การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้ต่อคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์

โดย

นางสาวอภิชญา ห่วงทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้ต่อคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์

โดย
นางสาวอภิชญา ห่วงทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF GLUTEN-FREE BREAD PRODUCTS FROM BURZUPOLO FLOUR AND BURZUPOPIE FLOUR ON PHYSICAL AND SENSORY QUALITY OF PRODUCTS

By

MISS Apitchaya HUANGTHONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)

Department of FOOD TECHNOLOGY

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2021

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้ต่อคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์
โดย	อภิชญา ห่วงทอง
สาขาวิชา	เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต อินณวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงใจ ถิรธรรมถาวร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินณวงศ์)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(อาจารย์ ดร.ศันสนีย์ อุดมระติ)

61403207 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
คำสำคัญ : แป้งข้าวบือซูโปะโละ แป้งข้าวบือซูโพปี้ ขนมปังปราศจากกลูเตน

นางสาว อภิชญา ห่วงทอง: การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้ต่อคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต อินณวงศ์

ข้าวไร่หรือข้าวพันธุ์พื้นเมืองเป็นพืชที่มีความสำคัญในด้านความมั่นคงทางอาหารของชุมชน โดยเฉพาะประชากรที่อาศัยในพื้นที่ห่างไกลหรือในพื้นที่ภูเขาสูง การเพาะปลูกข้าวไร่หรือข้าวพันธุ์พื้นเมือง เช่น ข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและข้าวพันธุ์บือซูโพปี้ถือเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สร้างอาชีพและรายได้ให้แก่คนในพื้นที่ ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้แป้งข้าวในผลิตภัณฑ์อาหารที่หลากหลาย โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน ซึ่งในการแปรรูปแป้งข้าวนั้นนอกจากชนิดและสายพันธุ์ของข้าวจะมีผลต่อคุณภาพของแป้งข้าวและผลิตภัณฑ์แปรรูปแล้ว กระบวนการผลิตแป้งข้าวก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของแป้งข้าวเช่นกัน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวที่แตกต่างกัน ได้แก่ การโม่แห้ง, โม่เปียก, เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน ต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้ ตลอดจนการนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน จากการทดลอง พบว่า ข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้มีปริมาณอะไมโลสต่ำเท่ากับ 1.24 และ 2.41% ตามลำดับ และข้าวทั้งสองสายพันธุ์มีคุณค่าทางโภชนาการที่ดีกว่าข้าวที่ขัดสีแล้ว โดยเฉพาะปริมาณโปรตีน, โอเมก้า 3 6 และ 9, แอนโทไซยานิน และ Antioxidant เมื่อนำข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ไปแปรรูปเป็นแป้งข้าวด้วยกระบวนการที่แตกต่างกัน พบว่า แป้งข้าวที่ผลิตด้วยกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง (เทคโนโลยีเอ็กทรูชันและเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง) มีค่าความสว่างลดลง (L*) มีค่าความเป็นสีแดง (a*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เพิ่มมากขึ้น และมีค่าดัชนีการละลายน้ำสูงกว่าแป้งข้าวที่ใช้กระบวนการผลิตแป้งด้วยวิธีอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่า แป้งข้าวที่ผลิตด้วยกระบวนการเอ็กทรูชันมีค่าดัชนีการละลายน้ำที่สูงขึ้น แต่กลับมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำลดลงอย่างชัดเจน โดยแป้งข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยการโม่เปียกมีค่า peak viscosity, trough, final viscosity และค่า setback สูงที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวที่ผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยการโม่แห้ง, เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน โดยแป้งข้าวที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชันนั้นสามารถให้ความหนืดได้ทันทีเมื่อละลายในน้ำ และมีเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) ลดต่ำลง ประมาณ 3.5 และ 11 เท่า เมื่อเปรียบเทียบแป้งข้าวโม่แห้งกับแป้งข้าวที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งและ

เทคโนโลยีเอ็กทรูชัน ตามลำดับ โดยแป้งข้าวที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีเอ็กทรูชันมีค่า peak viscosity, trough, final viscosity และ setback ต่ำกว่าตัวอย่างอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อนำแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ที่ใช้กระบวนการผลิตแป้งที่แตกต่างกันมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน พบว่า สายพันธุ์ของข้าวไม่มีผลต่อความสูงของโด, ปริมาตรจำเพาะ และลักษณะปรากฏของขนมปังหลังอบ เมื่อนำแป้งข้าวตัวอย่างไปใช้แทนแป้งสาลี 100% ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง พบว่า โดจากแป้งข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ใช้กระบวนการผลิตด้วยเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน มีค่าความสูงของโดหลังบ่มสูงกว่าโดจากแป้งข้าวโม่แห้งและโม่เปียก แต่อย่างไรก็ตาม การใช้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้เพียงอย่างเดียวไม่สามารถผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนได้ ทางนักวิจัยจึงมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยผสมโปรตีนไข่ขาวและแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (แป้งข้าวเจ้า แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพด) พบว่า โปรตีนไข่ขาวสามารถช่วยสร้างโครงสร้างที่คล้ายคลึงกลูเตนในระบบของขนมปังได้ และการประยุกต์ใช้ไข่ขาวผงร่วมกับแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน ส่งผลให้แป้งผสมมีค่า amylose-amylopectin ratio เท่ากับ 0.19-0.20 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้ขนมปังมีลักษณะปรากฏการกระจายตัวของรูพรุนในโครงสร้างด้านในเหมือนกับขนมปังที่ผลิตจากแป้งสาลี และมีลักษณะเนื้อสัมผัสใกล้เคียงขนมปังจากแป้งสาลีมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าดัชนีการละลายน้ำที่แตกต่างกันของแป้งข้าวมีผลต่อปริมาตรจำเพาะและลักษณะเนื้อสัมผัสขนมปังภายหลังการอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ด้วยเทคโนโลยีเอ็กทรูชันผสมกับไข่ขาวผงและแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน ซึ่งพบว่ามีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ไม่แตกต่างจากขนมปังจากแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยได้รับคะแนนความชอบและการยอมรับจากผู้บริโภคสูงที่สุดและได้รับคะแนนความชอบด้านความนุ่ม รสชาติ และความชอบโดยรวมเทียบเท่ากับขนมปังที่ผลิตจากแป้งสาลีอีกด้วย

61403207 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : Burzupolo flour Burzupopie flour Gluten-free breads

MISS APITCHAYA HUANGTHONG : DEVELOPMENT OF GLUTEN-FREE BREAD PRODUCTS FROM BURZUPOLO FLOUR AND BURZUPOPIE FLOUR ON PHYSICAL AND SENSORY QUALITY OF PRODUCTS THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR BHUNDIT INNAWONG, Ph.D.

The upland rice or local rice is a principal plant ensuring food stability of the community, especially for those living in remote areas or high mountain areas. The upland rice or local rice varieties agriculture, such as Burzupolo rice and Burzupopie rice, is an occupational activity that generates livelihood and income for people in the area. Nowadays, rice flour is the ingredient in a wide range of food products, especially gluten-free bread. To process rice flour, the quality of rice flour was affected by the type and varieties of rice and also the different rice flour production methods. Therefore, in this research, the effect of the different rice flour production processes (namely: dry mill, wet mill, drum drying, and extrusion technology) on the physicochemical properties of Burzupolo and Burzupopie rice flour was studied, together with its application in gluten-free bread products. The experiment found that; first, Burzupolo rice and Burzupopie rice had low amylose contents of 1.24% and 2.41% respectively, second, both varieties had a better nutritional value than polish rice (especially the protein content, omega 3, omega 6, omega 9, anthocyanin, and antioxidant). After both rice varieties were processed into rice flour by different methods, the results found that; rice flour produced by the high-temperature process (extrusion technology and drum drying technology) had a lower brightness (L*), redness (a*), and yellowness (b*), but a higher water solubility index than rice flour produced by the other processes. It also found that rice flour produced by extrusion technology had a higher water solubility index but distinctly a lower water absorption index. Both varieties of rice flour processed by wet milling had the highest peak viscosity, trough, final viscosity, and setback values, followed by dry milling, drum drying technology, and extrusion technology. The rice flour produced by drum drying technology and extrusion technology provided an instant viscosity when dissolved in water and a decrease in the peak time of approximately 3.5 and 11 times compared to dry mill rice flour with the rice flour produced by drum drying technology and extrusion technology, respectively. The study showed a statistically significant; lower peak

viscosity, lower through, lower final viscosity, and lower setback values in the rice flour produced by extrusion technology in comparison to the other samples. When using different flour production processes for gluten-free bread, the rice varieties did not affect the dough height, specific volume, and the appearance of bread after baking. In bread products, substituting the wheat flour with 100% rice flour samples resulted in the dough from both rice flour varieties, processed by drum drying technology and extrusion technology, being higher in height than the dough from dry milling and wet milling. However, using Burzupolo and Burzupopie flour alone can not produce gluten-free bread, so the egg white protein and gluten-free flour bread mix for gluten-free bread production (rice flour, potato starch, and corn flour) were added. The study showed that the combination of egg white protein led to a gluten-like structure forming in breadcrumbs, also the application of using egg white powder together with gluten-free flour bread mix for gluten-free bread production resulted in a 0.19-0.20 amylose-amylopectin ratio of the flour mix, which was an appropriate ratio for the bread appearance seeing that the pore distribution in the inner structure and the texture were more similar to wheat bread. In addition, the different water solubility index values of rice flour affected the specific volume and texture of the baked bread, especially in gluten-free bread made from Burzupolo and Burzupopie rice flour, produced by extrusion technology, mixed with powdered egg white and gluten-free bread flour mixture. The surveys demonstrated that; the texture characteristics of this bread were not significantly different from wheat flour bread, it received the highest consumer satisfaction and acceptance score, and it received the score of softness, flavor, and overall liking equivalent to the bread made from wheat flour.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินณวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนแรงบันดาลใจในการทำวิจัยและการทำงานในสายวิชาชีพนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ให้การอบรมสั่งสอนวิชาความรู้และประสบการณ์ในสาขาวิชาชีพนี้อย่างสุดความสามารถ

ขอขอบคุณบุคลากรที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทุกท่านที่คอยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้อง ที่เป็นที่ปรึกษาในเรื่องการเรียน ตลอดถึงการทำวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูสั่งสอนข้าพเจ้าเป็นอย่างดี และคอยเป็นกำลังใจในทุกๆ เรื่อง จนทำให้ข้าพเจ้าผ่านพ้นอุปสรรคต่างๆ ไปได้อย่างราบรื่น

นางสาว อภิชญา ห่วงทอง

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

สารบัญ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 สมมติฐานของการวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ข้าวและแป้งข้าว 4

2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว 4

2.1.2 คุณสมบัติการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวและแป้งข้าว 6

2.2 กระบวนการผลิตแป้งข้าว 7

2.2.1 กระบวนการโม่ข้าว 7

2.2.2 ผลของกระบวนการโม่ต่อคุณสมบัติของแป้งข้าว 8

2.3 กระบวนการดัดแปรแป้งข้าว 10

2.4 ผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าว 11

2.4.1 แป้งปราศจากกลูเตน....12
2.4.2 ไฮโดรคอลลอยด์....14
2.4.3 โปรตีน....16
2.4.4 เอนไซม์....17
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย....19
3.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์....19
3.1.1 ตัวอย่างข้าว....19
3.1.2 ส่วนผสมในการผลิตขนมปัง....19
3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือในการผลิตตัวอย่าง....19
3.1.4 อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์....20
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย....21
3.2.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ 21
3.2.2 การศึกษาผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้....22
3.2.3 การประยุกต์ใช้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน....25
3.2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ....27
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง....28
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ 28
4.1.1 ลักษณะปรากฏของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ 28
4.1.2 ขนาดของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ 28
4.1.3 องค์ประกอบทางเคมี ค่าความชื้น และค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้....29
4.1.4 ปริมาณอะไมโลสในเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ 31

4.2 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้.....31
4.2.1 ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้และค่าความชื้นของแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้.....31
4.2.2 ค่าสีและลักษณะปรากฏของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้.....32
4.2.3 ดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลายน้ำของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้....34
4.2.4 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้.....36
4.3 การประยุกต์ใช้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน .40
4.3.1 ความสูงของโด ปริมาตรจำเพาะและลักษณะปรากฏของขนมปังหลังอบ 40
4.3.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน 45
4.3.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน 50
บทที่ 5 สรุป.....54
5.1 สรุป 54
5.2 ข้อเสนอแนะ 54
รายการอ้างอิง 56
ประวัติผู้เขียน 66

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณอะไมโลส 5

ตารางที่ 2 ผลของกระบวนการโม่ต่อองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว 8

ตารางที่ 3 ผลของกระบวนการโม่ต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง 9

ตารางที่ 4 วิธีการเตรียมแป้งดัดแปรและคุณสมบัติของแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ 10

ตารางที่ 5 ปริมาณอะไมโลและอะไมโลเพกตินในแป้งชนิดต่างๆ 13

ตารางที่ 6 กำลังการพองตัวและการละลายของแป้งชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส.....13

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทั่วไปของแป้งชนิดต่างๆ 13

ตารางที่ 8 ส่วนผสมของขนมปังจากแป้งสาลีและขนมปังปราศจากกลูเตน 25

ตารางที่ 9 ขนาดของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้.....28

ตารางที่ 10 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ 30

ตารางที่ 11 ปริมาณอะไมโลสของข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้.....31

ตารางที่ 12 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้และค่าความชื้นของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้.....32

ตารางที่ 13 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อค่าสีของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ 33

ตารางที่ 14 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อค่าดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลายน้ำของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้.....36

ตารางที่ 15 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้.....39

ตารางที่ 16 ผลของพันธุ์ข้าวและกระบวนการผลิตแป้งที่แตกต่างกันต่อความสูงของโด ปริมาตรจำเพาะและลักษณะปรากฏของขนมปังหลังอบ 42

ตารางที่ 17 ผลของพันธุ์ข้าวและกระบวนการผลิตแป้งที่แตกต่างกันต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน.....48

ตารางที่ 18 ผลของพันธุ์ข้าวและกระบวนการผลิตแป้งที่แตกต่างกันต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน 52

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน 5

ภาพที่ 2 กราฟวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA 7

ภาพที่ 3 กรรมวิธีการผลิตแป้งข้าว 8

ภาพที่ 4 การกักเก็บฟองก๊าซของ HPMC และ แซนแทนกัมที่ความเข้มข้น 2% 15

ภาพที่ 5 ผลของไฮโดรคอลลอยต่อคุณภาพของขนมปัง (ก) ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์; (ข) เติมแซนแทนกัม 2% และ (ค) เติม HPMC 2% 15

ภาพที่ 6 ผลของโปรตีนจากนมต่อการสร้างโครงข่าย 3 มิติ และคุณภาพผลิตภัณฑ์ขนมปังโดย (ก) ขนมปังจากแป้งสาลี, (ข) ขนมปังปราศจากกลูเตนแบบธรรมดา และ (ค) ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผสมโปรตีนนม 16

ภาพที่ 7 โครงสร้างของขนมปังปราศจากกลูเตนที่ (A) เติมไข่ผงอย่างเดียว และ (B) เติมไข่ขาวผงร่วมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส 17

ภาพที่ 8 ขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้ง Buckwheat (BW), แป้งข้าวกล้อง (BR) และแป้งข้าวโพด (CR) ที่มีการเติมโปรตีนนมร่วมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ที่ปริมาณ 0, 0.1 และ 10 % ต่อกรัมของโปรตีน 18

ภาพที่ 9 ลักษณะปรากฏของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ 28

ภาพที่ 10 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อลักษณะปรากฏของแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้ 34

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การปลูกข้าวไร่ของเกษตรกรในประเทศไทย ส่วนใหญ่พบบนพื้นที่ราบสูงในภาคเหนือตอนบน เนื่องจากข้าวไร่สามารถเจริญเติบโตได้โดยอาศัยเพียงน้ำฝนตามธรรมชาติเท่านั้น ซึ่งในปี พ.ศ. 2555 ภาคเหนือตอนบนมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวไร่ จำนวน 343,461 ไร่ และมีผลผลิตรวมเฉลี่ยปีละ 120,555 ตัน (กรมการข้าว, 2555) แม้ว่าข้าวไร่จะไม่ใช่พืชเศรษฐกิจ แต่ถือว่าเป็นพืชที่มีความสำคัญในด้านความมั่นคงทางอาหารของชุมชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งประชากรที่อาศัยในพื้นที่ห่างไกลหรือในพื้นที่ภูเขาสูง นอกจากนี้ยังพบว่า การเพาะปลูกข้าวไร่หรือข้าวพันธุ์พื้นเมือง เช่น ข้าวบือซูโปะโละ และ ข้าวบือซูโพปี้ ถือว่าเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สร้างอาชีพและรายได้ให้แก่คนในพื้นที่ได้มากกว่าการประกอบอาชีพอื่นๆ (บริบูรณ์ สมฤทธิ์, 1988)

การเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวพันธุ์พื้นเมืองแต่ละชนิดนั้น เป็นแนวทางในการอนุรักษ์พันธุ์ข้าวให้คงอยู่ ตลอดจนเป็นการสร้างอาชีพและค้นหาโอกาสในการยกระดับคุณภาพชีวิตให้แก่คนในชุมชนได้อย่างยั่งยืน ซึ่งในปัจจุบัน พบว่า มีการประยุกต์ใช้ข้าวและแป้งข้าวในผลิตภัณฑ์อาหารที่หลากหลายเพื่อจำหน่ายไปทั่วโลก ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ประเภทเส้น ผลิตภัณฑ์อาหารเช้า ผลิตภัณฑ์สำหรับผู้ที่มีอาการแพ้แป้งสาลีและกลูเตน และผลิตภัณฑ์เบเกอรี เป็นต้น (Ding และคณะ, 2021; Masure และคณะ, 2019; Suksomboon และ Naivikul, 2006; Yeh, 2004; พรพิไล นิยมเวช และคณะ, 2018; อุทัยวรรณ ทองทั้งวงศ์ และ สุนทรี สุวรรณสิชฌน์, 2010)

ขนมปังเป็นอาหารในกลุ่มผลิตภัณฑ์เบเกอรีที่นิยมทั่วโลก ทำจากแป้งสาลีนำมาผสมกับน้ำ ยีสต์ และส่วนผสมอื่นๆ เช่น น้ำตาล เกลือ เป็นต้น โดยนวดผสมให้เข้ากันและนำไปอบ ซึ่งแป้งสาลีและโปรตีนในแป้งสาลีที่เรียกว่ากลูเตน เป็นหนึ่งในโปรตีนที่เป็นอันตรายในอันดับต้นๆ โดยเฉพาะกับผู้ป่วยโรคเซลิแอค (Celiac Disease) ที่ไม่สามารถรับประทานกลูเตนได้ ซึ่งโรคเซลิแอคนี้จัดอยู่ในกลุ่มโรคเรื้อรังที่ยังไม่มียารักษา ดังนั้น จึงต้องหลีกเลี่ยงการรับประทานอาหารที่มีส่วนผสมของกลูเตน หรือบริโภคอาหารที่มีกลูเตนได้ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อวัน (วิภา สุโรจนะเมธากุล, 2013) ในปัจจุบันผู้บริโภคตระหนักถึงความรุนแรงของโรคนี้มากขึ้น ทำให้ขนาดของตลาดผลิตภัณฑ์อาหารปราศจากกลูเตนมีแนวโน้มขยายใหญ่ขึ้นในทุกๆ ปี โดยสังเกตได้จากยอดผลกำไรต่อปีของผลิตภัณฑ์กลุ่มเบเกอรีปราศจากกลูเตนในปีพ.ศ. 2563 ที่สูงถึง 2,975.28 ล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งมีผลกำไรเพิ่มขึ้น คิดเป็น 40% เมื่อเปรียบเทียบกับปี 2558 ดังนั้น จึงนับว่าเป็นโอกาสสำคัญของข้าวไทยในอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากข้าวเป็นวัตถุดิบที่ปราศจากกลูเตนและมีส่วนประกอบของ

โปรตีนที่ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ ตลอดจนเป็นแหล่งพลังงานที่มีคุณค่าทางโภชนาการที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวที่มีสีดำ (black rice) เช่น ข้าวบือซูโปะโละ และ ข้าวบือซูโพปี้ ซึ่งพบว่ามีสารประกอบฟีนอล (Sumczynski และคณะ, 2016) และสารแอนโทไซยานินซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเป็นส่วนประกอบด้วย (Plaitho และคณะ, 2013) นอกจากนี้ยังพบว่า ข้าวที่มีสีดำมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าข้าวขาว (white rice) และข้าวกล้อง (brown rice) 1.4 เท่า และ 1.3 เท่า ตามลำดับ (Thomas และคณะ, 2013)

นอกจากชนิดและสายพันธุ์ของข้าวจะมีผลต่อคุณภาพของแป้งข้าวและผลิตภัณฑ์แปรรูปแล้ว กรรมวิธีการผลิตแป้งข้าวก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของแป้งข้าวเช่นกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า กระบวนการโม่ (โม่แห้ง โม่เปียก และโม่ผสม) มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณสตาร์ชเสียหาย ขนาดอนุภาคของเม็ดแป้ง ค่าการละลาย และคุณสมบัติทางกระแสวิทยาของแป้งข้าว (Asmeda และคณะ, 2015; Chen และคณะ, 1999; Liaotrakoon และคณะ, 2014; Prasad และคณะ, 2012; Suksomboon และ Naivikul, 2006; สวนิต อิชยาวณิชย์ และคณะ, 2004) นอกจากนี้ กระบวนการดัดแปรแป้งข้าว (การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และการใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์) ก็มีผลต่อคุณสมบัติการเกิดเจลและอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวด้วยเช่นกัน (Hagenimana และคณะ, 2006; Ilo และคณะ, 1999; Mercier และคณะ, 1980; กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2000) ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการผลิตแป้งข้าวในรูปแบบต่างๆ สามารถผลิตแป้งข้าวที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกัน

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้ ตลอดจนการนำแป้งข้าวไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน ซึ่งนอกจากจะทำให้เข้าใจและทราบถึงคุณสมบัติของแป้งข้าวที่เปลี่ยนแปลงไปแล้ว ยังสามารถหาแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้มีมูลค่าเพิ่มตรงตามความต้องการของตลาดได้ ซึ่งอาจเป็นกลไกสำคัญในการยกระดับคุณภาพชีวิตของคนในพื้นที่ให้ดีขึ้นควบคู่กับการอนุรักษ์ข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่หายากได้อย่างยั่งยืนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้ ตลอดจนการนำแป้งข้าวไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้

ได้แก่ ลักษณะปรากฏ, ขนาด, องค์ประกอบทางเคมี, ปริมาณอะไมโลส, ค่าความชื้น และค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้

1.3.2 การศึกษาผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าว ได้แก่ การโม่แห้ง, โม่เปียก, เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน ต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ ได้แก่ ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้, ค่าความชื้น, ค่าสี, ลักษณะปรากฏ, ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ, ค่าดัชนีการละลายน้ำ และการเปลี่ยนแปลงความหนืด

1.3.3 การประยุกต์ใช้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ที่ได้จากกระบวนการโม่แห้ง, โม่เปียก, เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน และทำการวิเคราะห์ความสูงของโดหลังบ่ม, ปริมาตรจำเพาะ, ลักษณะปรากฏ, ลักษณะเนื้อสัมผัส และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังหลังอบ

1.4 สมมติฐานของการวิจัย

1.4.1 กระบวนการผลิตแป้งที่แตกต่างกันทำให้ได้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ที่มีคุณสมบัติหลากหลายมากขึ้น

1.4.2 กระบวนการผลิตแป้งที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ให้ทดแทนกลูเตนในแป้งสาลีได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาในครั้งนี้ทำให้ทราบถึงคุณภาพทางเคมีกายภาพของข้าวพันธุ์พื้นเมืองทั้ง 2 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ และคุณสมบัติของแป้งข้าวที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งข้าวที่แตกต่างกัน ตลอดจนการนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน

