจาก ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3 ในข้าวกข6 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวิซสูงกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกตัวอื่น ซึ่งน้ำตาลรีดิวิซนี้สามารถเกิดปฏิกิริยามอลดาร์คกับกรดแอมิโนอิสระในระหว่างการทอด ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีคล้ำลง และอาจมีกลิ่นไหม้ได้ จึงพบว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนทางด้านกลิ่นรสลดลง

เมื่อนำข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเปลือกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการนึ่งก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการนึ่งที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคะแนนทางด้านกลิ่นรสในข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ มีคะแนนอยู่ในช่วง 3.63-4.13, 4.13-4.25 และ 4.13-4.25 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งมีคะแนนสูงกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีคะแนนทางด้านกลิ่นรสสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง แต่เมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอกแล้วผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า คะแนนทางด้านกลิ่นรสของข้าวพองในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 และ สิบเหล็กมีคะแนนมากกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง แต่ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกกข6 มีคะแนนน้อยกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง จากนั้นเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการนึ่งแล้วนำไปผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีคะแนนทางด้านกลิ่นรสมากกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพราะฉะนั้น หากต้องการบริโภคข้าวพองโดยหวังผลที่กลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ให้มีลักษณะของกลิ่นรสดีตามธรรมชาติ ไม่มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้ จึงควรเลือกบริโภคในรูปข้าวพองในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ทุกระยะในข้าวทั้ง 3 พันธุ์

4.4.3 ความกรอบ

คะแนนการยอมรับทางด้านความกรอบที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวพองจากข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ของผู้ทดสอบชิม แสดงดังตารางที่ 26 ปรากฏว่า เมื่อเปรียบเทียบคะแนนด้านความกรอบของข้าวพองทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวพองจากข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวพองจากข้าวสารจัดอยู่ในเกณฑ์กรอบพอใช้ แต่มีส่วนแข็งกระด้าง จนกระทั่งกรอบพอดี คือ มีคะแนนเท่ากับ 2.75, 3.13 และ 4.13 คะแนน ตามลำดับ และมีคะแนนสูงกว่าข้าวพองที่ผลิตจากข้าวกล้อง (2.13, 2.63 และ 3.88 คะแนน) อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และจากผลการทดลองเมื่อนำ

ข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการนึ่งก่อนนำมาผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองที่ผลิตจากข้าวนี้กลิ้งจากข้าวเปลือก ซึ่งมีคะแนนเท่ากับ 3.25, 3.44 และ 4.00 คะแนน ตามลำดับ มีแนวโน้มของคะแนนเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวพองจากข้าวกลิ้ง แสดงว่าผลของกระบวนการผลิตข้าวนี้ก่อนนำมาแปรรูปเป็นข้าวพองทำให้ความกรอบไม่เปลี่ยนแปลงจากข้าวกลิ้ง

ตารางที่ 26 ผลทางประสาทสัมผัสด้านความกรอบของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	ความกรอบ (คะแนน 1-5)*		
	สุพรรณบุรี 1	สินเหล็ก	กช6 ^{1/}
ข้าวสาร	2.75 ABb	3.13 ABab	4.13Aa
ข้าวกลิ้ง	2.13 Bb	2.63 Bb	3.88Aa
ข้าวนี้กลิ้งจากข้าวเปลือก ^{2/}	3.25 ABa	3.44 ABa	4.00 Aa
ข้าวกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	2.75 ABb	2.63 Bb	4.00 Aa
ข้าวกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	3.00 ABab	2.75 Bb	4.25 Aa
ข้าวกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	3.00 ABb	2.75 Bb	4.25 Aa
ข้าวนี้กลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	3.00 ABb	3.56 ABb	4.25 Aa
ข้าวนี้กลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	3.13 ABb	3.88 ABb	4.25 Aa
ข้าวนี้กลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ^{2/}	3.63 Aa	4.25 Aa	4.50 Aa

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 15 ซ้ำ

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

^{1/} ตัวเลขค่าเฉลี่ยในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

^{2/} ตัวเลขค่าเฉลี่ยในแนวนอนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

5 คะแนน คือ กรอบพองดีมาก, 4 คะแนน คือ กรอบพองดี, 3 คะแนน คือ กรอบพองพอใช้, 2 คะแนน คือ กรอบพองพอใช้ แต่มีส่วนแข็งกระด้าง และ 1 คะแนน คือ ไม่กรอบพอง แข็งกระด้าง

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สินเหล็ก และกช6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอกก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคะแนนความกรอบ ปรากฏว่า ข้าวพองของข้าวกลิ้งจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์

มีคะแนนทางด้านความกรอบในช่วงกรอบพองพอใช้ แต่มีส่วนแข็งกระด้าง จนถึงกรอบพอดี คือ มีคะแนนอยู่ในช่วง 2.75-3.00, 2.63-2.75 และ 4.00-4.25 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งคะแนนมีแนวโน้มสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง และเมื่อเปรียบเทียบคะแนนความกรอบที่ระยะเริ่มงอกแตกต่างกัน ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า คะแนนความกรอบของข้าวพองในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะต่างๆ มีคะแนนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการนึ่งก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคะแนนความกรอบในข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ ซึ่งมีคะแนนอยู่ในช่วง 3.00-3.63, 3.56-4.25 และ 4.25-4.50 คะแนน ตามลำดับ มีคะแนนสูงกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และเมื่อเปรียบเทียบคะแนนความกรอบของข้าวพองจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก 3 ระยะ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า คะแนนความกรอบของข้าวพองในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะต่างๆ มีคะแนนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเริ่มงอกที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีคะแนนทางด้านความกรอบสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอกแล้วผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า คะแนนทางด้านความกรอบของข้าวพองในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะต่างๆ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์มีค่าสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง จากนั้นเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกไปผ่านกระบวนการนึ่งแล้วผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอมีคะแนนทางด้านความกรอบสูงกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และมีค่าสูงสุดในข้าว กข6 รองลงมา คือ ข้าวสิบเหล็ก และข้าวสุพรรณบุรี 1 ตามลำดับ โดยคะแนนทางด้านความกรอบนี้มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนการพองตัวของข้าวพอง โดยผู้ทดสอบชิมให้คะแนนทางด้านความกรอบสูงในข้าวพองที่มีอัตราส่วนการพองตัวสูง นั่นคือ เป็นข้าวพองที่ผลิตจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในข้าวพองจากข้าว กข6 เพราะฉะนั้น หากต้องการบริโภคข้าวพองโดยหวังผลที่ความกรอบพองให้มีลักษณะของความกรอบพองที่ดี จึงควรเลือกบริโภคข้าวพองในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์

4.4.4 ความชอบรวม

คะแนนความชอบรวมที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวพองจากข้าวสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และ กข6 ของผู้ทดสอบชิม แสดงดังตารางที่ 27 ปรากฏว่า เมื่อเปรียบเทียบคะแนนด้านความชอบรวมของข้าวพองทั้ง 3 พันธุ์ ระหว่างข้าวพองจากข้าวสาร และข้าวกล้อง พบว่า ข้าวพองจากข้าวสารจัดอยู่ในเกณฑ์ชอบ

ปานกลาง โดยมีคะแนนเท่ากับ 3.00, 3.00 และ 3.88 คะแนน ตามลำดับ ซึ่งมีคะแนนสูงกว่าข้าวพองที่ผลิตจากข้าวกล้อง (2.75, 2.81 และ 3.75 คะแนน) อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อนำข้าวเปลือกไปผ่านกระบวนการนี้ก่อนนำมาผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองที่ผลิตจากข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือก ซึ่งมีคะแนนเท่ากับ 3.25, 3.25 และ 3.88 คะแนน ตามลำดับ มีแนวโน้มของความชอบรวมเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวพองจากข้าวกล้อง แสดงว่าผลของกระบวนการผลิตข้าวนี้ก่อนนำมาแปรรูปเป็นข้าวพองทำให้ความชอบรวมไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวพองจากข้าวกล้อง

ตารางที่ 27 ผลทางประสาทสัมผัสด้านความชอบรวมของข้าวพองในข้าว 3 พันธุ์

ตัวอย่างข้าว	ความชอบรวม (คะแนน 1-5) [*]		
	สุวรรณบุรี 1	สินเหล็ก ^{1/}	กข6 ^{1/}
ข้าวสาร ^{2/}	3.00 ABa	3.31 Aa	3.88 Aa
ข้าวกล้อง ^{2/}	2.75 ABa	2.81 Aa	3.75 Aa
ข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือก ^{2/}	3.25 ABa	3.25 Aa	3.88 Aa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1	2.25 Bb	2.88 Aab	3.13 Aa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2	2.63 ABb	2.88 Aab	3.50 Aa
ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3	2.88 ABb	2.88 Ab	3.62 Aa
ข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 1 ^{2/}	3.25 ABa	3.25 Aa	4.13 Aa
ข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 2 ^{2/}	3.38 ABa	3.63 Aa	4.13 Aa
ข้าวนี้กล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ^{2/}	3.75 Aa	4.00 Aa	4.13 Aa

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 15 ซ้ำ

ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง และตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงว่าค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \leq 0.05$)

^{1/} ตัวเลขค่าเฉลี่ยในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

^{2/} ตัวเลขค่าเฉลี่ยในแนวนอนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

5 คะแนน คือ ชอบมากที่สุด, 4 คะแนน คือ ชอบมาก, 3 คะแนน คือ ชอบปานกลาง, 2 คะแนน คือ ไม่ชอบเล็กน้อย และ 1 คะแนน คือ ไม่ชอบมาก

เมื่อนำข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่านกระบวนการผลิตข้าวกล้อง จากข้าวเปลือกเริ่มงอกก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการ เปลี่ยนแปลงคะแนนความชอบรวม ปรากฏว่า ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีคะแนนความชอบรวมในช่วงไม่ชอบเล็กน้อย จนถึงชอบปานกลาง (2.25-2.88, 2.88 และ 3.13-3.62 คะแนน) ซึ่งคะแนนความชอบรวมมีแนวโน้มลดลงจากข้าวกล้อง และเมื่อเปรียบเทียบคะแนนความชอบ รวมที่ระยะเริ่มงอกต่างๆ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า คะแนนความชอบรวมของข้าวพองของข้าวกล้องจาก ข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ มีคะแนนแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 ไปผ่าน กระบวนการหนึ่งก่อนนำไปผลิตเป็นข้าวพอง เพื่อตรวจสอบผลของกระบวนการงอกที่มีต่อการ เปลี่ยนแปลงคะแนนความชอบรวมในข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ปรากฏว่า ข้าวพอง ของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ ซึ่งมีคะแนนอยู่ในช่วง 3.25-3.75, 3.25-4.00 และ 4.13 คะแนน ตามลำดับ มีคะแนนสูงกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และเมื่อเปรียบเทียบ คะแนนความชอบรวมของข้าวพองในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก 3 ระยะ ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า คะแนนความชอบรวมของข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ มีคะแนน แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเริ่มงอกที่เพิ่มขึ้น และมีคะแนน สูงสุดในข้าวพองจากข้าวกข6

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ข้าวพองจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมี คะแนนทางด้านความชอบรวมสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง และเมื่อนำข้าวเปลือกไปทำให้เริ่มงอกแล้ว ผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า คะแนนทางด้านความชอบรวมของข้าวพองในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ระยะต่างๆ ของข้าวทั้ง 3 พันธุ์มีค่าสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง จากนั้นเมื่อนำข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่ม งอกไปผ่านกระบวนการหนึ่งแล้วผลิตเป็นข้าวพอง พบว่า ข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมี คะแนนทางด้านความชอบรวมสูงกว่าข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และมีค่าสูงสุดใน ข้าวกข6 รองลงมา คือ ข้าวสิบเหล็ก และข้าวสุพรรณบุรี 1 ตามลำดับ เพราะฉะนั้น หากต้องการบริโภคข้าว พองโดยให้มีความชอบรวมสูง จึงควรเลือกบริโภคในรูปข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ในทุกระยะของข้าวทั้ง 3 พันธุ์

4.5 ปริมาณจุลินทรีย์

การตรวจหาปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดในผลิตภัณฑ์อาหารเป็นการบ่งบอกคุณภาพทาง จุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์ จากการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ที่มีในตัวอย่างข้าวทั้ง 3 พันธุ์ ที่ผ่านการหุงสุก อบแห้งที่ 70 °ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำมาทอดในน้ำมันรำข้าวแบบน้ำมันท่วมขึ้นอาหาร ที่อุณหภูมิ

220 °ซ เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวพอง และเก็บในถุงรีทอร์ต ถุงละ 20 กรัม แล้วนำไปตรวจวัดปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีในตัวอย่างข้าวพอง ผลปรากฏดังตารางที่ 28 ซึ่งพบว่า ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์ และรา ในผลิตภัณฑ์ข้าวพองจากข้าวทั้ง 27 ตัวอย่าง มีปริมาณน้อยกว่า 10 โคโลนี/กรัม ซึ่งนับว่าอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค และปริมาณจุลินทรีย์ดังกล่าวไม่เกินปริมาณที่กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2548) กำหนดไว้ โดยให้มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1×10^3 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม และปริมาณรา ต้องไม่เกิน 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม



ตารางที่ 28 ปริมาณจุลินทรีย์ของข้าวพองในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ หลังทอดที่ 220 °ซ เป็นเวลา 10 วินาที

ตัวอย่างข้าวพอง	สุพรรณบุรี 1			สินเหล็ก			กข6		
	ปริมาณจุลินทรีย์ (โคโลนี/กรัม)			ปริมาณจุลินทรีย์ (โคโลนี/กรัม)			ปริมาณจุลินทรีย์ (โคโลนี/กรัม)		
	จุลินทรีย์ทั้งหมด	ยีสต์	รา	จุลินทรีย์ทั้งหมด	ยีสต์	รา	จุลินทรีย์ทั้งหมด	ยีสต์	รา
ข้าวสาร	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
ข้าวกล้อง	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
ข้าวนี้้งกล้องจากข้าวเปลือก	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
ข้าวกล้องเริ่มงอระยะที่ 1 จากข้าวเปลือก	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
ข้าวกล้องเริ่มงอระยะที่ 2 จากข้าวเปลือก	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
ข้าวกล้องเริ่มงอระยะที่ 3 จากข้าวเปลือก	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
ข้าวนี้้งกล้องเริ่มงอระยะที่ 1 จากข้าวเปลือก	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
ข้าวนี้้งกล้องเริ่มงอระยะที่ 2 จากข้าวเปลือก	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
ข้าวนี้้งกล้องเริ่มงอระยะที่ 3 จากข้าวเปลือก	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ผลของกระบวนการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพพะแตกต่างกัน 3 ระดับ ต่อสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ ในข้าว 3 พันธุ์ เปรียบเทียบกับข้าวสาร ข้าวกล้อง และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก

1.1 คุณภาพวัตถุดิบ และการหาสภาวะการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอก

1.1.1 คุณภาพทางฟิสิกส์ของวัตถุดิบข้าวเปลือกด้านน้ำหนักจำนวน 1,000 เมล็ดของข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 พบว่า มีน้ำหนักเท่ากับ 26.85, 28.14 และ 24.53 กรัม ตามลำดับ ซึ่งน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ จัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของข้าวพันธุ์ดี ส่วนขนาดและรูปร่างของเมล็ดข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ จัดอยู่ในกลุ่มของข้าวเมล็ดเรียวยาวมาก ซึ่งมีลักษณะเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอก

1.1.2 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ ได้แก่ ปริมาณความชื้น แอมิโลส คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด โปรตีน ไขมัน และเถ้าของข้าวกล้องสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 มีค่าแตกต่างกัน จากผลการตรวจสอบพบว่า มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 9.32-9.98, 5.46-25.12, 77.47-79.57, 6.75-8.57, 2.08-2.90 และ 1.32-1.56 ตามลำดับ

1.1.3 การดูดซึมน้ำ ณ จุดสิ้นสุดของการแช่ข้าวเปลือกที่ 30 °ซ เป็นเวลา 36 ชั่วโมงระหว่างข้าวทั้ง 3 พันธุ์ พบว่า ข้าวกข6 (ร้อยละ 38.95) มีการดูดซึมน้ำสูงสุด รองลงมา คือ ข้าวสิบเหล็ก (ร้อยละ 37.74) และข้าวสุพรรณบุรี 1 (ร้อยละ 33.77) และเมื่อตรวจสอบร้อยละการเริ่มงอกสูงสุดในข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 สิบเหล็ก และกข6 พบว่า มีค่าเท่ากับร้อยละ 97, 94 และ 98 ตามลำดับ

1.1.4 สภาวะการผลิตข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกให้มีความยาวคัพพะแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.5-1, 1-2 และ 2-3 มิลลิเมตร สามารถเตรียมได้โดยแช่ข้าวเปลือกในน้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 14 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลาจนกว่าข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์มีความยาวคัพพะแตกต่างกัน 3 ระดับ ซึ่งพบว่า ข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 และกข6 ใช้เวลารวมของการทำให้เริ่มงอก ชั่วโมงที่ 28, 32 และ 38 ตามลำดับ ส่วนข้าวสิบเหล็ก ใช้เวลารวมของการทำให้เริ่มงอก ชั่วโมงที่ 30, 38 และ 42 ตามลำดับ

1.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก
เปรียบเทียบกับข้าวสาร ข้าวกล้อง และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก

1.2.1 ค่าสี

ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความสว่าง (L^*) (61.00-75.33) ลดลงจากข้าวกล้อง (64.32-76.43) และข้าวสาร (73.21-84.99) โดยมีค่าลดลงตามระดับความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าความสว่างของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกกับข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก พบว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความสว่างสูงกว่า ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* พบว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความเป็นสีเขียวหรือแดงเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง และข้าวสาร โดยเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีค่าความเป็นสีเขียวหรือแดงสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก และส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าสี b^* พบว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (20.62-25.63) มีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง (20.58-22.81) และข้าวสาร (9.84-12.01) โดยเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกมีค่าความเป็นสีเหลืองสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

1.2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

เมล็ดสตาร์ชของข้าวกล้องทั้ง 3 พันธุ์ มีขนาด และรูปร่างคล้ายคลึงกัน คือ มีขนาดโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4-5 ไมโครเมตร ลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยม และอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม มีโปรตีนที่บริเวณผิวระหว่างกลุ่มของเมล็ดสตาร์ช เมื่อนำข้าวเปลือกไปผลิตเป็นข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ระยะต่างๆ ทำให้มองเห็นเหลี่ยมคมของเมล็ดสตาร์ชชัดเจนขึ้น แต่เมล็ดสตาร์ชมีขนาดโดยเฉลี่ยเล็กลงจากเมล็ดสตาร์ชของข้าวกล้อง โดยเมล็ดสตาร์ชมีขนาดเล็กที่สุดในข้าวสินเหล็ก เมื่อนำข้าวเปลือกไปนึ่ง พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกสุพรรณบุรี 1 จัดเป็นข้าวหนึ่งบางส่วน ในขณะที่ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกสินเหล็กและกข6 จัดเป็นข้าวหนึ่งสมบูรณ์

1.2.3 ปริมาณความชื้น

ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ ข้าวสาร ข้าวกล้อง และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8.70-12.64 ซึ่งปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวทั้งหมดดังกล่าวนี้พบว่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัยต่อการเก็บรักษา คือ ร้อยละ 13

1.2.4 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (37.81-80.68 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง (18.00-20.34 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) และข้าวสาร (7.46-11.17 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) โดยเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น แต่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ต่ำกว่าข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (17.42-30.11 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดในข้าวภข6 และจากผลการตรวจสอบ สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกส่งผลทำให้มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากสตาโรซูกย่อยยให้เป็น โมเลกุลน้ำตาลที่ต้นอ่อนสามารถดูดซึมเข้าไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว

1.2.5 ปริมาณโปรตีน

ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก มีปริมาณโปรตีนทั้งเพิ่มขึ้น และลดลงจากข้าวกล้อง (ร้อยละ 6.75-8.57 โดยน้ำหนักแห้ง) แต่มีปริมาณสูงกว่าข้าวสาร (ร้อยละ 6.21-7.55 โดยน้ำหนักแห้ง) โดยมีค่าลดลงในระยะเริ่มงอกที่ 1 (ร้อยละ 6.64-8.38 โดยน้ำหนักแห้ง) มีค่าเพิ่มขึ้นในระยะเริ่มงอกที่ 2 (ร้อยละ 6.91-8.66 โดยน้ำหนักแห้ง) และมีค่าลดลงในระยะเริ่มงอกที่ 3 (ร้อยละ 6.91-8.55 โดยน้ำหนักแห้ง) ส่วนข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (ร้อยละ 6.80-8.46 โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณโปรตีนสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก โดยปริมาณโปรตีนมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดในข้าวสินเหล็ก และจากผลการตรวจสอบ สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกส่งผลทำให้ปริมาณโปรตีนมีทั้งเพิ่มขึ้น และลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการสังเคราะห์โปรตีน และการใช้ไปของโปรตีนในระหว่างการงอกของเมล็ดข้าว เพื่อสนับสนุนการเจริญของต้นอ่อน

1.2.6 ปริมาณกรดแกมมา แอมิโนบิวทีริก (γ -Aminobutyric acid; GABA)

ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (4.13-19.08 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณ GABA เพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง (0.82-1.89 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) และข้าวสาร (0.09-0.32 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) โดยเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (2.31-3.41 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณ GABA ต่ำกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก โดยปริมาณ GABA มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดในข้าวภข6 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 3 และจากผลการตรวจสอบ สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกส่งผลทำให้มีปริมาณ GABA สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากกรดกลูตามิกถูกเปลี่ยนรูปไปเป็น GABA เพื่อใช้เป็นสารอาหารให้กับต้นอ่อนในระหว่างที่เมล็ดข้าวกำลังงอก

1.2.7 ปริมาณธาตุเหล็ก

ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (0.54-1.98 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณธาตุเหล็กเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้อง (0.15-1.27 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) และข้าวสารซึ่งไม่สามารถตรวจวัดปริมาณได้ โดยปริมาณธาตุเหล็กของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (0.47-1.32 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณธาตุเหล็กสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก โดยปริมาณธาตุเหล็กตรวจพบมากในข้าวสีนเหล็ก และจากผลการตรวจสอบ สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกส่งผลทำให้มีปริมาณธาตุเหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของกระบวนการงอกอาจยังช่วยทำให้การเป็นประโยชน์ของธาตุเหล็กเพิ่มมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเกิดการย่อยสลายของสารที่จับธาตุเหล็กไว้ เช่น ไฟเตต เป็นต้น

1.2.8 การเปลี่ยนแปลงความหนืด

สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงความหนืดได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของข้าวเจ้า และกลุ่มของข้าวเหนียว โดยในกลุ่มของข้าวเจ้า ซึ่งได้แก่ ข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวสีนเหล็ก ค่าความหนืดโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าความหนืดสูงสุด พบว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความหนืดสูงสุด (1,480-1,718 เซนติปัวส์) ลดต่ำลงจากข้าวกล้อง (1,810-1,833 เซนติปัวส์) และข้าวสาร (2,221-3,700 เซนติปัวส์) โดยมีค่าลดลงตามความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก มีค่าความหนืดสูงสุด (131-477 เซนติปัวส์) ต่ำกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ส่วนการเปลี่ยนแปลงความหนืดในข้าวเหนียวพบ 6 พบว่า ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความหนืดสูงสุด (95-343 เซนติปัวส์) ลดต่ำลงจากข้าวกล้อง (2,017 เซนติปัวส์) และข้าวสาร (3,071 เซนติปัวส์) โดยมีค่าลดลงตามความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก มีค่าความหนืดสูงสุด (1,667 เซนติปัวส์) สูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก

2. สมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และเคมีเชิงฟิสิกส์ ของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระดับ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ เปรียบเทียบกับข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกัน 3 ระดับ

หลังจากผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกที่มีความยาวคัพภะแตกต่างกันจากข้าวเปลือก แล้วนำไปนึ่งที่ 121 °ซ, ความดัน 15 ปอนด์ นาน 10 นาที เพื่อตรวจสอบผลของการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีต่อข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

2.1 ค่าสี

ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ (55.06-61.07) มีค่าความสว่างลดลงจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (61.00-75.33) โดยลดลงตามระดับความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความเป็นสีเขียวหรือแดงเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าสี b^* พบว่า ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (24.41-32.59) มีค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความยาวคัพภะที่เพิ่มมากขึ้น

2.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะต่างๆ ของข้าวสุพรรณบุรี 1 จัดเป็นข้าวหนึ่งบางส่วน โดยพบว่า ลักษณะความเป็นเมล็ดตารยังหลงเหลือให้เห็นในข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 1 อยู่มากกว่าข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกระยะที่ 2 และ 3 ในขณะที่ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทุกระยะของข้าวสินเหล็ก และกข6 จัดเป็นข้าวหนึ่งสมบูรณ์

2.3 ปริมาณความชื้น

ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ และข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทั้ง 3 ระยะ ในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 8.17-12.64 ซึ่งปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความยาวคัพภะเริ่มงอกเพิ่มขึ้น

2.4 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ (31.44-46.87 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (37.81-80.68 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) แต่ทั้งนี้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าสูงขึ้นเมื่อความยาวคัพภะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีการเปลี่ยนแปลงในข้าวกข6 มากที่สุด

2.5 ปริมาณโปรตีน

ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ (ร้อยละ 6.85-9.54 โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (ร้อยละ 6.64-8.66 โดยน้ำหนักแห้ง) โดย

ปริมาณโปรตีนในข้าวหนึ่งกิโลกรัมจากข้าวเปลือกเริ่มงอกผันแปรตามปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในแต่ละระยะ กล่าวคือ หากโปรตีนในข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าลดลง โปรตีนในข้าวหนึ่งกิโลกรัมจากข้าวเปลือกเริ่มงอกก็มีค่าลดลงเช่นกันแต่ยังมีค่าสูงกว่าข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ซึ่งจากผลการตรวจสอบ พบว่า ปริมาณโปรตีนมีค่ามากที่สุดที่สูงสุดในข้าวสินเหล็ก

2.6 ปริมาณกรดแกมมา แอมิโนบิวทิริก (γ -Aminobutyric acid; GABA)

ข้าวหนึ่งกิโลกรัมจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ (2.45-6.85 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณ GABA ลดลงจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (4.13-19.08 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) แต่ทั้งนี้ปริมาณ GABA ของข้าวหนึ่งกิโลกรัมจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าสูงขึ้นเมื่อความยาวคัพพะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งปริมาณ GABA มีการเปลี่ยนแปลงในข้าวข6 มากที่สุด โดยเฉพาะในระยะเริ่มงอกที่ 3

2.7 ปริมาณธาตุเหล็ก

ข้าวหนึ่งกิโลกรัมจากข้าวเปลือกเริ่มงอกในข้าวทั้ง 3 พันธุ์ (0.62-2.16 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) มีปริมาณธาตุเหล็กเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (0.54-1.98 มก./100 ก. โดยน้ำหนักแห้ง) ซึ่งปริมาณธาตุเหล็กของข้าวหนึ่งกิโลกรัมจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าสูงขึ้นเมื่อความยาวคัพพะเพิ่มมากขึ้น โดยปริมาณธาตุเหล็กพบมากที่สุดที่สูงสุดในข้าวสินเหล็ก

2.8 การเปลี่ยนแปลงความหนืด

สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงความหนืดได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มของข้าวเจ้า และกลุ่มของข้าวเหนียว โดยในกลุ่มของข้าวเจ้า ซึ่งได้แก่ ข้าวสุพรรณบุรี 1 และข้าวสินเหล็ก ค่าความหนืดโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ค่าความหนืดสูงสุด พบว่า ข้าวหนึ่งกิโลกรัมจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (119-511 เซนติปัวส์) มีค่าความหนืดสูงสุดลดลงจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (1,480-1,718 เซนติปัวส์) โดยมีค่าลดลงตามความยาวคัพพะที่เพิ่มขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงความหนืดในข้าวเหนียวข6 พบว่า ข้าวหนึ่งกิโลกรัมจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (1,330-1,412 เซนติปัวส์) มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (95-343 เซนติปัวส์) โดยค่าความหนืดมีค่าลดลงเมื่อความยาวคัพพะเพิ่มขึ้น

