



การปรับปรุงคุณภาพขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชมันสำปะหลังโดยเติม  
โปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น



โดย  
นายธนวิทย์ สุขแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การปรับปรุงคุณภาพขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชมันสำปะหลัง  
โดยเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2  
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร  
มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2568  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

QUALITY IMPROVEMENT OF GLUTEN-FREE BREAD MADE FROM CORN FLOUR  
AND CASSAVA STARCH BY ADDING PUMPKIN SEED PROTEIN CONCENTRATE



By  
Mr. Thanawit SUKKAEW

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science FOOD TECHNOLOGY  
Department of FOOD TECHNOLOGY  
Academic Year 2025  
Copyright of Silpakorn University



620920098 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : แป้งข้าวโพด, สตาร์ชมันสำปะหลัง, โปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น, ขนมหึ่งปราศจากกลูเตน

นาย ธนวิชัย สุขแก้ว: การปรับปรุงคุณภาพขนมหึ่งปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชมันสำปะหลังโดยเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงใจ ธีรธรรมถาวร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงคุณภาพขนมหึ่งปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น และศึกษาผลของเวลาการบ่ม และอุณหภูมิในการอบต่อคุณลักษณะทางเคมี-กายภาพของขนมหึ่งปราศจากกลูเตน โดยวิเคราะห์องค์ประกอบของโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้ง และการเปลี่ยนแปลงความร้อนของโดที่เติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้นที่ 5% และ 10% ของน้ำหนักแป้ง รวมทั้งวิเคราะห์คุณภาพของขนมหึ่ง (องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะทางกายภาพ สีเปลือกกับสีเนื้อขนมหึ่ง ปริมาณกับขนาดรูพรุน และลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมหึ่ง) โดยใช้การบ่มเป็นเวลา 45 นาที อบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที และสำหรับการศึกษาเวลาการบ่มทำโดยเพิ่มเวลาบ่มเป็น 60 นาที และในส่วนของผลอุณหภูมิในการอบทำโดยเพิ่มอุณหภูมิเป็น 200 องศาเซลเซียส ทั้งสองสภาวะนี้ทำในขนมหึ่งที่เติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น 5% ผลการวิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น ประกอบด้วยความชื้น 3.91%, โปรตีน 65.49% ไขมัน 8.30% เถ้า 10.10% เส้นใย 14.19% และคาร์โบไฮเดรต 1.92% โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ การเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้นส่งผลกระทบสมบัติของแป้งพบว่า ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) และค่าการแตกหัก (Breakdown) ของแป้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ในส่วนการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนของโดพบว่า ค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้การเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้นที่ 5% ทำให้ปริมาณโปรตีนในขนมหึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) และมีแนวโน้มช่วยปรับปรุงโครงสร้างของขนมหึ่งให้แข็งแรงขึ้น ลดขนาดของรูพรุน และเพิ่มจำนวนรูพรุนโดยเฉลี่ย ในส่วนค่าสีของเนื้อและเปลือกขนมหึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ในส่วนลักษณะเนื้อสัมผัสขนมหึ่งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้นที่ 5% ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ( $p \geq 0.05$ ) การเพิ่มระยะเวลาการบ่ม และการเพิ่มอุณหภูมิการอบไม่ได้ส่งผลกระทบต่อปริมาณจำเพาะ ปริมาณกับขนาดรูพรุน และลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมหึ่งอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \geq 0.05$ ) แต่อุณหภูมิการอบที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการสูญเสียความชื้นในระหว่างอบ และการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเปลือกขนมหึ่งที่เพิ่มอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้ การเติมโปรตีนเมล็ด

ฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 10% ทำให้ขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้น ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความต้านทานการเคี้ยว (Chewiness) ของขนมปังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) สอดคล้องกับปริมาณจำเพาะของขนมปังที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ดังนั้นการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5% มีความเหมาะสมในการทำขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชสำปะหลัง ที่เวลาการบ่ม 45 นาที อุณหภูมิอบ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที



620920098 : Major FOOD TECHNOLOGY

Keyword : Corn flour, Tapioca starch, Pumpkin seed protein concentrate, Gluten-free bread

Mr. Thanawit SUKKAEW : Quality Improvement of Gluten-free Bread Made from Corn Flour and Cassava Starch by Adding Pumpkin Seed Protein Concentrate  
Thesis advisor : Assistant Professor Doungjai Thirathumthavorn, Ph.D.

The objective of this study was to investigate the quality improvement of gluten-free bread made from corn flour and cassava starch by adding pumpkin seed protein concentrate (PSPC). The study also examined the influence of proofing time and baking temperature on the physicochemical properties of the bread. The research analyzed the composition of PSPC, changes in the pasting properties of the flour, and the thermal properties of dough with the addition of 5% and 10% PSPC (based on flour weight). Bread quality was also evaluated, including chemical composition and physical characteristics such as crumb and crust color, pore size, cell density, and textural properties. The conditions for the study were a proofing time of 45 minutes and baking at 170 °C for 50 minutes. For the proofing time study, the duration was extended to 60 minutes, while for the baking temperature study, the temperature was increased to 200 °C. Both of these variable conditions were tested on bread containing 5% PSPC. The results showed that PSPC contained 3.91% moisture, 65.49% protein, 8.30% fat, 10.10% ash, 14.19% fiber, and 1.92% carbohydrate on a dry weight basis. The incorporation of PSPC significantly increased the peak viscosity and breakdown viscosity of the flour ( $p < 0.05$ ). For thermal properties, the enthalpy ( $\Delta H$ ) showed a significant decreasing trend with higher amounts of PSPC ( $p < 0.05$ ). Furthermore, adding 5% PSPC significantly increased protein content in the bread and improved its structure, resulting in reduced pore size and an increased average number of pores ( $p < 0.05$ ). The crumb and crust color values also changed significantly with the addition of 5% PSPC ( $p < 0.05$ ). However, the textural properties of the bread with 5% PSPC did not differ significantly from the control sample ( $p \geq 0.05$ ). Extending the proofing time and increasing the baking temperature did not significantly affect the specific volume, pore size, cell density, or texture of the bread ( $p \geq 0.05$ ). Nevertheless, a higher baking temperature significantly

increased moisture loss during baking and increased the crust color values ( $p < 0.05$ ). On the other hand, adding 10% PSPC resulted in larger pore sizes, significantly higher hardness and chewiness values ( $p < 0.05$ ), which was consistent with the reduction in specific volume observed when compared with the control bread. In conclusion, the addition of 5% PSPC is suitable for producing gluten-free bread from corn flour and cassava starch with a proofing time of 45 minutes and a baking temperature of 170 °C for 50 minutes.



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้น ณ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์ ความเมตตา ความช่วยเหลือ และความมีน้ำใจจากบุคคลหลายฝ่าย ผมขอกราบขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงใจ ธีรธรรมถาวร ที่กรุณาให้การสนับสนุน ให้ความรู้ คอยให้คำแนะนำ และคำปรึกษาที่ดี รวมถึงแนวคิดในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์และวิธีการคิดเพื่อแก้ไขปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ จนกระทั่งงานสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร ที่มอบความรู้ทางวิชาการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีอาหารและคำแนะนำที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมถึงขอบพระคุณ รศ.ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์ไผ่ชาติ และ ดร.ศันสนีย์ อุดมระติ ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอบคุณเพื่อน ๆ นักวิทยาศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่ให้ความร่วมมือในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง

ธนวิชญ์ สุขแก้ว



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์การนำไปใช้.....	3
บทที่ 2 .....	4
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ขนมปัง.....	4
2.1.1 ส่วนผสมสำคัญของขนมปังโดยทั่วไป .....	4
2.1.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของขนมปังที่สำคัญระหว่างการบ่มโด .....	6
2.1.3 คุณลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของโด .....	7
2.1.4 องค์ประกอบและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนกลูเตน .....	8
2.2 ขนมปังปราศจากกลูเตน .....	9
2.2.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของแป้ง.....	9
2.2.2 สมบัติของแป้ง.....	11