บทที่ 2
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้าวและแป้งข้าว

ข้าว (*Oryza sativa L.*) เป็นแหล่งอาหารสำคัญของประชากรทั่วโลก สำหรับประเทศไทยนั้น ข้าวถือว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ โดยประเทศไทยมีการส่งออกข้าวเป็นอันดับ 1 ของโลก ซึ่งนำรายได้เข้าสู่ประเทศสูงถึงสองแสนล้านบาทต่อปี (สมาคมโรงสีข้าวไทย, 2555)

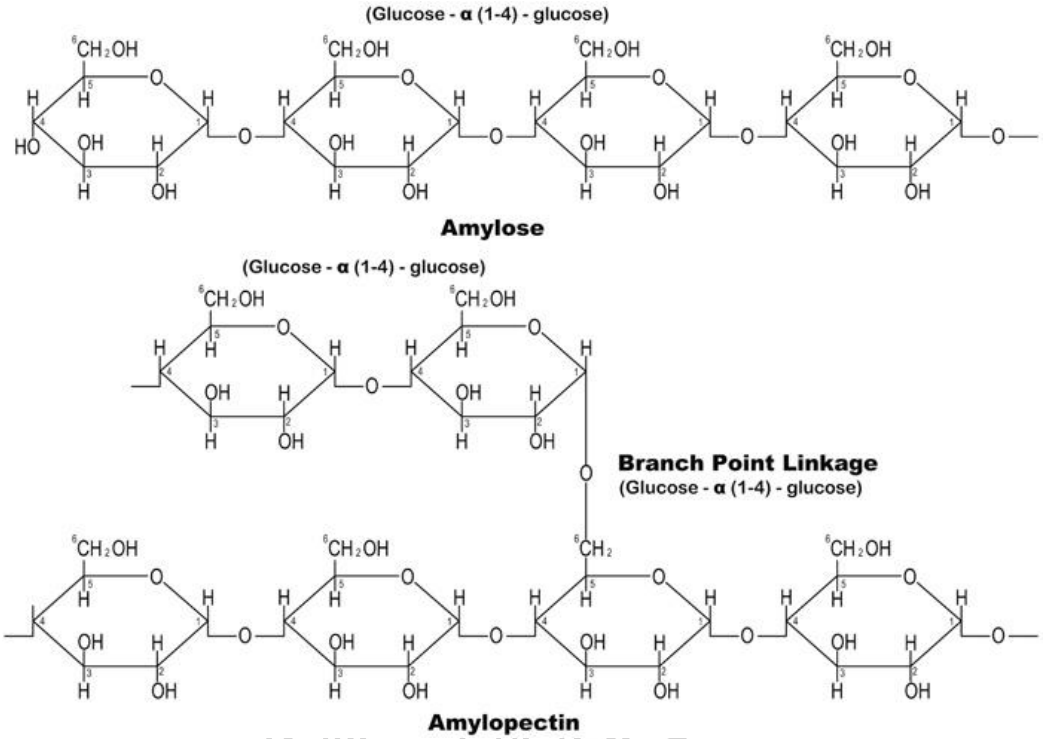
2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของข้าว

ข้าวแต่ละสายพันธุ์จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เส้นใยอาหาร และเถ้า โดยคาร์โบไฮเดรตประเภทแป้ง (Starch) เป็นองค์ประกอบหลักสำคัญที่พบในข้าวและมีผลต่อคุณภาพการหุงต้มและคุณภาพในด้านการบริโภค (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2004)

2.1.1.1 สตาร์ช

แป้ง (สตาร์ช) เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะ α-1,4-glycosidic bond และ α-1,6-glycosidic bond ซึ่งถือว่าเป็นองค์ประกอบที่พบมากที่สุดในข้าว โดยเม็ดสตาร์ชมีขนาดประมาณ 2-9 ไมครอน และสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ อะไมโลส (amylose) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สายยาวมีลักษณะขดเป็นเกลียวแบบเฮลิกซ์ (helix) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้าน (Juliano, 1985; งามชื่น คงเสรี, 2004) ดังภาพที่ 1

หากแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณอะไมโลส จะพบว่า ข้าวเหนียวเป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (0-2%) ในขณะที่ข้าวเจ้าสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มย่อย ได้แก่ ข้าวอะไมโลสสูง ปานกลาง และต่ำ ซึ่งมีปริมาณอะไมโลส อยู่ในช่วง 26-32%, 20-25% และ 10-19% ตามลำดับ (ตารางที่ 1)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

ที่มา: Ghanbarzadeh และ Almasi (2013)

ตารางที่ 1 การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณอะไมโลส

ประเภทข้าว	ปริมาณอะไมโลส (%)	ลักษณะข้าวหลังหุงต้ม
ข้าวเหนียว	0-2	เหนียวมาก
ข้าวเจ้า		
อะไมโลสต่ำ	10-19	เหนียว-นุ่ม
อะไมโลสปานกลาง	20-25	ค่อนข้างร่วน แต่ไม่แข็ง
อะไมโลสสูง	26-34	ร่วนและแข็ง

ที่มา: งามชื่น คงเสรี (2004)

2.1.1.2 โปรตีน

องค์ประกอบที่มีปริมาณมากเป็นอันดับสองรองจากคาร์โบไฮเดรต คือ โปรตีน ซึ่งในเมล็ดข้าวมีปริมาณโปรตีนโดยเฉลี่ย 8 % และสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้ โปรตีนกลู

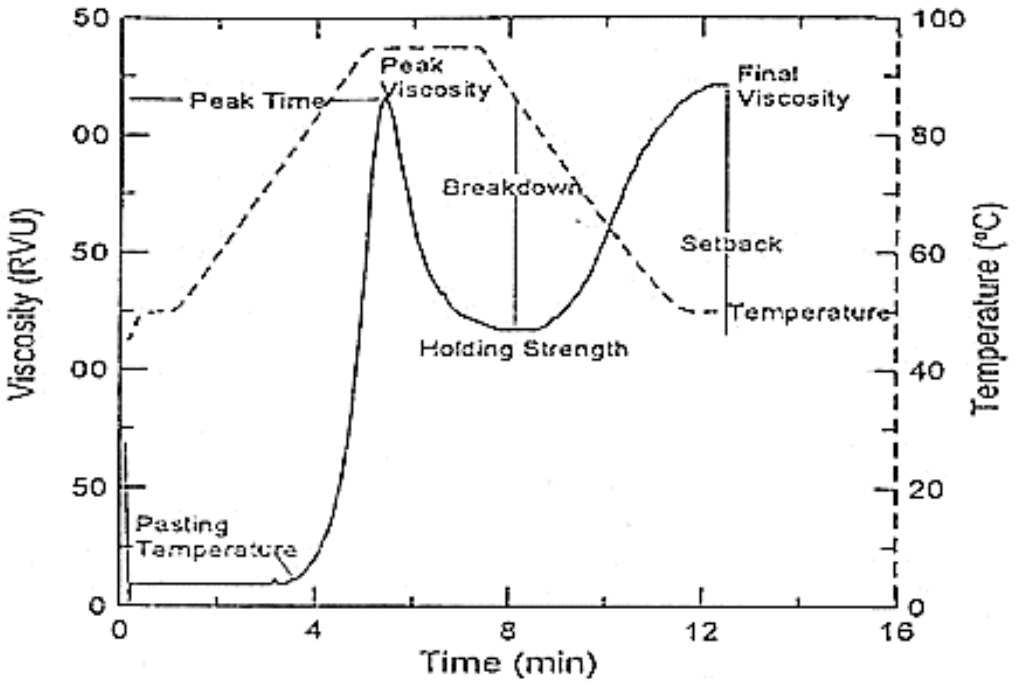
เตลิน (Glutelin) เป็นโปรตีนที่ละลายในสารละลายกรดหรือด่าง ซึ่งโปรตีนชนิดนี้เป็นโปรตีนหลักที่พบในข้าว (ประมาณ 85-90 %) ส่วนที่เหลือจะเป็นโปรตีนอัลบูมิน (Albumin) โกลบูลิน (Globulin) และโปรลามิน (Prolamine) ซึ่งละลายในน้ำ ละลายในสารละลายเกลือ และในแอลกอฮอลล์ ตามลำดับ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2004) โดยโปรตีนจะแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างระหว่างเม็ดแป้ง และขัดขวางการซึมผ่านของน้ำ มีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้งและการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง ทำให้ใช้ระยะเวลาในการหุงต้มให้ข้าวสุกนานขึ้น (งามชื่น คงเสรี, 2004; อรอนงค์ นัยวิกุล, 2004)

2.1.1.3 ไขมัน

ไขมันส่วนใหญ่ที่พบในข้าว คือ ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) และฟอสโฟไลพิด (phospholipids) ซึ่งมีอยู่ปริมาณ 1-3% มักพบในคัพภะและส่วนเปลือก สำหรับส่วนเนื้อเมล็ดนั้นพบไขมันอยู่ในปริมาณน้อย ทั้งนี้ ในระหว่างการเก็บรักษาไขมันเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยากับเอนไซม์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระซึ่งก่อให้เกิดกลิ่นหืนในเมล็ดข้าวได้ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2004) ยิ่งไปกว่านั้น ไขมันเหล่านี้ยังสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะไมโลส (amylose-lipid complex) ทำให้การพองตัว และความสามารถในการละลาย และความหนืดสูงสุดลดลง ตลอดจนส่งผลให้อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มสูงขึ้น (Eliasson และ Krog, 1985; Jane และคณะ, 1999)

2.1.2 คุณสมบัติการเกิดเจลาติไนเซชันของข้าวและแป้งข้าว

โมเลกุลของสตาร์ชที่อยู่ในข้าวประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เม็ดแป้งที่อยู่ในข้าวสามารถดูดซับน้ำและพองตัวได้อย่างจำกัดเมื่ออยู่ในน้ำเย็น แต่เมื่อมีการให้ความร้อนแก่ระบบ พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลงทำให้เม็ดแป้งสามารถดูดซับน้ำและเกิดการพองตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้น้ำแป้งมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น โดยอุณหภูมิที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนืดนี้ เรียกว่า Pasting Temperature และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้พบว่า ความหนืดของแป้งจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่เรียกว่าความหนืดสูงสุด (Peak Viscosity) หลังจากนั้น ความหนืดจะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากเม็ดแป้งเกิดการแตกตัวและเกิดการปลดปล่อยอะไมโลสและอะไมโลเพกตินออกมา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความหนืดในช่วงนี้จะเรียกว่า Break down (ความหนืดสูงสุด - ความหนืดต่ำสุด) เมื่อระบบถูกทำให้เย็นตัวลง โมเลกุลต่างๆ ที่กระจายตัวอยู่ก็จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันและเก็บกักน้ำเอาไว้ภายในโครงสร้างอีกครั้ง ส่งผลให้ความหนืดของสารละลายแป้งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง เรียกสิ่งที่เกิดขึ้นนี้ว่าการคืนตัวของแป้งหลังจากหุงสุก (setback) (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2003) (ภาพที่ 2)



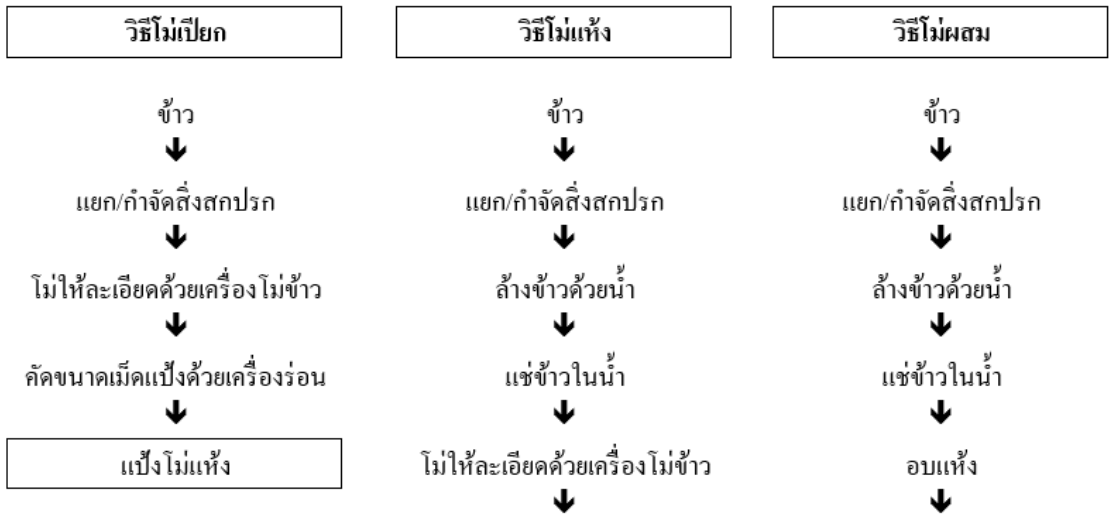
ภาพที่ 2 กราฟวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA

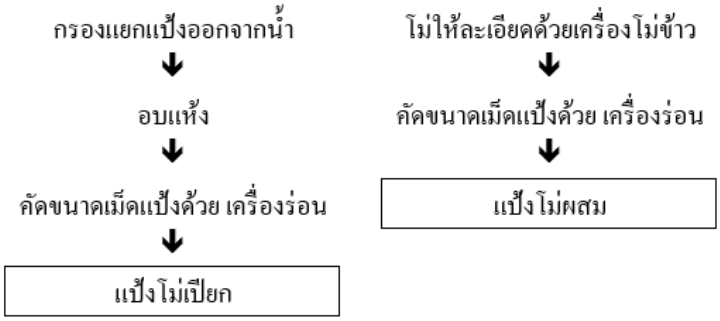
ที่มา: Scientific (1995)

2.2 กระบวนการผลิตแป้งข้าว

2.2.1 กระบวนการโม่ข้าว

โดยส่วนใหญ่แป้งข้าวจะถูกผลิตจากข้าวหัก นำมาลดขนาดให้เล็กลงด้วยกระบวนการโม่ ซึ่งกระบวนการแปรรูปแป้งข้าวที่นิยมใช้ในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้ 3 วิธี ได้แก่ โม่เปียก โม่แห้ง และโม่ผสม โดยมีขั้นตอนแสดงดังแผนภาพต่อไปนี้





ภาพที่ 3 กรรมวิธีการผลิตแป้งข้าว

ที่มา: งามชื่น คงเสรี (2003)

2.2.2 ผลของกระบวนการโม่ต่อคุณสมบัติของแป้งข้าว

กระบวนการโม่ข้าวเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของแป้งข้าวในด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งข้าว ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.2.1 ผลของกระบวนการโม่ต่อองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว

งานวิจัยจำนวนมากพบว่า ปริมาณวิตามินที่ละลายน้ำ โปรตีน น้ำตาล และไขมันบางส่วนสูญเสียไปจากกระบวนการโม่เปียก ซึ่ง Lu และ Lii (1989) และ Chen และคณะ (1999) ได้รายงานว่า แป้งข้าวที่โม่แบบแห้งมีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และน้ำตาลรีดิวซ์ สูงกว่าแป้งข้าวที่ได้จากกระบวนการโม่แบบเปียกและโม่แบบผสม ซึ่งแสดงผลเปรียบเทียบได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2 ผลของกระบวนการโม่ต่อองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)	
	วิธีการโม่แห้ง	วิธีการโม่เปียก
โปรตีน	8.02	6.67
ไขมัน	0.41	0.03
เถ้า	0.45	0.17
น้ำตาลรีดิวซ์	0.90	0.15

ที่มา: Lu และ Li (1989)

2.2.2.2 ผลของกระบวนการโม่ต่อขนาดอนุภาคของเม็ดแป้ง

Chen และคณะ (1999) รายงานว่าแป้งข้าวเหนียวที่ได้จากกระบวนการโม่แห้ง (Dry mill) มีขนาดอนุภาคประมาณ 100 - 300 ไมครอน ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าการโม่แบบผสม และการโม่เปียก ซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 100 - 200 ไมครอน และ 10 - 30 ไมครอน ตามลำดับ

2.2.2.3 ผลของกระบวนการโม่ต่อปริมาณสตาร์ชที่ถูกทำลาย (Damaged starch)

กระบวนการโม่แห้งทำให้มีสตาร์ชที่ถูกทำลายมากกว่าวิธีอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างกระบวนการโม่แห้ง เครื่องโม่จะทำให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 50 องศาเซลเซียส ในขณะที่เครื่องโม่แบบโม่เปียกมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องปกติ นอกจากนี้ ในกระบวนการโม่เปียกยังมีการแช่ข้าวในน้ำซึ่งขั้นตอนนี้ทำให้เมล็ดข้าวนิ่มขึ้นส่งผลให้ในระหว่างการโม่เกิดสตาร์ชที่เสียหายน้อยกว่าการโม่แห้ง โดยปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นจาก 13% เป็น 28% ทำให้ปริมาณสตาร์ชที่ถูกทำลายลดลงจาก 8.4% เหลือ 5% ตามลำดับ (Chen และคณะ, 1999) ซึ่ง Nishita (1982) ได้รายงานไว้ว่า แป้งที่ได้จากการโม่แห้งมีปริมาณสตาร์ชที่ถูกทำลายเกิดขึ้น 24.2% ในขณะที่แป้งที่ได้จากการโม่เปียกมีปริมาณสตาร์ชที่ถูกทำลายเกิดขึ้นพียง 6.7% เท่านั้น โดยการรายงานดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Yoenyongbu-ddhagal และ Noomhorm (2002) ที่ทดลองโม่ข้าวไทยที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (เสาไห้) และพบว่า แป้งข้าวที่ได้จากการโม่แห้ง มีปริมาณสตาร์ชที่ถูกทำลายสูงกว่าแป้งข้าวโม่เปียก โดยมีค่าปริมาณสตาร์ชที่ถูกทำลายเท่ากับ 12.1% และ 4.2% ตามลำดับ

2.2.2.4 ผลของกระบวนการโม่ต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง

แป้งข้าวที่ผลิตด้วยวิธีโม่เปียกมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่า break down และค่าความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity) สูงกว่าแป้งข้าวที่ผลิตด้วยวิธีการโม่แห้ง (Chen และคณะ, 1999; Leewatchararongjaroen และ Anuntagool, 2016; Yoenyongbuddhagal และ Noomhorm, 2002) ซึ่งสรุปค่าต่างๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 3 ผลของกระบวนการโม่ต่อสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง

คุณสมบัติ	วิธีโม่เปียก	วิธีโม่แห้ง
ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity: RVU)	309.87	202.71
ค่า Breakdown (RVU)	84.92	45.88
ความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity: RVU)	373.21	326.50

ที่มา: Yoenyongbuddhagal และ Noomhorm (2002)

2.3 กระบวนการดัดแปรแป้งข้าว

แป้งตามธรรมชาติอาจมีคุณสมบัติและข้อจำกัดในการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้น กระบวนการดัดแปรจึงเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหาตลอดจนปรับปรุงคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของแป้งธรรมชาติ (Native Starch) ได้ด้วยวิธีการต่างๆ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4 วิธีการเตรียมแป้งดัดแปรและคุณสมบัติของแป้งดัดแปรชนิดต่างๆ

วิธีการดัดแปร	การเตรียม	คุณสมบัติ
พรีเจลาติไนเซชัน	ทำให้แป้งสุกเกิดเจลและพองตัวได้ในน้ำเย็นโดยใช้วิธีทำแห้งแบบลูกกลิ้งและการเอ็กซ์ทรูชัน เป็นต้น	สามารถกระจายตัวได้ในน้ำเย็น
การย่อยด้วยกรด	ใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริก หรือกรดซัลฟิวริก	ลดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ลดความหนืด และเพิ่มการเกิดรีโทรเกรเดชัน
การย่อยด้วยเอนไซม์	ใช้เอนไซม์ที่ย่อยอะไมโลส (amylolytic enzyme)	ลดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ ลดความหนืด และเพิ่มการเกิดรีโทรเกรเดชัน
การเชื่อมข้าม	โมโนสตาร์ชฟอสเฟต - ทำการเอสเทอริฟิเคชันด้วยกรดออร์โธฟอสฟอริกร่วมกับการใช้โซเดียมหรือโพแทสเซียมออร์โธฟอสเฟต หรือโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟต ไดสตาร์ชฟอสเฟต - ทำการเอสเทอริฟิเคชันด้วยโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต หรือฟอสฟอรัสออกซิคลอไรด์	เม็ดสตาร์ชมีความคงตัวสูงเมื่อเกิดการพองตัว ทนต่ออุณหภูมิ ทนต่อแรงเฉือน และทนต่อสภาวะที่เป็นกรดสูง

ที่มา: Singh และคณะ (2007)

แป้งพรีเจลเป็นแป้งที่ถูกดัดแปรด้วยเทคนิคทางกายภาพ ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้ความร้อนในการทำให้สารละลายแป้งเกิดเจลาติไนเซชัน จากนั้นจึงนำแป้งสุกที่ได้ไปทำแห้ง กระบวนการ

ดังกล่าวจะทำให้แป้งที่ได้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากแป้งธรรมชาติ (Native starch) โดยแป้งพรีเจลจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำและละลายน้ำได้ดีขึ้น และสามารถละลายในน้ำเย็นได้ เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายในระหว่างการผลิต ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้ในการผลิตแป้งพรีเจลคือการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และ เอ็กทรูชัน จากงานวิจัยของ Ilo และคณะ (1999) พบว่าสภาวะของเครื่องเอ็กทรูดเมื่อมีการปรับเพิ่มอุณหภูมิบาเรลจาก 70 องศาเซลเซียส เป็น 120 องศาเซลเซียส ส่งผลให้แป้งเอ็กทรูดมีความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลายน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่กลับมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุด ค่า Breakdown ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัว (setback) ลดลง สำหรับกระบวนการผลิตแป้งด้วยวิธีทำแห้งแบบลูกกลิ้งนั้น เป็นวิธีที่นิยมใช้แพร่หลายมากกว่าวิธีเอ็กทรูด เนื่องจากผลิตภัณฑ์แป้งที่ได้สามารถละลายน้ำได้อย่างรวดเร็วมากกว่า (Vlachos และ Karapantsios, 2000) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของสารละลายแป้งก่อนนำไปทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่แตกต่างกัน เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและคุณสมบัติของแป้งพรีเจลที่ได้

สำหรับผลของกระบวนการผลิตแป้งพรีเจลเปรียบเทียบระหว่างวิธีทำแห้งแบบลูกลิ้งและวิธีเอ็กทรูชัน จากผลงานวิจัยของ Collonna และคณะ (1984) พบว่า เมื่อเปรียบเทียบแป้งที่ได้จากกระบวนการเอ็กทรูชันที่อุณหภูมิบาเรล 90-180 องศาเซลเซียส (ความชื้น 19-44%) กับแป้งพรีเจลที่ผลิตด้วยวิธีทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่ใช้แป้งที่มีปริมาณของแข็ง 45% อุณหภูมิและความเร็วลูกกลิ้งเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส และ 10 รอบต่อนาที ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า ทั้ง 2 วิธีมีผลทำให้โครงสร้างของแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยกระบวนการเอ็กทรูชันจะทำลายโครงสร้างของเม็ดแป้งในส่วนที่เป็นอะไมโลสและอะไมโลเพกตินแบบสุ่ม และพบอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่ถูก depolymerization ในอัตราส่วนเดียวกันกับแป้งธรรมชาติ แต่สำหรับแป้งที่ได้จากวิธีทำแห้งแบบลูกกลิ้งนั้น มีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่ถูก depolymerization และถูกปลดปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการทำแห้งมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า แป้งพรีเจลที่ผลิตด้วยวิธีทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีความสามารถในการดูดซับน้ำ ค่าการละลายน้ำ และค่ากำลังการพองตัวที่สูงกว่าวิธีเอ็กทรูชันอีกด้วย (Pérez-Sira และ González-Parada, 1997)

2.4 ผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าว

กลูเตน (Gluten) เป็นโปรตีนหลักที่มีอยู่ในแป้งสาลี และมีส่วนสำคัญในการกักเก็บก๊าซเอาไว้ภายในโครงสร้างของขนมปัง ทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมปังมีการพองตัว และมีลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Demirkesen และคณะ, 2010) นอกจากนี้กลูเตนยังเป็นส่วนประกอบสำคัญที่มีผลต่อลักษณะปรากฏ ตลอดจนลักษณะโครงสร้างของขนมปัง ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากลูเตน

คือส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตขนมอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลิตภัณฑ์ขนมปัง ซึ่งจำเป็นต้องใช้แป้งสาลีที่มีกลูเตนสูงในการผลิต (Renzetti และคณะ, 2008; Sivaramakrishnan และคณะ, 2004) อย่างไรก็ตามในปัจจุบัน พบว่า มีผู้บริโภคที่เป็นโรคภูมิแพ้กลูเตน (Celiac Disease) จำนวนมากซึ่งเป็นโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบการย่อยที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น จึงมีแนวโน้มที่ผู้บริโภคต้องการผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากกลูเตนหรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้แป้งชนิดอื่นทดแทนการใช้แป้งสาลีมากยิ่งขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตนเป็นทางออกเดียวที่จะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดอาการแพ้ดังกล่าว เพราะโรคนี้ยังไม่มียาที่สามารถรักษาได้ โดยส่วนผสมที่สำคัญและถูกใช้ในกระบวนการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.1 แป้งปราศจากกลูเตน

แป้งปราศจากกลูเตนที่นิยมใช้ ได้แก่ แป้งข้าว แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และแป้งจากพืชตระกูลถั่ว เป็นต้น (Defloor และคณะ, 1991; Gallagher และคณะ, 2004; Keetels และคณะ, 1996; Marco และคณะ, 2008; Moore และคณะ, 2004; Sanchez และคณะ, 2002; Schonlechner และคณะ, 2006) ซึ่งบทบาทที่สำคัญของแป้งในระหว่างกระบวนการอบขนมปัง คือ การจับกับน้ำและการสร้างโครงสร้างที่มีก๊าซ (Sandstedt, 1961) โดยแป้งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติด้านต่างๆ ที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 5-7) เช่น ลักษณะทางกระแสวิทยา กระบวนการเจลาติไนเซชัน การเกิดเจล และลักษณะเนื้อสัมผัส ซึ่งมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างของแป้ง (Abdel-Aal และ Gallagher, 2009) ทั้งนี้ คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งจะได้รับอิทธิพลมาจากองค์ประกอบหลัก ได้แก่ อะไมโลส และอะไมโลเพกติน องค์ประกอบเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับพันธะไฮโดรเจนและการเปลี่ยนแปลงของแป้งในระหว่างกระบวนการที่ได้รับความร้อน ตลอดจนมีความเกี่ยวเนื่องโดยตรงกับอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตนมักใช้แป้งที่มีลักษณะเป็น pseudo plastic (Ronda และคณะ, 2011) และใช้แป้งที่มีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันที่สูง เพราะจะทำให้ได้ขนมปังที่มีปริมาตรสูง โดยพบว่าแป้งข้าวเป็นแป้งที่มีคุณสมบัติเหมาะสำหรับใช้เป็นแป้งทดแทนแป้งสาลีมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่น (Ronda และคณะ, 2011)

ตารางที่ 5 ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้งชนิดต่างๆ

ชนิดแป้ง	อะไมโลส (%)	อะไมโลเพกติน (%)
แป้งมันฝรั่ง	21	79
แป้งข้าวโพด	28	72
แป้งสาลี	28	72
แป้งมันสำปะหลัง	17	83
แป้งข้าวเหนียว	0	100
แป้งข้าวเจ้า	17	83

ที่มา : Swinkels (1985)

ตารางที่ 6 กำลังการพองตัวและการละลายของแป้งชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส

ชนิดแป้ง	กำลังการพองตัว	การละลาย (%)
แป้งมันฝรั่ง	> 1,000	82
แป้งข้าวโพด	24	25
แป้งสาลี	21	41
แป้งมันสำปะหลัง	71	48
แป้งข้าวเจ้า	19	18

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2007)

ตารางที่ 7 คุณสมบัติทั่วไปของแป้งชนิดต่างๆ

ชนิดแป้ง	ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน (^{o}C)	ความขุ่น-ใส	ความสามารถในการเกิดเจลและรีโทรเกรเดชัน
แป้งมันฝรั่ง	58-65	ใส	ต่ำถึงปานกลาง
แป้งข้าวโพด	62-80	ขุ่น	สูง
แป้งสาลี	52-85	ขุ่น	สูง

แป้งมันสำปะหลัง	52-65	ใส	ปานกลาง
แป้งข้าวเจ้า	61-78	ขุ่น	สูง

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ (2007); นิธิยา รัตนาปนนท์ (2010)

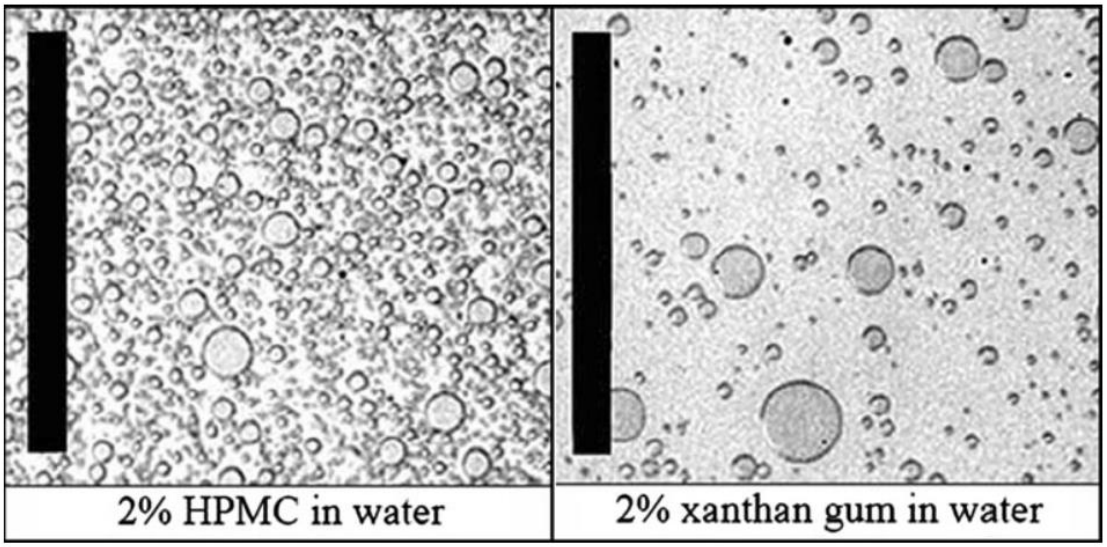
แต่อย่างไรก็ตามภายหลังการเจลาติไนเซชันพบว่า ผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ใช้แป้งข้าวทดแทนแป้งสาลีจะมีปริมาตรลดลงภายหลังจากที่อุณหภูมิของขนมปังเย็นตัวลง (หดตัว/ยุบตัว) (Onyango และคณะ, 2011a) ดังนั้นจึงมีการใช้ส่วนผสมอื่นๆ (เนยขาว ไข่ โปรตีน และเอนไซม์) หรือการดัดแปรแป้งชนิดต่างๆ เพื่อให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตนที่มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้ (Miyazaki และคณะ, 2006; Ronda และคณะ, 2011; Ronda และ Roos, 2008; Tegge, 2004) โดย Lopez และคณะ (2004) ได้ศึกษาการทดแทนการใช้แป้งสาลีด้วยแป้งข้าว แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง พบว่า ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ใช้แป้งข้าวโพดมีลักษณะปรากฏของโครงสร้างที่ดี และมีปริมาตรจำเพาะที่ดีกว่าแป้งข้าวและแป้งมันสำปะหลัง แต่แป้งข้าวเป็นแป้งทดแทนที่ช่วยให้ขนมปังปราศจากกลูเตนมีคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสที่ดี (ลักษณะปรากฏของสีเปลือกภายนอก สีเนื้อภายใน และเนื้อสัมผัสที่มีความนุ่ม) ตลอดจนทำให้ขนมปังปราศจากกลูเตนได้รับคะแนนความชอบและการยอมรับจากผู้บริโภคสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่นๆ สำหรับแป้งมันสำปะหลังนั้น เมื่อใช้ทดแทนแป้งสาลีพบว่า ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ได้มีความยืดหยุ่น มีเนื้อสัมผัสที่เหนียว และมีคุณภาพทางประสาทสัมผัสไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้น Lopez และคณะ (2004) จึงทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยผสมแป้งข้าว แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลังเพื่อให้เกิดการเสริมด้านดีของแป้งแต่ละชนิด ในปริมาณ 45%, 35% และ 20% ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า สามารถผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่มีลักษณะที่ดี กล่าวคือ มีลักษณะด้านเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสเป็นที่ชื่นชอบของผู้บริโภค

2.4.2 ไฮโดรคอลลอยด์

ในผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตนนั้น ไฮโดรคอลลอยด์ถูกใช้เป็นสารทดแทนกลูเตนเนื่องจากคุณสมบัติที่สามารถสร้างเสถียรภาพให้แก่ระบบได้ ทั้งนี้ ไฮโดรคอลลอยด์มักถูกใส่เข้าไปในระบบเพื่อทำให้เกิดความหนืดและมีพฤติกรรมคล้ายกลูเตน (Toufeili และคณะ, 1994) ตลอดจนเพื่อเพิ่มความสามารถในการกักเก็บก๊าซให้อยู่ภายในระบบ (Delcour และคณะ, 1991; Rosell และคณะ, 2001) ไฮโดรคอลลอยด์ที่อยู่ในระบบจะทำงานร่วมกับโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในแป้งโดขนมปัง ซึ่งน้ำจะถูกลดการเคลื่อนที่ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้ได้แก่ แซน

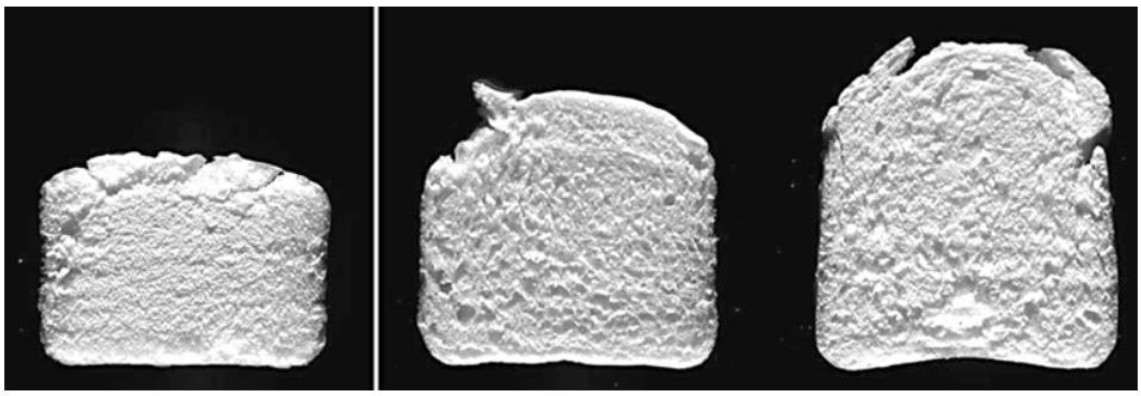
แทนกัม กัวร์กัม และ CMC ซึ่งเป็นกลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่ละลายได้ในน้ำเย็น (Haque และคณะ, 1993; Rodd และคณะ, 2000)

นอกจากไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น HPMC ก็เป็นไฮโดรคอลลอยด์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถสร้างโครงสร้างของเจลได้ (Bell, 1990; Haque และคณะ, 1993) ซึ่งการใช้ HPMC ทำให้ขนมปังมีความหนืด มีเสถียรภาพ และมีความสามารถในการกักเก็บก๊าซเพิ่มมากขึ้น ตลอดจนส่งผลให้ขนมปังมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้นด้วย (Lazaridou และ Biliaderis, 2009) (ภาพที่ 4 และ 5)



ภาพที่ 4 การกักเก็บฟองก๊าซของ HPMC และ แซนแทนกัมที่ความเข้มข้น 2%

ที่มา: Schober และคณะ (2008)

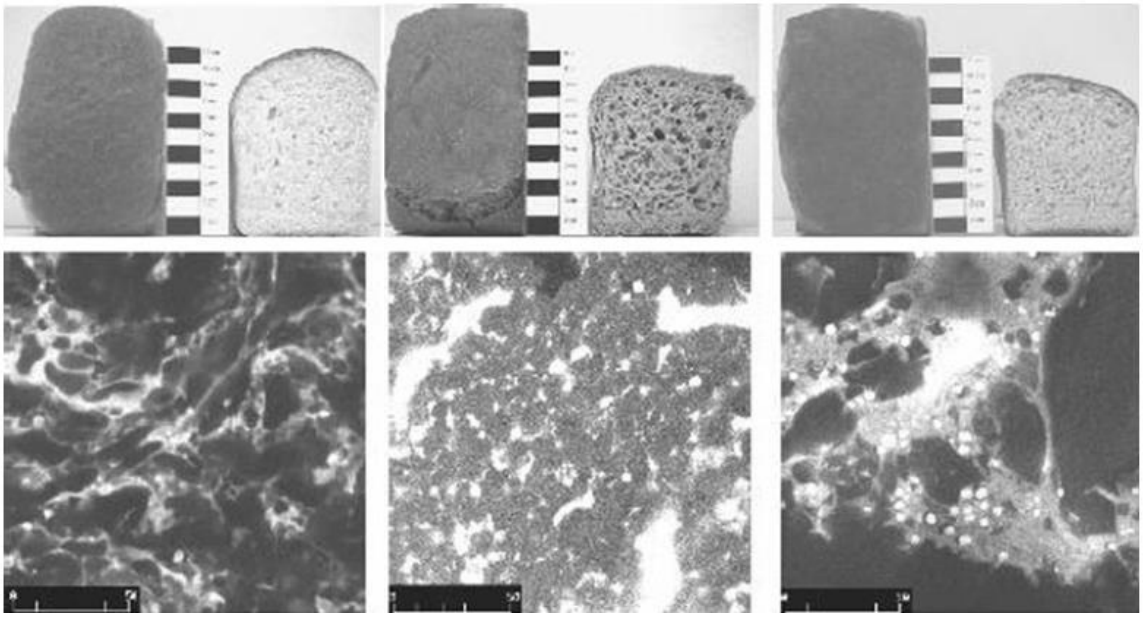


ภาพที่ 5 ผลของไฮโดรคอลลอยต่อคุณภาพของขนมปัง (ก) ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์; (ข) เติมแซนแทนกัม 2% และ (ค) เติม HPMC 2%

ที่มา: Schober (2009) และ Jongh (1961)

2.4.3 โปรตีน

โปรตีนเป็นส่วนประกอบที่ถูกประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตนเพื่อสร้างโครงสร้างที่คล้ายคลึงกลูเตนในระบบของขนมปัง ซึ่งโปรตีนจะถูกเติมลงไปในช่วงการเตรียมโดของขนมปัง (Gallagher และคณะ, 2003; Moore และคณะ, 2004; Riemsdijk และคณะ, 2011) โดยโปรตีนที่นิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตน ได้แก่ โปรตีนนม (เวย์โปรตีน) โปรตีนจากไข่ (อัลบูมิน) และโปรตีนจากถั่วเหลือง เป็นต้น งานวิจัยจำนวนมากเติมโปรตีนนมลงในโดขนมปังเพื่อสร้างโครงข่าย 3 มิติ แทนกลูเตน (Gallagher และคณะ, 2003) จากภาพที่ 6 จะเห็นว่าโปรตีนนมสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากโปรตีนนมแล้ว โปรตีนจากไข่ขาวก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากโปรตีนไข่ขาวมีความสามารถในการเกิดโฟม และช่วยให้ขนมปังปราศจากกลูเตนมีโครงสร้างที่คงตัว ตลอดจนทำให้ฟองอากาศมีเสถียรภาพเมื่ออยู่ในโครงสร้างของโด (Ludewig, 2001; Schober, 2009) นอกจากนี้ โปรตีนจากไข่ขาวยังทำให้เกิดโครงสร้างเจลของโปรตีนที่ทนร้อนคล้ายกับของกลูเตนได้อีกด้วย (Kato และคณะ, 1990; Moore และคณะ, 2004)



(ก) (ข) (ค)

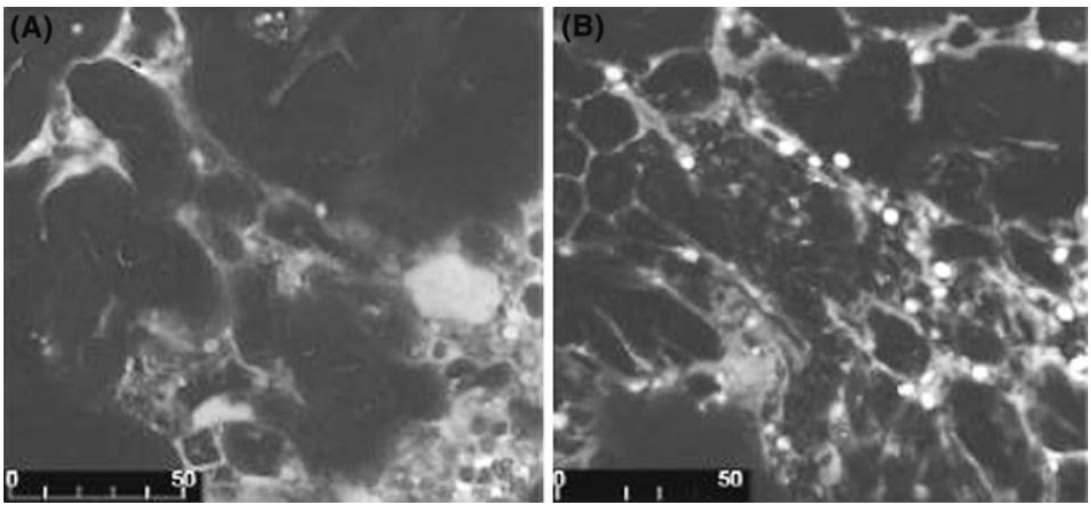
ภาพที่ 6 ผลของโปรตีนจากนมต่อการสร้างโครงข่าย 3 มิติ และคุณภาพผลิตภัณฑ์ขนมปังโดย (ก) ขนมปังจากแป้งสาลี, (ข) ขนมปังปราศจากกลูเตนแบบธรรมดา และ (ค) ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผสมโปรตีนนม

ที่มา: Moore และคณะ (2004)

2.4.4 เอนไซม์

เอนไซม์มักถูกเติมลงไปในโดขนมปังเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน ทั้งนี้หากเลือกใช้เอนไซม์ที่เหมาะสมจะส่งผลเชิงบวกในการทำให้คุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนมีคุณภาพที่ดีขึ้น (Rosell, 2009) ตัวอย่างเอนไซม์ที่มีการใช้ ได้แก่ การเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (transglutaminase: TG) เพื่อเชื่อมต่อโปรตีน หรือการเติมเอนไซม์อะไมเลส (amylase) เพื่อดัดแปรแป้ง เป็นต้น

สำหรับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (transglutaminase: TG) ถูกใช้เพื่อเชื่อมโปรตีนเข้าด้วยกัน ดังนั้น จึงมักพบว่ามีการเติมเอนไซม์ชนิดนี้ร่วมกับการเติมโปรตีนชนิดต่างๆ เช่น โปรตีนจากนม และโปรตีนจากไข่ จากผลการทดลองของ Moore และคณะ (2006) แสดงให้เห็นว่าการเติมเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสร่วมกับโปรตีนไข่ขาวทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของโปรตีนด้วยพันธะโควาเลนท์ (Covalent isopeptide bonds) เกิดเป็นโครงสร้างโปรตีนที่สามารถเก็บกักก๊าซไว้ในโครงสร้างได้และส่งผลให้ปริมาตรของขนมปังเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 7)

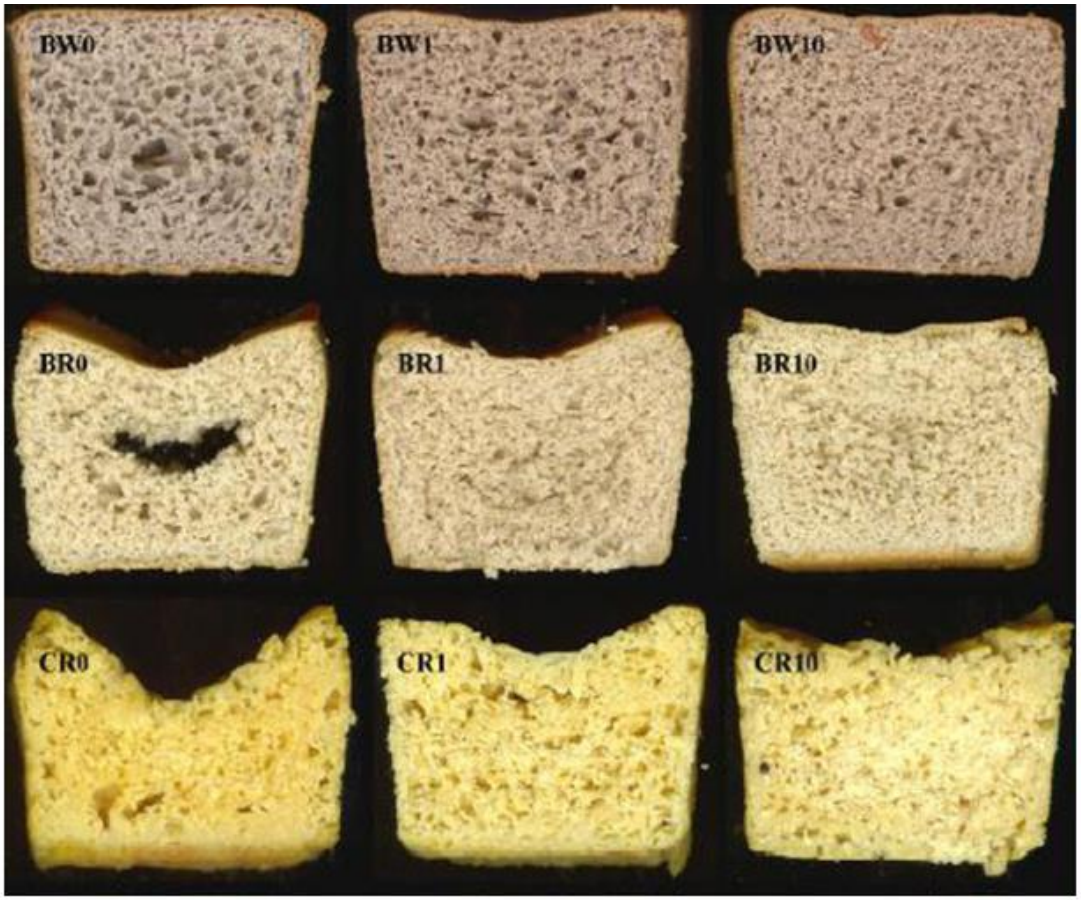


ภาพที่ 7 โครงสร้างของขนมปังปราศจากกลูเตนที่ (A) เติมไข่ขาวผงอย่างเดียว และ (B) เติมไข่ขาวผงร่วมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส

ที่มา: Moore และคณะ (2006)

นอกจากนี้ ยังสามารถยืนยันผลเชิงบวกของการเติมเอนไซม์ร่วมกับโปรตีนได้ด้วยผลงานวิจัยของ Renzetti และคณะ (2008) ซึ่งศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสร่วมกับโปรตีนจากนม (skim milk protein) โดยพบว่า ทำให้ขนมปังปราศจากกลูเตนมีความแน่น

เนื้อมากขึ้น แต่มีปริมาณรูพรุนต่อตารางเซนติเมตรเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งแสดงผลไปในทิศทางเดียวกัน แม้ว่าแป้งที่ใช้แทนแป้งสาลีจะเป็นแป้งที่ต่างชนิดกันก็ตาม (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 ขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้ง Buckwheat (BW), แป้งข้าวกล้อง (BR) และแป้งข้าวโพด (CR) ที่มีการเติมโปรตีนนมร่วมกับเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส ที่ปริมาณ 0, 0.1 และ 10 % ต่อกรัมของโปรตีน

