



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรการอาหาร)

ปริญญา

วิทยาศาสตรการอาหาร

วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีการอาหาร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร

Optimization of Expanded Snack Production from Pre-Germinated Brown Rice Flour  
Mixed with Herbs

นามผู้วิจัย นายนิรันดร จันทร์ลาด

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( อาจารย์สิริรัช ส่งเสริมพงษ์, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ศาสตราจารย์อรอนงค์ นัยวิกุล, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์จุฬาลักษณ์ จารุณูช, วท.ม. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรรณิ จิรภาคย์กุล, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร

Optimization of Expanded Snack Production from Pre-Germinated Brown Rice Flour

Mixed with Herbs

โดย

นายนิรันดร จันทร์ลาด

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรจารย์การอาหาร)

พ.ศ. 2555

นิรันดร จันทร์ลาด 2555: สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม  
สมุนไพรมะขาม วิทยาลัยเกษตรศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การอาหาร) สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร  
ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
อาจารย์สิริชัย ส่งเสริมพงษ์, Ph.D. 171 หน้า

การเพิ่มมูลค่าข้าวของไทยโดยการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพรมะขาม  
เคยมีการศึกษามาก่อน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าว  
เจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 และหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจาก  
แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก วางแผนการทดลองแบบ Central composite design (CCD) โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง  
(RSM) ในการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกในห้องปฏิบัติการ โดยการแช่ข้าวกล้องในน้ำที่อุณหภูมิ 17.9 - 30 °ซ เป็น  
เวลา 19 - 53 ชั่วโมง พบว่า โปรตีน เถ้า น้ำตาลรีดิวซ์ และกรดแกมมา-เอมิโนบิวทีริก(กาบา) เพิ่มขึ้นทั้งในข้าว  
เจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 โดยพบสารกาบาสูงสุดที่ 18.58 และ 40.61 มก/ 100 ก  
น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ คุณสมบัติด้านความหนืดลดลงเป็นอย่างมากทั้งในข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ  
ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 เมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ นอกจากนี้ ได้ทดลองผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกโดยใช้  
เครื่องเพาะข้าวงอกต้นแบบ ที่อุณหภูมิ 25 °ซ นาน 48 ชั่วโมง พบว่า โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบ  
ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ส่วนน้ำตาลรีดิวซ์และสารกาบาเพิ่มขึ้น ( $P \leq 0.01$ ) ในข้าวเจ้าพันธุ์ขาว  
ดอกมะลิ 105 ปริมาณโปรตีน และเถ้า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) ไขมัน ลดลง และเส้นใยหยาบ  
( $P \leq 0.05$ ) น้ำตาลรีดิวซ์และสารกาบาเพิ่มขึ้น ( $P \leq 0.01$ ) ในข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 และพบว่า สารกาบาใน ข้าว  
กล้องเริ่มงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ กข 10 มีค่า 17.53 และ 122.51 มก/100 ก น้ำหนักแห้ง เพิ่มขึ้น 7.1 และ  
60 เท่า ตามลำดับ ต่อจากนั้นนำข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผลิตจากเครื่องเพาะข้าวงอกต้นแบบ มาผลิตขนมกรอบพอง  
ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ โดยศึกษาผลของความชื้นวัตถุดิบ (ร้อยละ 15.6 - 22.3) ความเร็วรอบสกรู  
(264 - 434 rpm) และปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 (ร้อยละ 0 - 63.6) พบว่า ความชื้น และปริมาณแป้ง  
ข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ (อัตราการพองตัว, ความหนาแน่น, WAI และ WSI)  
เนื้อสัมผัส (ความแข็ง ความเปราะ และความเหนียว) และปริมาณสารกาบา ส่วนความชื้นและความเร็วรอบสกรู  
ไม่มีผลต่อปริมาณสารกาบา ( $P > 0.05$ ) แผนภาพทับซ้อน แสดงสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพอง  
คือ ความชื้นร้อยละ 15- 18 ความเร็วรอบสกรู 360 - 434 rpm และปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ร้อยละ  
49-57 ทำการผลิตซ้ำเพื่อทดสอบสมการ พบว่า ปริมาณสารกาบาที่ได้จากค่าการทำนายกับค่าจากการทดลอง  
ไม่แตกต่างกัน ( $P > 0.01$ ) โดยขนมกรอบพองมีสารกาบา 59.78 มก/ 100 ก น้ำหนักแห้ง เมื่อผสมสมุนไพรมะขาม  
คือ อบเชย และขมิ้น ที่ร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 ต่อน้ำหนักแป้ง พบว่า ไม่มีความแตกต่างทางคุณสมบัติ  
ทางกายภาพ ( $P > 0.05$ ) แต่ส่งผลต่อค่าความแข็ง สมบัติด้านสี และการยอมรับทางประสาทสัมผัส ( $P \leq 0.05$ )  
ขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพรมะขามไปด้วยสารกาบา ซึ่งมีประโยชน์ต่อร่างกายและ  
ระบบประสาท สามารถนำไปผลิตในเชิงพาณิชย์ เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ให้ผู้บริโภค

Nirandorn Chanlat 2012: Optimization of Expanded Snack Production from Pre-Germinated Brown Rice Flour Mixed with Herbs. Master of Science (Food Science), Major Field: Food Science, Department of Food Science and Technology. Thesis Advisor: Mr. Sirichai Songsermpong, Ph.D. 171 pages.

Value addition of Thai rice by production of expanded snack from pre-germinated brown rice (PGBR) mixed with herbs has not been studied. The aim of this research was to study optimal conditions for production of PGBR from KDML 105 (low amylose rice) and RD 10 (waxy rice) and to produce expanded snack by twin-screw extruder. Central composite design (CCD) and Response surface methodology (RSM) was used to optimize the process. In a laboratory scale, PGBR were produced by soaking in water to study the effect of temperature (17.9 -30 °C) and time (19 -53 h) on the chemical compositions and pasting properties of PGBR. The result showed that, crude protein, crude fat, ash, reducing sugar and gamma-aminobutyric acid (GABA) contents were higher than brown rice (control) in both varieties, GABA content of PGBR-KDML 105 and PGBR-RD 10 was 18.58 and 40.61 mg/100 g db, respectively, pasting properties of both PGBR decreased significantly when compared with control. In addition, PGBR was produced from a pilot scale tank at 25 °C for 48 h, the results showed that crude protein, crude fat and crude fiber did not show significant difference ( $P > 0.05$ ) reducing sugar and GABA contents increased ( $P \leq 0.01$ ) in PGBR-KDML 105, crude protein and ash did not show significant difference ( $P > 0.05$ ) crude fat decreased and crude fiber increased ( $P \leq 0.05$ ) reducing sugar and GABA contents increased ( $P \leq 0.01$ ) in PGBR-RD 10 and GABA content in PGBR-KDML 105 and PGBR-RD 10 was 17.53 and 122.51 mg/100 g db higher than control 7.1 and 60 times, respectively. Then, PGBR from the pilot scale tank was used to produce direct expanded snack with 3 factors, feed moisture (15.6 - 22.3 %) screw speed (264 - 343 rpm) and PGBR-RD 10 ratio (0 - 63.6 %). The results showed feed moisture and PGBR-RD 10 ratio had affected on physical (expansion, density, WAI and WSI) and textural properties (hardness, brittleness and toughness) and GABA content. Feed moisture and screw speed did not affected on GABA content ( $P > 0.05$ ). Overlaid plot for optimal condition of expanded snack was feed moisture between 15- 18%, screw speed between 360- 434 rpm and PGBR-RD 10 ratio between 49-57%. Reproduction for verification of the model, the result showed no significance in predictive and experimental value ( $P > 0.01$ ). GABA in expanded snack was 59.78 mg/100 g db. The last objective was to study the effect of cinnamon and turmeric powder (0.2 0.4 and 0.6 %w/w). The result showed that expanded snack with cinnamon and turmeric powder did not affected on physical properties ( $P > 0.05$ ) but affected on hardness, color properties and sensory scores of expanded snack ( $P \leq 0.05$ ). Therefore, expanded snack from PGBR mixed with herb is a functional food with high GABA, which benefit to brain health. This snack is the alternative choice for consumer and this knowledge can be used in the food industry.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณ ดร. สิริชัย ส่งเสริมพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่สนับสนุนให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสศึกษาต่อในระดับปริญญาโท และให้ความรู้ในการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.อรอนงค์ นัยวิกุล และอาจารย์จุฬาลักษณ์ จารุณข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำและชี้แนะด้วยความกรุณาเสมอมา ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สงวนศรี เจริญเหรียญ ประธานในการสอบ และรองศาสตราจารย์ ดร. สุคนธ์ชื่น ศรีงาม ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการตีพิมพ์ผลงานวิทยานิพนธ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องเอกซเรย์เตอร์แบบสกรูว์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณคุณครู-อาจารย์ทุกท่าน ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอบคุณและขอบใจ ในมิตรภาพของ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ สาขาวิศวกรรมอาหาร ที่เป็นกำลังใจ และช่วยเหลือระหว่างเรียนและทำวิจัยด้วยดีเสมอมา รวมไปถึงเพื่อนสาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร

และที่สำคัญที่สุด กราบขอขอบคุณ คุณปู่ คุณพ่อ และคุณแม่ ที่กรุณาเลี้ยงดูและอดทนกับลูกคนนี้

ผลดีอันเกิดจากการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่บุพการีและคุณครูผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน หากมีข้อบกพร่องประการใดข้าพเจ้าน้อมรับแต่เพียงผู้เดียว

นิรันดร จันทร์ลาด

กันยายน 2555

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	46
ผลและวิจารณ์	59
สรุปและข้อเสนอแนะ	121
สรุป	121
ข้อเสนอแนะ	123
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	124
ภาคผนวก	138
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกและขนมกรอบพอง	139
ภาคผนวก ข การตรวจสอบคุณสมบัติแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกและขนมกรอบพอง	143
ภาคผนวก ค การประเมินทางประสาทสัมผัส	152
ภาคผนวก ง ข้อมูลจากการทดลอง	155
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ	159
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	171

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณแอมิโลสในข้าวไทยพันธุ์ต่าง ๆ	5
2	องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวสาร และรำข้าว	8
3	ปริมาณสารกาบาในข้าวไทย 14 สายพันธุ์	11
4	ผลของระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ Koshihikari	14
5	ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผลิตจากข้าวกล้องและข้าวเปลือกที่เวลาต่างกัน	15
6	ผลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลงกาบา และกลูตาเมตของข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105	16
7	ผลของ pH และระยะเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ กข 6	17
8	ผลของวิธีการเพาะต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และสารกาบา	20
9	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งต่อปริมาณสารกาบา	21
10	ผลของไอน้ำและเอทานอลต่อการเปลี่ยนแปลงสารกาบาและปริมาณจุลินทรีย์	21
11	องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเปลือกงอกจากข้าวเกาหลี 4 สายพันธุ์	24
12	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวกล้อง และข้าวกล้องเริ่มงอก จากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6	25
13	ประโยชน์ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่อร่างกาย	26
14	ปัจจัยการทดลองตามแผนการทดลอง CCD แบบ 2 ปัจจัย	46
15	จำนวนสิ่งทดลองตามแผนการทดลอง CCD แบบ 2 ปัจจัย	47
16	ปัจจัยการศึกษาตามแผนการทดลอง CCD แบบ 3 ปัจจัย	52
17	จำนวนสิ่งทดลองตามแผนการทดลอง CCD แบบ 3 ปัจจัย	52
18	องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105	60
19	สมการผลตอบแทนขององค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105	61
20	องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10	66

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
21	สมการผลตอบแทนขององค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10	67
22	สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105	72
23	สมการผลตอบแทนของสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105	73
24	สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10	78
25	สมการผลตอบแทนของสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10	79
26	องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องและข้าวกล้องเริ่มงอกจากเครื่องเพาะข้าวงอกต้นแบบ	84
27	สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผลิตจากเครื่องเพาะข้าวงอกต้นแบบ	85
28	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม	86
29	สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม	87
30	ปริมาณสารกาบาจากการทดลองและค่าการทำนาย	92
31	คุณสมบัติทางกายภาพของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	93
32	สมการผลตอบแทนของสารกาบา และคุณสมบัติทางกายภาพ	94
33	ค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและผลตอบแทนของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม	95
34	ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	104
35	สมการผลตอบแทนของลักษณะเนื้อสัมผัส	105
36	การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	111
37	ค่าสหสัมพันธ์ของการประเมินทางประสาทสัมผัส และลักษณะทางกายภาพของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	112
38	ค่าจากการทดลองและการทำนายของสารกาบาภายใต้สภาวะที่เหมาะสม	114

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
39	การประเมินลักษณะทางกายภาพของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร	116
40	การประเมินลักษณะทางเนื้อสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร	117
41	ค่าสี $L^*$ $a^*$ $b^*$ และ $\Delta E$ ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร	118
42	การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมอบเชย	119
43	การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมขมิ้น	120
<b>ตารางผนวกที่</b>		
ข1	การเตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐาน	148
ค1	การจัดตัวอย่างสำหรับทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ BIB	153
ง1	สภาวะที่บันทึกจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ระหว่างการผลิต	156
จ1	สัมประสิทธิ์สัมภาระผลตอบแทนขององค์ประกอบทางเคมีจากข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวขาวดอกมะลิ 105	160
จ2	สัมประสิทธิ์สัมภาระผลตอบแทนขององค์ประกอบทางเคมีจากข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียว กข 10	160
จ3	สัมประสิทธิ์สัมภาระผลตอบแทนของสมบัติด้านความหนืดจากข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวขาวดอกมะลิ 105	161
จ4	สัมประสิทธิ์สัมภาระผลตอบแทนของสมบัติด้านความหนืดจากข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียว กข 10	161
จ5	สัมประสิทธิ์สัมภาระผลตอบแทนของสารกาบา และคุณสมบัติทางกายภาพ	162

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
จ6 สัมประสิทธิ์สัมพรรคภาพผลตอบแทนของลักษณะทางเนื้อสัมผัสของขนมกรอบ พอง	163
จ7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของลักษณะปรากฏ	164
จ8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของรสชาติ	164
จ9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของเนื้อสัมผัส	165
จ10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของความชอบโดยรวม	165
จ11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของสีในขนมกรอบพอง ผสมอบเชย	166
จ12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของกลิ่นในขนมกรอบพอง ผสมอบเชย	166
จ13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของรสชาติในขนมกรอบ พองผสมอบเชย	167
จ14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของเนื้อสัมผัสในขนมกรอบ พองผสมอบเชย	167
จ15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของความชอบโดยรวมใน ขนมกรอบพองผสมอบเชย	168
จ16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของสีในขนมกรอบ พองผสมขมิ้น	168
จ17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของกลิ่นในขนมกรอบ พองผสมขมิ้น	169
จ18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของรสชาติในขนมกรอบ พองผสมขมิ้น	169
จ19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของเนื้อสัมผัสในขนมกรอบ พองผสมขมิ้น	170
จ20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของความชอบโดยรวมใน ขนมกรอบพองผสมขมิ้น	170

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว	7
2	การเปลี่ยนแปลงของข้าวกล้องที่ผ่านการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง ตามลำดับ	9
3	การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและสารอาหารในช่วงระยะเวลาต่างๆ กันของเมล็ดข้าว	10
4	การเปลี่ยนแปลงของสารกาบา และกลูตาเมตของข้าวกล้องเริ่มงอกที่ระยะเวลาต่างๆ กัน	13
5	การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมิโนสของข้าวกล้องเริ่มงอก	23
6	โครงสร้างของกลูตาเมต (L-glutamate) และกาบา (GABA)	27
7	กลไกการสังเคราะห์กาบา (GABA Shunt)	28
8	ความสัมพันธ์ของยีน (Gene) กับการสังเคราะห์สารกาบาและ 1-Pyrroline	29
9	ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์	32
10	กลไกการพองตัวของเอกซ์ทรูเดต	38
11	Surface plot ของพื้นผิวผลตอบสนอง	39
12	แผนการทดลองแบบ CCD สำหรับ 2 และ 3 ปัจจัย	41
13	วิธีการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกและแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	48
14	วิธีการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกด้วยเครื่องเพาะข้าวงอกต้นแบบ	50
15	การผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	53
16	Surface plot และ Contour plot ของปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)	63
17	Surface plot และ Contour plot ของปริมาณไขมันในข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)	64
18	Surface plot และ Contour plot ของปริมาณเถ้าในข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)	64

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	Surface plot และ contour plot ของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)	65
20	Surface plot และ Contour plot ของปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)	65
21	Surface plot และ Contour plot ของปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องเริ่มงอก (กข 10)	69
22	Surface plot และ Contour plot ของปริมาณไขมันในข้าวกล้องเริ่มงอก (กข 10)	69
23	Surface plot และ Contour plot ของปริมาณเถ้าในข้าวกล้องเริ่มงอก (กข 10)	70
24	Surface plot และ Contour plot ของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในข้าวกล้องเริ่มงอก (กข 10)	70
25	Surface plot และ Contour plot ของปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอก (กข 10)	71
26	Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)	75
27	Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดต่ำสุด (Trough) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)	75
28	Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)	76
29	Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)	76
30	Surface plot และ Contour plot ของค่าเซตแบค (Setback) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)	77
31	Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (กข10)	80

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดต่ำสุด (Trough) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (กข10)	81
33	Surface plot และ contour plot ของค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (กข10)	81
34	Surface plot และ contour plot ของค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (กข10)	82
35	Surface plot และ contour plot ของค่าเซตแบค (Setback) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (กข10)	82
36	ลักษณะปรากฏของข้าวกล้องปกติและข้าวกล้องเริ่มงอกอบแห้ง ที่ผลิตจากเครื่องเพาะข้าวอกต้นแบบ	83
37	ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (ซ้าย) และลักษณะปรากฏ (ขวา) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	88
38	ความสัมพันธ์ของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 (PGBR-RD 10) ต่อ ปริมาณสารกาบาในขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	90
39	เปรียบเทียบปริมาณสารกาบาในขนมกรอบพอง(สีน้ำเงิน)และแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม (สีแดง)	91
40	Surface plots และ Contour plots ของอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	97
41	Surface plots และ Contour plots ของความหนาแน่น (Density) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	99
42	Surface plots และ Contour plots ของดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	101
43	Surface plots และ Contour plots ของดัชนีการละลายน้ำ (WSI) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	103
44	Surface plots และ Contour plots ของค่าความแข็ง (Hardness) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	106

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
45	Surface plots และ Contour plots ของค่าความเปราะ (Brittleness) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	108
46	Surface plots และ Contour plots ของค่าความเหนียว (Toughness) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	110
47	Overlaid contour plot ของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก	113
48	ลักษณะปรากฏของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมขมิ้น (บน) และอบเชย (ล่าง)	115
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ก1	เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์แบบสกรูคู่ รุ่น Herman Berstoff Laboratory, ZE 25x33D	140
ก2	เครื่องบดของแห้ง (Fitz mill)	140
ก3	เครื่องเคลือบแบบหม้อทรงแปดเหลี่ยม	141
ก4	เครื่องกะเทาะเปลือกข้าว	141
ก5	เครื่องคัดเมล็ดข้าว	142
ข1	กราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคส	149
ข2	กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมกรอบพอง	151
ค1	แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส	154
ง1	อัตราการป้อนน้ำ	157
ง2	อัตราการป้อนวัตถุดิบที่อัตราส่วนเป็น 100:0	157
ง3	อัตราการป้อนวัตถุดิบที่อัตราส่วนเป็น 90:10	157
ง4	อัตราการป้อนวัตถุดิบที่อัตราส่วนเป็น 70:30	158
ง5	อัตราการป้อนวัตถุดิบที่อัตราส่วนเป็น 50:50	158
ง6	อัตราการป้อนวัตถุดิบที่อัตราส่วนเป็น 36.4:63.6	158

## สถานะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร

### Optimization of Expanded Snack Production from Pre-Germinated Brown Rice

#### Flour Mixed with Herbs

##### คำนำ

ข้าวเป็นอาหารหลักของคนไทยและคนเอเชีย เป็นที่ทราบกันดีว่าการบริโภคข้าวกล้องหรือข้าวที่ไม่ผ่านการขัดสี ให้คุณค่าทางโภชนาการมากกว่าข้าวสารหรือข้าวขัดสี ข้าวกล้องต่างจากข้าวขาว คือมีชั้นของรำ (Rice bran) และคัพภะ (Germ) ติดอยู่ ซึ่งในชั้นของรำข้าว และคัพภะ เป็นแหล่งของใยอาหาร กรดไฟติก วิตามินบี และ วิตามินอี (Champagne *et al.*, 2004; อรอนงค์, 2550) ข้าวกล้องเริ่มงอก (Pre-germinated brown rice; PGBR) คือ เมล็ดข้าวกล้องที่มีคัพภะติด อยู่ นำมาแช่น้ำจนเริ่มงอก (Watanabe *et al.*, 2004; Ohtsubo *et al.*, 2005) โดย Saikusa *et al.* (1994a) พบ กรดแกมมา-แอมิโนบิวทิริก หรือกาบา ( $\gamma$ -Aminobutyric acid; GABA) เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อนำข้าวกล้องไปแช่น้ำที่อุณหภูมิ 40 °ซ นาน 8-24 ชั่วโมง ข้าวกล้องเริ่มงอก กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในประเทศไทย ในประเทศญี่ปุ่นได้มีการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกทางการค้า ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995 โดยการแช่ข้าวกล้องในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 30-40 °ซ เป็นเวลาอย่างน้อย 20 ชั่วโมง (Kayahara *et al.*, 2001) จะสังเกตเห็นการงอกของคัพภะประมาณ 0.5 – 1.0 มิลลิเมตร (Ito and Ishikawa, 2004) ระหว่างการงอก กิจกรรมของเอนไซม์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของเมล็ดข้าว ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของ น้ำตาล กรดแอมิโนอิสระ ใยอาหาร กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic acid) แกมมา-ออริซานอล ( $\gamma$ -Oryzanol) โทโคไตรอินอล (Tocotrienol) อินโนซิทอล (Inositol) แมกนีเซียม แคลเซียม สังกะสี และ สารกาบา (Kayahara *et al.* 2001; Ohtsubo *et al.*, 2005; Komatsuzaki *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2007) นอกจากนี้ยังทำให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (Charoenthaikij *et al.*, 2009; Jiamyangyuen and Ooraikul, 2008) และช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้านการรับประทาน (Ito and Ishikawa, 2004; Jiamyangyuen and Ooraikul, 2008)

สารกาบา (GABA) เป็นกรดแอมิโนที่ไม่ใช่โปรตีน (Non-protein amino acid) ประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอม (Bown and shelp, 1997) ทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาทประเภทยับยั้งในระบบประสาทส่วนกลาง (Inhibitory neurotransmitter) สารกาบาเกิดจากกระบวนการ

Decarboxylation ของกรดกลูตามิก (Glutamic acid) โดยเอนไซม์ Glutamate decarboxylase (Bown and Shelp, 1997; Shelp *et al.*, 1999) การบริโภคข้าวกล้องเริ่มงอกส่งผลดีต่อสุขภาพหลายประการ Oh and Oh (2004) รายงานการได้รับสารกาบาติดต่อกันนาน 8 สัปดาห์ ช่วยลดความดันโลหิต และทำให้ออนหลับดีขึ้น รวมทั้งช่วยให้ร่างกายของผู้สูงอายุทำงานได้เป็นปกติ

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Extrusion cooking) สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายในด้านรูปร่าง เนื้อสัมผัส สี กลิ่น และรสชาติ (Harper, 1981; Riaz, 2000; Lusas and Rooney, 2001) ปัจจัยทางด้านกระบวนการและวัตถุดิบมีผลต่อคุณภาพของเอกซ์ทรูเดตที่ได้ (Choudhury and Gautam, 1999; Moraru and Kokini, 2003) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น รุ่งนภาและประชา (2538) และ พัชรา (2547) ศึกษาคุณสมบัติของเอกซ์ทรูเดตจากที่ผลิตข้าวเจ้าและข้าวเหนียว สุนันทาและ มาโนชญ์ (2546) ศึกษาการผลิตขนมเอกซ์ทรูเดตจากข้าวกล้อง และ Ohtsubo *et al.* (2005) ผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกและเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมยีสต์แห้ง

ปัจจุบันขนมขบเคี้ยว (Snacks) มีอัตราการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และมีมูลค่าทางการตลาดสูง กลุ่มผู้บริโภคส่วนใหญ่มักเป็นเด็กและวัยรุ่น เนื่องด้วยรูปลักษณะที่จูงใจ รสชาติและเนื้อสัมผัสที่ถูกใจผู้บริโภค (Ibanoglu *et al.*, 2006) วัตถุดิบหลักประกอบไปด้วยแป้ง น้ำตาล น้ำมัน พงชูรส และเกลือ ซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการน้อยและขาดสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ เนื่องจากปัจจุบันผู้บริโภคให้ความใส่ใจต่อสุขภาพมากขึ้นและต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการและดีต่อสุขภาพ (จุฬาลักษณ์, 2550)

สมุนไพรมีประโยชน์ต่อสุขภาพ ขมิ้น ใช้เป็นยาลดกรด ขับลม แก้ปวดท้อง ใช้เป็นยาช่วยให้เจริญอาหาร อบเชยใช้ปรุงเป็นยา หรือผสมในขนมหวานและเครื่องดื่ม ช่วยทำให้สดชื่น ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด (สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2548)

จากประโยชน์ที่ได้กล่าวมา จึงมีแนวคิดที่จะผลิตขนมกรอบพอง (Expanded snacks) โดยใช้ข้าวกล้องเริ่มงอกที่มีสารกาบาและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Extrusion cooking) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายในด้านรูปร่างและเนื้อสัมผัส นอกจากนี้ยังผสมสมุนไพรเพื่อเพิ่มคุณค่า และมีความหลากหลาย เป็นทางเลือกแก่ผู้บริโภค

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกในระดับห้องปฏิบัติการจากข้าวกล้องพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง และเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านเคมีและกายภาพกับข้าวกล้องปกติ
2. ศึกษาการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกในระดับนาร่องด้วยเครื่องเพาะข้าวงอกต้นแบบและเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านเคมี และกายภาพกับข้าวกล้องปกติ
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมจากข้าวกล้องพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และ ข้าวเหนียวกล้องพันธุ์ กข 10 ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง และตรวจสอบคุณสมบัติด้านเคมี กายภาพและประสาทสัมผัสของขนมกรอบพองที่ผลิตได้
4. ศึกษาการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร และการยอมรับทางประสาทสัมผัส

## การตรวจเอกสาร

### 1. ข้าว

ข้าว (Rice) หมายถึง พืชวงศ์หญ้าแกรมินีอี (Gramineae) สกุลออไรซา (Oryza) ข้าวเป็นอาหารที่มีผู้บริโภคมากถึง 2 ใน 3 ของประชากรโลก ส่วนใหญ่แล้วมักนำมาหุงต้มแล้วบริโภคเป็นอาหารหลักทั้งเมล็ด นอกจากนี้บางส่วนยังสามารถนำไปเป็นส่วนประกอบในกระบวนการผลิตอาหารได้ด้วย สำหรับปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้ข้าวในส่วนผสมของอาหารคือลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร ความนิ่มของผู้บริโภค ราคาและปริมาณวัตถุดิบที่มีเพียงพอในการใช้ เนื่องจากข้าวมีคุณสมบัติด้านองค์ประกอบที่เหมาะสมคือ มีโซเดียมน้อย ไขมันต่ำ ไม่มีคอเลสเตอรอล เก็บรักษาได้นาน และไม่มีสารที่ทำให้เกิดการแพ้ (Champagne *et al.*, 2004; อรอนงค์, 2550) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย

ข้าวที่มนุษย์ปลูกเพื่อบริโภคมีเพียง 2 ชนิด คือ ข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima* Steud) และข้าวเอเชีย (*Oryza sativa* Linn) ซึ่งข้าวเอเชียแบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือ อินดิกา (Indica) จาปอนิกา (Japonica) และจาวานิกา (Javanica) ข้าวที่ปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นข้าวอินดิกาซึ่งมีเมล็ดยาว (อรอนงค์, 2550)

เมล็ดข้าวประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว เรียกว่า แกลบ (Hull or Husk) และส่วนเนื้อผล หรือ ผลแท้ (True fruit or Caryopsis grain) หรือข้าวกล้อง เมื่อนำข้าวเปลือกมากะเทาะจะได้เป็นแกลบประมาณร้อยละ 20 และข้าวกล้องร้อยละ 80 เมื่อนำข้าวกล้องไปขัดสีจะได้รำข้าว (Rice bran) ประมาณร้อยละ 9 คัพพะ (Embryo) ร้อยละ 1 และเป็นข้าวขัดขาว (Polished rice) ประมาณร้อยละ 70 (Juliano *et al.*, 1972 ; อรอนงค์, 2550)

ในประเทศไทยมีการเพาะปลูกข้าวพันธุ์ต่าง ๆ โดยสามารถจำแนกกลุ่มของข้าวได้หลายประเภท เช่น จำแนกตามฤดูกาลปลูก (ข้าวนาปรัง, ข้าวนาปี) จำแนกตามปริมาณแอมิโลส (ข้าวเจ้า, ข้าวเหนียว) ซึ่งปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกตินเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และคุณสมบัติหุงต้มและรับประทานแตกต่างกัน ข้าวที่มีแอมิโลสสูง (ข้าวเจ้า) จะดูดน้ำและขยายปริมาตรในระหว่างการหุงต้มได้สูง ได้ลักษณะข้าวสุกที่แข็ง และร่วน ส่วนข้าวที่แอมิโลเพกตินสูง (ข้าวเหนียว) จะดูดน้ำและขยายตัวได้น้อยกว่าข้าวเจ้า (งามชื่น, 2546) สำหรับข้าวที่ปลูกในประเทศไทยสามารถแบ่งกลุ่มได้ดังตารางที่ 1

## ตารางที่ 1 ปริมาณแอมิโลสในข้าวไทยพันธุ์ต่าง ๆ

ชนิดข้าว	ปริมาณแอมิโลส (ร้อยละ)	สายพันธุ์
ข้าวเหนียว	0-3	กข 6 กข 8 กข 10 เหนียวสันป่าตอง หางยี 71 ชีวแม่จัน
ข้าวเจ้า	10-19	กข 15 กข 21 ขาวดอกมะลิ 105 ปทุมธานี 1 หอมสุวรรณบุรี พิษณุโลก 60-1
	20-25	กข 7 กข 17 กข 25 สุพรรณบุรี 2 สุพรรณบุรี 60 ขาวปากหม้อ 148
	26-35	กข 1 กข 3 กข 5 กข 9 กข 11 กข 13 กข 23 กข 27 ชัยนาท 1 เหลืองประทิว 123 สุพรรณบุรี 1 สุพรรณบุรี 90 ปิ่นแก้ว 56 ปทุมธานี 60 ขาวตาแห้ง 17 เลี้ยวพัทลุง

ที่มา: งามชื่น (2546)

## 2. โครงสร้างของเมล็ดข้าวกล้อง

ข้าวกล้อง (Brown rice, Dehusked rice, Caryopsis grain) หมายถึง ข้าวที่ได้จากการกะเทาะเปลือก (แกลบ) ออกโดยยังมีคัพภะและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าวติดอยู่ (ภาพที่ 1) สีของข้าวกล้องเป็นสีที่เยื่อหุ้มผล (Pericarp) ข้าวกล้องมีสีต่างๆ กัน ตั้งแต่ขาว แดง น้ำตาลเข้ม น้ำตาลเทา และมีวงถึงดำ ซึ่งส่วนนี้จะเป็นส่วนที่มีคุณค่าทางอาหารและเป็นประโยชน์ต่อร่างกาย โครงสร้างของเมล็ดข้าวกล้องประกอบไปด้วย (Juliano *et al.*, 1972; Champagne *et al.*, 2004; อรอนงค์, 2550)

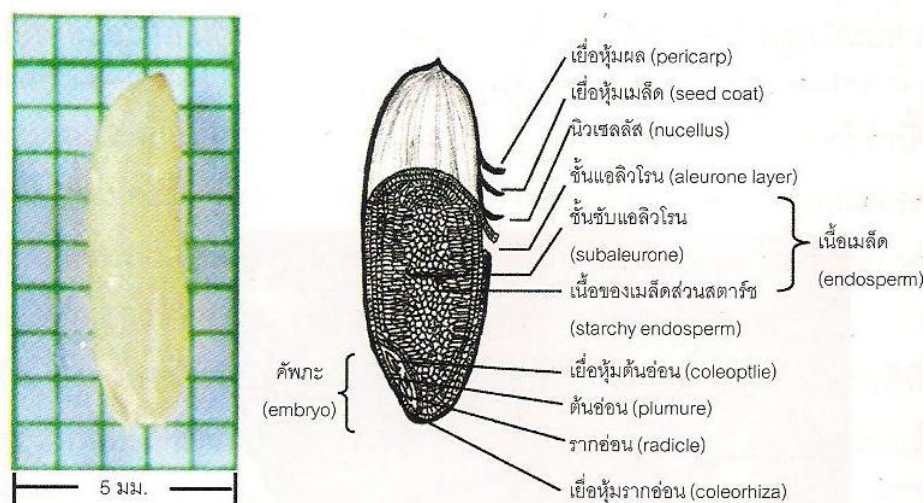
2.1 เยื่อหุ้มผล (Pericarp, Fruit seed) เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอก มีลักษณะเป็นเซลล์ที่มีผนังเซลล์เส้นใย 6 ชั้น มีความหนาประมาณ 10 ไมครอน ภายในเยื่อหุ้มผล มีรงควัตถุปนอยู่ ทำให้ข้าวกล้องมีสีต่างๆ นอกจากนี้ยังมี โปรตีน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบสำคัญ ในชั้นเยื่อหุ้มผลนี้แบ่งย่อยได้เป็น 3 ชั้นย่อย คือ เอพิการ์พ (Epicarp) หรือเยื่อที่อยู่นอกสุด เมโซคาร์พ (Mesocarp) เป็นเยื่อชั้นกลาง และเอนโดคาร์พ (Endocarp) เป็นเยื่อชั้นใน

2.2 เยื่อหุ้มเมล็ด (Seed coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้ามา ประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น รูปยาวเรียงตามขวาง และมีผนังบางกั้น ภายในเซลล์มีลิพิด และรงควัตถุ เช่นเดียวกับเยื่อหุ้มผล และมีนิวเคลียส (Nucellus) อยู่ติดกับเยื่อหุ้มเมล็ด แต่ไม่ติดแน่น จึงแยกออกจากกันได้ง่าย มีความหนาประมาณ 0.8-2.5 ไมครอน

2.3 เยื่อชั้นแอลิวโรน (Aleurone layer) ประกอบด้วยเซลล์ 1-7 ชั้น แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ เซลล์ส่วนที่ห่อหุ้มรอบเนื้อของเมล็ดจะมีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ และมีไซโทพลาซึม (Cytoplasm) อยู่หนาแน่น ในเซลล์ยังมีกลุ่มของโปรตีนที่มีรูปร่าง (Protein body) ไขมัน (Lipid body) และสารอื่น ๆ เช่น นิวเคลียส ไมโครบอดี (Microbodies) ไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) พลาสทิด (Plastids) เป็นต้น ส่วนเซลล์แอลิวโรนที่ห่อหุ้มคัพภะจะบาง มีไซโทพลาซึมน้อย รูปร่างยาว มีกลุ่มไขมันและโปรตีนน้อย มีเวสิเคิล (Vesicles) มาก เป็นต้น ส่วนผนังเซลล์มีโปรตีนเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสประกอบอยู่

2.4 คัพภะ หรือเชื้อชีวิต (Embryo) เป็นแหล่งสะสมอาหารที่อุดมด้วยโปรตีนและลิพิด โดยในส่วนของชั้นแอลิวโรนและคัพภะนี้ ลิพิดจะอยู่ในลักษณะทรงกลม (Spherosome) หรือหยดน้ำมัน (Oil droplet) ที่มีขนาด 0.1-1 ไมครอน คัพภะจะอยู่ที่โคนเมล็ดด้านเปลือกใหญ่ ส่วนท้องของเมล็ดมีส่วนประกอบเป็นรากอ่อน ต้นอ่อน เยื่อหุ้มรากอ่อน เยื่อหุ้มต้นอ่อน ท่อน้ำท่ออาหาร และใบเลี้ยง ซึ่งเป็นใบเลี้ยงเดี่ยว คัพภะเป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของต้นอ่อนจึงอุดมไปด้วยโปรตีน และลิพิดในส่วนต่าง ๆ

2.5 เนื้อเมล็ดหรือเนื้อข้าว (Starchy endosperm) มีมากที่สุด ในเมล็ดข้าวประมาณร้อยละ 80 ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด อยู่ถัดจากชั้นแอลิวโรน ในส่วนของเนื้อเมล็ด แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกคือ ชั้นซับแอลิวโรน แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นซับแอลิวโรน (Subaleurone layer) เป็นเซลล์ 2 ชั้นบางๆ ที่หุ้มเนื้อในเมล็ดอีกทีหนึ่งซึ่งมีกลุ่มโปรตีนบอดี (Protein body) อยู่ 3 ชนิด คือ โปรตีนที่มีลักษณะกลมใหญ่ โปรตีนที่มีลักษณะกลมเล็ก และโปรตีนที่มีลักษณะ เป็นผลึก ส่วนที่สองเป็นสตาร์ชในเนื้อของเมล็ด (Starchy endosperm) ประกอบด้วยโปรตีนกลมใหญ่เท่านั้นแทรกอยู่ในระหว่างเม็ดสตาร์ช (Starch granules) มีขนาด 3-9 ไมครอน ที่มีอยู่มากอัดแน่นรวมเป็นกลุ่มเม็ดสตาร์ช (Compound granules) อยู่ภายในเซลล์พาราเอนไคมา (Parenchyma cells)



ข้าวกล้อง

### ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว

ที่มา: อรอนงค์ (2550)

### 3. องค์ประกอบทางเคมีและคุณค่าทางโภชนาการของข้าว

ข้าวมีคุณค่าและประโยชน์มากกว่าธัญชาติชนิดอื่น เนื่องจากโปรตีนในข้าวไม่ก่อให้เกิดการแพ้ (Kasarda, 2001)

ข้าวกล้อง มีคุณค่าทางโภชนาการมากกว่าข้าวขาวหรือข้าวขัดสี ยกเว้น คาร์โบไฮเดรต ในข้าวกล้องมีโทอามีน และไขมัน มากกว่าข้าวขาวประมาณ 5 เท่า มีใยอาหาร ในอาซีน ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม เหล็ก โซเดียม และไรโบฟลาวิน มากกว่าข้าวขาว ประมาณ 2-3 เท่า โดยส่วนใหญ่จะอยู่ที่ชั้นของรำ (Bran layers) นอกจากนี้ในชั้นของร่ายังมี Hypocholesterolemic protein ซึ่งมีคุณสมบัติลดโคเลสเตอรอล (Cholesterol-lowering activity) (Marshall and Wadsworth, 1994)

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวจะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ สิ่งแวดล้อม และกระบวนการแปรรูป (Champagne *et al.*, 2004; อรอนงค์, 2550) ดังแสดงในตารางที่ 2

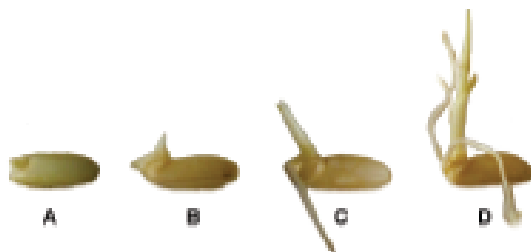
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวสาร และรำข้าว

องค์ประกอบ	ชนิดของข้าว			
	ข้าวเปลือก	ข้าวกล้อง	ข้าวสาร	รำข้าว
โปรตีน (% , N x 5.95)	5.8-7.7	7.1-8.3	6.3-7.1	11.3-14.9
ไขมัน (%)	1.5-2.3	1.6-2.8	0.3-0.5	15.0-19.7
เส้นใยหยาบ (%)	7.2-10.4	0.6-1.0	0.2-0.5	7.0-11.4
เถ้า (%)	2.9-5.2	1.0-1.5	0.3-0.8	6.6-9.9
คาร์โบไฮเดรต (%)	64-73	73-87	77-89	34-62
สตาร์ช (%)	53.4	66.4	77.6	13.8
น้ำตาลอิสระ (%)	0.5-1.2	0.7-1.3	0.22-0.45	5.5-6.9
แคลเซียม (mg/g)	0.1-0.8	0.1-0.5	0.1-0.3	0.3-1.2
แมกนีเซียม (mg/g)	0.6-1.5	0.2-1.5	0.2-0.5	5-13
ฟอสฟอรัส (mg/g)	1.7-3.9	1.7-4.3	0.8-1.5	11-25
โปแตสเซียม (mg/g)	1.5-3.7	0.6-2.8	0.7-1.3	10-20
คลอรีน ( $\mu\text{g/g}$ )	500-800	210-560	200-300	66
ทองแดง ( $\mu\text{g/g}$ )	2-11	1-6	2-3	9-34
เหล็ก ( $\mu\text{g/g}$ )	14-60	2-52	2-28	86-430
แมงกานีส ( $\mu\text{g/g}$ )	17-94	2-36	6-17	95-230
โซเดียม ( $\mu\text{g/g}$ )	53-810	17-340	5-86	71-335
สังกะสี ( $\mu\text{g/g}$ )	1.7-31	6-28	6-23	43-285
เรตินอล ( $\mu\text{g/g}$ )	0-0.08	0-0.11	0-trace	0-3.6
ไทอามีน ( $\mu\text{g/g}$ )	2.6-3.3	2.9-6.1	0.2-1.1	12-24
ไรโบฟลาวิน ( $\mu\text{g/g}$ )	0.6-1.1	0.4-1.4	0.2-0.6	1.8-4.3
ไนอาซิน ( $\mu\text{g/g}$ )	29-56	35-53	13-24	267-499
ไพริดอกซิน ( $\mu\text{g/g}$ )	4-7	5-9	0.4-1.2	9-28
ไบโอติน ( $\mu\text{g/g}$ )	0.04-0.08	0.04-0.1	0.01-0.06	0.2-0.5
อินโนซิทอล ( $\mu\text{g/g}$ )	800	1,000	90-110	4,000-8,000
กรดโฟลิก ( $\mu\text{g/g}$ )	0.2-0.4	0.1-0.5	0.03-0.14	0.4-1.4
แอลฟา-โทโคฟีรอล ( $\mu\text{g/g}$ )	9-20	9-25	trace-3	26-130

ที่มา: Champagne *et al.* (2004)

#### 4. ข้าวกล้องเริ่มงอก

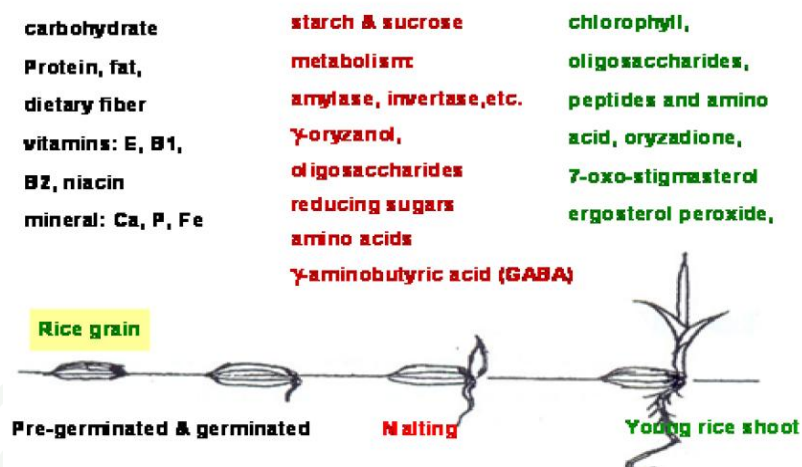
ข้าวกล้องเริ่มงอก (Pre-germinated brown rice; PGBR) หมายถึง เมล็ดข้าวกล้องที่ผ่านการแช่น้ำจนส่วนของคัพภะมีรากอ่อนงอกออกมา ความยาวประมาณ 0.5-1.0 มิลลิเมตร (Kayahara *et al.*, 2001; Watanabe *et al.*, 2004) การเปลี่ยนแปลงจะเริ่มขึ้นเมื่อ เมล็ดข้าวดูดซับน้ำ ซึ่งความชื้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมจะไปกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ (Hydrolytic enzymes) ทำให้สารอาหารที่เก็บสะสมไว้ในเมล็ดถูกย่อยสลายไปตามกระบวนการทางชีวเคมี ส่งผลให้คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ถูกย่อยให้มีโมเลกุลที่เล็กลง และยังมี的增加ขึ้นของใยอาหาร วิตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ รวมไปถึงสารที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive compounds) เช่น สารกาบา ( $\gamma$ -Aminobutyric acid: GABA), แกมมา-ออริซานอล ( $\gamma$ -Oryzanol), โทโคฟีรอล (Tocopherol), โทโคไตรอีนอล (Tocotrienol), อินโนซิทอล (Inositol), กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic acid) และสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) (Kayahara *et al.*, 2001; Varanyanond *et al.*, 2005 ; Komatsuzaki *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2007; Banchuen *et al.*, 2010; Moongngarm and Saetung, 2010) รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีกายภาพ และคุณสมบัติด้านการหุงต้ม (Cooking quality) (Choi *et al.*, 2006; Jiamyangyuen and Oraikul, 2008)



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของข้าวกล้องที่ผ่านการแช่น้ำเป็นระยะเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมงตามลำดับ

ที่มา: Shu *et al.* (2008)

เมื่อต้นข้าวเจริญเติบโตขึ้น จะมีการสร้างสาร ที่เรียกว่า Secondary metabolite ขึ้นมาในช่วงของระยะเวลาการเจริญเติบโตที่ต่างกัน ซึ่งสารเหล่านี้มีความสำคัญในการดำรงชีวิตของต้นข้าว และเป็นกลไกทางธรรมชาติที่ป้องกันการรบกวน (Defense mechanism) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในระยะต่างๆ กัน แสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและสารอาหารในช่วงระยะเวลาต่างๆ กันของเมล็ดข้าว

ที่มา: จุไรทิพย์ (2549)

ในปัจจุบันได้มีการนำสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ได้จากข้าวกล้องเริ่มงอก นำมาประยุกต์ใช้ในทางเภสัชกรรม และเสริมในผลิตภัณฑ์อาหาร นอกจากจะช่วยเสริมด้านโภชนาการและการต้านอนุมูลอิสระแล้ว แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกยังนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ขนมขบเคี้ยว (Ohtsubo *et al.*, 2005) ขนมปัง (Watanabe *et al.*, 2004; Charoenthaikij *et al.*, 2010), เครื่องดื่มชนิดผงสำหรับผู้สูงอายุ (Sutiniem *et al.*, 2008) ไอ้กึ่งสำเร็จรูป (สุภาณี และคณะ, 2551) รวมไปถึง เต้า กูกี้ โดนัต และเบอร์เกอร์ (Ito and Ishikawa, 2004)

## 5. ปัจจัยการผลิตที่มีผลต่อปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอก

การผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกสามารถทำได้ง่ายโดยการนำข้าวกล้องมาแช่น้ำ แต่การควบคุมคุณภาพของข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผลิตได้นั้นทำได้ยาก เนื่องจากมีปัจจัยที่สำคัญที่ต้องคำนึงถึงอยู่หลายประการ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ปัจจัยหลัก คือ ปัจจัยด้านวัตถุดิบ และปัจจัยด้านการผลิต

### 5.1 ปัจจัยด้านวัตถุดิบ

### 5.1.1 สายพันธุ์

Tungtrakul *et al.* (2006) ได้ศึกษาปริมาณสารกาบาในคัพภะของข้าวไทยจำนวน 14 สายพันธุ์ โดยนำเมล็ดข้าวกล้องมาแช่ในน้ำจัดอออนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า กลุ่มของข้าวเจ้า ได้แก่ ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ให้ปริมาณสารกาบาสูงสุด คือ 37.2 มิลลิกรัม/ 100 กรัมคัพภะ รองลงมา คือ ปทุมธานี 1 และ ชัยนาท 1 ตามลำดับ สำหรับกลุ่มข้าวเหนียว พบว่า ข้าวเหนียวพันธุ์อาร์ 258 ให้ปริมาณสารกาบาสูงสุด คือ 72.8 มิลลิกรัม/ 100 กรัมคัพภะ รองลงมาคือ กข 10 และ ขาวโป่งไคร้ ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณสารกาบาในข้าวไทย 14 สายพันธุ์

พันธุ์ข้าว	ร้อยละโดยน้ำหนักของคัพภะ ในข้าวกล้อง 100 กรัม	สารกาบา (มิลลิกรัม/100 กรัมคัพภะ)
ข้าวเจ้า		
ขาวดอกมะลิ 105	7.22	37.2
ปทุมธานี 1	5.90	31.0
ชัยนาท 1	7.50	28.8
สุพรรณบุรี 1	8.16	21.4
เหลืองประทิว 123	7.90	22.6
พลาญงาม	10.02	23.4
ข้าวเหนียว		
อาร์ 258	3.00	72.8
กข 10	2.84	65.0
สกลนคร	2.22	34.6
ขาวโป่งไคร้	2.70	63.2
กข 6	2.12	58.4
เหนียวอุบลราชธานี 2	2.04	29.6
แพร์ 1	3.72	33.8
สันป่าตอง 1	2.92	50.4

ที่มา: Tungtrakul *et al.* (2006)

จากการศึกษาของ Hirunpong and Tungjaroenchai (2008) พบว่า ข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผ่านการเพาะงอกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จากข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ให้ปริมาณสารกาบาสูงสุด คือ 186 มิลลิกรัม/ 100 กรัม น้ำหนักคัพพะ รองลงมาคือ กข 23 และขาวดอกมะลิ 105 คือ 77 และ 76 มิลลิกรัม/ 100 กรัม น้ำหนักคัพพะ ตามลำดับ