2.2.3 แป้งปราศจากกลูเตน .....	13
2.2.4 ความแตกต่างของขนมปังแป้งสาลีกับขนมปังปราศจากกลูเตน .....	14
2.3 โพรตีน .....	16
2.3.1 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนที่สำคัญในขนมปัง .....	18
2.3.2 อิทธิพลของโปรตีนต่อสมบัติของแป้งปราศจากกลูเตน .....	22
2.3.3 โพรตีนจากพืชที่ใช้ในขนมปังปราศจากกลูเตน .....	24
2.3.4 โพรตีนสกัดจากเมล็ดพืชทอง .....	25
บทที่ 3 .....	35
วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	35
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	35
3.1.1 วัสดุดิบและสารเคมี .....	35
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	35
3.2 ขั้นตอนและวิธีการศึกษา .....	36
3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเข้มข้นจากเมล็ดพืชทอง (PSPC) .....	36
3.3 การวิเคราะห์สมบัติของแป้งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น .....	36
3.3.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น .....	36
3.3.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของแป้งโดเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น .....	36
3.4 การเตรียมสูตรขนมปังปราศจากกลูเตน .....	37
3.5 การวิเคราะห์ลักษณะของขนมปังปราศจากกลูเตน .....	38
3.5.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี .....	38
3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น .....	38
3.5.3 การวิเคราะห์ % Baking loss ในขนมปังปลอดกลูเตน .....	38

3.5.4 การวิเคราะห์ค่าสีของเนื้อและเปลือกของขนมปังปราศจากกลูเตน .....	38
3.5.5 การวิเคราะห์ขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในขนมปังใช้โปรแกรม ImageJ .....	39
3.5.6 การวิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะของขนมปังปลอดกลูเตน .....	39
3.5.7 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปลอดกลูเตน.....	39
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ .....	39
บทที่ 4 .....	40
ผลทดลองและการอภิปรายผล .....	40
4.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น .....	40
4.1.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น.....	40
4.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น .....	41
4.2.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น.....	41
4.2.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของแป้งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น.....	42
4.3 การวิเคราะห์ลักษณะของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น ..	43
4.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขนมปังเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น ....	43
4.3.2 ลักษณะทางกายภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น.....	44
4.3.3 การวิเคราะห์ขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น.....	47
4.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น .....	48
บทที่ 5 .....	50
สรุป.....	50
ข้อเสนอแนะ.....	51

รายการอ้างอิง ..... 52

ภาคผนวก ก..... 62

ประวัติผู้เขียน..... 65



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กลูเตน (Gluten) เป็นโปรตีนในแป้งที่สามารถจับตัวเป็นโครงสร้างของโดที่มีสมบัติด้านความเหนียวและยืดหยุ่น โดยการเกิดพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโปรตีน (Gallagher et al., 2004) ซึ่งประกอบด้วย โปรตีนกลูเตนิน (glutenin) และ โปรตีนไกลอะดีน (gliadin) จัดเป็นโปรตีนที่สามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ ควบคุมลักษณะ ความชื้นเหนียว และยืดหยุ่นของโดขนมปัง (Xu et al., 2007) และมีชื่อเรียกแตกต่างกันไปในธัญพืชแต่ละชนิด เช่น ไกลอะดีน ในข้าวสาลี ฮอร์ดิน ในข้าวบาเลย์ และเซคาร์ลินในข้าวไรย์ เนื่องจากนี้ยังพบว่าโปรตีนไกลอะดีนมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันและเป็นพิษต่อผู้ป่วยที่เป็นโรคแพ้กลูเตน (Celiac Disease)(Elli et al., 2003) ซึ่งสาเหตุของโรคอาจเกิดจากพันธุกรรม หรือจากการกระตุ้นโดยสารที่อยู่ในสภาวะแวดล้อม

โรคแพ้กลูเตน (Celiac Disease) เป็นอาการที่ร่างกายตอบสนองต่อกลูเตนเหมือนเป็นสิ่งแปลกปลอม ระบบภูมิคุ้มกันของผู้ที่แพ้กลูเตนจะผลิตแอนติบอดีออกมาตอบสนองต่อกลูเตนที่เกาะอยู่ในผนังลำไส้ แล้วจะทำให้วิลไล (Villi) ที่ทำหน้าที่ดูดซึมสารอาหาร เกิดอักเสบ บวมแดง เป็นสาเหตุของอาการต่าง ๆ เช่น อาการปวดท้อง คลื่นไส้มีลมในกระเพาะ เจ็บป่วย ท้องเสีย ทั้งนี้โรคแพ้กลูเตนจัดเป็นโรคเรื้อรังตลอดชีวิต ปัจจุบันยังไม่มียารักษาวิธีป้องกันที่ดีที่สุด คือ หลีกเลี่ยงการรับประทานอาหารที่มีส่วนผสมของกลูเตน หรือ รับประทานอาหารชนิดปราศจากกลูเตน และโดยทั่วไปผู้ป่วยที่แพ้กลูเตน (Celiac Disease) ไม่ควรบริโภคอาหารที่มีกลูเตน เกิน 20 มิลลิกรัมต่อวัน (WHO/FAO, 2017)

ในผลิตภัณฑ์ที่ปราศจากกลูเตนจะมีลักษณะเป็นแบบเตอรัมากกว่าที่จะเป็นโดขนมปัง (Gallagher et al., 2004; Torbica et al., 2010) ดังนั้นก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มของขนมปังจึงไม่เสถียรเนื่องจากโครงสร้างของแบบเตอรัขาดความเหนียวของกลูเตนซึ่งลักษณะพิเศษของแป้งสาลีในการทำขนมปัง โดยส่วนใหญ่มาจากความสามารถในการสร้างโครงสร้างแบบ mesoscopic (Fessas et al., 2008) นอกจากนี้การเติมโปรตีนยังช่วยปรับปรุงให้เกิดสีน้ำตาลในขนมปังปราศจากกลูเตนได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับขนมปังที่ปราศจากกลูเตนที่ไม่มีการเติมโปรตีน ซึ่งสาเหตุหลักมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดของโปรตีนกับน้ำตาลในแป้ง (Nunes et al., 2009)

โปรตีนจากเมล็ดพืชทอง (PSP) มีศักยภาพที่ดีในการนำไปใช้ในสูตรอาหารเนื่องจากมีผลส่งเสริมสุขภาพ เช่น ฤทธิ์ต้านมะเร็ง การป้องกันการขาดโปรตีน และยับยั้งการแข็งตัวของเลือด (Bučko et al., 2015) นอกจากนี้ ยังแสดงฤทธิ์ต้านเบาหวาน (Quanhong et al., 2003) ด้านเชื้อรา ด้านแบคทีเรีย ด้านการอักเสบ (Caili et al., 2006) และด้านอนุมูลอิสระ (Nkosi et al., 2006)

มีรายงานอาการแพ้เมล็ดฟักทองมีน้อยมากในผู้ป่วยบางราย (Kotecka-Majchrzak et al., 2020) เมื่อเทียบกับโปรตีนชนิดอื่น ๆ เช่น เวย์โปรตีน โปรตีนจากถั่ว เป็นต้น นอกจากนี้จากการศึกษาการเติมโปรตีนสกัดเข้มข้นจากเมล็ดเทียนดำ เมล็ดถั่ว และเมล็ดฟักทอง ในขนมปังปราศจากกลูเตนพบว่า การเติมน้ำในขนมปัง 8% และ 15 % ขนมปังที่เติมโปรตีนสกัดเข้มข้นจากเมล็ดฟักทองมีปริมาณเพิ่มขึ้นสูงชันเมื่อเทียบกับตัวควบคุม โปรตีนสกัดเข้มข้นจากเมล็ดเทียนดำ และเมล็ดถั่ว (Coşkun et al., 2020) การเพิ่มขึ้นของปริมาณขนมปัง อาจเนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำของโปรตีน (Sánchez-Vioque et al., 1999)