ที่มา : Renzetti และคณะ (2008)

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและอุปกรณ์

3.1.1 ตัวอย่างข้าว

3.1.1.1 ข้าวเหนียว สายพันธุ์ บือซูโปะโละ (วิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์หนองสลาบ, จังหวัดเชียงใหม่, ประเทศไทย)

3.1.1.2 ข้าวเหนียว สายพันธุ์ บือซูโพปี้ (วิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์หนองสลาบ, จังหวัดเชียงใหม่, ประเทศไทย)

3.1.2 ส่วนผสมในการผลิตขนมปัง

3.1.2.1 แป้งสาลีโปรตีนสูง (ตรา ยานอวกาศ, บริษัท อุตสาหกรรมแป้งข้าวสาลีไทย จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.2.2 แป้งข้าวเจ้า (ตรา ช้างสามเศียร, บริษัท โรงเส้นหมี่ชอเฮง จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.2.3 แป้งข้าวโพด (ตรา ซุปเปอร์ไฟน์, บริษัท อาร์ แอนด์ บี ฟู้ด ซัพพลาย จำกัด (มหาชน), ประเทศไทย)

3.1.2.4 แป้งมันฝรั่ง (ตรา แม็กกาแรต, บริษัท คอนติเนนดัล ฟูด จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.2.5 ไข่ขาวผง (บริษัท ยูนิฟาย เคมิคอล จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.2.6 น้ำตาลทราย (ตรา มิตรผล, บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.2.7 เกลือ (ตรา ปรุงทิพย์, บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์ จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.2.8 ยีสต์จืดผง (ตรา พัคมายา, ประเทศตุรกี)

3.1.2.9 เนย (ตรา ออร์คิด, บริษัท อุตสาหกรรมนมไทย จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.3 อุปกรณ์และเครื่องมือในการผลิตตัวอย่าง

3.1.3.1 อุปกรณ์เครื่องครัว/อุปกรณ์สำหรับทำเบเกอรี ได้แก่ ถ้วยผสม, ช้อน, ถาดรองอบ เป็นต้น

3.1.3.2 เครื่องผสมอาหาร (รุ่น HM274, ยี่ห้อ OTTO, ประเทศไทย)

3.1.3.3 เตาอบ (รุ่น EO-70K , ยี่ห้อ SHARP, ประเทศญี่ปุ่น)

3.1.3.4 ตู้บ่ม (รุ่น IN110, ยี่ห้อ Memmert, ประเทศเยอรมนี)

3.1.3.5 เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 2 ตำแหน่ง (รุ่น TX2202L ยี่ห้อ SHIMADZU, ประเทศญี่ปุ่น)

3.1.3.6 เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง (รุ่น TX423L ยี่ห้อ SHIMADZU, ประเทศญี่ปุ่น)

3.1.3.7 ตู้อบลมร้อน (รุ่น FED-BF, ยี่ห้อ BIDER, ประเทศอเมริกา)

3.1.3.8 เครื่องปั่น (รุ่น Series 5000, ยี่ห้อ PHILIP, ประเทศอังกฤษ)

3.1.3.9 เครื่องร่อนเขย่าและตะแกรงร่อน (รุ่น AS200, ยี่ห้อ RETSCH, ประเทศเยอรมนี)

3.1.3.10 เครื่องโม่แห้ง (โรงงาน SPF FACTORY Powder Processing Technology)

3.1.3.11 เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Double drum dryer) เส้นผ่านศูนย์กลางลูกกลิ้งขนาด 30 เซนติเมตร และยาว 40 เซนติเมตร (บริษัท ไรซ์ ฟอร์ ไลฟ์ จำกัด)

3.1.3.12 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder twin screw) ขนาดหน้าไดมีรูเปิด 1 รู เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของสกรู 250 รอบต่อนาที (บริษัท ไทยเอเชียบิสกิท จำกัด)

3.1.4 อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิเคราะห์

3.1.4.1 กล้องดิจิตอล (รุ่น OMD EM10 MARK2 ยี่ห้อ Olympus, ประเทศญี่ปุ่น)

3.1.4.2 Vernier caliper (ยี่ห้อ Mitutoyo, ประเทศญี่ปุ่น)

3.1.4.3 เครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyser; RVA) (รุ่น RVA4500, ยี่ห้อ Perten, ประเทศสวีเดน)

3.1.4.4 เครื่องวัดสี (Colorimeter) (รุ่น WF Series, ยี่ห้อ FRU, ประเทศจีน)

3.1.4.5 เครื่อง Texture Analyzer (รุ่น TA.XT.PLUS ยี่ห้อ Stable Micro Systems, Godalming, ประเทศอังกฤษ)

3.1.4.6 เครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (Water Activity; aw) (รุ่น AquaLab PRE, ยี่ห้อ METER, ประเทศอเมริกา)

3.1.4.7 ตู้อบลมร้อน (รุ่น FED-BF, ยี่ห้อ BIDER, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

3.1.4.8 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) (รุ่น Frontier FC5706, ยี่ห้อ OHAUS, ประเทศอเมริกา)

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้

3.2.1.1 ข้าว

ข้าวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ข้าวเหนียว พันธุ์บือซูโปะโละ และข้าวเหนียวพันธุ์บือซูโพปี้ (วิสาหกิจชุมชนเกษตรอินทรีย์หนองสลาบ, จังหวัดเชียงใหม่) ที่เก็บเกี่ยวเดือนพฤศจิกายน ปีพ.ศ. 2563

3.2.1.2 การวิเคราะห์คุณภาพของข้าว

ก) ขนาดของเมล็ดข้าว

ทำการสุ่มตัวอย่างข้าวประมาณ 10-20 กรัม จากนั้นนำมาวัดขนาดของเมล็ดข้าวในด้านความกว้างและความยาว โดยใช้ Vernier caliper จำนวน 20 เมล็ด นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยได้เป็น 1 ค่า ทำซ้ำจำนวน 20 ครั้ง จะได้ 20 ค่า (จากข้าวจำนวน 400 เมล็ด) และแสดงผลเป็นช่วงความกว้างและความยาวของเมล็ด

ข) ลักษณะปรากฏของเมล็ดข้าว

ถ่ายภาพในกล่องพลาสติกที่เป็นระบบปิด โดยมีการควบคุมแสงไฟภายในกล่องให้เพียงพอและคงที่เท่ากันทุกครั้ง ทำการถ่ายภาพโดยใช้กล้องดิจิตอลยี่ห้อ Olympus รุ่น OMD-EM10 Mark2

ค) องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis)

นำตัวอย่างข้าวไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ดังนี้ คาร์โบไฮเดรต (Method of Analysis for Nutrition Labeling (1993) p.106), โปรตีนรวม (AOAC (2019) 981.10) , ไขมัน (AOAC(2019) 922.06), เถ้า (AOAC (2019) 920.153), แอนโทไซยานิน (AOAC Official method 2005.02), Gamma aminobutyric acid (GABA) (TAS 4003-20), Gamma oryzanol (Food Anal. Methods (2015) 8 : 649-655), โอเมก้า 3 (AOAC (2019) 996.06), โอเมก้า 6 (AOAC (2019) 996.06), โอเมก้า 9 (AOAC (2019) 996.06), Total Antioxidant (DPPH), วิตามิน B3 (Analytica Chimica Acta 569 (2006) 167-175), แคลเซียม (AOAC (2019) 984.27), เหล็ก (AOAC (2019) 984.27) และปริมาณอะไมโลส (Thai Rice Research Center)

ง) ความชื้น (moisture content; MC)

อาศัยวิธีการของ AOAC (2000) ในการวิเคราะห์ค่าความชื้นของข้าว โดยนำตัวอย่างข้าวประมาณ 3-5 กรัม ชั่งลงในภาชนะอะลูมิเนียม (moisture can) ที่ทราบน้ำหนักแล้ว จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างกับภาชนะ นำภาชนะอะลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างมาอบในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำภาชนะอะลูมิเนียม

ที่บรรจุตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปและคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของข้าวก่อนอบ} - \text{น้ำหนักของข้าวหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของข้าวก่อนอบ}} \times 100$$

หมายเหตุ : ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

จ) ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (Water activity, a_w)

ทำการสุ่มตัวอย่างข้าวประมาณ 10-20 กรัม นำมาบดให้ละเอียด จากนั้นบรรจุลงในถ้วยพลาสติกสำหรับใส่ตัวอย่าง แล้ววางไว้ในเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ รอจนกระทั่งตัวเลขแสดงผลคงที่ ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

3.2.2 การศึกษาผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้

3.2.2.1 การเตรียมแป้งข้าว

ทำการปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งข้าว โดยศึกษาผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวจำนวน 4 วิธี ได้แก่ การโม่แห้ง, การโม่เปียก, เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน ต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของแป้งข้าว จากข้าวจำนวน 2 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวบือซูโปะโละและข้าวบือซูโพปี้ ดังนี้

ก) การโม่แห้ง (Pin mill)

นำข้าวตัวอย่างไปโม่แห้งด้วยเครื่องบดอาหารแห้ง (Pin mill) ที่ความละเอียด 80-100 mesh

ข) การโม่เปียก (Wet mill)

นำข้าวตัวอย่างมาล้างหรือซาวข้าวเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออก จากนั้นนำข้าวตัวอย่างไปแช่น้ำในอัตราส่วนข้าวต่อน้ำเท่ากับ 1:2 เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นเทน้ำทิ้งและล้างข้าวจำนวน 1 ครั้ง และนำไปปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นเปียกที่ระดับความเร็วปานกลางกับน้ำเปล่าในอัตราส่วน 1:2 โดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำแป้งในระหว่างปั่นผสมให้ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมากรองด้วยผ้าขาวบางจำนวน 3 ชั้น จะได้ก้อนแป้งเปียก แล้วนำก้อนแป้งเปียกไปทำแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส โดยควบคุมให้มีปริมาณความชื้นสุดท้ายต่ำกว่า 13%

ค) เทคโนโลยีการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

การเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้าเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ดัดแปลงจากวิธีของพรพิไล นิยมเวช และคณะ (2018) โดยนำข้าวตัวอย่างมาผสมกับน้ำที่อัตราส่วน 1:10 นำไปต้มด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที เพื่อทำให้ข้าวสุก จากนั้นนำตัวอย่างไปปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นผสมให้อยู่ในสภาพของเหลวพร้อมสำหรับเข้าเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ (Double drum dryer) เส้นผ่านศูนย์กลางลูกกลิ้งขนาด 30 เซนติเมตร และยาว 40 เซนติเมตร รอบในการหมุน 0.8 รอบ/นาที, อุณหภูมิผิวลูกกลิ้ง 125 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการบดละเอียดผลิตภัณฑ์เกล็ดข้าวที่ได้ด้วยเครื่องบดอาหารแห้ง (Pin mill) ที่ความละเอียด 80-100 mesh

ง) เทคโนโลยีเอ็กทรูชัน

นำข้าวตัวอย่างมาบดและร่อนผ่านตะแกรง 25 mesh และทำการวัดความชื้นวัตถุดิบตัวอย่างข้าวเริ่มต้น พร้อมปรับความชื้นข้าวให้ได้ 15% ด้วยการเติมน้ำผสมกับข้าวตัวอย่างปริมาณรวม 5 กิโลกรัม จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้บรรจุในถุงปิดสนิทเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้ความชื้นสมดุล จากนั้นนำไปเข้าเครื่องเอ็กทรูชันแบบสกรูคู่ (Extruder twin-screw) โดยใช้อุณหภูมิบาร์เรล 125 องศาเซลเซียส และทำการบดละเอียดผลิตภัณฑ์เกล็ดข้าวที่ได้ด้วยเครื่องบดอาหารแห้ง (Pin mill) ที่ความละเอียด 80-100 mesh

3.2.2.2 การวิเคราะห์คุณภาพของแป้งข้าว

ก) ความชื้น (moisture content; MC)

อาศัยวิธีการของ AOAC (2000) ในการวิเคราะห์ค่าความชื้นของข้าว โดยนำตัวอย่างข้าวประมาณ 3-5 กรัม ชั่งลงในภาชนะอะลูมิเนียม (moisture can) ที่ทราบน้ำหนักแล้ว จากนั้นบันทึกน้ำหนักตัวอย่างกับภาชนะ นำภาชนะอะลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างมาอบในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำภาชนะอะลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปและคำนวณหาค่าปริมาณความชื้น จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของข้าวก่อนอบ} - \text{น้ำหนักของข้าวหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของข้าวก่อนอบ}} \times 100$$

หมายเหตุ : ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

ข) ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (Water activity, a_w)

ทำการสุ่มตัวอย่างข้าวประมาณ 10-20 กรัม นำมาบดให้ละเอียด จากนั้นบรรจุลงในถ้วยพลาสติกสำหรับใส่ตัวอย่าง แล้ววางไว้ในเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ รอจนกระทั่งตัวเลขแสดงผลคงที่ ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

ค) ลักษณะปรากฏของแป้งข้าว

ถ่ายภาพในกล่องพลาสติกที่เป็นระบบปิด โดยมีการควบคุมแสงไฟภายในกล่องให้เพียงพอและคงที่เท่ากันทุกครั้ง ทำการถ่ายภาพโดยใช้กล้องดิจิตอลยี่ห้อ Olympus รุ่น OMD-EM10 Mark2

ง) ค่าสี (L*,a*,b*)

วิเคราะห์ค่าสีโดยใช้เครื่อง Colorimeter บันทึกผลเป็นค่า L* (ค่าความสว่าง), a* (ค่าที่แสดงถึงสีแดงและสีเขียว) และ b* (ค่าที่แสดงถึงสีเหลืองและสีน้ำเงิน) ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

จ) ดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลายน้ำ

วิเคราะห์ค่าดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลายน้ำตามวิธีของ Anderson และคณะ (1969) โดยชั่งแป้งข้าว 2.5 กรัม ใส่ลงในหลอดหมุนเหวี่ยงที่ทราบน้ำหนัก เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร คนผสมทุก 5 นาที ด้วยแท่งแก้วเป็นเวลา 30 นาที ฉีดล้างส่วนที่ติดบนแท่งแก้วด้วยน้ำกลั่น ปิดฝาหลอดหมุนเหวี่ยงให้สนิท และนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 2,200 รอบต่อนาที นาน 15 นาที จากนั้นเทส่วนใสด้านบนลงในถ้วยอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณค่าดัชนีการละลายน้ำ และนำหลอดหมุนเหวี่ยงที่มีตะกอนด้านล่างไปชั่งน้ำหนักตะกอนเพื่อนำไปคำนวณค่าดัชนีการดูดซับน้ำ ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{ดัชนีการละลายน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างส่วนที่ละลายน้ำ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\text{ดัชนีการดูดซับน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลอดหมุนเหวี่ยงพร้อมตะกอน} - \text{น้ำหนักหลอดหมุนเหวี่ยง}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

หมายเหตุ : ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

ฉ) การเปลี่ยนแปลงความหนืด

ทำการวิเคราะห์แป้งข้าวที่ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) โดยเตรียมตัวอย่างน้ำแป้งที่ความเข้มข้น 14% เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature), ความหนืดสูงสุด (peak viscosity), เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time), ความหนืดต่ำสุด (trough), ความหนืดสุดท้าย (final viscosity), ค่าความหนืดที่ลดลง (breakdown) และค่าเซตแบค (setback) ของน้ำแป้ง ทำการวิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง

3.2.3 การประยุกต์ใช้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน

3.2.3.1 การผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน

ทำการผสมแป้งปราศจากกลูเตน (แป้งข้าวตัวอย่าง, แป้งข้าวเจ้า, แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพด), ไข่ขาวผง, น้ำตาลทรายและเกลือให้เข้ากัน ทำการร่อนแป้งผสมผ่านตะแกรง 2 รอบ เพื่อให้แป้งกระจายตัว เรียกแป้งผสมปราศจากกลูเตน นำยีสต์ผสมกับน้ำให้เข้ากัน พักทิ้งไว้ 3 นาที จากนั้นค่อยๆ ใส่เนยที่ละลายแล้ว พร้อมตีด้วยเครื่องผสมอาหารแบบมือถือ (Hand mixer) 2 นาที จนเป็นเนื้อเดียวกัน เรียกสารละลายยีสต์ จากนั้นเทแป้งผสมปราศจากกลูเตนลงในสารละลายยีสต์ และนวดผสมโดยใช้เครื่องผสมอาหารที่ความเร็วต่ำ เป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเร่งความเร็วเป็นระดับปานกลาง นวดผสมต่อเป็นเวลา 3 นาที จนส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน เทใส่พิมพ์ขนมปังขนาด 8 x 16 เซนติเมตร (ปริมาตร 520 มิลลิลิตร) ที่ทาด้วยเนยละลายเพื่อป้องกันขนมปังติดพิมพ์ นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพันธ์ 75-80% เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เมื่ออบขนมปังครบเวลาแล้วเทออกจากพิมพ์ทันที พักให้เย็นบนตะแกรงที่อุณหภูมิห้องปฏิบัติการเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และเก็บขนมปังในถุงพลาสติก

ตารางที่ 8 ส่วนผสมของขนมปังจากแป้งสาลีและขนมปังปราศจากกลูเตน

วัตถุดิบ	ขนมปังจากแป้งสาลี	ขนมปังจากแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมือง	ขนมปังจากแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมืองผสมไข่ขาวผง	ขนมปังจากแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมืองผสมไข่ขาวผงและแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปัง
แป้งสาลี	110	-	-	-
แป้งข้าวพันธุ์พื้นเมือง	-	110	100	20
แป้งข้าวเจ้า	-	-	-	40
แป้งมันฝรั่ง	-	-	-	30

แป้งข้าวโพด	-	-	-	10
ไข่ขาวผง	-	-	10	10
น้ำตาล	10	10	10	10
เกลือ	0.5	0.5	0.5	0.5
ยีสต์	1	1	1	1
เนย	20	20	20	20
น้ำ	100	100	100	100

3.2.3.2 การวิเคราะห์คุณภาพของโดและขนมปังปราศจากกลูเตน

ก) การวิเคราะห์ความสูงของโดที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการบ่ม

ใช้ไม้บรรทัดวัดความสูงของโดก่อนนำไปบ่มและวัดความสูงของโดภายหลังจากการบ่ม 1 ชั่วโมง โดยวัดบริเวณจุดกึ่งกลางของโด และคำนวณค่าความสูงของโดที่เปลี่ยนแปลงไปโดยนำค่าความสูงของโดภายหลังการบ่ม 1 ชั่วโมง ลบค่าความสูงของโดก่อนนำไปบ่ม

ข) ลักษณะปรากฏของขนมปัง

หั่นขนมปังหนา 1.5 เซนติเมตร บริเวณกึ่งกลางของก้อนขนมปัง นำไปถ่ายภาพในกล่องพลาสติกที่เป็นระบบปิด โดยมีการควบคุมแสงไฟภายในกล่องให้เพียงพอและคงที่เท่ากันทุกครั้ง ทำการถ่ายภาพโดยใช้กล้องดิจิตอลยี่ห้อ Olympus รุ่น OMD-EM10 Mark2

ค) ปริมาตรจำเพาะ (specific volume)

ใช้วิธีแทนที่ด้วยเมล็ดงา เริ่มจากวัดปริมาตรของภาชนะ โดยเทเมล็ดงาลงในภาชนะจนเต็มและนำมาตวงใส่กระบอกตวงเพื่อหาปริมาตรของภาชนะ จากนั้นนำตัวอย่างก้อนขนมปังมาชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนัก เทเมล็ดงาลงในภาชนะประมาณ 1 ใน 3 และนำก้อนขนมปังวางในภาชนะที่มีเมล็ดงาอยู่ และเติมเมล็ดงาจนเต็มภาชนะ ปาดเมล็ดงาส่วนเกินออกให้เรียบ จากนั้นนำก้อนขนมปังออกจากภาชนะและนำงาที่อยู่ในภาชนะตวงใส่กระบอกตวงเพื่อหาปริมาตรหลังแทนที่ด้วยขนมปังและนำไปคำนวณหาปริมาตรจำเพาะของก้อนขนมปัง จากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ปริมาตรจำเพาะ (ml/g)} = \frac{\text{ปริมาตรภาชนะ - ปริมาตรหลังแทนที่ด้วยขนมปัง}}{\text{น้ำหนักของขนมปัง}}$$

ง) ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture profile analysis)

วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังโดยใช้เครื่อง Texture analyzer แบบ Texture profile analysis (TPA) โดยทำการวิเคราะห์ภายหลังจากนำขนมปังออกจากเตาอบเป็นเวลา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิชิ้นขนมปังเท่ากับอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการ (24.5 องศาเซลเซียส) เตรียมขนมปังโดยหั่นหนา 4 เซนติเมตร เลือกตัวอย่างของชิ้นขนมปังบริเวณกึ่งกลางของก้อนขนมปัง จากนั้นตัดขอบขนมปังออกทั้งหมด และหั่นขนมปังให้มีความกว้าง ยาว สูง เท่ากับ 4 x 4 x 2.5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสทันที โดยใช้หัววัดแบบ aluminum cylinder probe ขนาด 25 mm (P/25) ตั้งค่า pre-test speed 2.0 mm/sec, test speed 2.0 mm/sec, post-test speed 10 mm/sec และ trigger force 5 g (Matos และ Rosell, 2012) ทำการวิเคราะห์จำนวน 10 ซ้ำ และบันทึกค่า Hardness, Adhesiveness, Springiness, Cohesiveness, Gumminess และ Chewiness

จ) คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังด้วยวิธี 9 point hedonic scale โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน ประเมินคุณลักษณะในด้านลักษณะปรากฏ, ความนุ่ม, กลิ่น, รสชาติ และความชอบโดยรวม (คะแนน 1 = ไม่ชอบมากที่สุด, 2 = ไม่ชอบมาก, 3 = ไม่ชอบปานกลาง, 4 = ไม่ชอบเล็กน้อย, 5 = เฉยๆ, 6 = ชอบเล็กน้อย, 7 = ชอบปานกลาง, 8 = ชอบมาก และ 9 = ชอบมากที่สุด)

3.2.4 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวน ด้วย Analysis of Variance (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูป SPSS for Windows เวอร์ชัน 16.0 ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

บทที่ 4
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีกายภาพของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้

4.1.1 ลักษณะปรากฏของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้

เมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละมีลักษณะของเมล็ดที่กลมกว่าเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโพปี้ที่มีลักษณะของเมล็ดที่เรียว โดยสีของเมล็ดข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ มีสีดำและสีน้ำตาล-เหลืองในเมล็ดเดียวกัน (ภาพที่ 9)

บือซูโปะโละ บือซูโพปี้

ภาพที่ 9 ลักษณะปรากฏของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้

4.1.2 ขนาดของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้

เมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละมีความกว้างและความยาวอยู่ในช่วง 3.22-3.30 และ 5.77-6.02 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโพปี้มีความกว้างและความยาวอยู่ในช่วง 2.61-2.68 และ 6.01-6.18 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 ขนาดของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้

สายพันธุ์	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความยาว (มิลลิเมตร)
บือซูโปะโละ	3.22-3.30	5.77-6.02
บือซูโพปี้	2.61-2.68	6.01-6.18