3. คุณภาพ และผลทางด้านประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ข้าวพองจากเมล็ดข้าวสาร ข้าวกล้อง ข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพพะแตกต่างกัน 3 ระดับ และข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่มีความยาวคัพพะแตกต่างกัน 3 ระดับ

3.1 อัตราส่วนการพองตัว

ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีอัตราส่วนการพองตัวเพิ่มขึ้น (1.51-2.68 เท่า) ตามระดับความยาวคัพพะที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าสูงกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง (1.48-1.72 เท่า) และข้าวสาร (1.60-2.80) แต่มีค่าต่ำกว่าข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (2.04-2.84 เท่า) ส่วนข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (2.18-3.36 เท่า) พบว่า มีอัตราส่วนการพองตัวสูงกว่าข้าวพองจากข้าวชนิดอื่น ซึ่งข้าวพองที่ผลิตจากข้าวข6 มีอัตราส่วนการพองตัวสูงกว่าข้าวสินเหล็ก และสุพรรณบุรี 1 ตามลำดับ

3.2 ลักษณะเนื้อสัมผัส (ความแข็ง)

ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกมีค่าความแข็งลดลง (22.18-27.55 นิวตัน) ตามระดับความยาวคัพพะที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีค่าต่ำกว่าข้าวพองจากข้าวกล้อง (26.82-30.81 นิวตัน) และข้าวสาร (21.43-28.08 นิวตัน) แต่มีค่าความแข็งสูงกว่าข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก (21.41-24.86 นิวตัน) ส่วนข้าวพองของข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก (19.41-23.45 นิวตัน) พบว่า มีค่าความแข็งต่ำกว่าข้าวพองจากข้าวชนิดอื่น ซึ่งข้าวพองที่ผลิตจากข้าวข6 มีค่าความแข็งน้อยกว่าข้าวสินเหล็ก และสุพรรณบุรี 1 ตามลำดับ

3.3 ผลทางด้านประสาทสัมผัส

ข้าวพองของข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก มีคะแนนทางด้านกลิ่นรส (2.88-4.25) ความกรอบ (2.63-4.25) และความชอบรวม (2.25-3.62) สูงกว่าข้าวพองที่ผลิตจากข้าวกล้อง และข้าวสาร แต่มีค่าต่ำกว่าข้าวพองที่ผลิตจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือก ซึ่งคะแนนทางด้านกลิ่นรส (3.63-4.25) ความกรอบ (3.00-4.50) และความชอบรวม (3.25-4.13) ของผลิตภัณฑ์ข้าวพองมีค่าสูงสุดในข้าวพองที่ผลิตจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก ซึ่งผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบทางด้านกลิ่นรส ความกรอบ และความชอบรวมในข้าวพองที่ผลิตจากข้าวข6 สูงกว่าข้าวอีกสองพันธุ์

3.4 คุณภาพทางด้านจุลินทรีย์

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และรา ของผลิตภัณฑ์ข้าวพองทั้ง 27 ตัวอย่าง มีค่าน้อยกว่า 10 โคลิฟอร์ม/กรัม ซึ่งนับว่าอยู่ในช่วงที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค และปริมาณจุลินทรีย์ดังกล่าวไม่เกินปริมาณที่กำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2548) กำหนดไว้ โดยให้มีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดไม่เกิน 1×10^3 โคลิฟอร์มต่อตัวอย่าง 1 กรัม และปริมาณรา ต้องไม่เกิน 100 โคลิฟอร์มต่อตัวอย่าง 1 กรัม

จากผลการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวพอง และคะแนนทางด้านประสาทสัมผัส สามารถสรุปได้ว่า ข้าวพองที่ผลิตจากข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกทุกระยะ ให้คุณภาพทางด้านอัตราส่วนการพองตัว ความแข็ง และการยอมรับจากผู้ทดสอบชิม ตลอดจนค่าทางจุลินทรีย์ ดีที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวพองที่ผลิตจากข้าวข6 นอกจากนี้ จากผลการตรวจสอบคุณภาพของเมล็ดข้าวด้านต่างๆ ซึ่งพบว่า การทำข้าวเปลือกให้เริ่มงอกก่อนที่จะนำไปผลิตเป็นข้าวหนึ่ง สามารถเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ ปริมาณโปรตีน GABA และธาตุเหล็ก ให้กับข้าวหนึ่งกล้องได้ และเมื่อนำข้าวหนึ่งกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอกที่ผลิตได้นี้มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวพอง อาจช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณค่าทางโภชนาการ และได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคได้ดีขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ข้าวกล้องเริ่มงอกซึ่งมีความยาวคัพพะเริ่มงอระยะต่างๆ นี้ ให้สารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ ได้แก่ โปรตีน กรดแกมมา แอมิโนบิวทริก (GABA) และธาตุเหล็ก เพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องปกติ จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าข้าวทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณ โปรตีน และธาตุเหล็ก เพิ่มขึ้นจากระยะเริ่มงอกที่ 1 มาระยะเริ่มงอกที่ 2 แต่มีค่าลดลงในระยะเริ่มงอกที่ 3 จึงอาจกล่าวได้ว่าการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกให้มีความยาวคัพพะเริ่มงอกเท่ากับระยะที่ 2 เหมาะแก่การเพิ่มปริมาณของ โปรตีน และธาตุเหล็ก แต่สำหรับปริมาณ GABA พบว่า ข้าวเปลือกเริ่มงอระยะที่ 3 ยังมีปริมาณ GABA สูงสุด และปริมาณยังไม่ลดลง เพราะฉะนั้น ถ้าต้องการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกเพื่อให้มีปริมาณ GABA สูงๆ จึงควรเพิ่มระยะของคัพพะเริ่มงอกให้มากขึ้น เพื่อหาช่วงความยาวคัพพะเริ่มงอกที่ให้ปริมาณ GABA สูงสุด

2. การใช้ประโยชน์จากเมล็ดข้าวโดยนำไปแปรรูปขึ้นถัดไป ควรศึกษาสมบัติของสารอาหารที่มีในเมล็ดข้าวเพิ่มเติม ยกตัวอย่างเช่น จากการทดลองนี้ ซึ่งพบว่า กระบวนการผลิตข้าวเปลือกให้เริ่มงอก ทำให้มี GABA และธาตุเหล็กเพิ่มขึ้น แต่เมื่อนำไปผ่านขั้นตอนการนึ่ง พบว่า GABA มีค่าลดลงจากเดิม ในขณะที่ธาตุเหล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า GABA ถูกทำลายได้ด้วยความร้อน ในขณะที่ธาตุเหล็กคงทนต่อความร้อน เพราะฉะนั้น หากต้องการรักษาปริมาณ GABA ไว้ จึงควรบริโภคในรูปแบบ

ข้าวเปลือกเริ่มงอก หรือเลือกกรรมวิธีการแปรรูปที่ไม่ได้ใช้ความร้อนรุนแรง ในขณะที่หากต้องการ ปริมาณธาตุเหล็กสูง จึงควรนำข้าวเปลือกเริ่มงอกไปนึ่งต่อได้

3. เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวพองจากตัวอย่างข้าวหลายชนิด เพื่อต้องการ เปรียบเทียบคุณสมบัติเบื้องต้น และไม่ได้ตรวจวัดคุณภาพในเชิงลึกของผลิตภัณฑ์ เช่น ปริมาณสารอาหาร ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงอันเนื่องมาจากระบวนการผลิต แต่จากคุณสมบัติเบื้องต้นที่ตรวจประเมินทางด้านฟิสิกส์ นี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นให้กับผู้บริโภคได้ว่ากระบวนการผลิตข้าวเปลือกเริ่มงอกร่วมกับ กระบวนการผลิตข้าวนี้ สามารถให้ลักษณะผลิตภัณฑ์ข้าวพองที่ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคในระดับดี เพราะฉะนั้นหากมีการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการด้านเคมีของเมล็ดข้าวกล้องจากข้าวเปลือกเริ่มงอก เพิ่มเติม อาจเป็นประโยชน์ให้กับผู้บริโภค และนักวิจัยที่ต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากข้าวนี้กล้องจาก ข้าวเปลือกเริ่มงอกต่อไปได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมการข้าว. 2553. **การใช้เมล็ดพันธุ์ข้าวที่มีคุณภาพดี**. องค์ความรู้เรื่องข้าว (Rice knowledge bank).
แหล่งที่มา: http://www.brrd.in.th/rkb/data_003/rice_xx2-03_ricecheck002.html, 24
พฤศจิกายน 2553.
- กรมวิชาการเกษตร. 2549. **ข้าว และข้อมูลทั่วไป**.
แหล่งที่มา: http://www.doa.go.th/pl_data/RICE/1stat/st01.html, 19 กันยายน 2550.
- _____. 2550. **ข้าวนึ่ง (Parboiled rice)**. ฐานความรู้ด้านพืช กรมวิชาการเกษตร:
แหล่งที่มา: http://www.doa.go.th/pl_data/RICE/6product/pro02.html, 22 กันยายน 2550.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กฤตลักษณ์ ปะสะกวี. 2553. **จากขนมสุ้าอาหารขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพ (วิทยาศาสตร์สำหรับเยาวชน)**.
หนังสือพิมพ์แนวหน้า. แหล่งที่มา: <http://www.ryt9.com/s/mnd/939668>, 14 กุมภาพันธ์ 2554.
- เครือวัลย์ อัดตะวิริยะสุข. 2534. **คุณภาพเมล็ดทางกายภาพและการแปรรูปเมล็ด**. ศูนย์วิจัยข้าว
ปทุมธานี. สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- จวงจันทร์ ดวงพัตรา. 2529. **เทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์ (Seed Technology)**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์กลุ่ม
หนังสือเกษตร, กรุงเทพฯ.
- จริยา คุณะวิภากร. 2542. **การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารว่างจากข้าวพองที่ทำจากข้าวกล้องหักหอมมะลิ
ผสมเนยถั่วลิสง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จุฬาลักษณ์ จารุณช. 2550. **ขนมขบเคี้ยวจากเครื่องเอกซ์ทราคเตอร์**. วารสารอาหาร. 37 (3): 211.
- ธงชัย สุวรรณสิขณณ์. 2535. **การพัฒนาอาหารขบเคี้ยวจากแป้งถั่วลิสงไขมันต่ำผสมแป้งมันสำปะหลัง
ชนิดฟรีเจลาทีไนซ์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

น้ำฝน ศีตะจิตต์ และ อรอนงค์ นัยวิกุล. 2546. กระบวนการผลิตข้าวเปลือกนึ่งระดับห้องปฏิบัติการ, น. 36-44. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41 (สาขา อุตสาหกรรมเกษตร). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2548. การเกิดรีโทรเกรเดชันของข้าวขาว และข้าวหนึ่งที่มีปริมาณแอมิโลสสูงหุงสุกแช่เยือกแข็ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประพาส วีระแพทย์. 2552. การปรับปรุงพันธุ์ข้าว. แหล่งที่มา: <http://guru.sanook.com/encyclopedia>, 28 พฤษภาคม 2552.

พิณทิพย์ รัชมกการณ. 2547. การตัดแปรแป้งข้าวโดยการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. 2548. ข้าวพอง. มผช. 743/2548.

วิสิฐ จະวะสิต, รัตนา วัฒนาไพศาลตระกูล และ นัฐพล ตั้งสุภูมิ. 2552. ส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อประโยชน์เชิงพันธุภาพ. วารสารโภชนาการ. 44(2): 42-55.

วันชัย จันทรประเสริฐ. 2537. ศรีรวิทายาเมล็ดพันธุ์. กรุงเทพฯ.

ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว. ม.ป.ป. ข้าวเพื่ออนาคต: พัฒนาพันธุ์ข้าวสุโลกอนาคต. อาคารดีเอ็นเอและจีโนมิก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน, นครปฐม. (อัคราเนนา)

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2541. ขนกรอบจากธัญชาติ Crispy cereal-based snacks. มอก. 1534-2541.

สิริธร เบญจมสุทธุกุล. 2552. การใช้ประโยชน์จากข้าวกล้องเริ่มงอกสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุพัตรา เลิศวณิชย์วัฒนา. 2546. การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากข้าวงอก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. **ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

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

Abe, K., H. Kendo and S. Arai. 1987. Purification and properties of a cysteine proteinase from
germinating rice seeds. **Agric. Biol. Chem.** 51: 1509–1514.

Abhay, Kr.T. and A.K. Gupta. 2006. Water absorption characteristics of paddy, brown rice and husk
during soaking. **Journal of Food Engineering.** 75: 252-257.

Aggarwal, P., and D. Dollimore. 1998. A thermal analysis investigation of partially hydrolyzed starch.
Thermochimica Acta. 319: 17-25.

Ali, S.Z. and K.R. Bhattacharya. 1980. Changes in sugars and amino acids during parboiling of rice.
Journal of Food Biochemistry. 4: 169-179.

Akazawa, T. 1972. Enzymes in rice, pp. 75–101. *In* D.F. Houston, ed. **Rice Chemistry and
Technology**. American Association of Cereal Chemists Inc., Minnesota.

Anonymous. 2011a. **Citric acid cycle**. Overview of the citric acid cycle. Available
Source: http://en.wikipedia.org/wiki/Krebs_cycle, February 14, 2011.

Anonymous. 2011b. **Glycolysis**. Glycolysis. Available
Source: <http://en.wikipedia.org/wiki/Glycolysis>, February 14, 2011.

Antonio, A.A. and B.O. Juliano. 1973. Amylose content and puffed volume of parboiled rice. **Journal
of Food Science.** 38: 915-916.

A.O.A.C. 2000. **Official Method of Analysis**. 20th ed. The Association of Official Analytical
Chemists, Arlington, Virginia.