### 5.1.2 ขนาดของคัพพะ

Choi *et al.* (2006) ได้นำข้าวจากปอนิกา สายพันธุ์ Keunnunbyeo ซึ่งมีคัพพะขนาดใหญ่ และ พันธุ์ Ilpumbyeo ซึ่งมีคัพพะขนาดปกติ ซึ่งมีน้ำหนักของ คัพพะเป็น 1.49 และ 0.62 มิลลิกรัม ตามลำดับ และอัตราส่วนของน้ำหนักคัพพะต่อน้ำหนักเมล็ดเป็นร้อยละ 7.10 และ 2.64 ตามลำดับ ทำการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกโดยการแช่น้ำขจัดออรอนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเพาะงอกอีก 24 และ 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าสารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยใน ข้าวพันธุ์ Keunnunbyeo เพิ่มจาก 1.67 มิลลิกรัม/100 กรัม เป็น 29.26 และ 35.86 มิลลิกรัม/100 กรัม เมื่อผ่านการเพาะงอกที่ 24 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับ ส่วนในข้าวพันธุ์ Ilpumbyeo เพิ่มจาก 1.58 มิลลิกรัม/100 กรัม เป็น 10.95 และ 17.65 มิลลิกรัม/100 กรัม เมื่อผ่านการเพาะงอกที่ 24 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับ

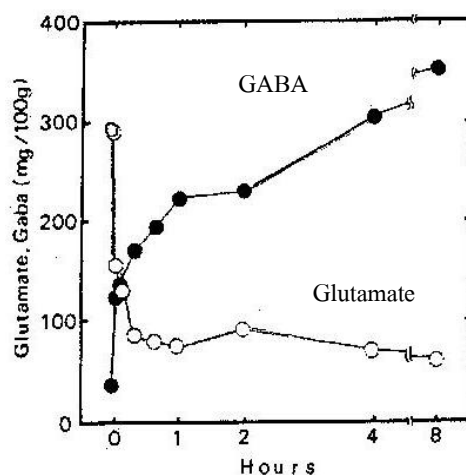
### 5.1.3 ระยะเวลาหลังการเก็บเกี่ยว

Saikusa *et al.* (1994b) ได้ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บต่อปริมาณสารกาบาในข้าวพันธุ์ Koshihikari ที่ผ่านการเก็บรักษาเป็นเวลา 119 และ 269 วัน ที่อุณหภูมิห้องโดยวิเคราะห์สารกาบาในคัพพะข้าวที่ผ่านแช่น้ำเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ข้าวที่ผ่านการเก็บที่ 119 วันมีปริมาณสารกาบาเริ่มต้นและสุดท้ายเป็น 25.4 และ 215 มิลลิกรัม/100 กรัม ตามลำดับ โดยเพิ่มขึ้น 8.5 เท่า ส่วนข้าวที่ผ่านการเก็บที่ 269 วัน มีปริมาณสารกาบาเริ่มต้นและสุดท้ายเป็น 36.9 และ 162 มิลลิกรัม/100 กรัม ตามลำดับ โดยเพิ่มขึ้น 4.4 เท่า

## 5.2 สภาวะในการผลิต

### 5.2.1 อุณหภูมิ

Saikusa *et al.* (1994a) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณสารกาบาในข้าวพันธุ์ Koshihikari โดยนำคัพพะไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 30 40 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 1 4 8 และ 24 ชั่วโมง จากการศึกษา พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณสารกาบาสูงสุด และสอดคล้องกับการลดลงของกลูตาเมต (glutamate) ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของสารกาบา และกลูตาเมตของข้าวกล้องเริ่มงอกที่ระยะเวลาต่าง ๆ กัน

ที่มา: Saikusa *et al.* (1994a)

### 5.2.2 เวลา

Watanabe *et al.* (2004) และ Ohtsubo *et al.* (2005) นำข้าวพันธุ์ Koshihikari มาผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกด้วยการแช่ในน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่าง ๆ กันแล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารกาบา พบว่า ปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้น ตามระยะเวลาในการเพาะงอก แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลของระยะเวลาต่อปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ Koshihikari

ตัวอย่าง	ปริมาณสารกาบา (มิลลิกรัม/100 กรัม)
ข้าวขัดสี	1.70 ± 0.01 <sup>b</sup>
ข้าวกล้อง	3.2 ± 2.9 <sup>a</sup>
ข้าวกล้อง	6.04 ± 0.01 <sup>b</sup>
ข้าวกล้องเริ่มงอก 8 ชั่วโมง	9.0 ± 0.7 <sup>a</sup>
ข้าวกล้องเริ่มงอก 16 ชั่วโมง	9.6 ± 2.7 <sup>a</sup>
ข้าวกล้องเริ่มงอก 24 ชั่วโมง	13.0 ± 2.8 <sup>a</sup>
ข้าวกล้องเริ่มงอก 24 ชั่วโมง	11.02 ± 0.25 <sup>b</sup>
ข้าวกล้องเริ่มงอก 48 ชั่วโมง	27.07 ± 0.46 <sup>b</sup>
ข้าวกล้องเริ่มงอก 72 ชั่วโมง	69.21 ± 0.14 <sup>b</sup>
ข้าวกล้องเริ่มงอก 96 ชั่วโมง	149.03 ± 5.16 <sup>b</sup>

ที่มา: <sup>a</sup> Watanabe *et al.* (2004)

<sup>b</sup> Ohtsubo *et al.* (2005)

Oh *et al.* (2010) ได้นำข้าวเกาหลีจำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ Keunnun, Ilpum, Heugkwang, และ Chucheong มาผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 3.5 และ 4 วัน โดยวัดความยาวของรากที่เริ่มงอกได้ 10 20 และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ พบว่าปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเพาะงอก แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผลิตจากข้าวกล้องและข้าวเปลือกที่เวลาต่างกัน

สายพันธุ์	ปริมาณสารกาบา (มิลลิกรัม/ 100 กรัม)	
	ข้าวกล้อง	ข้าวเปลือก
Keunnun (ควบคุม)	465.2 ± 7.8	458.4 ± 10.9
Keunnun (3 วัน)	1,237.4 ± 32.7	1,020.8 ± 39.4
Keunnun (3.5 วัน)	1,394.6 ± 30.9	1,240.4 ± 48.2
Keunnun (4 วัน)	1,405.1 ± 44.9	1,324.6 ± 45.7
Heugkwang (ควบคุม)	392.4 ± 8.2	346.8 ± 14.7
Heugkwang (3 วัน)	886.9 ± 13.6	785.1 ± 25.8
Heugkwang (3.5 วัน)	980.1 ± 17.2	828.9 ± 20.4
Heugkwang (4 วัน)	1,043.7 ± 20.5	832.4 ± 19.0
Ilpum (ควบคุม)	105.6 ± 2.8	89.4 ± 5.7
Ilpum (3 วัน)	346.7 ± 6.8	104.7 ± 4.2
Ilpum (3.5 วัน)	469.3 ± 7.9	128.7 ± 3.8
Ilpum (4 วัน)	537.5 ± 12.3	530.4 ± 14.2
Chucheong (ควบคุม)	198.6 ± 4.2	185.5 ± 5.1
Chucheong (3 วัน)	487.4 ± 7.9	428.1 ± 11.1
Chucheong (3.5 วัน)	670.7 ± 8.1	590.4 ± 17.4
Chucheong (4 วัน)	708.5 ± 11.5	650.7 ± 21.3

ที่มา: Oh *et al.* (2010)

### 5.2.3 ชนิดของสารละลายและความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากรัตน์ และคณะ (2550) ได้นำข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มาแช่ในน้ำที่ pH ต่างๆ กันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้ววิเคราะห์ปริมาณของสารกาบาและกลูตามิต แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลของ pH ต่อการเปลี่ยนแปลงสารกาบา และกลูตาเมตของข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์  
ขาวดอกมะลิ 105

pH	ปริมาณกาบา (มก / 100 ก)	ปริมาณกลูตาเมต (มก / 100 ก)
4.0	20.72 ± 1.53	515.89 ± 6.38
4.5	15.84 ± 1.80	531.15 ± 25.56
5.0	21.93 ± 1.32	538.13 ± 24.12
5.5	20.94 ± 1.08	533.29 ± 20.06
6.0	13.02 ± 0.43	563.06 ± 23.09
6.5	13.46 ± 0.34	550.53 ± 10.96

ที่มา: จารุรัตน์ และคณะ (2550)

Charoenthaikij *et al.* (2009) ได้ศึกษาผลของ pH ที่ 3 5 7 และน้ำจืดอ่อน (pH 6.8) เป็นเวลา 24 48 และ 72 ชั่วโมง ในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และเวลาที่ 24 36 และ 48 ชั่วโมง ในข้าวพันธุ์ กข 6 ต่อการเปลี่ยนแปลงของสารกาบา ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แสดงในตารางที่

7

ตารางที่ 7 ผลของ pH และเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์  
ข้าวดอกมะลิ 105 และ กข 6

pH	เวลา (ชั่วโมง)	ปริมาณสารกาบา (มิลลิกรัม/100 กรัม)
ข้าวดอกมะลิ 105	ควบคุม	2.11 ± 0.13
pH 3	24	32.70 ± 0.16
	48	67.00 ± 2.01
	72	63.24 ± 0.19
pH 5	24	16.17 ± 0.16
	48	21.14 ± 0.70
	72	21.61 ± 1.62
pH 7	24	8.50 ± 0.28
	48	12.28 ± 0.22
	72	16.82 ± 0.43
น้ำจืดอ่อน (pH 6.8)	24	14.84 ± 0.18
	48	25.79 ± 0.67
	72	38.90 ± 2.8
กข 6	ควบคุม	2.41 ± 0.66
pH 3	24	30.69 ± 0.04
	36	26.05 ± 0.11
	48	27.95 ± 0.03
pH 5	24	14.73 ± 0.07
	36	14.45 ± 1.37
	48	25.56 ± 3.22
pH 7	24	4.25 ± 0.03
	36	12.95 ± 0.33
	48	10.95 ± 0.18
น้ำจืดอ่อน (pH 6.8)	24	6.34 ± 0.46
	36	14.61 ± 0.66
	48	24.81 ± 0.16

ที่มา: Charoenthaikij *et al.* (2009)

Oh (2003) ได้ศึกษาผลของสารละลายที่ใช้ในการแช่ข้าวกล้องต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารกาบา โดยเตรียมสารละลายที่แตกต่างกัน 5 ชนิดคือ น้ำกลั่น กรดแล็กติกความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ไคโตแซนความเข้มข้น 50 พีพีเอ็มในกรดแล็กติกความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ กรดกลูตามิกความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ และ ไคโตแซนความเข้มข้น 50 พีพีเอ็มในกรดกลูตามิกความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ โดยข้าวกล้องจะแช่ในสารละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 25-26 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยเปลี่ยนสารละลายใหม่ทุกๆ 12 ชั่วโมง

จากการศึกษาพบว่า การแช่ข้าวกล้องในสารละลายไคโตแซนความเข้มข้น 50 พีพีเอ็มในกรดกลูตามิกความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ให้ปริมาณสารกาบาสูงสุด เมื่อเทียบกับสารละลายชนิดอื่นๆ โดยเพิ่มขึ้นเป็น 13 เท่า และยังพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ Glutamate decarboxylase เพิ่มขึ้น 4 เท่า เมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ เนื่องจาก ไคโตแซนจะช่วยสะสม (Mobilization) และช่วยในกระจายตัว (Redistribution) ของแคลเซียมไอออนในเซลล์พืช ซึ่งช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ Glutamate decarboxylase และส่งผลต่อการสังเคราะห์สารกาบา (Oh, 2003)

จารุรัตน์และคณะ (2550) ได้แช่ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในน้ำที่ pH 5 และผสมแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) 1 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 8 และ 12 ชั่วโมง พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ให้ปริมาณสารกาบาสูงสุด คือ 31.18 มิลลิกรัม/100 กรัม ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณ 3 เท่า

ชนิษฐาและคณะ (2552) ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ที่ความเข้มข้น 0 0.5 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ และระยะเวลาในการแช่ 12 24 36 48 และ 60 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ต่อปริมาณสารกาบาในข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 พบว่า ที่ระดับความเข้มข้น 0.5 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 60 ชั่วโมง ให้ปริมาณสารกาบาสูงสุด คือ 31.78 มิลลิกรัม/100 กรัม รองลงมาคือที่เวลา 48 ชั่วโมง 25.32 มิลลิกรัม/100 กรัม ซึ่งเพิ่มขึ้นจากตัวอย่างควบคุม ประมาณ 10 และ 8 เท่า ตามลำดับ

#### 5.2.4 ผลของออกซิเจน

Komatsuzaki *et al.* (2007) ได้นำข้าวจากปอนิกาจำนวน 5 พันธุ์คือ Haiminori , Oou 359, Koshihikari , Yametsukushi และ Nipponbare มาผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับวิธี Gaseous treatment โดยแช่น้ำ 3 ชั่วโมง แล้วเพาะงอกในกล่องพลาสติกปิดสนิทเป็นเวลา 21 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ต่อการเปลี่ยนแปลงกรดแอมิโนและสารกาบา พบว่า วิธี Gaseous treatment จะทำให้สารกาบาเพิ่มขึ้นในทุกสายพันธุ์เมื่อเทียบกับการเพาะแบบปกติ

ศุภรัตน์ และคณะ (2554) เปรียบเทียบผลของสภาวะการเพาะต่อปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 โดยเพาะงอกแบบแช่น้ำ โดยแช่เมล็ดข้าวในน้ำ ที่ 35 องศาเซลเซียส กับ การเพาะงอกบนผ้าขาวบาง โดยแช่เมล็ดข้าวในน้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำมาเพาะงอกบนผ้าขาวบางที่ชุ่มน้ำ ที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 -96 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และสารกาบาเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบวิธีการกับระยะเวลา พบว่า การเพาะงอกบนผ้าขาวบางให้ปริมาณสารกาบาสูงกว่า การเพาะงอกแบบแช่น้ำ ที่ระยะเวลาเท่ากัน คือ การเพาะงอกบนผ้าขาวบางให้ปริมาณสารกาบาสูงสุดที่เวลา 84 ชั่วโมง 107.23 มิลลิกรัม/100 กรัม และลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนการเพาะงอกแบบแช่น้ำให้ปริมาณสารกาบาสูงสุดที่เวลา 96 ชั่วโมง 107.25 มิลลิกรัม/100 กรัม การเพาะงอกบนผ้าขาวบางจะได้รับออกซิเจนมากกว่า ซึ่งออกซิเจนมีความสำคัญต่อการหายใจของเมล็ดที่กำลังงอกและส่งผลต่อการสังเคราะห์สารที่จำเป็นต่อการทำงานของเซลล์ (Bouche and Fromm, 2004) ผลแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลของวิธีการเพาะต่อปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และสารกาบา

วิธี	เวลา (ชั่วโมง)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก/100 ก)	สารกาบา (มก/100 ก)
ควบคุม		50.91	3.19
แช่น้ำ	12	80.89	7.75
	24	99.03	14.49
	36	121.67	18.90
	48	155.65	29.09
	60	340.75	38.00
	72	563.00	47.97
	84	783.21	53.28
	96	1,057.20	107.25
เพาะบนผ้าขาวบาง	12	91.72	15.89
	24	3,346.57	44.46
	36	7,451.29	66.97
	48	9,458.83	66.23
	60	18,459.70	100.50
	72	26,964.50	101.11
	84	28,193.46	107.23
	96	41,675.51	86.95

ที่มา: สุรจันท์ และคณะ (2554)

### 5.2.5 การอบแห้ง

Srisang *et al.* (2009) ศึกษาผลของการอบแห้งข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ด้วยเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดแบบลมร้อน ต่อปริมาณสารกาบา และจำนวนจุลินทรีย์ ใช้อุณหภูมิในการอบแห้ง 90 110 130 และ 150 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็วลม 4 เมตร/วินาที ได้ความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วงร้อยละ 13-15 (ฐานแห้ง) พบว่า สารกาบาไม่มีการเปลี่ยนแปลง ปริมาณแบคทีเรียยีสต์ และรา บนผิวของข้าวกล้องเริ่มงอกภายหลังการอบแห้งมีปริมาณต่ำกว่า  $10^4$  CFU/g

ตารางที่ 9 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งต่อปริมาณสารกาบา

ตัวอย่าง	ปริมาณสารกาบา (มิลลิกรัม/ 100 กรัม)
ข้าวกล้องเริ่มงอก, อบที่ 90 °ซ นาน 6 นาที	3.705 ± 0.037
ข้าวกล้องเริ่มงอก, อบที่ 110 °ซ นาน 4 นาที	4.369 ± 0.177
ข้าวกล้องเริ่มงอก, อบที่ 130 °ซ นาน 3 นาที	4.460 ± 0.052
ข้าวกล้องเริ่มงอก, อบที่ 150 °ซ นาน 2 นาที	4.494 ± 0.261

ที่มา: Srisang *et al.* (2009)

#### 5.2.6 การลดปริมาณจุลินทรีย์

Komatsuzaki *et al.* (2007) เปรียบเทียบวิธีการลดปริมาณจุลินทรีย์ในข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผ่านการแช่น้ำที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยการใช้ไอน้ำที่เวลา 10, 20 และ 30 นาที และการใช้ไอน้ำร่วมกับการแช่ในเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 70 เป็นเวลา 3 นาที ต่อปริมาณสารกาบาและจำนวนจุลินทรีย์ (Aerobic plate count)

ตารางที่ 10 ผลของไอน้ำและเอทานอลต่อการเปลี่ยนแปลงสารกาบาและปริมาณจุลินทรีย์

ตัวอย่าง	สารกาบา (มก /100 กรัม)	ปริมาณจุลินทรีย์ (CFU/g)
ข้าวกล้อง	4.1	$1.7 \times 10^4$
ข้าวกล้องเริ่มงอก	9.6	$1.9 \times 10^8$
ไอน้ำ 10 นาที	9.2	$2.2 \times 10^3$
ไอน้ำ 20 นาที	10.1	$1.0 \times 10^2$
ไอน้ำ 30 นาที	9.8	$1.0 \times 10^2$
ไอน้ำ 10 นาที + แช่เอทานอล	9.2	$3.0 \times 10^2$
ไอน้ำ 20 นาที + แช่เอทานอล	9.1	ND
ไอน้ำ 30 นาที + แช่เอทานอล	8.8	ND

ที่มา: Komatsuzaki *et al.* (2007)

## 6. การเปลี่ยนแปลงภายหลังกระบวนการงอก

### 6.1 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ

การเปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวกล้องเริ่มงอก นับเป็นปัจจัยสำคัญต่อการนำไปแปรรูปและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้

Benjamasuttikul and Naivikul (2007) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืด (Pasting properties) ของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 6 พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเป็นอย่างมากในช่วงของระยะเวลาเพาะงอกที่ 12-20 ชั่วโมง โดยค่าความหนืดสูงสุดลดลง 2.5 เท่า และความหนืดสุดท้ายลดลง 2 เท่า ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 สำหรับข้าวเหนียว กข 6 มีค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ลดลง 5 เท่า และความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ลดลง 4.4 เท่า ซึ่งมีความสอดคล้องกับการศึกษาของ Charoenthaikij *et al.* (2009)

Jiamyangyuen and Ooraikul (2008) ได้ตรวจสอบค่าความแข็ง (Hardness) ของข้าวกล้องเริ่มงอก ที่ผ่านการแช่ที่ 6 หรือ 12 ชั่วโมง และนำไปเพาะงอกที่ระยะเวลา 0 6 12 18 และ 24 ชั่วโมง แล้วนำมาหุงสุก เปรียบเทียบกับข้าวกล้องปกติหุงสุก พบว่า เมื่อระยะเวลาการเพาะงอกนานขึ้น มีผลให้ค่าความแข็งของข้าวสุกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

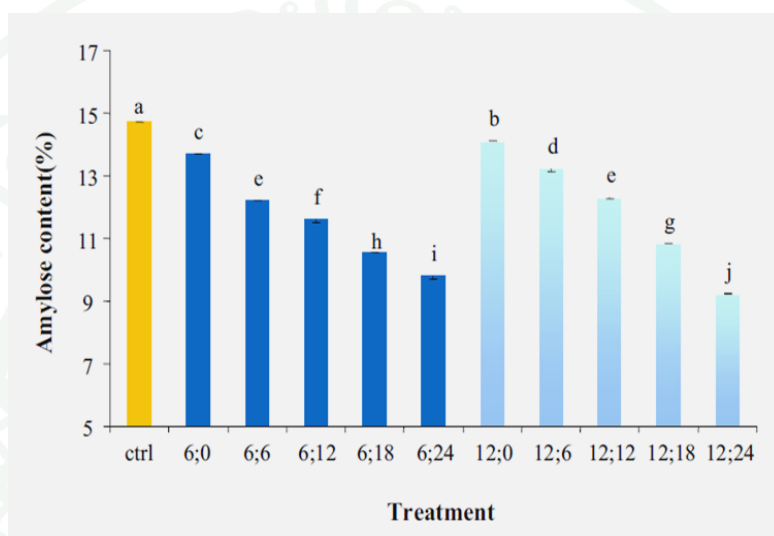
### 6.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

Palmiano and Juliano (1972) ศึกษาเมตาบอลิซึมของเมล็ดข้าวระหว่างการงอก พบว่า เกิดการสลายตัวของโปรตีนและอาร์เอ็นเอ (RNA) โดยเอนไซม์โปรติเอส และไรโบนิวคลีเอส (Ribonuclease; RNase) ซึ่งเกิดขึ้นก่อนการย่อยสลายสตาร์ช ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนที่ละลายได้และกรดอะมิโนเพิ่มขึ้น เมื่อข้าวงอกในที่มืดเป็นระยะเวลา 3 วัน พบว่ามีปริมาณโปรตีนที่ละลายได้และกรดอะมิโน เพิ่มขึ้น 1 และ 4.5 เท่า ตามลำดับ กิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอส และไรโบนิวคลีเอสเพิ่มขึ้น จากเดิม 1.6 และ 1.4 เท่า ตามลำดับ ส่วน ปริมาณอาร์เอ็นเอ ลดลง 2.4 เท่า

Saman *et al.* (2008) เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลส และ แอลฟา-กลูโคซิเดส ในข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้า กข 17 และข้าวเหนียว กข 6 ที่แช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเพาะงอกเป็นเวลา 1-7 ชั่วโมงที่ 30 องศาเซลเซียส พบว่า ข้าวเหนียว

กข 6 มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงกว่าข้าวเจ้า กข 17 โดยพบสูงสุดในวันที่ 3 ของการเพาะงอก ซึ่งสอดคล้องกับกิจกรรมของเอนไซม์ที่มีค่าสูงสุดในวันที่ 3 ของการเพาะงอก เช่นกัน

Jiamyangyuen and Ooraikul (2008) ได้ตรวจสอบปริมาณแอมิโลสในข้าวกล้องและข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 พบว่า ระยะเวลาในการเพาะงอกมีผลต่อ การลดลงของปริมาณแอมิโลสอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณแอมิโลสของข้าวกล้องเริ่มงอก

หมายเหตุ Ctrl = ตัวอย่างควบคุม, (h1;h2) = เวลาแช่; เวลาเพาะ

ที่มา: Jiamyangyuen and Ooraikul (2008)

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแอมิโลสสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลส ที่จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการเพาะงอก โดยเพิ่มขึ้นสูงสุดประมาณ 6 เท่า เมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Charoenthaikij *et al.* (2009) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมของเอนไซม์สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลรีดิวซ์ และการลดลงของความหนืด (Benjamasuttikul and Naivikul, 2007) เนื่องจากเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลสจะทำการย่อยสตาร์ชให้กลายเป็น เดกซ์ทริน (dextrin) และ โอลิโกแซ็กคาไรด์ (Palmiano and Juliano, 1972)

จากการศึกษาของ Komatsuzuki *et al.* (2007) พบว่า ข้าวกล้องเริ่มงอกจากวิธี gaseous treatment จะมีกรดแอมิโนอิสระมากกว่าข้าวกล้องปกติ ยกเว้น แอสพาร์ติก เซอรีน แอสพาราจีน และกรดกลูตามิก ซึ่งปริมาณกรดแอมิโนจะเพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการงอกของเมล็ดข้าวและปริมาณโปรตีนมีแนวโน้มลดลง (Palmiano and Juliano, 1972) เนื่องจากกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสที่เพิ่มขึ้นจะไปย่อยโปรตีนเป็นเปปไทด์ และกรดแอมิโน

Lee *et al.* (2007) ได้เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเปลือกของข้าวเกาหลีจำนวน 4 สายพันธุ์ ได้แก่ Ipum, Goami 2, Keunnun และ Heugkwang โดยแช่น้ำที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน พบว่า ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า ใยอาหาร และน้ำตาลอิสระเพิ่มขึ้นหลังจากการงอกอย่างมีนัยสำคัญ ผลแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเปลือกงอกจากข้าวเกาหลี 4 สายพันธุ์

พันธุ์		โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	ใยอาหาร (ร้อยละ)	น้ำตาลอิสระ (กรัม/100 กรัม)
Ipum	ก่อนงอก	6.08	2.08	4.56	11.9	0.498
	หลังงอก	6.75	2.68	5.02	19.2	2.990
Goami 2	ก่อนงอก	7.05	2.63	5.30	20.6	0.810
	หลังงอก	7.37	3.47	5.51	26.7	2.190
Keunnun	ก่อนงอก	6.19	2.36	4.97	19.6	0.854
	หลังงอก	7.05	3.28	5.27	22.1	2.647
Heugkwang	ก่อนงอก	6.85	2.09	4.70	13.2	0.723
	หลังงอก	7.04	3.00	4.75	25.3	2.381

ที่มา: Lee *et al.* (2007)

Moongngarm and Saetung (2010) ทำการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากข้าวกล้อง และข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ซึ่งผลิตโดยแช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเพาะงอกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณโปรตีน ไขมัน ใยอาหาร น้ำตาล กรดแอมิโน แอลฟา-โทโคฟีรอล แกมมา-ออริซานอล และสารประกอบฟีนอลิก เพิ่มขึ้นอย่าง มีนัยสำคัญ แต่ ไขมัน โนอาซิน ไพรดอกซินและกรดไฟติก ลดลง ผลแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 องค์ประกอบทางเคมีและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวกล้องและข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6

องค์ประกอบ	ข้าวกล้อง	ข้าวกล้องเริ่มงอก
โปรตีน (ร้อยละ)	6.98±0.07	8.98±0.27
ไขมัน (ร้อยละ) <sup>ns</sup>	1.20±0.68	1.23±0.68
เถ้า (ร้อยละ) <sup>ns</sup>	1.96±0.11	2.06±0.11
เส้นใยหยาบ (ร้อยละ) <sup>ns</sup>	1.13±0.16	1.22±0.26
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ) <sup>ns</sup>	79.2±2.08	77.7±2.49
น้ำตาลทั้งหมด (ร้อยละ)	0.91±0.03	1.88±0.13
น้ำตาลรีดิวิซ์ (ร้อยละ)	0.19±0.04	0.81±0.19
กรดแอมิโนอิสระทั้งหมด (ร้อยละ)	2.11±0.56	3.12±0.55
โทอามีน(มก/100 ก)	0.23±0.02	0.12±0.02
โนอาซิน(มก/100 ก)	7.66±0.14	4.47±0.18
ไพรดอกซิน(มก/100 ก)	0.76±0.08	0.66±0.04
กรดไฟติก (ก/100 ก)	1.32±0.07	1.15±0.08
แอลฟา-โทโคฟีรอล (มก/100 ก) <sup>ns</sup>	0.93±0.18	0.86±0.08
แกมมา-ออริซานอล (มก/100 ก)	66.0±5.93	84.0±5.93
สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มก gallic acid/100 ก)	70.3±8.31	84.3±6.35

ที่มา: Moongngarm and Saetung (2010)

## 7. ประโยชน์ของข้าวกล้องเริ่มงอก

Kayahara *et al.* (2001) ได้อธิบายถึงผลของกิจกรรมของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่พบในข้าวกล้องเริ่มงอกต่อสุขภาพ แสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ประโยชน์ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่อร่างกาย

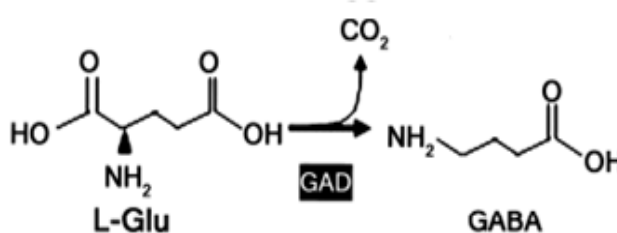
สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ	ประโยชน์ต่อร่างกาย
กรดแกมมา-แอมิโนบิวทีริก	ช่วยลดความดันโลหิต ช่วยการทำงานของสมอง ป้องกันอาการปวดหัว หรือ ความวิตกกังวล ที่มีผลมาจากหลอดเลือดภายในสมองอุดตัน ป้องกันโรคลมชัก ช่วยให้ผ่อนคลาย และช่วยในการทำงานของไต
ใยอาหาร	บรรเทาอาการท้องผูก ป้องกันมะเร็งลำไส้ และควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด
อินโนซิทอล	ช่วยเร่งกระบวนการเมแทบอลิซึมของไขมัน ป้องกันกรดไขมันในตับ ป้องกันโรคหลอดเลือด
กรดเฟอร์ูลิก	กำจัดอนุมูลอิสระ ยับยั้งกระบวนการ melanogenesis
กรดไฟติก	ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน ป้องกันการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ
โทโคไตรอินอล	กำจัดอนุมูลอิสระ ป้องกันผิวหนังจากรังสียูวี
แมกนีเซียม	ป้องกันโรคหัวใจ
โพแทสเซียม	ช่วยลดความดันโลหิต
สังกะสี	กระตุ้นการทำงานของระบบสืบพันธุ์ ป้องกันโรคหลอดเลือดแข็งตัว
แกมมา-ออริซานอล	ป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชัน ป้องกันการเสื่อมของผิวหนังก่อนวัย ควบคุมระดับคอเลสเตอรอล
สารยับยั้งโพรติเลนโดเปปทิเดส (Prolylendopeptidase inhibitor)	มีผลต่อการยับยั้งการเกิดโรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer)

ที่มา: Kayahara *et al.* (2001)

## 8. กรดแกมมา-แอมิโนบิวทีริก ( $\gamma$ -Aminobutyric acid)

กรดแกมมา-แอมิโนบิวทีริก หรือ กาบา ( $\gamma$ -aminobutyric acid ;GABA) จัดเป็นกรดแอมิโนที่ไม่ใช่โปรตีน ประกอบด้วยคาร์บอน 4 อะตอม มีหมู่คาร์บอกซิล (COOH) และหมู่แอมิโน ( $\text{NH}_2$ ) อย่างละ 1 หมู่ ต่ออยู่กับคาร์บอนอะตอม ตรงตำแหน่ง แกมมา-คาร์บอน ( $\gamma$ -carbon) (Bown and Shelp, 1997 )

มีสูตรโมเลกุลคือ  $\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$  มวลโมเลกุลเท่ากับ 103.12 มีโครงสร้างเป็นวงแหวนคล้ายโพรลีน (Proline) และอยู่โดยไม่เกาะอยู่กับโมเลกุลอื่น มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี จัดเป็น Zwitter ionic คือมีทั้งขั้วบวกและขั้วลบ สลายตัวที่ 195 องศาเซลเซียส (Bown and Shelp,1997 ; Shelp *et al.*, 1999) แสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างของกลูตามัต (L-glutamate) และสารกาบา (GABA)

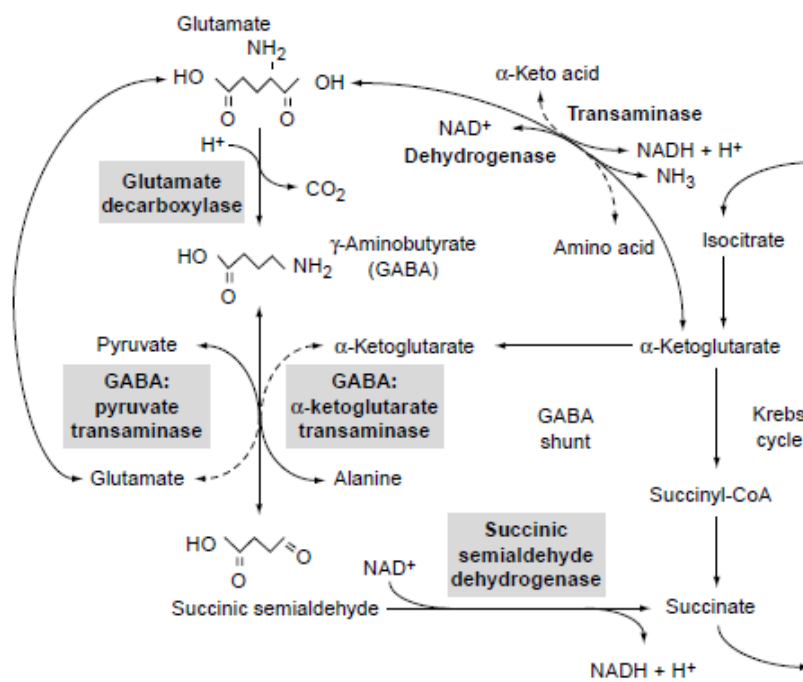
ที่มา: Liu *et al.* (2005)

Shelp *et al.* (1999) และ Bouche and Fromm (2004) ได้ศึกษากระบวนการเมทาบอลิซึมของกาบา ซึ่งพบว่า เกี่ยวข้องกับเอนไซม์หลายชนิด โดยกลไกนี้จะเปลี่ยนกลูตามัตไปเป็นซักซิเนต (succinate) ซึ่งเรียกว่า GABA Shunt ดังแสดงในภาพที่ 7

ขั้นตอนแรก เป็นกระบวนการแอลฟา-ดีคาร์บอกซิเลชัน ( $\alpha$ -decarboxylation) ของกลูตามัต เป็นกระบวนการที่ไม่สามารถผันกลับ โดยเอนไซม์กลูตามัตดีคาร์บอกซิเลส (Glutamate decarboxylase; GAD, EC 4.1.1.15) เกิดเป็นกาบาและคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) (ภาพที่ 7) ซึ่งเอนไซม์ GAD นี้ มีความจำเพาะกับ กลูตามัต และมี Pyridoxal 5'-phosphate เป็นโคแฟกเตอร์ pH ที่เหมาะสมของเอนไซม์นี้อยู่ที่ประมาณ 5.8

ขั้นที่สอง เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ โดยเอนไซม์ GABA transaminase (GABA-T ; EC 2.6.1.19) จะเปลี่ยนกามา ไปเป็น Succinic semialdehyde โดยใช้ Pyruvate หรือ  $\alpha$ -ketoglutarate เป็น Amino acceptor

ขั้นสุดท้าย เป็นการบวนการที่ผันกลับไม่ได้ โดยเอนไซม์ Succinic semialdehyde dehydrogenase (SSADH; EC 1.2.1.16) จะออกซิไดซ์ succinic semialdehyde ไปเป็น Succinate

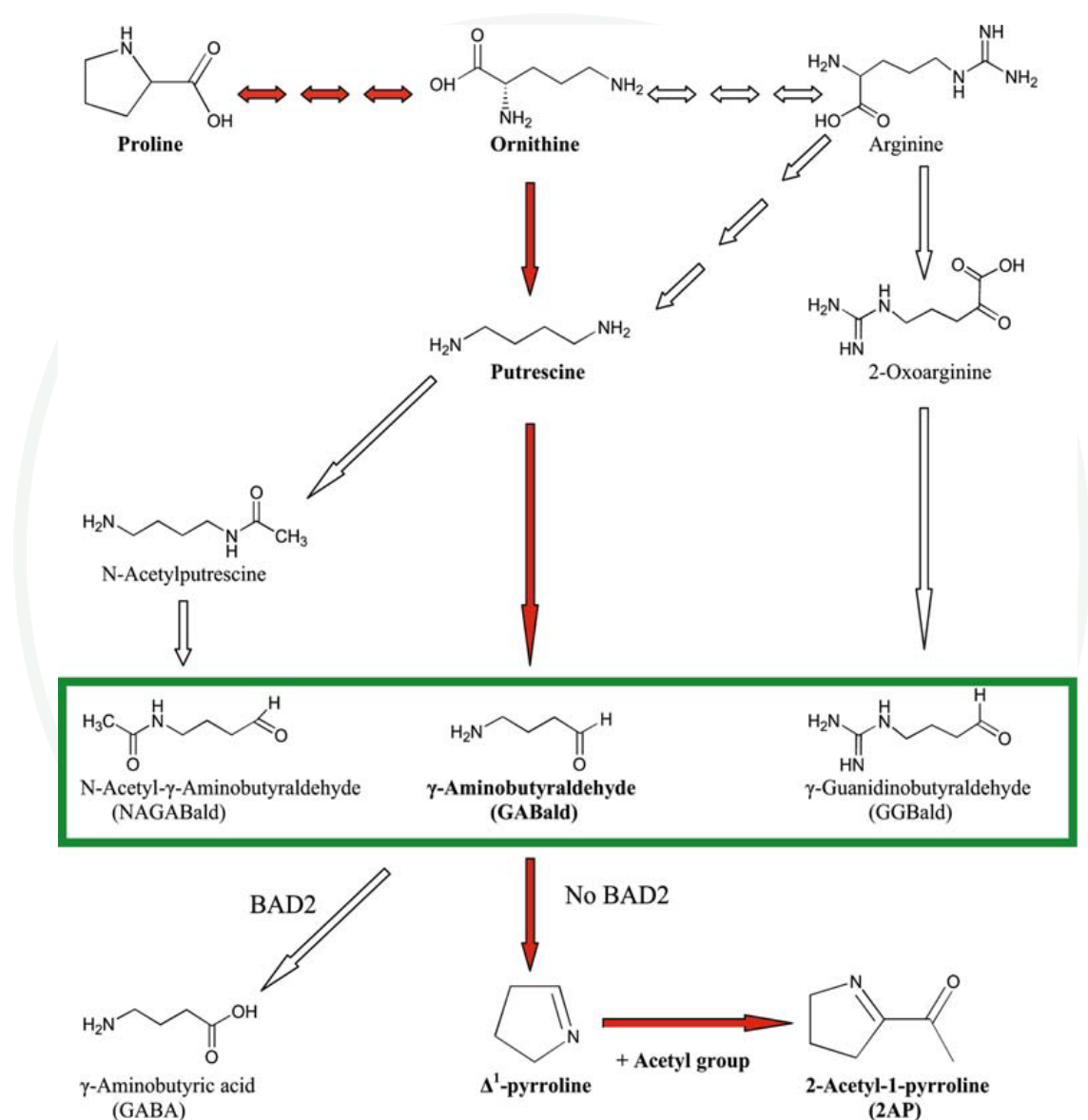


ภาพที่ 7 กลไกการสังเคราะห์กามา (GABA Shunt)

ที่มา: Shelp *et al.* (1999)

นอกจากปัจจัยดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้น Bradbury *et al.*(2008) และ Sakthivel *et al.*(2009) ยังได้กล่าวถึงปัจจัยทางด้านพันธุกรรมที่มีผลต่อการสังเคราะห์สารกามาในเมล็ดข้าวว่า การสังเคราะห์สารกามา และ 1-Pyrroline ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ 2-Acetyl-1- Pyrroline (2AP) ซึ่งเป็นสารที่ให้กลิ่นหอม พบในข้าวหอม เช่น ข้าวดอกมะลิ 105 และ กข 15 เป็นต้น (Vanavichit and Yoshihashi, 2010 ) มีความเกี่ยวข้องกัน (ภาพที่ 8) คือ เริ่มต้นจาก กรดแอมิโน โพรลีน (Proline) จะถูกเปลี่ยนเป็น Ornithin, Putrescine และ  $\gamma$ -Aminobutyraldehyde (GABald) ตามลำดับ และ GABald สามารถเปลี่ยนไปเป็นสารกามา (GABA) โดยเอนไซม์ Betaine aldehyde dehydrogenase

homologs (BAD2) (Bradbury *et al.*, 2008) ซึ่งเอนไซม์นี้ถูกควบคุมโดยยีน (gene) ในกรณีที่ยีนกลายพันธุ์ จะทำให้ยีนดังกล่าวเป็นยีนด้อย (recessive gene) ทำให้เอนไซม์ BAD2 ไม่สามารถทำงานได้ จึงทำให้ GABA ถูกเปลี่ยนไปเป็น 1-Pyrroline ส่งผลให้ข้าวมีกลิ่นหอม ซึ่งวิธีทำให้ยีนกลายพันธุ์นั้นถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มิกลิ่นหอม (Vanavichit and Yoshihashi, 2010)



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ของยีน (Gene) กับการสังเคราะห์สารกาบาและ 1- Pyrroline

ที่มา: Bradbury *et al.* (2008)

## 9. กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

เอกซ์ทรูชัน (Extrusion) หมายถึง การปฏิบัติการที่ทำให้พลาสติกหรือโพลิเมอร์เป็นรูปร่างขึ้นมา ด้วยการบังคับให้พลาสติกหรือโพลิเมอร์ผ่านที่อัดจำกัดหรือที่เรียกว่ารูเปิด (Die) ของหน้าแปลน (Die plate) (ประชา, 2539)

เอกซ์ทรูชันทางอาหาร (Food extrusion) หมายถึง กระบวนการผลิตอาหารที่ประกอบด้วย หน่วยปฏิบัติการหลายๆ หน่วยประกอบเข้าด้วยกัน อันประกอบด้วย การผสม การทำให้สุก การนวด การเนียน การขึ้นรูปและการเกิดรูปร่าง โดยการอัดโพลิเมอร์ผ่านรูเปิดที่ได้ออกแบบไว้ให้เป็นรูปร่าง หรือผลิตภัณฑ์ที่สุกพอง (Riaz, 2000)

เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) เป็นเครื่องจักรที่ทำให้วัตถุดิบเป็นรูปร่างออกมาด้วย กระบวนการเอกซ์ทรูชัน หรือ หมายถึงเครื่องจักรซึ่งประกอบด้วยสกรูที่มีเกลียวลาดเอียงหมุนอยู่ในเนื้อที่จำกัดของเปลือกทรงกระบอกหรือบารเรล (Barrel) หรือหมายถึงเครื่องจักรที่ทำให้วัตถุดิบอาหารเป็นรูปร่างออกมาด้วยการอัด ดัน บิด เนียนผ่านทางออก (Die) (ประชา, 2540) หรือเครื่องจักรที่ประกอบด้วยถังป้อนวัตถุดิบ (Hopper) สกรู (Screw) บารเรล (Barrel) และ รูเปิด(Die) เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์อาหารให้มีรูปแบบตามที่ต้องการในอุตสาหกรรมอาหาร กระบวนการเอกซ์ทรูชัน ทำให้อาหารสุกและมีลักษณะเป็นโคลิกลาย พลาสติก โดยอาศัยความร้อนจากแรงเสียดทานของสกรู วัตถุดิบ และจากแหล่งพลังงานอื่น ๆ เช่น ไอน้ำหรือน้ำร้อนที่หล่อบาร์เรลอยู่ มีผลทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงสุดท้าย สกรูอัด วัตถุดิบผ่านหน้าแปลน ซึ่งอยู่ทางออกของปลายสกรู เพื่อขึ้นรูปอาหาร หลังจากนั้นทำการตัดอาหารเป็น ชิ้นๆ ตามขนาดที่ต้องการด้วยใบมีดอัตโนมัติ (วิไล, 2546)

ภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เมื่ออาหารผ่าน สกรูทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เช่น เกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) และการแตกตัว (Degradation) ของสตาร์ช การเปลี่ยนสภาพของโปรตีน (Denaturation) การยับยั้งเอนไซม์บางชนิดที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งมีผลต่ออาหารระหว่างการเก็บรักษา การทำลายสารพิษที่มีอยู่ในอาหาร บางชนิด และการลดจำนวน จุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงในกระบวนการเอกซ์ทรูชันนั้นอุณหภูมิที่ใช้ทำอาหารให้สุกก่อนเข้าสู่แต่ละระยะเวลาที่อาหารอยู่ที่อุณหภูมินั้นสั้นมาก จึงทำให้กระบวนการเอกซ์ทรูชันนี้มักถูก เรียกว่า กระบวนการ HTST (High temperature short time) เพราะสามารถใช้ประโยชน์จากความร้อนได้สูง

สุดแต่เกิดผลเสียจากความร้อนน้อยที่สุดเช่นการเกิดสีน้ำตาลการสูญเสียวิตามินและกรดแอมิโน การเกิดรสชาติที่ไม่ต้องการ (Riaz, 2000; Lusas and Rooney, 2001 )

การเตรียมวัตถุดิบที่จะนำมาผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันต้องนำวัตถุดิบมาผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำวัตถุดิบที่ผสมดีแล้วมาป้อนเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีได้หลายรูปแบบ ตามลักษณะของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ และสถานะของเครื่องที่กำหนด วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอาหารขบเคี้ยวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 กลุ่ม ตามหน้าที่ของวัตถุดิบที่มีต่อผลิตภัณฑ์ (Guy, 2001) ได้แก่

กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ (Structure-forming material) ได้แก่ ธัญชาติ และพืชหัว ที่เป็นรูปของแป้ง (Flour) และสตาร์ช (Starch) รวมไปถึงโปรตีน

กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มที่กระจายอยู่ในส่วนที่เป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ (Dispersed-phase filling material) ได้แก่ โปรตีน และเส้นใย

กลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์และสารหล่อลื่น (Act as plasticisers and lubricants) ได้แก่ น้ำ น้ำมัน/ไขมัน และอิมัลซิไฟเออร์

กลุ่มที่ 4 เป็นของแข็งที่ละลายได้ (Soluble solids) ช่วยทำให้เกิดรสชาติและสีขึ้น และมีผลเล็กน้อยต่อลักษณะเนื้อสัมผัส เช่น เกลือ น้ำตาล

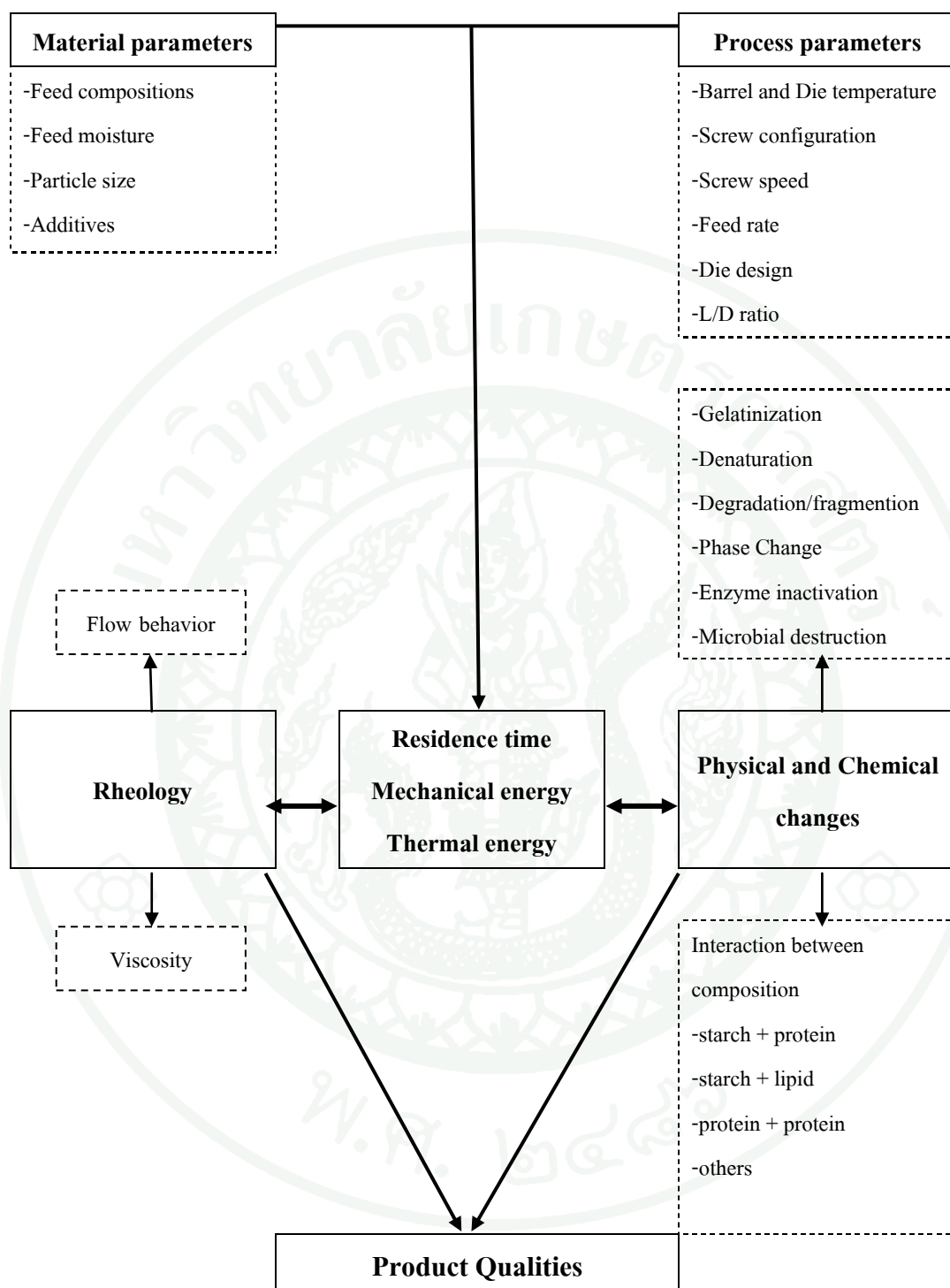
กลุ่มที่ 5 เป็นสารที่ทำให้ฟองอากาศ (Nucleating substances) ซึ่งมีผลให้ผลิตภัณฑ์พองและให้โครงสร้างภายในที่ละเอียด ได้แก่ ผงฟู แคลเซียมคาร์บอเนต