หมายเหตุ : n = 400 เมล็ด

4.1.3 องค์ประกอบทางเคมี ค่าความชื้น และค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ พบว่า ข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้มีความชื้น 12.95% และ 13.26% (ฐานเปียก) ตามลำดับ ซึ่งเป็นความชื้นที่อยู่ในข้อกำหนดของมาตรฐานสินค้าข้าวที่กำหนดให้ความชื้นของข้าวต้องไม่เกิน 14% (ประกาศกระทรวงพาณิชย์ เรื่องมาตรฐานข้าวไทย พ.ศ.2559) นอกจากนี้ยังพบว่า ข้าวพันธุ์บือซูโปะโละมีปริมาณโปรตีน เท่ากับ 7.86 g/100g sample (คิดเป็น 9.03 g/100g น้ำหนักแห้ง) ส่วนข้าวบือซูโพปี้ มีปริมาณโปรตีน เท่ากับ 7.42 g/100g sample (คิดเป็น 8.55 g/100g น้ำหนักแห้ง) โดยปริมาณโปรตีนที่พบสอดคล้องกับข้อมูลของ Juliano (1993) ที่ระบุว่า ข้าวกล้องมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 7.1-8.3 g/100 g sample ซึ่งโปรตีนที่พบในข้าวกล้องมีปริมาณมากกว่าข้าวขาวที่ขัดสีแล้ว (ข้าวขาวมีโปรตีน 6.3-7.1 g/100 g sample) ทั้งนี้ เนื่องจากโปรตีนที่มีในข้าวจะตรวจพบในส่วนของชั้นเปลือกหุ้มเมล็ดและเนื้อเมล็ดด้านนอกมากกว่าใจกลางเมล็ดของเมล็ดข้าว ดังนั้นข้าวกล้องซึ่งมีส่วนของชั้นเปลือกหุ้มเมล็ดจึงมีปริมาณโปรตีนโดยรวมสูงกว่าข้าวขาว (Juliano, 1993) นอกจากนี้ ข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ ยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และเถ้าในข้าวพันธุ์บือซูโปะ โละ เท่ากับ 74.99, 2.60 และ 1.66 g/100 g sample และตรวจพบคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และเถ้าในข้าวพันธุ์บือซูโพปี้ เท่ากับ 75.16, 2.89 และ 1.5 g/100g นอกจากองค์ประกอบพื้นฐานของข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์แล้ว ข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ยังมีคุณค่าทางโภชาการอื่นๆ ที่ดีอีกด้วย โดยสังเกตได้ว่า ข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ มีปริมาณโอเมก้า 3, 6 และ 9 อยู่ในช่วง 34.61-41.50, 965.57-985.71 และ 837.15-1051.35 mg/100g ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลที่น่าสนใจ คือ ข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้มีปริมาณโอเมก้า 3, 6 และ 9 สูงกว่าที่ตรวจพบในข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ตรวจพบจากผลการทดลองของภานุมาศ พุฒแก้ว และ กวินภพ ศรีวัฒนานุศาสตร์ (2020) นอกจากนี้ ข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ ยังพบแอนโทไซยานินในปริมาณที่สูง (9.02-10.02 mg/kg) ซึ่งแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่พบในข้าวที่มีสีตามธรรมชาติ (Yawadio และคณะ, 2007) โดยพันธุ์ข้าวสีดำหรือสีม่วง (black rice/purple rice) และข้าวสีแดง (red rice) จะพบ total phenolic compound, ฟราโวนอยด์ และ antioxidant มากกว่าข้าวขาว และข้าวกล้องทั่วไป (Shao และคณะ, 2014) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Mira และคณะ (2009) ที่พบว่า ข้าวที่มีสี (colour rice) ตรวจพบปริมาณ total phenolic compound สูงกว่าข้าวที่ไม่มีสีถึงสี่เท่า นอกจากนี้ในส่วนของปริมาณกาบาและธาตุเหล็ก พบว่า ข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้มีปริมาณกาบา (GABA) เท่ากับ 90.20 และ 100.02 mg/100g ตามลำดับ ซึ่งจากการสืบค้นข้อมูลเพิ่มเติมพบว่า ข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์นี้มีปริมาณกาบาที่สูงกว่าข้าวชนิดอื่นๆ เช่น ข้าวกล้องหอมมะลิ (12.77 mg/100g), ข้าวกล้องหอมมะลิ

แดง (18.94 mg/100g), ข้าวเล็บนก (19.42 mg/100g), ข้าวสินเหล็ก (26.21 mg/100g), ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (25.42 mg/100g), ข้าวกล้องสด (34.69 mg/100g) และข้าวหอมมะลิขาว (8.61 mg/100g) เป็นต้น (กวินนาถ หล้าตุ้ย และคณะ, 2015) ส่วนปริมาณธาตุเหล็ก พบว่า ข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้มีปริมาณเท่ากับ 9.46 และ 11.54 mg/kg ตามลำดับ ซึ่งปริมาณธาตุเหล็กที่ตรวจพบก็มีปริมาณที่มากกว่าข้าวกล้องพันธุ์อื่นๆ เช่นกัน ตัวอย่างเช่น ข้าวกล้องสังข์หยดพัทลุง (7.80 mg/kg), ข้าวกล้องไรซ์เบอร์รี่ (5.76 mg/kg) และข้าวกล้องหอมใบเตย (4.01 mg/kg) (อุไรวรรณ วัฒนกุล และคณะ, 2018) จากผลการทดลองจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้เป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่มีคุณค่าทางโภชนาการครบถ้วนทั้งองค์ประกอบพื้นฐานและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ซึ่งถือว่าเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจและมีศักยภาพสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์อาหารได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผลิตภัณฑ์เบเกอรีปราศจากกลูเตน ซึ่งจำเป็นต้องใช้แป้งชนิดอื่นๆ เพื่อทดแทนการใช้แป้งสาลีที่มีสารก่ออาการแพ้ หรือ โปรตีนกลูเตนเป็นส่วนประกอบ

ตารางที่ 10 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้

องค์ประกอบทางเคมี	บือซูโปะโละ	บือซูโพปี้
คาร์โบไฮเดรต (g/100g)	74.99	75.16
โปรตีน (g/100g) (wet basis)	7.86	7.42
ไขมัน (g/100g)	2.60	2.89
เถ้า (g/100g)	1.66	1.50
แอนโทไซยานิน (mg/kg)	64.74	57.82
Gamma aminobutyric acid (GABA) (mg/kg)	9.02	10.02
Gamma oryzanol (mg/kg)	506.01	538.06
โอเมก้า 3 (mg/100g)	34.61	41.50
โอเมก้า 6 (mg/100g)	965.57	985.71
โอเมก้า 9 (mg/100g)	837.15	1051.35
Total Antioxidant (mq eq Trolox/100 g)	481.37	463.27
วิตามิน B3 (mg/100 g)	0.1807	0.1258
แคลเซียม (Calcium, Ca) (mg/kg)	470.620	406.730
เหล็ก (Iron, Fe) (mg/kg)	9.455	11.542

ปริมาณความชื้น (%)	12.95	13.26
ค่ากิจกรรมน้ำอิสระ (aw)	0.647	0.653

หมายเหตุ: ค่าในตารางเป็นน้ำหนักฐานเปียก

4.1.4 ปริมาณอะไมโลสในเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้

สำหรับการทดสอบปริมาณอะไมโลสในเมล็ดข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้ พบว่าข้าวพันธ์บือซูโปะโละและบือซูโพปี้มีปริมาณอะไมโลสเท่ากับ 1.24 และ 2.41% ตามลำดับ ซึ่งตามเกณฑ์การแบ่งประเภทข้าวตามปริมาณอะไมโลสของ Juliano (1971) จะเห็นได้ว่า ข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์เป็นข้าวอะไมโลสต่ำ (อยู่ในช่วง 0-19%) ซึ่งปริมาณอะไมโลสที่ต่ำนี้ทำให้คุณภาพภายหลังการหุงต้มของข้าวจะมีลักษณะเหนียวและนุ่ม ในขณะที่ข้าวซึ่งมีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีลักษณะแข็ง ร่วน และมีความนุ่มลดลงตามปริมาณอะไมโลสที่เพิ่มขึ้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2007)

ตารางที่ 11 ปริมาณอะไมโลสของข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้

สายพันธุ์ข้าว	ปริมาณอะไมโลส (%)
บือซูโปะโละ	1.24
บือซูโพปี้	2.41

4.2 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้

4.2.1 ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้และค่าความชื้นของแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้

จากการศึกษาผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าว (พันธุ์บือซูโปะโละและพันธุ์บือซูโพปี้) ที่แตกต่างกัน 4 วิธี ได้แก่ โม่แห้ง, โม่เปียก, เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน พบว่า แป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้ที่ได้จากกระบวนการผลิตแป้งข้าวที่แตกต่างกันมีค่าความชื้นของแป้งข้าวอยู่ในช่วง 4.72-12.24% และมีค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้อยู่ในช่วง 0.181-0.592 (ตารางที่ 12) ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนแป้งข้าว โดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้ระบุคุณลักษณะที่ต้องการในด้านค่าความชื้นของแป้งข้าวไว้ว่าแป้งข้าวจะต้องมีความชื้นไม่เกิน 13% โดยน้ำหนักอบแห้ง (มผช.1517/2562) และแป้งข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ใช้กระบวนการผลิตแป้งข้าวที่แตกต่างกันนั้น มีค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้น้อยกว่า 0.6 ซึ่งจากการแบ่งประเภทอาหารตามค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ พบว่า แป้งข้าวดังกล่าวอยู่ในกลุ่มของอาหารแห้ง

(dried food) ที่สามารถเก็บได้นานที่อุณหภูมิห้อง (Jay, 1970) โดยไม่เกิดการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์

ตารางที่ 12 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้และค่าความชื้นของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้

กระบวนการผลิตแป้งข้าว	ค่าวอเตอร์แอคทีวิตี้ (a_w)	ค่าความชื้น (%)
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Dry mill	0.581 (±0.05)[a]	11.77 (±0.02)[b]
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Wet mill	0.421 (±0.01)[c]	9.31 (±0.01)[c]
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Drum dry	0.196 (±0.00)[e]	4.72 (±0.01)[g]
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Extruder	0.306 (±0.05)[d]	7.52 (±0.01)[d]
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Dry mill	0.592 (±0.03)[a]	12.24 (±0.01)[a]
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Wet mill	0.438 (±0.01)[b]	9.34 (±0.02)[c]
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Drum dry	0.181 (±0.00)[f]	4.82 (±0.02)[f]
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Extruder	0.310 (±0.04)[d]	7.54 (±0.06)[e]

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$), ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.2.2 ค่าสีและลักษณะปรากฏของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้

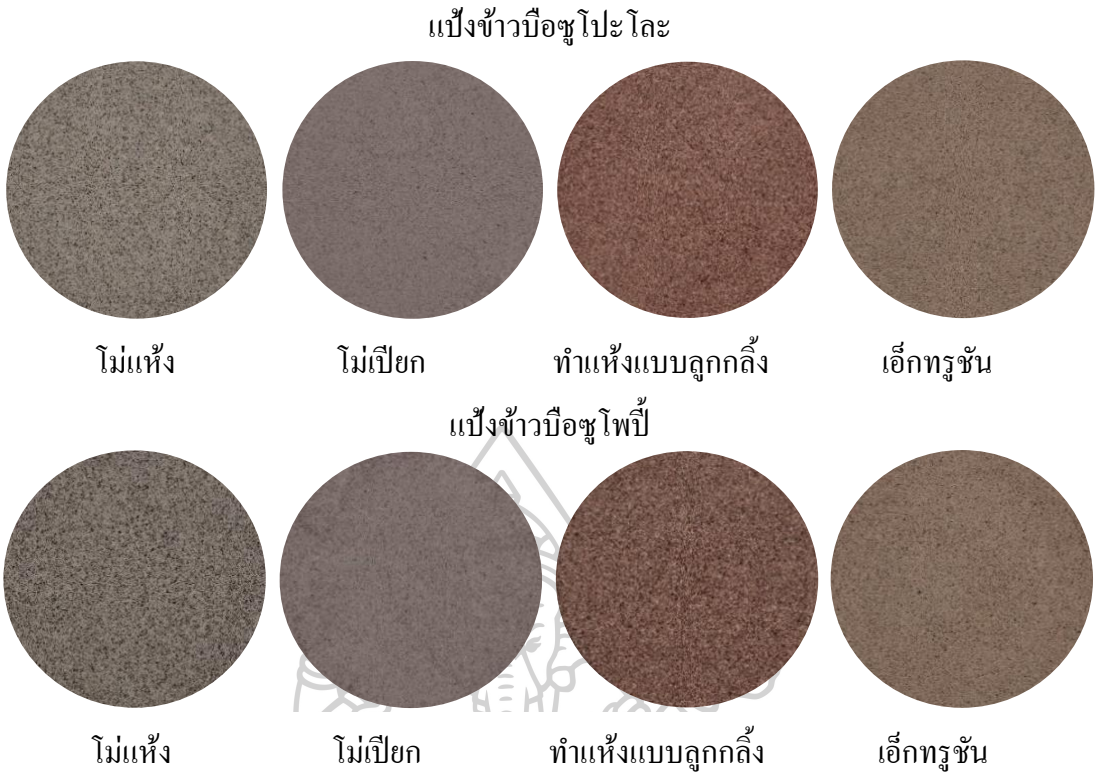
จากผลการวิเคราะห์ค่าสีของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ ที่ผลิตด้วยกระบวนการแตกต่างกัน พบว่า ตัวอย่างแป้งข้าวที่ผลิตด้วยกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง (เทคโนโลยีเอ็กทรูชันและ เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง) มีโทนสีที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่แห้งซึ่งถือว่าเป็นตัวอย่างแป้งข้าวที่สีของรงควัตถุได้รับผลกระทบจากกระบวนการผลิตน้อยที่สุด (ภาพที่ 10) สามารถยืนยันการเปลี่ยนแปลงได้จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 13 โดยพบว่า ตัวอย่างแป้งข้าวที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน และ เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีค่า L* ลดลง (ค่าความสว่างลดลง) ในขณะเดียวกันกลับมีค่า a* กับค่า b* ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยเมื่อ a* เป็นบวกแสดงความเป็นสีแดงมากขึ้น และเมื่อ b* เป็นบวกแสดงความเป็นสีเหลืองมากขึ้นหรือเป็นสีน้ำเงินน้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งข้าวบือซูโปะโละมีการเปลี่ยนแปลงของค่า L*, a* และ b* มากกว่าแป้งข้าวบือซูโพปี้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ซึ่งอาจเป็นเพราะแป้งข้าวบือซูโปะโละมีปริมาณแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุที่จะเกิด

การเปลี่ยนแปลงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อนอยู่ในปริมาณที่มากกว่าแป้งข้าวบือซูโพปี้ (ตารางที่ 10) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wiriyawattana และคณะ (2018) ที่พบว่ากระบวนการผลิตแป้งด้วยเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งส่งผลให้สีของแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่มีค่าความสว่าง (L*) ที่ลดลง มีค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*) เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่ใช้กระบวนการผลิตแป้งด้วยการโม่แห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) โดยการเปลี่ยนแปลงสีของแป้งข้าวที่ใช้เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน อาจเนื่องมาจากการใช้ความร้อนสูงในกระบวนการผลิตทำให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (non-enzymatic browning) สีของแป้งข้าวจึงมีสีที่คล้ำขึ้นเนื่องจากสารประกอบสีน้ำตาลที่เกิดขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นและระยะเวลาที่นานขึ้น ประกอบกับในระหว่างการผลิตที่ใช้ความร้อนสูงจะเกิดการสลายตัวของแอนโทไซยานินซึ่งเป็นรงควัตถุหรือสารสีในข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ ซึ่งแอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ละลายได้ในน้ำ ไม่เสถียรจึงสลายตัวได้ง่ายด้วยความร้อน ออกซิเจน และแสง (Leong และ Oey, 2012) ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดง-น้ำเงินไปเป็นสีน้ำตาล (Patras และคณะ, 2010; Roobha และคณะ, 2011)

ตารางที่ 13 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อค่าสีของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้

กระบวนการผลิตแป้งข้าว	ค่าสี		
	L*	a*	b*
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Dry mill	47.14 (±0.13)^{a}	-2.13 (±0.13)^{g}	7.86 (±0.05)^{d}
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Wet mill	44.81 (±0.21)^{b}	-0.39 (±0.07)^{e}	6.12 (±0.09)^{f}
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Drum dry	34.70 (±0.19)^{f}	7.28 (±0.18)^{a}	9.84 (±0.15)^{b}
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Extruder	43.38 (±0.27)^{c}	0.96 (±0.04)^{d}	10.23 (±0.13)^{a}
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Dry mill	43.23 (±0.23)^{c}	-1.68 (±0.06)^{f}	6.86 (±0.03)^{e}
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Wet mill	42.08 (±0.08)^{d}	-0.12 (±0.10)^{e}	5.58 (±0.12)^{g}
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Drum dry	33.12 (±0.11)^{g}	5.23 (±0.06)^{b}	8.87 (±0.08)^{c}
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Extruder	40.35 (±0.06)^{e}	1.43 (±0.03)^{c}	10.11 (±0.07)^{ab}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$), ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน



ภาพที่ 10 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อลักษณะปรากฏของแป้งข้าวบือซูโปะโละและแป้งข้าวบือซูโพปี้

4.2.3 ดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลายน้ำของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบแป้งข้าวสายพันธุ์เดียวกัน แต่กระบวนการผลิตต่างกัน โดยเริ่มจากการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแป้งข้าวบือซูโปะโละและข้าวบือซูโพปี้ที่ได้จากวิธีโม่แห้งและวิธีการโม่เปียก พบว่า แป้งข้าวโม่เปียกมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำที่สูงกว่า แต่ค่าดัชนีการละลายน้ำต่ำกว่าแป้งข้าวโม่แห้ง เนื่องจากในกระบวนการโม่เปียกจะนำข้าวไปแช่ในน้ำอุณหภูมิปกติก่อนนำมาโม่พร้อมน้ำ กำจัดน้ำออก และอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งขั้นตอนนี้ทำให้เม็ดแป้งเกิดการดูดซับน้ำบางส่วน ดังนั้น เมล็ดข้าวจึงนิ่มขึ้น แต่การดูดซับน้ำนี้เกิดขึ้นได้อย่างจำกัด เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง โดยการดูดซับน้ำที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้โครงสร้างของแป้งที่ได้จากการโม่เปียกเกิดการคลายตัวมากกว่าแป้งที่ได้จากการโม่แห้ง จึงส่งผลให้แป้งโม่เปียกมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำสูงกว่าแป้งโม่แห้งเล็กน้อย สำหรับค่าดัชนีการละลายน้ำนั้นอาจมีความสัมพันธ์กับปริมาณสตาร์ที่เสียหาย (damaged starch) ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถละลายในน้ำได้ โดย Nishita (1982) ได้รายงานไว้ว่า แป้งที่ได้จากการโม่แห้งมีปริมาณสตาร์ชที่ถูกทำลาย

เกิดขึ้น 24.2% ในขณะที่แป้งที่ได้จากการโม่เปียกมีปริมาณสตาร์ชที่ถูกทำลายเกิดขึ้นพียง 6.7% เท่านั้น โดยการรายงานดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Yoenyongbuddhagal และ Noomhorm (2002) ที่ทดลองโม่ข้าวไทยที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (เสาไห้) และพบว่า แป้งข้าวที่ได้จากการโม่แห้ง มีปริมาณสตาร์ชที่ถูกทำลายสูงกว่าแป้งข้าวโม่เปียก โดยมีค่าปริมาณสตาร์ชที่ถูกทำลายเท่ากับ 12.1% และ 4.2% ตามลำดับ

สำหรับ แป้งข้าวบือซูโพปี้และแป้งข้าวบือซูโปะโละที่ใช้เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลายน้ำสูงกว่าแป้งข้าวที่ผ่านกระบวนการโม่เปียก โม่แห้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน ทั้งนี้เนื่องจาก กระบวนการผลิตแป้งด้วยเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งนั้น เม็ดแป้งได้รับความร้อนโดยตรงจากผิวลูกกลิ้งภายใต้ความชื้นสูง ซึ่งความร้อนนี้จะทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดแป้ง (intramolecular hydrogen bond) คลายตัวลง ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งที่รวมตัวกันแน่น (crystalline structure) ถูกทำลาย (destruction) ทำให้มีโครงสร้างดังกล่าวลดลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวของโมเลกุลแป้งที่สามารถดูดซับน้ำเพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับในระหว่างที่ได้รับความร้อนจะเกิดการสลายตัว (degradation) ของโมเลกุลแป้ง จึงส่งผลให้เม็ดแป้งที่ผลิตด้วยกระบวนการทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลายน้ำสูงกว่าตัวอย่างแป้งที่ผ่านกระบวนการอื่นๆ (Majzoobi และคณะ, 2011; สุนันทา ทองทา และคณะ, 2010) แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่างแป้งที่ผลิตด้วยกระบวนการเอ็กทรูชันนั้น แม้ว่าจะมีค่าดัชนีการละลายน้ำที่สูงขึ้น แต่กลับมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการโม่เปียก โม่แห้ง และกระบวนการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง โดย Sarawong และคณะ (2014) ได้อธิบายว่า เมื่อแป้งเกิดเจลาติไนซ์เซชันที่มากเกินไป ค่าดัชนีการดูดซับน้ำของแป้งจะลดลง เนื่องจากการสลายตัว (degradation) ของโมเลกุลแป้งที่เกิดขึ้นจำนวนมากทำให้ความสามารถในการจับกับน้ำของกลุ่มที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) ลดลง แต่สำหรับค่าดัชนีการละลายน้ำนั้น บ่งชี้ถึงองค์ประกอบที่ละลายออกมาจากโครงสร้างของเม็ดแป้ง ดังนั้น เมื่อพันธะของเม็ดแป้งถูกทำลายและเกิดเจลาติไนเซชันที่มากเกินไป จึงมีการปลดปล่อยองค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ออกมาในระหว่างกระบวนการเอ็กทรูชัน ส่งผลให้ค่าดัชนีการละลายน้ำของแป้งเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลของพันธุ์ข้าวต่อค่าดัชนีการดูดซับน้ำและค่าดัชนีการละลายน้ำ พบว่า แป้งข้าวบือซูโพปี้ (อะไมโลส 2.41%) ที่ได้จากทุกกระบวนการผลิตมีค่าดัชนีการละลายน้ำที่ต่ำกว่าแป้งข้าวบือซูโปะโละ (อะไมโลส 1.24%) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากปริมาณอะไมโลสที่แตกต่างกัน โดย Nakorn และคณะ (2009) ได้ค้นพบว่า เมื่อแป้งข้าวพรีเจลาติไนซ์เซชันมีปริมาณอะไมโลสเพิ่มสูงขึ้น จะมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำและค่าดัชนีการละลายลดลงตามลำดับ อาจเนื่องมาจาก

ปริมาณอะไมโลสที่มากขึ้นทำให้เกิดเม็ดแป้งที่ถูกทำลายโครงสร้างลดน้อยลง ตลอดจนแป้งข้าวที่มีอะไมโลสสูง จะแสดงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชที่อัดแน่นมากกว่า ดังนั้นอะไมโลสจึงหลุดออกจากเม็ดแป้งได้ยากกว่า ส่งผลให้ค่าดัชนีการละลายน้ำซึ่งบ่งชี้ถึงองค์ประกอบที่ละลายออกมานั้นมีค่าลดลง (Thiranusornkij และคณะ, 2018)

ตารางที่ 14 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อค่าดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลายน้ำของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้

วิธีแปรรูปแป้งข้าว	ดัชนีการดูดซับน้ำ (%)	ดัชนีการละลายน้ำ (%)
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Dry mill	2.27 (±0.01)^{c}	6.08 (±0.00)^{e}
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Wet mill	2.36 (±0.01)^{b}	3.14 (±0.01)^{g}
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Drum dry	2.77 (±0.02)^{a}	64.35 (±0.05)^{c}
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Extruder	1.06 (±0.02)^{e}	66.56 (±0.04)^{b}
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Dry mill	2.18 (±0.01)^{d}	5.75 (±0.02)^{f}
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Wet mill	2.20 (±0.00)^{d}	3.11 (±0.01)^{g}
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Drum dry	2.35 (±0.01)^{b}	63.02 (±0.02)^{d}
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Extruder	1.06 (±0.02)^{e}	73.27 (±0.00)^{a}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$), ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.2.4 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้