จากการศึกษาของ Vinayashree and Vasu (2021) พบว่า โปรตีนเมล็ดฟักทองไอโซเลทนั้นมีค่า อัตราส่วนประสิทธิภาพของโปรตีน (PER) ที่ 2.70 สูงกว่าโปรตีนจากถั่วพูและ ถั่วพีเจียน ซึ่งเท่ากับ 1.21 และ 1.82 ตามลำดับ (Salunkhe & Kadam, 1989) ค่า PER ของโปรตีนเมล็ดฟักทองไอโซเลทยังใกล้เคียงกับโปรตีนจากถั่วลิ้นเต่า เมล็ดพืชตระกูลถั่วดิบ เมล็ดถั่วป็น และเมล็ดบัว ซึ่งค่า PER ที่สูงกว่า 2.0 จัดเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพสูง (Friedman, 1996)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาสมบัติเคมีกายภาพของแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชสำปะหลังเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นและศึกษาผลของการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น เวลาการบ่ม และอุณหภูมิในการอบต่อคุณลักษณะทางเคมีกายภาพของขนมปัง และเป็นแนวทางในการพัฒนา และเพิ่มประสิทธิภาพให้กับขนมปังผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตนอื่น ๆ ต่อไป



## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสมบัติเคมีกายภาพของแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชสำปะหลังเมื่อเติมโปรตีน เมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น เวลา และอุณหภูมิในการอบ ต่อดัชนีลักษณะทางเคมีกายภาพของขนมปังปราศจากกลูเตน

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1.3.1 การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมีกายภาพในแป้ง ขนมปังปราศจากกลูเตน

1.3.2 ผลของเวลาบ่ม และอุณหภูมิในการอบส่งผลต่อการเปลี่ยนเคมีกายภาพของขนมปัง ปราศจากกลูเตนที่เติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1.4.2 การศึกษาสมบัติเคมีกายภาพของแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชสำปะหลังเมื่อเติมโปรตีน เมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น 5% และ 10%

1.4.3 การศึกษาผลต่อการเปลี่ยนเคมีกายภาพขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมโปรตีนเมล็ด ฟักทองสกัดเข้มข้น 5% และ 10%

1.4.4 การศึกษาผลของเวลาบ่ม และอุณหภูมิในการอบส่งผลต่อการเปลี่ยนเคมีกายภาพของ ขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น 5%

## 1.5 ประโยชน์การนำไปใช้

สามารถนำโปรตีนจากเมล็ดฟักทองไปใช้กับขนมปังและผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตนอื่น ๆ เพื่อเสริมคุณค่าทางโภชนาการ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ขนมหปัง

ขนมหปังปกติโดยทั่วไปมีส่วนผสมหลักได้แก่ แป้งสาลี น้ำ เกลือ และยีสต์ ส่วนผสมทั้ง 4 อย่างนี้ จัดเป็นส่วนผสมหลัก ที่ต้องมีในขนมหปังทั่วไปนอกจากส่วนผสมที่กล่าวไปนั้น อาจใส่สารอื่นเพื่อปรับปรุงลักษณะของขนมหปังให้แตกต่างไปตามความต้องการของผู้บริโภค ได้แก่ ไขมัน แป้งมอลต์ แป้งถั่วเหลือง ธัญชาติอื่น ๆ อาหารยีสต์ สารที่ทำให้น้ำกับน้ำมันเข้ากันได้ (emulsifiers) น้ำมันผลิตภัณฑ์จากน้ำมัน และผลไม้ เป็นต้น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2540)

##### 2.1.1 ส่วนผสมสำคัญของขนมหปังโดยทั่วไป

###### แป้งสาลี

แป้งสาลีที่ใช้ทำขนมหปัง เป็นแป้งโม้จากข้าวสาลีธรรมดาศนิตแข็งพวก Hard Red Spring หรือ Hard Red Winter ซึ่งเป็นข้าวสาลีที่มีเปอร์เซ็นต์โปรตีนสูง 12-14% โดยทั่วไปแป้งที่ใช้จะมีสีขาวนวล มีความชื้นไม่เกิน 14% เป็นแป้งที่ดูดซึมน้ำได้มาก 60-65% มีเถ้า 0.40-0.50% และ โปรตีน 10-16% มีลักษณะทางกายภาพเหมาะสม หน้าที่ของแป้งสาลีในขนมหปังคือ เป็นโครงสร้างสำคัญ มีความยืดหยุ่นในขณะผสม ขึ้นฟูขณะหมัก และในที่สุดแข็งตัวเป็นโครงสร้างของขนมหปัง เนื้อนุ่มเหนียวต่อการเคี้ยว เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงเกิดจากองค์ประกอบทางเคมีในแป้งสาลี ที่สำคัญคือ สตาร์ช กลูเตน และรวมทั้งองค์ประกอบอื่น เช่น ไขมัน เพนโทแซน น้ำตาล และอื่น ๆ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนการผสมโดของขนมหปัง (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2540)

###### น้ำ

น้ำเป็นวัตถุดิบที่สำคัญรองลงมาจากแป้ง ซึ่งช่วยทำให้เกิดโดของขนมหปัง นอกจากนี้ยังมีผลต่อลักษณะของโดโดยตรง ช่วยให้โดมีความนุ่ม ยืดหยุ่น และไม่ติดมือ ชนิดของน้ำจำแนกตามปริมาณของอินทรีย์สาร และเกลือแร่ที่ละลายอยู่ในน้ำเป็น 6 ชนิดด้วยกันคือ

1. น้ำอ่อน (Soft water) เป็นน้ำที่มีปริมาณของแร่ธาตุละลายอยู่ต่ำ
2. น้ำกระด้าง(Hard water) จะมีพวกแร่ธาตุละลายอยู่ในปริมาณสูงน้ำกระด้างนี้อาจเป็นน้ำกระด้างชั่วคราว (Temperary hardness) หรือน้ำกระด้างถาวร (Permanent hardness)
3. น้ำด่าง (Alkaline water) เป็นน้ำที่มีพวกโซเดียมไบคาร์บอเนตอยู่

4. น้ำที่เป็นกรด (Acid water) มักพบในที่ ๆ เป็นเหมืองแร่ และเป็นน้ำที่ได้รับจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม น้ำที่มีความเป็นกรดนั้นไม่ค่อยมีในธรรมชาติ
5. น้ำเกลือ (Saline water) จะมีพวกเกลือปนอยู่บ้าง ทำให้มีรสเค็ม
6. น้ำที่มีสารแขวนลอย (Turbid water) น้ำทุกชนิดที่กล่าวมาข้างต้นอาจเป็นน้ำประเภทนี้ได้โดยเกิดมีสารแขวนลอยเช่น ดินเหนียว ทราลอะเอียต ตะกอน หรืออื่น ๆ ปนอยู่

การใช้น้ำที่เป็นน้ำกระด้างปานกลาง ซึ่งมีแร่ธาตุบางชนิดปนอยู่อย่างเหมาะสม จะช่วยให้โดมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นตัวดี ถ้าน้ำกระด้างมากหรือถาวร จะทำให้โดแข็งเกินไป ส่วนน้ำอ่อนก็มีผลทำให้โदनุ่มเกินไป อาจฉะติดมือง่าย ดังนั้นการตรวจสอบคุณภาพของน้ำก่อนนำไปใช้ทำขนมปังจึงจำเป็น เพื่อการปรับปรุงแก้ไขสภาพน้ำให้เหมาะสม โดยใช้เกลือ และอาหารยีสต์ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ เข้าช่วย เช่น ถ้าน้ำอ่อนมาก ก็ควรเพิ่มเกลือ และอาหารยีสต์ในสูตร แต่ถ้าน้ำกระด้างมากก็ลดเกลือ ลดอาหารยีสต์และเพิ่มปริมาณยีสต์ พร้อมทั้งใช้เวลาในการหมักนานขึ้น เป็นต้น โดยปริมาณน้ำที่เติมในสูตร จะอยู่ในช่วง 55-56% ขึ้นอยู่กับชนิดของขนมปัง (จิตธนา แจ่มเมฆ และ อรอนงค์ นัยวิกุล, 2539)