กลุ่มที่ 6 เป็นกลุ่มที่ให้สี (Coloring substances) ได้แก่ นมผง และสีจากธรรมชาติ

กลุ่มที่ 7 เป็นสารที่ทำหน้าที่ให้รสชาติ (Flavoring substances) ได้แก่ เกลือ น้ำตาล และสารให้กลิ่นรสต่าง ๆ

## 10. ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

ตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน มี 2 ตัวแปรคือ ตัวแปรทางด้านวัตถุดิบ (Material parameters) และตัวแปรทางด้านกระบวนการ (Process parameters) (Choudhury and Gautam, 1999; Moraru and Kokini, 2003) ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ที่มา: คัดแปลงจาก Choudhury and Gautam (1999) และ Moraru and Kokini (2003)

## 10.1 ตัวแปรทางด้านวัตถุดิบ ที่สำคัญ ได้แก่

1. องค์ประกอบของวัตถุดิบ (Feed compositions) องค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้จะมีผลต่อลักษณะของเอ็กซ์ทรูเกตที่ได้ แบ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ใช้ในการผลิตขนมขบเคี้ยวจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (รุ่งนภา, 2544) ซึ่งจะทำให้วัตถุดิบเกิดการผสมเป็นโคที่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดการสุกและพองตัว ซึ่งมีผลมาจากปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกตินที่มีอยู่ (Pan *et al.*, 1992)

อัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน มีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Lai and Kokini, 1991) เอ็กซ์ทรูเกตที่ได้จากข้าวเหนียวมีลักษณะค่อนข้างเหนียว มีการพองตัวมากกว่าเอ็กซ์ทรูเกตที่ได้จากข้าวเจ้า ปริมาณแอมิโลเพกตินที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility index; WSI) ของเอ็กซ์ทรูเกตมีค่าเพิ่มขึ้นและความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption index; WAI) มีค่าลดลง (Pan *et al.*, 1992)

รุ่งนภา และ ประชา (2538) ได้ศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมของข้าวเจ้าและข้าวเหนียวในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ พบว่า การบดข้าวมีผลทำให้ปริมาณ แอมิโลสในข้าวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการศึกษาที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 15, 20 และ 25 และขนาดอนุภาคในช่วง 30-50 เมช, 50-70 เมช และ 70-100 เมช ของข้าวทั้งสองชนิดที่ป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ พบว่า ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 15 ให้เอ็กซ์ทรูเกตที่มีความพองมากที่สุด โดยมีค่าความหนาแน่นน้อยที่สุด และข้าวที่มีขนาดอนุภาค 50-70 เมช และ 70-100 เมช ให้เอ็กซ์ทรูเกตที่มีความพองตัวดีกว่าและมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าเอ็กซ์ทรูเกตที่เตรียมจากอนุภาคในช่วง 30-50 เมชทั้งในข้าวเจ้าและข้าวเหนียว และเมื่อนำข้าวเจ้าหรือข้าวเหนียวที่มีขนาดอนุภาค 50-70 เมชมาผสมกับแป้งสาลีเพื่อผลิตอาหารขบเคี้ยว พบว่า เอ็กซ์ทรูเกตที่ได้จากข้าวไม่ว่าข้าว เจ้าหรือข้าวเหนียวที่ผสมกับแป้งสาลีในอัตราส่วน 80:20 และ 60:40 จะให้ค่าความหนาแน่นและแรงกดทะลุต่ำกว่า และอัตราการพองตัวสูงกว่าเอ็กซ์ทรูเกตจากข้าวเจ้าหรือข้าวเหนียวเพียงอย่างเดียว

พัชรา (2547) ได้ศึกษาผลของแอมิโลสจากข้าวพันธุ์ กข 6 ขาวดอกมะลิ 105 สุพรรณบุรี 60 และชัยนาท 1 ที่มีปริมาณแอมิโลสร้อยละ 7 17 24 และ 33 ตามลำดับ พบว่าเมื่อปริมาณแอมิโลสเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการพองตัวลดลง ความหนาแน่นและ Breaking strength เพิ่มขึ้น

สุนันทา (2550) ทำการผลิตเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ผสมรำข้าวดิบที่ ร้อยละ 0 10 และ 20 พบว่า การเติมรำข้าวที่ร้อยละ 20 ทำให้อัตราการขยายตัวลดลง แรงกดแตก (Compression force) และความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ( $P \leq 0.05$ ) เนื่องมาจากรำข้าวมีโปรตีนและไขมันสูง การเพิ่มขึ้นของโปรตีนทำให้การพองตัวลดลง เพราะ โปรตีนไม่สามารถพองตัวได้เหมือนสตาร์ช แต่การเติมรำข้าวที่ร้อยละ 10 มีค่าการพองตัว และแรงกดแตก ไม่ต่างจากการไม่เติมรำข้าว ( $P > 0.05$ )

2. ปริมาณความชื้น (Feed moisture) ของส่วนผสมที่ป้อนเข้าสู่เครื่อง ในกระบวนการแปรรูปด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชันจำเป็นต้องกำหนด น้ำทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทความร้อนและเป็นสารหล่อลื่น ช่วยในการควบคุมความดันและแรงเสียดภายในเอกซ์ทรูเดอร์ (Anderson *et al.*, 1969; Bhattacharya and Hanna, 1987) ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของส่วนผสมที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องจำเป็นต้องศึกษา เพราะความชื้นมีผลต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้ง ลักษณะการพองตัว ความหนาแน่นและลักษณะของเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดต (Halek and Chang, 1992 และ Pan *et al.*, 1992)

Ding *et al.* (2005) พบว่าความชื้นของวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและอัตราการพองตัวลดลงในเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าว เนื่องจากน้ำจะทำให้โครงสร้างโมเลกุลของแอมิโลเพกตินเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งทำให้ค่า Elasticity ของมวลหลอม (Melt) ลดลงจึงมีผลต่อการพองตัว ซึ่งค่าความหนืดของโดเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการพองตัวของเอกซ์ทรูเดต (Kokini *et al.*, 1992) อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณความชื้นของวัตถุดิบต่ำเกินไปจะส่งผลให้สตาร์ชเกิดการแตกตัว (Dextrinization) เนื่องจากแรงเสียดจากการหมุนของสกรู ทำให้อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง (Chinnaswamy and Hanna, 1988)

สุนันทาและมาโนชญ์ (2546) ทำการผลิตขนมขบเคี้ยวจากแป้งข้าวกล้องข้าวดอกมะลิ 105 พบว่า ความชื้นของวัตถุดิบ (ร้อยละ 20-24) และอุณหภูมิของบารเรล (160-180 องศาเซลเซียส) มีผลต่อผลต่อลักษณะทางกายภาพ ( $P \leq 0.05$ ) คือ ความหนาแน่น อัตราการพองตัว และแรงกดแตก โดยความชื้นและอุณหภูมิของบารเรลที่สูงขึ้นส่งผลให้อัตราการพองตัวลดลง และความชื้นที่ร้อยละ 20 อุณหภูมิของบารเรล 170 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบสกรู 300 rpm ให้อัตราการพองตัวสูงสุด คือ 3.17

ความชื้นที่เหมาะสมในวัตถุดิบ จะทำให้เกิดความดันไอที่เหมาะสม และทำให้เกิดการพองตัว ถ้าความชื้นสูงเกินไป จะทำให้อัตราการพองตัวลดลง เนื่องจากปริมาณน้ำที่มีมาก จะทำให้ไอน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบไม่สามารถระเหยออกมาได้ทัน ในระยะเวลาอันรวดเร็วเมื่อไอน้ำผ่านพื้นหน้าไค (Die) จึงทำให้น้ำเหลืออยู่ในตัวอย่างเป็นจำนวนมาก การพองตัวจึงเกิดขึ้นได้ไม่ดี (Chiang and Johnson, 1977)

3. ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ (Particle size) มีผลต่อกระบวนการผลิตโดยขนาดอนุภาคของส่วนประกอบต่างๆในวัตถุดิบที่นำมาผสมกัน ควรจะต้องมีขนาดใกล้เคียงกัน เพราะถ้ามีขนาดไม่เท่ากันจะทำให้ผลิตภัณฑ์ออกมาไม่สม่ำเสมอ เกิดการสุกเป็นบางจุดไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การใช้วัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่เกินไปจะไม่เหมาะสมในการผลิต เพราะจะทำให้วัตถุดิบสุกไม่ทั่วถึง เกิดเป็นเม็ดแข็งขึ้นบางจุดในผลิตภัณฑ์ ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่เรียบสม่ำเสมอและขนาดของช่องอากาศของผลิตภัณฑ์มีขนาดใหญ่ และไม่สม่ำเสมอ ส่วนวัตถุดิบที่มีขนาดละเอียดมากจะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนได้ง่าย ทำให้มีปัญหาในการเดินเครื่อง และอาจทำให้เกิดการไหม้ (Jones, 1992) เอกซ์ทรูเดตที่ได้จากแป้งข้าวที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 60-100 ไมครอน มีลักษณะเนื้อสม่ำเสมอ ช่วยปรับปรุงลักษณะการไหลภายในบาร์เรลส่งผลให้ลดพลังงานที่ใช้แปรรูป ส่วนเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากแป้งข้าวที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 20-80 ไมครอน จะมีลักษณะพองกรอบ แข็ง (Pan *et al.*, 1992)

Desrumaux *et al.* (1998) กล่าวว่าเมื่ออนุภาคใหญ่ขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคลดลง ทำให้มีแรงเสียดทานต่อกันต่ำลง อุณหภูมิของโดจึงลดลง และส่งผลไปลดการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดต โดยโพรงอากาศภายในโครงสร้างจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยในขณะที่จำนวนของโพรงอากาศลดลง

Carvalho *et al.* (2010) ได้ผลิตเอกซ์ทรูเดตจากคอนมิล (Corn meal) โดยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ พบว่า ขนาดของอนุภาคขนาดเล็ก (500-710 ไมครอน) จะทำให้ air cell ภายในของเอกซ์ทรูเดตมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลง และอัตราการพองตัวเพิ่มขึ้น จึงมีผลต่อลักษณะทางเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดต เช่นเดียวกับการศึกษาของ Altan *et al.* (2009) ที่พบในเอกซ์ทรูเดตจากบาร์เลย์

#### 4. ส่วนผสมอื่น ๆ (Additive)

Boonyasirikul and Charunuch (2000) ได้พัฒนาขนมพองกรอบจากปลายข้าว พบว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้เพิ่มพองอากาศขนาดเล็ก ส่งผลให้มีการขยายตัวต่ำลง ทำให้ใช้แรงกดแตกเพิ่มขึ้น แม้ว่าผลิตภัณฑ์จะมีความหนาแน่นที่ต่ำ และมีการขยายตัวที่สูง แต่โครงสร้างมีความสม่ำเสมอ ของโพรงอากาศ ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรง

#### 10.2 ตัวแปรทางด้านกระบวนการ

1. อัตราการป้อน (Feed rate) สกรูป้อนเป็นตัวพาส่วนผสมของวัตถุดิบ เข้าไปในเครื่อง เมื่อความเร็วของสกรูป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Residence time) มีค่าลดลง ผลลัพธ์สุดท้ายมีลักษณะพองลดลง ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น และอัตราการพองตัวตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่การป้อนวัตถุดิบในอัตราลดลงโดยที่ความเร็วรอบของสกรูมีค่าคงที่ ทำให้ระดับการเติมเต็มภายในบาร์เรล (Degree of fill) ลดลง ส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองของโคภายในบาร์เรลและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการขยายตัวลด (Pan *et al.*, 1992)

2. ความเร็วของสกรู (Screw speed) เป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งของเครื่อง สกรูอัดเป็นสกรูที่พาส่วนผสมของวัตถุดิบให้ผ่านเข้าไปในเครื่อง โดยในระหว่างนี้จะมีการบด ผสม นวด ให้วัตถุดิบเกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และเกิดแรงอัด แรงเฉือน ความร้อนที่เกิดขึ้นรวมกับความร้อนจากเครื่อง ทำให้เกิดการสุกของแป้งและโปรตีน เมื่อความเร็วของสกรูอัดมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มีค่าลดลง ความเร็วสกรูอัดที่เหมาะสมคือ 100-200 รอบ/นาที ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (กมลวรรณ, 2541)

3. อุณหภูมิของบาร์เรล (Barrel temperature) เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มีการแบ่งการให้ความร้อนกับวัตถุดิบเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกเป็นช่วงต่อจากสกรูป้อน เป็นช่วงที่จะให้ความร้อนเบื้องต้นแก่วัตถุดิบ เป็นการเพิ่มอุณหภูมิในวัตถุดิบเพื่อที่จะเตรียมวัตถุดิบเข้าสู่ช่วงที่ 2 ต่อไปในช่วงที่ 2 อุณหภูมิที่ใช้จะต้องสูงขึ้นเพื่อให้วัตถุดิบเริ่มสุกและเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ ในช่วงสุดท้ายอุณหภูมิที่ใช้ต้องทำให้วัตถุดิบเกิดการสุกอย่างสมบูรณ์ ถ้าอุณหภูมิทางออกของเครื่องมากกว่า 100 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่พองตัวทันที เนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะไม่พองทันทีหลังออกจากเครื่อง เกิดเนื่องจากการ

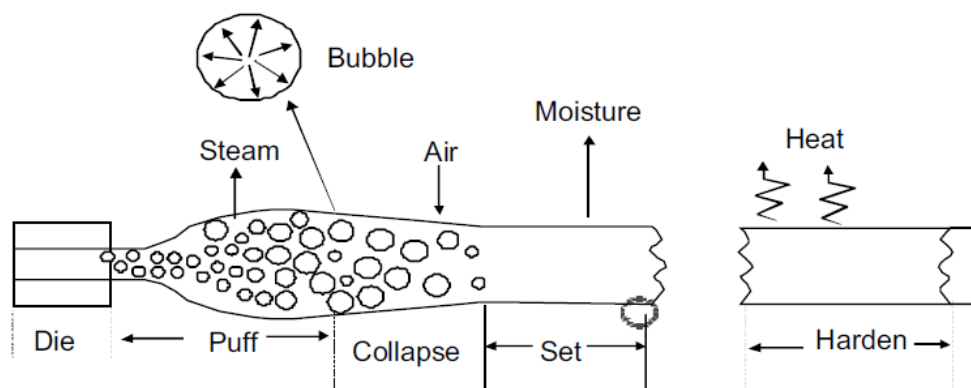
ลดอุณหภูมิช่วงใกล้ทางออกต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส (กมลวรรณ, 2541) Pan *et al.* (1992) รายงานว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตเอ็กซ์ทรูเดตจากข้าวเหนียวคือ 158 องศาเซลเซียส และ 145 องศาเซลเซียส สำหรับข้าวเจ้า ปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) จะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส และมีผลให้เอ็กซ์ทรูเดตมีอัตราการพองตัวลดลง

Chiang and Johnson (1977) ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้น พบว่า วัสดุที่มีความชื้นค่อนข้างสูง (ร้อยละ 18-22) ที่อุณหภูมิปานกลาง (88-104 เซลเซียส) จะได้ลักษณะที่ค่อนข้างแข็ง โครงสร้างภายในเล็ก และลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างเหนียว หากวัสดุมีความชื้นต่ำ (ร้อยละ 10-14) อุณหภูมิสูง (93-121 องศาเซลเซียส) จะได้ลักษณะที่พอง เบา โครงสร้างภายในเปิดกว้าง

4.การจัดเรียงสกรู (Screw configuration) สกรูเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สำคัญของเอ็กซ์ทรูเดอร์ ลักษณะ และตำแหน่งการจัดเรียงของสกรูมี โดยเฉพาะกับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ มีผลต่อการผสมของวัสดุ เวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่อง แรงเฉือน พลังงานกลที่ให้กับวัสดุ และอุณหภูมิของโถภายในเครื่อง การจัดแบบสกรูที่เป็นการเพิ่มแรงเฉือนใกล้ทางออกของเครื่อง จะเพิ่มการสูญเสียโครงสร้างของโมเลกุลแป้ง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่พอง มีลักษณะรูพรุนเล็ก และความคงทนต่อแรงกดลดลง (กมลวรรณ, 2541)

## 11. กลไกการพองตัว

โครงสร้างที่เป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์ที่มีแป้งเป็นส่วนผสมหลัก เริ่มจากการป้อนวัสดุเข้าสู่อุปกรณ์ แล้วผสมกับน้ำที่ป้อนเข้าสู่บาร์เรล จากการกระทำของสกรูในพื้นที่ที่จำกัดภายในบาร์เรล โดยมีทิศทางไปสู่ทางออกที่ใด สกรูในช่วงสุดท้ายจะช่วยเพิ่มความดันให้สูงขึ้น จากอุณหภูมิและความดันที่สูงขึ้นนี้ ส่งผลให้แป้งกลายเป็นเพสต์ เมื่อมวลหลอมถูกดันให้พ้นจากไดออกมา ความดันที่ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความแตกต่างของความดันภายในบาร์เรลและภายนอก ทำให้ไอน้ำซึ่งอยู่ในรูปไอน้ำร้อนยิ่งยวด ระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดลักษณะการพอง มีลักษณะเป็นรูพรุน (Harper, 1981) ภายใต้นี้จะมีการพองตัวมากที่สุด แต่เนื่องด้วยมวลหลอมยังมีความหนืดและความยืดหยุ่นอยู่ เมื่อความร้อนและความดันถูกปลดปล่อยออกมาจากโครงสร้าง จึงทำให้เกิดการยุบตัว (Collapse) เล็กน้อย ซึ่งหลังจากการยุบตัวนี้ มวลหลอมจะเริ่มแข็งตัว เนื่องจากความดันและความร้อน ถูกปลดปล่อยออกมาจนมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะแวดล้อม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เจลที่มีความคงตัว (Moraru and Kokini, 2003 และ Forte and Young, 2005)



ภาพที่ 10 กลไกการพองตัวของเอกซ์ทรูเดต

ที่มา: Pai *et al.* (2009)

## 12. วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง หรืออาร์เอสเอ็ม (Response surface methodology; RSM) ได้ถูกนำเสนอขึ้นโดย Box *et al.* ในปี ค.ศ.1987 ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือสถานะที่เหมาะสม (Optimization) ต่อผลตอบสนองนั้น โดยในกระบวนการผลิตหรือการทดลองหนึ่งๆ ประกอบด้วย ตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง (Dependent variable; Y) ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระหรือปัจจัย (Independent variables)  $X_1, X_2, \dots, X_k$  มีความสัมพันธ์เป็น

$$y = f(x_1, x_2 \dots x_k) + \varepsilon \quad (1)$$

โดย X คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัย

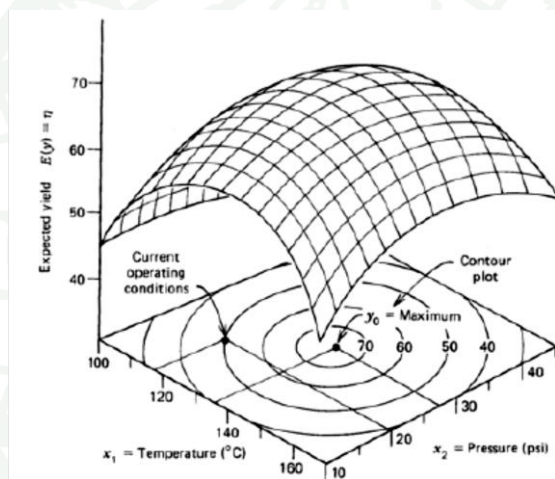
$\varepsilon$  คือ ค่าความผิดพลาดหรือสิ่งรบกวน (Error or noise) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหรือการทดลอง และมีผลต่อค่า y

ถ้ากำหนดว่า  $E(y) = f(x_1, x_2)$  ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$n = f(x_1, x_2 \dots x_k) \quad (2)$$

ซึ่งจะเรียกว่า พื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface) โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบสนองในรูปของกราฟิก โดยที่  $n$  จะถูกพล็อตกับระดับของ  $X_1$  และ  $X_2$  เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้น โครงร่าง (Contour plot)

ในภาพที่ 11 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม หรือตัวแปรตอบสนอง (Response variable) ซึ่งแสดงผลผลิตที่ได้ ( $y$ ) จากกระบวนการทางเคมี กับตัวแปรอิสระสองตัว คือ อุณหภูมิ ( $X_1$ ) และความดัน ( $X_2$ ) ซึ่งจะเห็นว่ารูปของผลตอบสนองมีลักษณะเป็นพื้นผิว จึงมักเรียกรูปที่แสดงค่าของผลตอบสนองที่เปลี่ยนไปตามค่าของตัวแปรอิสระว่า พื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface)



ภาพที่ 11 Surface plot ของพื้นผิวผลตอบสนอง

ที่มา: Montgomery (2005)

โดยทั่วไปแล้วเรามักจะไม่ทราบฟังก์ชันที่แท้จริงของพื้นผิวผลตอบสนอง ดังนั้นในขั้นตอนแรกในการหาพื้นผิวผลตอบสนอง คือการประมาณค่าความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรต้นหรือปัจจัยต่างๆ โดยทั่วไปจะใช้สมการลำดับที่ 1 (First-order model) โดยมีรูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \varepsilon \tag{3}$$

แต่ในกรณีที่มีผิวโค้ง (Curvature) จะใช้สมการลำดับที่ 2 (Second-order model) โดยมีรูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

โดยที่  $y$  คือ ฟังก์ชันผลตอบ (Response function) และ  $\varepsilon$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Error)

อย่างไรก็ตามการใช้ RSM ในการหาสถานะหรือจุดที่เหมาะสมนั้น จำเป็นต้องอาศัยพื้นฐานทางด้าน การวางแผนการทดลอง (Experimental design) และการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) (Hu, 1999 และ Myers and Montgomery, 2002) รวมไปถึงทักษะการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้าง Contour หรือ Surface plots โปรแกรมสำเร็จรูปที่สามารถวิเคราะห์และสร้าง Contour หรือ Surface plots มีหลายโปรแกรม เช่น SAS, Minitab, MathCad, Design Expert, Statistica, JMP และ R- Program เป็นต้น (อิสรพงษ์, 2550)

### 13. แผนการทดลอง Central composite design (CCD)

วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง โดยทั่วไปจะไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริงจึงนิยมประมาณรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระด้วยสมการโพลีโนเมียลอันดับ 2 (Second order -polynomial model) ซึ่งแผนแบบที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาสมการโพลีโนเมียลอันดับ 2 จะใช้แผน Central composite design (CCD) ซึ่งนำเสนอโดย Box และ Wilson ในปี 1951

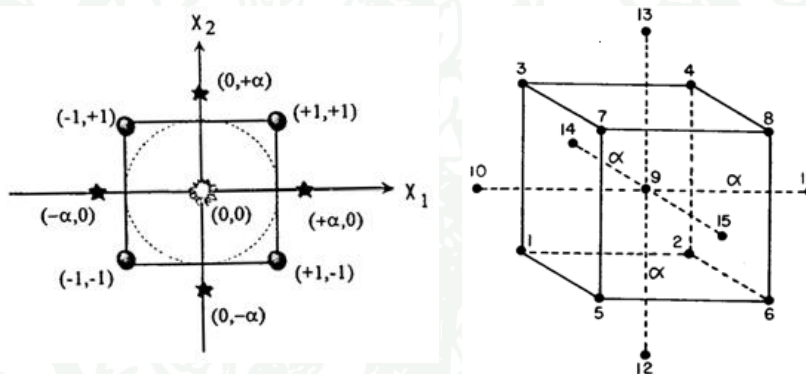
แผนการทดลองแบบ CCD ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ (Hu, 1999 ; Myers and Montgomery, 2002; Montgomery, 2005)

1. ส่วนแฟคทอเรียล (Factorial points;  $2^k$ ) เป็นส่วนที่ประกอบด้วยแผนแบบแฟคทอเรียลที่มี  $k$  ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งใช้สัญลักษณ์  $-1$  แทนระดับต่ำ และ  $+1$  แทน ระดับสูง ซึ่งจะมีจำนวนการทดลอง (Run) เท่ากับ  $2^k$  โดยในส่วนของแฟคทอเรียลพอยท์นั้นถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าอิทธิพลเชิงเส้น (Linear term) และอิทธิพลอันตรกิริยา (Interaction term)

2. ส่วนจุดแกน (Star or Axial points;  $2k$ ) ประกอบด้วยข้อมูลที่แต่ละจุดอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง ด้วยระยะทางที่เท่ากันคือระยะ  $\alpha$  โดย มีจำนวนการทดลอง เท่ากับ  $2k$  โดยในส่วนของจุดแกน นั้นถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าอิทธิพลกำลังสอง (Quadratic term)

3. ส่วนจุดศูนย์กลาง (Center points;  $n_c$ ) เป็นส่วนที่ใช้เพื่อช่วยในการคำนวณ pure error สำหรับการทดสอบความเหมาะสมของรูปแบบ (Lack-of-fit test: LOF)

ดังนั้นแผนการทดลองแบบ CCD มีจำนวนหน่วยทดลองหรือขนาดของแผนแบบ (Design size ;  $N$ ) ทั้งหมดเท่ากับ  $N = 2^k + 2k + n_c$  ซึ่งการทดลองตามส่วนประกอบดังกล่าวสำหรับแผนแบบ CCD ที่มี 2 และ 3 ปัจจัยสามารถแสดงตำแหน่งของข้อมูล ได้ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แผนการทดลองแบบ CCD สำหรับ 2 และ 3 ปัจจัย

ที่มา: Hu (1999) และ Montgomery (2005)

สำหรับจุดแกน หรือ แอลฟา ( $\alpha$ ) สามารถคำนวณ โดยใช้สูตร

$$\alpha = \pm 2^{n/4}$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ตั้งแต่ 2 ขึ้นไป ( Myers and Montgomery, 2002 )

ในการทดลองทั่วไปจะมีหน่วยของปัจจัย แต่ในการทดลอง RSM จะต้องทำการแปลงค่าที่ใช้ในการทดลอง (Actual value) ให้เป็นตัวแปรรหัสก่อน (Coded value) ซึ่งจะไม่มีการแปลงค่า ดังนี้ คือ

$$\text{ตัวแปรรหัส} = \frac{\text{ตัวแปรเดิม} - (\text{ระดับสูง} + \text{ระดับต่ำ}) / 2}{(\text{ระดับสูง} - \text{ระดับต่ำ}) / 2}$$

#### 14. การวิเคราะห์สมการการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบสนอง

1. ทดสอบความสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและเซตของตัวแปรถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น (ร้อยละ 95 หรือ 99) โดยพิจารณาสมมติฐานที่เหมาะสมของแต่ละแบบ ซึ่งพิจารณาจากค่า  $P$ -value

$$H_0: \text{All } \beta_i = 0 \quad (\text{Model does not exist})$$

$$H_1: \text{At least one } \beta_i \neq 0 \quad (\text{Model exist})$$

จะปฏิเสธ  $H_0$  ต่อเมื่อ ค่า  $P$ -value  $\leq$  ค่า  $\alpha$  ที่กำหนด ( $P \leq 0.05$  หรือ  $0.01$ ) หมายความว่าสมการที่สร้างสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่า  $Y$  ได้ (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2551)

เมื่อทำการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ได้สมการแล้วจากสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปร ทำให้ทราบได้ว่าตัวแปรใดมีอิทธิพลสูงกว่า หากสัมประสิทธิ์ของตัวแปรสูงกว่าตัวแปรอื่น (ไม่คิดเครื่องหมายบวกหรือลบ โดยเครื่องหมายดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์ที่แปรผันตามหรือผกผัน) ย่อมแสดงว่าตัวแปรนั้นมีอิทธิพลต่อค่าตอบสนองสูงกว่าอีกตัวแปรหนึ่ง นอกจากนี้อาจสังเกตได้จากค่า  $P$ -value ของตัวแปร โดยค่า  $P$ -value น้อยแสดงถึง จะมีอิทธิพลมากขึ้นด้วย (อิสรพงษ์, 2550)

#### 2. การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-fit test; LOF)

การทดสอบ LOF เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือสมการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ซึ่งพิจารณาจากค่า  $P$ -value ซึ่งมีสมมติฐานในการทดสอบ คือ

$$H_0: \text{สมการมีความเหมาะสมกับข้อมูล (There's no LOF)}$$

$$H_1: \text{สมการไม่เหมาะสมกับข้อมูล (There's LOF)}$$

จะปฏิเสธ  $H_0$  ต่อเมื่อ ค่า  $P$ -value  $\leq$  ค่า  $\alpha$  ที่กำหนด ( $P \leq 0.05$  หรือ  $0.01$ )

### 3. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficients of determination; $R^2$ )

R-Squared ( $R^2$ ) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความแปรผันทั้งหมดใน Y อธิบายโดยความแปรผันใน X หรืออธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่สร้างได้เหมาะสมกับข้อมูลเพียงไร ถ้า  $R^2$  มีค่ามากขึ้น แสดงว่าสมการถดถอยที่สร้างได้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงได้

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, 0 \leq R^2 \leq 1$$

ค่า  $R^2$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยที่ 0 แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์ใดๆ ระหว่างตัวแปรอิสระและค่าตอบสนอง และ 1 แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ โดยทั่วไปสมการที่มักนำไปใช้ควรมีค่า  $R^2$  อย่างน้อย 0.75 หากสูงกว่า 0.9 ถือว่าดีมาก (Hu, 1999)

Adjusted R-Squared ( $R_{adj}^2$ ) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ซึ่งเป็นค่าที่วัดว่ารูปแบบเหมาะสมกับข้อมูลอย่างไร โดยการนำ Degree of freedom มาพิจารณาด้วย คำนวณได้จากสมการ

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SSE/(n - k - 1)}{SST/(n - 1)}, 0 \leq R_{adj}^2 \leq 1$$

ในทางปฏิบัติค่า  $R^2$  มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง คือ ถ้ามีการเพิ่มตัวแปรอิสระเข้าไปในสมการ จะทำให้ค่า  $R^2$  สูงขึ้น จึงมีการใช้ค่า  $R_{adj}^2$  แทน (ประไพศรี และพงศ์ชนัน, 2551)

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ
  - 1.1 ข้าวเปลือกพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 จากศูนย์วิจัยข้าวเชียงใหม่ เก็บเกี่ยวธันวาคม 2552
  - 1.2 ข้าวเปลือกพันธุ์ กข 10 จากศูนย์วิจัยข้าวเชียงใหม่ เก็บเกี่ยวพฤศจิกายน 2552
  - 1.3 น้ำมันรำข้าว ตราคิง
  - 1.4 ผงปรุงรสบาร์บีคิว บริษัท Thai Quest Co., Ltd. ประเทศไทย
  - 1.5 กรดซิตริก
  - 1.6 โซเดียมซิเตรต
  - 1.7 โซเดียมไฮโปคลอไรต์
  - 1.8 อบเชยผง ตรามือที่ 1
  - 1.9 ขมิ้นผง ตราท็อปส์
2. อุปกรณ์ผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกและแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก
  - 2.1 เครื่องผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกต้นแบบ
  - 2.2 เครื่องกะเทาะเปลือกข้าว หจก. เจริญช่างอุตสาหกรรม ประเทศไทย
  - 2.3 เครื่องคัดเมล็ดข้าว หจก. เจริญช่างอุตสาหกรรม ประเทศไทย
  - 2.4 ตู้บ่ม (Incubator) บริษัท Memmert instrument ประเทศเยอรมันนี
  - 2.5 ตู้แช่เย็น (Refrigerator) รุ่น PT 203 บริษัท อาปาเช่ ประเทศอิตาลี
  - 2.6 ตู้อบแห้งลมร้อนแบบถาด (Tray dryer) บริษัท Kan Seng Lee Machinery (1960) Ltd. ประเทศไทย
  - 2.7 เครื่องบดของแห้ง (Ultra centrifugal mill) บริษัท Retsch ประเทศเยอรมันนี
3. อุปกรณ์ผลิตขนมกรอบพอง
  - 3.1 เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (Co-rotating twin screw extruder) รุ่น ZE 25x33D, Herman Berstorff Laboratory ประเทศเยอรมันนี
  - 3.2 เครื่องบดของแห้ง (Fitz mill) ประเทศเยอรมันนี
  - 3.3 เครื่องผสมของแห้ง (Telegram bear mixer) ประเทศไทย

- 3.4 เครื่องอบลมร้อนแบบถาด (ไทยประดิษฐ์)
- 3.5 เครื่องเคลือบแบบหม้อทรงแปดเหลี่ยม (ไทยประดิษฐ์)

#### 4. อุปกรณ์วิเคราะห์คุณภาพแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกและขนมกรอบพอง

##### 4.1 อุปกรณ์วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

- 4.1.1 เวอร์เนียคาลิเปอร์
- 4.1.2 เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid visco analyzer) รุ่น RVA 4D บริษัท Newport Scientific Ltd. ประเทศออสเตรเลีย
- 4.1.3 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) รุ่น TA-XT Plus Stable Micro Systems ประเทศอังกฤษ พร้อมหัววัด แบบทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร (P 36R)
- 4.1.4 เครื่องวัดสี Spectrophotometer รุ่น CM- 3500d บริษัท Minolta ประเทศญี่ปุ่น
- 4.1.5 กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Sterio Microscope) รุ่น Leica S8 APO บริษัท Leica Microsystems ประเทศเยอรมันนี
- 4.1.6 เครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน (Centrifuge) บริษัท Heraeus instrument ประเทศเดนมาร์ก

##### 4.2 อุปกรณ์วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

- 4.2.1 ชุดวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Kjeldahl ประกอบด้วย เครื่องย่อย (K-434 digestion unit) และเครื่องกลั่น (B-324 distillation unit) บริษัท Buchi ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 4.2.2 เครื่องวิเคราะห์ไขมัน (Soxtec systems) รุ่น HT 1043 บริษัท Tecator ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
- 4.2.4 เตาเผาอุณหภูมิสูง (Muffle furnace) รุ่น Tactical 308 บริษัท Gallenkamp ประเทศอังกฤษ
- 4.2.5 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) รุ่น Genesys-10 บริษัท Thermo Scientific ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 4.2.6 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น FED53 บริษัท Binder ประเทศเยอรมันนี

#### 5. คอมพิวเตอร์และโปรแกรมประมวลผลข้อมูล

- 5.1 โปรแกรม SPSS version 15
- 5.2 โปรแกรม Minitab version 16

## 6. แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

### วิธีการ

#### 1. การผลิตข้าวกล้องเริ่มงอก

1.1 นำข้าวเปลือกทั้ง 2 สายพันธุ์ คือ ข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 มากะเทาะเป็นข้าวกล้อง และนำไปคัดแยกเมล็ดที่แตกหักออก

1.2 การผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกในห้องปฏิบัติการ คัดแปลงจากวิธีของ จารูรัตน์และคณะ (2550) และ Varayanond *et al.* (2005) วางแผนการทดลองแบบ Central composite design (CCD) ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (RSM) ปัจจัยในการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิและเวลา (ตารางที่ 14 และ 15) การผลิตข้าวกล้องเริ่มงอก โดยนำข้าวกล้องที่แยกเมล็ดแตกหักออก นำเมล็ดที่สมบูรณ์ มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า จากนั้นนำมาแช่ในน้ำที่ ปรับ pH เท่ากับ 5.0 ด้วย สารละลาย ซิเตรตบัฟเฟอร์ (citrate buffer) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่มีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ผสมอยู่ โดยใช้อัตราส่วนของข้าวกล้องต่อสารละลายเป็น 1 : 1.8 โดย น้ำหนักต่อปริมาตร โดยใช้ตัวอย่าง 2 กิโลกรัมต่อน้ำ 3.8 ลิตรต่อสิ่งทดลอง และทำการเปลี่ยน น้ำใหม่ทุก ๆ 6 ชั่วโมง จนครบตาม เวลาที่กำหนด แล้วอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนแบบถาด ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนได้ความชื้นสุดท้าย ประมาณร้อยละ  $12 \pm 2$  แล้วเก็บรักษา ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เพื่อใช้วิเคราะห์คุณสมบัติอื่น ๆ ต่อไป ดังภาพที่ 14

ตารางที่ 14 ปัจจัยการทดลองตามแผนการทดลอง CCD แบบ 2 ปัจจัย

ตัวแปรต้น	สัญลักษณ์	รหัส (code factor level)				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	Temp	17.9	20	25	30	32.1
เวลา (ชั่วโมง)	Time	19	24	36	48	53

หมายเหตุ:  $\alpha = \pm 1.41$

ตารางที่ 15 จำนวนสิ่งทดลองตามแผนการทดลอง CCD แบบ 2 ปัจจัย

สิ่งทดลอง	Coded value		Natural value	
	$X_1$	$X_2$	Temperature	Time
1	-1	-1	20	24
2	-1	1	20	48
3	1	-1	30	24
4	1	1	30	48
5	-1.41	0	17.9	36
6	1.41	0	32.1	36
7	0	-1.41	25	19
8	0	1.41	25	53
9-11	0	0	25	36

### 1.3 การตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านเคมีของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

1.3.1 ปริมาณโปรตีน ไขมัน และเถ้า ตามวิธีของ AOAC (2000)

1.3.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar content) ตามวิธีของ Nelson-Somogyi 's method (Somogyi, 1951)

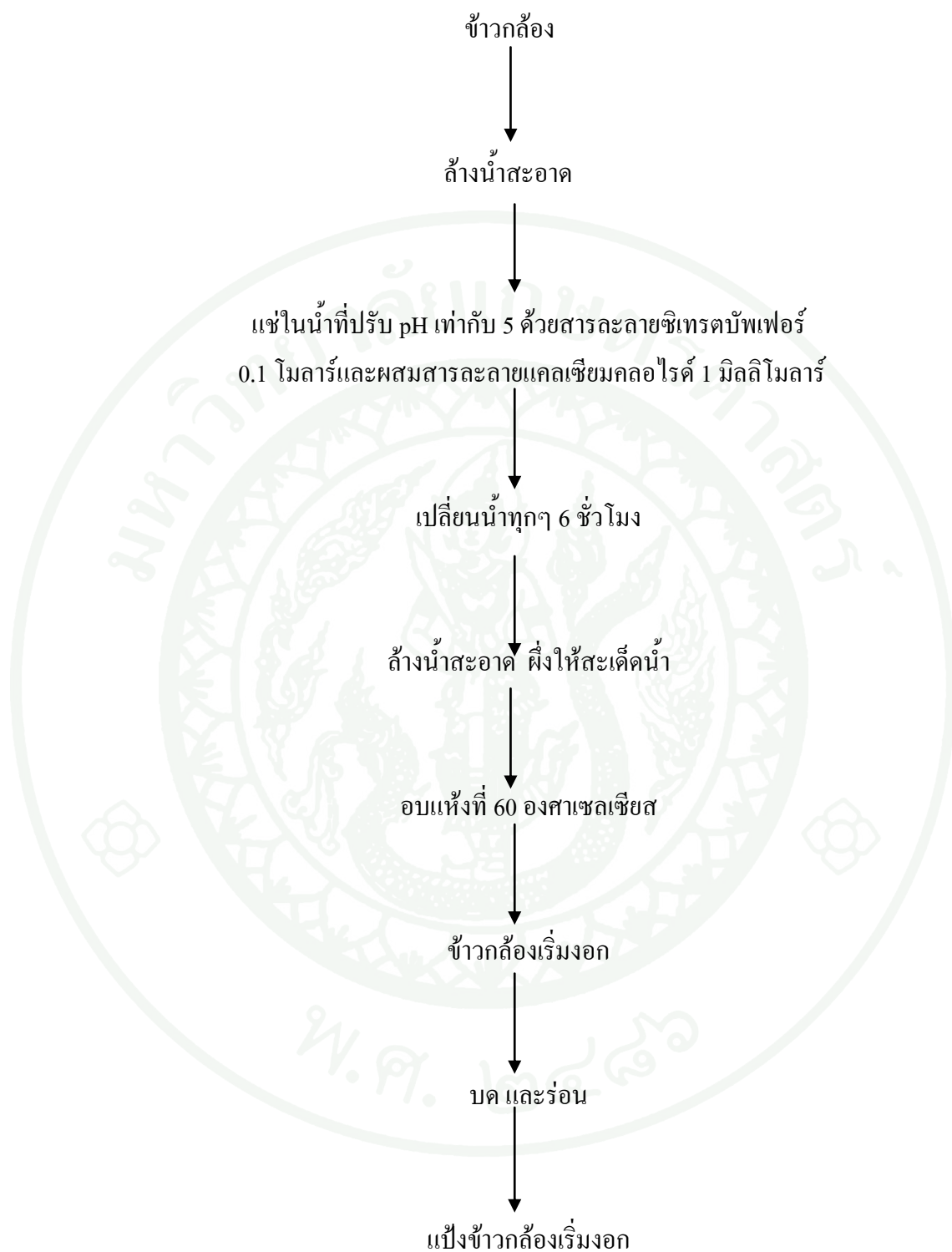
1.3.3 ปริมาณสารกาบา ( $\gamma$ -aminobutyric acid content; GABA) ด้วยวิธี HPLC ส่งวิเคราะห์ที่สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร

### 1.4 การตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านกายภาพของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

1.4.1 การเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting properties) ของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก ตามวิธีของ AACC (2000)

### 1.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์สมการถดถอย (Regression analysis) โดยใช้สมการโพลิโนเมียลอันดับ 2 (Second - order polynomial) และสร้าง Surface plots ด้วยโปรแกรม Minitab



ภาพที่ 13 วิธีการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกและแบ่งข้าวกล้องเริ่มงอก

ที่มา: คัดแปลงจากจากรัตน์และคณะ (2550) และ Varayanond *et al.* (2005)

## 2. การผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกด้วยเครื่องเพาะข้าวงอกต้นแบบ

เครื่องเพาะข้าวงอกต้นแบบ ออกแบบโดย ดร. สิริชัย ส่งเสริมพงษ์ วิธีการผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกโดยใช้เครื่องเพาะข้าวกล้องงอก เริ่มจากนำเมล็ดข้าวกล้องที่สมบูรณ์ นำมาแช่ในสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) ความเข้มข้นร้อยละ 0.1 นาน 20 นาที แล้วล้างด้วยน้ำประปา 2 ครั้ง จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องเพาะข้าวงอก

### 2.1 การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากเครื่องเพาะข้าวงอก

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis) เช่นเดียวกับข้อ 1.3.1

2.1.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar content) เช่นเดียวกับข้อ 1.3.2

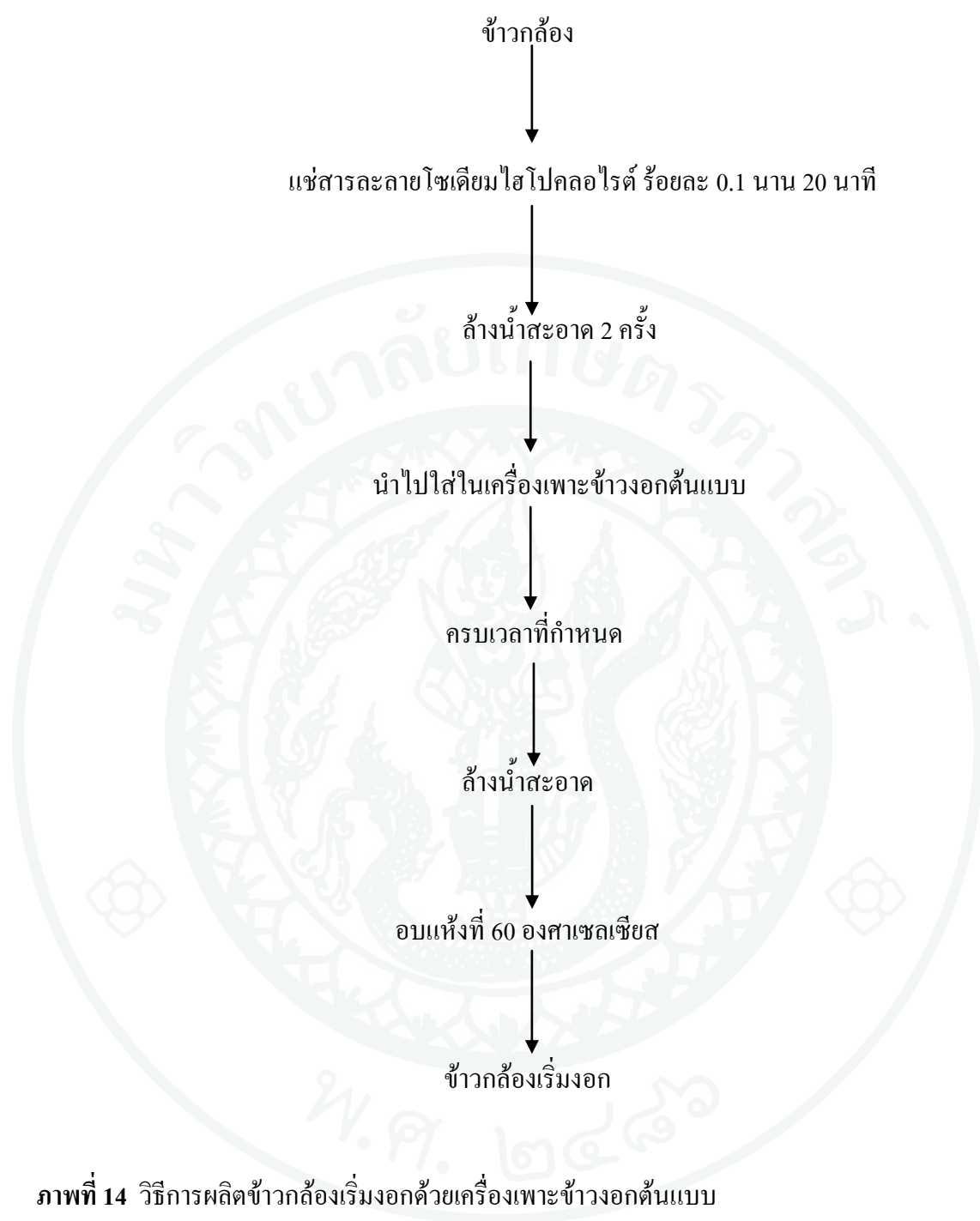
2.1.3 ปริมาณสารกาบา (GABA) เช่นเดียวกับข้อ 1.3.3

### 2.2 การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากเครื่องเพาะข้าว งอก

2.2.1 การเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting properties) เช่นเดียวกับข้อ 1.4.1

### 2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพ มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี t-test โดยใช้โปรแกรม SPSS



ภาพที่ 14 วิธีการผลิตข้าวกล็องเริ่มงอกด้วยเครื่องพะข้าวอกต้นแบบ

### 3. สภาพที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

3.1 นำข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผลิตได้จากข้อ 2. ทั้ง 2 สายพันธุ์ คือข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 มาบดด้วยเครื่องบดของแห้ง Fitz mill ด้วยตะแกรงขนาด 40 เมช

3.2 นำแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกทั้ง 2 สายพันธุ์ มาผสมกันตามอัตราส่วน (แสดงในตารางที่ 16 และ 17) ในเครื่องผสมแบบตั้งนาน 10 นาที

3.3 เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ชนิดหมุนตามกัน (Co-rotating twin-screw extruder) รุ่น Herman Berstoff Laboratory, ZE 25x33D ประเทศเยอรมัน ประกอบด้วยบาร์เรล 7 ท่อนเรียงต่อกัน ส่วนที่ให้ความร้อนที่สามารถควบคุมได้ แยกเป็นอิสระต่อกัน และปิดด้วยหัวใด (Die head) ความหนา 24.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีรูเปิด (Circular die hole) เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร ความยาวของบาร์เรลต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง (L/D) เป็น 875/25 อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สามารถอ่านได้จากเทอร์โมคัลเปิดที่เสียบอยู่ที่ใด (Die) วัตถุประสงค์ถูกป้อนโดยถังป้อนแบบปริมาตร (K-Tron soder AG 5702, Type 20 ประเทศสวีเดน) และมีปั๊มเติมน้ำ (Metering pump) เพื่อเติมน้ำเข้าสู่ส่วนต้นของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ให้ผสมกับวัตถุดิบ

3.4 ควบคุมอัตราการป้อนวัตถุดิบ ให้คงที่ ด้วยความเร็ว 16 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิของบาร์เรลเป็น 30 45 55 95 125 140 และ 130 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิที่หัวใด (Die head) เป็น 120 องศาเซลเซียส

3.5 นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที พักให้เย็นแล้วบรรจุในถุงพลาสติก นำไปวิเคราะห์คุณภาพต่อไป