เมื่อเปรียบเทียบผลของวิธีการผลิตแป้งข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ พบว่า แป้งข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ ที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยการโม่เปียกมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity), ค่า trough, ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และค่า setback สูงที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวที่ผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยการโม่แห้ง, แป้งข้าวที่ใช้เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และแป้งข้าวที่ใช้เทคโนโลยีเอ็กทรูชัน (ตารางที่ 15) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยอื่นๆ (Chen และคณะ, 1999; Leewatchararongjaroen และ Anuntagool, 2016; Yoenyongbuddhagal และ Noomhorm, 2002) ที่มีการรายงานว่า แป้งข้าวที่ผลิตด้วยวิธีโม่เปียกมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่า break down และค่าความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity) สูงกว่าแป้งข้าวที่ผลิตด้วยวิธีการโม่แห้ง โดย Nishita (1982) รวมถึงพัชรี ตั้งตระกูล และคณะ (2006)

ได้อธิบายว่า ในระหว่างการล้างและแช่ข้าวสำหรับกระบวนการโม่เปียก โปรตีนบริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งจะละลายออกมา ทำให้แป้งข้าวโม่เปียกมีปริมาณโปรตีนที่ตรวจพบน้อยกว่าแป้งข้าวโม่แห้ง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Lu และ Lii (1989) และ Chen และคณะ (1999) ที่ได้รายงานว่า แป้งข้าวที่โม่แบบเปียก (โปรตีน 6.67%) มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าแป้งข้าวที่ได้จากกระบวนการโม่แบบแห้ง (โปรตีน 8.02%) โดยโปรตีนที่แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างระหว่างเม็ดแป้งจะขัดขวางการซึมผ่านของน้ำ ทำให้มีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง และมีผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง โดยหากมีปริมาณที่มากขึ้น ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ค่า break down และค่าความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity) จะลดลง ซึ่งโปรตีนยังมีผลทำให้ peak time และ pasting temperature เพิ่มขึ้นอีกด้วย (งามชื่น คงเสรี, 2004; อรอนงค์ นัยวิกุล, 2004) นอกจากนี้ กระบวนการโม่เปียกยังทำให้ได้แป้งที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าแป้งโม่แห้ง โดย Chen และคณะ (1999) รายงานว่า แป้งข้าวเหนียวที่ได้จากกระบวนการโม่เปียก มีขนาดอนุภาค 10-30 ไมครอน ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าแป้งที่ได้จากการโม่แห้ง ซึ่งมีขนาดอนุภาคประมาณ 100-300 ไมครอน โดยแป้งที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะแสดง pasting temperature ที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ แป้งข้าวที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า (แป้งโม่เปียก) จะสามารถดูดซับน้ำได้มาก และเกิดการพองตัวได้รวดเร็ว ตลอดจนมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และค่าความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity) ที่สูงกว่าแป้งข้าวที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ (แป้งโม่แห้ง) (Nishita, 1982; พัชรี ตั้งตระกูล และคณะ, 2006)

ยิ่งไปกว่านั้น คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวในตารางที่ 7 ยังแสดงให้เห็นว่า แป้งข้าวที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชันมีเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) ลดต่ำลง ประมาณ 3.5 และ 11 เท่า เมื่อเปรียบเทียบแป้งข้าวโม่แห้งกับแป้งข้าวที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน ตามลำดับ ซึ่งนอกจากนี้ยังพบว่า แป้งข้าวที่ได้จากทั้ง 2 กระบวนการนี้จะให้ความหนืดได้ทันทีเมื่อละลายในน้ำ โดยเรียกแป้งที่มีคุณสมบัติเช่นนี้ว่า แป้งพรีเจล ซึ่งโดยทั่วไปมักใช้ความร้อนในการทำให้สารละลายแป้งเกิดเจลาติไนเซชัน จากนั้นจึงนำแป้งสุกที่ได้ไปทำแห้ง กระบวนการดังกล่าวจะทำให้แป้งที่ได้มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากแป้งธรรมชาติ (Native starch) โดยแป้งพรีเจลจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำและละลายน้ำได้ดีขึ้น และสามารถละลายในน้ำเย็นได้ เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายในระหว่างการผลิต ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้โดยทั่วไป คือ การทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และกระบวนการเอ็กทรูชัน จากงานวิจัยของ Ilo และคณะ (1999) พบว่าสภาวะของเครื่องเอ็กทรูดเมื่อมีการปรับเพิ่มอุณหภูมิบาเรลจาก 70 องศาเซลเซียสเป็น 120 องศาเซลเซียส ส่งผลให้แป้งเอ็กทรูดชันมีความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลายน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่กลับมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุด ค่า Breakdown ค่าความหนืดสุดท้าย และค่าการคืนตัว (setback) ลดลง ซึ่งจากผลการทดลองจะพบ

ข้อสังเกตที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก คือ แป้งข้าวที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีเอ็กทรูชันมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity), ค่า trough, ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และค่า setback ต่ำกว่าตัวอย่างอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ทั้งนี้ เนื่องจาก กระบวนการผลิตแป้งข้าวด้วยเทคโนโลยีเอ็กทรูชันนั้น แป้งจะถูกทำลายโครงสร้างและถูกย่อยสลายอย่างรุนแรงกว่ากระบวนการอื่นๆ เพราะนอกจากถูกกระตุ้นด้วยความดัน และความร้อนที่อุณหภูมิสูงแล้ว เม็ดแป้งยังถูกทำลายทั้งโครงสร้างและพันธะต่างๆด้วยแรงเฉือน (Shearing) ภายใต้ความชื้นที่ต่ำ (15%) ทำให้พันธะโควาเลนท์ระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ของแป้งถูกทำลาย ส่งผลให้สูญเสียความสมบูรณ์ของอนุภาค (particle integrity) และเกิดการแตกออกของสายพอลิเมอร์เป็นโมเลกุลโมโนเมอร์ขนาดเล็ก (dos Santos และคณะ, 2018) ซึ่งคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวจะมีความสัมพันธ์กับความชื้นของแป้งข้าวและความเร็วของสกรูเป็นอย่างมาก (Sarawong และคณะ, 2014; Sompong และคณะ, 2011; Waramboi และคณะ, 2014; Ye และคณะ, 2018) ซึ่งสามารถยืนยันได้จากงานวิจัยของ Mitrus และคณะ (2017) ที่พบว่า ความชื้นของแป้งก่อนเข้าสู่กระบวนการเอ็กทรูชันที่สูงขึ้น ทำให้ได้แป้งที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่มีความชื้นก่อนเอ็กทรูชันต่ำกว่า เนื่องจากความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ไปช่วยลดความเสียหายของเม็ดแป้งที่เกิดจากความดันและแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการผลิต

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 15 ผลของกระบวนการผลิตแป้งข้าวต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้

วิธีแปรรูปแป้งข้าว	Peak Viscosity (RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final Viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Peak Time (min)	Pasting Temperature (°C)
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Dry mill	40.05 (±1.59)^{c}	19.67 (±0.83)^{c}	0.38 (±0.77)^{d}	28.71 (±0.88)^{c}	9.04 (±0.06)^{c}	3.73 (±0.00)^{a}	73.05 (±0.64)^{a}
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Wet mill	164.04 (±0.65)^{a}	57.25 (±0.11)^{a}	106.80 (±0.53)^{a}	68.71 (±0.06)^{a}	11.46 (±0.06)^{a}	3.70 (±0.04)^{ab}	71.00 (±0.00)^{b}
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Drum dry	22.38 (±0.77)^{c}	5.75 (±0.11)^{d}	16.63 (±0.64)^{e}	8.52 (±0.00)^{e}	2.50 (±0.11)^{e}	1.07 (±0.00)^{c}	N
แป้งข้าวบือซูโปะโละ Extruder	4.29 (±0.30)^{f}	2.67 (±0.23)^{e}	1.63 (±0.06)^{f}	3.34 (±0.12)^{f}	0.67 (±0.12)^{f}	0.33 (±0.00)^{e}	N
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Dry mill	40.34 (±0.59)^{c}	19.21 (±0.30)^{c}	29.80 (±0.88)^{c}	28.42 (±0.47)^{c}	9.21 (±0.18)^{c}	3.70 (±0.04)^{ab}	72.80 (±0.00)^{a}
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Wet mill	150.84 (±1.18)^{b}	51.67 (±0.12)^{b}	99.17 (±1.06)^{b}	62.84 (±0.12)^{b}	11.17 (±0.23)^{b}	3.67 (±0.00)^{b}	71.43 (±0.53)^{b}
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Drum dry	36.00 (±0.95)^{d}	6.21 (±0.06)^{d}	21.13 (±0.29)^{d}	9.42 (±0.12)^{d}	3.21 (±0.06)^{d}	1.07 (±0.00)^{c}	N
แป้งข้าวบือซูโพปี้ Extruder	4.00 (±0.00)^{f}	2.42 (±0.00)^{e}	1.58 (±0.00)^{f}	3.21 (±0.00)^{f}	0.79 (±0.06)^{f}	0.40 (±0.00)^{d}	N

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$), ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

N หมายถึง เกิดความหนืดทันทีเมื่อละลายในน้ำที่อุณหภูมิห้อง

4.3 การประยุกต์ใช้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน

4.3.1 ความสูงของโด ปริมาตรจำเพาะและลักษณะปรากฏของขนมปังหลังอบ

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 8 พบว่า เมื่อกระบวนการผลิตแป้งเหมือนกัน สายพันธุ์ของข้าวไม่มีผลต่อความสูงของโด, ปริมาตรจำเพาะ และลักษณะปรากฏของขนมปังหลังอบอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) สำหรับแป้งที่ผลิตด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันนั้นพบว่า ส่งผลต่อคุณสมบัติของโดและขนมปังหลังการอบอย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อนำแป้งข้าวตัวอย่างที่ผลิตด้วยการโม่แห้ง โม่เปียก เทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน ไปใช้แทนแป้งสาลี 100% ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง พบว่า โดจากแป้งข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ที่ใช้กระบวนการผลิตด้วยเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน มีค่าความสูงของโดหลังบ่มสูงกว่าโดจากแป้งข้าวโม่แห้ง และโม่เปียก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก แป้งข้าวที่ผลิตจากเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเทคโนโลยีเอ็กทรูชันเป็นแป้งข้าวที่ผ่านการให้ความร้อนจนเกิดเจลาติไนซ์แล้วนำไปทำแห้ง จึงทำให้แป้งข้าวที่ผลิตจากเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเทคโนโลยีเอ็กทรูชันมีค่าดัชนีการละลายน้ำที่สูงกว่าแป้งข้าวที่ใช้กระบวนการผลิตแป้งด้วยวิธีโม่แห้งและโม่เปียก (ตารางที่ 14) นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการกระจายตัวได้ในน้ำเย็น และเกิดความหนืดได้ทันทีโดยไม่ต้องให้ความร้อน (Sriroth และ Piyachomkwan, 2007) โดยบ่งชี้ได้จากผลวิเคราะห์ Pasting Temperature ของแป้งข้าวดังกล่าว (ตารางที่ 15) ส่งผลให้โดที่ได้มีความหนืดมากกว่าโดที่ผลิตจากแป้งโม่แห้งและโม่เปียก ทำให้มีความสามารถในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตโดยยีสต์ไว้ในโครงสร้างได้ดีในระหว่างกระบวนการบ่มโด

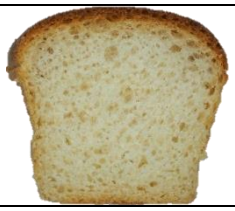
แต่อย่างไรก็ตาม การใช้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้เพียงอย่างเดียวไม่สามารถผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนได้ เนื่องจากแป้งข้าวไม่มีส่วนประกอบของโปรตีนกลูเตนจึงไม่สามารถกักเก็บก๊าซและเกิดโครงสร้างที่แข็งแรงภายหลังการอบได้ ซึ่งความสามารถในการกักเก็บก๊าซไว้ภายในโครงสร้างนี้ เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมปังมีการพองตัว และมีลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Demirkesen และคณะ, 2010; Renzetti และคณะ, 2008; Sivaramakrishnan และคณะ, 2004) สำหรับแป้งข้าวที่มีคุณสมบัติเป็นแป้งพรีเจล (ผลิตด้วยการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน) นั้น แม้ว่าจะกักเก็บก๊าซในช่วงของการบ่มได้ดีแต่กลับพบว่า ภายหลังการอบ แป้งโดไม่สามารถคงรูปได้และเกิดการยุบตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งแสดงลักษณะหลังอบเป็นของแข็งกึ่งเหลวคล้ายแป้งกวน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการอบ แป้งข้าวพรีเจลถูกกระตุ้นด้วยความร้อนและความชื้นสูงอีกครั้ง จึงเกิดเจลาติไนเซชันที่มากเกินไป ซึ่ง Sarawong และคณะ (2014) ได้อธิบายว่า เมื่อแป้งเกิดเจลาติไนซ์เซชันที่มากเกินไป จะเกิดการสลายตัว (degradation) ของโมเลกุลแป้งจำนวนมาก ซึ่งพันธะภายในเม็ดแป้งจะถูกทำลาย ทำให้เม็ดแป้งมี

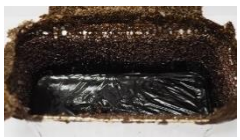
โครงสร้างที่ไม่แข็งแรง ด้วยเหตุนี้ ทางนักวิจัยจึงมีการศึกษาเพิ่มเติม โดยผสมโปรตีนไข่ขาวและแป้งผสมที่ปราศจากกลูเตน (แป้งข้าวเจ้า แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพด) จากนั้นติดตามความสูงของโด ปริมาตรจำเพาะและลักษณะปรากฏของขนมปังหลังอบที่เปลี่ยนแปลงไป จากผลการทดลองพบว่า โปรตีนไข่ขาวสามารถช่วยสร้างโครงสร้างที่คล้ายคลึงกลูเตนในระบบของขนมปังได้ (Gallagher และคณะ, 2003; Moore และคณะ, 2004; Riemsdijk และคณะ, 2011) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยจำนวนมากที่พบว่า โปรตีนไข่ขาวสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากโปรตีนไข่ขาวมีความสามารถในการเกิดโฟมและช่วยให้ขนมปังปราศจากกลูเตนมีโครงสร้างที่คงตัว ตลอดจนทำให้ฟองอากาศมีเสถียรภาพเมื่ออยู่ในโครงสร้างของโดและขนมปังหลังอบ (Ludewig, 2001; Schober, 2009) โดยผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ziobro และคณะ (2013) ที่รายงานว่า การใช้อัลบูมินร้อยละ 10 ของปริมาณแป้งทั้งหมด ทำให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังปราศจากกลูเตนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอัลบูมินมีความสามารถในการเกิดโฟมสูงและมีความสามารถในการจับกับคาร์บอนไดออกไซน์ได้ดี ตลอดจนอัลบูมินจะเสียสภาพที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้เกิดโครงสร้างของเนื้อขนมปังที่มีเสถียรภาพตั้งแต่ระยะแรกของการอบ ส่งผลให้สามารถผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่ไม่ยุบตัวเมื่อนำออกจากตู้อบหรือเมื่อมีอุณหภูมิลดต่ำลง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าไข่ขาวจะช่วยกักเก็บก๊าซไว้ภายในระบบของขนมปัง ตลอดจนทำให้ขนมปังมีโครงสร้างที่คงตัวได้มากขึ้น แต่โครงสร้างที่เกิดขึ้นยังไม่แข็งแรงมากนัก ตลอดจนขนมปังปราศจากกลูเตนที่ได้ยังมีลักษณะยึดติดกับหัววัดหรือวัสดุอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้เป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ โดยมี amylose-amylopectin ratio เท่ากับ 0.01 และ 0.02 ตามลำดับ ซึ่ง Yu และคณะ (2009) ได้อธิบายว่า การยึดติดกับหัววัดหรือวัสดุอื่นๆ ของเจลจากแป้งมีความสัมพันธ์กับปริมาณอะไมโลสและการเกิดการคืนตัว (retrogradation) ของแป้ง โดยตัวอย่างแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งร่วน และมีความเหนียวเหนอะเกาะติดกับวัสดุอื่นๆ ที่ต่ำ ซึ่ง Lumdubwong และคณะ (2005) ได้อธิบายเพิ่มเติมว่า แป้งที่มีอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัว (retrogradation) ได้ดีกว่าแป้งที่มีอะไมโลสต่ำ ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่าลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีการยึดติดกับหัววัดหรือวัสดุอื่นๆ ของขนมปังปราศจากกลูเตนที่เกิดขึ้นในการทดลองครั้งนี้ เป็นเพราะแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ที่ใช้เป็นข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำจึงเกิดการคืนตัวได้ไม่ดี

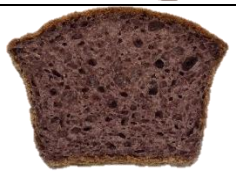
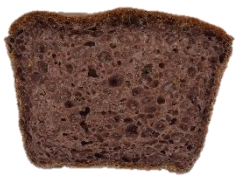
อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่า การประยุกต์ใช้ไข่ขาวผง ร่วมกับแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (แป้งข้าวเจ้า แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพด) สามารถปรับปรุงคุณภาพของขนมปังหลังการอบได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดยการใช้แป้งข้าวเจ้า แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพด ผสมกับแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมือง (แป้งข้าวบือซูโปะโละ

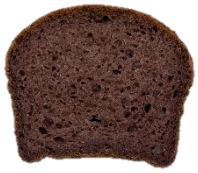
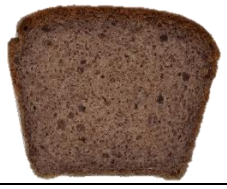
และแป้งข้าวบือซูโพปี้) ทำให้แป้งผสมที่ใช้ทำขนมปังปราศจากกลูเตนมีปริมาณอะไมโลสโดยรวมเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการคำนวณค่า amylose-amylopectin ratio ของแป้งผสมดังกล่าว พบว่า มีค่า amylose-amylopectin ratio เท่ากับ 0.19 และ 0.20 ตามลำดับ ซึ่งมีค่า amylose-amylopectin ratio สูงกว่าแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมืองเพียงอย่างเดียวถึง 19 และ 10 เท่า ตามลำดับ โดยการใช้แป้งผสมนอกจากจะช่วยให้ขนมปังปราศจากกลูเตนมีโครงสร้างที่แข็งแรง และแก้ปัญหาการยึดติดกับหัววัดหรือวัสดุอื่นๆ ได้แล้ว ยังทำให้ขนมปังปราศจากกลูเตนมีชั้นเปลือกด้านนอก (outer crust) ที่คล้ายคลึงกับขนมปังจากแป้งสาลีอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้น ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากการผสมแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมือง (ข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้) กับไข่ขาวผง และแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน ยังมีลักษณะปรากฏและการกระจายตัวของรูพรุนอยู่ในโครงสร้างด้านในเหมือนกับขนมปังที่ผลิตจากแป้งสาลีอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Lopez และคณะ (2004) ที่ผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนโดยใช้แป้งผสม (แป้งข้าว แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง) โดยพบว่าสามารถผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่มีคุณสมบัติด้านต่างๆ เช่น ลักษณะด้านเนื้อสัมผัส ลักษณะปรากฏ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสดีกว่าการใช้แป้งชนิดเดียวในการทดแทนแป้งสาลีเพื่อผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ค่าดัชนีการละลายน้ำของแป้งข้าวมีผลต่อปริมาตรจำเพาะของขนมปังภายหลังการอบอย่างชัดเจน โดยขนมปังที่ทำจากแป้งข้าวที่มีค่าดัชนีการละลายน้ำสูง ได้แก่ แป้งข้าวที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน (ตารางที่ 14) มีค่าปริมาตรจำเพาะมากกว่าขนมปังที่ทำจากแป้งข้าวโม่แห้งและโม่เปียกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 16 ผลของพันธุ์ข้าวและกระบวนการผลิตแป้งที่แตกต่างกันต่อความสูงของโด ปริมาตรจำเพาะและลักษณะปรากฏของขนมปังหลังอบ

ตัวอย่าง	ความสูงของโดหลังบ่ม (เซนติเมตร)	ปริมาตรจำเพาะ (ml/g)	ลักษณะปรากฏของขนมปังหลังอบ
แป้งสาลี (สูตรควบคุม)	3.48 (±0.04)[a]	2.77 (±0.02)[a]	
PL(100)-Dry mill	1.47 (±0.05)[i]	0.92 (±0.02)[g]	

PL(100)-Wet mill	1.32 (±0.03)^{i}	0.71 (±0.01)^{h}	
PL(100)-Drum dry	3.23 (±0.04)^{abc}	N/A	
PL(100)-Extruder	2.81 (±0.01)^{def}	N/A	
PP(100)-Dry mill	1.83 (±0.25)^{h}	0.73 (±0.03)^{h}	
PP(100)-Wet mill	1.36 (±0.08)^{i}	0.42 (±0.01)^{j}	
PP(100)-Drum dry	2.93 (±0.13)^{cde}	N/A	
PP(100)-Extruder	2.91 (±0.16)^{cde}	N/A	
PL(90)-Dry mill+EG(10)	2.13 (±0.18)^{g}	1.26 (±0.02)^{e}	
PL(90)-Wet mill+EG(10)	1.62 (±0.03)^{hi}	0.95 (±0.01)^{fg}	

PL(90)-Drum dry+EG(10)	3.38 (±0.11)^{ab}	2.56 (±0.01)^{c}	
PL(90)-Extruder+EG(10)	2.66 (±0.08)^{ef}	2.62 (±0.02)^{b}	
PP(90)-Dry mill+EG(10)	2.19 (±0.45)^{g}	0.74 (±0.01)^{h}	
PP(90)-Wet mill+EG(10)	1.58 (±0.11)^{hi}	0.62 (±0.01)^{i}	
PP(90)-Drum dry+EG(10)	3.05 (±0.21)^{bcd}	2.18 (±0.01)^{d}	
PP(90)-Extruder+EG(10)	2.65 (±0.07)^{ef}	2.64 (±0.01)^{b}	
PL(20)-Dry mill+EG(10)+MF(70)	2.82 (±0.02)^{def}	1.22 (±0.02)^{e}	
PL(20)-Wet mill+EG(10)+MF(70)	2.51 (±0.15)^{f}	0.91 (±0.01)^{g}	
PL(20)-Drum dry+EG(10)+MF(70)	3.24 (±0.03)^{abc}	2.52 (±0.02)^{c}	

PL(20)-Extruder+EG(10)+MF(70)	2.59 (±0.01)^{ef}	2.63 (±0.03)^{b}	
PP(20)-Dry mill+EG(10)+MF(70)	2.84 (±0.23)^{def}	1.24 (±0.03)^{e}	
PP(20)-Wet mill+EG(10)+MF(70)	2.67 (±0.04)^{ef}	0.99 (±0.01)^{f}	
PP(20)-Drum dry+EG(10)+MF(70)	3.11 (±0.16)^{bcd}	2.55 (±0.03)^{c}	
PP(20)-Extruder+EG(10)+MF(70)	2.88 (±0.04)^{de}	2.63 (±0.03)^{b}	

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$), ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, N/A หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้

PL = แป้งจากข้าวพันธุ์บือซูโปะโละ PP= แป้งจากข้าวพันธุ์บือซูโพปี้

EG = ไข่ขาวผง

MF = แป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (แป้งข้าวขาวโม่แห้ง + แป้งมันฝรั่ง + แป้งข้าวโพด)

การกำหนดชื่อตัวอย่าง ประกอบด้วย :

พันธุ์ข้าว (%ที่ใช้) -วิธีการผลิต + ไข่ขาวผง (%ที่ใช้) + แป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (%ที่ใช้)

4.3.2 ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน

จากการศึกษาผลของพันธุ์ข้าวและกระบวนการผลิตแป้งที่แตกต่างกันต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน (ตารางที่ 17) พบว่า ไข่ขาวผงช่วยปรับปรุงให้ขนมปังปราศจากกลูเตนมีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น สังเกตได้จากค่า Hardness (ค่าความแข็ง) และ Cohesiveness (แสดงถึงพลังงานในการยึดเกาะกันภายในเนื้ออาหาร) ที่เพิ่มมากขึ้นในทุกๆ ตัวอย่าง นอกจากนี้ ไข่ขาวผงยังช่วยลดการยึดติดของขนมปังกับหัววัดหรือวัสดุอื่นๆ เช่น การติดเหงือก ฟัน เพดาน ริมฝีปากระหว่างการรับประทาน หรือเรียกว่า ความเหนียว (stickiness) แสดงผลเป็นค่า Adhesiveness