- Awazuhara, M., A. Nakagawa, J. Yamaguchi, T. Fujiwara, H. Hayashi, K. Hatae, M. Chino and A. Shimada. 2000. Distribution and characterization of enzymes causing starch degradation in rice (*Oryza sativa* Cv. Koshihikari). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 48: 245–252.
- Ayernor, G.S. and F.C.K. Ocloo. 2007. Physico–chemical changes and diastatic activity associated with germinating paddy rice (PSB. Rc 34). **Afr. J. Food Sci.** 1: 37–41.
- BAM. 2001. **Bacteriological Analytical Manual**. U.S. Food and Drug Administration. Center for Food Safety and Applied Nutrition, Maryland.
- Banchuen, J., P. Thammarutwasik, B. Oraikul, P. Wuttijumnong and P. Sirivongpaisal. 2009. Effect of germinating processes on bioactive component of Sangyod Muang Phatthalung rice. **Thai Journal of Agricultural Science**. 42(4): 191-199.
- _____, _____, _____, _____ and _____. 2010. Increasing the bio-active compounds contents by optimizing the germination conditions of Southern Thai brown rice. **Songklanakarinn Journal of Science and Technology**. 32(3): 219-230.
- Bewley, J.D. and M. Black. 1985. **Seeds: Physiology of Development and Germination**. Plenum Press, Inc., New York and London, USA.
- Bhattacharya, K.R. 1985. Parboiling of rice, pp. 289-348. In B.O. Juliano, ed. **Rice: Chemistry and Technology**. St. Paul, MN, USA.
- Bhattacharya, S. 1996. Kinetics on colour changes in rice due to parboiling. **Journal of Food Engineering**. 29: 99-106.
- Billiaderis, C.G., J.R. Tonogai, C.M. Perez and B.O. Juliano. 1993. Thermophysical properties of milled rice starch as influenced by variety and parboiling method. **Cereal Chem.** 70(5): 512-516.

- Brockington, S.F. and V.J. Kelly. 1972. Rice breakfast cereals and infant foods, pp. 410-418. *In* D.F. Houston, ed. **Rice Chemistry and Technology**. St. Paul, MN, USA.
- Capanzana, M.V. and K.A. Buckle. 1997. Optimization of germination conditions by response surface methodology of a high amylase rice (*Oryza sativa*) cultivar. **Lebensm.-Wiss. U.-Technol.** 30: 155-163.
- Champagne, E.T., ed. 2004. **Rice: Chemistry and Technology**. 3rd ed. The American Association of Cereal Chemists Inc., Minnesota, USA.
- Chang, C.W. 1979. Starch and its component ratio in developing cotton leaves. **Plant Physiol.** 63: 973-977.
- Charoenthaikij, P., K. Jangchud, A. Jangchud, K. Piyachomkwan, P. Tungtrakul and W. Prinyawiwatkul. 2009. Germination conditions affect physicochemical properties of germinated brown rice flour. **Journal of Food Science.** 74(9): 658-665
- Chiang P.Y. and A.I. Yeh. 2002. Effect of soaking on wet-milling of rice. **J. Cereal Sci.** 35: 85-94.
- Chinnaswamy, R. and K.R. Bhattacharya. 1983. Studies on expanded rice. Optimal processing condition. **Journal of Food Science.** 48: 1,604-1,608.
- Donald, A.M. 2004. Understanding starch structure and functionality, pp. 170-198. *In* A.C. Eliasson, ed. **Starch in Food: Structure, Function and Applications**. Woodhead Publishing, Ltd., Cambridge, England.
- Eliasson, A.C. and M. Gudmundsson. 1996. Starch: Physicochemical and functional aspects, pp. 131-503. *In* A.C. Eliasson, ed. **Carbohydrates in Food**. Marcel Dekker, New York.
- Fales, F.W., J.A. Russell and J.N. Fain. 1961. Some applications and limitations of the enzymic reducing (Somogyi), and anthrone methods for estimating sugars. **Clin. Chem.** 7: 290-303.

- Fan, J. and B.P. Marks. 1998. Retrogradation kinetics of rice flours as influenced by cultivar. **J. Cereal Chem.** 75(1): 153-155.
- Franco, C.M.L., and C.F. Ciacco. 1992. Factors that affect the enzymatic degradation of natural starch granules: Effect of the size of the granules. **Starch/Stärke.** 44: 422-426.
- Godet, M.C., V. Tran and M.M. Delagw. 1993. Molecular modeling of the specific interactions in amylose complexation by fatty acids. **Int J Biol Macromolecules.** 15: 11-16.
- Graham, R.D., R.M. Welch and H.E. Bouis. 2001. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: Principles, perspectives and knowledge gaps. **Adv. Agron.** 70: 77-142.
- Gregorio, G.B., D. Senadhira, H. Htut and R.D. Graham. 2000. Breeding for trace mineral density in rice. **Food Nutr. Bull.** 21: 382-386.
- Hamaker, B.R. and V.K. Griffin. 1993. Effect of disulfide bond-containing protein on rice starch gelatinization and pasting. **Cereal Chem.** 70: 377-380.
- Han, X.Z. and B.R. Hamaker. 2001. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown. **J. Cereal Sci.** 34: 279-284.
- Heinemann, R.J.B., P.L. Fagundes, E.A. Pinto, M.V.C. Penteado and U.M. Lanfer-Marquez. 2005. Comparative study of nutrient composition of commercial brown, parboiled and milled rice from Brazil. **Journal of Food Composition and Analysis.** 18: 287-296.
- Himmelsbach, D.S., J.T. Manful and R.D. Coker. 2008. Changes in rice with variable temperature parboiling: thermal and spectroscopic assessment. **Cereal Chem.** 85(3): 384-390.
- Hoseney, R.C. 1998. **Principles of Cereal Science and Technology.** 2nd ed. American Association of Cereal Chemists, Inc., Minnesota, USA.

- Hunt, J.R., L.K. Johnson and B.O. Juliano. 2002. Bioavailability of zinc from cooked philippine milled, undermilled, and brown rice, as assessed in rats by using growth, bone zinc, and zinc-65 retention. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 50(18): 5,229-5,235.
- Islam, M.R., N. Shimizu and T. Kimura. 2004. Energy requirement in parboiling and its relationship to some important quality indicators. **Journal of Food Engineering**. 63: 433-439.
- Ito, S. and Y. Ishikawa. 2004. **Marketing of value-added rice products in Japan: Germinated brown rice and rice bread**. FAO International Rice Year, 2004 Symposium. Italy.
- Jane, J., Y.Y. Chen, L.F. Lee, A.E. Mcpherson, K.S. Wong, M. Radosavljevic and T. Kasemsuwan. 1999. Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. **Cereal Chem**. 76: 629-637.
- Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. **Cereal Science Today** 16: 334-340.
- _____. 1985. Polysaccharides, proteins, and lipids of rice, pp. 59-160. *In* B.O. Juliano, ed. **Rice: Chemistry and Technology**. The American Association of Cereal Chemists, Inc., Minnesota, USA.
- _____. 1998. **Expanded (puffed, popped) rice products**. Available source: <http://www.fao.org/docrep/t0567e/T0567E00.htm#Contents>, February 7, 2011.
- _____ and J. Sakurai. 1985. Miscellaneous rice products, pp. 569-618. *In* B. O. Juliano, ed. **Rice: Chemistry and Technology**. The American Association of Cereal Chemists, Inc., Minnesota, USA.
- Kaddus, M.A.M., A. Haque, M.P. Douglass and B. Clarke. 2002. Parboiling of rice. Part II: Effect of hot soaking time on the degree of starch gelatinization. **International Journal of Food Science and Technology**. 37: 539-545.

Kaletunc, G. 2003. Construction of state diagrams for cereal processing, pp 151-171. In G. Kaletunc and K.J. Breslauer, eds. **Characterization of Cereals and Flours: Properties, Analysis, and Applications**. Marcel Dekker, Inc., New York, USA.

Kaneko, M., H. Itoh, M.U. Tanaka, M. Ashikari and M. Matsuoka. 2000. The α -amylase induction in endosperm during rice seed germination is caused by gibberellin synthesized in epithelium. **Plant Physiol.** 128: 1,264-1,270.

Kayahara, H. and K. Tsukahara. 2000. **Flavor health and nutritional quality of pre-germinated brown rice**. International Chemical Congress of Pacific Basin Societies in Hawaii.

_____, _____ and T. Tatai. 2001. Flavor, health and nutritional quality of pre-germinated brown rice, pp 546. In A.H. Spanier, F. Shahidi, T.H. Parliament, C. Mussinan, C.-T. Ho and E.T. Contis, eds. **Food Flavors and Chemistry Advances of the New Millennium**. Athenaem Press Ltd, Gateshead, Tyne and Wear, UK.

Kimanya, E.M., P.R.S. Mamiro, J.V. Camp, F. Devlieghere, A. Opsomer, P. Kolsteren and J. Debevere. 2003. Growth of *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus* during germination and drying of finger millet. **International Journal of Food Science and Technology.** 38: 119-125.

Kinefuchi, M., M. Sekiya, A. Yamazaki and K. Yamamoto. 1999. Change in viable bacteria count in brown rice containing accumulated GABA by high pressure treatment, and properties of processed brown rice. **Nippon Shokuhin Kagaku Kougaku Kaishi.** 46: 329-333.

Kinnersley, A.M. and F.J. Turano. 2000. Gamma-aminobutyric acid (GABA) and responses to stress. **Crit. Rev. Plant Sci.** 19: 479-509.

Komatsuzaki, N., K. Tsukahara, H. Toyoshima, T. Suzuki, N. Shimizu and T. Kimura. 2007. Effect of soaking and gaseous treatment on GABA content in germinated brown rice. **Journal of Food Engineering.** 78: 556-560.

Lai, L.S. and J.L. Kokini. 1991. Physicochemical changes and rheology properties of starch during extrusion. **Biotechnol. Prog.** 7: 251-266.

- Lai, V.M.F., M.C. Shen, A.I. Yeh, B.O. Juliano and C.Y. Lii. 2001. Molecular and gelatinization properties of rice starches from IR24 and Sinandomeng cultivars. **Cereal Chem.** 78: 596-602.
- Lamberts, L., I. Rombout and J.A. Delcour. 2008. Study of nonenzymic browning in α -amino acid and γ -aminobutyric acid/sugar model systems. *Food Chemistry*. 111: 738-744.
- _____, K. Brijs, R. Mohamed, N. Verhelke and J.A. Delcour. 2006. Impact of browning reactions and bran pigments on color of parboiled rice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. 54: 9,924-9,929.
- Lii, C.Y., M.L. Tsai and K.H. Tseng. 1996. Effect of amylose content on the rheological property of rice starch. **Cereal Chem.** 73: 415-420.
- Lui, L.L., H.Q. Zhai and J.M. Wan. 2005. Accumulation of γ -aminobutyric acid in giant-embryo rice grain in relation to glutamate decarboxylase activity and its gene expression during water soaking. **Cereal Chem.** 82(2): 191-196.
- Luh, B.S. and A. Bhumiratana. 1980. Breakfast rice cereals and baby foods, pp 622-649. *In* B.S. Luh, ed. **Rice: Production and Utilization**. Westport, CT: AVI.
- _____, and R.R. Mickus. 1980. Parboiled rice, pp 501-542. *In* B.S. Luh, ed. **Rice: Production and Utilization**. Westport, CT: AVI.
- Moongngarm, A. and N. Saetung. 2010. Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice. **Food Chemistry**. 122: 782-788.
- Muntz, K., M.A. Belozersky, Y.E. Dunaevsky, A. Schlereth and J. Tiedemann. 2001. Stored protienases and the initiation of storage protein mobilization in seed during germination and seeding growth. **J. Exp. Bot.** 362: 174 –1752.
- Noomhom, A. 2001. **Parboiling in rice: Postharvest and Cereal Technology**. IDRC- 053e sheet. Asian Institute Technology, Thailand.

- Ohtsubo, K., K. Suzuki, Y. Yasui and T. Kasumi. 2005. Bio-functional components in the processed pre-germinated brown rice by a twin-screw extruder. **Journal of Food Composition and Analysis**. 18: 303-316.
- Okamoto, K. and T. Akazawa. 1979. Enzymic mechanisms of starch breakdown in germinating rice seeds. **Plant Physiol**. 63: 336-340.
- Palmiano, E.P. and B.O. Juliano. 1972. Biochemical changes in the rice grain during germination. **Plant Physiol**. 49: 751-756.
- Priestley, R.J. 1976. Studies on parboiled rice: Comparison of the characteristics of raw and parboiled rice. **Food Chem**. 1: 5-14.
- Ramesh, M., K.R. Bhattacharya and J.R. Mitchell. 2000. Developments in understanding the basis of cooked rice texture. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 40(6): 499-460.
- Rani, M.R.S. and K.R. Bhattacharya. 1995. Microscopy of rice starch granules during cooking. **Starch/Stärke**. 47(9): 334-337.
- Reggiani, R., C.A. Cantu, I. Bramibilla and A. Bertani. 1988. Accumulation and interconversion of amino acids in rice roots under anoxia. **Plant Cell Physiol**. 29: 981-987.
- Roberts, R.L., D.F. Houston and E.B. Kester. 1951. Expanded rice product. A new use of parboiled rice. **Food Technology**. 5: 361-363.
- Saifullah, M.H.S., A.D. Suter and Y. Lan. 2004. Effects of processing conditions and environmental exposure on the tensile properties of parboiled rice. **Biosystems Engineering**. 89(3): 321-330.
- Saman, P., J.A. Vazquez and S.S. Pandiella. 2008. Controlled germination to enhance the functional properties of rice. **Process Biochemistry**. 43: 1,377-1,382.