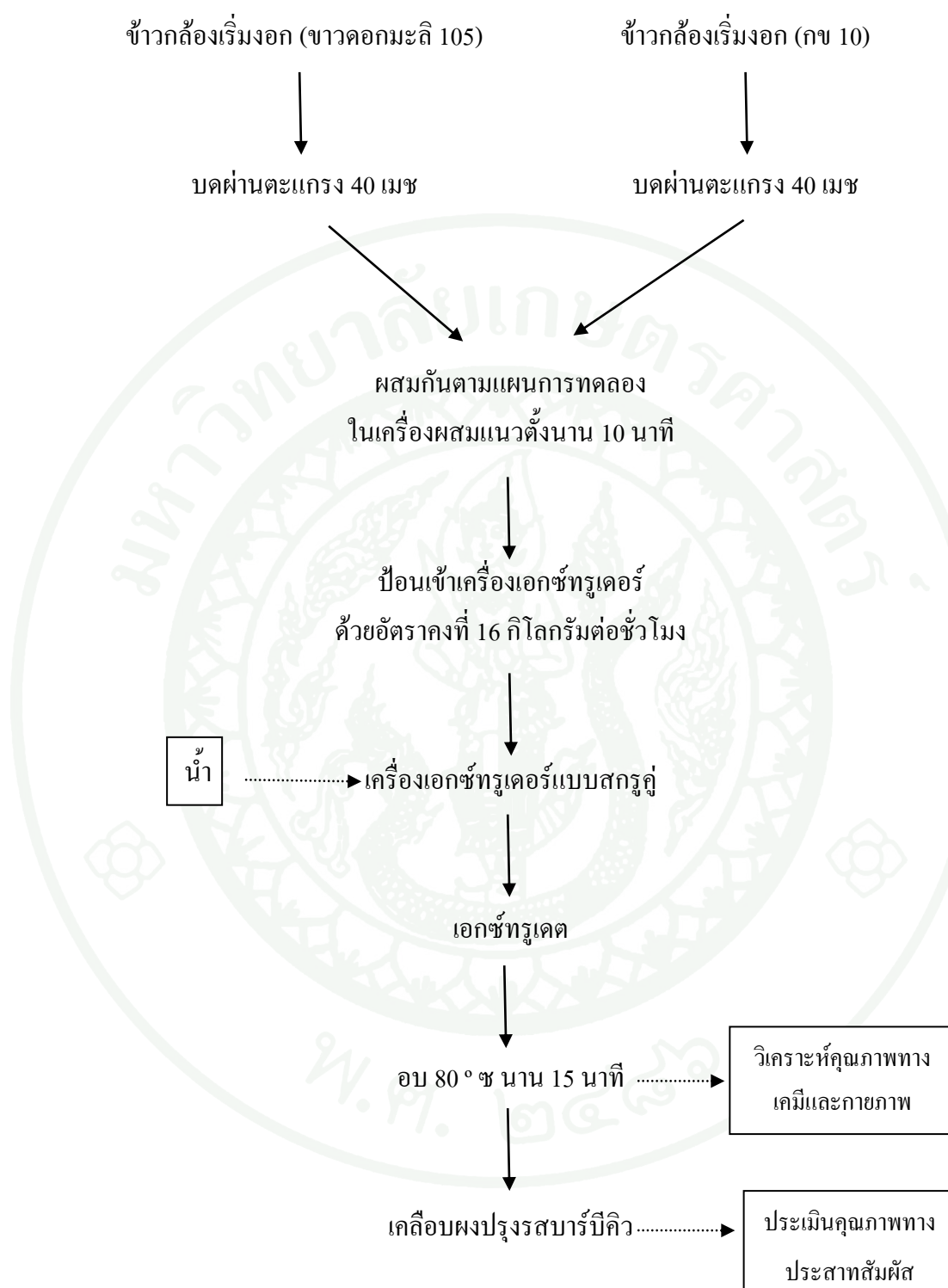
ตารางที่ 16 ปัจจัยการทดลองตามแผนการทดลอง CCD แบบ 3 ปัจจัย

ตัวแปรต้น	สัญลักษณ์	รหัส (code factor level)				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
ความชื้นของวัตถุดิบ (%)	FM	15.6	17	19	21	22.3
ความเร็วรอบของสกรู (rpm)	SS	264	300	350	400	434
แป้งข้าวกล้องเริ่มออก กข 10 (%)	PGBR-RD 10	0	10	30	50	63.6

หมายเหตุ:  $\alpha = \pm 1.68$

ตารางที่ 17 จำนวนสิ่งทดลองตามแผนการทดลอง CCD แบบ 3 ปัจจัย

สิ่งทดลอง	Coded value			Natural value		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	FM	SS	PGBR-RD 10
1	-1	-1	-1	17	300	10
2	1	-1	-1	21	300	10
3	-1	1	-1	17	400	10
4	1	1	-1	21	400	10
5	-1	-1	1	17	300	50
6	1	-1	1	21	300	50
7	-1	1	1	17	400	50
8	1	1	1	21	400	50
9	-1.68	0	0	15.6	350	30
10	1.68	0	0	22.3	350	30
11	0	-1.68	0	19	264	30
12	0	1.68	0	19	434	30
13	0	0	-1.68	19	350	0
14	0	0	1.68	19	350	63.6
15-17	0	0	0	19	350	30



ภาพที่ 15 การผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

### 3.6 การตรวจสอบคุณภาพทางเคมีของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

#### 3.6.1 องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis) ตามข้อ 1.3.1

#### 3.6.2 ปริมาณสารกาบา (GABA) ตามข้อ 1.3.3

### 3.7 การตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

#### 3.7.1 อัตราการพองตัว (Expansion ratio) ตามวิธีของ Alvarez-Martinez *et al.* (1988)

$$\text{อัตราการพองตัว} = \frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเอกซ์ทรูเดต}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรูเปิด}}$$

#### 3.7.2 ความหนาแน่น (Density) ตามวิธีของ Alvarez-Martinez *et al.* (1988)

$$\text{ความหนาแน่น (g/cm}^3\text{)} = \frac{4m}{\pi D^2 L}$$

เมื่อ  $m$  = น้ำหนักของเอกซ์ทรูเดต (กรัม)

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเอกซ์ทรูเดต (เซนติเมตร)

$L$  = ความยาวของเอกซ์ทรูเดต (เซนติเมตร)

#### 3.7.3 ดัชนีการดูดซับน้ำ (Water absorption index; WAI) และดัชนีการละลายน้ำ (Water solubility index; WSI) ตามวิธีของ Anderson *et al.* (1969)

ชั่งตัวอย่างเอกซ์ทรูเดตที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงแล้ว ปริมาณ 0.300 กรัม (โดยฐานแห้ง) ใส่ในหลอดที่มีฝาปิดที่ทราบน้ำหนักแล้ว จากนั้นเติมเอทานอลร้อยละ 95 ลงไป 1 มิลลิลิตร เมื่อช่วยในการกระจายตัว และเติมน้ำ 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วนำไปแช่ใน water bath ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยทำการเขย่าเป็นระยะ จากนั้นนำไปเหวี่ยงแยกที่ 3,000 g เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนใสออกจากหลอด แล้วนำไปอบที่ตู้อบลม ร้อนอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักของแข็งที่ผ่านการอบแห้งจากส่วนใส เพื่อหาปริมาณเอกซ์ทรูเดตที่ละลายน้ำได้ (WSI) แล้วชั่งน้ำหนักส่วนของเจล ในหลอด แล้วคำนวณหาความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI)

$$\text{WAI (g/g)} = \frac{\text{น้ำหนักของเจล}}{\text{น้ำหนักของเอกซ์ทรูเดต}}$$

$$\text{WSI (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของของแข็งที่ละลายในน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักของเอกซ์ทรูเดต}}$$

3.8 การตรวจสอบลักษณะทางเนื้อสัมผัส (Textural properties) คัดแปลงจากวิธีของ Altan *et al.* (2008); Ding *et al.* (2005); Singh *et al.* (2009)

โดยใช้เครื่อง Texture analyzer รุ่น TA-XT plus ใช้หัววัดแบบทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 36 มิลลิเมตร (36R - cylinder aluminum probe) กำหนดสภาวะในการวัดดังนี้ ความเร็วที่เคลื่อนที่ลงมาก่อนสัมผัสตัวอย่างมีอัตรา 5 มิลลิเมตรต่อวินาที (pre-test speed) ความเร็วที่เคลื่อนที่ลงมาในเนื้อตัวอย่าง 5 มิลลิเมตรต่อวินาที (test speed) ความเร็วที่เคลื่อนที่ออกหลังจากการวัด 10 มิลลิเมตรต่อวินาที (post-test speed) ระยะทางที่ตัววัดกดลงบนตัวอย่างเป็น 50 % ของ ความสูงของชิ้นตัวอย่าง (50% strain) ซึ่งจะบันทึกหลังจากที่วัดแรงกดได้ 5 กรัม (trigger force) โดยทำการวัด 10 ตัวอย่างในแต่ละสิ่งทดลอง ทำการบันทึกกราฟ และวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Texture Exponent 32

ความแข็ง (Hardness) คือค่าแรงกดสูงสุด (maximum peak force) หน่วยเป็น นิวตัน

ความเปราะ (Brittleness) ระยะทางที่เกิดจากการกด (distance) หน่วยเป็น มิลลิเมตร

ความเหนียว (Toughness) อ่านจากพื้นที่ใต้กราฟที่เกิดจากการกด (area under the curve) มีหน่วยเป็น นิวตัน/มิลลิเมตร

3.9 ลักษณะโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (Sterio microscope) คัดแปลง จากวิธีของ Ernoult *et al.* (2002)

นำตัวอย่างเอกซ์ทรูเดตที่อบแห้งแล้ว มาตัดตามขวาง ความสูงประมาณ 2.5-3.5 เซนติเมตร นำมาวางบนฐานที่มีพื้นสีดำ ใช้กำลังขยายที่ 10 เท่า (10X) บันทึกภาพ

### 3.10 การประเมินทางประสาทสัมผัส

ทำการเคลือบตัวอย่างเอกซ์ทรูเดตด้วย ผงปรุงรสบาบีคิว ในอัตราส่วนของเอกซ์ทรูเดต : น้ำมันรำข้าว : ผงปรุงรสบาบีคิว เป็น 85:10:5 โดยน้ำหนัก โดยสเปรย์น้ำมันพืชลงบนเอกซ์ทรูเดต ในหม้อเคลือบทรงแปดเหลี่ยมที่หมุน และมีลมร้อนเป่าตลอดเวลา (Charunuch *et al.*, 2003 )

ใช้แบบทดสอบ 9-Point hedonic scale (1 หมายถึงไม่ชอบมากที่สุด และ 9 หมายถึงชอบมากที่สุด) โดยผู้ทดสอบเป็นนักศึกษาปริญญาตรี โท และเอก ของภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วางแผนการทดลองแบบ Balance incomplete block design (BIB) โดยมีจำนวนตัวอย่าง ( $t$ ) = 15 จำนวนตัวอย่างต่อบล็อก ( $k$ ) = 3 จำนวนซ้ำของแต่ละตัวอย่าง ( $r$ ) = 7 จำนวนผู้ทดสอบ ( $b$ ) = 35 และจำนวนครั้งที่แต่ละตัวอย่างปรากฏร่วมกัน ( $\lambda$ ) = 1 (Gacula, 1993) โดยประเมินคุณลักษณะในด้านต่างๆ ดังนี้

ลักษณะปรากฏ (Apperance)

รสชาติ (Taste)

เนื้อสัมผัส (Texture)

ความชอบรวม (Overall liking)

### 3.11 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.11.1 นำผลจากการวิเคราะห์เคมีและกายภาพมาวิเคราะห์หาสมการถดถอย (Regression analysis) และนำมาสร้าง Surface plots ด้วยโปรแกรม Minitab

3.11.2 ผลการประเมินทางประสาทสัมผัสมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ด้วยโปรแกรม SPSS

3.11.3 หาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองโดยใช้วิธี Overlaid plot ด้วยโปรแกรม Minitab และทำการทวนสอบ

#### 4. การผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร

สถานะที่เหมาะสมในข้อ 3. นำมาผสมสมุนไพร 2 ชนิด คือ อบเชยผง และ ขมิ้นผง

อบเชยผงร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนักแป้ง

ขมิ้นผงร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนักแป้ง

ทำการตรวจสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ดังนี้

4.1 คุณภาพทางเคมี (Proximate analysis) ตามข้อ 1.3.1

4.2 คุณภาพทางกายภาพ ตามข้อ 3.8

4.3 การวัดสี ด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Minolta รุ่น CM 3500d) ใช้แหล่งกำเนิดแสง (Illuminant) D<sub>65</sub> มุมสังเกตการณ์มาตรฐาน (Standard observer) 10 องศา รายงานผลเป็นค่า L\* a\* b\* และ Total color difference ( $\Delta E$ )

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

เมื่อ  $\Delta L^*$  = ค่า  $L^*$  ของขนมกรอบพอง - ค่า  $L^*$  ของวัตถุดิบ

$\Delta a^*$  = ค่า  $a^*$  ของขนมกรอบพอง - ค่า  $a^*$  ของวัตถุดิบ

$\Delta b^*$  = ค่า  $b^*$  ของขนมกรอบพอง - ค่า  $b^*$  ของวัตถุดิบ

4.4 การประเมินทางประสาทสัมผัส

เตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับข้อ 3.10

ใช้แบบทดสอบ 9-Point hedonic scale (1 หมายถึงไม่ชอบมากที่สุด และ 9 หมายถึงชอบมากที่สุด) โดยผู้ทดสอบเป็นนักศึกษาปริญญาตรี โท และเอก ของภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 40 คน วางแผนการทดลองแบบ Randomized complete block design (RCBD) คุณลักษณะที่ต้องการทดสอบ คือ

สี (Color)  
 กลิ่น (Odor)  
 รสชาติ (Taste)  
 เนื้อสัมผัส (Texture)  
 ความชอบโดยรวม (Overall liking)

#### 4.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัสวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธีของ Duncan's new multiple range test (DMRT) โดยใช้โปรแกรม SPSS

#### 10. สถานที่ทำการทดลอง

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมอาหาร และห้องปฏิบัติการเคมีอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โรงงานทดลองผลิต 1 สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

#### 11. ระยะเวลาในการทำวิจัย

ระยะเวลาทำวิจัย ธันวาคม 2552 ถึง ธันวาคม 2553

## ผลและวิจารณ์

### 1. การผลิตข้าวกล้องเริ่มงอก

#### 1.1 องค์ประกอบทางเคมี

จากการทดลองผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการแช่น้ำ ตามแผนการทดลอง Central composite design (CCD) แบบ 2 ปัจจัย ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ กัน ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอก และวิเคราะห์ผล โดยใช้โปรแกรม Minitab

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แสดงในตารางที่ 18 และสมการผลตอบแทน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination;  $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับ (Adjusted coefficient of determination;  $R_{adj}^2$ ) แสดงในตารางที่ 19

จากการทดลอง พบว่า ทุกสภาวะการผลิตส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอก ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า น้ำตาลรีดิวิซ์และสารกาบา เพิ่มขึ้นจากตัวอย่างข้าวกล้องปกติ (ควบคุม) Bewley and Black (1994) กล่าวว่า น้ำมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้น การทำงานของเอนไซม์ การละลายและการขนส่งสารเมทาบอลิต์ (Metabolite) ที่เกิดจากการสลายตัวของโปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของพืช การแช่เมล็ดข้าวในน้ำจะไปกระตุ้นการงอกและการทำงานของไฮโดรไลติกเอนไซม์ (Hydrolytic enzyme) ส่งผลต่อการเมทาบอลิซึมภายในเมล็ดข้าว (Palmiano and Juliano, 1972) จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี รวมไปถึงคุณค่าทางโภชนาการของข้าว และคุณสมบัติของแป้งข้าว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kayahara *et al.* (2001); Ohtsubo *et al.* (2005); Komatsuzaki *et al.* (2007); Lee *et al.* (2007); Jiamyangyuen and Oraikul (2008); Charoenthaikij *et al.* (2009); Moongngarm and Saetung (2010); Watcharaparpaiboon *et al.* (2010)

ตารางที่ 18 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

สิ่งทดลอง	สภาวะ		องค์ประกอบทางเคมี (มาตรฐานแห้ง)				
	อุณหภูมิ (° ซ)	เวลา (ชั่วโมง)	โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	น้ำตาลรีดิวิซ (ไมโครกรัม/กรัม)	สารกาบา (มิลลิกรัม/100 กรัม)
ควบคุม			7.72±0.19	3.17±0.14	1.21±0.07	116.76±10.70	2.47±0.07
1	20	24	8.34±0.09	3.37±0.17	1.67±0.01	190.04±23.90	7.99±0.11
2	20	48	7.96±0.03	3.06±0.01	1.35±0.02	177.59±28.01	12.36±0.09
3	30	24	8.55±0.21	3.27±0.06	1.45±0.02	182.32±11.63	10.69±0.01
4	30	48	7.80±0.25	2.98±0.14	1.32±0.02	235.79±45.63	12.27±0.03
5	17.9	36	8.16±0.58	3.09±0.05	1.37±0.02	283.52±34.86	11.30±0.09
6	32.1	36	7.72±0.53	3.43±0.10	1.70±0.01	257.99±28.47	14.54±0.36
7	25	19	8.33±0.47	3.48±0.19	1.80±0.04	191.46±19.30	12.25±0.46
8	25	53	8.25±0.09	3.02±0.33	1.36±0.03	204.21±43.97	18.58±0.72
9	25	36	8.40±0.36	3.30±0.05	1.46±0.04	134.34±10.99	14.63±0.72
10	25	36	8.36±0.01	3.24±0.12	1.44±0.02	122.32±33.79	15.40±0.49
11	25	36	8.24±1.26	3.27±0.03	1.45±0.03	120.49±36.72	14.75±0.58

ตารางที่ 19 สมการผลตอบสนองขององค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้า พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

	สมการผลตอบสนอง	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
โปรตีน	$3.507 + 0.375X_1 + 0.037X_2 - 0.007X_1^2 - 0.001X_2^2$	0.91	0.86
ไขมัน	$3.614 - 0.002 X_1 - 0.008 X_2$	0.30	0.13
เถ้า	$1.804 + (4.17E-3) X_1 - 0.009$	0.36	0.20
น้ำตาลรีดิวซ์	$2160.92 - 135.94X_1 - 19.46X_2 + 2.523X_1^2 + 0.1849 X_2^2 + 0.275 X_1X_2$	0.86	0.72
สารกาบา	$-47.267 + 3.939 X_1 + 0.415 X_2 - 0.073 X_1^2 - 0.004 X_2^2$	0.62	0.37

หมายเหตุ: X<sub>1</sub> = อุณหภูมิ (°ซ)

X<sub>2</sub> = เวลา (ชั่วโมง)

ปริมาณโปรตีนของข้าวกล้องเริ่มงอก มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 7.72 – 8.55 โดยน้ำหนักแห้ง สมการผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 19 โดยค่า R<sup>2</sup> และค่า R<sup>2</sup><sub>adj</sub> เท่ากับ 0.91 และ 0.86 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของปริมาณโปรตีน แสดงในภาพที่ 16

พบว่า ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติซึ่งมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 7.72 โดยน้ำหนักแห้ง การเปลี่ยนแปลงของโปรตีนเป็นผลมาจากกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอส จะทำการย่อยโปรตีนให้เป็นเปปไทด์ และกรดอะมิโนอิสระ (Veluppillai *et al.* 2009) จากภาพที่ 16 แสดงให้เห็นว่าปริมาณโปรตีนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาเพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Palmiano and Juliano (1972) พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสจะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในช่วง 2 วันแรก ของการงอก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสจะทำให้ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Charoenthaikij *et al.* (2009) ที่พบว่า ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นในช่วง 24 ชั่วโมงแรก และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการเพาะเพิ่มขึ้นจาก 48 เป็น 72 ชั่วโมง

ปริมาณไขมันมีค่าระหว่างร้อยละ 2.98-3.48 โดยน้ำหนักแห้ง สมการผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 19 โดยค่า R<sup>2</sup> และค่า R<sup>2</sup><sub>adj</sub> เท่ากับ 0.30 และ 0.13 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของปริมาณไขมันแสดงในภาพที่ 17

ปริมาณไขมันในข้าวกล้องปกติมีค่าร้อยละ 3.17 โดยน้ำหนักแห้ง การเพาะงอกพบว่า ปริมาณไขมันเพิ่มขึ้นใน 24 ชั่วโมงแรกของการงอกและมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Ohtsubo *et al.* (2005) พบว่า ปริมาณไขมันเพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการ เพาะงอก Rusydi *et al.* (2011) พบว่าปริมาณไขมันในข้าวสีแดง ข้าวสีม่วง และข้าวบาโร (Bario) หลังผ่านการเพาะงอกเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ลดลง โดย Hahm *et al.* (2008) กล่าวว่าไขมันเป็นแหล่ง พลังงานของเมล็ดพืชในการงอก ไขมันจะถูกย่อยเป็นกลีเซอรอลและกรดไขมัน โดยกรดไขมันจะ ถูกออกซิไดซ์ไปเป็น แอซิติล-โคเอ (Acetyl-CoA) และเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ (Krebs cycle) ต่อไป

ปริมาณเถ้า มี ค่าระหว่าง ร้อยละ 1.32 - 1.80 โดยน้ำหนักแห้ง สมการผลตอบแทนแสดง ในตารางที่ 19 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.36 และ 0.20 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของปริมาณเถ้าแสดงในภาพที่ 18

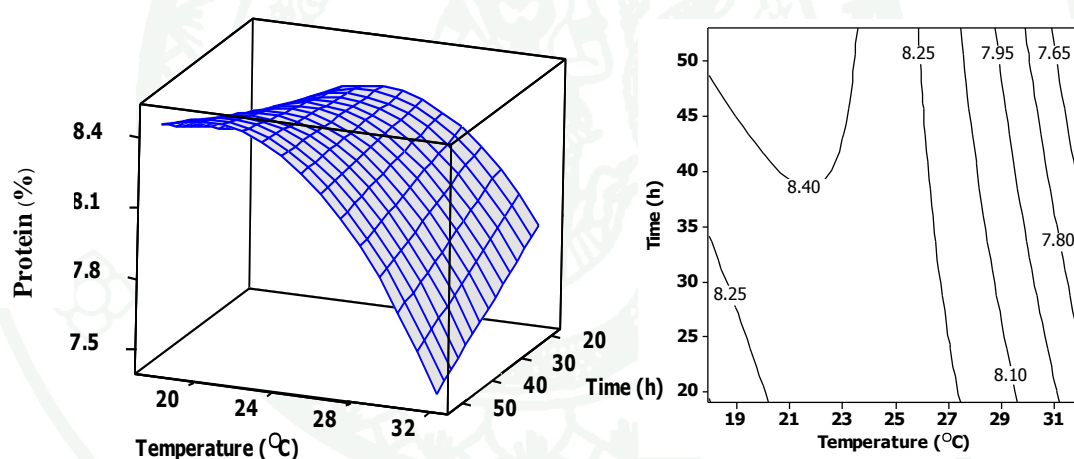
ปริมาณเถ้าแสดงถึงสารอนินทรีย์และแร่ธาตุ ซึ่งพืชจะนำไปใช้ในการเจริญระหว่าง การงอก จากการศึกษาของ Ohtsubo *et al.* (2005) พบว่าปริมาณเถ้าในข้าวกล้องเริ่มงอกลดลง อย่างไรก็ดีตามเถ้าในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก โดยเฉลี่ยมีค่าสูงกว่าข้าวกล้องปกติ

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าระหว่าง 120.49 – 283.25 ไมโครกรัม/กรัม โดยน้ำหนักแห้ง สมการผลตอบแทน แสดงในตารางที่ 19 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.86 และ 0.72 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงในภาพที่ 19

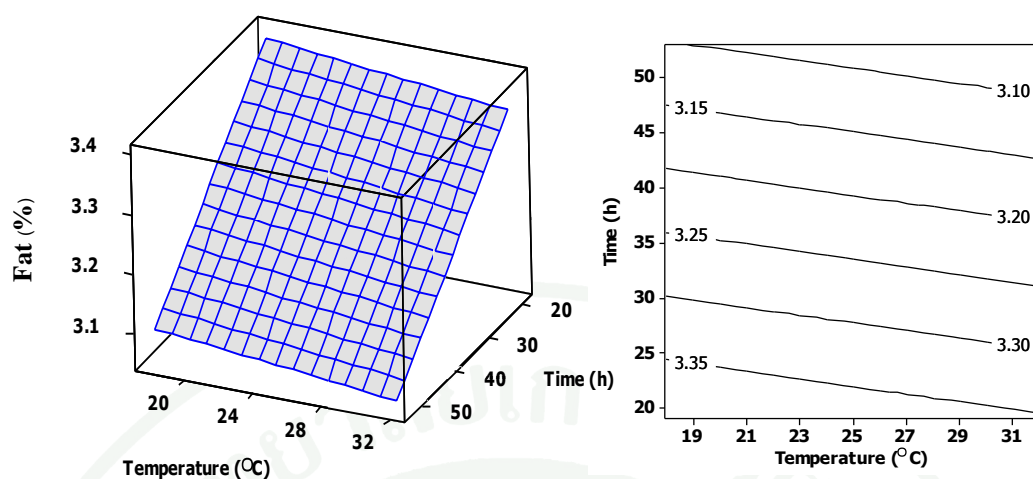
กิจกรรมของเอนไซม์ที่เกิดขึ้นระหว่างการงอก ทำให้เกิดการย่อยสลายของสตาร์ช และ โพลีแซ็กคาไรด์ เป็น โอลิโกแซ็กคาไรด์ และน้ำตาล (Palmiano and Juliano, 1972; Lee *et al.*, 2007 Saman *et al.*, 2008 และ Veluppillai *et al.*, 2009) จากการศึกษาของ Takeuchi *et al.* (2010) พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส จะสูงกว่ากิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา - แอมิเลส ที่ อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส แต่ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จะพบกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-แอมิเลส สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่พบว่า ที่สภาวะการทดลองที่ 5 อุณหภูมิ 17.9 องศาเซลเซียส เวลา 36 ชั่วโมง และสภาวะทดลองที่ 6 อุณหภูมิ 32.1 องศาเซลเซียส เวลา 36 ชั่วโมง พบว่า มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 283.52 และ 257.99 ไมโครกรัม/กรัมตัวอย่าง โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ อย่างไรก็ดีตามปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกมีค่าโดยเฉลี่ยสูงกว่าข้าวกล้องปกติ

ปริมาณสารกาบามีค่าระหว่าง 7.99 – 18.58 มิลลิกรัม/ 100 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง สมการผลตอบแทนแสดงในตารางที่ 18 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.62 และ 0.37 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของปริมาณสารกาบาแสดงในภาพที่ 20

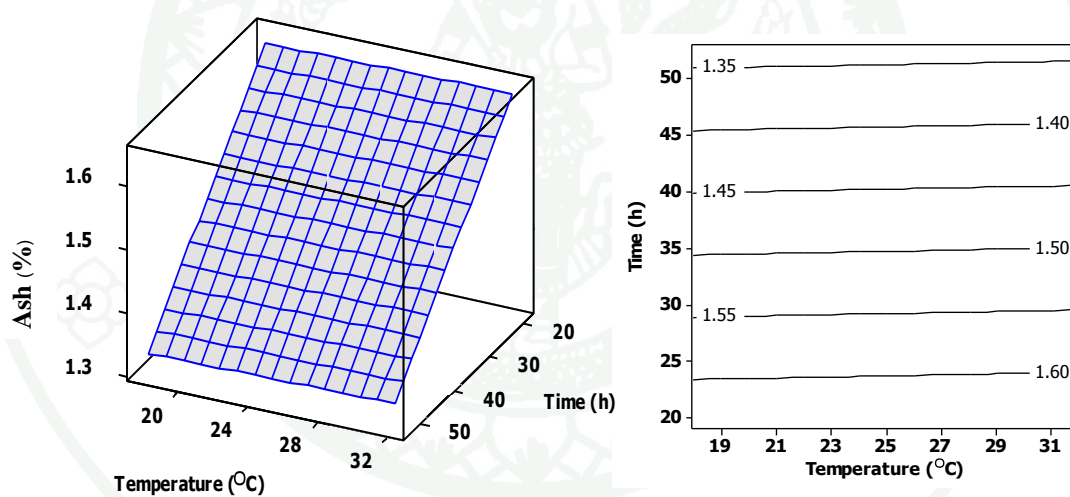
สารกาบาเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์ Glutamate decarboxylase (GAD) โดยมีกลูตามेटเป็นสารตั้งต้น (Shelp *et al.*, 1999) การเปลี่ยนแปลงของสารกาบาเป็นผลมาจากหลายปัจจัยจากการศึกษานี้พบว่า สารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างน้อย 3 เท่า และเพิ่มขึ้นสูงสุด 7.5 เท่าจากตัวอย่างข้าวกล้องปกติ (ตัวอย่างควบคุม) เช่นเดียวกับการศึกษาของ จารุรัตน์ และคณะ (2550); ชนิษฐาและคณะ (2552); Tungtrakul *et al.* (2006) และ Charoenthaikij *et al.* (2009) แต่การศึกษาของ Karladee and Suriyong (2012) ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า สารกาบาเพิ่มขึ้นในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการเพาะออก และลดลงเมื่อเวลาเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 36 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับ



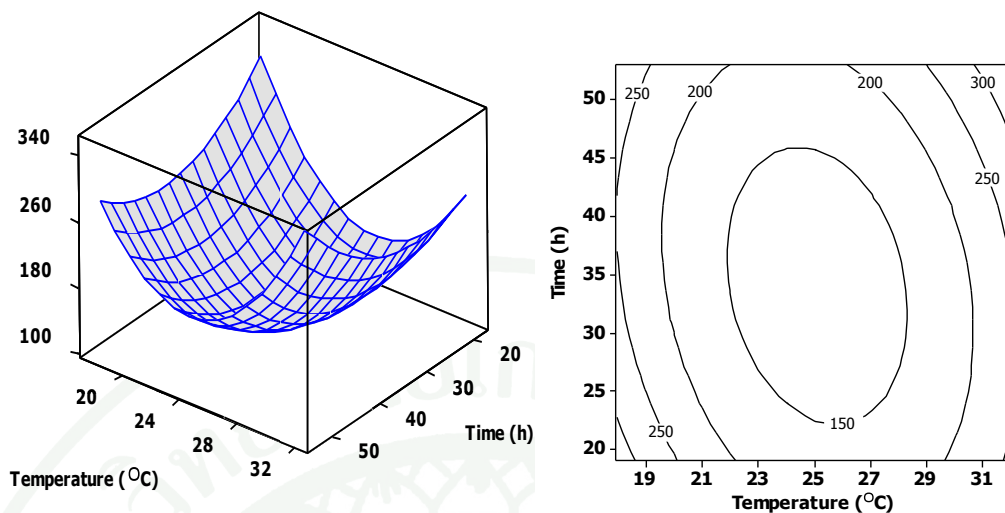
ภาพที่ 16 Surface plot และ Contour plot ของปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องเริ่มงอก (ขาวดอกมะลิ 105)



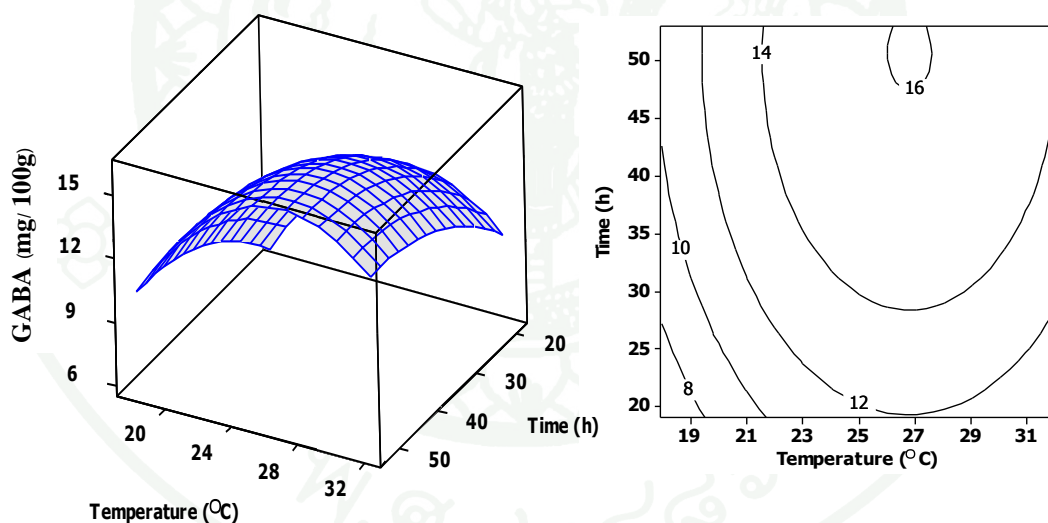
ภาพที่ 17 Surface plot และ Contour plot ของปริมาณไขมันในข้าวกล้องเริ่มงอก  
(ข้าวดอกมะลิ 105)



ภาพที่ 18 Surface plot และ Contour plot ของปริมาณเถ้าในข้าวกล้องเริ่มงอก  
(ข้าวดอกมะลิ 105)



ภาพที่ 19 Surface plot และ Contour plot ของปริมาณน้ำตาลรีดิวิซในข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)



ภาพที่ 20 Surface plot และ Contour plot ของปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 แสดงในตารางที่ 20 และ สมการผลตอบสอง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination;  $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับค่า ( Adjusted coefficient of determination;  $R_{adj}^2$ ) แสดงในตารางที่ 21

ตารางที่ 20 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10

สิ่งทดลอง	สภาวะ		องค์ประกอบทางเคมี (มาตรฐานแห้ง)				
	อุณหภูมิ (° ซ)	เวลา (ชั่วโมง)	โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	น้ำตาลรีดิวิซ (ไมโครกรัม/กรัม)	สารกาบา (มิลลิกรัม/100 กรัม)
ควบคุม			9.09±0.50	4.61±0.05	1.14±0.02	204.81±21.90	2.02±0.04
1	20	24	8.82±0.13	3.33±0.13	1.21±0.10	248.15±34.42	13.33±0.36
2	20	48	10.12±0.47	3.96±0.62	1.23±0.05	282.21±40.51	24.50±0.37
3	30	24	9.30±0.24	3.93±0.15	1.25±0.03	302.97±23.04	40.61±0.32
4	30	48	8.50±0.17	3.43±0.13	1.27±0.02	243.61±11.87	26.39±0.17
5	17.9	36	8.94±0.28	3.13±0.11	1.21±0.11	244.07±27.18	14.67±0.34
6	32.1	36	8.81±0.43	3.37±0.11	1.35±0.21	205.70±19.00	18.74±0.19
7	25	19	9.12±0.13	3.29±0.14	1.22±0.13	215.32±8.11	21.62±0.19
8	25	53	8.78±0.27	3.73±0.06	1.32±0.05	239.95±7.40	30.44±0.62
9	25	36	9.28±0.08	3.83±0.45	1.30±0.04	335.89±18.53	20.60±0.55
10	25	36	9.22±0.67	3.96±0.12	1.30±0.11	304.18±21.33	20.40±0.41
11	25	36	9.26±0.14	3.96±0.15	1.31±0.12	329.02±55.06	20.47±0.48

ตารางที่ 21 สมการผลตอบสนองขององค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าว  
เหนียวพันธุ์ กข 10

	สมการผลตอบสนอง	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
โปรตีน	$0.701 + 0.515X_1 + 0.202X_2 - 0.004X_1^2 - 0.009 X_1X_2$	0.83	0.72
ไขมัน	$-8.635 + 0.706 X_1 + 0.191X_2 - 0.010 X_1^2 - (9.215E-4) X_2^2 - 0.005 X_1X_2$	0.79	0.58
เถ้า	$0.332 + 0.046 X_1 + 0.015 X_2 - (8.166E-4) X_1^2 - (1.765E-4) X_2^2$	0.74	0.57
น้ำตาลรีดิวิซ์	$-1287.51 + 88.681X_1 + 28.74X_2 - 1.533X_1^2 - 0.256 X_2^2 - 0.389 X_1X_2$	0.78	0.56
สารกาบา	$-55.045 + 3.876 X_1 + 0.988 X_2 + 0.029 X_1^2 - 0.105 X_1X_2$	0.83	0.73

หมายเหตุ:  $X_1$  = อุณหภูมิ (°ซ)  
 $X_2$  = เวลา (ชั่วโมง)

โปรตีนมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 8.50 – 10.12 โดยน้ำหนักแห้ง สมการผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 21 โดยค่า R<sup>2</sup> และค่า R<sup>2</sup><sub>adj</sub> เท่ากับ 0.83 และ 0.72 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots แสดงในภาพที่ 21

ปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียว กข 10 มีค่าสูงกว่าข้าวกล้องปกติ (ควบคุม) เช่นเดียวกับที่พบในข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้าขาวดอกมะลิ 105 จากภาพที่ 21 แสดงให้เห็นว่าโปรตีนมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับที่พบในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

สำหรับปริมาณไขมันมีค่าร้อยละ 3.13 – 3.96 โดยน้ำหนักแห้ง สมการผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 21 โดยค่า R<sup>2</sup> และ ค่า R<sup>2</sup><sub>adj</sub> เท่ากับ 0.79 และ 0.58 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots แสดงในภาพที่ 22 จากภาพ พบว่า ไขมันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามปริมาณไขมันโดยเฉลี่ยของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกลดลง เมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ (ควบคุม) เช่นเดียวกับที่พบใน Watanabe *et al.* (2004)

นอกจากนี้ Maisont and Narkruga (2010) พบว่าปริมาณไขมันในข้าววงอกจากข้าวเปลือก กข 6 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาการเพาะงอกเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ปริมาณเถ้ามีค่าระหว่างร้อยละ 1.21 – 1.35 โดยน้ำหนักแห้ง สมการผลตอบสนอง แสดงในตารางที่ 21 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.74 และ 0.57 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots แสดงในภาพที่ 23 ปริมาณเถ้าในข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียว กข 10 มีค่าสูงกว่าข้าวกล้องปกติ (ควบคุม) จากภาพแสดงให้เห็นว่า ปริมาณเถ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับที่พบใน Watanabe *et al.* (2004); Chinma *et al.* (2009) และ Maisont and Narkruga (2010)

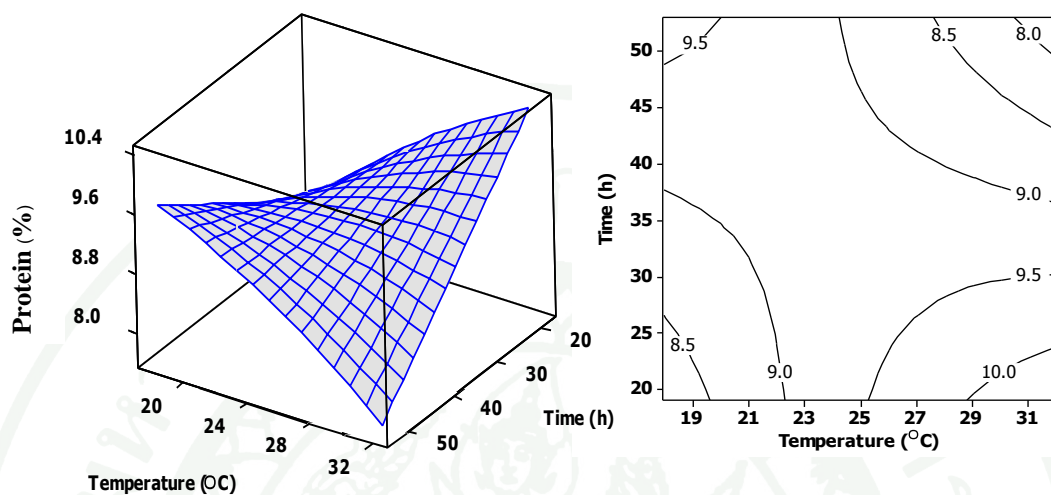
ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มีค่าระหว่าง 205.70 – 335.89 ไมโครกรัม/กรัม โดยน้ำหนักแห้ง สมการผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 21 โดยค่า  $R^2$  และ ค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.78 และ 0.56 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots แสดงใน ภาพที่ 24

จากภาพที่ 24 พบว่า น้ำตาลรีดิวซ์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 20-25 องศาเซลเซียส และปริมาณโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติเช่นเดียวกับที่พบใน ชนิษฐา และคณะ (2552); Benjamasuttikul and Naivikul (2007) และ Charoenthaikij *et al.* (2009)

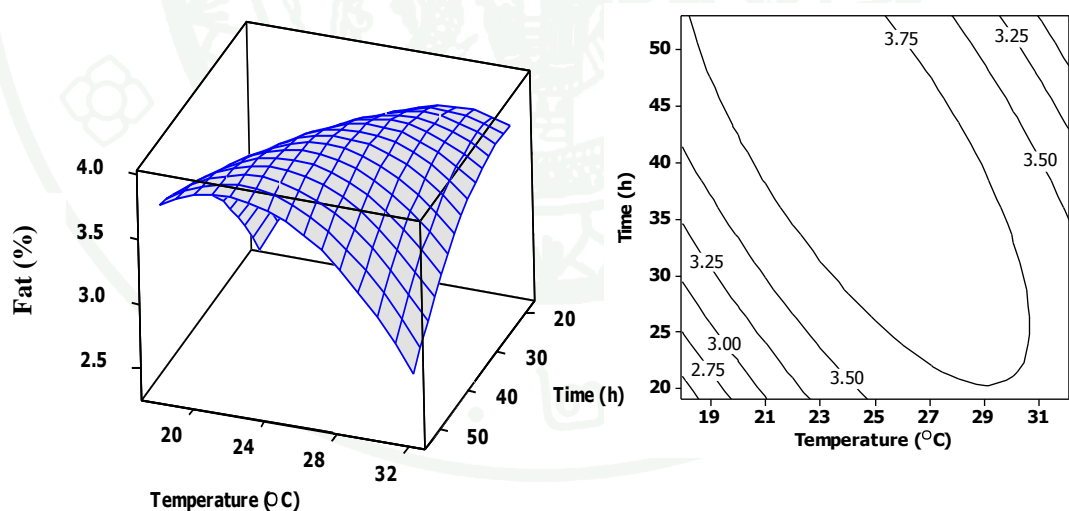
ปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 มีค่าระหว่าง 13.33 – 40.61 มิลลิกรัม/ 100 กรัม โดยน้ำหนักแห้ง สมการผลตอบสนอง แสดงในตารางที่ 21 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.83 และ 0.73 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots แสดงในภาพที่ 25

พบว่า สารกาบาเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ โดยสภาวะการผลิตที่ 3 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 24 ชั่วโมง ให้ปริมาณสารกาบาสูงสุด 40.61 มิลลิกรัม/ 100 กรัมตัวอย่าง โดยน้ำหนักแห้ง จากภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อปริมาณสารกาบา จากการศึกษาของ Zhang *et al.* (2007) พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของเอนไซม์ glutamate decarboxylase (GAD) จากคัพพะของข้าวคือที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส pH 5.5-5.8 และการเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ GAD เช่นเดียวกับ ชนิษฐา และคณะ (2552) และ Banchuen *et al.* (2009) ที่พบว่า เมื่อเวลาการ

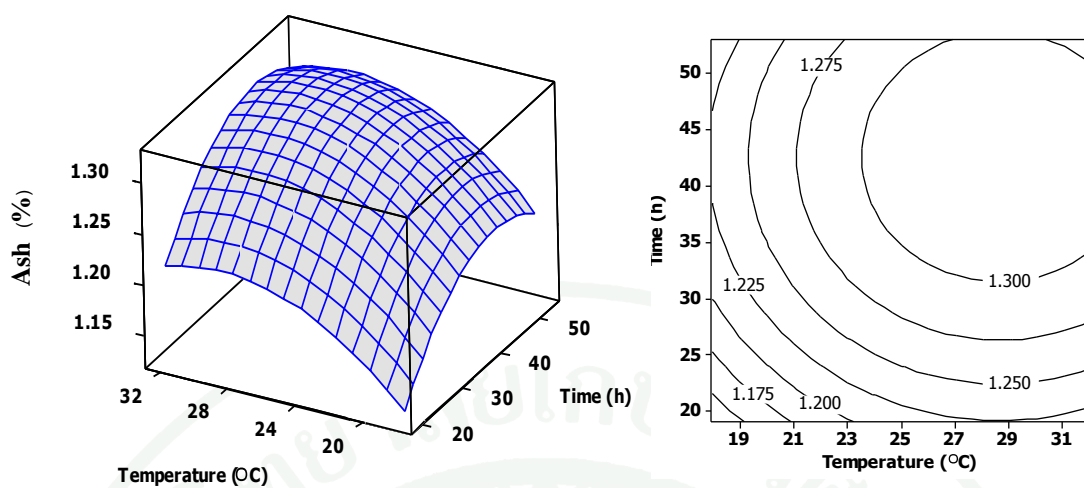
แต่เพิ่มขึ้นจะให้ปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณสารกาบาในข้าวเหนียวจะสูงกว่าข้าวเจ้า เช่นเดียวกับการศึกษาของ Tungkrakul *et al.* (2006) และ Charoenthaikij *et al.* (2009)



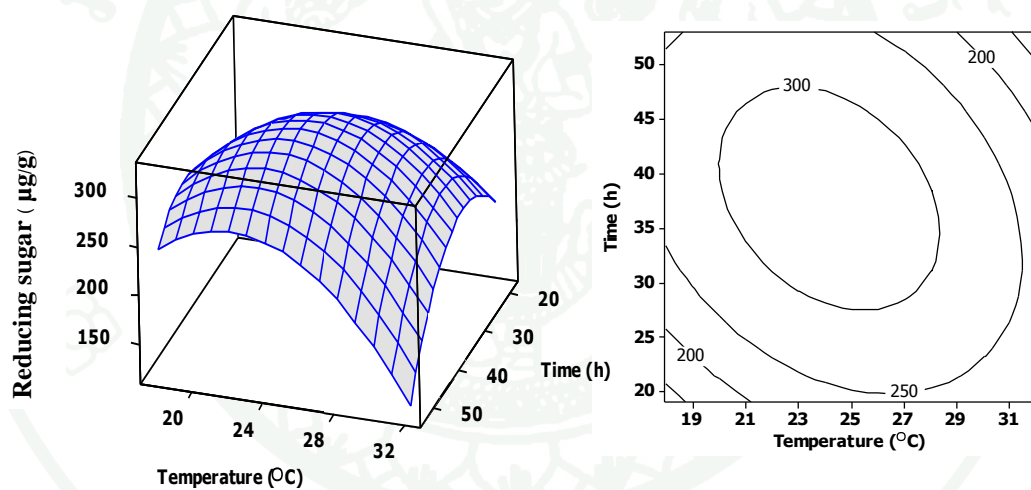
ภาพที่ 21 Surface plot และ Contour plot ของปริมาณโปรตีนในข้าวกล้องเริ่มงอก (กข 10)



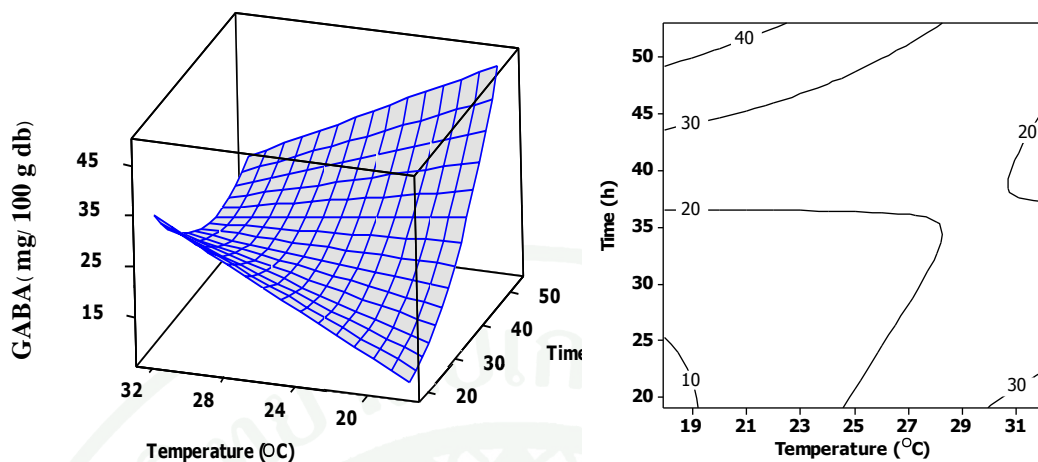
ภาพที่ 22 Surface plot และ Contour plot ของปริมาณไขมันในข้าวกล้องเริ่มงอก (กข 10)



ภาพที่ 23 Surface plot และ Contour plot ของปริมาณเถ้าในข้าวกล้องเริ่มงอก (กข 10)



ภาพที่ 24 Surface plot และ Contour plot ของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในข้าวกล้องเริ่มงอก (กข 10)



ภาพที่ 25 Surface plot และ Contour plot ของปริมาณสารกาบาในข้าวกล้องเริ่มงอก (ถข 10)

## 1.2 คุณสมบัติทางด้านความหนืด

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) เพื่อหาค่าต่างๆ ได้แก่ ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Trough) ความหนืดลดลง (Breakdown) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และค่าเซตแบค (Setback from trough) ผลการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 แสดงผลในตารางที่ 22 และสมการผลตอบแทน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination;  $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับ (Adjusted coefficient of determination;  $R_{adj}^2$ ) แสดงในตารางที่ 23

ตารางที่ 22 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

สิ่งทดลอง	สถานะ		สมบัติด้านความหนืด				
	อุณหภูมิ (°ซ)	เวลา (ชั่วโมง)	ความหนืดสูงสุด (RVU)	ความหนืดต่ำสุด (RVU)	ความหนืดลดลง (RVU)	ความหนืดสุดท้าย (RVU)	เขตแบบค (RVU)
ควบคุม			189.97±2.08	126.94±6.42	63.02±7.00	197.33±3.70	70.38±2.72
1	20	24	177.22±0.53	114.08±0.44	63.13±0.96	215.02±0.33	100.94±0.56
2	20	48	164.55 ±0.83	101.50±2.72	63.05±1.89	188.58±3.27	77.08±0.60
3	30	24	187.19±1.19	120.80±3.97	69.38±3.56	205.11±3.03	84.30±0.96
4	30	48	163.21±1.81	96.58±1.80	66.62±2.69	182.47±1.75	85.88±0.54
5	17.9	36	176.27±0.85	107.50±3.59	68.77±3.27	188.33±3.05	80.83±0.54
6	32.1	36	155.52±1.17	94.86±4.96	60.66±3.85	163.86±4.61	69.00±0.38
7	25	19	180.63±0.89	107.86±2.70	72.77±1.90	194.97±2.26	88.11±0.52
8	25	53	147.22±0.96	79.16±1.63	68.07±0.83	150.13±2.45	70.97±0.89
9	25	36	152.38±0.76	84.80±0.98	67.58±1.10	145.30±1.91	60.50±0.97
10	25	36	149.88±0.63	82.08±3.64	65.80±3.73	146.41±3.59	64.33±0.72
11	25	36	150.33±0.66	84.91±4.16	65.41±3.74	147.30±2.21	62.38±1.98

ตารางที่ 23 สมการผลตอบสนองของสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์  
ข้าวดอกมะลิ 105