ที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) อย่างไรก็ตามคุณสมบัติด้านต่างๆ ของขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตโดยการใช้แป้งข้าวพันธุ์พื้นเมืองเพียงอย่างเดียว และแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมืองผสมไข่ขาวผงก็ยังมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างจากตัวอย่างขนมปังที่ผลิตจากแป้งสาลี แต่เมื่อผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนด้วยการผสมแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมือง (ข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้) ไข่ขาวผง และแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน กลับพบว่า ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนที่ได้มีค่า Hardness, Adhesiveness, Springiness และ Cohesiveness ที่ใกล้เคียงขนมปังจากแป้งสาลีมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะตัวอย่างขนมปังที่ใช้แป้งข้าวพันธุ์พื้นเมืองที่ผลิตด้วยการทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน ซึ่งมีลักษณะเนื้อสัมผัสในทุกๆ ด้านใกล้เคียงกับขนมปังจากแป้งสาลี และโดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างขนมปังที่ใช้แป้งข้าวพันธุ์พื้นเมืองซึ่งผลิตด้วยเทคโนโลยีเอ็กทรูชันซึ่งพบว่า มีลักษณะเนื้อสัมผัสในทุกๆ ด้าน ได้แก่ ค่า Hardness, Adhesiveness, Springiness, Cohesiveness, Gumminess และ Chewiness ที่ไม่แตกต่างจากขนมปังที่ผลิตจากแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Martínez และคณะ (2013) ที่ได้สรุปไว้ว่า การใช้แป้งข้าวที่เป็นแป้งพรีเจล นอกจากจะช่วยเพิ่มปริมาตรของขนมปังแล้ว ยังสามารถลดความแข็งของเนื้อขนมปัง และช่วยชะลอการเกิด staling ได้อีกด้วย และจากผลการทดลองดังกล่าวเป็นตัวบ่งชี้ว่า ค่า amylose-amylopectin ratio ของแป้งข้าวผสมที่ใช้ในการทดลองนี้เหมาะสมสำหรับใช้ทำขนมปังปราศจากกลูเตน โดยมีค่าเท่ากับ 0.19-0.20 ซึ่งจากการสืบค้นข้อมูลเพิ่มเติมพบว่า มีค่า amylose-amylopectin ratio ที่ใกล้เคียงกับแป้งสาลี โดยแป้งสาลีมีค่า amylose-amylopectin ratio เท่ากับ 0.25 (Zakaria และคณะ, 2017)

จากคุณสมบัติของแป้งข้าวในตอนที่ 4.2 ต่อคุณภาพทางลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังภายหลังการอบ พบว่า ค่าดัชนีการละลายน้ำที่แตกต่างกันมีผลโดยตรงต่อลักษณะเนื้อสัมผัสขนมปังภายหลังการอบอย่างชัดเจน โดยจากผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังภายหลังจากอบแสดงให้เห็นว่า ขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ที่มีค่าดัชนีการละลายน้ำสูง ได้แก่ แป้งข้าวที่ผลิตจากเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (ค่าดัชนีการละลายน้ำ 64.35 และ 66.56% ตามลำดับ) และเทคโนโลยีเอ็กทรูชัน (ค่าดัชนีการละลายน้ำ 63.02 และ 73.27% ตามลำดับ) ผสมกับไข่ขาวผง และแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน มีลักษณะเนื้อสัมผัสในทุกๆ ด้านที่ใกล้เคียงกับลักษณะเสื้อสัมผัสของขนมปังจากแป้งสาลีเมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวโม่แห้งและโม่เปียก ทั้งนี้ เนื่องมาจากแป้งข้าวที่ผลิตจากเทคโนโลยีทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเทคโนโลยีเอ็กทรูชันเป็นแป้งพรีเจลที่มีค่าดัชนีการละลายน้ำสูงกว่าแป้งข้าวที่ใช้กระบวนการผลิตแป้งด้วยวิธีโม่แห้งและโม่เปียก ซึ่งมีความสามารถในการกระจายตัวได้ในน้ำเย็น และเกิดความหนืดได้ทันทีโดยไม่ต้องให้ความร้อน (Sriroth และ Piyachomkwan, 2007) ส่งผลให้โดที่ได้มีความ

หนืดมากกว่าโดที่ผลิตจากแป้งโม่แห้งและโม่เปียก และมีความสามารถในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตโดยยีสต์ไว้ในโครงสร้างได้ดีในระหว่างกระบวนการบ่มโด และเมื่อมีการผสมแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมืองกับไข่ขาวผง (ช่วยเพิ่มความสามารถในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ภายในระบบในระหว่างการบ่มโดและการอบ) และแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (ปรับ amylose-amylopectin ratio ให้เหมาะสมต่อการทำขนมปัง) จึงทำให้ขนมปังภายหลังการอบที่ได้มีลักษณะเนื้อสัมผัสในทุกๆ ด้านใกล้เคียงกับขนมปังจากแป้งสาลี

ตารางที่ 17 ผลของพันธุ์ข้าวและกระบวนการผลิตแป้งที่แตกต่างกันต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน

ตัวอย่าง	Hardness (N)	Adhesiveness (N.mm)	Springiness[ns]	Cohesiveness	Gumminess	Chewiness
แป้งสาลี (สูตรควบคุม)	1.22 (±1.02)^{g}	0.00 (±0.00)^{a}	1.01 (±0.01)	0.79 (±0.01)^{a}	0.97 (±0.06)^{k}	0.98 (±0.05)^{g}
PL(100)-Dry mill	4.12 (±1.08)^{defg}	-126.76 (±25.51)^{d}	0.83 (±0.02)	0.50 (±0.05)^{i}	2.02 (±0.58)^{ghijk}	1.68 (±0.44)^{fg}
PL(100)-Wet mill	4.05 (±0.98)^{defg}	-319.39 (±37.64)^{g}	0.81 (±0.10)	0.54 (±0.02)^{ghi}	2.20 (±0.07)^{ghijk}	1.78 (±0.27)^{fg}
PL(100)-Drum dry	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PL(100)-Extruder	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PP(100)-Dry mill	6.10 (±0.70)^{cdef}	-125.59 (±30.35)^{d}	0.82 (±0.03)	0.53 (±0.04)^{hi}	3.24 (±0.30)^{fgh}	2.66 (±0.16)^{efg}
PP(100)-Wet mill	6.05 (±0.64)^{cdef}	-299.59 (±28.12)^{g}	0.82 (±0.02)	0.59 (±0.05)^{fgh}	3.56 (±0.26)^{efg}	2.90 (±0.13)^{ef}
PP(100)-Drum dry	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PP(100)-Extruder	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PL(90)-Dry mill+EG(10)	16.16 (±0.26)^{b}	-71.84 (±4.08)^{c}	0.91 (±0.03)	0.55 (±0.03)^{ghi}	8.86 (±0.23)^{b}	8.06 (±0.03)^{b}
PL(90)-Wet mill+EG(10)	7.33 (±0.17)^{cd}	-92.98 (±5.49)^{cd}	0.90 (±0.01)	0.59 (±0.00)^{fgh}	4.31 (±0.13)^{def}	3.86 (±0.16)^{de}
PL(90)-Drum dry+EG(10)	2.86 (±0.14)^{efg}	-57.49 (±5.57)^{bc}	0.92 (±0.27)	0.58 (±0.01)^{fgh}	1.61 (±0.01)^{hijk}	1.48 (±0.45)^{fg}
PL(90)-Extruder+EG(10)	2.29 (±0.02)^{fg}	-241.10 (±0.62)^{f}	0.92 (±0.06)	0.65 (±0.00)^{de}	1.48 (±0.02)^{ijk}	1.37 (±0.06)^{fg}
PP(90)-Dry mill+EG(10)	27.44 (±0.60)^{a}	-73.67 (±5.01)^{c}	0.91 (±0.06)	0.59 (±0.01)^{fg}	16.29 (±0.30)^{a}	14.84 (±0.70)^{a}

PP(90)-Wet mill+EG(10)	14.99 (±4.88)^{b}	-191.10 (±14.05)^{ef}	0.90 (±0.06)	0.62 (±0.08)^{ef}	8.95 (±3.02)^{b}	8.16 (±3.27)^{b}
PP(90)-Drum dry+EG(10)	1.72 (±0.50)^{g}	-22.61 (±13.71)^{b}	0.93 (±0.46)	0.58 (±0.01)^{fgh}	1.00 (±0.10)^{jk}	0.96 (±0.56)^{g}
PP(90)-Extruder+EG(10)	4.36 (±0.14)^{defg}	-359.22 (±0.07)^{h}	0.93 (±0.04)	0.70 (±0.00)^{cd}	3.06 (±0.14)^{fghi}	2.85 (±0.00)^{ef}
PL(20)-Dry mill+EG(10)+MF(70)	7.39 (±0.35)^{cd}	-2.38 (±2.10)^{a}	0.96 (±0.03)	0.74 (±0.02)^{abc}	5.48 (±0.25)^{cd}	5.23 (±0.06)^{cd}
PL(20)-Wet mill+EG(10)+MF(70)	8.43 (±0.30)^{c}	- 4.51 (±4.23)^{a}	0.95 (±0.01)	0.75 (±0.00)^{abc}	6.29 (±0.32)^{c}	5.99 (±0.37)^{c}
PL(20)-Drum dry+EG(10)+MF(70)	3.54 (±0.15)^{efgh}	-2.87 (±0.20)^{a}	0.97 (±0.00)	0.75 (±0.01)^{abc}	2.66 (±0.16)^{ghij}	2.59 (±0.16)^{efg}
PL(20)-Extruder+EG(10)+MF(70)	2.67 (±0.11)^{efg}	-1.31 (±1.02)^{a}	0.98 (±0.00)	0.76 (±0.00)^{abc}	2.03 (±0.10)^{ghijk}	1.98 (±0.11)^{fg}
PP(20)-Dry mill+EG(10)+MF(70)	8.24 (±0.35)^{c}	-2.60 (±1.85)^{a}	0.97 (±0.02)	0.74 (±0.01)^{abc}	6.11 (±0.32)^{c}	5.93 (±0.20)^{c}
PP(20)-Wet mill+EG(10)+MF(70)	6.56 (±0.31)^{cde}	-0.63 (±0.21)^{a}	0.97 (±0.00)	0.74 (±0.00)^{bc}	4.84 (±0.35)^{cde}	4.68 (±0.33)^{cd}
PP(20)-Drum dry+EG(10)+MF(70)	3.68 (±0.22)^{defg}	-0.60 (±0.03)^{a}	0.98 (±0.03)	0.75 (±0.02)^{abc}	2.75 (±0.22)^{fghi}	2.69 (±0.15)^{efg}
PP(20)-Extruder+EG(10)+MF(70)	3.33 (±0.05)^{efg}	-1.86 (±0.79)^{a}	0.99 (±0.01)	0.76 (±0.01)^{ab}	2.54 (±0.10)^{ghijk}	2.52 (±0.14)^{efg}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$), ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, N/A หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้, ^{ns} หมายถึง ค่าในคอลลัมน์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

PL = แป้งจากข้าวพันธุ์บือซูโปะโละ PP= แป้งจากข้าวพันธุ์บือซูโพปี้

EG = ไข่ขาวผง

MF = แป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (แป้งข้าวขาวโม่แห้ง + แป้งมันฝรั่ง + แป้งข้าวโพด)

การกำหนดชื่อตัวอย่าง ประกอบด้วย พันธุ์ข้าว (%ที่ใช้) -วิธีการผลิต + ไข่ขาวผง (%ที่ใช้) + แป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (%ที่ใช้)

4.3.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน

นอกจากการวิเคราะห์คุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์แล้ว ยังได้ดำเนินการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำข้อมูลมาประกอบการประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่อการยอมรับของผู้บริโภคได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น (ตารางที่ 18) จากผลการทดลองพบว่า ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมือง (ข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้) ผสมกับไข่ขาวผง และแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน ได้รับคะแนนความชอบและการยอมรับจากผู้บริโภคสูงกว่าตัวอย่างขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมือง (ข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้) ผสมกับไข่ขาวผง และตัวอย่างขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวพันธุ์พื้นเมือง (ข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้) เพียงอย่างเดียว ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวที่ผ่านกระบวนการเอ็กทรูชัน ซึ่งพบว่าได้รับคะแนนความชอบด้านความนุ่ม รสชาติ และความชอบโดยรวมเทียบเท่ากับตัวอย่างขนมปังที่ผลิตจากแป้งสาลี ($p<0.05$) ซึ่ง Ma และคณะ (2022) ได้กล่าวไว้ว่า การใช้แป้งพรีเจลในปริมาณที่เหมาะสมช่วยปรับปรุงความสามารถในการจับน้ำในผลิตภัณฑ์ขนมปังได้เป็นอย่างดี ส่งผลให้ขนมปังมีความแข็งลดลง (มีความนุ่มเพิ่มมากขึ้น) ตัวอย่างเช่น ผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ผสมธัญพืชหลากหลายชนิด (multi-grain bread) เพื่อปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการให้กับขนมปัง แต่การเติมธัญพืชหลากหลายชนิดลงไปทำให้โดมีคุณสมบัติด้าน rheology ที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากธัญพืชชนิดอื่นๆ ที่ไม่ใช่แป้งสาลีจะไม่มีส่วนประกอบของโปรตีนกลูเตน ดังนั้นคุณภาพของขนมปังจึงลดลง ซึ่งสามารถปรับปรุงคุณภาพที่ลดลงของขนมปังได้ด้วยการใช้แป้งพรีเจล เพราะแป้งพรีเจลมีความหนืดสูงเมื่อผสมกับน้ำเย็นซึ่งคุณสมบัติที่โดดเด่นนี้ ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติด้าน rheology ของโดให้ดีขึ้น (Carrillo-Navas และคณะ, 2016; Jalali และคณะ, 2019; Onyango และคณะ, 2011b; Schober และคณะ, 2007) ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ Pongjaruvat และคณะ (2014) ที่พบว่าขนมปังจากข้าวหอมมะลิมีปริมาตรของขนมปังที่ต่ำ (ไม่สามารถกักเก็บก๊าซที่ผลิตจากการทำงานของยีสต์หรือผงฟูได้) และเนื้อขนมปังด้านในมีลักษณะแข็ง ซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ดีสำหรับผลิตภัณฑ์ขนมปัง แต่เมื่อมีการใช้แป้งพรีเจลแทนการใช้แป้งข้าวหอมมะลิที่ปริมาณ 10% พบว่า ขนมปังที่ได้มีความคงรูปไม่เกิดการยุบตัว มีความแข็งลดลง (มีความนุ่มเพิ่มมากขึ้น) และมีปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้น 26.3% แต่กลับพบว่าการเพิ่มปริมาณแป้งพรีเจลแทนแป้งข้าวหอมมะลิที่มากกว่า 10% ทำให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาคุณภาพด้านลักษณะปรากฏและกลิ่นของขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ที่ได้จากกระบวนการเอ็กทรูชัน (ตารางที่ 10) พบว่า ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ได้รับคะแนน

ความชอบด้านลักษณะปรากฏและกลิ่นน้อยกว่าขนมปังจากแป้งสาลีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้มีกลิ่นและสีที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของสายพันธุ์ ทำให้ผู้บริโภคอาจไม่คุ้นชินกับสีและกลิ่นที่เกิดขึ้น ซึ่งประเด็นนี้อาจต้องทำการประเมินความชอบและการยอมรับกับลูกค้ากลุ่มเป้าหมายที่แท้จริง (target consumer) ควบคู่การประเมินความเป็นไปได้ทางการตลาดอีกครั้ง ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า การใช้แป้งข้าวจากกระบวนการเอ็กทรูชันผสมกับไข่ขาวผงและแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (แป้งข้าวเจ้า แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพด) สามารถผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่มีคุณประโยชน์ และมีคุณภาพทางประสาทสัมผัสเป็นที่ชื่นชอบและยอมรับจากผู้บริโภคทั้งด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าและความหลากหลายในการใช้งานให้แก่ข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ได้อย่างเป็นรูปธรรม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 18 ผลของพันธุ์ข้าวและกระบวนการผลิตแป้งที่แตกต่างกันต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน

ตัวอย่าง	ลักษณะปรากฏ	ความนุ่ม	กลิ่น	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
แป้งสาลี (สูตรควบคุม)	8.86 (±0.21)^{a}	8.85 (±0.21)^{a}	8.75 (±0.35)^{a}	8.86 (±0.20)^{a}	8.90 (±0.14)^{a}
PL(100)-Dry mill	2.00 (±0.28)^{g}	4.9 (±0.14)^{de}	5.03 (±0.04)^{d}	5.45 (±0.21)^{b}	3.31 (±0.44)^{d}
PL(100)-Wet mill	1.10 (±0.14)^{h}	4.81 (±0.28)^{de}	5.17 (±0.21)^{cd}	5.25 (±0.35)^{b}	1.00 (±0.15)^{e}
PL(100)-Drum dry	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PL(100)-Extruder	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PP(100)-Dry mill	3.04 (±0.23)^{f}	4.88 (±0.39)^{de}	5.13 (±0.18)^{cd}	5.38 (±0.18)^{b}	3.30 (±0.42)^{d}
PP(100)-Wet mill	1.15 (±0.21)^{h}	4.75 (±0.35)^{de}	5.14 (±0.44)^{cd}	5.41 (±0.13)^{b}	1.25 (±0.35)^{e}
PP(100)-Drum dry	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PP(100)-Extruder	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
PL(90)-Dry mill+EG(10)	3.06 (±0.08)^{f}	4.50 (±0.71)^{de}	5.48 (±0.04)^{cd}	5.46 (±0.41)^{b}	3.89 (±0.52)^{d}
PL(90)-Wet mill+EG(10)	3.21 (±0.30)^{f}	4.25 (±0.35)^{e}	5.44 (±0.08)^{cd}	5.50 (±0.06)^{b}	3.85 (±0.49)^{d}
PL(90)-Drum dry+EG(10)	4.21 (±0.30)^{e}	5.23 (±0.32)^{d}	5.49 (±0.02)^{c}	5.45 (±0.18)^{b}	5.00 (±0.50)^{c}
PL(90)-Extruder+EG(10)	4.25 (±0.35)^{e}	5.13 (±0.18)^{d}	5.49 (±0.02)^{c}	5.55 (±0.22)^{b}	5.23 (±0.33)^{c}
PP(90)-Dry mill+EG(10)	3.08 (±0.11)^{f}	4.17 (±0.24)^{e}	5.44 (±0.08)^{cd}	5.47 (±0.45)^{b}	3.82 (±0.70)^{d}
PP(90)-Wet mill+EG(10)	4.23 (±0.32)^{e}	4.18 (±0.25)^{e}	5.40 (±0.15)^{cd}	5.50 (±0.35)^{b}	3.88 (±0.67)^{d}

PP(90)-Drum dry+EG(10)	2.31 (±0.44)^{g}	5.16 (±0.22)^{d}	5.40 (±0.14)^{cd}	5.52 (±0.71)^{b}	3.13 (±0.18)^{d}
PP(90)-Extruder+EG(10)	4.24 (±0.22)^{e}	5.24 (±0.34)^{d}	5.43 (±0.10)^{cd}	5.48 (±0.19)^{b}	5.25 (±0.35)^{c}
PL(20)-Dry mill+EG(10)+MF(70)	7.23 (±0.17)^{c}	7.02 (±0.06)^{c}	8.08 (±0.25)^{b}	8.11 (±0.21)^{a}	7.24 (±0.19)^{b}
PL(20)-Wet mill+EG(10)+MF(70)	7.50 (±0.19)^{e}	7.13 (±0.53)^{c}	8.04 (±0.37)^{b}	8.14 (±0.16)^{a}	7.05 (±0.71)^{b}
PL(20)-Drum dry+EG(10)+MF(70)	6.25 (±0.12)^{d}	8.01 (±0.55)^{b}	8.23 (±0.14)^{b}	8.22 (±0.13)^{a}	6.63 (±0.52)^{b}
PL(20)-Extruder+EG(10)+MF(70)	8.60 (±0.16)^{b}	8.89 (±0.11)^{a}	8.18 (±0.09)^{b}	8.20 (±0.14)^{a}	8.89 (±0.12)^{a}
PP(20)-Dry mill+EG(10)+MF(70)	7.23 (±0.18)^{c}	7.08 (±0.18)^{c}	8.20 (±0.14)^{b}	8.14 (±0.19)^{a}	7.03 (±0.25)^{b}
PP(20)-Wet mill+EG(10)+MF(70)	7.52 (±0.15)^{c}	7.02 (±0.33)^{c}	8.22 (±0.13)^{b}	8.25 (±0.35)^{a}	6.85 (±0.49)^{b}
PP(20)-Drum dry+EG(10)+MF(70)	6.25 (±0.21)^{d}	8.05 (±0.64)^{b}	8.25 (±0.14)^{b}	8.25 (±0.13)^{a}	6.38 (±0.18)^{b}
PP(20)-Extruder+EG(10)+MF(70)	8.58 (±0.09)^{b}	8.88 (±0.15)^{a}	8.19 (±0.09)^{b}	8.21 (±0.14)^{a}	8.87 (±0.06)^{a}

ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$), ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, N/A หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าได้

PL = แป้งจากข้าวพันธุ์บือซูโปะโละ PP= แป้งจากข้าวพันธุ์บือซูโพปี้

EG = ไข่ขาวผง

MF = แป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (แป้งข้าวขาวโม่แห้ง + แป้งมันฝรั่ง + แป้งข้าวโพด)

การกำหนดชื่อตัวอย่าง ประกอบด้วย :

พันธุ์ข้าว (%ที่ใช้) -วิธีการผลิต + ไข่ขาวผง (%ที่ใช้) + แป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (%ที่ใช้)

บทที่ 5
สรุป

5.1 สรุป

ข้าวพันธุ์บือซูโปะโละและข้าวพันธุ์บือซูโพปี้ เป็นข้าวไร่หรือข้าวพันธุ์พื้นเมืองซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการที่ดี เมื่อนำมาแปรรูปเป็นแป้งข้าวด้วยกระบวนการที่แตกต่างกันส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีกายของแป้งข้าวเปลี่ยนแปลงไป ทั้งในด้านของลักษณะปรากฏ ค่าสี ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ ค่าดัชนีการละลายน้ำ ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงทางความหนืดของแป้งข้าว ซึ่งเมื่อได้นำแป้งข้าวดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน พบว่า การใช้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้เพียงอย่างเดียวไม่สามารถผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนได้ แต่เมื่อนำแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ผสมกับโปรตีนไข่ขาวและแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน (แป้งข้าวเจ้า แป้งมันฝรั่ง และแป้งข้าวโพด) พบว่า โปรตีนไข่ขาวสามารถช่วยสร้างโครงสร้างที่คล้ายคลึงกลูเตนในระบบของขนมปังได้ และการใช้แป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนร่วมด้วยทำให้ขนมปังมีลักษณะปรากฏ การกระจายตัวของรูพรุนในโครงสร้างด้านในเหมือนกับขนมปังที่ผลิตจากแป้งสาลี และมีลักษณะเนื้อสัมผัสใกล้เคียงขนมปังจากแป้งสาลีมากยิ่งขึ้น และจากผลการทดลองพบว่า ค่าดัชนีการละลายน้ำของแป้งข้าวมีผลโดยตรงกับปริมาตรจำเพาะ และลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปัง โดยเฉพาะขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ด้วยเทคโนโลยีเอ็กทรูชันซึ่งมีค่าดัชนีการละลายน้ำสูงที่สุด ผสมกับไข่ขาวผงและแป้งผสมสำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน พบว่า ขนมปังภายหลังการอบมีปริมาตรจำเพาะสูงและมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกับขนมปังจากแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังได้รับคะแนนความชอบและการยอมรับจากผู้บริโภคสูงที่สุดและได้รับคะแนนความชอบด้านความนุ่ม รสชาติ และความชอบโดยรวมเทียบเท่ากับขนมปังที่ผลิตจากแป้งสาลีอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรใช้แป้งพรีเจลในปริมาณที่เหมาะสมในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน เนื่องจากหากใช้ในปริมาณมากเกินไปจะส่งผลในเชิงลบกับขนมปังปราศจากกลูเตน

5.2.2 เป็นที่น่าสนใจหากมีการทดลองใช้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ที่โม่แห้งแทนการใช้แป้งข้าวเจ้า ผสมกับแป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้เอ็กทรูชัน เนื่องจากจะทำให้ขนมปัง

ปราศจากกลูเตนมีคุณค่าทางโภชนาการดีขึ้นจากเดิม และนอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้แป้งข้าวบือซูโปะโละและบือซูโพปี้ในผลิตภัณฑ์อีกด้วย

รายการอ้างอิง

Abdel-Aal, E.-S. M., & Gallagher, E. (2009). 11 Functionality of Starches and Hydrocolloids in Gluten-Free Foods. *Gluten-free food science and technology*, 200.