น้ำมีทำหน้าที่คือ ช่วยละลายเกลือ ยีสต์ หรือส่วนผสมอื่น ให้สามารถผสมเข้าไปในเนื้อโโดอย่างสม่ำเสมอ หลังจากการนวดแบ่งกับน้ำจนกลายเป็นโโด จะมีกลูเตนเกิดขึ้น ให้ความยืดหยุ่นดี มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของยีสต์ ซึ่งทำงานได้เนื่องจากน้ำในส่วนผสม และผลิตภัณฑ์ออกมาทำให้โโดพองฟูขึ้นขณะหมัก เมื่อนำเข้าอบ น้ำมีส่วนให้สตาร์ชเกิดเจลลิตีเนสเซชันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น กลูเตนขยายตัว และส่วนอื่นเปลี่ยนสภาพจากดิบเป็นสุก และคงรูปร่างของขนมปัง ส่วนน้ำที่ยังเหลืออยู่จะทำให้ขนมปังนุ่มเมื่อใช้มือกด และเนื้อขนมปังเหนียวเคี้ยวอร่อย (ณัฐนิชา ทวีมาก, 2020)

### เกลือ

เกลือที่เติมลงไปในส่วนผสมขนมปัง เพื่อจุดประสงค์ 3 ประการที่สำคัญคือ ทำให้ขนมปังมีกลิ่นรสเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ประการที่สองคือ ช่วยให้กลูเตนแข็งแรงและคงทนเพิ่มขึ้น ทำให้โโดไม่ฉะ และ ประการที่สามคือ มีส่วนในการควบคุมการทำงานของยีสต์ให้ช้าลงมีการหมักนานขึ้น ทำให้ขนมปังขึ้นฟูสม่ำเสมอ และมีโครงสร้างดี โดยปริมาณเกลือที่ใส่ควรอยู่ระหว่าง 1.75-2.2% (ณัฐนิชา ทวีมาก, 2020)

## ยีสต์

ยีสต์เป็นสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharomyces cerevisiae* หรือมีชื่อทั่วไปว่า ยีสต์สำหรับทำขนมอบ (Bakers' yeast) ซึ่งมีหน้าที่หลักในส่วนผสมขนมปัง 3 อย่าง คือ ช่วยให้เกิดก๊าซภายในโด ปรับสภาพโดให้เหมาะสม และให้กลิ่นรสแก่ขนมปัง ยีสต์ที่ผสมอยู่ในโดจะเริ่มเติบโตเนื่องจากมีน้ำกับอากาศจากการผสม และน้ำตาลซึ่งยีสต์ใช้เป็นสารอาหารจากโด ทำให้ยีสต์เพิ่มจำนวนมากขึ้น ทำให้ภายในโดมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดันให้โดพองตัวขึ้นจากเดิมหลายเท่าในขณะเดียวกัน ก็ปรับสภาพโด ให้ยึดตัว มีก๊าซแทรกอยู่พร้อมทั้งให้กลิ่นหมักของแอลกอฮอล์ ร่วมกับกลิ่นอื่น ๆ เมื่อนำโดเข้าเตาอบ ขณะที่ความร้อนยังไม่แผ่กระจายเข้าสู่โดมากนัก ยีสต์จะยังทำงานเป็นเหตุให้โดขึ้นฟูในเตาอบอีกระยะหนึ่ง จนในที่สุด ความร้อนกระจายทั่วก้อนโด ทำให้ยีสต์ตายและขนมปังคงรูปร่างขึ้นฟู พร้อมกับมีกลิ่นหมัก กลิ่นยีสต์และสารอื่น เป็นกลิ่นเฉพาะของขนมปังที่ผู้บริโภคพอใจ (ณัฐนิชา ทวีมาก, 2020)

### 2.1.2 การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพของขนมปังที่สำคัญระหว่างการบ่มโด

การบ่มโด จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีโดยเอนไซม์ และยีสต์ ทำให้โดมีสภาพขึ้นฟู จากการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในโด การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญเริ่มจากเอนไซม์ย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต คือแอลฟา-และบีตา-อะมิเลส รวมทั้งเอนไซม์อื่น เช่น ไดเอสเทส มอลเทสอินเวอร์เทส ไชเมส ซึ่งเป็นเอนไซม์หลายชนิด (ประมาณ 14 ชนิด) ที่มีในยีสต์ ทำการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตเสียหายน้อยๆ จะย่อยได้มากและเร็วทำให้ได้น้ำตาลกลูโคส ซึ่งกลุ่มเอนไซม์ไซเมสในยีสต์ จะแปรสภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ พร้อมกับกลิ่นแอลกอฮอล์ ทำให้สภาพของโดเปลี่ยนไป มีความฟูตัวขึ้น ช่วยให้เก็บก๊าซไว้ได้ตั้งนั้นจึงมีความสัมพันธ์กันระหว่างการเกิดก๊าซและการเก็บก๊าซของโด ควรจะเหมาะสมกัน เพื่อให้ได้ขนมปังเนื้อนุ่ม เป็นรูพรุน ซึ่งควบคุมได้จากปริมาณเอนไซม์หรือปฏิกิริยาการหมักกับระยะเวลาที่ใช้หมักต้องพอดี จึงจะได้ลักษณะโดหลังหมักที่ดี ซึ่งโดยทั่วไปใน ระหว่างการบ่มถึงระยะหนึ่งจะมีการนำโดมาไล่ลม (punching) โดยการนวดโดให้ยุบตัวลงซึ่งเป็นการไล่ก๊าซออกจากโด แล้วนวดให้โดมีโครงสร้างแข็งแรงอีกครั้ง เพิ่มอากาศเข้าไปในโด เพื่อให้ยีสต์ได้ใช้ในการเจริญเติบโต ช่วยให้โดมีความยืดหยุ่นในการอุมก๊าซได้ดีขึ้นเมื่อทำการหมักต่อไปอีก จะได้ลักษณะโดดี มีโครงสร้างเป็นร่างแหตั้งยัดได้ ไม่แฉะ (ณัฐนิชา ทวีมาก, 2020)

### การอบ

การอบเป็นขั้นตอนสุดท้าย และสำคัญที่สุดในการทำขนมปัง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของโดที่ยังดิบให้สุกโดยความร้อน จนได้ขนมปังที่กินได้ในที่สุด ปัจจัยสำคัญในการอบ คือ การควบคุมอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์และเวลาให้เหมาะสม เพราะมีผลต่อการสุกของขนมปัง โดยเฉพาะเนื้อในส่วนกลางของขนมปัง ควรจะสุกพอดีกับเปลือกนอกเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลสวย มีกลิ่นรสดี ซึ่งทั่วไปแล้วเตาอบจะมีอุณหภูมิระหว่าง 191-232 °C โดยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และเคมีภายในโดขณะ

อยู่ในเตาอบนั้นจะเริ่มจากความร้อนภายในเตาแต่กระจายไปยังโด กระตุ้นให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีแรงดัน น้ำในโดกลายเป็นไอ และแอลกอฮอล์ขยายตัว ช่วยกันดันโครงร่างของโด ให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกัน ความร้อนในช่วงแรก จะช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์และยีสต์ให้เกิดกระบวนการหมักเพิ่มขึ้นอีก มีก๊าซและแอลกอฮอล์เสริมในการขยายตัวของโด เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น สตาร์ชภายในโด จะเกิดการพองตัวและกลายเป็นเจล ในขณะที่ขนมปังสุกจะมีองค์ประกอบของ สตาร์ชที่เปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะอะไมโลสจะเคลื่อนที่ออกจากเม็ดสตาร์ช เมื่อทำให้ขนมปังเย็นและทิ้งไว้นาน อะไมโลสจะกลับมาจับกันอีกครั้ง ทำให้มีลักษณะขุ่นเป็นตะกอนขาวซึ่งถือเป็นลักษณะการเสื่อมเสียที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับอย่างหนึ่ง ในระหว่างที่สตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์จะดึงน้ำจากโดมา ทำให้กลูเตนสูญเสียน้ำเปลี่ยนสภาพจากเดิมที่เคยยืดหยุ่นกลับแข็งตัวขึ้น เป็นโครงร่างของเซลล์ มีรูพรุน ผันเซลล์บางเป็นใยเชื่อมกัน รูปร่าง กลมบ้าง กระจายทั่วก้อนขนมปังในขณะที่เอนไซม์และยีสต์ค่อยๆ ตายไป เนื่องจากทนความร้อนเพิ่มมากขึ้นไม่ได้ ส่วนผิวนอกของขนมปัง ก็จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาลทั้ง 2 แบบ คือ การเกิดคาราเมล เนื่องจากความร้อนทำให้น้ำตาลที่ผิวโด เปลี่ยนสภาพให้สีน้ำตาล และการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) จากน้ำตาลและกรดอะมิโน ให้สารสีน้ำตาลเรียกว่า มิลานอยดิน (Melanoidin) พร้อมกันนี้จะเกิดสารให้กลิ่นรสแก่ขนมปังและในที่สุดขนมปังก็สุก โดยมีน้ำหนักลดลงจากเดิม 9-10% เนื่องจากการระเหยของน้ำและสารอื่น ๆ (จิตรนา แจ่มเมฆ และ อรอนงค์ นัยวิกุล, 2539)