	สมการผลตอบสนอง	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
ความหนืดสูงสุด	$522.392 - 20.747 X_1 - 4.682 X_2 + 0.382 X_1^2 + 0.059 X_2^2$	0.71	0.53
ความหนืดต่ำสุด	$421.59 - 21.818 X_1 - 2.323 X_2 + 0.478 X_1^2 + 0.056 X_2^2 - 0.902 X_1 X_2$	0.76	0.52
ความหนืดลดลง	$56.176 - 2.202 X_1 - 0.753 X_2 - 0.0512 X_1^2 + 0.011 X_2^2$	0.51	0.19
ความหนืดสุดท้าย	$917.883 - 43.586 X_1 - 10.314 X_2 + 0.829 X_1^2 + 0.132 X_2^2$	0.78	0.63
ค่าเซตแบค	$511.217 - 22.214 X_1 - 8.496 X_2 + 0.348 X_1^2 + 0.076 X_2^2 + 0.106 X_1 X_2$	0.85	0.70

หมายเหตุ:  $X_1$  = อุณหภูมิ (°ซ)

$X_2$  = เวลา (ชั่วโมง)

ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีค่าระหว่าง 147.22 – 187.19 RVU สมการผลตอบสนอง แสดงในตารางที่ 23 โดยค่า R<sup>2</sup> และ ค่า R<sup>2</sup><sub>adj</sub> เท่ากับ 0.71 และ 0.53 ตามลำดับ และค่าความหนืดต่ำสุด (Trough) มีค่าระหว่าง 79.16-120.80 RVU สมการผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 22 โดยค่า R<sup>2</sup> และค่า R<sup>2</sup><sub>adj</sub> เท่ากับ 0.76 และ 0.52 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของค่าความหนืดสูงสุด และค่าความหนืดต่ำสุด แสดงในภาพที่ 26 และ 27 ตามลำดับ

ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดต่ำสุด มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิ และเวลา เพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Benjamasuttikul and Naivikul (2007) พบว่า เวลาในการเพาะงอกที่ 12 – 20 ชั่วโมง ทำให้ค่าความหนืดสูงสุด ลดลง 5.5 เท่าและค่าความหนืดต่ำสุดลดลง 6.1 เท่าเมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Charoenthaikij *et al.* (2009) ที่พบว่า เมื่อเวลาในการเพาะงอกเพิ่มขึ้น สมบัติด้านความหนืดมีค่าลดลง

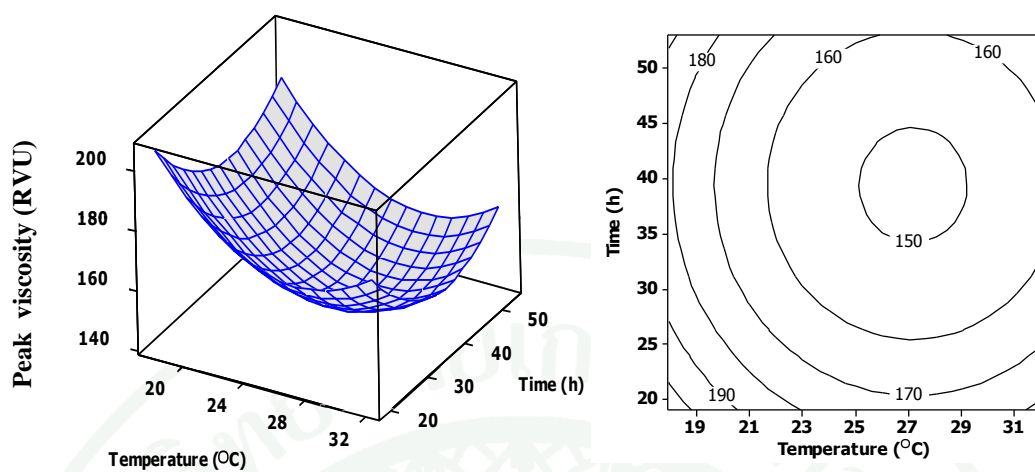
ค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีค่าระหว่าง 63.05 – 72.77 RVU สมการผลตอบสนอง แสดงในตารางที่ 23 โดยค่า R<sup>2</sup> และ ค่า R<sup>2</sup><sub>adj</sub> เท่ากับ 0.51 และ 0.19 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots แสดงในภาพ

ที่ 28 พบว่าเป็นลักษณะของอานม้า (saddle point) อย่างไรก็ตาม ค่าความหนืดลดลง คำนวณมาจากความแตกต่างของค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดต่ำสุด

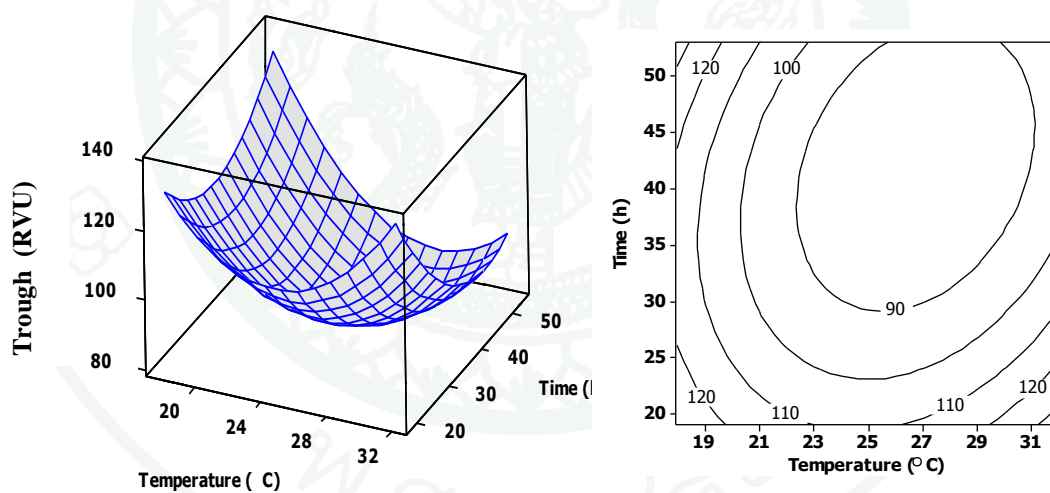
ค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีค่าระหว่าง 145.30 – 215.02 RVU สมการผลตอบแทนแสดงในตารางที่ 23 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.78 และ 0.63 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots แสดงในภาพที่ 29 และค่าเซตแบค (Setback) มีค่าระหว่าง 60.50 – 100.94 RVU สมการผลตอบแทนแสดงในตารางที่ 21 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.85 และ 0.70 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots แสดงในภาพที่ 30

จากภาพแสดงให้เห็นว่าค่าความหนืดสุดท้ายและค่าความคงตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิ และเวลา เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการศึกษาของ Benjamasuttikul and Naivikul (2007) พบว่าค่าความหนืดสุดท้ายลดลง 2 เท่า และค่าเซตแบคลดลงเช่นเดียวกับ Charoenthaikij *et al.* (2009)

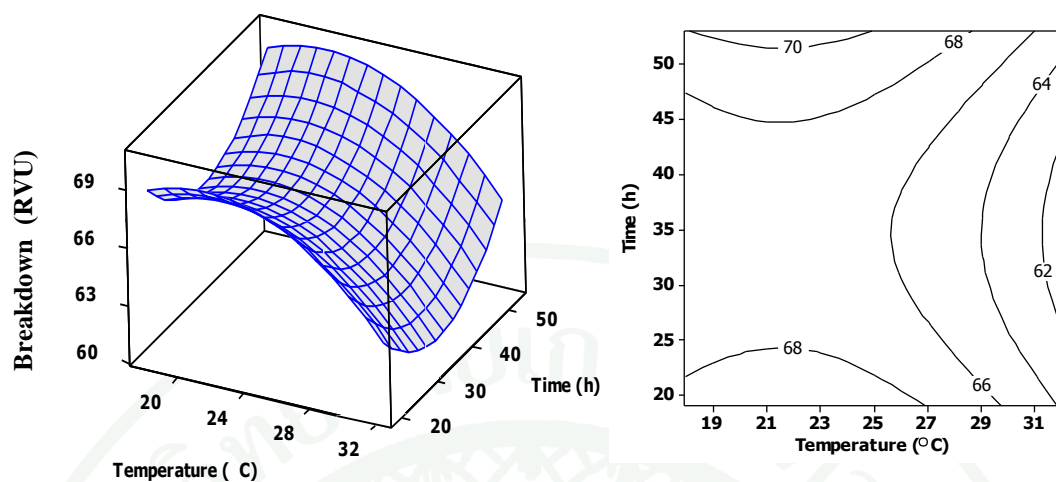
Saman *et al.* (2008) กล่าวว่า การแตกตัวของสตาร์ช (starch degradation) ระหว่างการงอกเป็นกระบวนการทางชีวเคมี ซึ่งเกี่ยวข้องกับเอนไซม์หลายชนิด เช่น เบตา และ แอลฟา-แอมิเลส แอลฟา-กลูโคซิเดส ( $\alpha$ -glucosidase) และ Debranching enzyme ซึ่ง กิจกรรมของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น จีโนไทป์ (genotype) และสภาวะแวดล้อม (Mohan *et al.*, 2010)



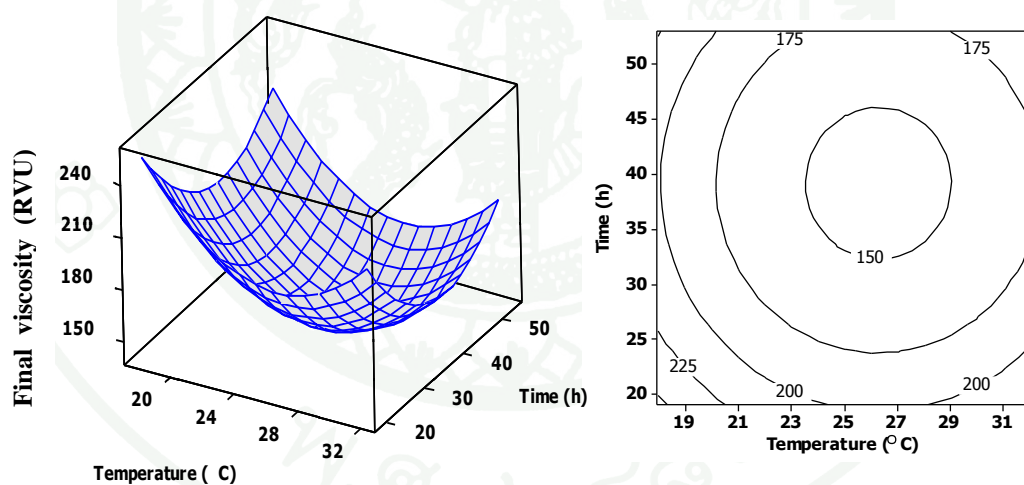
ภาพที่ 26 Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)



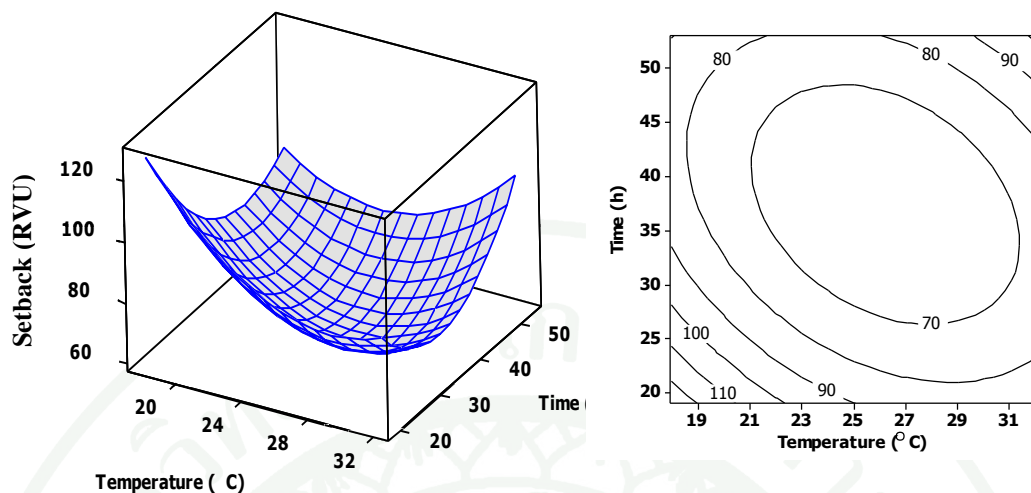
ภาพที่ 27 Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดต่ำสุด (Trough) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)



ภาพที่ 28 Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ในแป้งข้าวกล้อง เริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)



ภาพที่ 29 Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)



ภาพที่ 30 Surface plot และ Contour plot ของค่าเซตแบค (Setback) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (ข้าวดอกมะลิ 105)

ผลการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 ได้แก่ ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Trough) ความหนืดลดลง (Breakdown) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และค่าเซตแบค (Setback from trough) แสดงในตารางที่ 24 และสมการผลตอบแทน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination;  $R^2$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจแบบปรับ (Adjusted Coefficient of determination;  $R_{adj}^2$ ) แสดงในตารางที่ 25

ตารางที่ 24 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10

สิ่งทดลอง	สภาวะ		สมบัติด้านความหนืด				
	อุณหภูมิ (° ซ)	เวลา (ชั่วโมง)	ความหนืดสูงสุด (RVU)	ความหนืดต่ำสุด (RVU)	ความหนืดลดลง (RVU)	ความหนืดสุดท้าย (RVU)	เซตแบค (RVU)
ควบคุม			188.12±0.53	104.62±0.88	83.50±1.41	121.79±0.76	17.16±0.11
1	20	24	80.83±0.94	41.13±0.71	39.70±0.25	52.47±0.67	11.33±0.14
2	20	48	25.27±0.71	7.61±0.33	17.66±1.04	12.42±0.36	4.81±0.43
3	30	24	24.52±1.52	11.25±1.84	13.28±0.41	16.00±1.70	4.75±0.14
4	30	48	18.05±0.90	7.27±1.04	10.78±0.62	10.39±1.13	3.11±0.10
5	17.9	36	54.30±0.91	23.44±0.10	30.86±0.96	31.75±0.38	8.30±0.41
6	32.1	36	23.00±0.50	10.05±0.92	12.95±0.42	14.53±1.32	4.48±0.48
7	25	19	46.27±1.18	16.91±0.22	29.36±1.05	24.16±0.52	7.25±0.58
8	25	53	8.02±1.63	2.58±1.61	5.44±0.84	4.67±1.58	2.08±0.14
9	25	36	9.55±1.18	4.36±2.00	5.19±0.82	7.22±1.34	2.86±0.75
10	25	36	9.02±1.29	4.72±2.00	4.31±1.04	6.67±2.25	1.94±0.29
11	25	36	9.22±1.59	4.94±1.63	4.27±0.05	6.83±2.44	1.88±0.21

ตารางที่ 25 สมการผลตอบแทนของสมบัติทางด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกข้าว  
เหนียวพันธุ์ กข 10

	สมการผลตอบแทน	$R^2$	$R^2_{adj}$
ความหนืดสูงสุด	$787.99 - 41.542 X_1 - 11.343 X_2 + 0.630 X_1^2 + 0.0695 X_2^2 + 0.205 X_1 X_2$	0.98	0.96
ความหนืดต่ำสุด	$373.716 - 19.698 X_1 - 5.317 X_2 + 0.277 X_1^2 + 0.024 X_2^2 + 0.123 X_1 X_2$	0.93	0.87
ความหนืดลดลง	$414.26 - 21.844 X_1 - 6.025 X_2 + 0.353 X_1^2 + 0.045 X_2^2 + 0.081 X_1 X_2$	0.99	0.99
ความหนืดสุดท้าย	$417.654 - 25.17 X_1 - 6.658 X_2 + 0.365 X_1^2 + 0.033 X_2^2 + 0.143 X_1 X_2$	0.94	0.89
ค่าเซตแบค	$101.8 - 5.471 X_1 - 1.339 X_2 + 0.088 X_1^2 + 0.009 X_2^2 + 0.02 X_1 X_2$	0.97	0.95

หมายเหตุ:  $X_1$  = อุณหภูมิ (°ซ)

$X_2$  = เวลา (ชั่วโมง)

ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียว กข 10 มีค่าระหว่าง 80.83- 8.02 RVU สมการผลตอบแทนแสดงในตารางที่ 25 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R^2_{adj}$  เท่ากับ 0.96 และ 0.93 ตามลำดับ

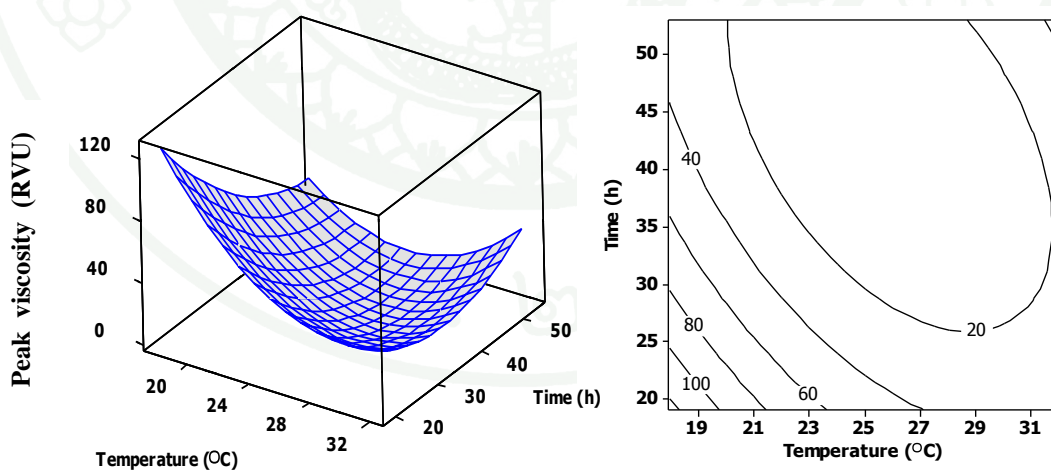
ค่าความหนืดต่ำสุด (Trough) มีค่าระหว่าง 41.13 – 2.58 RVU สมการผลตอบแทนแสดงในตารางที่ 25 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R^2_{adj}$  เท่ากับ 0.93 และ 0.87 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดต่ำสุด แสดงในภาพที่ 31 และ 32 ตามลำดับ

ค่าความหนืดลดลง (Breakdown) มีค่าระหว่าง 39.70 -4.27 RVU สมการผลตอบแทนแสดงในตารางที่ 25 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R^2_{adj}$  เท่ากับ 0.99 และ 0.99 ตามลำดับ

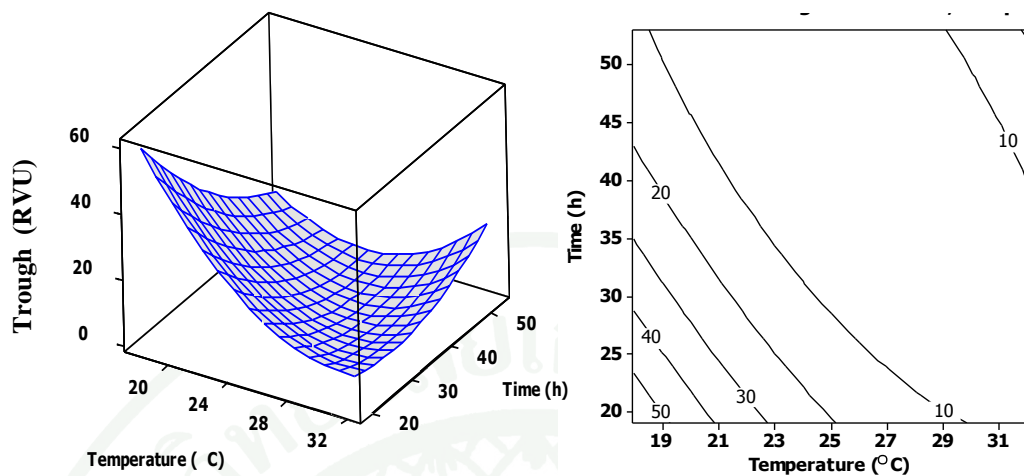
ค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) มีค่าระหว่าง 52.47 – 4.67 RVU สมการผลตอบแทน แสดงในตารางที่ 25 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.94 และ 0.89 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของค่าความหนืดลดลงและค่าความหนืดสุดท้าย แสดงในภาพที่ 33 และ 34 ตามลำดับ

และค่าเซตแบค (Setback) มีค่าระหว่าง 11.33- 1.88 RVU สมการผลตอบแทนแสดงในตารางที่ 25 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.97 และ 0.95 ตามลำดับ แผนภาพ Surface plots และ Contour plots แสดงในภาพที่ 35

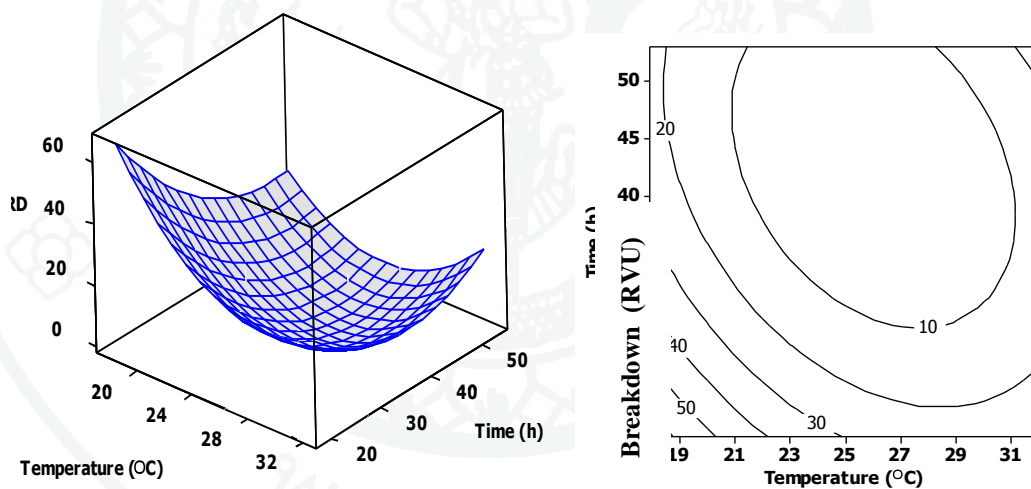
จากการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Benjamasuttikul and Naivikul (2007) และ Charoenthaikij *et al.* (2009) ซึ่งศึกษาในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียว กข 6 พบว่าเมื่อเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้นจะทำให้คุณสมบัติด้านความหนืดลดลง นอกจากนี้ Zhou *et al.* (2002) กล่าวว่า เอนไซม์ เบตา-แอมิเลสพบมากในชั้นของรำ โดยเฉพาะในข้าวเหนียวจะพบมากในเอนโดสเปิร์ม ซึ่งผลของกิจกรรมของเอนไซม์จะทำให้สมบัติด้านความหนืดลดลง เนื่องจากเอนไซม์จะทำการย่อยสลายซ์ให้เป็นเดกตรินซ์ และน้ำตาล ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ทั้งในข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 10



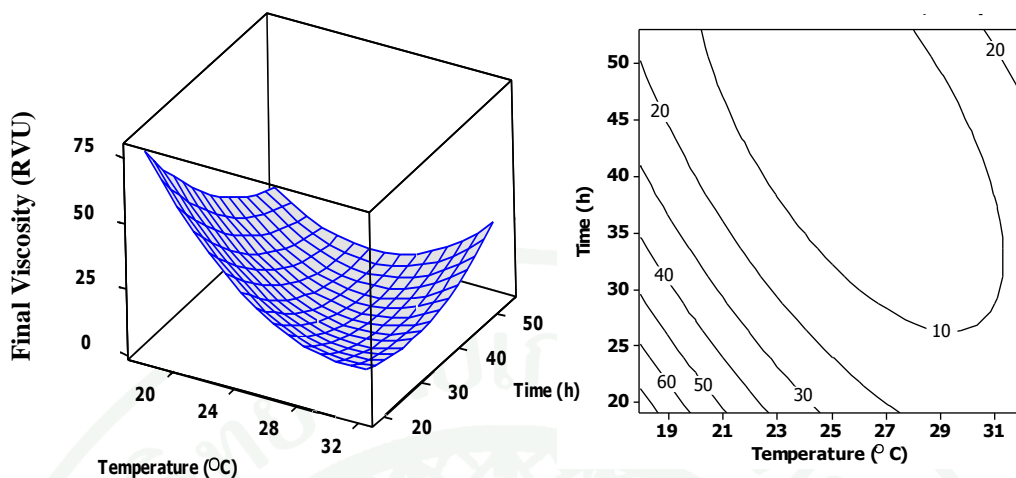
ภาพที่ 31 Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (กข10)



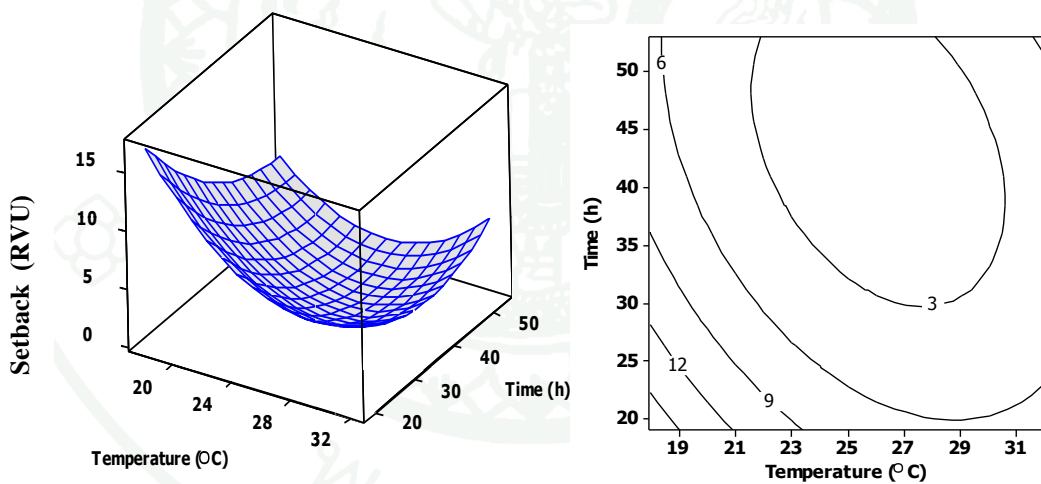
ภาพที่ 32 Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดต่ำสุด (Trough) ในแป่งขี้วากลึงเริ่มงอก (กข10)



ภาพที่ 33 Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ในแป่งขี้วากลึงเริ่มงอก (กข10)



ภาพที่ 34 Surface plot และ Contour plot ของค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (กช10)



ภาพที่ 35 Surface plot และ Contour plot ของค่าเซตแบค(Setback) ในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก (กช10)

## 2. ข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผลิตจากเครื่องเพาะข้าวอกต้นแบบ

### 2.1 ลักษณะปรากฏ

การผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกจาก ด้วยเครื่องเพาะข้าวอกต้นแบบ ลักษณะของข้าวกล้องเริ่มงอกอบแห้ง แสดงในภาพที่ 36 พบว่า มีการงอกที่ส่วนของคัพภะเพียงเล็กน้อยในข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 (KDML 105) ส่วนข้าวเหนียว กข 10 (RD 10) พบว่า มีการงอกยาวกว่า โดยมีความยาวของรากอ่อนประมาณ 1/4 ของความยาวเมล็ด



ปกติ

เริ่มงอก

ปกติ

เริ่มงอก

ภาพที่ 36 ลักษณะปรากฏของข้าวกล้องปกติและข้าวกล้องเริ่มงอกอบแห้ง ที่ผลิตจากเครื่องเพาะข้าวอกต้นแบบ

### 2.2 องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องเริ่มงอก ที่ผลิตจากเครื่องเพาะข้าวอกต้นแบบ พบว่า ข้าวกล้องเริ่มงอกจากพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 มีปริมาณ โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบ ไม่แตกต่างจากแป้งข้าวกล้องปกติ ( $P > 0.05$ ) แต่มีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และสารกาบา เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ ) ดังแสดงในตารางที่ 26

สำหรับข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 มีปริมาณ โปรตีนและเถ้าไม่แตกต่างจากข้าวกล้องปกติ ( $P > 0.05$ ) แต่มีปริมาณไขมันลดลง และเส้นใยหยาบ เพิ่มขึ้น ( $P \leq 0.05$ ) ส่วนน้ำตาลรีดิวซ์ และสารกาบา เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ ) ดังแสดงในตารางที่ 26

การที่สารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างมากอาจเป็นเพราะการเติมอากาศ เนื่องจากออกซิเจนเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับสำหรับเมล็ดพืชที่กำลังงอก Bouche and Fromm (2004) กล่าวว่า การสังเคราะห์กาบาเป็นส่วนหนึ่งของวัฏจักรเครปส์ ออกซิเจนจึงจำเป็นสำหรับการสังเคราะห์สารตั้งต้นในการทำงานของเซลล์ สอดคล้องกับการการศึกษาของสุรฐนันท์ (2554) ที่พบว่า การเพาะงอกบนฝ้ายขาวบางจะได้รับออกซิเจนมากกว่า จึงทำให้มีสารกาบาสูงกว่า เมื่อเทียบกับวิธีการเพาะแบบแช่น้ำที่เวลาเท่ากัน

ตารางที่ 26 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวกล้องและข้าวกล้องเริ่มงอกจากเครื่องเพาะข้าว  
งอกต้นแบบ

องค์ประกอบทางเคมี (มาตรฐานแห้ง)	ข้าวกล้อง	ข้าวกล้องเริ่มงอก
ข้าวดอกมะลิ 105		
โปรตีน (ร้อยละ)	7.11±0.18	7.50±0.03 <sup>NS</sup>
ไขมัน (ร้อยละ)	3.08±0.10	3.32±0.38 <sup>NS</sup>
เถ้า (ร้อยละ)	1.21±0.07	1.13±0.00 <sup>NS</sup>
เส้นใยหยาบ (ร้อยละ)	1.18±0.02	1.45±0.02 <sup>NS</sup>
น้ำตาลรีดิวซ์(ไมโครกรัม/กรัม)	116.76±10.7	214.88±4.3 <sup>**</sup>
สารกาบา (มิลลิกรัม/100 กรัม)	2.47±0.07	17.53±0.06 <sup>**</sup>
กข 10		
โปรตีน (ร้อยละ)	8.12±0.45	8.33±0.54 <sup>NS</sup>
ไขมัน (ร้อยละ)	4.61±0.05	3.41±0.09 <sup>*</sup>
เถ้า (ร้อยละ)	1.14±0.02	1.08±0.02 <sup>NS</sup>
เส้นใยหยาบ (ร้อยละ)	1.66±0.01	2.15±0.03 <sup>*</sup>
น้ำตาลรีดิวซ์(ไมโครกรัม/กรัม)	204.84±21.9	533.63±81.2 <sup>**</sup>
สารกาบา (มิลลิกรัม/100 กรัม)	2.02±0.04	122.51±0.85 <sup>**</sup>

## ตารางที่ 26 (ต่อ)

หมายเหตุ: <sup>NS</sup> ไม่แตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) โดยวิธี t- test

\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) โดยวิธี t- test

\*\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ ) โดยวิธี t- test

### 2.3 คุณสมบัติทางด้านความหนืด

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผลิตจากเครื่องเพาะข้าวออกต้นแบบ ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) แสดงในตารางที่ 27

ตารางที่ 27 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผลิตจากเครื่องเพาะข้าวออกต้นแบบ

ตัวอย่าง	คุณสมบัติด้านความหนืด **				เซตแบบค (RVU)
	ความหนืด	ความหนืด	ความหนืด	ความหนืด	
	สูงสุด (RVU)	ต่ำสุด (RVU)	ลดลง (RVU)	สุดท้าย (RVU)	
ข้าวดอกมะลิ 105					
ปกติ	177.22 ± 1.30	137.78±0.77	39.44±0.67	233.78±1.12	96.01±0.41
เริ่มงอก	32.53 ± 0.77	14.63± 0.26	17.88± 0.66	34.11± 1.42	19.47± 1.29
กข 10					
ปกติ	188.41±0.62	105.02±0.92	83.39±1.01	122.35±1.11	17.32±0.29
เริ่มงอก	5.69 ± 0.39	3.19 ± 0.31	2.50 ± 0.54	4.44 ± 0.19	1.25 ± 0.50

หมายเหตุ: \*\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ ) โดยวิธี t- test

พบว่า กระบวนการงอกมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้อง เริ่มงอกทั้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 10 โดยพบว่า ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ค่าความหนืดต่ำสุด (Trough) ค่าความหนืดลดลง (Breakdown) ค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และค่าเซตแบค (Setback) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ ) เช่นเดียวกับที่พบในการศึกษาของ ชนิษฐา และคณะ (2552); Benjamasuttikul and Naivikul (2007); Charoenthaikij *et al.* (2009)

### 3. สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่

#### 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม

นำข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผลิตได้จากเครื่องพ่นข้าวงอกต้นแบบ (ข้อ 2) มาทำการผสมตามอัตราส่วนในตารางที่ 17 แล้วทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี แสดงในตารางที่ 28

ตารางที่ 28 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม

อัตราส่วน		องค์ประกอบทางเคมี (มาตรฐานแห้ง)				
PGBR-KDML 105	PGBR-RD 10	โปรตีน (ร้อยละ)	ไขมัน (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	น้ำตาลรีดิวซ์ (มก/ก)	สารกาบา (มก/100 ก)
90	10	8.17 ± 0.14 <sup>c</sup>	2.92 ± 0.04 <sup>b</sup>	1.12 ± 0.10	577.95 ± 43.66 <sup>c</sup>	22.97 ± 0.64 <sup>d</sup>
70	30	8.41 ± 0.02 <sup>b</sup>	3.15 ± 0.05 <sup>a</sup>	1.10 ± 0.09	795.86 ± 14.87 <sup>b</sup>	36.53 ± 0.75 <sup>c</sup>
50	50	8.57 ± 0.22 <sup>b</sup>	3.19 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.08 ± 0.11	1,243.01 ± 10.98 <sup>a</sup>	47.91 ± 0.55 <sup>b</sup>
36.4	63.6	9.00 ± 0.47 <sup>a</sup>	3.29 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.07 ± 0.05	1,093.99 ± 57.75 <sup>a</sup>	52.91 ± 0.36 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: <sup>NS</sup> ไม่แตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

<sup>a-d</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

PGBR-KDML 105 = แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเจ้าพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

PGBR-RD 10 = แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10

ปริมาณของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อปริมาณโปรตีน ไขมัน น้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณสารกาบาอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) โดยปริมาณของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ร้อยละ 63.6 ให้ปริมาณโปรตีนสูงสุด คือ ร้อยละ 9.00 และลดลงเมื่อปริมาณของแป้งข้าวกล้อง

เริ่มงอก กข 10 ลดลง ปริมาณไขมันสูงสุด คือ ร้อยละ 3.29 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ สูงสุด คือ 1093.99 ไมโครกรัมต่อกรัม และสารกาบา สูงสุด คือ 52.91 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม และลดลงเมื่อ ปริมาณของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ลดลง ส่วนปริมาณเถ้า ไม่แตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

### 3.2 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม

สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม แสดงใน ตารางที่ 29

ตารางที่ 29 สมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม

อัตราส่วน		คุณสมบัติด้านความหนืด				เซตแบค (RVU)
PGBR-KDML105	PGBR-RD 10	ความหนืด สูงสุด (RVU)	ความหนืด ต่ำสุด (RVU)	ความหนืด ลดลง (RVU)	ความหนืด สุดท้าย (RVU)	
90	10	23.58 ± 0.68 <sup>a</sup>	13.83 ± 0.30 <sup>a</sup>	10.08 ± 0.36 <sup>a</sup>	29.08 ± 1.08 <sup>a</sup>	15.48 ± 0.85 <sup>a</sup>
70	30	7.94 ± 0.48 <sup>b</sup>	5.91 ± 0.22 <sup>b</sup>	2.02 ± 0.34 <sup>b</sup>	8.41 ± 0.84 <sup>b</sup>	2.50 ± 0.08 <sup>b</sup>
50	50	6.25 ± 0.43 <sup>c</sup>	5.00 ± 0.22 <sup>c</sup>	1.25 ± 0.21 <sup>c</sup>	7.16 ± 0.22 <sup>b</sup>	2.16 ± 0.83 <sup>b</sup>
36.4	63.6	5.36 ± 0.45 <sup>c</sup>	3.46 ± 0.41 <sup>d</sup>	1.89 ± 0.74 <sup>b</sup>	5.58 ± 0.41 <sup>c</sup>	2.12 ± 0.10 <sup>b</sup>

หมายเหตุ: <sup>a-d</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

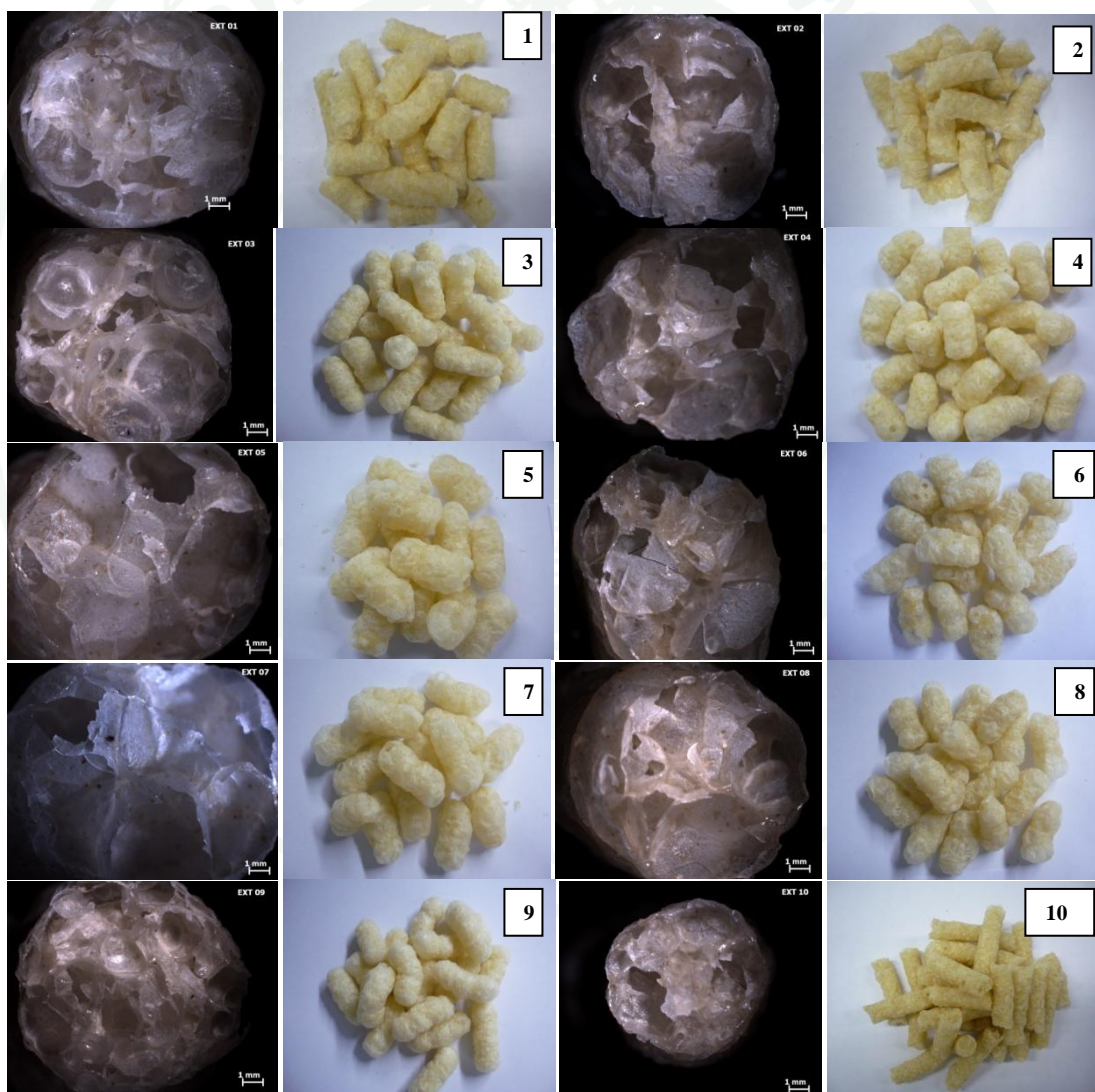
PGBR-KDML 105 = แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก พันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

PGBR- RD 10= แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก พันธุ์ กข 10

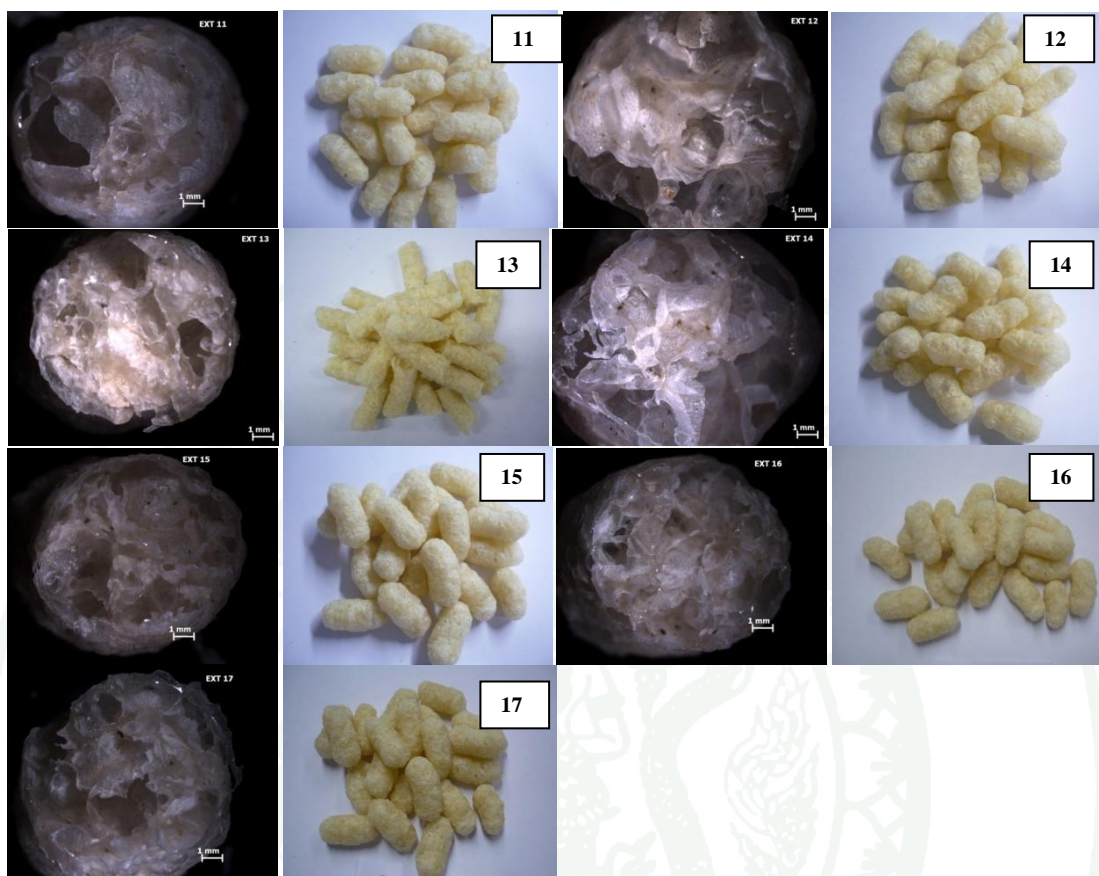
ปริมาณของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 มีผลต่อสมบัติด้านความหนืด โดยปริมาณของ แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ที่ร้อยละ 10 ให้ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Trough) ความหนืดลดลง (Breakdown) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และค่าเซตแบค (Setback) มีค่าสูงสุด คือ 23.58 13.83 10.08 29.08 และ 15.48 RVU ตามลำดับ และการเพิ่มขึ้น ของ แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 มีผลทำให้สมบัติด้านความหนืดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

### 3.3 ลักษณะปรากฏของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่

ทำการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ตามแผนการทดลองในตารางที่ 17 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ และลักษณะของขนมกรอบพอง แสดงในภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (ซ้าย) และลักษณะปรากฏ (ขวา) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

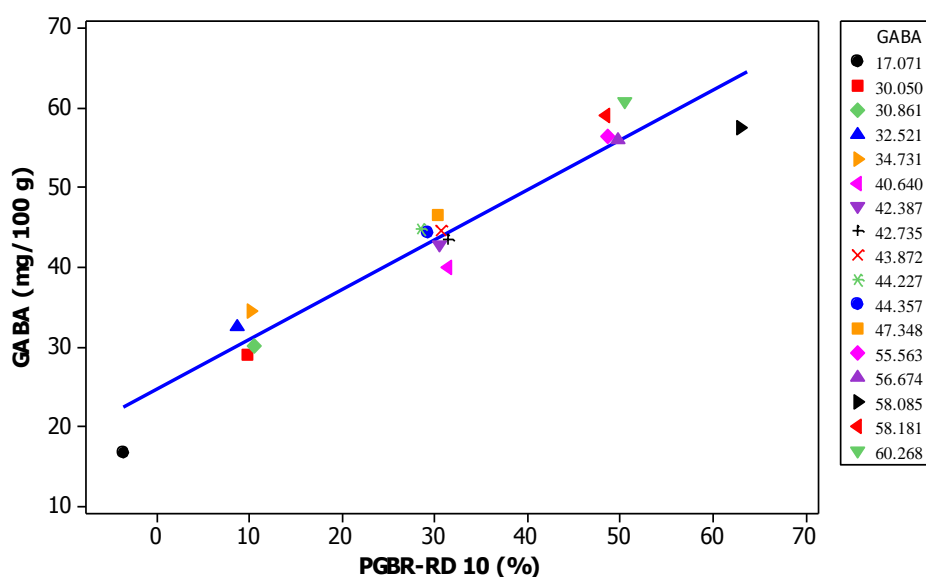


ภาพที่ 37 (ต่อ)

หมายเหตุ: หมายเลขที่กำกับหมายถึงสิ่งทดลองตามตารางที่ 17

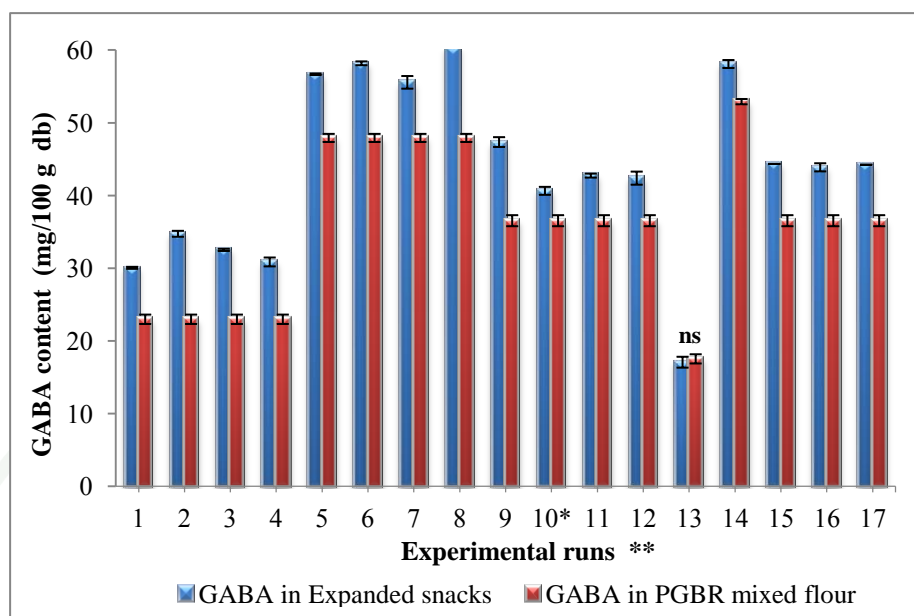
ภาพที่ 37 แสดงลักษณะภายในของขนมกรอบพอง พบว่า ตัวอย่างที่มีการพองตัวสูงจะมีช่องอากาศภายในที่ใหญ่และมีผนังเซลล์ที่บาง ซึ่งภาพเหล่านี้สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ของการพองตัวกับค่าความแข็งที่วัดจากเครื่อง Texture analyzer โดยตัวอย่างที่มีการพองตัวสูงจะมีช่องอากาศภายในที่ใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มีการพองตัวต่ำ การพองตัวสูงนั้นจะทำให้ผนังเซลล์บาง จึงทนต่อแรงกดได้น้อย ทำให้ค่าแรงกดต่ำ เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่พองตัวน้อยที่จะมีช่องอากาศภายในเล็กและมีขนาดสม่ำเสมอ และผนังเซลล์มีความหนาแน่นมากกว่า จึงทนต่อแรงกดได้สูง

### 3.4 ปริมาณสารกาบาในขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก



ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 (PGBR-RD 10) ต่อ ปริมาณสารกาบาในขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

ปริมาณสารกาบาในขนมกรอบพองมีค่าระหว่าง 17.07 – 60.26 มิลลิกรัม/100 กรัมโดย น้ำหนักแห้ง และค่าการทำนาย (Predicted value) มีค่าระหว่าง 24.24 – 64.79 มิลลิกรัม/100 กรัม แสดงในตารางที่ 30 และภาพที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 และปริมาณสารกาบาในขนมกรอบพอง พบว่า เมื่อปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 ทำให้ปริมาณสารกาบาในตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 มีปริมาณของสารกาบาอยู่สูงถึง 122.51 มิลลิกรัม/100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 จึงทำให้ปริมาณกาบาในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นด้วย



ภาพที่ 39 เปรียบเทียบปริมาณสารกาบาในขนมกรอบพอง(สีน้ำเงิน)และแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม (สีแดง)