Anderson, R., Conway, H. F., Pfeifer, V. F., Griffin, E. L., Anderson, R. A., Conway, H. F., Pfeifer, Griffin, J. R., & Griffin, L. I. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking.

Asmeda, R., Noorlaila, A., & Norziah, M. (2015). Effects of different grinding methods on chemical and functional properties of MR211 rice flour. *Int. J. Food Eng*, *1*(2), 111-114.

Bell, D. (1990). Methylcellulose as a structure enhancer in bread baking. *Cereal Foods World*, *35*, 1001-1006.

Carrillo-Navas, H., Guadarrama-Lezama, A. Y., Vernon Carter, E. J., Garci Diaz, S., Reyes, I., & Álvarez-Ramírez, J. (2016). Effect of gelatinized flour fraction on thermal and rheological properties of wheat-based dough and bread. *Journal of Food Science and Technology*, *53*, 3996-4006.

Chen, J., Lu, S., & Lii, C. (1999). Effects of milling on the physicochemical characteristics of waxy rice in Taiwan. *Cereal Chemistry*, *76*(5), 796-799.

Colonna, P., Doublier, J., Melcion, J., De Monredon, F., & Mercier, C. (1984). Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. *Cereal Chemistry*, *61*(6), 538-554.

Defloor, I., De Geest, C., Schellekens, M., Martens, A., & Delcour, J. (1991). Emulsifiers and/or extruded starch in the production of breads from cassava. *Cereal Chem*, *68*(4), 323-327.

Delcour, J. A., Vanhamel, S., & Hoseney, R. C. (1991). Physicochemical and functional properties of rye nonstarch polysaccharides. II. Impact of a fraction containing water-soluble pentosans and proteins on gluten-starch loaf volumes. *Cereal Chemistry*, *68*, 72-76.

Demirkesen, I., Mert, B., Sumnu, G., & Sahin, S. (2010). Rheological properties of gluten-free bread formulations. *Journal of Food Engineering*, *96*(2), 295-303.

Ding, X.-L., Wang, L.-J., Li, T.-T., Wang, F., Quan, Z.-Y., Zhou, M., Huo, Z.-Y., & Qian, J.-Y. (2021). Pre-Gelatinisation of Rice Flour and Its Effect on the Properties of Gluten Free Rice Bread and Its Batter. *Foods*, *10*(11), 2648.

dos Santos, T. P. R., Franco, C. M. L., Demiate, I. M., Li, X., Garcia, É. L., Jane, J.-L., & Leonel,

M. (2018). Spray-drying and extrusion processes: Effects on morphology and physicochemical characteristics of starches isolated from Peruvian carrot and cassava. *International journal of biological macromolecules*, *118 Pt A*, 1346-1353.

Eliasson, A.-C., & Krog, N. (1985). Physical properties of amylose-monoglyceride complexes. *Journal of Cereal Science*, *3*(3), 239-248.

Gallagher, E., Gormley, T. R., & Arendt, E. K. (2004). Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science & Technology*, *15*(3-4), 143-152.

Gallagher, E., Kunkel, A. L., Gormley, T. R., & Arendt, E. K. (2003). The effect of dairy and rice powder addition on loaf and crumb characteristics, and on shelf life (intermediate and long-term) of gluten-free breads stored in a modified atmosphere. *European Food Research and Technology*, *218*, 44-48.

Ghanbarzadeh, B., & Almasi, H. (2013). Biodegradable Polymers.

Hagenimana, A., Ding, X., & Fang, T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, *43*(1), 38-46.

Haque, A. K. M. A., Richardson, R. K., Morris, E. R., & Dea, I. C. M. (1993). Xanthan-like@ weak geŒ rheology from dispersions of ispaghula seed husk. *Carbohydrate Polymers*, *22*, 223-232.

Ilo, S., Liu, Y., & Berghofer, E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. *LWT-Food Science and Technology*, *32*(2), 79-88.

Jalali, M., Sheikholeslami, Z., Elhamirad, A. H., Haddad Khodaparast, M. H., & Karimi, M. (2019). The effect of the ultrasound process and pre-gelatinization of the corn flour on the textural, visual, and sensory properties in gluten-free pan bread. *Journal of Food Science and Technology*, *57*, 993-1002.

Jane, J., Chen, Y., Lee, L., McPherson, A., Wong, K., Radosavljevic, M., & Kasemsuwan, T. (1999). Effects of amylopectin branch chain length and amylose content on the gelatinization and pasting properties of starch. *Cereal Chemistry*, *76*(5), 629-637.

Jay, J. M. (1970). Modern food microbiology.

Jongh, G. (1961). *The Formation of Dough and Bread Structures. I. The Ability of Starch to Form Structures, and the Improving Effect of Glyceryl Monostearate* (Vol. 38). American Association of Cereal Chemists, Inc. .

Juliano, B. (1985). Criteria and tests for rice grain qualities.

Juliano, B. O. (1971). A simplified assay for milled-rice amylose.

Juliano, B. O. (1993). Rice in human nutrition.

Kato, A., Ibrahim, H. R., Watanabe, H., Honma, K., & Kobayashi, K. (1990). Enthalpy of Denaturation and Surface Functional Properties of Heated Egg White Proteins in the Dry State. *Journal of food science*, *55*, 1280-1283.

Keetels, C., Visser, K., Van Vliet, T., Jurgens, A., & Walstra, P. (1996). Structure and mechanics of starch bread. *Journal of Cereal Science*, *24*(1), 15-26.

Lazaridou, A., & Biliaderis, C. G. (2009). Gluten-free doughs: rheological properties, testing procedures - methods and potential problems.

Leewatchararongjaroen, J., & Anuntagool, J. (2016). Effects of dry-milling and wet-milling on chemical, physical and gelatinization properties of rice flour. *Rice Science*, *23*(5), 274-281.

Leong, S. Y., & Oey, I. (2012). Effects of processing on anthocyanins, carotenoids and vitamin C in summer fruits and vegetables. *Food chemistry*, *133*, 1577-1587.

Liaotrakoon, W., Liaotrakoon, V., Wongsaengtham, W., & Rodsiri, S. (2014). Influence of dry-and wet-milling processes on physicochemical properties, syneresis, pasting profile and microbial count of job's tear flour. *International Food Research Journal*, *21*(5), 1745.

López, A. C. B., Pereira, A. J. G., & Junqueira, R. G. (2004). Flour mixture of rice flour, corn and cassava starch in the production of gluten-free white bread. *Brazilian archives of biology and technology*, *47*, 63-70.

Lu, S., & Lii, C. (1989). The influences of various milling processes on the physicochemical properties of rice flours and the rice flake preparation. *Food Sci.(Taiwan)*, *16*, 22-35.

Ludewig, H.-G. (2001). *Rezeptbestandteile und deren funktionelle Eigenschaften*. Seibel W (ed) Feine Backwaren.

Lumdubwong, N., Boonta, B., & Tatongjai, J. (2005). Structure and functional properties of Thai waxy rice starches. In proceeding of Starch Update 2007: the 4th Internatinal Conference on Starch Technology, Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, Thailand, November 6-7, 2007. 161-166.

Ma, S., Wang, Z., Liu, H., Li, L., Zheng, X., Tian, X., Sun, B., & Wang, X. (2022). Supplementation of wheat flour products with wheat bran dietary fiber: Purpose,

mechanisms, and challenges. *Trends in Food Science & Technology*.

Majzoobi, M., Radi, M., Farahnaky, A., Jamalian, J., Tongtang, T., & Mesbahi, G. (2011). Physicochemical properties of pre-gelatinized wheat starch produced by a twin drum drier. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *13*, 193-202.

Marco, C., Pérez, G., León, A. E., & Rosell, C. M. (2008). Effect of Transglutaminase on Protein Electrophoretic Pattern of Rice, Soybean, and Rice‐Soybean Blends. *Cereal Chemistry*, *85*(1), 59-64.

Martinez, M. M., Marcos, P. J. B., & Gómez, M. (2013). Texture Development in Gluten-Free Breads: Effect of Different Enzymes and Extruded Flour. *Journal of Texture Studies*, *44*, 480-489.

Masure, H. G., Wouters, A. G., Fierens, E., & Delcour, J. A. (2019). Impact of egg white and soy proteins on structure formation and crumb firming in gluten-free breads. *Food Hydrocolloids*, *95*, 406-417.

Matos, M. E., & Rosell, C. M. (2012). Relationship between instrumental parameters and sensory characteristics in gluten-free breads. *European Food Research and Technology*, *235*, 107-117.

Mercier, C., Charbonniere, R., Grebaut, J., & De la Gueriviere, J. (1980). Formation of amylose-lipid complexes by twin-screw extrusion cooking of manioc starch. *Cereal Chem*, *57*(1), 4-9.

Mira, N. V. M. d., Massaretto, I., Pascual, C. d. S. C. I., & Marquez, Ú. M. L. (2009). Comparative study of phenolic compounds in different Brazilian rice (Oryza sativa L.) genotypes. *Journal of Food Composition and Analysis*, *22*, 405-409.

Mitrus, M., Wójtowicz, A., Oniszczuk, T., Gondek, E., & Mo. (2017). Effect of Processing Conditions on Microstructure and Pasting Properties of Extrusion-Cooked Starches. *International Journal of Food Engineering*, *13*.

Miyazaki, M., Van Hung, P., Maeda, T., & Morita, N. (2006). Recent advances in application of modified starches for breadmaking. *Trends in Food Science & Technology*, *17*(11), 591-599.

Moore, M. M., Heinbockel, M., Dockery, P., Ulmer, H. M., & Arendt, E. K. (2006). Network Formation in Gluten-Free Bread with Application of Transglutaminase. *Cereal Chemistry*,

83, 28-36.

Moore, M. M., Schober, T. J., Dockery, P., & Arendt, E. K. (2004). Textural comparisons of gluten-free and wheat-based doughs, batters, and breads. *Cereal Chemistry*, *81*(5), 567-575.

Nakorn, K. N., Tongdang, T., & Sirivongpaisal, P. (2009). Crystallinity and Rheological Properties of Pregelatinized Rice Starches Differing in Amylose Content. *Starch-starke*, *61*, 101-108.

Nishita, K. (1982). Grinding methods: Their impact on rice flour properties. *Cereal Chem.*, *59*, 46-49.

Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G., & Lindhauer, M. G. (2011a). Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch. *LWT-Food Science and Technology*, *44*(3), 681-686.

Onyango, C., Mutungi, C., Unbehend, G., & Lindhauer, M. G. (2011b). Rheological and textural properties of sorghum-based formulations modified with variable amounts of native or pregelatinised cassava starch. *Lwt - Food Science and Technology*, *44*, 687-693.

Patras, A., Brunton, N. P., o Donnell, C., & Tiwari, B. K. (2010). Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. *Trends in Food Science and Technology*, *21*, 3-11.

Pérez-Sira, E., & González-Parada, Z. (1997). Functional properties of cassava (Manihot esculenta Crantz) starch modified by physical methods. *Starch-Stärke*, *49*(2), 49-53.

Plaitho, Y., Kangsadalampai, K., & Sukprasansap, M. (2013). The protective effect of Thai fermented pigmented rice on urethane induced somatic mutation and recombination in Drosophila melanogaster. *Journal of Medicinal Plants Research*, *7*(2), 91-98.

Pongjaruvat, W., Methacanon, P., Seetapan, N., Fuongfuchat, A., & Gamonpilas, C. (2014). Influence of pregelatinised tapioca starch and transglutaminase on dough rheology and quality of gluten-free jasmine rice breads. *Food Hydrocolloids*, *36*, 143-150.

Prasad, K., Singh, Y., & Anil, A. (2012). Effects of grinding methods on the characteristics of Pusa 1121 rice flour. *Journal of Tropical Agriculture and Food Science*, *40*(2), 193-201.

Renzetti, S., Dal Bello, F., & Arendt, E. K. (2008). Microstructure, fundamental rheology and baking characteristics of batters and breads from different gluten-free flours treated with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, *48*(1), 33-45.

Riemsdijk, L. E. v., Goot, A. J. v. d., Hamer, R. J., & Boom, R. (2011). Preparation of gluten-free

bread using a meso-structured whey protein particle system. *Journal of Cereal Science*, *53*, 355-361.

Rodd, A. B., Dunstan, D. E., & Boger, D. V. (2000). Characterisation of xanthan gum solutions using dynamic light scattering and rheology. *Carbohydrate Polymers*, *42*, 159-174.

Ronda, F., Oliete, B., Gómez, M., Caballero, P. A., & Pando, V. (2011). Rheological study of layer cake batters made with soybean protein isolate and different starch sources. *Journal of Food Engineering*, *102*(3), 272-277.

Ronda, F., & Roos, Y. H. (2008). Gelatinization and freeze-concentration effects on recrystallization in corn and potato starch gels. *Carbohydrate research*, *343*(5), 903-911.

Roobha, J., Saravanakumar, M., Aravindhan, K., & Devi, P. S. (2011). The effect of light, temperature, ph on stability of anthocyanin pigments in Musa acuminata bract. *Research in Plant Biology*, *1*, 5-12.

Rosell, C. M. (2009). Enzymatic Manipulation of GluteŽ Free Breads.

Rosell, C. M., Rojas, J. A., & Barber, C. B. d. (2001). Influence of hydrocolloids on dough rheology and bread quality. *Food Hydrocolloids*, *15*, 75-81.

Sanchez, H., Osella, C., & De La Torre, M. (2002). Optimization of gluten‐free bread prepared from cornstarch, rice flour, and cassava starch. *Journal of food science*, *67*(1), 416-419.

Sandstedt, R. (1961). The function of starch in baking of bread. *Baker's Digest*, *35*, 36-44.

Sarawong, C., Schoenlechner, R., Sekiguchi, K., Berghofer, E., & Ng, P. K. W. (2014). Effect of extrusion cooking on the physicochemical properties, resistant starch, phenolic content and antioxidant capacities of green banana flour. *Food chemistry*, *143*, 33-39.

Schober, T. J. (2009). Manufacture of GluteŽ Free Specialty Breads and Confectionery Products.

Schober, T. J., Bean, S. R., & Boyle, D. L. (2007). Gluten-free sorghum bread improved by sourdough fermentation: biochemical, rheological, and microstructural background. *Journal of agricultural and food chemistry*, *55 13*, 5137-5146.

Schober, T. J., Bean, S. R., Boyle, D. L., & Park, S. H. (2008). Improved viscoelastic zein-starch doughs for leavened gluten-free breads: Their rheology and microstructure. *Journal of Cereal Science*, *48*, 755-767.

Schonlechner, R., Linsberger, G., Kaczyk, L., & Berghofer, E. (2006). Herstellung von glutenfreien Keksen aus den Pseudocerealien Amaranth, Quinoa und Buchweizen mit Gartenbohnen.

NUTRITION-VIENNA-, *30*(3), 101.

Scientific, N. (1995). Operation manual for the series 4 Rapid Visco Analyzer. *Newport Scientific Pty. Ltd*, 10-18.

Shao, Y., Xu, F.-f., Sun, X., Bao, J., & Beta, T. (2014). Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (Oryza sativa L.). *Journal of Cereal Science*, *59*, 211-218.

Singh, N., Nakaura, Y., Inouchi, N., & Nishinari, K. (2007). Fine structure, thermal and viscoelastic properties of starches separated from Indica rice cultivars. *Starch‐Stärke*, *59*(1), 10-20.

Sivaramakrishnan, H. P., Senge, B., & Chattopadhyay, P. (2004). Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of Food Engineering*, *62*(1), 37-45.

Sompong, R., Siebenhandl-Ehn, S., Berghofer, E., & Schoenlechner, R. (2011). Extrusion cooking properties of white and coloured rice varieties with different amylose content. *Starch-starke*, *63*, 55-63.

Sriroth, K., & Piyachomkwan, K. (2007). *Technology of Starch*. Kasetsart University Press.

Suksomboon, A., & Naivikul, O. (2006). Effect of dry-and wet-milling processes on chemical, physicochemical properties and starch molecular structures of rice starches. *Kasetsart Journal (Natural Science)*, *40*, 125-134.

Sumczynski, D., Kotásková, E., Družbíková, H., & MlČek, J. (2016). Determination of contents and antioxidant activity of free and bound phenolics compounds and in vitro digestibility of commercial black and red rice (Oryza sativa L.) varieties. *Food chemistry*, *211*, 339-346.

Swinkels, J. (1985). Composition and properties of commercial native starches. *Starch‐Stärke*, *37*(1), 1-5.

Tegge, G. (2004). *Stärke und Stärkederivate*. Behr's Verlag DE.

Thiranusornkij, L., Thamnarathip, P., Chandrachai, A., Kuakpetoon, D., & Adisakwattana, S. (2018). Physicochemical Properties of Hom Nil (Oryza sativa) Rice Flour as Gluten Free Ingredient in Bread. *Foods*, *7*.

Thomas, R., Wan-Nadiah, W., & Bhat, R. (2013). Physiochemical properties, proximate composition, and cooking qualities of locally grown and imported rice varieties marketed in Penang, Malaysia. *International Food Research Journal*, *20*(3).

Toufeili, I., Dagher, S. M., Shadarevian, S., Noureddine, A., Sarakbi, M. M., & Farran, M. T.

(1994). Formulation of gluten-free pocket-type flat breads : optimization of methylcellulose, gum arabic, and egg albumen levels by response surface morphology. *Cereal Chemistry*, *71*, 594-601.

Vlachos, N., & Karapantsios, T. (2000). Water content measurement of thin sheet starch products using a conductance technique. *Journal of Food Engineering*, *46*(2), 91-98.

Waramboi, J. G., Gidley, M. J., & Sopade, P. A. (2014). Influence of extrusion on expansion, functional and digestibility properties of whole sweetpotato flour. *Lwt - Food Science and Technology*, *59*, 1136-1145.

Wiriyawattana, P., Suwonsichon, S., & Suwonsichon, T. (2018). Effects of drum drying on physical and antioxidant properties of riceberry flour. *Agriculture and Natural Resources*.

Yawadio, R., Tanimori, S., & Morita, N. (2007). Identification of phenolic compounds isolated from pigmented rices and their aldose reductase inhibitory activities. *Food chemistry*, *101*, 1616-1625.

Ye, J., Hu, X., Luo, S., Liu, W., Chen, J., Zeng, Z., & Liu, C. (2018). Properties of Starch after Extrusion: A Review. *Starch-starke*, *70*, 1700110.

Yeh, A. I. (2004). *Preparation and application of rice flour*. 3th ed. The American Association of Cereal Chemists, INC. Minnesota.

Yoenyongbuddhagal, S., & Noomhorm, A. (2002). Effect of physicochemical properties of high-amylose Thai rice flours on vermicelli quality. *Cereal Chemistry*, *79*(4), 481-485.

Yu, S., Ma, Y., & Sun, D. W. (2009). Impact of amylose content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage. *Journal of Cereal Science*, *50*, 139-144.

Zakaria, N. H., Muhammad, N. B., & Abdullah, M. M. A. B. (2017). Potential of Starch Nanocomposites for Biomedical Applications.

Ziobro, R., Witczak, T., Juszczak, L., & Korus, J. (2013). Supplementation of gluten-free bread with non-gluten proteins. Effect on dough rheological properties and bread characteristic. *Food Hydrocolloids*, *32*, 213-220.

กล้าณรงค์ ศรีรอด, & เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2000). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ *3*. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

กล้าณรงค์ ศรีรอด, & เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2003). เทคโนโลยีของแป้ง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. กรุงเทพฯ.

กล้าณรงค์ ศรีรอด, & เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2007). เทคโนโลยีของแป้ง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ.

กวินนาถ หล้าตุ้ย, นงพงา จรัสโสภณ, ประภาพร ตั้งกิจโชติ, & วันเพ็ญ เหล่าศรีไพบูลย์. (2015). การตรวจหาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสารสกัดจากข้าวเพาะงอกและไม่เพาะงอก. การประชุมทางวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ *12*.

งามชื่น คงเสรี. (2003). ข้าวและผลิตภัณฑ์ข้าว. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ.

งามชื่น คงเสรี. (2004). การสร้างคำแนะนำการหุงต้มข้าวหอมมะลิไทย. งามชื่น คงเสรี, *(*ผู้รวบรวม*)*, คุณภาพและการตรวจสอบข้าวหอมมะลิไทย. เอกสารวิชาการฉบับพิเศษ. บริษัท จิรวัฒน์เอกซ์เพลส จำกัด, กรุงเทพฯ

นิธิยา รัตนาปนนท์. (2010). เคมีอาหาร. โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ.

บริบูรณ์ สมฤทธิ์. (1988). ข้าวไร่. แพร่: เอกสารวิชาการ ศูนย์วิจัยข้าวแพร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

พรพิไล นิยมเวช, ปฐมพร สรรพสิทธิ์, อติกานต์ วารี, & เพ็ญศิริ คงสิทธิ์. (2018). การ พัฒนาสูตรโจ๊กข้าวไร ซ์เบอร์รี่กึ่งสำเร็จรูป. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, *23*(3), 1638-1654.

พัชรี ตั้งตระกูล, อรอนงค์ นัยวิกุล, & วิภา สุโรจนะเมธากุล. (2006). ผลการ โม่เปียก โม่แห้ง และโม่แบบผสมต่อสมบัติแป้งข้าว.

ภานุมาศ พุฒแก้ว, & กวินภพ ศรีวัฒนานุศาสตร์. (2020). การพัฒนารูปแบบการผลิตและการยอมรับข้าวฮางงอกไรซ์เบอร์รี่แช่น้ำหมักสมุนไพร. วารสารวิชาการวิทยาลัย สันตพล, *6*(1), 163-171.

วิภา สุโรจนะเมธากุล. (2013). โรคแพ้กลูเตน (Coeliac disease) และความสำคัญของอาหารปราศจากกลูเตน. วารสารอาหาร. ปีที่ *43*, *3*, 16-21.

สวนิต อิชยาวณิชย์, มณฑิรา นพรัตน์, & พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์. (2004). คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ และรีโอโลจีของแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตโดยกระบวนการโม่เปียกและโม่แห้งในระดับอุตสาหกรรม. ว.วิจัยและพัฒนา มจธ., *27*(3), 357-374.

สุนันทา ทองทา, เทวี ทองแดง, & กล้าณรงค์ ศรีรอด. (2010). การดัดแปรทางกายภาพแป้งข้าวและแป้งมันสำปะหลัง. สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อรอนงค์ นัยวิกุล. (2004). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ นัยวิกุล. (2007). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.

อุทัยวรรณ ทองทั้งวงศ์, & สุนทรี สุวรรณสิชฌน์. (2010). ผลของการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสีนิลต่อคุณภาพของบัตเตอร์เค้ก. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ *48:* สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, *646*, 195-202.

อุไรวรรณ วัฒนกุล, ศุภลักษณ์ สุดขาว, & พีรพงษ์ พึ่งแย้ม. (2018). คุณภาพทางเคมี-กายภาพ และสารออกฤทธิ์ทาง

ชีวภาพในผลิตภัณฑ์ข้าวกล้องงอกหุงสุกเร็วจากข้าวกล้องงอกผสม 3 สายพันธุ์.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อภิชญา ห่วงทอง
วัน เดือน ปี เกิด	21 มีนาคม 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดราชบุรี
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม พ.ศ. 2560 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2561 ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	216/1 หมู่ 3 ตำบลเบิกไพร อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี 70110

มหาวิทยาลัยศิลปากร