- 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 Chemistry**. 81: 219-231.
- Smith, P.S. 1982. Starch derivatives and their use in foods, pp. 237-262. *In* D.R. Lineback and G.E. Inglett, eds. **Food Carbohydrates**. The AVI Publishing Company, Inc., Westport.
- Smith, A.M., S.C. Zeeman and S.M. Smith. 2005. Starch degradation. **Annu. Rev. Plant Biol.** 56: 73-98.
- Somogyi, S. and N. Nelson. 1952. A photometric adapyion of somogyi and method for the determination of cellulose. **Biol Chem.** 153: 1.
- Sujatha, S. L., R. Ahmad and P.R. Bhat. 2004. Physicochemical properties and cooking qualities of two varieties of raw and parboiled rice cultivated in the coastal region of Dakshina Kannada, India. **Food Chemistry**. 86: 211-216.
- Suzuki, K. and T. Maekawa. 1999. Microorganisms control during processing of germinated brown rice. **The Society of Agricultural Structures**. 9: 137-144.
- TA-XT2 application study. 1995. **Comparison of hardness and stickiness of four varieties of cooked rice**. Stable Micro Systems, Ltd., UK.
- Tester, R.F. and J. Karkalas. 1996. Swelling and gelatinization of oat starches. **Cereal Chem.** 73(2): 271-277.
- Tian, B., B. Xie, J. Shi, J. Wu, Y. Cai, T. Xu, S. Xue and Q. Deng. 2010. Physicochemical changes of oat seeds during germination. **Food Chemistry**. 119: 1,195-1,200.
- Trachoo, N., C. Boudreaux, A. Moongngarm, S. Samappito and R. Gaensakoo. 2006. Effect of germinated rough media on growth of selected probiotic bacteria. **Pakistan Journal of Biological Sciences**. 9(14): 2,657-2,661.

- Tsukahara, K. 2004. **The pioneer of sprouted brown rice.** Domer Co., Ltd. Available
Source: <http://www.hatsuga.com/DOMER/english/index.html>, August 20, 2008
- Usansa, U., N. Sompong, C. Wanapu, N. Boonkerd and N. Teaumroong. 2009. The influences of steeping duration and temperature on the α - and β -amylase activities of six Thai rice malt cultivars (*Oryza sativa* L. Indica). **J. Inst. Brew.** 115(2): 140-147.
- USDA. 1982. **Rice Inspection Hand Book.** FGIS, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
- Vandeputte, G.E., R. Vermeulen, J. Geeroms and J.A. Delcour. 2003. Rice starch I structural aspects provide insight into crystallinity characteristics and gelatinization behavior of granular starch. **J. Cereal Sci.** 38: 43-52.
- Varayanond, W., P. Tungtrakul, V. Surojanametakul, L. Watanasiritham and W. Luxiang. 2005. Effect of water soaking on gamma-aminobutyric acid (GABA) in germ of different Thai rice varieties. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**. 39: 411-415.
- Villareal, C.P. and B.O. Juliano. 1987. Varietal differences in quality characteristics of puffed rice. **Cereal Chem.** 64: 337-342.
- Wang, Y.J. and L. Wang. 2002. Structures of flour waxy rice starches in relation to thermal, pasting, and textural properties. **Cereal Chem.** 79: 252-256.
- Watanabe, M., T. Maeda, K. Tsukahara and N. Morita. 2004. Application of pregerminated brown rice for breadmaking. **Cereal Chem.** 81(4): 450-455.
- Whistler, R.L. and J.N. Bemiller. 1999. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists.** American Association of Cereal Chemists, Inc., U.S.A.
- _____ and J.R. Deniel. 1984. Molecular structure of starch, pp. 153-178. *In* R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall, eds. **Starch: Chemistry and Technology.** Academic Press, Inc., Florida. U.S.A.

Wurzburg, O.B. 1986. **Modified Starch : Properties and uses**. CRC Press, Inc., Florida.

Yamada, C., H. Izumi, J. Hirano, A. Mizukuchi, M. Kise, T. Matsuda and Y. Kato. 2005. Degradation of soluble proteins including some allergens in brown rice grains by endogenous proteolytic activity during germination and heat processing. **Biosci. Biotechnol. Biochem.** 69: 1877–1883.

Yoshizawa, K. 2004. Rice in Brewing, pp 541-567. In E.T. Champagne, ed. **Rice: Chemistry and Technology**. American Association of Cereal Chemists, Inc., Minnesota, USA.

Zakaria, S., T. Mutsuda and Y. Nitta. 2000. Morphological studied on the mobilization of reserves in germinating rice seed. **Plant Prod. Sci.** 3: 152–160.

Zhang, H., Y.H. Yao., F. Chen and X. Wang. 2007. Purification and characterization of glutamate decarboxylase from rice germ. **Food Chemistry.** 101: 1,702-1,708.

Zhang, L., P. Hu, S. Tang, H. Zhao and D. Wu. 2005. Comparative studies on major nutritional components of rice with a giant embryo and a normal embryo. **Journal of Food Biochemistry.** 29: 653-661.





1. น้ำหนักเมล็ดข้าวจำนวน 1,000 เมล็ด ตามวิธีการของอรอนงค์ (2550)

คัดเลือกเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร จำนวน 1,000 เมล็ดของข้าวแต่ละพันธุ์ โดยคัดเลือกเมล็ดที่สมบูรณ์ และแก่เต็มที่ แล้วชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ

2. ขนาด และรูปร่างของเมล็ดข้าว ตามวิธีการของอรอนงค์ (2550)

สุ่มตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสารในข้าวแต่ละพันธุ์ จำนวนอย่างละ 10 เมล็ด วัดขนาดในรูปของความยาว ความกว้าง และความหนา ด้วยเวอร์เนียคาร์ลิเปอร์

ความยาวของเมล็ด หมายถึง ระยะทางจากปลายยอดสุดของเมล็ดถึงโคนเมล็ด

ความกว้างของเมล็ด หมายถึง ระยะทางส่วนที่กว้างที่สุดระหว่างเปลือกใหญ่ถึงเปลือกเล็ก

ความหนาของเมล็ด หมายถึง ระยะทางที่มากที่สุดระหว่างเปลือกใหญ่ด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

การจัดจำแนกขนาดของเมล็ดข้าวเมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร แสดงดังตารางผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 เปรียบเทียบขนาดของเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสาร

ลักษณะเมล็ด	ชนิดเมล็ด	ความยาว (มม.)	ความกว้าง (มม.)	ความหนา (มม.)
ข้าวเปลือก	ขาว	8.7-9.9	2.3-2.5	1.8-2.0
	ปานกลาง	7.8-8.4	2.9-3.2	1.9-2.2
	สั้น	7.2-7.3	2.9-3.4	2.0-2.3
ข้าวกล้อง	ขาว	6.8-8.0	2.0-2.3	1.6-1.9
	ปานกลาง	5.8-6.3	2.4-2.8	1.8-2.1
	สั้น	5.2-5.4	2.6-3.0	1.9-2.1
ข้าวสาร	ขาว	6.5-7.5	1.9-2.2	1.5-1.8
	ปานกลาง	5.4-6.0	2.3-2.7	1.7-1.9
	สั้น	5.0-5.2	2.5-2.9	1.8-2.0

ที่มา: อรอนงค์ (2550)

ส่วนรูปร่างเมล็ดข้าว สามารถวัดได้จากอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง โดยมีเกณฑ์แสดงดังตารางผนวกที่ ก2

ตารางผนวกที่ ก2 รูปร่างของเมล็ดข้าว

รูปร่าง	ข้าวเปลือก	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร
เรียวยาว	3.4 หรือมากกว่า	3.1 หรือมากกว่า	3.0 หรือมากกว่า
ปานกลาง	2.3-3.3	2.1-3.0	2.0-2.9
ป้อม	2.2 หรือน้อยกว่า	2.0 หรือน้อยกว่า	1.9 หรือน้อยกว่า

ที่มา: อรอนงค์ (2550)

3. วิธีการวัดสี (Chroma CR-310, Japan)

วัดค่าสีของเมล็ดข้าวด้วย Chroma CR-310 โดยวัดค่าสี L^* , a^* , b^* ในระบบ CIELAB ค่า L^* , a^* และ b^* ของแผ่นมาตรฐาน คือ 94.2, 0.3157 และ 0.3320 ตามลำดับ วัดค่า 3 ซ้ำ เพื่อหาค่าเฉลี่ยของ L^* , a^* และ b^* โดยนำตัวอย่างเมล็ดข้าวที่ป่นละเอียดแล้วใส่ลงในเพลทจนเต็ม นำปากกระบอกเครื่องวัดสีกดทับบนตัวอย่างจนแนบสนิท กดปุ่มเพื่อวัดค่า และบันทึกค่าสี

ค่า L^* หมายถึง ความเข้มของแสง โดยเทียบค่า L^* เท่ากับ 100 หมายถึง สีขาว และเมื่อ L^* เท่ากับ 0 หมายถึง สีดำ

ค่า a^* หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สี เมื่อค่า a^* เป็น (+) หมายถึง อยู่ในทิศของสีแดง เมื่อ a^* เป็น (-) หมายถึง อยู่ในทิศของสีเขียว

ค่า b^* หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์สี เมื่อค่า b^* เป็น (+) หมายถึง อยู่ในทิศของสีเหลือง เมื่อ b^* เป็น (-) หมายถึง อยู่ในทิศของสีน้ำเงิน

4. ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเมล็ดข้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ดัดแปลงจากวิธีการของน้ำฝน (2548)

ก่อนเตรียมตัวอย่างเมล็ดข้าวเพื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราด เมล็ดข้าวถูกเก็บไว้ในโถสุญญากาศเป็นเวลา 2 สัปดาห์ ก่อนนำมาเตรียมตัวอย่างเพื่อส่องด้วย กล้องฯ โดยหักเมล็ด

ข้าวชนิดต่างๆ ด้วยมือออกเป็น 2 ท่อน นำมาวางบนแท่นวางตัวอย่าง โดยใช้แถบกาวคาร์บอน 2 ด้าน ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์ยึดติดระหว่างแท่นวางตัวอย่างกับตัวอย่าง จากนั้นเคลือบผิวหน้าของเมล็ดข้าวด้วยทองคำ ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้า โดยใช้เครื่องเคลือบ (Sputter coater) จากนั้นนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสงส่องกราด โดยใช้ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ (kV) ที่กำลังขยาย 35 และ 3,000 เท่า บันทึกภาพที่ต้องการ

5. อัตราส่วนการพองตัว คัดแปลงจากวิธีการของธงชัย (2535)

ใช้การแทนที่เมล็ดงา โดยนำเมล็ดงาใส่ถ้วยแก้วปากเรียบให้เต็ม ปาดให้เรียบ วัดปริมาณ โดยใช้กระบอกตวง (V_1) นำเมล็ดข้าวใส่ถ้วยใบเดิม วัดปริมาณงาที่เหลือหลังนำข้าวออก (V_2) ความแตกต่างของเมล็ดงา ($V_1 - V_2$) คือ ปริมาตรของข้าวก่อนทอด จากนั้นนำเมล็ดข้าวไปทอด และหาปริมาตรเช่นเดิม (V_3) จะได้ปริมาตรข้าวหลังทอด ($V_1 - V_3$)

$$\text{อัตราส่วนการพองตัว (เท่า)} = (\text{ปริมาตรของข้าวหลังทอด}) / (\text{ปริมาตรของข้าวก่อนทอด})$$

6. การตรวจสอบลักษณะเนื้อสัมผัสของเมล็ดข้าวพอง คัดแปลงจาก TA-XT2 application study (1995)

วัดค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ข้าวพองด้วยเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer; TA-XT Plus, Stable Micro System) ใช้หัววัดแบบทรงกระบอก (6 mm cylinder probe; P/6) โดยวางเมล็ดข้าวพองจำนวน 1 เมล็ดตรงกลางแท่นวางตัวอย่าง ทำการวัด โดยให้หัววัดกดทับเมล็ดข้าวพองเป็นระยะทางร้อยละ 50 ของความหนาเมล็ดข้าวพอง (50% strain) ซึ่งค่าแรงสูงสุด (Peak force) ที่อ่านได้จากกราฟ เป็นค่าความแข็งของตัวอย่าง แสดงในหน่วยนิวตัน (N) ทำการวัดตัวอย่างเมล็ดข้าวพองจำนวน 10 เมล็ด โดยกำหนดค่าในการวัด ดังนี้

Mode:	Measure force in compression
Option:	Return to start
Pre-test speed:	0.5 mm/s
Test speed:	0.5 mm/s
Post-test speed:	10.0 mm/s
Strain:	50%
Trigger type:	Auto-3g
Data acquisition rate:	400pps



ภาคผนวก ข
การตรวจวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ตามวิธีการของ AACC (2000) Method 44-15A

อบแห้งภาชนะอะลูมิเนียมเปล่าพร้อมฝา ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำมาใส่ใน โถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน

ชั่งตัวอย่างเมล็ดข้าว/แป้งข้าวลงในภาชนะอะลูมิเนียมที่เตรียมไว้ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 2-3 กรัม นำไปอบที่ตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส โดยเปิดฝาภาชนะไว้ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (สำหรับตัวอย่างที่มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 13) หรือ 14-16 ชั่วโมง (สำหรับตัวอย่างที่มีความชื้นมากกว่าร้อยละ 13) เมื่อครบเวลาแล้วนำออกจากตู้อบ ปิดฝาภาชนะ และนำมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้นทันที แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนัก โดย

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

เมื่อ

A = น้ำหนักที่หายไป (กรัม)

B = น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

2. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน ตามวิธีการของ A.O.A.C. (2000)

สารเคมี

1. ปีโตรเลียมอีเทอร์

วิธีวิเคราะห์

1. เปิดเครื่องทำความเย็น (Cooling) ควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส เปิดสวิตช์ให้น้ำไหลเข้าเครื่องสกัด (Extractor)
2. ตั้งอุณหภูมิที่เครื่อง Thermostatic Cut-Out (สำหรับตัวทำลายที่เป็นปีโตรเลียมอีเทอร์ ให้ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 100 °ซ) (ยังไม่ต้องเปิด Switch Main)
3. อบ Extraction cup และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักไว้ (W_1)
4. ชั่งตัวอย่างแป้งประมาณ 2 กรัม บันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอน (W_2) ลงบนกระดาษกรอง และห่อให้มิดชิด นำมาใส่ใน Thimble แล้วนำ Thimble ไปใส่ไว้ใน Thimble Holder แล้วนำไปใส่ในเครื่อง ดังนี้