ภาพที่ 39 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณสารกาบาในขนมกรอบพองและแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสม พบว่า ปริมาณสารกาบาในขนมกรอบพองในสิ่งทดลองที่ 13 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) โดยมีสภาวะการผลิตคือ ความชื้นร้อยละ 19 ความเร็วรอบสกรู 350 rpm และปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ร้อยละ 0 (แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก ขวดดอกมะลิ 105 ร้อยละ 100) ส่วนในสิ่งทดลองอื่นๆ พบว่า ปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ ) ยกเว้นในสิ่งทดลองที่ 10 ปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) มีสภาวะการผลิตคือ ความชื้นร้อยละ 22.3 ความเร็วรอบสกรู 350 rpm และปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ร้อยละ 30 (แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก ขวดดอกมะลิ 105 ร้อยละ 70)

แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันไม่มีผลต่อการลดลงของปริมาณสารกาบา แต่ในขณะเดียวกันกลับพบว่า ปริมาณสารกาบาในขนมกรอบพองเพิ่มขึ้น จากการศึกษาของ Ohtsubo *et al.* (2005) พบว่าการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกที่ผสมยีสต์แห้งร้อยละ 10 ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารกาบา และยังพบว่าสามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ได้ Komatsuzaki *et al.* (2007) พบว่าการใช้ไอน้ำ (Steam) เป็นเวลา 20 และ 30 นาที สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์จาก  $10^8$  เหลือ  $10^2$  โดยที่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารกาบา Watanabe *et al.* (2004) ได้ใช้แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกร้อยละ 30 ทดแทนแป้งสาลีในการผลิตขนมปัง อบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นาน

20 นาที่ พบว่า สารกาบาสลายตัวระหว่างกรอบ โดย Bown and Shelp (1997) และ Shelp *et al.* (1999) กล่าวว่า สารกาบาสลายตัวที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส แต่ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันนี้ อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 120-130 องศาเซลเซียส จึงไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารกาบ

ตารางที่ 30 ปริมาณสารกาบจากการทดลองและค่าการทำนาย

สิ่งทดลอง	สภาวะเอกซ์ทรูชัน	สารกาบ (มิลลิกรัม/100 กรัม)	
	FM/ SS/ PGBR-RD10	ค่าจากการทดลอง (Observed values)	ค่าการทำนาย <sup>1/</sup> (Predicted values)
1	17/ 300/ 10	30.05 ± 0.13	30.83
2	21/ 300/ 10	34.73 ± 0.40	30.53
3	17/ 400/ 10	32.52 ± 0.15	30.68
4	21/ 400/ 10	30.86 ± 0.61	30.38
5	17/ 300/ 50	56.67 ± 1.30	55.94
6	21/ 300/ 50	58.18 ± 0.26	55.64
7	17/ 400/ 50	55.56 ± 0.87	55.80
8	21/ 400/ 50	60.26 ± 1.34	55.50
9	15.6/ 350/ 30	47.34 ± 1.34	45.16
10	22.3/ 350/ 30	40.64 ± 0.54	44.65
11	19/ 264/ 30	42.73 ± 0.27	45.03
12	19/ 434/ 30	42.38 ± 0.90	44.78
13	19/ 350/ 0	17.07 ± 0.74	18.85
14	19/ 350/ 63.6	58.08 ± 0.55	61.09
15	19/ 350/ 30	44.35 ± 0.06	44.09
16	19/ 350/ 30	43.87 ± 1.27	44.09
17	19/ 350/ 30	44.22 ± 0.20	44.09

หมายเหตุ: <sup>1/</sup> จากสมการในตารางที่ 32

FM = ความชื้นของวัตถุดิบ (%)

SS = ความเร็วรอบสกรู (rpm)

PGBR-RD 10 = แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 (%)

### 3.5 ลักษณะทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

คุณสมบัติทางกายภาพของขนมกรอบพอง แสดงในตารางที่ 31 สมการผลตอบแทน ของสารกบาและสมบัติทางกายภาพของขนมกรอบพองแสดงในตารางที่ 32 และค่าสหสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 33

ตารางที่ 31 คุณสมบัติทางกายภาพของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

สิ่งทดลอง	สถานะเอ็กซ์ทรูชัน	คุณสมบัติทางกายภาพ			
	FM/ SS/ PGBR-RD10	อัตราการพองตัว	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	WAI (g/g)	WSI (%)
1	17/ 300/ 10	3.82±0.12	0.17±0.01	4.51±0.44	36.36±0.79
2	21/ 300/ 10	3.41±0.13	0.25±0.03	5.63±0.60	26.37±1.62
3	17/ 400/ 10	3.67±0.14	0.13±0.01	4.56±0.80	38.95±0.97
4	21/ 400/ 10	3.40±0.15	0.25±0.02	6.60±0.43	31.67±0.58
5	17/ 300/ 50	4.56±0.18	0.11±0.02	4.62±0.50	50.26±4.51
6	21/ 300/ 50	4.05±0.24	0.25±0.02	4.29±0.51	37.38±2.88
7	17/ 400/ 50	4.64±0.39	0.09±0.01	4.01±0.06	51.45±5.07
8	21/ 400/ 50	4.23±0.16	0.27±0.01	5.10±0.26	43.56±1.09
9	15.6/ 350/ 30	3.87±0.19	0.12±0.01	3.82±2.00	40.22±2.86
10	22.3/ 350/ 30	2.90±0.14	0.40±0.04	5.03±0.06	26.01±0.99
11	19/ 264/ 30	3.86±0.16	0.16±0.02	4.85±0.42	47.04±6.05
12	19/ 434/ 30	4.20±0.23	0.12±0.02	5.28±0.68	47.84±3.42
13	19/ 350/ 0	3.15±0.15	0.21±0.02	7.17±0.06	29.58±0.55
14	19/ 350/ 63.6	4.80±0.19	0.12±0.02	3.89±0.49	47.26±0.91
15	19/ 350/ 30	3.42±0.17	0.22±0.03	4.65±0.41	32.25±0.66
16	19/ 350/ 30	3.42±0.16	0.21±0.02	5.07±0.31	32.30±1.73
17	19/ 350/ 30	3.41±0.15	0.22±0.02	4.79±0.08	33.57±0.38

หมายเหตุ: FM = ความชื้นของวัตถุดิบ (%)

SS = ความเร็วรอบสกรู (rpm)

PGBR-RD 10 = แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 (%)

ตารางที่ 32 สมการผลตอบสนองของสารกาบา และคุณสมบัติทางกายภาพ

	สมการผลตอบสนอง	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
สารกาบา	$24.088 - 0.075 X_1 - 0.0014 X_2 + 0.889 X_3 - 0.0043 X_3^2$	0.95	0.94
อัตราการพองตัว	$19.516 - 0.342 X_1 - 0.068 X_2 - 0.016 X_3 + 0.0058 X_1^2 + (9.958E-5) X_2^2 + (6.266E-3) X_3^2$	0.96	0.94
ความหนาแน่น	$0.043 - 0.135 X_1 + 0.007 X_2 - 0.0044 X_3 + 0.0042 X_1^2 - (1.024E-5) X_2^2 - (4.985E-5) X_3^2 + (3.522E-3) X_1 X_3$	0.96	0.93
WAI	$-1.154 + 1.274 X_1 - 0.053 X_2 + 0.078 X_3 - 0.049 X_1^2 + (5.148E-3) X_3^2 + 0.003 X_1 X_2 - 0.0074 X_1 X_3$	0.86	0.75
WSI	$373.989 - 5.637 X_1 - 1.571 X_2 + 0.011 X_3 + 0.002 X_2^2 + 0.004 X_2^2 + 0.01 X_1 X_2$	0.98	0.97

หมายเหตุ: X<sub>1</sub> = ความชื้นของวัตถุดิบ (%)

X<sub>2</sub> = ความเร็วรอบสกรู (rpm)

X<sub>3</sub> = แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 (%)

ตารางที่ 33 ค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรต้นและผลตอบสนองของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

	สารกาบา	อัตราการพองตัว	ความหนาแน่น	WAI	WSI	ความแข็ง	ความเปราะ	ความเหนียว
ความชื้นวัตถุดิบ	-0.013	-0.401	0.846**	0.457	-0.501*	0.415	-0.772**	-0.515*
ความเร็วรอบสกรู	-0.006	0.087	-0.103	0.149	0.133	-0.160	0.219	0.083
ข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10	0.963**	0.746**	-0.109	-0.655**	0.643**	-0.705**	0.131	-0.733**
สารกาบา	1	0.714**	-0.166	-0.701**	0.611**	-0.769**	0.189	-0.762**
อัตราการพองตัว		1	-0.684**	-0.575*	0.915**	-0.838**	0.530*	-0.327
ความหนาแน่น			1	0.398	-0.743**	0.630**	-0.668**	-0.291
WAI				1	-0.519*	0.607**	-0.451	0.302
WSI					1	-0.832**	0.606*	-0.213
ความแข็ง						1	-0.461	0.426
ความเปราะ							1	0.367
ความเหนียว								1

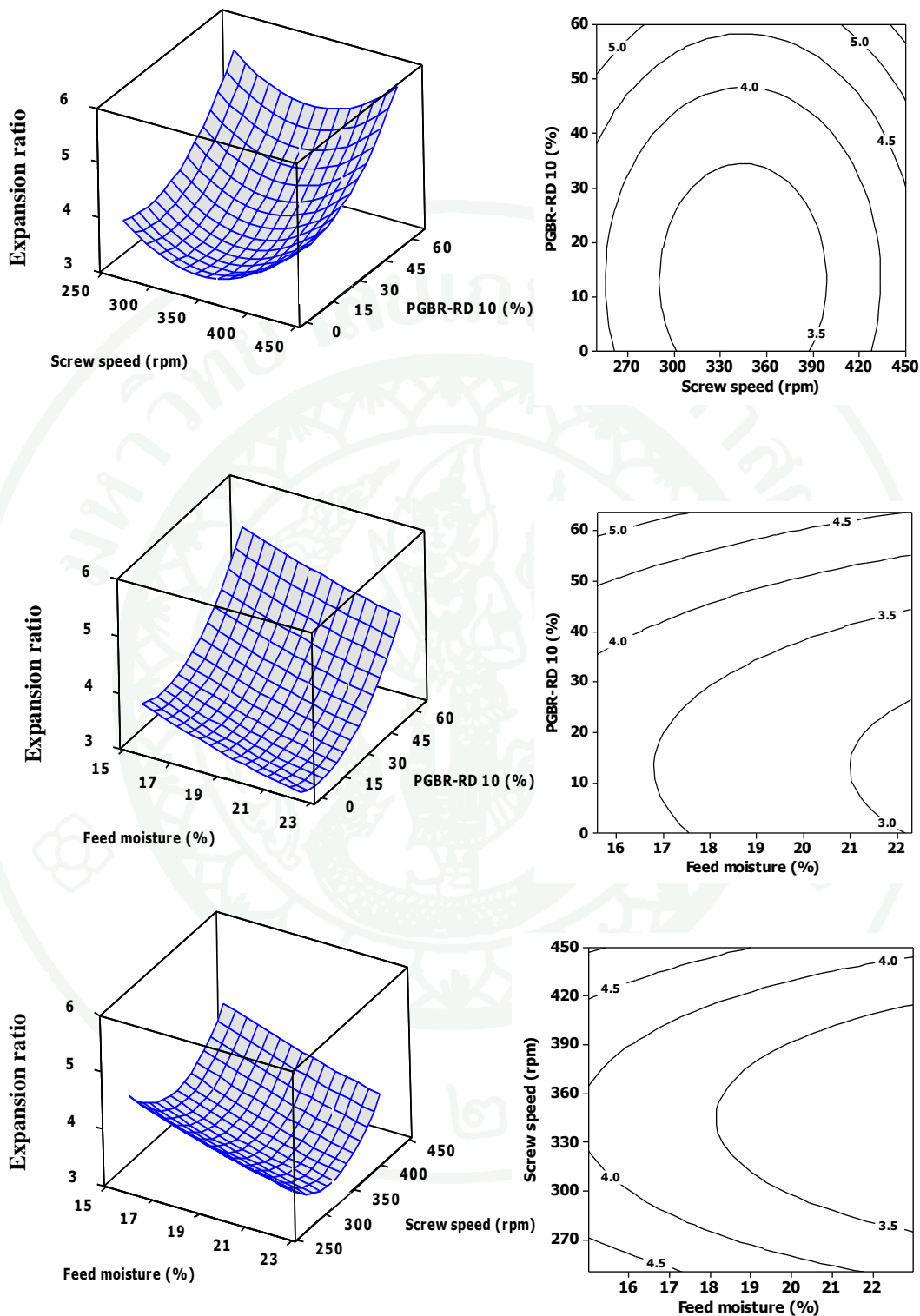
หมายเหตุ: \* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

\*\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ )

อัตราการพองตัว (Expansion ratio) นับเป็นดัชนีที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ประเภทพองตัวทันที (Direct expanded products) เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างภายใน (Grenus *et al.*, 1993) และจะมีผลต่อความชอบทางประสาทสัมผัส (ประชา และคณะ 2539) ขนกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก มีค่าอัตราการพองตัวระหว่าง 2.90 – 4.80 สมการผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 31 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.96 และ 0.94 ตามลำดับ ส่วนค่าสหสัมพันธ์ ( $r$ ) ของอัตราการพองตัวกับ แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 เท่ากับ 0.746 ( $P \leq 0.01$ ) ส่วน ความชื้นวัตถุดิบ และ ความเร็วรอบสกรู ไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) (ตารางที่ 33) แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของอัตราการพองตัว แสดงในภาพที่ 40

จากภาพที่ 40 พบว่า อัตราการพองตัวของขนกรอบพองมีการลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความชื้น ( $P \leq 0.01$ ) และมีการเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ( $P \leq 0.01$ ) Mercier and Feillet (1975) และ Chinnaswamy (1993) กล่าวว่า ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกติน มีผลต่อลักษณะทางกายภาพ โดยหากมีปริมาณแอมิโลสมากจะทำให้การพองตัวลดลง ในขณะที่แอมิโลเพกตินจะช่วยในการพองตัว ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักเบา และผิวหน้าเรียบ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงของแอมิโลส จะยึดตัวเป็นเส้นตรงเมื่อมีแรงเฉือน และให้โครงสร้างที่แข็งแรงในขณะที่โครงสร้างของแอมิโลเพกตินที่มีความเป็นกึ่งก้าน จึงเกาะตัวกันอย่างหลวม และมีความแข็งแรงน้อยกว่า (Kokini *et al.*, 1992) เมื่อโคผ่านหน้าไค (Die) แรงดันไอะจะดันโครงสร้างให้พองตัวออกได้ง่ายกว่า ทำให้พองตัวดีกว่า (Moraru and Kokini, 2003) เช่นเดียวกับรายงานของ พัชรา (2547) พบว่า เอกซ์ทรูเดตจากข้าวเหนียว กข 6 มีอัตราการพองตัวสูงสุดรองลงมาคือ เอกซ์ทรูเดตจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 สุพรรณบุรี 60 และชัยนาท 1 ตามลำดับ

Ding *et al.* (2005) พบว่า การเพิ่มความชื้นทำให้การพองตัวของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวลดลง ในขณะที่ความเร็วของสกรูไม่มีผล เช่นเดียวกับที่พบในแป้งสาลี (Ding *et al.*, 2006) และ สุนันทาและมานิชญ์ (2546) ยังพบว่า ความชื้นของวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20 –24 จะทำให้ อัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตจากข้าวกล้องขาวดอกมะลิ 105 ลดลง โดยสภาวะที่ทำให้การพองตัวดีที่สุดคือ อุณหภูมิใบเรลที่ 160 องศาเซลเซียส ความชื้นร้อยละ 20

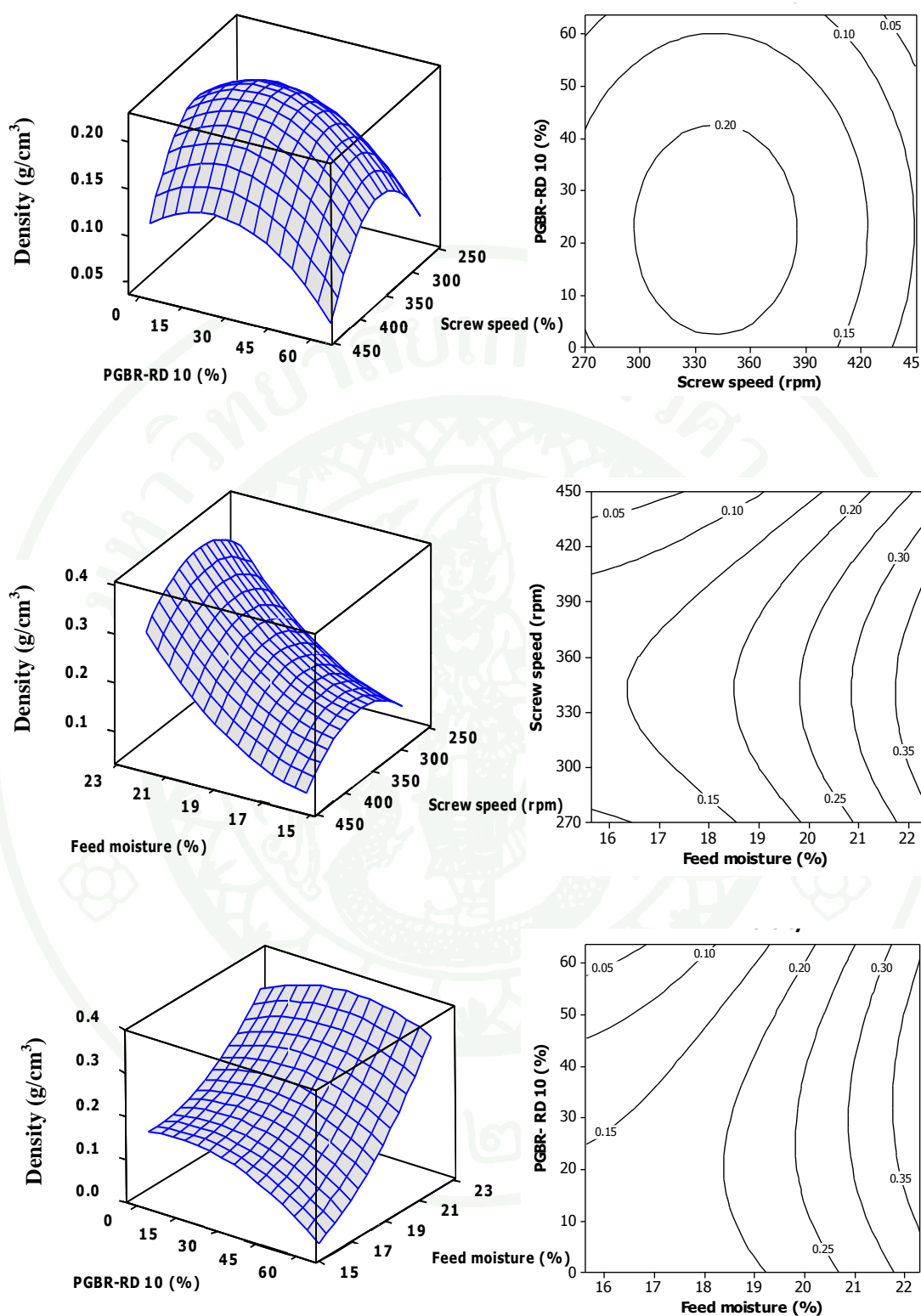


ภาพที่ 40 Surface plots และ Contour plots ของอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

ความหนาแน่น (Density) ขนมหกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก มีค่าความหนาแน่นระหว่าง 0.09 – 0.40 กรัม/ลูกบาศก์ สมการผลตอบแทนแสดงในตารางที่ 32 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.96 และ 0.93 ตามลำดับ ส่วนค่าสหสัมพันธ์ ( $r$ ) ของความหนาแน่นกับความชื้นวัตถุดิบ เท่ากับ 0.846 ( $P \leq 0.01$ ) ส่วนความเร็วรอบสกรู และ แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) (ตารางที่ 33) แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของความหนาแน่น แสดงในภาพที่ 41

จากภาพที่ 41 พบว่า ความหนาแน่นของขนมหกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ( $P \leq 0.05$ ) และลดลงเป็นอย่างมากเมื่อ ความชื้นเพิ่มขึ้น ( $P \leq 0.01$ ) อย่างไรก็ตามความเร็วรอบสกรู ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นเพียงเล็กน้อย แต่ไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่า ผลของความชื้นของวัตถุดิบมีผลเป็นอย่างมากต่อความหนาแน่น เช่นเดียวกับการศึกษาของ รุ่งนภาและประชา (2538) และ สุนันทาและมาโนชญ์ (2546) โดยสภาวะการทดลองที่ 10 คือ ความชื้นร้อยละ 22.3 ความเร็วรอบ 350 rpm และปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ร้อยละ 30 ให้ค่าความหนาแน่นสูงสุด

Ding *et al.* (2005) กล่าวว่า ความชื้นของวัตถุดิบ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนาแน่นและการพองตัวของเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าว โดยการเพิ่มขึ้นของความชื้นจะทำให้ความยืดหยุ่นของมวลหลอม (melt elasticity) ลดลง เป็นผลให้การพองตัวลดลง และเพิ่มความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดตจากสตาร์ช (Singh *et al.*, 1996; Ilo *et al.*, 1999)

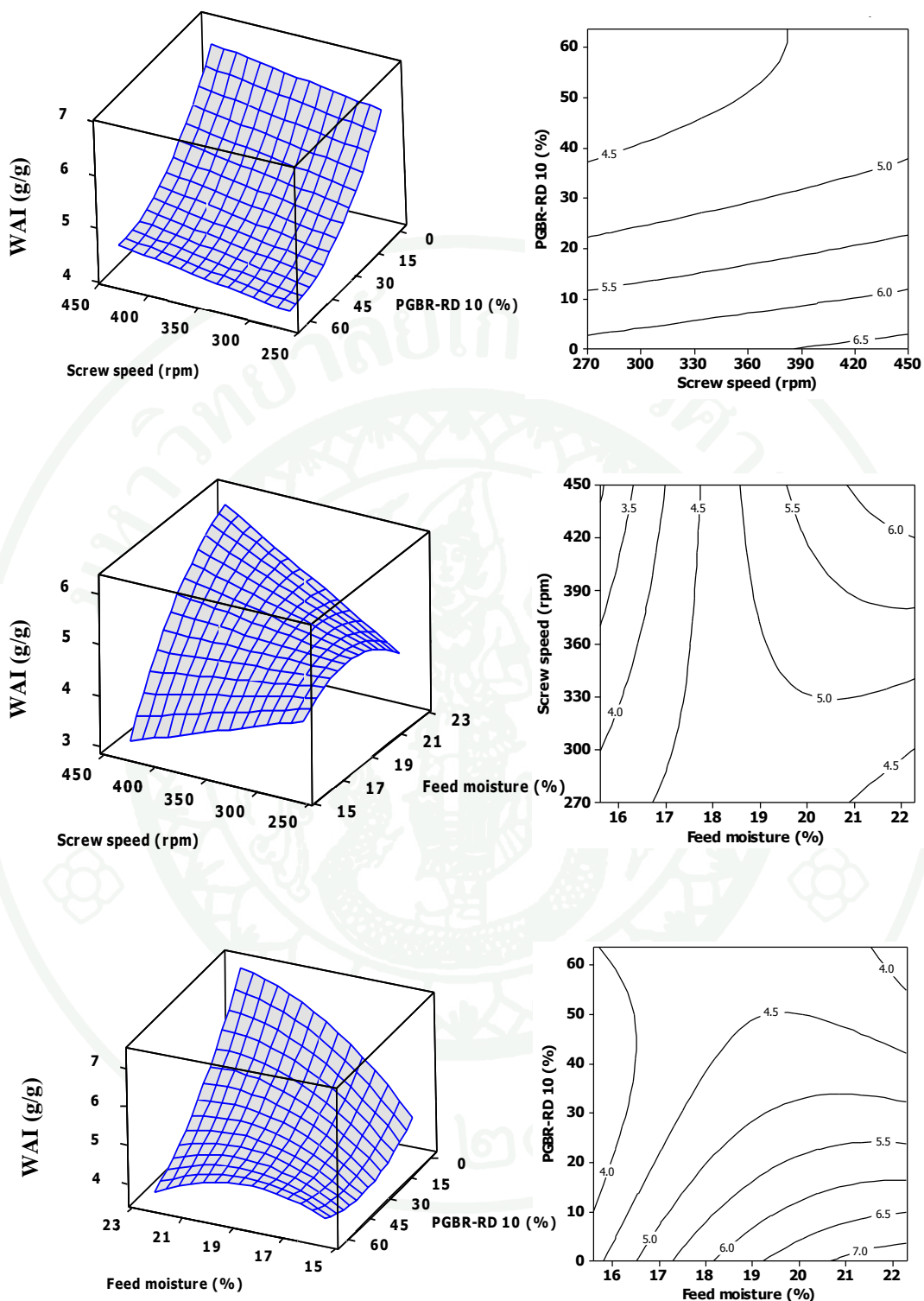


ภาพที่ 41 Surface plots และ Contour plots ของความหนาแน่น (Density) ของขนม  
กรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มออก

ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI) และดัชนีการละลายน้ำ (WSI) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเอกซ์ทรูเดต โดยค่า WSI หมายถึง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากสตาร์ช ซึ่งสัมพันธ์กับ Dextrinization (Colonna *et al.* 1989) ส่วนค่า WAI คือ ปริมาณของสตาร์ชที่พองตัวได้ในน้ำที่มากเกินไป ณ อุณหภูมิห้อง ซึ่งปกติแล้วสตาร์ชจะไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้อง และมีความหนืดใกล้เคียงกับน้ำเปล่า ค่า WAI นี้จะแสดงถึงการเสียหายของสตาร์ช (Damaged starch) การเสียดสภาพของโปรตีน และการเกิด macromolecular complex formation (Gomez and Aguilera, 1983) ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Mercier *et al.*, 1989)

ดัชนีการดูดซับน้ำ (Water absorption index; WAI) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก มีค่า ระหว่าง 3.82 – 7.17 กรัม/กรัมตัวอย่าง สมการผลตอบสนองแสดงในตารางที่ 32 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.86 และ 0.75 ตามลำดับ ส่วนค่าสหสัมพันธ์ ( $r$ ) ของ WAI กับแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 เท่ากับ -0.655 ( $P \leq 0.01$ ) ซึ่งหมายความว่า ปริมาณแอมิโลเพกตินที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า WAI ลดลง ส่วนความชื้น และความเร็วรอบสกรู ไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) (ตารางที่ 33) แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI) แสดงในภาพที่ 42

เมื่อพิจารณาจากกราฟ (ภาพที่ 42) จะพบว่าเมื่อปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ WAI ลดลงอย่างมาก ส่วนการเพิ่มขึ้นของความชื้นและความเร็วรอบสกรูมีผลเพียงเล็กน้อย การที่ค่า WAI ลดลงเป็นผลมาจากการแตกตัว (Degradation) และ แดกหัก (Dextrinization) ของสตาร์ช ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง (Water holding) เนื่องจากขนาดโมเลกุลที่เล็กลง (Merier and Feillet, 1975) นอกจากนี้ค่า WAI ยังสามารถบ่งชี้ถึงระดับการหุงสุก (Degree of cooking) (Bryant *et al.*, 2001) พัชรา (2547) รายงานว่า ปริมาณแอมิโลสที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า WAI เพิ่มขึ้น เนื่องจากแอมิโลเพกตินสามารถเกิด Starch conversion ได้ง่ายกว่าแอมิโลส ส่วน Ding *et al.* (2005) รายงานว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้น ทำให้ค่า WAI เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเพิ่มอุณหภูมิของบารเลต ทำให้ค่า WAI ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากน้ำทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นในระบบทำให้ลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสตาร์ช ทำให้สามารถอุ้มน้ำได้ จึงมีผลต่อค่า WAI เช่นเดียวกับที่พบใน Liu *et al.* (2011) และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความเร็วของสกรู ส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่สตาร์ชมากขึ้นทำให้ค่า WAI ลดลง (Hagenimana *et al.*, 2006).

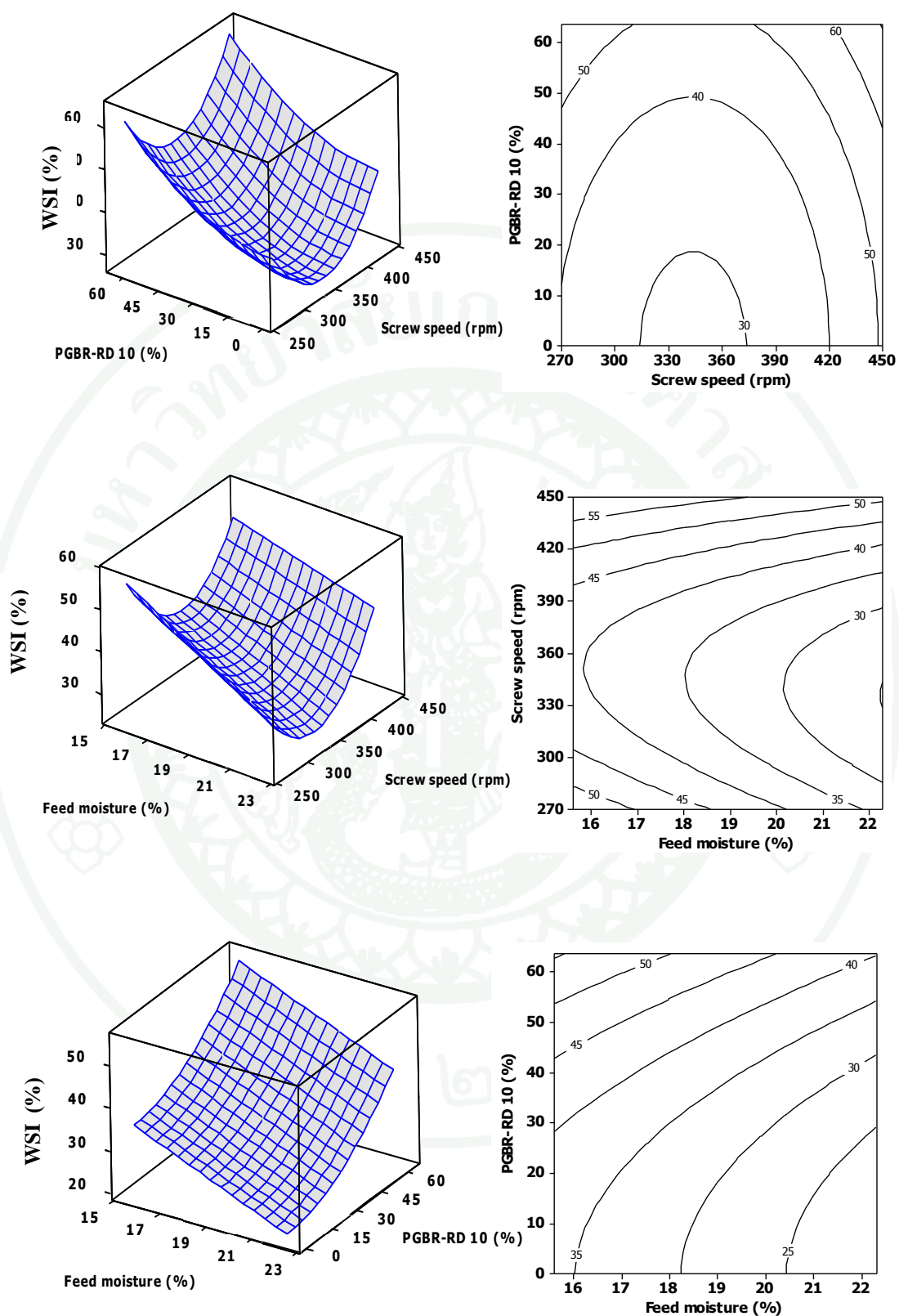


ภาพที่ 42 Surface plots และ Contour plots ของดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

ดัชนีการละลายน้ำ (Water solubility index; WSI) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้อง เริ่มงอก มีค่า ระหว่าง ร้อยละ 26.01 – 51.45 สมการผลตอบแทนแสดงในตารางที่ 32 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.98 และ 0.97 ตามลำดับ ส่วนค่าสหสัมพันธ์ (r) ของ WSI กับ แป้งข้าวกล้อง เริ่มงอก กข 10 เท่ากับ 0.643 ( $P \leq 0.01$ ) หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของเอมิโลเพกตินจะทำให้ค่า WSI เพิ่มขึ้น ส่วนความชื้นของวัตถุดิบ เท่ากับ -0.501 ( $P \leq 0.05$ ) หมายความว่า ความชื้นของวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า WSI ลดลง และความเร็วรอบสกรู (SS) ไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) นอกจากนี้ค่าสหสัมพันธ์ของ WAI และ WSI ยังมีค่าแปรผกผันกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ -0.519 ( $P \leq 0.05$ ) (ตารางที่ 33) แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของดัชนีการละลายน้ำ (WSI) แสดงในภาพที่ 43

ค่า WSI บ่งชี้ถึงระดับการถูกทำลายของเม็ดสตาร์ช (Degradation of starch) (Guha *et al.*, 1997; Bryant *et al.*, 2001) และระดับของ Starch conversion ที่วัดจากปริมาณของแข็งที่สามารถละลายได้ (Soluble component) หลังจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Ding *et al.*, 2005) จากภาพที่ 43 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า WSI เพิ่มขึ้น แต่ความชื้นของวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า WSI ลดลง จากรายงานของ Guha and Ali (2006) พบว่า ค่า WSI ของเอกซ์ทรูเดตจากข้าวแอมิโลสต่ำ จะให้ค่า WSI สูงกว่าเอกซ์ทรูเดตจากแป้งที่มีแอมิโลสสูง เช่นเดียวกับที่พบในพัชรา (2547)

Liu *et al.* (2011) พบว่า ความชื้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่า WSI ลดลง เช่นกัน เช่นเดียวกับที่พบใน Ding *et al.* (2005) และ เอกซ์ทรูเดตข้าวสาลี (Ding *et al.*, 2006) เนื่องจาก เอมิโลเพกตินจะให้ความหนืดที่สูงกว่าแอมิโลส และเมื่ออยู่ในสถานะที่มีน้ำหรือความชื้นต่ำ จะทำให้เกิด Degradation สูงขึ้น (Chen and Yeh, 2001) ดังนั้นเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความหนืดลดลง และยังช่วยให้ลดแรงเสียดทานจากสกรู ทำให้ค่า WSI ลดลง



ภาพที่ 43 Surface plots (ซ้าย) และ Contour plots (ขวา) ของดัชนีการละลายน้ำ (WSI) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

ตารางที่ 34 ลักษณะทางเนื้อสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

สิ่งทดลอง	สภาวะเอกซ์ทรูชัน	ลักษณะทางเนื้อสัมผัส		
	FM/ SS/ PGBR- RD10	ความแข็ง (Newton)	ความเปราะ (mm)	ความเหนียว (N/mm)
1	17/ 300/ 10	41.85±2.44	2.27±0.45	23.13±2.12
2	21/ 300/ 10	44.99±2.32	1.65±0.50	13.55±2.02
3	17/ 400/ 10	34.06±3.42	2.66±1.10	21.21±1.40
4	21/ 400/ 10	39.61±3.45	1.45±0.12	12.96±3.40
5	17/ 300/ 50	25.55±3.04	2.52±0.46	12.35±3.00
6	21/ 300/ 50	29.73±2.54	1.76±0.86	8.93±2.00
7	17/ 400/ 50	23.80±3.64	2.55±1.22	11.49±1.89
8	21/ 400/ 50	29.06±3.66	2.18±0.59	9.77±1.11
9	15.6/ 350/ 30	34.15±2.70	2.88±0.38	19.77±2.44
10	22.3/ 350/ 30	53.30±3.80	1.60±0.36	11.62±2.37
11	19/ 264/ 30	34.25±4.10	1.78±0.86	12.69±3.04
12	19/ 434/ 30	31.99±2.45	2.27±1.12	17.72±4.32
13	19/ 350/ 0	51.40±4.65	1.89±1.22	25.32±3.44
14	19/ 350/ 63.6	31.57±3.67	1.83±0.68	10.60±2.42
15	19/ 350/ 30	34.40±1.80	1.61±0.49	12.67±1.56
16	19/ 350/ 30	37.03±2.20	1.50±1.02	14.50±3.53
17	19/ 350/ 30	36.37±3.40	1.61±0.80	15.08±2.36

หมายเหตุ: FM = ความชื้นของวัตถุดิบ (%)

SS = ความเร็วรอบสกรู (rpm)

PGBR-RD 10 = แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกจากข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 (%)

ตารางที่ 35 สมการผลตอบสนองของลักษณะเนื้อสัมผัส

	สมการผลตอบสนอง	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
ความแข็ง	$-6.092 - 8.677 X_1 + 0.702X_2 - 0.317X_3 + 0.277 X_1^2 - 0.001 X_2^2$	0.81	0.72
ความเปราะ	$32.970 - 2.401 X_1 - 0.039 X_2 - 0.014 X_3 + 0.060 X_1^2 + (6.702E-5) X_2^2 + (2.911E-3) X_3^2 - (2.512E-4) X_1 X_2$	0.90	0.83
ความเหนียว	$92.772 - 3.865 X_1 - 0.063 X_2 - 1.096 X_3 + 0.0023 X_3^2 + 0.0037 X_1 X_2 + 0.0396 X_1 X_3$	0.89	0.82

หมายเหตุ:  $X_1$  = ความชื้นของวัตถุดิบ (%)

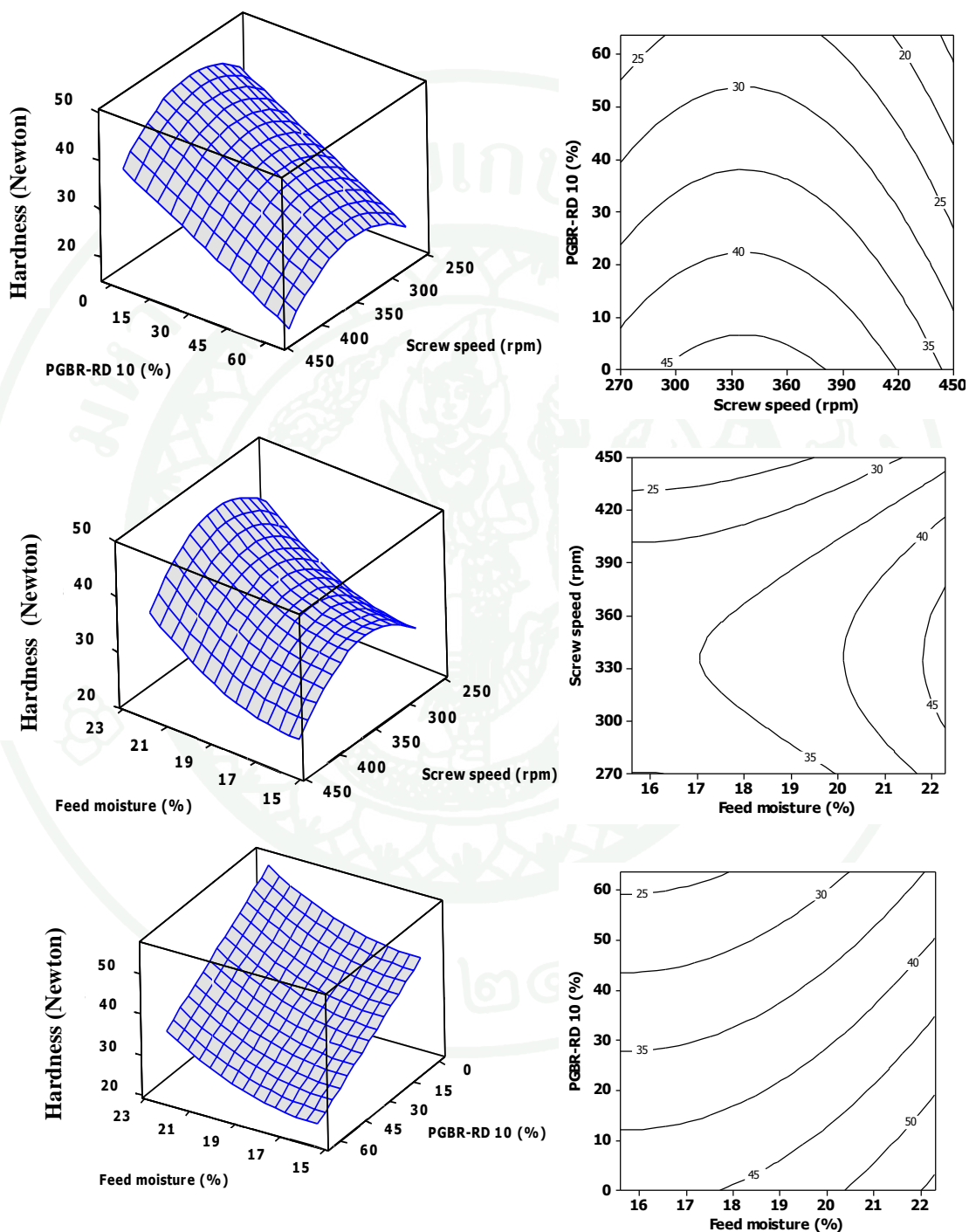
$X_2$  = ความเร็วรอบสกรู (rpm)

$X_3$  = แป้งข้าวกล้องเริ่มออกข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 (%)

ค่าความแข็ง (Hardness) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มออก มีค่า ระหว่าง 23.80 – 53.30 นิวตัน สมการผลตอบสนอง แสดงในตารางที่ 35 โดยค่า R<sup>2</sup> และค่า R<sup>2</sup><sub>adj</sub> เท่ากับ 0.81 และ 0.72 ตามลำดับ ส่วนค่าสหสัมพันธ์ (r) ของ ค่าความแข็ง กับแป้งข้าวกล้องเริ่มออก กข 10 เท่ากับ -0.705 ( $P \leq 0.01$ ) หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของเอมิโลเพกตินจะทำให้ค่าความแข็งลดลง ส่วนความชื้นของวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรู ไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) (ตารางที่ 33) แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของค่าความแข็ง แสดงในภาพที่ 44

ค่าความแข็ง วัดจากแรงกดสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการกด (Maximum peak force) จากภาพที่ 44 พบว่า การเพิ่มปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มออก กข 10 ทำให้ค่าความแข็งลดลงอย่างมาก ส่วนความชื้นที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นกัน Guha and Ali (2006) พบว่าข้าวที่เอมิโลสต่ำจะทำให้การพองตัวที่ต่ำกว่าข้าวที่มีเอมิโลสสูง เช่นเดียวกับ รุ่งนภาและประชา (2538) และ พัชรา (2547) การที่ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นนั้น มีความสัมพันธ์กับการพองตัว เนื่องจากน้ำที่เพิ่มขึ้นมากเกินไปจะทำให้ความหนืดของโดภายในบารลดลดลง และทำให้ความดันลดลงเช่นกัน(มานิชญ์ และสุนันทา, 2547) เมื่อความดันภายในกับภายนอกบารแตกต่างกันน้อยลง จะทำให้น้ำที่อยู่ในโดระเหยออกมาไม่หมดเมื่อ โดผ่านหน้าไค (die) ออกมา ทำให้การพองตัวลดลง และทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น โดยสุนันทาและมานิชญ์ (2546) พบว่า การพองตัวและแรงกดแตกมีความสัมพันธ์

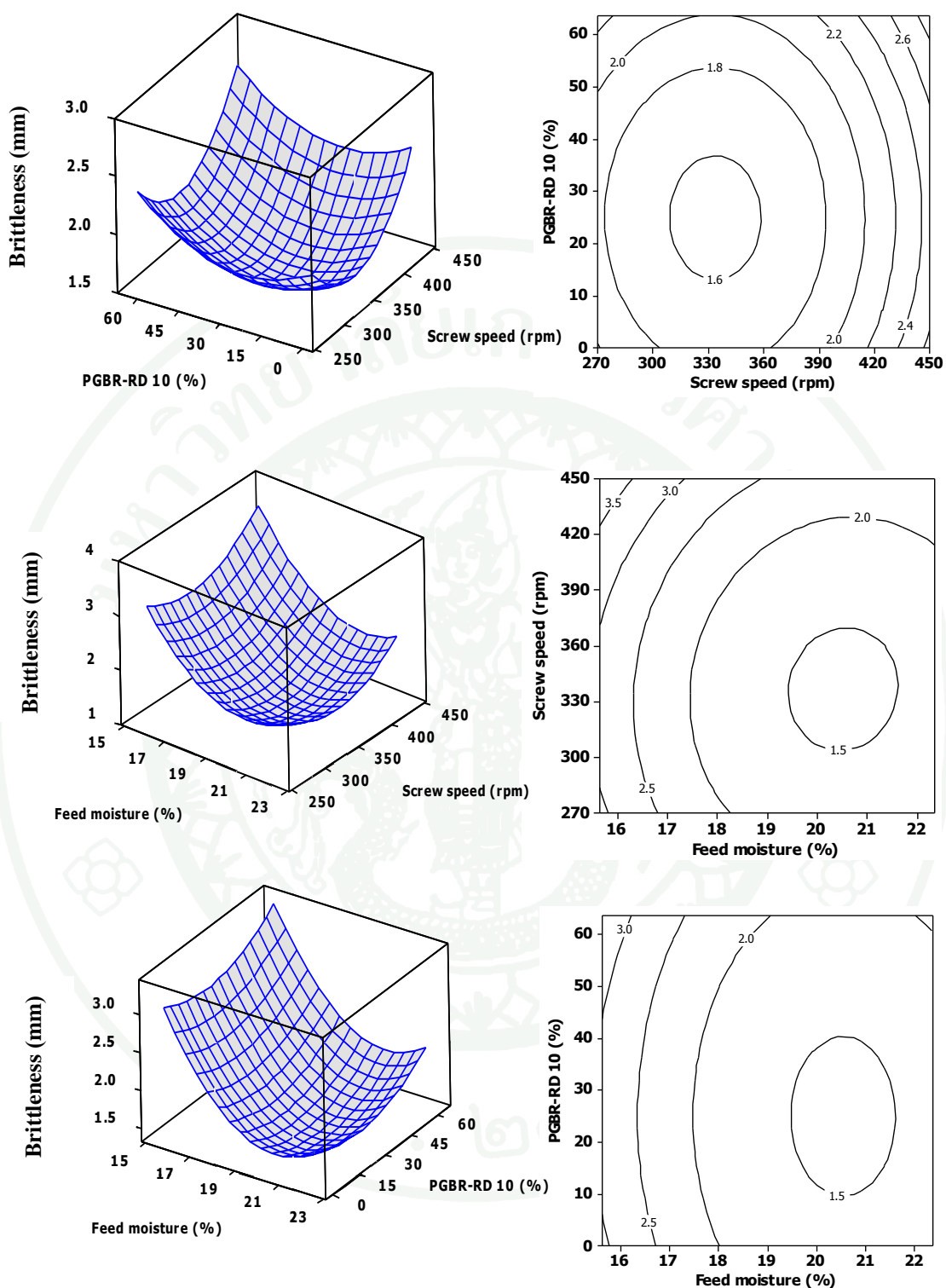
แบบตรงข้ามกัน โดยเอกซ์ทรูเดตที่มีการพองน้อย จะมีโพรงอากาศ ภายในที่เล็กและผนังเซลล์ที่หนา ทำให้ทนต่อแรงในการกดได้มาก



ภาพที่ 44 Surface plots และ Contour plots ของค่าความแข็ง (Hardness) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มออก

ค่าความเปราะ (Brittleness) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก มีค่าระหว่าง 1.45 – 2.88 มิลลิเมตร สมการผลตอบสนอง แสดงในตารางที่ 35 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.90 และ 0.83 ตามลำดับ ส่วนค่าสหสัมพันธ์ (r) ของ ค่าความเปราะ กับ ความชื้นของวัตถุดิบ เท่ากับ -0.772 ( $P \leq 0.01$ ) หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้นจะทำให้ระยะในการกดลดลง ตัวอย่างมีความเปราะมากขึ้น ส่วนแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 และความเร็วรอบสกรู ไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) (ตารางที่ 33) แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของค่าความแข็ง แสดงในภาพที่ 45