### 2.1.3 คุณลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของโด

เมื่อนวดแป้งกับน้ำ จะเกิดการจับกันของแป้งกับน้ำจะกลายเป็นก้อนโด ซึ่งมีสมบัติของความยืดหยุ่น จากลักษณะการยืดหยุ่น (elastic) ความหนืดขึ้น (viscous) และลักษณะของพลาสติก (plastic) ร่วมกัน ซึ่งเป็นผลจากความเปลี่ยนแปลงภายในของแป้ง ทั้งในทางเคมี กายภาพและชีวภาพ เรียกว่า การเกิดรีโอโลยีของโด (dough rheology) หรือวิทยาการเสกของโด ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเค้น (stress) แรงเฉือน (shear) และแรงดึง (tensile) ต่อโด ในระยะเวลาและอุณหภูมิเหมาะสม จึงจะได้ได้ลักษณะยืดหยุ่นดี ซึ่งทำให้เกิดการผิดรูป (deformation) แบบนอน-นิวโทเนียน (non-newtonian) มีลักษณะผสมผสานระหว่างความหนืดและความยืดหยุ่น (visco-elactic) เป็นผลให้โครงร่างและองค์ประกอบทางเคมีในโดเปลี่ยนแปลง โดยมีน้ำที่เติมลงไปเป็นตัวกลางสำคัญเมื่อเติมน้ำลงในแป้งนั้น น้ำจะไม่ซึมเข้าไปในแป้งทันที แต่จะเกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ บนผิวแป้ง พอลอกรางขนาดหรือใช้เครื่องผสม เกิดแรงเค้นและแรงเฉือน ทำให้น้ำซึมเข้าไปในแป้ง อยู่ระหว่างเม็ดแป้งเกิดแรงดึงดูดระหว่างแป้งกับน้ำ เป็นผลจากโปรตีนในองค์ประกอบของแป้ง เกิดการรวมตัวของโปรตีน โดยมีน้ำเป็นตัวเชื่อม กลายเป็นร่างแหของกลูเตน คลุมเม็ดสตาร์ชซึ่งจะยังไม่ดูดซึมน้ำที่อุณหภูมิของการผสมโดนี้ ขณะผสมจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกลูเตนไปเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่กลูเตนมีความยืดหยุ่นเหมาะสมทำให้โดไม่ติดมือ หรือติดภาชนะที่ใช้ผสม สามารถดึงให้เป็นฟิล์มบาง ๆ ได้ ถ้าทำการผสม

ต่อไปอีก จะทำให้เกิดแรงเฉือนและแรงเค้นรวมทั้งแรงดึงร่วมกัน มีผลให้กลูเตนฟิล์มหมดความยืดหยุ่นตัว ทำให้ขาดลงเป็นสาย โดเหนอะหนะติดมือและไหลได้ เนื่องจากการผสมมากเกินไป ปริมาณน้ำที่เติมให้ได้ได้ที่เหมาะสมนั้น ต้องพิจารณาจากปริมาณความชื้นเดิมของแป้ง ซึ่งเป็นปริมาณน้ำชนิดที่เกาะเกี่ยวกับสารอื่นรวมกับน้ำอิสระ โดยทั่วไปมีอยู่ประมาณ 14% ดังนั้นน้ำที่เติมลงไป จะช่วยให้เกิดการเกาะเกี่ยวของน้ำกับสารอื่นจนถึง 25% ของความชื้นหรือเท่ากับ 0.33 กรัมของน้ำ ต่อน้ำหนักแป้ง 1 กรัม และเมื่อมีน้ำถึง 0.54 กรัมของน้ำต่อน้ำหนักแป้ง 1 กรัม (ประมาณ 35% ของความชื้น) โดจะมีลักษณะที่เหมาะสม โดยมีส่วนของน้ำอิสระประมาณ 10% (0.11 กรัมของน้ำต่อน้ำหนักแป้ง 1 กรัม) และน้ำอิสระที่เพิ่มขึ้นนี้จะมีผลทำให้โดอ่อนนุ่ม และมีความลื่นไม่ติดมือ และสามารถยืดเป็นฟิล์มได้ (จิตธนา แจ่มเมฆ & อรอนงค์ นัยวิกุล, 2539)

#### 2.1.4 องค์ประกอบและสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนกลูเตน

กลูเตน (Gluten) เป็นโปรตีนเชิงซ้อนที่พบมากในธัญพืชตระกูลข้าวสาลี มีองค์ประกอบหลักคือโปรตีนสองชนิด ได้แก่ ไกลอะดีน (gliadin) และ กลูเทนิน (glutenin) ซึ่งมีบทบาทต่างกันเชิงโครงสร้างของแป้ง โดยไกลอะดีนมีลักษณะเหนียวหนืดและละลายในสารผสมแอลกอฮอล์-น้ำ ช่วยเสริมความเหนียวแน่นและความสามารถในการไหลของแป้ง ในขณะที่กลูเทนินไม่ละลายน้ำแต่มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงและมีโครงสร้างเป็นเส้นใย ทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงและความยืดหยุ่นให้กับเนื้อแป้ง กลไกการทำงานของกลูเตนเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไกลอะดีนและกลูเทนิน ผ่านพันธะหลากหลายประเภท เช่น พันธะไดซัลไฟด์ (covalent disulfide bonds) และพันธะอื่น ๆ เช่น พันธะไฮโดรเจนและแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิก ซึ่งช่วยสร้างโครงข่ายโปรตีนที่มีสมบัติเชิงหน้าที่โดดเด่นหลายประการในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะในกระบวนการทำเบเกอรี่ กลูเตนแสดงความสามารถด้าน viscoelasticity กล่าวคือ กลูเตนสามารถยืดขยายและคืนรูปได้ดี ซึ่งจำเป็นต่อการขึ้นรูปแป้งและการกักเก็บก๊าซจากการหมักของยีสต์ (Zhang et al., 2023)

นอกจากนี้กลูเตนยังมีคุณสมบัติในการกักเก็บสูง ช่วยรักษาความชื้นของผลิตภัณฑ์อบ และสามารถสร้างฟอง (foaming) และอิมัลชัน (emulsification) ได้ดีในบางผลิตภัณฑ์ เช่น เค้กหรือขนมอบบางชนิด รวมถึงมีความสามารถในการเกิดเจล (gelation) และทำหน้าที่เป็นสารยึดเหนี่ยว (binder) ซึ่งช่วยให้ส่วนผสมต่าง ๆ เกาะกันเป็นเนื้อเดียว กลูเตนจึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารอย่างกว้างขวาง ทั้งในผลิตภัณฑ์จากข้าวสาลี เช่น ขนมปัง พาสต้า เส้นก๋วยเตี๋ยว และเบเกอรี่ชนิดต่าง ๆ (Uthayakumaran et al., 2002) ตลอดจนเป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสในอาหารแปรรูป ใช้ทำฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากโปรตีน นอกจากนี้ ในผลิตภัณฑ์อาหารเฉพาะอาหารปราศจากกลูเตน (gluten-free products) พยายามเลียนแบบให้โครงสร้างมีลักษณะคล้ายกับกลูเตน โดยจำเป็นต้องใช้สารกลุ่ม hydrocolloids พืชโปรตีนสูง และ เทคโนโลยีอื่นๆ เพื่อทดแทน โครงสร้างของกลูเตน (Brites et al., 2018)