- ปุ่มบังคับ Thimble อยู่ที่ตำแหน่ง Boiling

- นำ Thimble ไปใส่ไว้ในช่อง Extraction แล้วเอา Thimble Holder ออก
 - เลื่อนปุ่มบังคับ Thimble มาอยู่ในตำแหน่ง Rinsing
5. เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ จำนวน 45-50 มิลลิลิตร ลงใน Extraction cup แล้วนำ Extraction cup ไปใส่ไว้ใน Extraction cups holder
6. นำ Extraction Cups Holder ไปใส่ในช่อง Extraction แล้วเคลื่อนคันโยกทางด้านซ้ายมือของเครื่อง Extractor ลง
7. เริ่มทำการสกัดโดยขั้นตอน ดังนี้
- ปุ่มบังคับ Thimble อยู่ตำแหน่ง Boiling
 - ก๊อกต้องอยู่ในลักษณะที่เปิด
 - เปิด Switch Main ที่เครื่อง Thermostatic Cut-Out
 - ตั้งเวลาที่เครื่อง Extractor ไว้ 15 นาที
8. เมื่อครบ 15 นาที ทำการ Rinsing โดยขั้นตอน ดังนี้
- เลื่อนปุ่มบังคับ Thimble ไปที่ Rinsing
 - ตั้งเวลาที่เครื่อง Extractor ไว้ 45 นาที
9. เมื่อครบ 45 นาที จะทำการระเหยตัวทำละลาย (Solvent Recover) ดังนี้
- ปิดก๊อก
 - เปิดพัดลม
 - เลื่อนปุ่ม Evaporation ลง
10. เคลื่อนคันโยกทางซ้ายมือของเครื่อง Extractor ขึ้น นำ Extraction cups holder ออกจากช่อง Extraction
11. นำ Thimble holder ไปใส่ในช่อง Extraction แล้วเลื่อนปุ่มบังคับ Thimble ไปที่ Boiling นำ Thimble holder ที่มี Thimble อยู่ภายในออกจากช่อง Extraction
12. ปิด Switch เครื่องทำความเย็น
13. นำภาชนะไปใส่ตัวทำละลาย (Solvent) โดยไปวางไว้ในช่อง Extraction แล้วเปิดก๊อกให้ตัวทำละลายไหลออกมา (นำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ได้)
14. นำ Extraction cups ที่ได้ไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที ทิ้ง Extraction cup ให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก (W_3)

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

เมื่อ W_1 = น้ำหนัก Extraction cup หน่วยเป็นกรัม

W_2 = น้ำหนักตัวอย่างที่วิเคราะห์ หน่วยเป็นกรัม

W_3 = น้ำหนัก Extraction cup และไขมันที่สกัดได้ หน่วยเป็นกรัม

3. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตามวิธีการของ A.O.A.C. (2000)

สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
2. คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
3. โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4)
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 40
5. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล
6. สารละลายกรดบอริก ความเข้มข้นร้อยละ 4
7. อินดิเคเตอร์ (Methyl red 0.02 กรัม + Bromocresol green 0.1 กรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ จำนวน 100 มิลลิลิตร)

วิธีวิเคราะห์

1. พับกระดาษกรองเป็นรูปของจดหมาย ซ้ำตัวอย่างลงในกระดาษกรองให้ได้น้ำหนักที่คงที่แน่นอนประมาณ 0.5-1.0 กรัม
2. ใส่ตัวอย่างที่เตรียมได้ลงในหลอดย่อยโดยไม่ให้เปื้อนข้างหลอด เติม K_2SO_4 10 กรัม และ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.5 กรัม ใส่ Glass bead 2-3 เม็ด
3. เติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น จำนวน 25 มิลลิลิตร ปิดฝาหลอดย่อย ยกไปที่บนเตาย่อยต่อสายชุดจับไอกรดกับฝาหลอดย่อย โดยเปิดเครื่องทำความเย็นไว้ก่อนแล้วก่อนทำการย่อยครึ่งชั่วโมง
4. เปิดสวิทช์เตาย่อย และชุดจับไอกรด พร้อมทั้งหมุนตั้งอุณหภูมิเตาย่อยไว้ที่ระดับ 6 เมื่อเริ่มต้นการย่อย จากนั้นปรับเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็นระดับ 8-9 ทำการย่อยจนได้สารละลายสีเขียวใส ยกออกจากเตาย่อย
5. ปิดสวิทช์เตาย่อย แต่ยังไม่ปิดสวิทช์ชุดจับไอกรด จนกว่าไอกรดหมด
6. นำหลอดย่อยมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปต่อเข้ากับชุดเครื่องกลั่น
7. ตั้งค่าเครื่องกลั่นในชื่อน้ำกลั่นเป็น 60-75 มิลลิลิตร (ประมาณ 3 เท่าของกรด) และช่องของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 40 เป็น 60-80 มิลลิลิตร (ประมาณ 3 เท่าของกรด)
8. ทำการกลั่นจนสารละลายในหลอดย่อยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลก่อนข้างดำ (ตั้งค่าการกลั่น 3 นาที) รองรับสิ่งที่กลั่นได้ด้วยขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายกรดบอริก ความเข้มข้นร้อยละ 2 จำนวน 60 มิลลิลิตร ซึ่งมีการเติมอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด

9. ก่อนเปลี่ยนตัวอย่างอื่นเพื่อกลั่นต่อ ล้างเครื่องกลั่นก่อนด้วยน้ำกลั่น

10. นำสิ่งทีกลั่นได้ไปไทเทรตกับสารละลายกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งได้สารละลายสีเทา (จุดยุติ) บันทึกปริมาณกรดที่ใช้ ทำเบลนจ์ควบคู่ไปด้วย โดยไม่มีตัวอย่างในหลอดย่อย

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

$$\text{ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ)} = \text{ปริมาณไนโตรเจน} \times 5.95$$

เมื่อ S = ปริมาตรสารละลายกรดซัลฟูริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง

B = ปริมาตรสารละลายกรดซัลฟูริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับเบลนจ์

N = ความเข้มข้นเป็นนอร์มัลของสารละลายกรดซัลฟูริกมาตรฐาน

W = น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม

4. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ A.O.A.C. (2000)

เผาด้วยกระบือเพลิงเปล่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก 3-5 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ลงในถ้วยกระบือเพลิง นำตัวอย่างไปเผาไฟด้วยตะเกียงเบนเสนจนหมดควันในตู้ดูดควัน นำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างกลายเป็นสีขาวหรือสีเทา ทำให้เย็นใน โถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณหาปริมาณเถ้า ดังนี้

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา}}$$

5. การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีการของ A.O.A.C. (2000)

$$\text{ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)} = 100 - (\text{ปริมาณความชื้น} + \text{ปริมาณโปรตีน} + \text{ปริมาณไขมัน} + \text{ปริมาณเถ้า})$$

6. การวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส ตามวิธีการของ Juliano (1971)

สารเคมี

1. เอทิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้นร้อยละ 95
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์
3. กรดแอสติก ความเข้มข้น 1 โมลาร์
4. แอมิโลสบริสุทธิ์
5. สารละลายไอโอดีน

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างแป้งให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน (เทคนิค 4 ตำแหน่ง) จำนวน 0.1 กรัม ใส่ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 9 มิลลิลิตร นำไปต้มในอ่างน้ำเดือด 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
3. ถ่ายแป้งลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร โดยใช้น้ำกลั่นล้าง 2-3 ครั้ง ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน
4. ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมกรดแอสติก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นให้ครบปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ 20 นาที
5. ทำแบลนด์ โดยเติมกรดแอสติกความเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 2 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบด้วยน้ำกลั่น
6. วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าสารละลายแบลนด์เท่ากับศูนย์
7. เตรียมกราฟมาตรฐาน โดยชั่งแอมิโลสบริสุทธิ์ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 0.0400 กรัม และดำเนินการเช่นเดียวกับข้อ 2 แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น
8. ปิเปตสารละลายมาตรฐานแอมิโลสที่เตรียมไว้ ปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตรใส่ขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมกรดแอสติก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 มิลลิลิตร ตามลำดับ เติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้สารละลายเข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ 20 นาที
9. วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร และเขียนกราฟระหว่างปริมาณแอมิโลส (กรัม/แป้งขาว 100 กรัม) กับค่าการดูดกลืนแสง การเปลี่ยนค่าการดูดกลืนแสงเป็นปริมาณแอมิโลส โดยนำค่าการ

ดูดกลืนแสงที่ปริมาณตัวอย่าง 0.1000 กรัม ของแต่ละตัวอย่างเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วอ่านค่าเป็นร้อยละของแอมิโลสต่อแป้งข้าว 100 กรัม

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

(มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร)

7. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ดัดแปลงจากวิธีการของ Chang (1979) และ Somogyi and Nelson (1952)

สารเคมี

1. Alkaline Copper Reagent: ชั่งสาร $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 71 กรัม , NaK tartrate จำนวน 40 กรัม และ NaOH จำนวน 4 กรัม ละลายสารตามลำดับในน้ำกลั่นประมาณ 700 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนและเติม $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 8 กรัม เมื่อสารละลายหมดแล้วจึงเติม Na_2SO_4 จำนวน 180 กรัม จากนั้นปรับปริมาตรให้ครบ 1 ลิตร เก็บไว้ในขวดสีชาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง แล้วนำมากรองตะกอนออกก่อนใช้

2. Nelson Reagent: ชั่ง $(\text{NH}_4)_6\text{MO}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 53.2 กรัม เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ปริมาตร 21 มิลลิลิตร และ $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 6 กรัม ละลายสารตามลำดับในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ครบ 1 ลิตร เก็บไว้ในขวดสีชาที่อุณหภูมิห้อง 24-48 ชั่วโมง แล้วนำมากรองตะกอนออกก่อนใช้

3. เอทิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้นร้อยละ 50

4. สารกลูโคสมาตรฐาน (D-glucose)

การเตรียมกราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส

เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสเข้มข้นร้อยละ 0.2 จากนั้นนำสารละลายน้ำตาลที่ได้มาทำให้เจือจางเป็นความเข้มข้นร้อยละ 0.02 ก่อนนำมาเตรียมให้มีมีความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่ 0-200 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร โดยแสดงดังตารางผนวกที่ ข1

ตารางผนวกที่ ๗1 สารละลายกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้น 0-200 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร

ความเข้มข้นของกลูโคส (ไมโครกรัม/ มิลลิลิตร)	ปริมาณน้ำกลั่น (มิลลิลิตร)	ปริมาณสารละลายกลูโคสร้อยละ 0.02 (มิลลิลิตร)
0	1.0	0
40	0.8	0.2
80	0.6	0.4
120	0.4	0.6
160	0.2	0.8
200	0	1.0

วิธีวิเคราะห์

1. สกัดน้ำตาลรีดิวซ์ในตัวอย่างแป้งข้าวโดยเติมเอทิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้นร้อยละ 50 จำนวน 5 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่างแป้งข้าว จำนวน 0.5 กรัม กวนให้เข้ากันดีแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5,000 rpm เป็นเวลา 15 นาที

2. ปิเปตส่วนใสที่ได้จากการสกัดในข้อ 1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลองที่มีฝาปิด พร้อมกับเตรียมแบลนด์โดยใช้ น้ำกลั่น ปริมาตร 1 มิลลิลิตร แทนตัวอย่าง แล้วเติมสารละลาย Alkaline copper ปริมาตร 1 มิลลิลิตร

3. นำไปให้ความร้อนในน้ำเดือดเป็นเวลา 15 นาที และทำให้เย็นทันทีในถังน้ำแข็ง เติมสารละลาย Nelson ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันอย่างดี ตั้งหลอดทดลองทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที

4. เติมน้ำกลั่น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้ 15 นาที นำไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ โดยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร หาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยเทียบกับกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับปริมาณน้ำตาลกลูโคสมาตรฐาน

8. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุเหล็ก ตามวิธีการของ AACC (2000) Method 40-41B

สารเคมี

1. สารละลาย *o*-phenanthroline: ละลาย *o*-phenanthroline จำนวน 0.1 กรัม ด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 °ซ ทำให้เย็น แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร เก็บสารละลายในขวดแก้วสีชา

2. สารละลาย Hydroxylamine hydrochloride: ละลาย $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ จำนวน 10 กรัม ด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร เก็บสารละลายในขวดแก้วสีชา

3. Acetate buffer: ละลาย Anhydrous sodium acetate ซึ่งผ่านการอบที่ 100°C แล้ว จำนวน 8.3 กรัม ด้วยน้ำกลั่น จากนั้นเติมกรดแอสติก ปริมาตร 12 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

4. สารละลายเหล็กมาตรฐาน ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร

5. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น

การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายเหล็ก

เตรียมสารละลายเหล็กที่มีความเข้มข้นต่างๆ ตั้งแต่ 0-4.5 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร จากสารละลายเหล็กความเข้มข้น 10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร โดยดูดสารละลายเหล็กความเข้มข้น 10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ตามปริมาตรในตารางผนวกที่ ข2 ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น

ตารางผนวกที่ ข2 สารละลายเหล็กมาตรฐานความเข้มข้น 0-4.5 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร

ปริมาตรของสารละลายเหล็กที่ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (มิลลิลิตร)	ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายเหล็ก (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)
0	0
2	0.2
5	0.5
15	1.5
25	2.5
45	4.5

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างแป้งข้าวจำนวน 2-10 กรัม ลงใน Crucible (ทำเบลงค์ควบคู่ด้วย) นำไปเผาไฟด้วยตะเกียงเบนเสนจนหมดควันในตู้ดูดควัน แล้วนำไปเผาต่อในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace) ค้างคืนที่อุณหภูมิ 550°C นำ Crucible ออกจากเตาเผาและทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

2. ค่อยๆ เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปประเหยให้แห้งในอ่างน้ำร้อน ละลายส่วนที่เหลือโดยการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนเป็นเวลา 5 นาที

3. กรองสารละลายทั้งหมดลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ครบด้วยน้ำกลั่น และผสมให้เข้ากัน

4. ปิเปตสารละลายตัวอย่างจำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในขวดกำหนดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร เติม สารละลาย Hydroxylamine hydrochloride จำนวน 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งไว้เป็นเวลา 5 นาที แล้วเติมสารละลายบัพเฟอร์ จำนวน 5 มิลลิลิตร กับสารละลาย *o*-phenanthroline จำนวน 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที

5. นำแบดจ์ สารละลายเหล็กมาตรฐาน และตัวอย่าง วัดการค่าการดูดกลืนแสงของด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร คำนวณปริมาณธาตุเหล็กของตัวอย่างโดยเทียบจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้น (หน่วย ppm) ของสารละลายเหล็กมาตรฐาน

$$\text{ปริมาณธาตุเหล็ก (มก./100 ก.)} = \frac{C \times DF \times 10}{W}$$

เมื่อ

C = ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง (ppm)

DF = Dilution factor (ถ้ามีการ Dilute ตัวอย่าง)

W = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

9. การวิเคราะห์ปริมาณกรดแกมมา แอมิโนบิวทีริก (γ -aminobutyric acid; GABA) ตามวิธีการของ Varayanond *et al.* (2005)

สารเคมี

1. สารมาตรฐาน γ -Amino-n-butyric acid
2. Acetic acid
3. Sodium bicarbonate
4. 4-Dimethyl-aminoazobenaene-4-sulfonyl chloride (DABSYL-Cl)
5. Acetonitrile

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งแป้ง จำนวน 0.2-0.5 กรัม ลงในกระบอกพลาสติก เติมน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน
2. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4,500 rpm เป็นเวลา 10 นาที
3. ปิเปตส่วนใส ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เติมสารละลาย NaHCO_3 ความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ ปริมาตร 200 ไมโครลิตร และสารละลาย DABSYL-Cl-Acetonitrile ความเข้มข้น 6 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 400 ไมโครลิตร
4. นำไปต้มในน้ำที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 20 นาที
5. กรองสารละลายตัวอย่างลงในขวด Vial โดยสารละลายตัวอย่างจำนวน 10 ไมโครลิตรจะถูกฉีดเข้าเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณ GABA



1. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด ตามวิธีการของ AACC (2000) Method 61-02

นำตัวอย่างข้าวกล้องแต่ละชนิดบดละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช นำไปตรวจวัด ปริมาณความชื้นที่แท้จริง ชั่งน้ำหนักแป้งตัวอย่าง 3.0 กรัมที่ได้จากการคำนวณน้ำหนักตัวอย่าง (ความชื้น ร้อยละ 12) ใส่ลงในกระบอกสำหรับวิเคราะห์ (Test canister) ซึ่งบรรจุน้ำกลั่นที่ได้จากการคำนวณ ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง รวมเป็นปริมาณน้ำทั้งหมดเท่ากับ 25 มิลลิลิตร ใช้ใบพัด (Paddle) กวนขึ้นลง ประมาณ 10 ครั้งให้แป้งกระจายตัวอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ นำกระบอกใส่เข้าเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) โดยคำนวณน้ำหนักตัวอย่างแป้งข้าว และน้ำกลั่นที่ต้อง ใช้อย่างแท้จริง ตามสูตร ดังนี้

$$S = (88 \times 3.0)/(100 - M) \quad \text{สำหรับแป้งข้าว}$$

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

โดย $S =$ น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้จริง (กรัม)
 $M =$ ความชื้นที่แท้จริงของตัวอย่าง (ร้อยละ)
 $W =$ น้ำหนักน้ำที่ใช้จริง (กรัม)

โดยสภาวะที่ใช้วิเคราะห์แสดงดังตารางที่ ค1

ตารางผนวกที่ ค1 สภาวะที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลา

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที:วินาที)
50.0 (อุณหภูมิเริ่มต้น)	0:00
50.0	1:00
50.0-95.0	4:45
95.0	7:15
95.0-50.0	11:06
50.0 (สิ้นสุดการทดสอบ)	12:30

โดยบันทึกค่าต่างๆ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (Pasting temperature) เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (Pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Trough) ความหนืดลดลง (Breakdown) (ผลต่างระหว่างความหนืดสูงสุด และความหนืดต่ำสุด) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และความหนืดคืนตัว (Setback) (ผลต่างของความหนืดสุดท้าย และความหนืดต่ำสุด)



1. ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count) ตามวิธีการของ BAM (2001)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 25 กรัม ผสมกับสารละลาย Butterfield's phosphate-buffered dilution water 225 มิลลิลิตร ได้สารละลายตัวอย่างอาหารเข้มข้น 10^{-1} แล้วเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 10^{-2} , 10^{-3} , และ 10^{-4} ปิเปตสารละลายตัวอย่างจากแต่ละความเข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในจานเพาะเชื้อความเข้มข้นละ 2 จาน เทอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA) ที่หลอมเหลวแล้ว อุณหภูมิประมาณ 45 ± 1 °ซ ลงในจานเพาะเชื้อจานละ 12 ถึง 15 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้แข็ง กลับจานเพาะเชื้อ นำไปบ่มในตู้อบเพาะเชื้ออุณหภูมิ 35 °ซ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นับจำนวนโคโลนีในจานเพาะเชื้อ ซึ่งมี 25 ถึง 250 โคโลนี หากค่าเฉลี่ยแล้วคำนวณเป็นโคโลนีต่อกรัม (Colony forming unit/g; CFU/g)

2. ปริมาณยีสต์ และรา ตามวิธีการของ BAM (2001)

ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 25 กรัม เจือจางตัวอย่างด้วยสารละลายเพปโทนเข้มข้นร้อยละ 0.1 ให้ได้ความเข้มข้น 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , และ 10^{-6} ปิเปตสารละลายตัวอย่างจากแต่ละความเข้มข้นปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในจานเพาะเชื้อความเข้มข้นละ 3 จาน เทอาหารเลี้ยงเชื้อ Dichloran 18% glycerol agar ลงในจานเพาะเชื้อจานละ 20 ถึง 25 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ให้แข็ง นำไปบ่มในตู้อบเพาะเชื้ออุณหภูมิ 25 °ซ เป็นเวลา 5 วัน นับจำนวนโคโลนีในจานเพาะเชื้อ ซึ่งมี 10 ถึง 150 โคโลนี ในกรณีที่ไม่นพบการเจริญของยีสต์ และราในช่วงเวลาการบ่ม 5 วัน ให้บ่มในตู้อบเพาะเชื้อต่อเป็นเวลา 48 ชั่วโมง หากค่าเฉลี่ยแล้วคำนวณเป็นโคโลนีต่อกรัม (Colony forming unit/g; CFU/g)



แบบทดสอบความชอบผลิตภัณฑ์ ชุดที่.....
(หาความชอบของผู้บริโภคที่มีต่อข้าวพองจากข้าวชนิดต่างๆ)

ผู้ทดสอบ.....วันที่.....

คำชี้แจง ท่านจะได้รับตัวอย่างข้าวพองทั้งหมด 9 ตัวอย่าง กรุณาชิมตัวอย่าง แล้วให้คะแนนความชอบของแต่ละตัวอย่างให้ใกล้เคียงกับความรู้สึกของท่านมากที่สุด

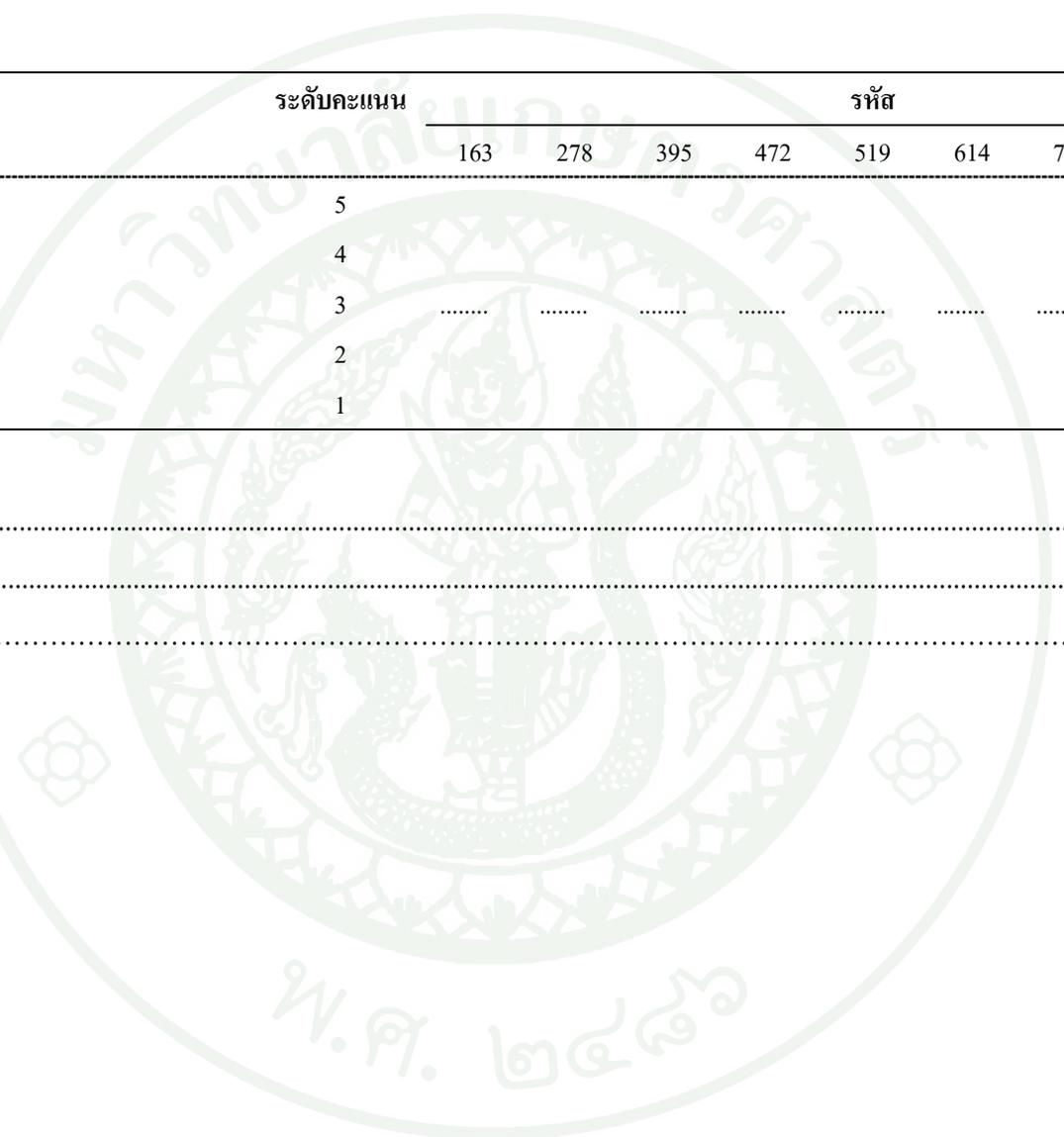
ปัจจัยคุณภาพ	ระดับการตัดสิน	ระดับคะแนน	รหัส								
			163	278	395	472	519	614	761	849	965
สี	สีสม่ำเสมอดีมาก	5									
	สีสม่ำเสมอดี	4									
	สีสม่ำเสมอปานกลาง	3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	สีสม่ำเสมอพอใช้	2									
	สีไม่สม่ำเสมอ	1									
กลิ่นรส	กลิ่นรสดีมากตามธรรมชาติ ไม่มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้	5									
	กลิ่นรสดีตามธรรมชาติ ไม่มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้	4									
	กลิ่นรสปานกลาง ไม่มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้	3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	กลิ่นรสพอใช้ มีกลิ่นหืน หรือกลิ่นไหม้เล็กน้อย	2									
	กลิ่นรสไม่ดี มีกลิ่นหืน กลิ่นอับ หรือกลิ่นไหม้	1									
ความกรอบ	กรอบพองดีมาก	5									
	กรอบพองดี	4									
	กรอบพองพอใช้	3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	กรอบพองพอใช้ แต่มีส่วนแข็งกระด้าง	2									
	ไม่กรอบพอง แข็งกระด้าง	1									

ปัจจัยคุณภาพ	ระดับการตัดสิน	ระดับคะแนน					รหัส								
		5	4	3	2	1	163	278	395	472	519	614	761	849	965
ความชอบรวม	ชอบมากที่สุด	5													
	ชอบมาก	4													
	ชอบปานกลาง	3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	ไม่ชอบเล็กน้อย	2													
	ไม่ชอบมาก	1													

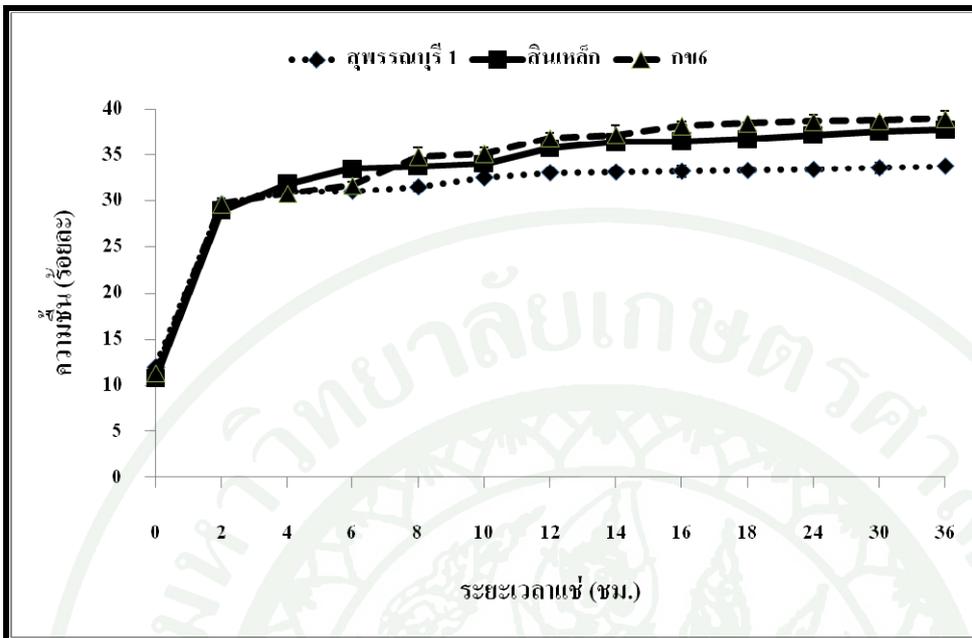
ข้อเสนอแนะ.....

.....