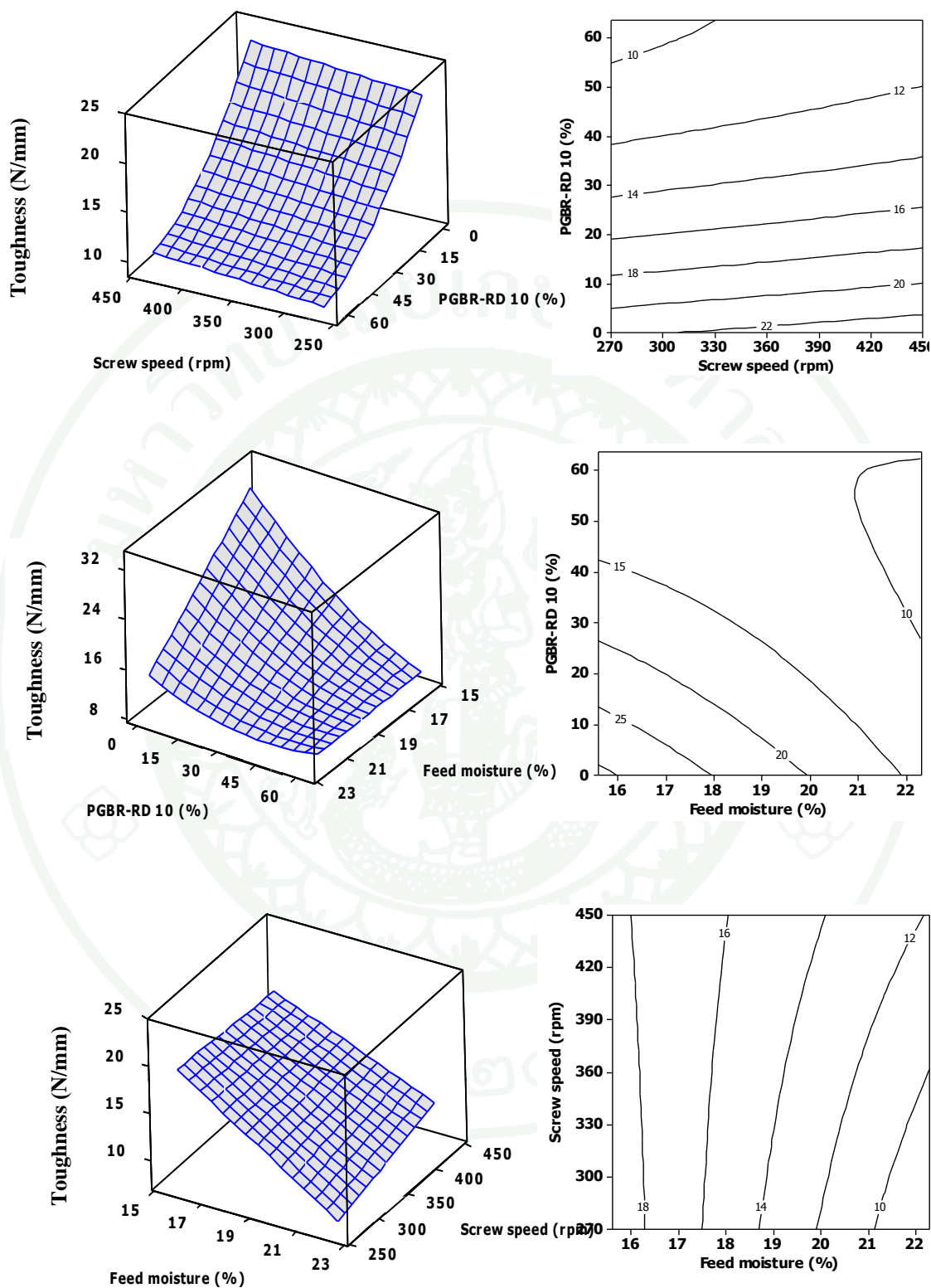
โดยค่าความเปราะนี้ นิยามจากระยะทาง (Distance) ที่เกิดขึ้นจากการกดตัวอย่าง เพื่อให้ตัวอย่างแตก (Break) โดยค่าความเปราะที่มีค่าต่ำ (ระยะทางสั้น) หมายถึงตัวอย่างที่มีความเปราะบางสูง แตกเสียหายได้ง่าย (Altan *et al.*, 2008 และ Singh *et al.*, 2009) จากภาพที่ 45 จะพบว่า ความชื้น ที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะทางในการกดลดลง หมายความว่า ตัวอย่างมีความเปราะมากขึ้น อาจเนื่องมาจาก น้ำมีผลต่อการพองของเอกซ์ทรูคเตด เมื่อพองตัวมากจะทำให้ผนังเซลล์บาง จึงใช้แรงกดน้อยลง ระยะทางสั้นลงเช่นกัน ส่วนปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 และความเร็วรอบสกรู มีผลเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 45 Surface plots และ Contour plots ของค่าความเปราะ (Brittleness) ของขนมกรอบพอง จากแป้งข้าวกล้องเริ่มออก

ค่าความเหนียว (Toughness) ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก มีค่าระหว่าง 8.93 – 25.32 นิวตัน/มิลลิเมตร สมการผลตอบสนอง แสดงในตารางที่ 35 โดยค่า  $R^2$  และค่า  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.89 และ 0.82 ตามลำดับ ส่วนค่าสหสัมพันธ์ ( $r$ ) ของ ค่าความเหนียว กับ ความชื้นของ วัสดุดิบ เท่ากับ -0.515 ( $P \leq 0.05$ ) และแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 เท่ากับ -0.733 ( $P \leq 0.01$ ) หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของความชื้น และแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ทำให้ความความเหนียว ลดลง ส่วนความเร็วรอบสกรูไม่มีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) (ตารางที่ 33) แผนภาพ Surface plots และ Contour plots ของค่าความแข็ง แสดงในภาพที่ 46

โดยค่าความเหนียว นิยามถึงงานที่เกิดขึ้นจากการกดตัวอย่าง (Work of compression) คำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่ใช้ (Bourne, 2002) จากภาพที่ 46 พบว่า ปริมาณ แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความเหนียว ลดลงเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของ ความชื้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบสกรูไม่มีผลต่อค่าความเหนียว Ding *et al.* (2005) พบว่า อุณหภูมิของบาริลและความชื้นมีผลต่อค่าพื้นที่ใต้กราฟ โดยความชื้นและอุณหภูมิที่ เพิ่มขึ้นทำให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับการพองตัวและ ค่าความหนาแน่น เช่นเดียวกับมาโนซุญและสุนันทา (2547) ที่ พบว่า ตัวอย่างที่พองตัวสูงจะมี โครงสร้างภายในที่เปราะบาง จึงใช้แรงกด ไม่มาก และในการศึกษานี้แป้งข้าวเหนียวจะให้การ พองตัวที่ดีจึงทำให้ใช้แรงในการกดที่น้อย พลังงานที่ใช้จึงต่ำ



ภาพที่ 46 Surface plots และ Contour plots ของค่าความเหนียว (Toughness) ของขนมกรอบพอง จากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

### 3.6 การประเมินทางประสาทสัมผัส

การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกที่เคลือบด้วยรสบาร์บีคิว ใช้ผู้ทดสอบจำนวน 35 คน วางแผนการทดลองแบบ Balance incomplete block design ใช้แบบทดสอบ 9- points hedonic scale (1 คือ ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คือ ชอบมากที่สุด) คุณลักษณะที่สำคัญของขนมกรอบพอง ที่ทำการประเมินคือ ลักษณะปรากฏ (Apperance) รสชาติ (Taste) เนื้อสัมผัส (Texture) และความชอบรวม (Overall liking) ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสแสดงในตารางที่ 36

ตารางที่ 36 การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

สิ่งทดลอง	ลักษณะทางประสาทสัมผัส			
	ลักษณะปรากฏ	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบรวม
1	5.43±1.13 <sup>ab</sup>	6.57±1.51 <sup>abc</sup>	6.14±1.46 <sup>ab</sup>	6.42±1.71 <sup>abc</sup>
2	5.71±1.11 <sup>ab</sup>	5.42±2.14 <sup>c</sup>	3.00±2.00 <sup>ef</sup>	3.85±2.11 <sup>de</sup>
3	6.57±0.97 <sup>a</sup>	6.71±0.75 <sup>abc</sup>	7.42±0.97 <sup>a</sup>	7.00±0.81 <sup>a</sup>
4	6.33±1.10 <sup>ab</sup>	6.00±1.29 <sup>ab</sup>	6.00±2.08 <sup>abc</sup>	6.00±1.15 <sup>abc</sup>
5	5.85±0.89 <sup>ab</sup>	5.28±2.13 <sup>c</sup>	3.85±2.34 <sup>def</sup>	4.71±1.38 <sup>cde</sup>
6	6.00±1.00 <sup>ab</sup>	6.71±1.60 <sup>abc</sup>	2.71±1.60 <sup>f</sup>	3.85±1.34 <sup>de</sup>
7	6.85±1.06 <sup>a</sup>	7.42±0.78 <sup>a</sup>	7.14±1.77 <sup>a</sup>	7.14±0.89 <sup>a</sup>
8	6.14±1.34 <sup>ab</sup>	6.85±1.06 <sup>ab</sup>	4.85±2.03 <sup>bcde</sup>	5.42±1.51 <sup>abcd</sup>
9	6.00±1.29 <sup>ab</sup>	7.00±1.15 <sup>a</sup>	7.00±1.52 <sup>a</sup>	7.07±1.17 <sup>a</sup>
10	6.28±0.95 <sup>ab</sup>	7.28±1.38 <sup>a</sup>	3.14±1.34 <sup>ef</sup>	3.57±0.78 <sup>c</sup>
11	5.00±1.41 <sup>b</sup>	6.42±1.61 <sup>abc</sup>	4.00±2.64 <sup>cdef</sup>	5.00±2.38 <sup>bcde</sup>
12	5.71±1.60 <sup>ab</sup>	7.00±0.81 <sup>a</sup>	6.57±0.97 <sup>ab</sup>	6.85±1.21 <sup>a</sup>
13	5.71±1.38 <sup>ab</sup>	6.14±0.69 <sup>abc</sup>	4.71±1.70 <sup>bcdef</sup>	5.42±1.81 <sup>abcd</sup>
14	6.14±0.69 <sup>ab</sup>	6.71±0.95 <sup>abc</sup>	5.85±1.57 <sup>abcd</sup>	6.00±1.63 <sup>abc</sup>
15	6.85±0.69 <sup>a</sup>	7.57±0.97 <sup>a</sup>	6.71±1.25 <sup>ab</sup>	6.71±0.75 <sup>ab</sup>

หมายเหตุ: <sup>a-f</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

จากการประเมินทางประสาทสัมผัสพบว่า คะแนนการยอมรับทางด้านลักษณะปรากฏ มีค่าระหว่าง 5.00 – 6.85 คะแนน การยอมรับทางด้านรสชาติมีค่าระหว่าง 5.28- 7.57 คะแนน การยอมรับทางด้านเนื้อสัมผัส มีค่าระหว่าง 2.71-7.42 คะแนน และความชอบโดยรวมมีค่าระหว่าง 3.57 – 7.07 คะแนน และเมื่อทำการพิจารณาพร้อมกับค่าสหสัมพันธ์ (Correlation; r) ในตารางที่ 37 จะพบว่า การยอมรับทางประสาทสัมผัสมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพของขนมกรอบพอง คือ คะแนนการยอมรับทางด้านเนื้อสัมผัสจะมีความสัมพันธ์กับค่าความชอบโดยรวมแบบแปรผันตาม อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ ) คือมีค่า r เท่ากับ 0.986 และความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าความหนาแน่น อย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ ) คือมีค่า r เท่ากับ -0.605 นอกจากนี้ ยังพบความสัมพันธ์แบบแปรผกผันของค่าความชอบโดยรวมกับความหนาแน่น อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ ) คือมีค่า r เท่ากับ -0.683

สรุปได้ว่า คะแนนความชอบทางด้านเนื้อสัมผัสที่เพิ่มขึ้นจะทำให้คะแนนความชอบโดยรวมเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าขนมกรอบพองที่มีความหนาแน่นลดลงจะทำให้ความชอบทางเนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมเพิ่มขึ้น นั่นก็คือ ขนมกรอบพองที่มีการพองตัวที่ดีจะได้รับการยอมรับที่สูงขึ้น (ประชาและคณะ, 2539; Mendonca *et al.*,2000; Ibanogle *et al.*, 2006)

ตารางที่ 37 ค่าสหสัมพันธ์ของการประเมินทางประสาทสัมผัส และลักษณะทางกายภาพของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มออก

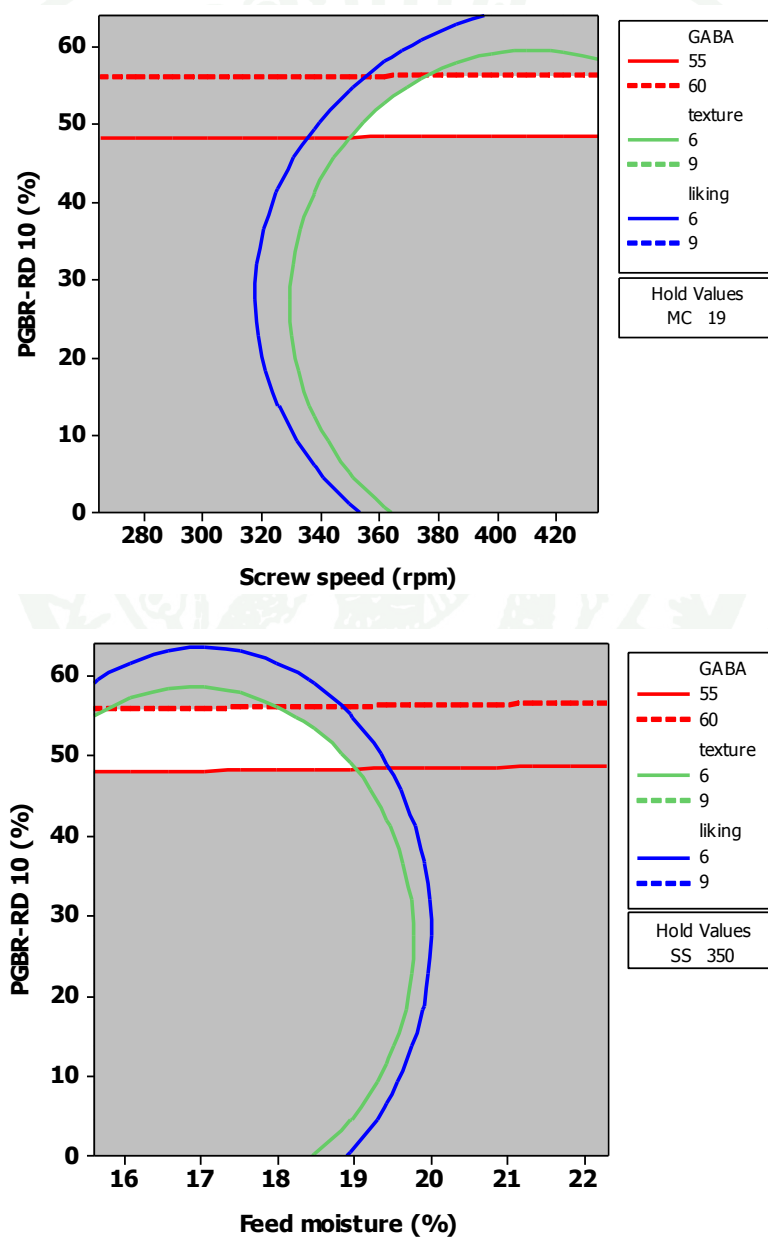
	ลักษณะปรากฏ	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ความชอบรวม	อัตราการพองตัว	ความหนาแน่น
ลักษณะปรากฏ	1	0.588	0.508	0.422	0.084	0.002
รสชาติ		1	0.474	0.455	0.025	0.044
เนื้อสัมผัส			1	0.986**	0.230	-0.605*
ความชอบรวม				1	0.300	-0.683**
อัตราการพองตัว					1	-0.684**
ความหนาแน่น						1

หมายเหตุ: \* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

\*\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ )

### 3.7 การหาสภาวะที่เหมาะสม

จากข้อมูลในการทดลองที่ผ่านมานำมาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (optimization) ในการผลิตขนมกรอบพอง โดยใช้ฟังก์ชัน overlaid plot ซึ่งเป็นการสร้าง contour plot แล้วนำมาทับซ้อนกัน เพื่อหาสภาวะที่ต้องการภายใต้ข้อกำหนดหรือเงื่อนไข โดยใช้ค่าผลตอบสนองที่ได้วิเคราะห์มาก่อนหน้านี้ (โซลูชัน เซ็นเตอร์, ม.ป.ป.) แสดงในภาพที่ 47



ภาพที่ 47 Overlaid contour plot ของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

พื้นที่สีขาวในภาพที่ 47 เป็นสถานะที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้ภายใต้ข้อกำหนดคือ ต้องการขนมกรอบพองที่มีสารกาบาระหว่าง 55-60 มิลลิกรัม/ 100 กรัมตัวอย่าง (เส้นสีแดง) มีคะแนนการยอมรับด้านเนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมระหว่าง 6-9 คะแนน (เส้นสีเขียวและน้ำเงินตามลำดับ) จากภาพ สามารถสรุปได้ว่า ต้องใช้แป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กช 10 ร้อยละ 49 -57 ความเร็วรอบของสกรู ระหว่าง 360- 434 rpm และความชื้นน้อยวัตถุดิบ ระหว่างร้อยละ 15 -18 เพื่อให้บรรลุตามข้อกำหนด

### 3.8 การทวนสอบ

การทวนสอบ (Verification) เป็นการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองหรือสถานะที่ได้วิเคราะห์ก่อนหน้าว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด โดยทำการผลิตจริงตามสถานะที่ได้ทำนายไว้ และตรวจสอบผลตอบสนองที่ได้กับผลจากการทำนาย (Myers and Montgomery, 2002; ประไพศรี และพงษ์ชนัน, 2551) แสดงในตารางที่ 38

ตารางที่ 38 ค่าจากการทดลองและการทำนายของสารกาบาภายใต้สถานะที่เหมาะสม

สถานะที่เหมาะสม			สารกาบา (มก/ 100 ก)	
ความชื้นวัตถุดิบ (%)	ความเร็วรอบสกรู (rpm)	PGBR-RD 10 (%)	Predicted value	Experimental value
16	434	55.3	60	59.78 ± 1.12 <sup>NS</sup>

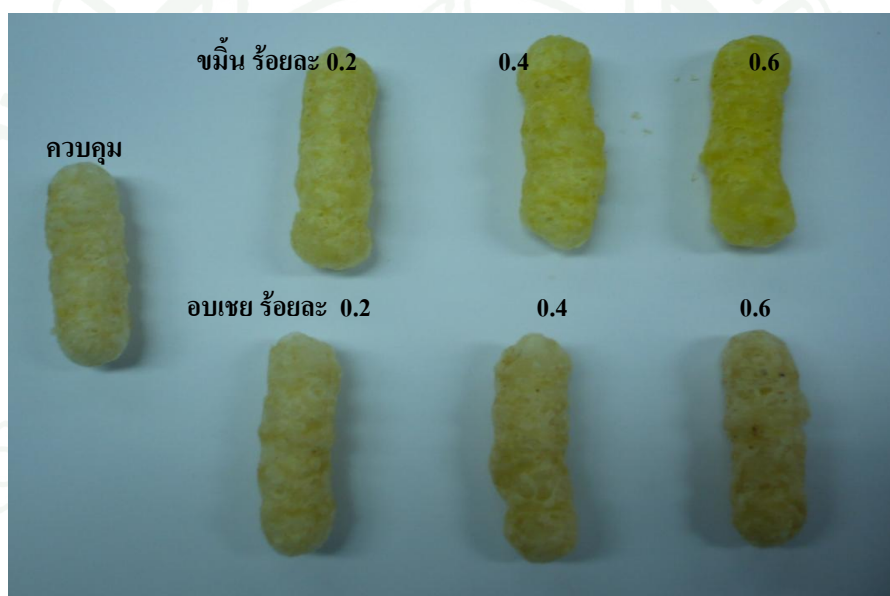
หมายเหตุ: <sup>NS</sup> ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) โดยวิธี t-test

ผลจากตารางที่ 38 แสดงให้เห็นว่าสถานะในการทดลองเป็นสถานะที่เหมาะสม โดยสามารถผลิตขนมกรอบพองให้มีสารกาบาสูงตามเงื่อนไข คือไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) ของสารกาบาระหว่างค่าจากการทำนาย (Predicted value) และค่าจากการทดลองจริง (Experimental value)

#### 4. การผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร

##### 4.1 การผลิตขนมกรอบพองผสมสมุนไพร

เมื่อได้สภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองในข้อ 3.7 จึงทำการผลิตขนมกรอบพองผสมสมุนไพร 2 ชนิด คือ ขมิ้นผง และอบเชยผง โดยผสมลงในแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกเป็นร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 โดยนํ้าหนักแป้ง และทำการผลิตตามสภาวะในตารางที่ 38 และตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และประเมินทางประสาทสัมผัส โดยลักษณะที่ปรากฏของขนมกรอบพองผสมสมุนไพรแสดงในภาพที่ 48



ภาพที่ 48 ลักษณะปรากฏของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมขมิ้น (บน) และอบเชย (ล่าง)

ผลการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของขนมกรอบพองผสมสมุนไพร ได้แก่ค่าอัตราการพองตัว (Expansion ratio) ความหนาแน่น (Density) ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI) และดัชนีการละลายน้ำ (WSI) แสดงในตารางที่ 39

พบว่า การผสมสมุนไพรไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ( $P > 0.05$ ) โดยค่าอัตราการพองตัวของขนมกรอบพองผสมอบเชย มีค่าระหว่าง 3.94 - 3.97 ขนมกรอบพองผสมขมิ้นมีค่าระหว่าง 3.95- 3.96 ค่าความหนาแน่นของขนมกรอบพองผสมอบเชย มีค่าระหว่าง 0.138- 0.147

กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขนมอบหองผสมขมึ้น มีค่าระหว่าง 0.133-0.143 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ค่า WAI ของขนมอบหองผสมอบเชย มีค่าระหว่าง 3.86-3.89 กรัมต่อกรัมตัวอย่าง ขนมอบหองผสมขมึ้น มีค่าระหว่าง 3.88-3.89 กรัมต่อกรัมตัวอย่าง และค่า WSI ของขนมอบหองผสมอบเชย มีค่าระหว่างร้อยละ 48.53-48.76 ขนมอบหองผสมขมึ้น มีค่าระหว่างร้อยละ 48.51-48.90

**ตารางที่ 39** การประเมินลักษณะทางกายภาพของขนมอบหองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร

สิ่งทดลอง	คุณสมบัติทางกายภาพ <sup>NS</sup>			
	อัตราการพองตัว	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	WAI (g/g)	WSI (%)
ควบคุม	3.96±0.18	0.136±0.02	3.92±0.08	48.85±0.89
อบเชย 0.2 %	3.97±0.19	0.138±0.01	3.86±0.11	48.76±0.83
อบเชย 0.4 %	3.94±0.15	0.144±0.01	3.89±0.03	48.55±0.38
อบเชย 0.6 %	3.95±0.19	0.147±0.03	3.87±0.05	48.53±0.36
ขมึ้น 0.2 %	3.95±0.18	0.143±0.02	3.89±0.07	48.60±0.81
ขมึ้น 0.4 %	3.95±0.15	0.133±0.01	3.88±0.51	48.90±0.49
ขมึ้น 0.6 %	3.96±0.16	0.142±0.02	3.88±0.26	48.51±0.23

หมายเหตุ: <sup>NS</sup> ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

ผลการตรวจสอบคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสของขนมอบหองผสมสมุนไพร ได้แก่ ค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความเปราะ (Brittleness) และค่าความเหนียว (Toughness) แสดงในตารางที่ 40

พบว่า การเติมสมุนไพรทำให้ค่าความแข็งแตกต่างกันทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยขนมอบหองที่ผสมอบเชยมีค่าความแข็งระหว่าง 28.03-29.30 นิวตัน ส่วนขนมอบหองที่ผสมขมึ้นมีค่าความแข็งระหว่าง 26.88 – 28.41 นิวตัน และตัวอย่างควบคุมมีค่า 25.87 นิวตัน ส่วนค่าความเปราะและค่าความเหนียวไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) โดยขนมอบหองที่ผสมอบเชยมีค่าความเปราะระหว่าง 9.11 – 9.46 มิลลิเมตร ส่วนขนมอบหองที่ผสมขมึ้นมีค่าความเปราะ

ระหว่าง 9.43 - 9.80 มิลลิเมตร ตัวอย่างควบคุมมีค่า 9.12 มิลลิเมตร ส่วนค่าความเหนียวของขนมกรอบพองที่ผสมอบเชยมีค่าความเหนียวระหว่าง 18.74- 19.32 นิวตันต่อมิลลิเมตร ส่วนขนมกรอบพองที่ผสมขมิ้นมีค่าความเหนียวระหว่าง 16.36 – 17.37 นิวตันต่อมิลลิเมตร และตัวอย่างควบคุมมีค่า 18.79 นิวตันต่อมิลลิเมตร

ตารางที่ 40 การประเมินลักษณะทางเนื้อสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มออกผสมสมุนไพร

สิ่งทดลอง	ลักษณะทางเนื้อสัมผัส		
	ความแข็ง (Newton)	ความเปราะ <sup>NS</sup> (mm)	ความเหนียว <sup>NS</sup> (N/mm)
ควบคุม	25.87±3.55 <sup>b</sup>	9.12±1.02	18.79±3.86
อบเชย 0.2 %	29.00±2.08 <sup>a</sup>	9.46±0.86	19.01±3.62
อบเชย 0.4 %	29.30±2.71 <sup>a</sup>	9.39±0.42	19.32±3.46
อบเชย 0.6 %	28.03±2.72 <sup>ab</sup>	9.11±0.83	18.74±1.89
ขมิ้น 0.2 %	26.88±2.17 <sup>ab</sup>	9.43±1.25	17.37±4.98
ขมิ้น 0.4 %	27.56±1.25 <sup>ab</sup>	9.44±0.83	16.36±3.04
ขมิ้น 0.6 %	28.41±2.15 <sup>a</sup>	9.80±0.59	16.66±3.34

หมายเหตุ: <sup>a-d</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

<sup>NS</sup> ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านสี ได้แก่ ค่าสี  $L^*$  (ความสว่าง) ค่าสี  $a^*$  (สีแดง-เขียว) และค่าสี  $b^*$  (สีเหลือง-ฟ้า) และ  $\Delta E$  (ความแตกต่างของค่าสี) แสดงในตารางที่ 41

พบว่า การผสมอบเชยและขมิ้นทำให้ค่าสี  $L^*$   $a^*$   $b^*$  และ  $\Delta E$  แตกต่างกันทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

ตารางที่ 41 ค่าสี  $L^*$   $a^*$   $b^*$  และ  $\Delta E$  ของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมสมุนไพร

สิ่งทดลอง	ค่าสี			
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E^{1/}$
ควบคุม	80.25±1.42 <sup>A, a</sup>	2.35±0.36 <sup>D, a</sup>	17.68±0.15 <sup>A, d</sup>	-
อบเชย 0.2 %	78.32±0.95 <sup>B</sup>	3.53±0.43 <sup>C</sup>	17.50±1.33 <sup>A</sup>	2.52±1.04 <sup>C</sup>
อบเชย 0.4 %	76.72±0.11 <sup>B</sup>	4.28±0.06 <sup>B</sup>	17.38±0.39 <sup>A</sup>	4.05±0.10 <sup>B</sup>
อบเชย 0.6 %	72.86±0.30 <sup>C</sup>	5.71±0.02 <sup>A</sup>	18.56±0.24 <sup>A</sup>	8.16±0.01 <sup>A</sup>
ขมิ้น 0.2 %	78.99±0.28 <sup>a</sup>	0.77±0.05 <sup>b</sup>	28.14±0.15 <sup>c</sup>	10.66±0.18 <sup>c</sup>
ขมิ้น 0.4 %	79.01±1.79 <sup>a</sup>	-0.72±0.34 <sup>c</sup>	30.07±0.26 <sup>b</sup>	12.91±0.42 <sup>b</sup>
ขมิ้น 0.6 %	79.67±0.46 <sup>a</sup>	-1.07±0.27 <sup>c</sup>	35.40±0.59 <sup>a</sup>	18.06±0.53 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: <sup>A-D, a-d</sup> ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่และพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

<sup>1/</sup> คำนวณจากตัวอย่างควบคุม

พบว่า การผสมอบเชยและขมิ้นทำให้ค่าสี  $L^*$   $a^*$   $b^*$  และ  $\Delta E$  แตกต่างกันทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดย ขนมกรอบพองผสมอบเชยมีค่าสี  $L^*$  ลดลง เมื่ออบเชยเพิ่มขึ้น แต่ในตัวอย่างขนมกรอบพองผสมขมิ้น พบว่า ไม่มี ความแตกต่างในค่าสี  $L^*$  เมื่อเพิ่มขมิ้น สำหรับค่าสี  $a^*$  พบว่า ในตัวอย่างขนมกรอบพองผสมอบเชยมีค่าสี  $a^*$  เพิ่มขึ้นเมื่ออบเชยเพิ่มขึ้น แต่ในขนมกรอบพองผสมขมิ้น พบว่า การเพิ่มขมิ้นทำให้ค่าสี  $a^*$  ลดลง สำหรับค่าสี  $b^*$  ในตัวอย่างขนมกรอบพองผสมอบเชยไม่มีความแตกต่างเมื่ออบเชยเพิ่มขึ้น แต่ในขนมกรอบพองผสมขมิ้น พบว่าค่าสี  $b^*$  เพิ่มขึ้นเมื่อขมิ้นเพิ่มขึ้น สำหรับค่า  $\Delta E$  แสดงถึงความแตกต่างของค่าสีโดยคำนวณมาจากค่าสีของตัวอย่างควบคุม โดยพบว่า การเพิ่มสมุนไพรในปริมาณสูงขึ้น ทำให้ค่า  $\Delta E$  สูงขึ้น

การประเมินทางประสาทสัมผัสโดยนำขนมกรอบพองไปเคลือบด้วยผงปรุงรสบาร์บีคิว และทำการประเมินโดยผู้ทดสอบจำนวน 40 คน ทำการประเมินคุณลักษณะทางด้านสี (Color) กลิ่น (Odor) รสชาติ (Taste) เนื้อสัมผัส (Texture) และความชอบโดยรวม (Overall liking) ของขนมกรอบพองผสมอบเชยแสดงในตารางที่ 42 และขนมกรอบพองผสมขมิ้นแสดงในตารางที่ 43

ตารางที่ 42 การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมอบเชย

สิ่งทดลอง	ลักษณะทางประสาทสัมผัส				
	สี	กลิ่น <sup>NS</sup>	รสชาติ	เนื้อสัมผัส <sup>NS</sup>	ความชอบรวม <sup>NS</sup>
ควบคุม	5.20±1.71 <sup>b</sup>	5.82±1.48	5.32±1.78 <sup>a</sup>	5.95±1.63	5.72±1.53
อบเชย 0.2 %	6.12±1.60 <sup>a</sup>	5.97±1.52	5.37±1.89 <sup>a</sup>	6.10±1.58	5.80±1.62
อบเชย 0.4 %	6.37±1.76 <sup>a</sup>	5.77±1.59	4.72±1.83 <sup>b</sup>	5.72±1.78	5.52±1.58
อบเชย 0.6 %	6.22±2.00 <sup>a</sup>	5.55±1.43	5.07±2.10 <sup>ab</sup>	5.80±1.88	5.46±1.81

หมายเหตุ: <sup>a-b</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

<sup>NS</sup> ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

พบว่า การผสมอบเชยให้ค่าการยอมรับด้านสี รสชาติ และความชอบโดยรวมแตกต่างกันทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยการผสมอบเชยให้ค่าการยอมรับด้านสีสูงกว่าตัวอย่างควบคุม การยอมรับด้านด้านรสชาติ พบว่า ตัวอย่างควบคุม ตัวอย่างที่ผสมอบเชยร้อยละ 0.2 และ 0.6 ได้คะแนนสูงกว่าตัวอย่างที่ผสมอบเชยร้อยละ 0.4 ส่วนความชอบด้านกลิ่น เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ไม่แตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

ตารางที่ 43 การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มอบผสม  
ไขมัน

สิ่งทดลอง	ลักษณะทางประสาทสัมผัส				
	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส <sup>NS</sup>	ความชอบรวม
ควบคุม	5.05±1.88 <sup>b</sup>	6.05±1.39 <sup>b</sup>	5.60±1.94 <sup>b</sup>	6.07±1.60	5.52±1.56 <sup>b</sup>
ไขมัน 0.2 %	6.80±1.38 <sup>a</sup>	6.55±1.29 <sup>a</sup>	6.32±1.50 <sup>a</sup>	6.40±1.69	6.42±1.35 <sup>a</sup>
ไขมัน 0.4 %	7.05±1.39 <sup>a</sup>	6.25±1.51 <sup>ab</sup>	6.20±1.96 <sup>a</sup>	6.52±1.50	6.30±1.53 <sup>a</sup>
ไขมัน 0.6 %	7.15±1.57 <sup>a</sup>	6.57±1.10 <sup>a</sup>	6.02±1.79 <sup>ab</sup>	6.20±1.66	6.42±1.29 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: <sup>a-b</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ )

<sup>NS</sup> ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

สำหรับขนมกรอบพองผสมไขมันมีค่าการยอมรับทางด้านสี กลิ่น รสชาติและความชอบโดยรวมแตกต่างทางสถิติ ( $P \leq 0.05$ ) โดยการผสมไขมันทำให้คะแนนการยอมรับด้านสีสูงกว่าตัวอย่างควบคุม คือมีค่าระหว่าง 6.80 - 7.15 ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมมีค่า 5.05 การยอมรับด้านสีพบว่า ตัวอย่างที่ผสมไขมัน ร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 ได้คะแนนการยอมรับสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ค่าความชอบโดยรวม มีค่าระหว่าง 6.30 - 6.42 ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ที่มีค่า 5.52 ตัวอย่างที่ผสมไขมัน ร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 ได้คะแนนการยอมรับสูงกว่าตัวอย่างควบคุม สำหรับการยอมรับด้านเนื้อสัมผัส ไม่แตกต่างกัน ( $P > 0.05$ )

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกในห้องปฏิบัติการ พบว่า ปัจจัย ทางด้านอุณหภูมิและเวลา มีผล ต่อองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า น้ำตาลรีดิวิซ์ และสารกาบา และการ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก โดยเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น จะทำให้น้ำตาลรีดิวิซ์และสารกาบาเพิ่มขึ้น และคุณสมบัติด้านความหนืดลดลง ทั้งในข้าวขาวดอก มะลิ 105 และข้าวเหนียว กข 10

การผลิตข้าวกล้องเริ่มงอกด้วยเครื่องเพาะข้าวออกต้นแบบ พบว่า ปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยหยาบ ไม่แตกต่างทางสถิติ แต่น้ำตาลรีดิวิซ์ และสารกาบา เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าสารกาบาในข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิเพิ่มขึ้น 7.1 เท่า เมื่อเทียบกับจากตัวอย่างปกติ สำหรับในข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 พบว่า ปริมาณโปรตีน และเถ้า ไม่แตกต่างทางสถิติ แต่ ปริมาณ ไขมัน และเส้นใยหยาบลดลง ปริมาณน้ำตาลรีดิวิซ์ และสารกาบาเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ โดย พบว่าสารกาบาเพิ่มขึ้น 60 เท่า เมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ สำหรับคุณสมบัติด้านความหนืด พบว่า ค่าความหนืดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับข้าวกล้องปกติ โดยค่าความหนืดสูงสุด ค่าความ หนืดต่ำสุด ค่าความหนืดลดลง ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบค ลดลง 5.4 , 9.4 , 2.2, 6.8 และ 4.9 เท่า ตามลำดับ ในข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ สำหรับข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 พบว่า ค่าความหนืด สูงสุด ค่าความหนืดต่ำสุด ค่าความหนืดลดลง ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าเซตแบค ลดลง 33.1, 32.9, 33.3, 27.5 และ 13.8 เท่าตามลำดับ

การผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกผสมระหว่างข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และ ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 โดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ โดยศึกษาปัจจัยด้าน ความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรู และอัตราส่วนของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก จากข้าวเหนียว พันธุ์ กข 10 พบว่า ความชื้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนาแน่น ค่าความแข็ง และดัชนีการดูดซึมน้ำ เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าอัตราการพองตัว ค่าความเปราะ ค่าความเหนียวและค่าดัชนีการละลายน้ำ ลดลง ส่วนความเร็วรอบของสกรูที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าอัตราการพองตัว ค่าความเปราะ ดัชนีการดูดซึมน้ำ และดัชนีการละลายน้ำ เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นและความแข็งลดลง แต่ไม่มีผลต่อความเหนียว และ ปริมาณสารกาบา ในขณะที่การเพิ่มปริมาณของแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กข 10 ทำให้ อัตราการพอง ตัว ความเปราะ ดัชนีการละลายน้ำ และปริมาณสารกาบาเพิ่มขึ้น แต่ค่าความหนาแน่น ความแข็ง

ความเหนียวและดัชนีการดูดซับน้ำลดลง ในขณะที่อิทธิพลด้านความชื้นและความเร็วรอบของสกรู ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารกาบา และยังพบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชัน ทำให้ปริมาณสารกาบาเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำขนมกรอบพองมาเคลือบด้วยผงปรุงรสบาร์บีคิวและทำการประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัส พบว่า การคะแนนการยอมรับทางด้านเนื้อสัมผัสจะมีผลต่อค่าคะแนนความชอบโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอกโดยใช้วิธีการทับซ้อนกราฟ (Overlaid plot) ด้วยโปรแกรม Minitab โดยต้องการให้ขนมกรอบพองที่ผลิตได้มีปริมาณสารกาบามากกว่า 55 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง มีลักษณะเนื้อสัมผัสและมีการยอมรับทางประสาทสัมผัสในเกณฑ์ที่ดีนั้น พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ความชื้นร้อยละ 15-18 ความเร็วรอบของสกรู 360-434 rpm และปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กช 10 ร้อยละ 49 - 57 เมื่อทำการทวนสอบ (Verification) เพื่อทดสอบความถูกต้องของสภาวะที่เหมาะสม โดยการทดลองผลิตขนมกรอบพองภายใต้สภาวะที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด ดังนี้คือ ความชื้นร้อยละ 16 ความเร็วรอบสกรู 434 rpm และปริมาณแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก กช 10 ร้อยละ 55.3 พบว่าปริมาณสารกาบาของค่าการทำนาย (Predicted value) และค่าการทดลอง (Experimental value) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมแล้ว นำมาผสมสมุนไพร 2 ชนิดคือ อบเชยผง และขมิ้นผง ในปริมาณร้อยละ 0.2 0.4 และ 0.6 โดยน้ำหนักของแป้ง พบว่า การเติมสมุนไพรทั้งสองชนิด ไม่มีผลต่อค่าอัตราการพองตัว ความหนาแน่น ดัชนีการดูดซับน้ำ และดัชนีการละลายน้ำ ลักษณะทางเนื้อสัมผัส พบว่า คือ ความเปราะ และความเหนียวไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่มีผลต่อค่าความแข็งคุณสมบัติด้านสี พบว่า ค่า สี  $L^*$   $a^*$   $b^*$  และ  $\Delta E$  แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการยอมรับทางประสาทสัมผัส พบว่า ขนมกรอบพองที่ผสมอบเชย มีการยอมรับทางด้านกลิ่น เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม แต่การยอมรับทางด้านสีและรสชาติดีกว่าตัวอย่างควบคุม ส่วนขนมกรอบพองที่ผสมขมิ้น มีการยอมรับทางด้านเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างทางสถิติ ส่วนการยอมรับด้านสี กลิ่น รสชาติและความชอบโดยรวมแตกต่างทางสถิติ โดยตัวอย่างที่ผสมขมิ้นจะมีการยอมรับด้านสี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมสูงกว่าตัวอย่างควบคุม

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ เช่นการผสมโปรตีน หรือใช้วัตถุดิบอื่นๆ ผสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายทั้งทางด้านรสชาติ และเนื้อสัมผัส
2. ควรศึกษาด้านอายุการเก็บว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสารกาวาในวัตถุดิบ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือไม่



## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กมลวรรณ แจ่มชัด. 2541. การแปรรูปด้วยกระบวนการเอ็กทรูชัน (Extrusion process).

อุตสาหกรรมเกษตร 9 (2): 4-8

งามชื่น คงเสรี. 2546. **ข้าวและผลิตภัณฑ์ข้าว**. กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ ๗

จารุรัตน์ ตันเต, วรณัฐ ศรีเจษฎารักษ์ และรัชฎา ตั้งวงศ์ไชย. 2550. ผลของกระบวนการแช่ต่อ ปริมาณสารแกมมาอะมิโนบิวเทอริกแอซิดในข้าวกล้องงอก (หอมมะลิ 105). **วารสาร วิทยาศาสตร์เกษตร (พิเศษ)** 38 (5): 164-167

จุไรทิพย์ หวังสินทวีกุล. 2549. **มหัศจรรย์ของความเป็นข้าว**. ภาควิชาเกษตรและเกษตรศึกษาศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา

จุฬาลักษณ์ จารุณัฐ. 2550. ขนมอบเกี่ยวข้องกับเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์. **อาหาร** 37 (3): 211-222.

ชนิษฐา วงศ์บาสก์, กมลวรรณ แจ่มชัด, อนุวัตร แจ่มชัด, พัชรี ตั้งตระกูล และสุคันทรส ธาดาภิตติสาร. 2552. ผลของสภาวะในการงอกที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของข้าวเหนียวกล้องงอก, น 630-638. ใน **รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47 (สาขาอุตสาหกรรมเกษตร)**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ ๗

โซลูชั่น เซ็นเตอร์. ม.ป.ป. **คู่มือการใช้ Minitab หัวข้อ Design of Experimentals**. บริษัท โซลูชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด, กรุงเทพฯ ๗

ประชา บุญญสิริกุล. 2539. เทคโนโลยีการอัดพองในกระบวนการผลิตอาหาร. **อาหาร** 26 (4): 235-248.

\_\_\_\_\_ 2540. การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารด้วยวิธีหุงต้มแบบเอ็กทรูชัน. **อาหาร** 27 (2): 79-99.

\_\_\_\_\_, จุฬาลักษณ์ จารุณช และมาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์. 2539. การผลิตอาหารขบ  
เคี้ยวจากถั่วเขียวโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่. อาหาร 26 (1): 14-33

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การ  
ทดลอง. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ ฯ

พัชรา วีระพงศ์. 2547. ผลของปริมาณแอมิโลสและสภาวะการเก็บของข้าวพันธุ์ต่างๆ ต่อสมบัติ  
ทางด้านเคมีฟิสิกส์ของเอกซ์ทรูเดต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,  
กรุงเทพฯ ฯ

มาโนชญ์ สุธีรพัฒนานนท์ และ สุนันทา ทองทา. 2547. ผลกระทบของสภาวะเอ็กซ์ทรูชันต่อ  
คุณสมบัติของเนื้อสัมผัสและโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ข้าวเจ้าที่พองตัวและไม่พอง  
ตัว. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

วิไล รังสาดทอง. 2546. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. พิมพ์ครั้งที่ 3. เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล  
พับลิเคชั่น, กรุงเทพฯ ฯ

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. 2544. วิศวกรรมอาหาร: หน่วยปฏิบัติการในอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2.  
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ ฯ

\_\_\_\_\_ และ ประชา บุญญศิริกุล. 2538. การศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมของข้าวเจ้าและ  
ข้าวเหนียวในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่.  
รายงานการวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ ฯ

ศุภรัตน์ คังวรรณ, กมลวรรณ แจ่มชัด และพัชรี ตั้งตระกูล. 2554. ผลของสภาวะการงอกต่อสมบัติ  
ความหนืดและปริมาณ GABA ของแป้งข้าวกล้องงอกที่ผลิตจากข้าวกล้อง, น 210-217. ใน  
รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49 (สาขา  
อุตสาหกรรมเกษตร). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ ฯ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2548. น้ำมันหอมระเหยไทย ตอนที่ 1. เซเว่น พรินติ้ง กรุ๊ป, กรุงเทพฯ ฯ

สุภาณี จงดี, กฤษณา สุตทะสาร และรานี เคนเหลียม. 2551. โจ๊กกึ่งสำเร็จรูปจากข้าวกล้องงอก. วารสารวิชาการข้าว 2 (2): 61-70

สุนันทา ทองทา. 2550. การเติมรำข้าวในผลิตภัณฑ์พองกรอบด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

\_\_\_\_\_ และ มาโนชญ์ สุธีรวัดนานนท์. 2546. ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเอกซ์ทรูชันของข้าวกล้อง. รายงานการวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา

อิสรพงษ์ พงษ์ศิริกุล. 2550. การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 4. คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2550. ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ ฯ

AACC. 2000. **Approved methods of the American association of cereal chemists.** 10<sup>th</sup> ed., The American Association of Cereal Chemists, Minnesota.

Altan, A., K. L. McCarthy and M. Maskan. 2008. Twin-screw extrusion of barley-grape bland: extrudate characteristics and determination of optimum processing conditions. **Journal of Food Engineering** 89 (1): 24-32

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_. 2009. Effect of screw configuration and raw material on some properties of barley extrudates. **Journal of Food Engineering** 92 (4): 377-382

Alvarez-Martinez, L., K.P. Kondury and J.M. Harper. 1988. A general model for expansion of extruded products. **Jornal of Food Science** 53: 609-615

- Anderson, R.A., H.F.M. Conway, V.F. Pfeiffer and E.J. Griffin. 1969. Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. **Cereal Science Today** 14: 4-12.
- AOAC. 2000. **Official methods of analysis of AOAC international**. 17<sup>th</sup> ed., The Association of Official Analytical Chemists, Washington D.C.
- Banchuen, J., P. Thammarutwasiku, B. Ooraikul, P. Wuttijumnong and P. Sirivongpaisal. 2010. Increasing the bio-active compounds contents by optimizing the germination conditions of southern Thai brown rice. **Songklanakarinn Journal of Science and Technology** 32 (2): 219-230
- Benjamasuttikul, S. and O. Naivikul. 2007. Pasting properties changes during pre-germination process of Thai rice varieties. pp. 185-192. *In* **Starch Update 2007 : the 4<sup>th</sup> International Conference on Starch Technology** , Bangkok
- Bewley, J.D. and M. Black. 1994. **Seeds: physiology of development and germination**. 2<sup>nd</sup> ed., Plenum Press, New York
- Bhattacharya, M. and M.A. Hanna. 1988. Effect of lipids on the properties of extruded products. **Journal of Food Science** 53 (4) : 1,230-1,231
- Boonyasirikul, P. and C. Charunuch. 2000. Development of corngrit-broken rice based snack food by extrusion cooking. **Kasetsart Journal (Nat. Sci.)** 34 (2): 279-288
- Bouche, N. and H. Fromm. 2004. GABA in plants : just a metabolite?. **Trends in Plant Science** 9 (3): 110-115.
- Bourne, M.C. 2002. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press, San Diego

- Bown, A. W. and B. J. Shelp. 1997. The metabolism and function of  $\gamma$ -aminobutyric acid. **Plant Physiology** 115: 1-5
- Bradbury, L.M.T., S.A. Gillies, D.J. Brushertt, D.L.E. Waters and R.J. Henry. 2008. Inactivation of an aminoaldehyde dehydrogenase in responsible for fragrance in rice. **Plant Mol Biol** 68: 439-449
- Bryant, R., R.S. Kadan, E.T. Champagne, B.T. Vinyard and D. Boykin. 2001. Functional and digestive characteristics of extruded rice flour. **Cereal Chemistry** 78:131-137
- Carvalho, C.W.P., C. Y. Takeiti, C. I. Onwulate and L. O. Pordesimo. 2010. Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: effect of particle size on the extrusion of corn meal. **Journal of Food Engineering** 98 (1): 103-109
- 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
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, W. Prinyawiwatkul, K.N. Hong and J. M. King. 2010. Physicochemical properties and consumer acceptance of wheat-germinated brown rice bread during storage time. **Journal of Food Science** 75 (6): 333-339
- Charunuch, C., P. Boonyasirikool and C. Tiengpook. 2003. Physical properties of direct expansion extruded snack in utilization from Thai brown rice. **Kasetsart Journal (Nat. Sci.)** 37:368-378
- Champagne, E.T. , D.F. Wood, B.O. Juliano and D.B. Bechtel. 2004. The rice grain and its gross Composition, pp. 77-107. *In* E.T. Champagne., Ed. **Rice : Chemistry and Technology**. 3<sup>rd</sup> Edition. American Association of Cereal Chemists Inc., Minnesota.