## 2.2 ขนมหึ่งปราศจากกลูเตน

ขนมหึ่งปราศจากกลูเตนจะไม่มีโปรตีนที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างสามมิติ และมักจะใช้จากสตาร์ช เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด และสตาร์ชมันสำปะหลังเป็นต้น เพื่อช่วยให้ระหว่งการอบแป้งเกิดการพองตัว (gelatinization) และมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีรายงานการใช้แป้งชนิดต่าง ๆ เพื่อผสมกันในการใช้ทำขนมหึ่ง ดังแสดงในตารางที่ 1 การใช้แป้งปราศจากกลูเตนชนิดต่าง ๆ เพื่อทำขนมหึ่งปราศจากกลูเตน (Houben et al., 2012) นอกจากนี้ขนมหึ่งปราศจากกลูเตนที่ไม่มีโครงสร้างโปรตีนจากกลูเตน มีการสูญเสียความชื้นสูงกว่า และการคืนตัวของสตาร์ช (retrogradation) ส่งผลให้ขนมหึ่งปราศจากกลูเตนมีเนื้อขนมหึ่งที่แน่นกว่าขนมหึ่งจากข้าวสาลี (Carini et al., 2017) นอกจากนี้พบว่า การผสมแป้งมันสำปะหลังในสูตร 10 ถึง 20 % สามารถช่วยเพิ่มปริมาณของขนมหึ่งปราศจากกลูเตนได้ดีขึ้น (Sigüenza-Andrés et al., 2021) ในปัจจุบันงานวิจัยการศึกษาเกี่ยวกับขนมหึ่งปราศจากกลูเตนเพิ่มขึ้นอย่างมาก และมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อขนมหึ่งกลูเตนในหลาย ๆ ปัจจัย เช่น การศึกษาชนิดของแป้ง อัตราส่วนและสารปราศจากกลูเตนอื่น ๆ เป็นต้น ที่ช่วยปรับปรุงขนมหึ่งปราศจากกลูเตนที่ดีมากขึ้น

ตารางที่ 1 การใช้แป้งปราศจากกลูเตนชนิดต่าง ๆ เพื่อทำขนมหึ่งปราศจากกลูเตน

แป้งปราศจากกลูเตน	อัตราส่วน	อ้างอิง
แป้งข้าว:สตาร์ชข้าวโพด	70:30	Zorzi et al. (2020)
แป้งข้าว:สตาร์ชข้าวโพด	50:50	Pico et al. (2019)
แป้งข้าว:แป้งข้าวโพด:แป้งควินัว	40:40:20	Jagelaviciute and Cizeikiene (2021)
สตาร์ชข้าวโพด:สตาร์ชมันฝรั่ง	20:80	Ziobro et al. (2013)
แป้งข้าว:แป้งควินัว:แป้งบัควีท	30:20:20	Sadeghian Motahar et al. (2021)

### 2.2.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของแป้ง

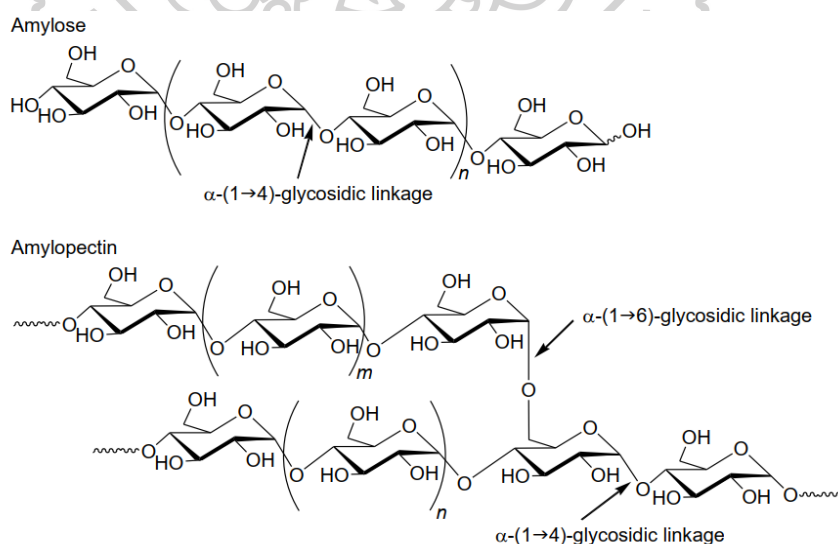
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน (polysaccharide) มีลักษณะเป็นผงสีขาวนวล ไม่มีรส ไม่ละลายในน้ำเย็น แอลกอฮอล์ หรือตัวทำละลายอื่นๆ สูตรเคมีพื้นฐานของโมเลกุลแป้งคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  ประกอบด้วยโครงสร้างน้ำตาลกลูโคสจำนวนมากเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) (ภาพที่ 1)

แป้งประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ อะไมโลส (Amylose) เป็นโซ่ตรง (linear polymer) โมเลกุลของกลูโคสเชื่อมกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic bond และ อะไมโลเพคติน (Amylopectin) เป็นโพลิเมอร์แบบแตกแขนง (branched polymer) เป็นโซ่หลักเชื่อมด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4 glycosidic bond และมีแขนงเชื่อมด้วย  $\alpha$ -1,6 glycosidic (Kadokawa, 2012) ซึ่งปริมาณและสัดส่วนของอะไมโลสกับอะไมโลเพคตินจะขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง และส่งผลต่อสมบัติของแป้ง (ตารางที่ 2) ตามสัดส่วนของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินที่มีอยู่ในแป้งด้วย

ตารางที่ 2 สมบัติที่สำคัญของของอะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

คุณสมบัติ	อะไมโลส (Amylose)	อะไมโลเพคติน (Amylopectin)
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของกลูโคส	สารประกอบของกลูโคส
พันธะที่จับยึด	$\alpha$ -1,4	$\alpha$ -1,4 และ $\alpha$ -1,6
ขนาด	200-2,000 กลูโคส	> 10,000 กลูโคส
การละลายน้ำ	ละลายได้น้อย	ละลายได้ดีกว่าอะไมโลส
ปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	ให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะเป็นแผ่นวุ้นแข็ง	ไม่เป็นแผ่นวุ้นแข็ง

ที่มา : Kadokawa (2012)



ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างของอะไมโลส (Amylose) และ อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

ที่มา : Kadokawa (2012)

## 2.2.2 สมบัติของแป้ง

การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมีความสำคัญ เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อการแปรรูป คุณภาพ และสมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งมุ่งเน้นไปสมบัติหลักของแป้ง ได้แก่ การดูดซับน้ำ การพองตัว การละลาย ความหนืดและการเกิดเจลลาติไนเซชัน (Gelatinization) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เช่น Differential Scanning Calorimetry (DSC) และ Rapid Visco Analyser (RVA) เป็นต้น (Shoukat et al., 2025)

### การดูดซับน้ำ (Water Absorption)

การดูดซับน้ำของแป้งหมายถึงความสามารถของเม็ดแป้งในการดูดน้ำเข้าสู่โครงสร้างภายในเมื่อสัมผัสกับของเหลว กระบวนการนี้มีความสำคัญต่อคุณสมบัติด้านการแปรรูปอาหาร เช่น ความชุ่มชื้น ความนุ่ม และความสามารถในการกักเก็บน้ำในผลิตภัณฑ์ แป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกตินสูงมักดูดซับน้ำได้มากกว่า เนื่องจากโครงสร้างที่มีแขนจำนวนมากทำให้เกิดพื้นที่ผิวในการจับน้ำได้ดี ขณะที่แป้งที่มีอะมิโลสสูงจะดูดซับน้ำได้ต่ำกว่าและเกิดเจลที่มีความแน่นมากกว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำ ได้แก่ ขนาดเม็ดแป้ง อัตราส่วนอะมิโลสต่ออะมิโลเพกติน และปริมาณสารประกอบที่เกี่ยวข้อง เช่น โปรตีนหรือไขมันที่เคลือบอยู่บนผิวเม็ดแป้ง ซึ่งสามารถยับยั้งการแทรกซึมของน้ำได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

### การพองตัว (Swelling)

เมื่อได้รับความร้อนในสภาวะที่มีน้ำ เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวจากการที่พันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโพลีแซ็กคาไรด์ถูกทำลายภายในเม็ดแป้งพองตัว การพองตัวนี้ทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการผลิตอาหารประเภทซอส ซุป หรือผลิตภัณฑ์อบการพองตัวขึ้นกับอุณหภูมิและปริมาณน้ำ ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป เม็ดแป้งอาจแตก (granule rupture) ทำให้โมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพกตินกระจายออกมาในสารละลาย ส่งผลต่อการเกิดเจล (Jia et al., 2023)