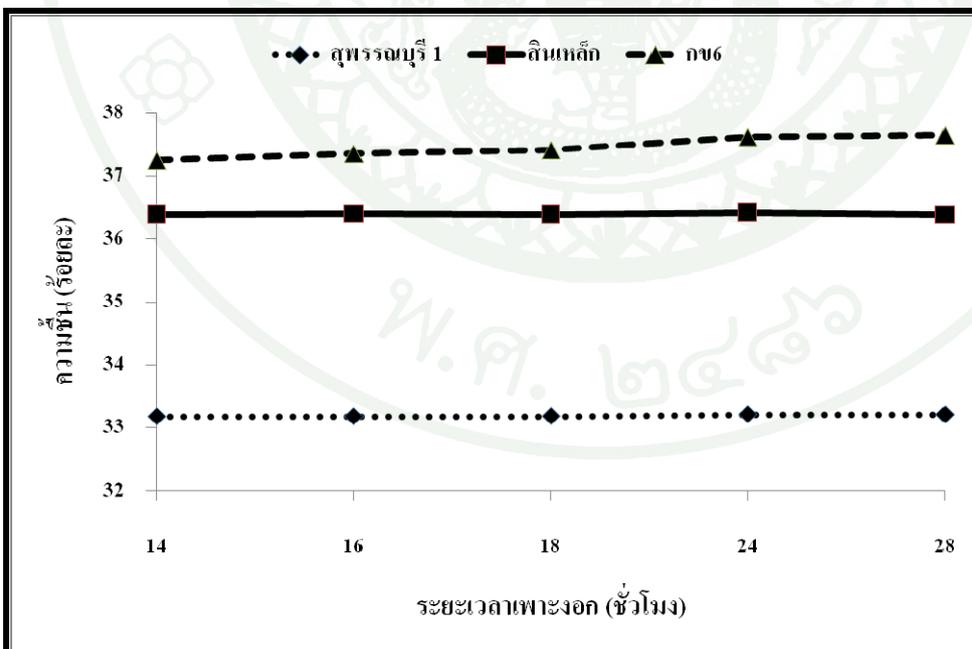
.....



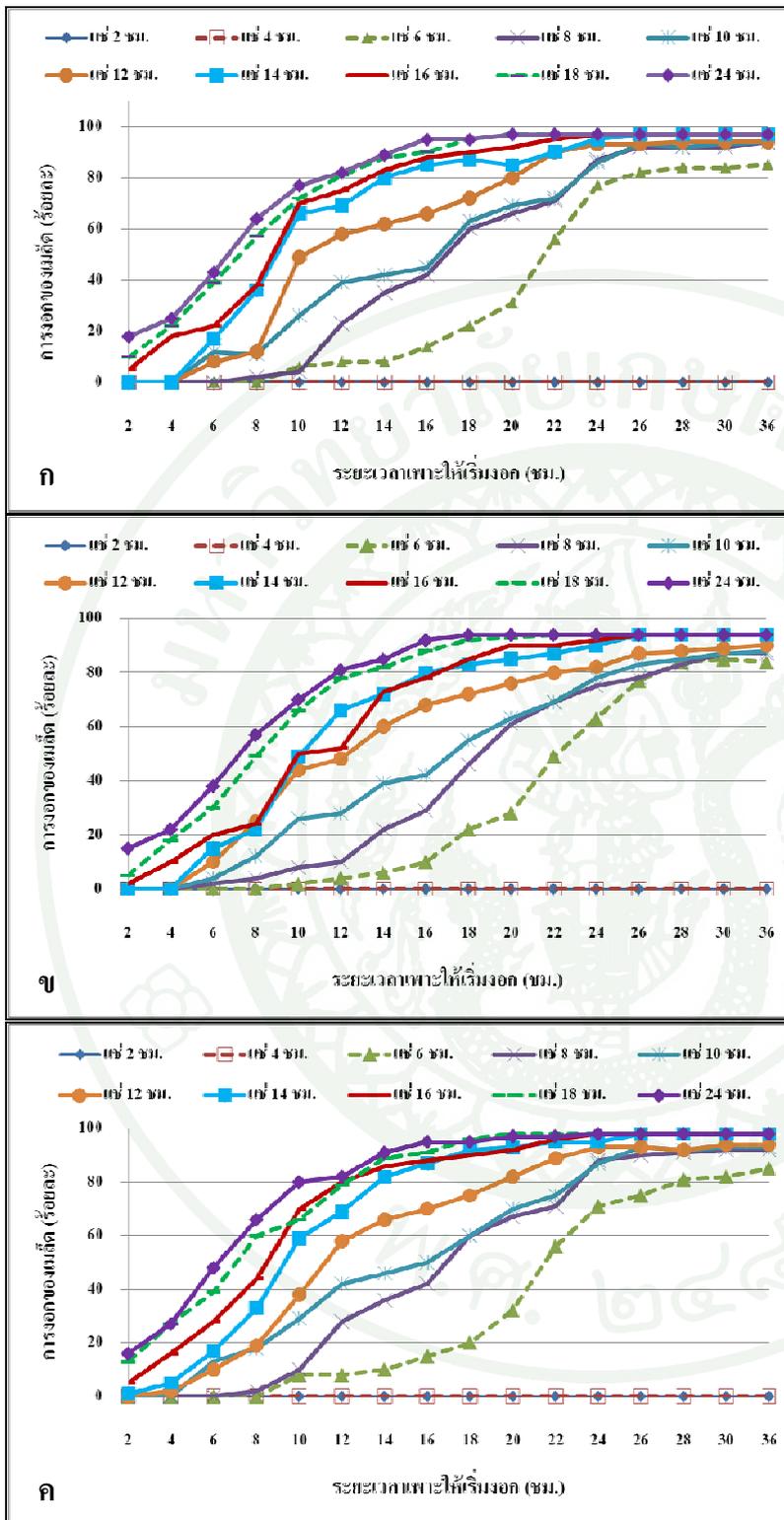




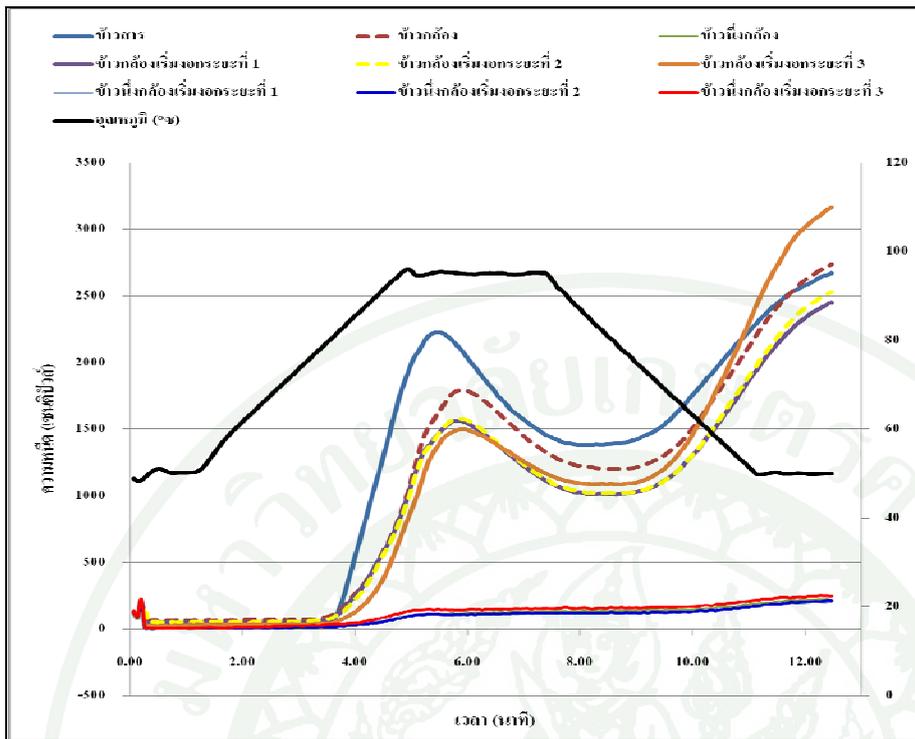
ภาพผนวกที่ ๑1 ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ของข้าวเปลือกทั้ง 3 พันธุ์ หลังแช่น้ำที่ 30°C เป็นเวลา 0-36 ชั่วโมง



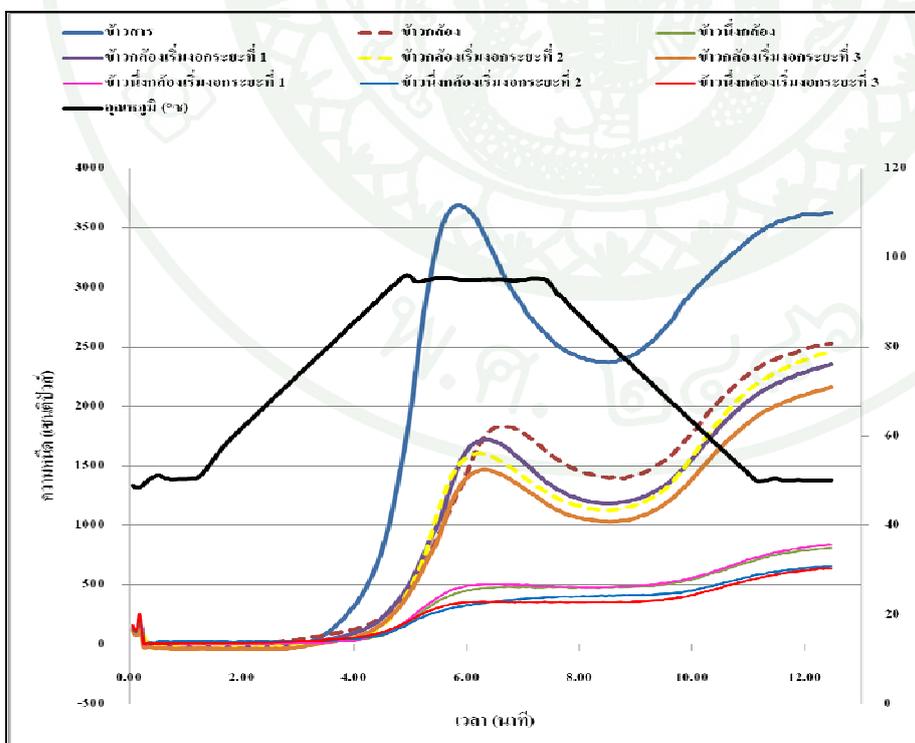
ภาพผนวกที่ ๑2 ปริมาณความชื้น (ร้อยละ) ของข้าวเปลือก 3 พันธุ์ หลังแช่น้ำที่ 30°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 14-28 ชั่วโมง



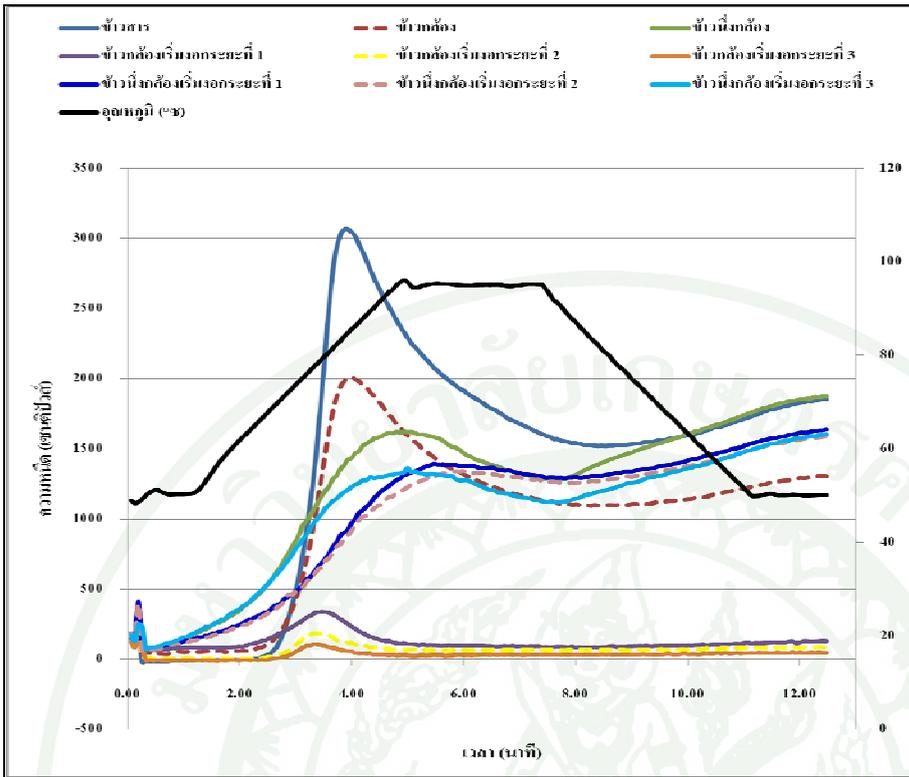
ภาพผนวกที่ ๓ ร้อยละการงอกของเมล็ดข้าวเปลือก 3 พันธุ์; ก) สุพรรณบุรี 1, ข) สีนเหล็ก และ ค) กข6
 เมื่อแช่น้ำที่ 30 °ซ เป็นเวลา 2-24 ชั่วโมง แล้วนำไปเพาะให้เริ่มงอกที่ 30 °ซ ความชื้น
 สัมพัทธ์ร้อยละ 85 เป็นเวลา 2-36 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ ๑๔ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวสุพรรณบุรี 1



ภาพผนวกที่ ๑๕ การเปลี่ยนแปลงความชื้นของข้าวสินเหล็ก



ภาพผนวกที่ ๑๖ การเปลี่ยนแปลงความหนักของข้าวหกข

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวกนกกาญจน์ ปานจันทร์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	2 เมษายน 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดสุโขทัย
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีการอาหาร) สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร สำนักวิชาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	เข้าร่วมเสนอผลงานภาคโปสเตอร์ในการประชุมทางวิชาการ “ Food Innovation Asia Conference 2009 “ ที่กรุงเทพมหานคร ระหว่างวันที่ 18-19 มิถุนายน 2552
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับเงินช่วยวิจัยบางส่วนจากโครงการบริการวิชาการของคณะอุตสาหกรรมเกษตร และ โครงการวิจัยทุนสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)