- Chen, C.M. and A.I. Yeh. 2001. Effect of amylose content on expansion of extruded rice pellet. **Cereal Chemistry** 78(3): 261-266
- Chiang, B.Y. and J.A. Johnson. 1977. Gelatinization of starch in extruded products. **Cereal Chemistry** 54 (3): 436-443
- Chinnaswamy, R. and M.A. Hanna. 1988. Relationship between amylose content and extrusion-expansion properties of corn starches. **Cereal Chemistry** 65: 138-143
- \_\_\_\_\_. 1993. Basic of cereal starch expansion. **Carbohydrate Polymers** 21:157-167
- Choi, I., D. Kim, J. Son, C. Yang, J. Chun and K. Kim. 2006. Physico-chemical properties of giant embryo brown rice (Keunnunbyeo). **Agric. Chem. Biotechnol** 49 (3): 95-100.
- Choudhury, G.S. and A. Gautam. 1999. Screw configuration effects on macroscopic characteristics of extrudates produced by twin-screw extrusion of rice flour. **Journal of Food Science** 64 (3) : 479-487
- Colonna, P., J. Tayeb and C. Mercier. 1989. Extrusion cooking of starch and starchy products, pp. 281-308 *In* C. Mercier , P. Linko and J.M. Harper., Eds. **Extrusion cooking**. AACC Ins, Minnesota.
- Ding, Q.B., P. Ainsworth, G. Tucker, and H. Marson. 2005. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. **Journal of Food Engineering** 66 (3): 283-289
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, A. Plunkett, G. Tucker and H. Marson. 2006. The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based extruded snacks. **Journal of Food Engineering** 73 (2): 142-148

- Desrumaux, A., J.M. Bouvier and J. Burri. 1998. Corn grits particle size and distribution effects on the characteristics of expanded extrudates. **Journal of Food Science** 63 (3) : 857-863
- Ernault, V., C.I. Moraru and J.L. Kokini. 2002. Influence of fat expansion of glassy amylopectin extrudates by microwave heating. **Cereal Chemistry** 79(2) : 265-273
- Forte, D. and G. Young. 2005. The dynamics of product expansion during extrusion processing, pp.161-169. *In* G. Young, D. Forte and F.V. Doore., Eds. **Food and Feed Extrusion Technology Course Notes**. 23-25 November 2005. Institute of food research and product development, Bangkok.
- Gacula, M.C. 1993. **Design and analysis of sensory optimization**. Food and nutrition Press, Trumbull.
- Gomez, M.H. and J.M. Aguilera. 1983. Changes in the starch fraction during extrusion cooking of corn. **Journal of Food Science** 48: 378-381
- Grenus, K.M., F.Hsieh and H.E. Huff. 1993. Extrusion and extrudate properties of rice flour. **Journal of Food Engineering** 18: 229-245
- Guha, M., S. Z. Ali and S. Bhattacharya. 1997. Twin-screw extrusion of rice flour without a die : effect of barrel temperature and screw speed on extrusion and extrudate characteristics. **Journal of Food Engineering** 32(3) : 251-267
- \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_. 2006. Extrusion cooking of rice: effect of amylose content and barrel temperature on product profile. **Journal of Food Processing and Preservation** 30: 706-716
- Guy, R. 2001. Raw materials for extrusion cooking, pp. 5-28. *In* R. Guy., Ed. **Extrusion Cooking: Technologies and Applications**. CRC press, Florida

- Hahm, T., S. Park and Y.M. Lo. 2008. Effect of germination on chemical composition and functional properties of sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds. **Bioresource Technology** 100 (4):1,643-1,647
- Halek, G.W. and K.L.B. Chang. 1992. Effect of extrusion operation variables on functionality of extrudates, pp. 677-691. *In* J.L. Kokini, C-T. Ho and M.V. Karwe., Eds. **Food extrusion science and technology**. Marcel Dekker, Inc., New York
- Harper, J. M. 1981. **Extrusion of foods Vol. 1**. CRC press, Florida
- Hirunpong, P. and W. Tungjaroenchai. 2008. Effect of germination on contents of bioactive components in germinated brown rice of three rice cultivars, pp.1-5. *In* **Proceeding of the 34<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand**. 31 October - 2 November 2008. Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok.
- Hu, R. 1999. **Food product design: a computer-aided statistical approach**. Technomic Pub., Lancaster
- Ibaonoglu, S., P. Ainsworth, E.A. Ozer and A. Plunkett. 2006. Physical and sensory evaluation of a nutritionally balanced gluten-free extruded snack. **Journal of Food Engineering** 75 (4) : 469-472
- Ito, S. and Y. Ishikawa. 2004. Marketing of value-added rice products in Japan: germinated brown rice and rice bread, pp. 62-60. *In* **Proceeding of the FAO rice conference: rice in global market**, Rome
- Jiamyangyuen, S. and B. Ooraikul. 2008. The physico-chemical, eating and sensorial properties of germinated brown rice. **Journal of Food, Agriculture and Environment** 6 (2):119-124

- Karladee, D. and S. Suriyong. 2012.  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) content in different varieties of brown rice during germination. **Science Asia** 38: 13-17
- Kasarda, D.D. 2001. Grains in relation to celiac disease. **Cereal Foods World** 46 (5): 209-210
- Kayahara, H., K. Tsukahara and T. Tatai. 2001. Flavor, health and nutritional quality of pre-germinated brown rice, pp. 546-551. *In* A. H. Spanier, F. Shahidi, T. H. Parliament, C. Mussian, C-H, Ho and E. T. Contis., Eds. **Food Flavors and Chemistry: Advances of the New Millennium**. Athenaueun Press, Cambridge.
- Kokini, J.L., C.N. Chang and L.S. Lai. 1992. The role of rheological properties on extrudate expansion, pp. 631-652. *In* J.L. Kokini, C-T. Ho and M.V. Karwe, Eds. **Food extrusion science and technology**. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Komatsuzaki, N., K. Tsukahara, H. Toyoshima, T. Suzuki, N. Shimisu and T. Kimura. 2007. Effect of soaking and gaseous treatment on GABA content in germinated brown rice. **Journal of Food Engineering** 78 (2): 556-560
- Lai, L.S. and J.L. Kokini. 1991. Physicochemical changes and rheological properties of starch during extrusion. **Biotechnology Progress** 7 (2): 251-266
- Lee, Y.R., J. Y. Kim, K. S. Woon, I. G. Hwang, K. H. Kim, K. J. Kim, J. H. Kim and H.S. Jeong. 2007. Changes in the chemical and functional components of Korean rough rice before and after germination. **Food Science and Biotechnology** 16 (6): 1,006-1,010
- Liu, L.L., H.Q. Zhai and J-M. Wan. 2005. Accumulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid in giant – embryo rice grain in relation to glutamate decarboxylase activity and its gene expansion during water soaking. **Cereal Chemistry** 82 (2): 191-196

- Liu, C., Y. Zhang, W. Liu, J. Wan, W. Wang, L. Wu, N. Zuo, Y. Zhou and Z. Yin. 2011. Preparation, physicochemical and texture properties of texturized rice produce by improved extrusion cooking technology. **Journal of Cereal Science** 54 (3): 473-480
- Lusas, E. W. and L. W. Rooney 2001. **Snack foods processing**. Technomic Pub., Lancaster.
- Maisont, S., and W. Narkrugs. 2010. The effect of germination on GABA content, chemical composition, total phenolics content and antioxidant capacity of Thai waxy paddy rice. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 44 (5): 912-923
- Marshall, W.E. and J.I. Wadsworth 1994. **Rice science and technology**. Marcel Dekker., Inc, New York.
- Mendonca, S., M.V.E. Grossmann and R. Verhe. 2000. Corn bran as a fiber source in expanded snacks. **LWT-Food Science and Technology** 33 (1): 2-8
- Mohan, B.H., N.G. Malleshi and T. Koseki. 2010. Physico-chemical characteristics and non-starch polysaccharide contents of *Indica* and *Japonica* brown rice and their malts. **LWT-Food Science and Technology** 43:784-791
- Montgomery, D.C. 2005. **Design and analysis of experiments**. 6<sup>th</sup> ed. Wiley, New Jersey
- Moongngarm, A. and N. Saetung. 2010. Comparision of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice. **Food Chemistry** 122 (3) : 782-788
- Moraru. C.I. and J.L. Kokini. 2003. Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. **Comprehensive reviews in food science and food safety** 2 :120-138

- Myers, R. and D.C. Montgomery. 2002. **Response surface methodology : process and products optimization using designed experiments**. 2<sup>nd</sup> ed. Wiley, New York
- Oh, C.H. and S. H. Oh. 2004. Effect of germinated brown rice extracts with enhanced levels of GABA on cancer cell proliferation and apoptosis. **Journal of Medicinal Food** 7 (1): 19-23
- Oh, S-H. 2003. Stimulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid synthesis activity in brown rice by a chitosan/glutamic acid germination solution and calcium/calmodulin. **Journal of Biochemistry and Molecular Biology** 36 (3): 319-325.
- Oh, S-K., P-S. Hwang, K-J. Kim, Y-K. Kim and J.H. Lee. 2010. Changes in nutritional components throughout germination in paddy rice and brown rice. **Journal of Food Science and Nutrition** 15 :113 -119
- 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 Food Composition Analysis** 18 (4) : 303-316
- Pai, D.A., O.A. Blake, B.R. Hamaker and O.H. Campanella. 2009. Importance of extensional rheological properties on fiber-enriched core extrudated. **Journal of Cereal Science** 50: 227-234
- Palmiano, E.P. and B.O. Juliano. 1972. Biochemical changes in the rice grain during germination. **Plant Physiol** 49 (5) : 751-756
- Pan, B. S., M-S. Kong and H-H. Chen. 1992. Twin-screw extrusion for expanded rice products: processing parameters and formulation of extrudate properties, pp.693-709. *In* J.L. Kokini, C-T. Ho and M.V. Karwe, Eds. **Food extrusion science and technology**. Marcel Dekker, Inc., New York.

- Riaz, M.N. 2000. **Extruders in food applications**. Technomic pub., Lancaster
- Rusydi, M.R.M., C.W. Noraliza, A. Azrina and A. Zulkhairi. 2011. Nutritional changes in germinated legumes and rice varieties. **International Food Research Journal** 18 :59-67
- Saikusa, T., T. Horino and Y. Mori. 1994a. Distribution of free amino acids in the rice kernel and kernel fractions and the effect of water soaking on the distribution. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 42 (5): 1,122-1,125
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ and \_\_\_\_\_. 1994b. Accumulation of  $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) in the rice germ during water soaking. **Bioscience Biotechnology and Biochemistry** 58 (12): 2,291-2,292
- Sakthivel, K., R.M. Sundaram, N. ShobhaRani, S.M. Balachandran and C.N. Neeraja. 2009. Genetic and molecular basis of fragrance in rice. **Biotechnology Advances** 27: 468-473
- 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
- Shelp, B.J., A. W. Bown and M. D. Mclean. 1999. Metabolism and functions of gamma-aminobutyric acid. **Trends in Plant Science** 4 (11) : 446-452
- Shyama Prasad Rao, R. and G. Muralikrishna. 2006. Water soluble feruloyl arabinoxylans from rice and raji: change upon malting and their consequence on antioxidant activity. **Phytochem** 67 (1): 91-99
- Shu, X.L., T. Frank, Q.Y. Shu and K.H. Engel. 2008. Metabolite profiling of germinated rice seed. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 56 (24) : 11,612-11,620

- Singh ,J., L.Kaur, O.L. McCarthy, P.J. Moughan and H. Singh. 2009. Development and characterization of extruded snacks from New Zealand Taewa (Maori potato) flour. **Food Research International** 42 (5-6): 666-673
- Somogyi, M. 1951. Note of sugar determination. **Journal of Biological Chemistry** 70 (3): 599-612
- Srisang, N., S. Prachayawarakorn, S. Saponronnarit and W. Varayanond. 2009. Comparative study of germinated brown rice drying using hot air and superheated steam fluidized bed, pp.336-342. *In* **The 6<sup>th</sup> Asia-Pacific drying conference (ADC 2009)**. 19-21 October 2009, Bangkok
- Sutinium, D., V. Haruthaithasan and P. Chompreede. 2008. Development of Instant Nutritious Beverage from Germinated Jasmine Brown Rice for Elderly Consumers. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 42 (1) : 88 – 98
- Takeuchi, W., S.I. Mitsunaga and H. Masui. 2011. Studies on germination conditions of germinated brown rice to improve the palatability. **J.Appi.Glycosci** 58 (1): 27-30
- Tungtrakul, P., W. Varayanond, V. Surojanametakul and L. Wattanasiritham. 2006. Accumulation of gamma- aminobutyric acid (GABA) in non-waxy and waxy rice germ during water soaking, pp. 264-267. *In* **Proceeding of the 32<sup>nd</sup> Congress on Science and Technology of Thailand**. 10-12 October 2006. Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok.
- Vanavichit, A. and T. Yoshihashi. 2010. Molecular aspects of fragrance and aroma in rice. **Advances in Botanical Research** 56:49-73
- Varayanond, W., P. Tungtrakul, V. Surojanametakul, L. Wattanasiritham and W. Luxiang. 2005. Effect of water soaking on gamma-aminobutyric acid (GABA) in germ of different Thai rice varieties. **Kasetsart Journal (Nat. Sci.)** 39 (3): 411- 415.

- Velupillai, S., K. Nithyanantharajah, S. Vasantharuba, S. Balakumar and V. Arasaratnam. 2009. Biochemical changes associated with germinating rice grains and germination improvement. **Rice Science** 16 (3): 240-242
- Watcharaparpaiboon, W., N. Laohakunjit and O. Kerdchoechuen. 2010. An improved process for high quality and nutrition of brown rice production. **Food Sci Tech Int** 16 (2): 147-159
- Watanabe, M., T. Maeda, K. Tsukahara, H. Kayahara and N. Morita. 2004. Application of pregerminated brown rice for breadmaking. **Cereal Chemistry** 81 (4): 450-455
- Zhang, H., H-Y. Yao, F. Chen and X. Wang. 2007. Purification and characterization of glutamate decarboxylase from rice germ. **Food Chemistry** 101 (4): 1,670-1,676
- Zhou, Z., K. Robards, S. Helliwell and C. Blanchards. 2002. Ageing of stored rice: changes in chemical and physical attributes. *Journal of Cereal Science* 35: 65-78







ภาพผนวกที่ ก1 เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ รุ่น Herman Berstoff Laboratory, ZE 25x33D



ภาพผนวกที่ ก2 เครื่องบดของแห้ง (Fitz mill)



ภาพผนวกที่ ก3 เครื่องเคลือบแบบหม้อทรงแปดเหลี่ยม



ภาพผนวกที่ ก4 เครื่องกะเทาะเปลือกข้าว



ภาพผนวกที่ ก5 เครื่องคัดเมล็ดข้าว



**ภาคผนวก ข**  
**การตรวจสอบคุณสมบัติแข่งขั้วกอล์ฟเริ่มงอกและขนมกรอบพอง**

## การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (AACC, 2000) Method 46-12

### 1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.1 เครื่องย่อยสลาย Buchi
- 1.2 หลอด Kjeldahl สำหรับย่อย
- 1.3 เครื่องกลั่นอัตโนมัติ Buchi

### 2 สารเคมี

- 2.1 กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 95
- 2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 35
- 2.3 สารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 4
- 2.4 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์แมล
- 2.5 คอปเปอร์ซัลเฟต
- 2.6 โพแทสเซียมซัลเฟต
- 2.7 อินดิเคเตอร์ผสมระหว่างเมทิลเรดและโบโรโมครีซอลกรีน

### 3. วิธีการวิเคราะห์

- 3.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 1-2 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนใส่ลงไปใน หลอดย่อย ระวังอย่าให้ติดข้างหลอด
- 3.2 ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งประกอบด้วยโพแทสเซียมซัลเฟต 10 กรัมและคอปเปอร์ซัลเฟต 0.5 กรัมรวมทั้งเม็ดลูกแก้วกันเดือด (glass bead) 2 เม็ด และเติมกรดซัลฟิวริกประมาณ 20-25 มิลลิลิตร
- 3.3 นำหลอดย่อยต่อเข้ากับชุดเครื่องย่อยจนกระทั่งได้สารละลายสีเขียวใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่น เป็น 3 เท่าของกรด
- 3.4 นำหลอดย่อยต่อเข้ากับชุดเครื่องกลั่น แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 35 จนสารละลายในหลอดย่อยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล
- 3.5 รองรับสิ่งกลั่นด้วยขวด (flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายกรดบอริกความเข้มข้นร้อยละ 4 จำนวน 25 มิลลิลิตร โดยกลั่นประมาณ 5 นาที
- 3.6 นำไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 นอร์แมล จนกระทั่งได้สารละลายสีเทา (จุดยุติ) บันทึกปริมาณกรดที่ใช้แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละของไนโตรเจน (ให้ทำแบบลบล้างควบคู่ไปด้วย โดยไม่มีตัวอย่างในหลอดย่อย)

## 4. วิธีการคำนวณ

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

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

- เมื่อ S หมายถึง ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง  
 B หมายถึง ปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์  
 N หมายถึง ความเข้มข้นเป็นนอร์แมลของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน  
 W หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม

## การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AACC, 2000) Method 30-25

### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1 เครื่องมือวิเคราะห์ไขมัน (Soxtec System HT 2)

1.2 Extraction cup

1.3 Thimbles

### 2. สารเคมี

ปิโตรเลียมอีเทอร์ที่มีจุดเดือดในช่วง 40- 60 องศาเซลเซียส

### 3. วิธีการวิเคราะห์

3.1 อบ Extraction cup และทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักไว้ (W1)

3.2 ชั่งตัวอย่างประมาณ 2 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงบนกระดาษกรองและห่อให้มีดชิดบันทึกน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอน (W2) แล้วนำมาใส่ลงใน Thimble

3.3 นำ Thimble ใส่ใน extraction unit แล้วเติมปิโตรเลียมอีเทอร์ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ลงใน Extraction cup

3.4 นำ extraction cup เข้าไปในเครื่องวิเคราะห์ไขมัน ทำการสกัดเป็นเวลา 20 นาที และทำการชะล้างเป็นเวลา 45 นาที นำ Extraction cup ไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป ทิ้ง Extraction cup ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ และนำไปชั่งน้ำหนัก (W3)

### 4. วิธีการคำนวณ

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

เมื่อ W1 หมายถึง น้ำหนัก extraction cup หน่วยเป็นกรัม

W2 หมายถึง น้ำหนักตัวอย่างที่วิเคราะห์ หน่วยเป็นกรัม

W3 หมายถึง น้ำหนัก extraction cup และไขมันที่สกัดได้ หน่วยเป็นกรัม

## การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AACC, 2000) Method 08-01

### 1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1 เตา Muffle furnace

1.2 Hot plate

1.3 Crucible

### 2 วิธีการวิเคราะห์

2.1 เเผา Crucible ในเตา Muffle furnace ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิกเคเตอร์ และชั่งน้ำหนัก

2.2 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงใน crucible แล้วนำไปเผาด้วย

ไฟอ่อน ๆ จนหมดควัน

2.3 นำไปเผาในเตา Muffle furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสจนกว่าได้เถ้าเป็นสีขาวหรือสีเทา

2.4 นำ Crucible ออกมาใส่ในเดซิกเคเตอร์ ทิ้งไว้ให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก

### 3 วิธีการคำนวณ

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

เมื่อ W0 หมายถึง น้ำหนักของ Crucible หน่วยเป็นกรัม

W1 หมายถึง น้ำหนักของ Crucible และตัวอย่างก่อนเผา หน่วยเป็นกรัม

W2 หมายถึง น้ำหนักของ Crucible และตัวอย่างหลังจากเผาจนได้น้ำหนักคงที่ หน่วยเป็นกรัม

## การวิเคราะห์น้ำตาลรีดิวซ์ ตามวิธีของ Nelson-Somogyi's method (Somogyi, 1951)

### 1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1 Spectrophotometer

1.2 Vorter mixer

1.3 Water bath

### 2. สารเคมี

2.1 Alkaline Copper Reagent : ชั่ง  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  71 กรัม ,  $\text{NaK Tartrate}$  40 กรัม,  $\text{NaOH}$  4 กรัม และ  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  8 กรัม นำมาละลายในน้ำกลั่นประมาณ 700 มิลลิลิตร ตามลำดับ และเริ่มให้ความร้อนเมื่อเติม  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  จนละลายหมด แล้วเติม  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  180 กรัม จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร เก็บไว้ในขวดสีชาที่อุณหภูมิห้อง 24–48 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรองตะกอนออกก่อนใช้

2.2 Nelson Reagent : ชั่ง  $(\text{NH}_4)_6\text{MO}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  53.2 กรัม เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 2 มิลลิลิตร และใส่  $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  6 กรัม ละลายสารตามลำดับในน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร เก็บไว้ในขวดสีชาที่อุณหภูมิห้อง 24–48 ชั่วโมง แล้วนำมากรองตะกอนออกก่อนใช้

### 3. วิธีการวิเคราะห์

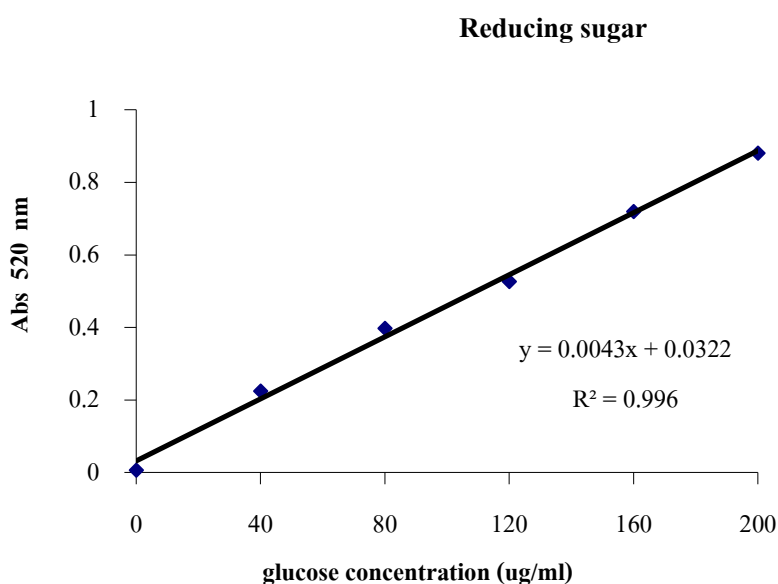
3.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส เตรียม Standard glucose solution ที่มีความเข้มข้น 200  $\mu\text{g/ml}$  โดยการชั่ง กลูโคสที่อบแห้งแล้ว 0.02 g ละลายน้ำกลั่นปรับปริมาตรเป็น 100 ml แล้วนำมาเจือจางให้มีความเข้มข้นต่าง ๆ ดังตารางผนวกที่ ข1

#### ตารางผนวกที่ ข1 การเตรียมสารละลายกลูโคสมาตรฐาน

ความเข้มข้นของกลูโคส ( $\mu\text{g/ml}$ )	ปริมาตรของน้ำกลั่น (ml)	ปริมาตรของ standard glucose (ml)
0	10	0
40	8	2
80	6	4
120	4	6
160	2	8
200	0	10

### 3.2 วิธีวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์

1. ปิเปตสารละลายน้ำตาลลงในหลอดทดลอง 1 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลาย Alkaline Copper Reagent 1 มิลลิลิตร ผสมกัน แล้วนำไปต้มในอ่างน้ำเดือดนาน 15 นาที จากนั้นทำให้เย็นทันทีโดยแช่ในอ่างน้ำแข็ง
3. เติมสารละลาย Nelson Reagent 1 มิลลิลิตร ผสมกันทันที แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที
4. เติมน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 520 นาโนเมตร เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับปริมาณน้ำตาลกลูโคสมาตรฐาน (กราฟมาตรฐาน)
5. สำหรับตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ใช้วิธีวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 1 – 4 โดยใช้สารละลายตัวอย่าง 1 มิลลิลิตร แทนสารละลายกลูโคส 1 มิลลิลิตร โดยปริมาณน้ำตาลของตัวอย่างต้องอยู่ในช่วงที่วิเคราะห์ได้ หากตัวอย่างมีปริมาณน้ำตาลสูงต้องเจือจางให้อยู่ในช่วงที่สามารถวิเคราะห์ได้ และหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์โดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน



ภาพผนวกที่ ข1 กราฟมาตรฐานของสารละลายกลูโคส

#### 4. วิธีการคำนวณ

$$\text{น้ำตาลรีดิวซ์ (}\mu\text{g/ml)} = \frac{\text{Abs}_{520} \times \text{dilution}}{\text{Slope}}$$

## การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืด (AACC, 2000)

### 1. เครื่องมือ

เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid visco analyzer, RVA 4D)

### 2. วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างจำนวน 3 กรัม ที่บดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช ใสลงในอุปกรณ์ชั่งน้ำหนัก และตวงน้ำปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร ( $\pm 0.1$  มิลลิลิตร) ใสในถ้วยทรงกระบอก (จำนวนที่ความชื้นร้อยละ 12) แต่ถ้าตัวอย่างมีความชื้นไม่เท่ากับร้อยละ 12 สามารถคำนวณปริมาณน้ำและตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามสูตร

สำหรับปริมาณตัวอย่าง  $S = 88 \times 3.0 / (100 - M)$

สำหรับปริมาณน้ำ  $W = 25 + (3.0 - S)$

โดย S = น้ำหนักตัวอย่างที่ปรับค่าแล้ว (กรัม)

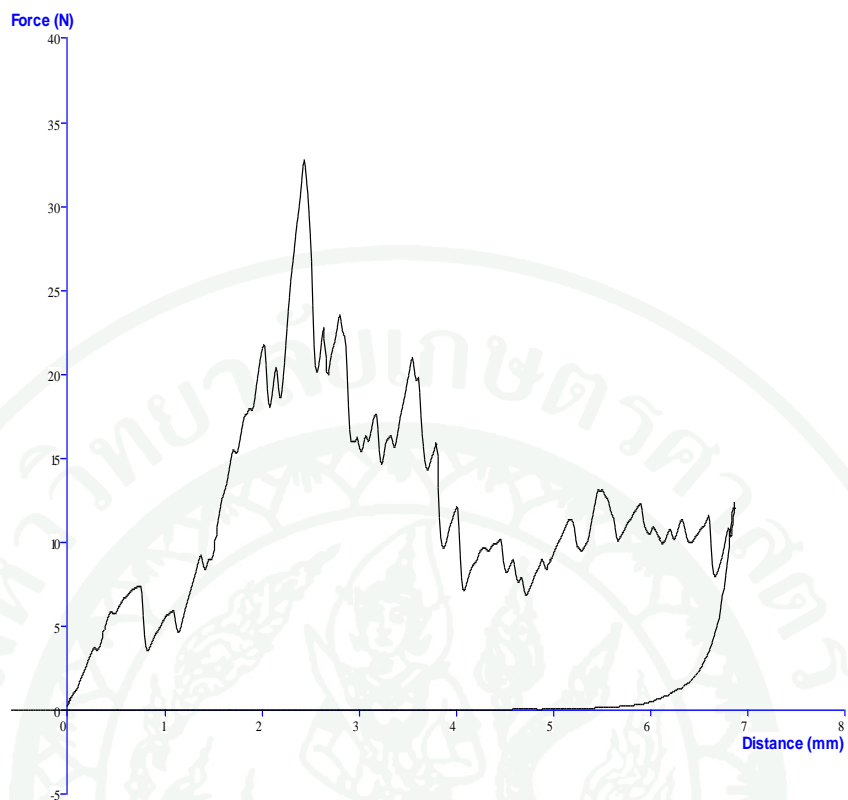
W = น้ำที่ปรับค่าแล้ว

M = ปริมาณความชื้นที่แท้จริงของตัวอย่าง (ร้อยละ)

2. ใสตัวอย่างลงบนผิวหน้าของน้ำในถ้วยทรงกระบอก ใช้ใบพายเขย่าตัวอย่างในถ้วยทรงกระบอกขึ้นลง 10 ครั้ง

3. ใสใบพายในถ้วยทรงกระบอก และสวมใบพายเข้ากับที่ยึด โดยให้ใบพายอยู่กึ่งกลางถ้วย แล้วเริ่มต้นการวิเคราะห์โดยกดมอเตอร์ของเครื่องมือลง และมีสิ่งที่ต้องระวังคืออย่าผสมตัวอย่างกับน้ำนานกว่า 1 นาทีก่อนการวิเคราะห์

4. บันทึก ความหนืดสูงสุดขณะให้ความร้อน (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) เป็นความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและต่ำสุด และ ค่าเซตแบค (setback) เป็นความแตกต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด



ภาพผนวกที่ ๒2 กราฟลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมกรอบพอง



### การจัดสิ่งทดลองสำหรับประเมินทางประสาทสัมผัส

ตามแผนการทดลองแบบ Balance incomplete block design (BIB) โดยตัวอย่างขนมกรอบพองที่ผ่านการเคลือบด้วยผงปรุงรสบาร์บีคิว จะถูกจัดให้ผู้ทดสอบจำนวน 35 คน โดยแต่ละคนจะได้รับคนละ 3 ตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างจะถูกทดสอบ 7 ครั้ง ดังแสดงในตารางผนวกที่ ค1

ตารางผนวกที่ ค1 การจัดตัวอย่างสำหรับทดสอบทางประสาทสัมผัสแบบ BIB

ผู้ทดสอบ	สิ่งทดลอง			ผู้ทดสอบ	สิ่งทดลอง		
1	1	2	3	21	1	10	11
2	4	8	12	22	2	12	14
3	5	10	15	23	3	5	6
4	6	11	13	24	4	9	13
5	7	9	14	25	7	8	15
6	1	4	5	26	1	12	13
7	2	8	10	26	2	5	7
8	3	13	14	28	3	9	10
9	6	9	15	29	4	11	15
10	7	11	12	30	6	8	14
11	1	6	7	31	1	14	15
12	2	9	11	32	2	4	6
13	3	12	15	33	3	8	11
14	4	10	14	34	5	9	12
15	5	8	13	35	7	10	13
16	1	8	9				
17	2	13	15				
18	3	4	7				
19	5	11	14				
20	6	10	12				

### แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

ชื่อผู้ทดสอบ..... วันที่.....

ผลิตภัณฑ์ : ขนมหกรอบพองจากแป้งข้าวกล้องเริ่มงอก

**คำชี้แจง** กรุณาทดสอบตัวอย่างต่อไปนี้จากซ้ายไปขวาและให้คะแนนความชอบตามความรู้สึกของท่าน เมื่อทดสอบตัวอย่างแล้วกรุณาบ้วนปากด้วยน้ำทุกครั้ง ก่อนทดสอบตัวอย่างต่อไป

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

รหัสตัวอย่าง

สี	.....	.....	.....
กลิ่น	.....	.....	.....
รสชาติ	.....	.....	.....
เนื้อสัมผัส	.....	.....	.....
การชอบรวม	.....	.....	.....

ข้อเสนอแนะ.....  
 .....  
 .....

ขอบพระคุณที่ให้ความร่วมมือ

นิรันดร จันทร์ลาด

ภาพผนวกที่ ๑1 แบบทดสอบทางประสาทสัมผัส

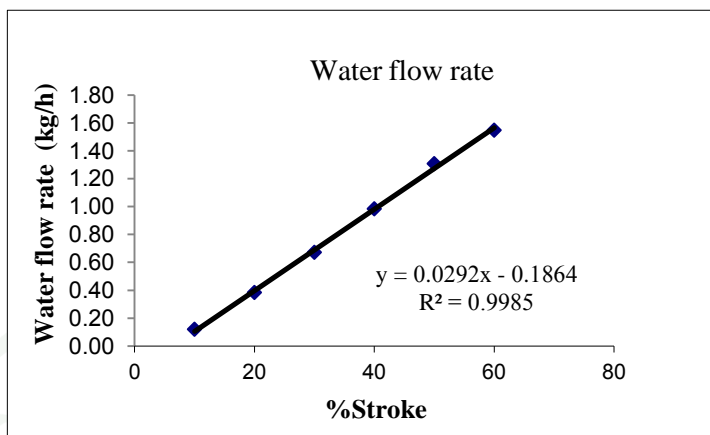


ภาคผนวก ง  
ข้อมูลจากการทดลอง

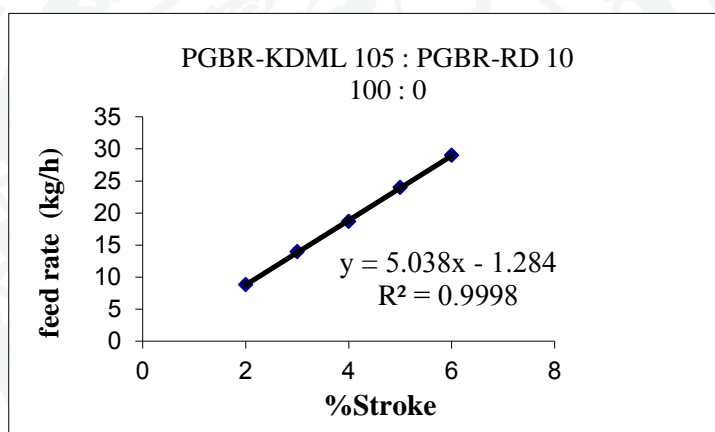
ตารางผนวกที่ 11 สภาวะที่บันทึกจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ระหว่างการทดลอง

สิ่งทดลอง	Extrusion temperature (°C)							Melt Temp. (°C)	Melt Pressure (Bar)	Screw speed (rpm)
	H 2	H 3	H 4	H 5	H 6	H7	Die			
Set	45	55	100	125	140	130	120			
1	44	54	98	126	139	135	126	154	310	300
2	45	55	99	125	140	131	122	153	292	300
3	45	54	99	124	139	134	124	154	344	400
4	45	55	99	125	140	132	120	155	290	400
5	45	55	100	125	140	131	120	148	314	300
6	45	56	101	126	140	130	121	148	314	300
7	45	55	100	125	140	131	120	150	310	400
8	45	55	100	125	140	130	120	142	246	400
9	45	55	99	125	140	132	120	145	248	350
10	45	55	100	125	140	130	120	144	314	350
11	46	56	100	126	141	130	120	148	250	264
12	45	56	100	125	141	130	120	139	220	434
13	44	54	98	125	138	135	130	167	294	350
14	45	57	100	125	140	130	120	145	248	350
15-17	46	55	100	125	140	130	120	144	320	350

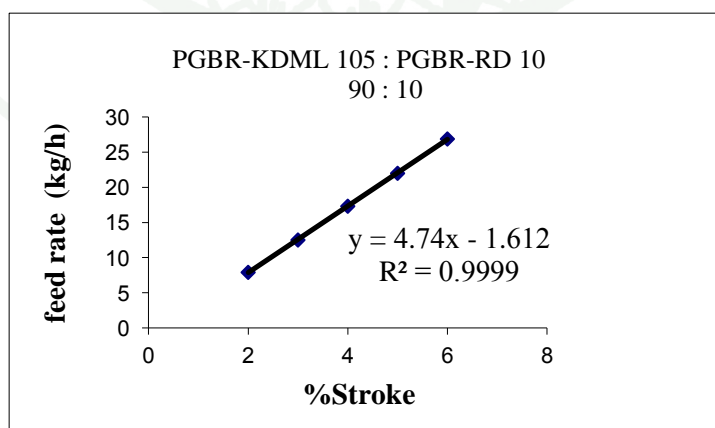
การคำนวณอัตราการป้อนน้ำและวัตถุดิบในกระบวนการเอ็กซ์ทรักชัน



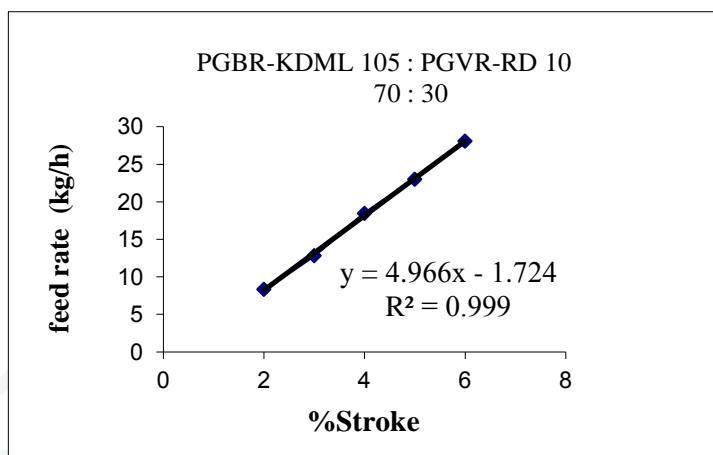
ภาพผนวกที่ ๓1 อัตราการป้อนน้ำ



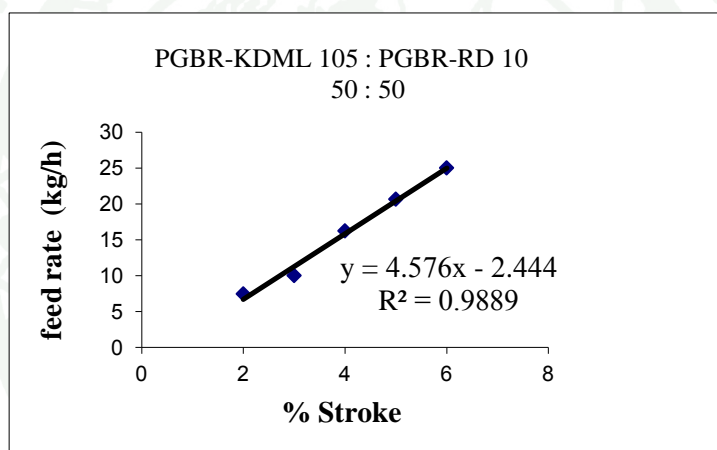
ภาพผนวกที่ ๓2 อัตราการป้อนวัตถุดิบที่อัตราส่วนเป็น 100:0



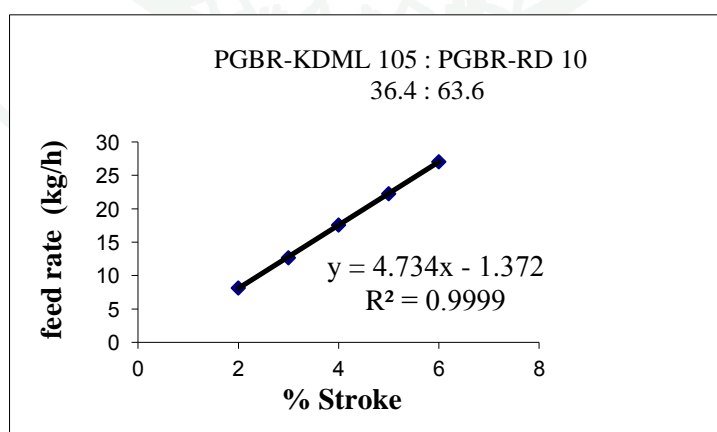
ภาพผนวกที่ ๓3 อัตราการป้อนวัตถุดิบที่อัตราส่วนเป็น 90:10



ภาพผนวกที่ ๓4 อัตราการป้อนวัตถุดิบที่อัตราส่วนเป็น 70:30



ภาพผนวกที่ ๓5 อัตราการป้อนวัตถุดิบที่อัตราส่วนเป็น 50:50



ภาพผนวกที่ ๓6 อัตราการป้อนวัตถุดิบที่อัตราส่วนเป็น 36.4:63.6



ตารางผนวกที่ จ1 สัมประสิทธิ์สัมพรรคผลตอบสนองขององค์ประกอบทางเคมีจากข้าว  
กล้องเริ่มงอกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

Coefficients	Responses				
	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	น้ำตาลรีดิวซ์	สารกาบา
Constant	3.507**	3.614	1.804	2160.92*	-47.267
Temp	0.375**	-0.002	4.17E-03	-135.94	3.939
Time	0.037	-0.008	-0.009	-19.46	0.415
Temp <sup>2</sup>	-0.007**	-	-	2.523**	-0.073
Time <sup>2</sup>	-0.001	-	-	0.1849	-0.004
Temp x Time	-	-	-	0.275	-
F-value <sub>LOF</sub>	1.46	36.22	272.71	43.00	21.63

ตารางผนวกที่ จ2 สัมประสิทธิ์สัมพรรคผลตอบสนองขององค์ประกอบทางเคมีจากข้าว  
กล้องเริ่มงอกข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10

Coefficients	Responses				
	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	น้ำตาลรีดิวซ์	สารกาบา
Constant	-0.701*	-8.635	0.332	-1287.51	-55.045*
Temp	0.515	0.706	0.046*	88.681	3.876
Time	0.202*	0.191	0.015*	28.74	0.988**
Temp <sup>2</sup>	-0.004	-0.010*	-8.166E-04	-1.533*	0.029*
Time <sup>2</sup>	-	-9.215E-04	-1.765E-04	-0.256*	-
Temp x Time	-0.009**	-0.005*	-	-0.389	-0.105*
F-value <sub>LOF</sub>	80.54	12.02	45.31	4.60	2282.08

หมายเหตุ: \* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

\*\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ )

ตารางผนวกที่ จ3 สัมประสิทธิ์สัมพรรคผลตอบสนองของสมบัติทางด้านความหนืดจาก  
แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105

Coefficients	Responses				
	Peak Viscosity	Trough	Breakdown	Final Viscosity	Setback from trough
Constant	522.392	421.59	56.176	917.883*	511.217*
Temp	-20.747	-21.818	2.202	-43.586	-22.214
Time	-4.682	-2.323	-0.753	-10.314	-8.496
Temp <sup>2</sup>	0.382	0.478*	-0.0512	0.829*	0.348*
Time <sup>2</sup>	0.059	0.056	0.011	0.132*	0.076*
Temp x Time	-	-0.902	-	-	0.106
F-value <sub>LOF</sub>	79.01	64.84	9.93	351.70	20.94

ตารางผนวกที่ จ4 สัมประสิทธิ์สัมพรรคผลตอบสนองของสมบัติทางด้านความหนืดจาก  
แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10

Coefficients	Responses				
	Peak Viscosity	Trough	Breakdown	Final Viscosity	Setback from trough
Constant	787.99**	373.716**	414.26**	475.654**	101.88**
Temp	-41.542**	-19.698**	-21.844**	-25.17**	-5.471**
Time	-11.343**	-5.317**	-6.025**	-6.658**	-1.339**
Temp <sup>2</sup>	0.630**	0.277**	0.353**	0.365**	0.088**
Time <sup>2</sup>	0.0695**	0.024*	0.045**	0.033*	0.009**
Temp x Time	0.205**	0.123*	0.081**	0.143*	0.02*
F-value <sub>LOF</sub>	405.05	314.74	1.36	434.76	1.67

หมายเหตุ: \* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

\*\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ )

ตารางผนวกที่ ๑5 สัมประสิทธิ์สมการผลตอบสนองของสารกาบา และคุณสมบัติทางกายภาพ

Coefficients	Responses				
	GABA	Expansion	Density	WAI	WSI
Constant	24.088 **	19.516 **	0.043 **	-1.154 **	373.989 **
<i>FM</i>	-0.075	-0.342 **	-0.135 **	1.274 **	-5.637 **
<i>SS</i>	-0.0014	-0.068	0.007	-0.053	-1.571 **
<i>PGBR-RD 10</i>	0.889 **	-0.016 **	-0.0044 *	0.078 **	0.011 **
<i>FM</i> <sup>2</sup>	-	0.0058	0.0042 *	-0.049	-
<i>SS</i> <sup>2</sup>	-	9.958E-05 **	-1.024E-05 **	-	0.002 **
<i>PGBR-RD 10</i> <sup>2</sup>	-0.0043 *	6.266E-03 **	-4.985E-05 *	5.148E-03	0.004 **
<i>FM x SS</i>	-	-	-	0.003	0.01
<i>FM x PGBR-RD 10</i>	-	-	3.522E-03	-0.0074	-
<i>SS x PGBR-RD 10</i>	-	-	-	-	-
<i>F</i> -value <sub>LOF</sub>	154.76	826.61	549.41	5.19	3.32

หมายเหตุ: *FM* = ความชื้นวัตถุดิบ (%)

*SS* = ความเร็วรอบสกรู (rpm)

*PGBR-RD 10* = แป้งข้าวกล้องเริ่มออกขาวเหนียวพันธุ์ กข 10 (%)

\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

\*\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ )

ตารางผนวกที่ ๑๖ สัมประสิทธิ์สมการผลตอบสนองของลักษณะทางเนื้อสัมผัสของขนมกรอบ  
พอง

Coefficients	Responses		
	Hardness	Brittleness	Toughness
Constant	-6.092**	32.970**	92.772**
<i>FM</i>	-8.677**	-2.401**	-3.865**
<i>SS</i>	0.702	-0.039	-0.063
<i>PGBR-RD 10</i>	-0.317**	-0.014	-1.096**
<i>FM</i> <sup>2</sup>	0.277	0.060**	-
<i>SS</i> <sup>2</sup>	-0.001	6.702E-05*	-
<i>PGBR-RD 10</i> <sup>2</sup>	-	2.911E-03	0.0023
<i>FM x SS</i>	-	-2.512E-04	0.0037
<i>FM x PGBR-RD 10</i>	-	-	0.0396*
<i>SS x PGBR-RD 10</i>	-	-	-
<i>F</i> -value <sub>LOF</sub>	11.64	9.93	2.93

หมายเหตุ: *FM* = ความชื้นวัตถุดิบ (%)

*SS* = ความเร็วรอบสกรู (rpm)

*PGBR-RD 10* = แป้งข้าวกล้องเริ่มงอกข้าวเหนียวพันธุ์ กข 10 (%)

\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ( $P \leq 0.05$ )

\*\* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $P \leq 0.01$ )

**ตารางผนวกที่ จ7** การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของลักษณะปรากฏ

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	65.915	48	1.373	1.012	.480
Intercept	3831.776	1	3831.776	2823.447	.000
Treatment	21.861	14	1.561	1.151	.338
Block	40.764	34	1.199	.883	.646
Error	75.999	56	1.357		
Total	3973.690	105			
Corrected Total	141.914	104			

**ตารางผนวกที่ จ8** การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของรสชาติ

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	145.968	48	3.041	3.036	.000
Intercept	4494.943	1	4494.943	4487.819	.000
Treatment	35.911	14	2.565	2.561	.007
Block	105.340	34	3.098	3.093	.000
Error	56.089	56	1.002		
Total	4697.000	105			
Corrected Total	202.057	104			

ตารางผนวกที่ ๑๑ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของเนื้อสัมผัส

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	434.635	48	9.055	5.156	.000
Intercept	2923.010	1	2923.010	1664.253	.000
Treatment	180.978	14	12.927	7.360	.000
Block	176.502	34	5.191	2.956	.000
Error	98.356	56	1.756		
Total	3456.000	105			
Corrected Total	532.990	104			

ตารางผนวกที่ ๑๑๐ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของความชอบโดยรวม

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	264.470	48	5.510	3.933	.000
Intercept	3377.336	1	3377.336	2411.016	.000
Trtreatment	107.056	14	7.647	5.459	.000
Block	112.913	34	3.321	2.371	.002
Error	78.444	56	1.401		
Total	3720.250	105			
Corrected Total	342.914	104			

ตารางผนวกที่ จ11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของสีในขนมกรอบพอง  
ผสมอบเชย

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	364.013	42	8.667	6.224	.000
Intercept	5724.056	1	5724.056	4110.412	.000
Block	330.194	39	8.467	6.080	.000
Cinnamon	33.819	3	11.273	8.095	.000
Error	162.931	117	1.393		
Total	6251.000	160			
Corrected Total	526.944	159			

ตารางผนวกที่ จ12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของกลิ่นในขนมกรอบพอง  
ผสมอบเชย

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	239.313	42	5.698	5.554	.000
Intercept	5347.656	1	5347.656	5212.607	.000
Block	235.594	39	6.041	5.888	.000
Cinnamon	3.719	3	1.240	1.208	.310
Error	120.031	117	1.026		
Total	5707.000	160			
Corrected Total	359.344	159			

ตารางผนวกที่ ๑13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของรสชาติในขนมกรอบ  
พองผสมอบเชย

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	415.100	42	9.883	7.034	.000
Intercept	4202.500	1	4202.500	2990.830	.000
Block	404.500	39	10.372	7.381	.000
Cinnamon	10.600	3	3.533	2.515	.062
Error	164.400	117	1.405		
Total	4782.000	160			
Corrected Total	579.500	159			

ตารางผนวกที่ ๑14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของเนื้อสัมผัสในขนม  
กรอบพองผสมอบเชย

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	374.763	42	8.923	10.606	.000
Intercept	5557.806	1	5557.806	6606.269	.000
Block	371.444	39	9.524	11.321	.000
Cinnamon	3.319	3	1.106	1.315	.273
Error	98.431	117	.841		
Total	6031.000	160			
Corrected Total	473.194	159			

ตารางผนวกที่ ๑15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของความชอบโดยรวมใน  
ขนมกรอบพองผสมอบเชย

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	321.412	42	7.653	8.904	.000
Intercept	5047.475	1	5047.475	5872.966	.000
Block	318.347	39	8.163	9.498	.000
Cinnamon	2.471	3	.824	.959	.415
Error	99.695	116	.859		
Total	5459.000	159			
Corrected Total	421.107	158			

ตารางผนวกที่ ๑16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของสีในขนมกรอบ  
พองผสมขมิ้น

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	284.150	42	6.765	3.634	.000
Intercept	6786.025	1	6786.025	3644.967	.000
Block	167.475	39	4.294	2.307	.000
Turmeric	116.675	3	38.892	20.890	.000
Error	217.825	117	1.862		
Total	7288.000	160			
Corrected Total	501.975	159			

ตารางผนวกที่ ๑17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของกลิ่นในขนมกรอบ  
พองผสมขมิ้น

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	154.563	42	3.680	3.259	.000
Intercept	6464.306	1	6464.306	5724.034	.000
Block	146.944	39	3.768	3.336	.000
Turmeric	7.619	3	2.540	2.249	.086
Error	132.131	117	1.129		
Total	6751.000	160			
Corrected Total	286.694	159			

ตารางผนวกที่ ๑18 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของรสชาติในขนมกรอบ  
พองผสมขมิ้น

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	338.300	42	8.055	5.081	.000
Intercept	5832.225	1	5832.225	3679.042	.000
Block	326.275	39	8.366	5.277	.000
Turmeric	12.025	3	4.008	2.529	.061
Error	185.475	117	1.585		
Total	6356.000	160			
Corrected Total	523.775	159			

ตารางผนวกที่ ๑19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของเนื้อสัมผัสในขนม  
กรอบพองผสมขมิ้น

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	322.950(a)	42	7.689	9.924	.000
Intercept	6350.400	1	6350.400	8196.324	.000
Block	318.100	39	8.156	10.527	.000
Turmeric	4.850	3	1.617	2.087	.106
Error	90.650	117	.775		
Total	6764.000	160			
Corrected Total	413.600	159			

ตารางผนวกที่ ๑20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) ของความชอบโดยรวมใน  
ขนมกรอบพองผสมขมิ้น

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	222.712	42	5.303	4.934	.000
Intercept	6088.556	1	6088.556	5665.744	.000
Block	200.194	39	5.133	4.777	.000
Turmeric	22.519	3	7.506	6.985	.000
Error	125.731	117	1.075		
Total	6437.000	160			
Corrected Total	348.444	159			

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายนิรันดร จันทร์ลาด
วัน เดือน ปีที่เกิด	11 สิงหาคม พ.ศ. 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดเพชรบุรี
ประวัติการศึกษา	ปวส. (เทคโนโลยีการอาหาร) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตปทุมธานี (พ.ศ. 2548) วท.บ. (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (พ.ศ. 2550)
ผลงานทางวิชาการ	1. Chanlat, N., S. Songsermpong, C. Charunuch and O. Naivikul. 2010. Twin-screw extrusion process affects characteristic of extruded snacks from pre-germinated brown rice flour. Poster presentation. <i>In</i> 6 <sup>th</sup> Thailand-Taiwan Academic cooperation conference. November 15 <sup>th</sup> 2010, Kasetsart University, Bangkok. 2. Chanlat, N., S. Songsermpong, C. Charunuch and O. Naivikul. 2011. Twin-screw extrusion of pre-germinated brown rice: physicochemical properties and $\gamma$ -aminobutyric acid (GABA) content of extruded snacks. <b>International Journal of Food Engineering</b> 7 (4)
ประสบการณ์งานวิจัย	1. ผู้ช่วยวิจัย โครงการ “สมบัติทางฟิสิกส์ เคมี และวิศวกรรม ของข้าวไทย และผลิตภัณฑ์จากข้าว” พ.ศ. 2550- 2552 2. ผู้ช่วยวิจัย โครงการ “การทดสอบเบื้องต้นในการใช้ ไมโครเวฟแบบต่อเนื่องในการทำสุกและลดความชื้นอาหารกึ่ง” พ.ศ. 2555
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ เพื่อการตีพิมพ์ผลงานใน วารสารวิชาการระดับนานาชาติ ประจำปีงบประมาณ 2552 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์