### การละลาย (Solubility)

การละลายของแป้งเกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของโมเลกุล โดยเฉพาะอะมิโลสที่สามารถเคลื่อนที่ออกจากเม็ดแป้งและเข้าสู่สารละลายเมื่อได้รับความร้อนสูงขึ้น ระดับการละลายเป็นตัวชี้วัดการสลายตัวของโครงสร้างเม็ดแป้ง ซึ่งส่งผลต่อความใส ความคงตัว และคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหาร (Shoukat et al., 2025)

### ความหนืดและการเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากที่สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจน ทำให้มีสมบัติชอบน้ำ แต่เนื่องจากอยู่ในรูปไมเซลล์ (micelles) เม็ดแป้งจึงละลายในน้ำเย็นได้ยาก และจะดูดน้ำพองตัวได้เพียงเล็กน้อย เมื่อได้รับความร้อน พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งดูดน้ำและพองตัวมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เจลาตินในเซชัน (gelatinization) โดยอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า pasting temperature ซึ่งแตกต่างกันตามชนิดแป้ง (ภาพที่ 2)

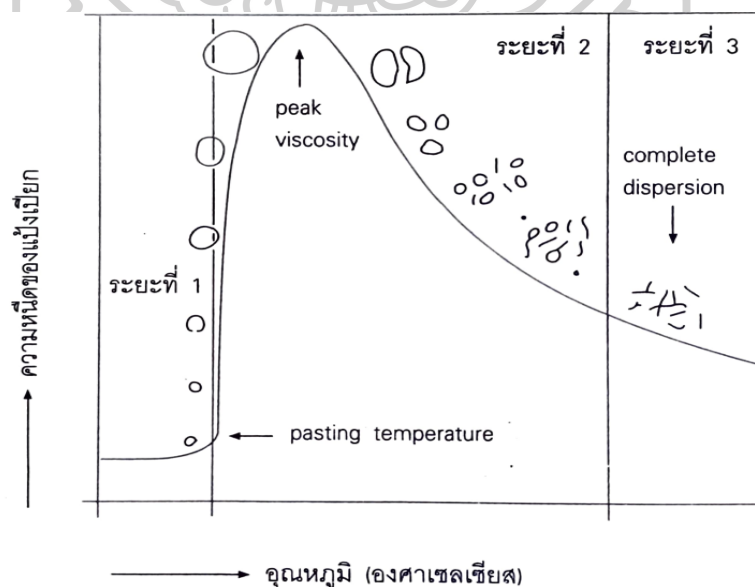
กระบวนการเจลาตินในเซชันแบ่งเป็น 3 ระยะ:

1. ระยะเริ่มต้น เม็ดแป้งดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและพองตัวแบบผันกลับได้ ความหนืดไม่เพิ่มขึ้น และยังคงคุณสมบัติ birefringence

2. ระยะเจลาตินในเซชัน เมื่ออุณหภูมิประมาณ 65 °C (ขึ้นกับชนิดแป้ง) พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งพองตัวเกิดความหนืดสูงขึ้น และอะมิโลส-อะมิโลเพกติน บางส่วนละลายออกมา

3. ระยะสุดท้าย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เม็ดแป้งสูญเสียรูปร่างแน่นอน การละลายของแป้งเพิ่มขึ้น และเมื่อเย็นลงจะเกิดเจล (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) และอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง ขึ้นกับองค์ประกอบ เช่น สัดส่วนอะมิโลส-อะมิโลเพกติน ไขมัน และขนาดเม็ดแป้ง เช่น แป้งมันฝรั่งมี peak viscosity สูงที่สุดและมีความสามารถในการทำให้ข้นหนืด (thickening power) มากกว่าแป้งธัญพืชอย่างข้าวโพดหรือสาลีที่พองตัวได้เพียงปานกลาง



ภาพที่ 2 แสดงกระบวนการในการเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546)

### 2.2.3 แบ่งปราศจากกลูเตน

#### สตาร์ชมันสำปะหลัง

สตาร์ชมันสำปะหลัง ทำมาจากหัวมันสำปะหลัง เป็นผงสีขาว เนื้อแป้งมีความละเอียด ลื่นมือ เมื่อถูกทำให้สุกแล้วตัวแป้งจะเหนียวหนืด มีสีใส เหมาะกับการนำไปทำอาหารที่มีความเหนียวแต่ใส และดูขุ่นเงา แต่ข้อเสียของสตาร์ชมันสำปะหลังคือ เมื่อถูกทำให้เย็นลงจะคืนตัวง่ายมาก มันสำปะหลัง แป้งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดหวาน และชนิดขม โดยชนิดหวานจะใช้เพื่อบริโภคหรือทำอาหารได้โดยตรง เช่น การนำไปนึ่ง เชื่อม ทอด มีปริมาณของกรด ไฮโดรไซยานิคต่ำและไม่มีรสขม ส่วนชนิดขม จะไม่เหมาะสำหรับนำมาบริโภคโดยตรง เนื่องจากมีปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิคสูง ซึ่งมีความเป็นพิษต่อร่างกาย การนำมาใช้ต้องผ่านการแปรรูปก่อน ในประเทศไทยจะมีการปลูกมันสำปะหลังชนิดขมเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมกันมากกว่าชนิดหวาน โดยทั่วไปส่วนประกอบของมันสำปะหลังหัวมันสำปะหลังสด มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณ 60 % ส่วนประกอบสำคัญในหัวมันสำปะหลังคือสตาร์ช (starch) ซึ่งมีถึง 70-80% โดยน้ำหนักแห้ง (Oladunmoye et al., 2014) ซึ่งมีปริมาณอะไมโลส 15-25 % (ตารางที่ 3) มันสำปะหลังจึงเป็นพืชที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ให้พลังงานได้ดี

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชมันสำปะหลัง

วิธีการหาปริมาณอะไมโลส	โปรตีน (%)	ไขมัน (%)	เถ้า (%)	อะไมโลส (%)	เส้นใย (%)	อ้างอิง
SEC-AD และ Iodine-A	0.7-0.9	0.1	0.7-0.9	15.9-25.31	0.5-0.9	Asaoka et al. (1991)
SEC-AD	0.05-0.28	0.04-0.38	0.12-0.33	16-20		Charles et al. (2004)
Iodine-S	0.25-0.36	0.25-0.36	0.07-0.16	22.5-23.8	0.17-0.42	Abera and Rakshit (2003)
Iodine-S	0.51	0.51	0.2	16.3		Mishra and Rai (2006)
SEC-WD	0.08-0.15	0.01	0.08-0.15	19.6-24.1		Sriroth et al. (1999)
Iodine-S	0.09	0.1	1.2	23.0		Freitas et al. (2004)

หมายเหตุ: SEC-AD คือ size-exclusion chromatography after debranching, SEC-WD คือ size-exclusion chromatography without debranching, Iodine-S คือ, iodine-spectrophotometry based method ที่มา : Zhu (2015)

### แป้งข้าวโพด

แป้งข้าวโพด ทำมาจากเมล็ดข้าวโพด เป็นผงสีขาว เนื้อแป้งสากมือเล็กน้อย ตัวแป้งเมื่อสุกแล้วจะมีลักษณะใสคล้ายกับวุ้น มีความมันเงา เมื่อพักให้เย็นตัวลงก็จะจับตัวเป็นก้อนแข็งแต่ตั้งอยู่ตัว เหมาะสำหรับอาหารที่มีความอยู่ตัว เช่น ตะโก้ ซ่าหริ่ม ลอดช่องแก้ว ขนมลิ่มกลืน ข้าวโพดเป็นแหล่งแป้งสำคัญในเชิงพาณิชย์ ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอาหาร เช่น การเกิดเจล การกักเก็บน้ำ และสารเพิ่มปริมาณ เป็นต้น องค์ประกอบของเม็ดข้าวโพดมากกว่า 70% เป็นสตาร์ช ส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาล โปรตีน ไขมัน และเถ้า ในตารางที่ 4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวโพด การวิเคราะห์เปรียบเทียบองค์ประกอบพบว่าแป้งข้าวโพดมีปริมาณของพอลิแซ็กคาไรด์ (อะไมโลเพกติน และอะไมโลส) ที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่ปริมาณของสารประกอบอื่น ๆ เช่น ไขมัน โปรตีน และเถ้า ค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้ ปริมาณอะไมโลสมักพบว่าจะอยู่ในช่วง 14% ถึง 29% ของแป้งที่มีในตัวอย่างทั้งหมด (Bertoft, 2017)

ตารางที่ 4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวโพด

องค์ประกอบ	ปริมาณ	หน่วย
อะไมโลส	24.64	กรัม/100 กรัม
อะไมโลเพกติน	75.36	กรัม/100 กรัม
ไขมัน	7.13	กรัม/100 กรัม
โปรตีน	7.7	กรัม/100 กรัม
เถ้า	0.62	กรัม/100 กรัม
ความชื้น	10.45	กรัม/100 กรัม
ความหนาแน่น	1.4029	กรัม/เซนติเมตร <sup>3</sup>

ที่มา : Ibrahim et al. ( 2019)

#### 2.2.4 ความแตกต่างของขนมปังแป้งสาลีกับขนมปังปราศจากกลูเตน

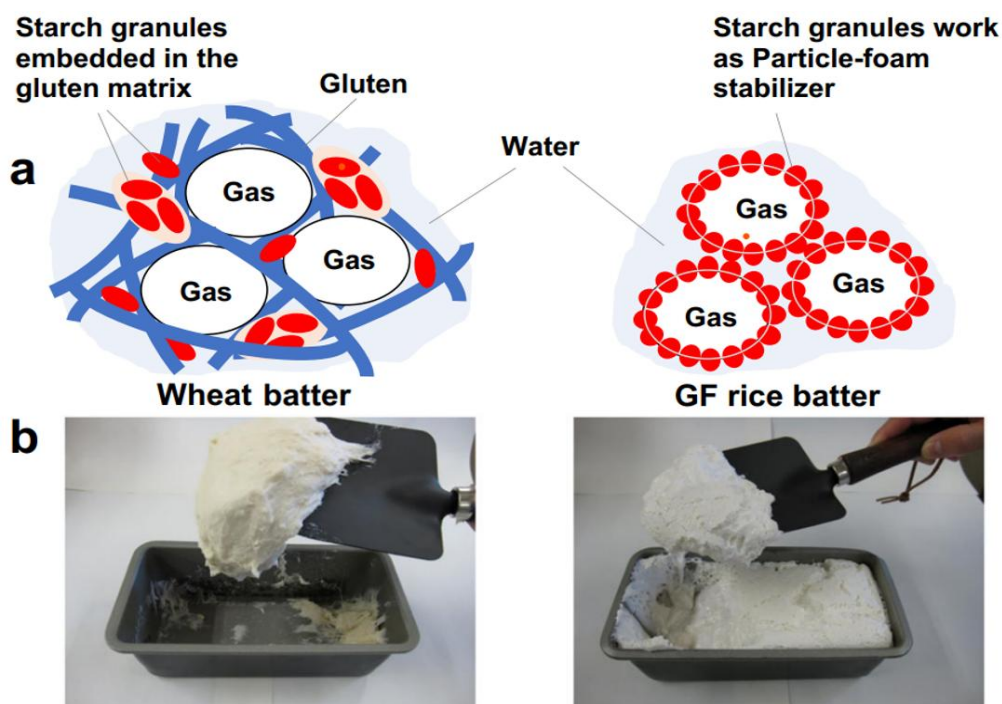
ขนมปังจากแป้งสาลีและขนมปังปราศจากกลูเตนมีความแตกต่างเชิงโครงสร้างและคุณสมบัติทางกายภาพอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 5) ซึ่งความแตกต่างหลักเกิดจากการมีหรือไม่มีโปรตีนกลูเตนเป็นองค์ประกอบสำคัญ กลูเตนที่พบในแป้งสาลีมีคุณสมบัติยืดหยุ่นและเหนียว (ภาพที่ 3) สามารถสร้างโครงข่ายโปรตีนที่แข็งแรง ทำหน้าที่กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ขนมปังสาลีมีปริมาตรจำเพาะสูง เนื้อสัมผัสโปร่งและเบาตรงกันข้ามกับขนมปังปราศจากกลูเตนซึ่งไม่มีโครงสร้างกลูเตนธรรมชาติ ทำให้การกักเก็บก๊าซมีประสิทธิภาพต่ำกว่า

ส่งผลให้ปริมาตรจำเพาะลดลงและเนื้อขนมปังมีลักษณะแน่น (Šmídová & Rysová, 2022) ในด้านเนื้อสัมผัส ขนมปังแป้งสาลีมักมีลักษณะนุ่มและยืดหยุ่นเนื่องจากโครงสร้างกลูเตนที่กักเก็บน้ำได้ดี ในขณะที่ขนมปังปราศจากกลูเตนมักมีลักษณะแห้ง แตกง่าย หรือมีความร่วน จำเป็นต้องมีการเติมสารเสริม เช่น ไฮโดรคอลลอยด์ โปรตีนจากพืชชนิดอื่น หรือสารอิมัลซิไฟเออร์ เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างและรักษาความชุ่มชื้นให้ใกล้เคียงกับขนมปังสาลี (Skendi et al., 2021) นอกจากนี้ ขนมปังสาลีมีรสชาติและกลิ่นเฉพาะตัว ส่วนขนมปังปราศจากกลูเตนมักมีกลิ่นรสขึ้นกับชนิดแป้งที่ใช้และสารเสริมที่เติมเข้าไป

**ตารางที่ 5** การเปรียบเทียบลักษณะของขนมปังจากแป้งสาลีและขนมปังปราศจากกลูเตน

คุณลักษณะ	ขนมปังแป้งสาลี	ขนมปังปราศจากกลูเตน
โครงสร้างโด	มีกลูเตนซึ่งมีความยืดหยุ่นและเหนียว สามารถกักเก็บก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพ	ไม่มีกลูเตน ทำให้การกักเก็บก๊าซมีประสิทธิภาพต่ำ
ปริมาตรขนมปัง	มีปริมาตรสูง เนื้อฟูและเบา	มีปริมาตรต่ำกว่า เนื้อแน่น
เนื้อสัมผัส	นุ่มและยืดหยุ่น (มีกลูเตน)	มีแนวโน้มที่แห้งแตก หรือยุบตัวง่าย ต้องเสริมสารไฮโดรคอลลอยด์หรือโปรตีน
รสชาติและกลิ่น	มีรสชาติและกลิ่นหอมแป้งสาลี	ขึ้นกับชนิดแป้งและสารเสริมอื่น ๆ
สีของเปลือก	เกิดสีน้ำตาลทองจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (โปรตีนกลูเตนกับน้ำตาล)	มีสีซีดกว่า เนื่องจากโปรตีนต่ำ (เสริมโปรตีนเพื่อเพิ่มสีน้ำตาล)
การบ่ม	ใช้เวลาบ่มนานกว่า เนื่องจากโครงสร้างกลูเตนสามารถกักเก็บก๊าซได้ดี	ใช้เวลาบ่มสั้นกว่า หากบ่มนานจะสูญเสียความคงตัวและยุบตัวได้ง่าย
อุณหภูมิการอบ	อุณหภูมิเหมาะสม (200–220 °C) อุณหภูมิต่ำไป (ความชื้นสูง เนื้อจะเสียหาย)	อุณหภูมิต่ำ หรือเคียงใกล้ (170–200 °C) ลดการสูญเสียความชื้น เนื้อแห้งแข็ง
คุณค่าทางโภชนาการ	มีโปรตีนสูงกว่า และหากเป็นโฮลวีทจะมีเส้นใยอาหารและแร่ธาตุมากกว่า	มีคาร์โบไฮเดรตสูง โปรตีนต่ำ ต้องเสริมสารอาหารเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ

ดัดแปลงข้อมูลมาจาก : Skendi et al. (2021); Šmídová and Rysová (2022); Wójcik et al. (2022)



ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างของโดขนมปังจากแป้งสาลีเปรียบเทียบกับโดขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวเจ้า เมื่อ a คือ กลไกการฟองตัวระหว่างการบ่มโดและ b คือลักษณะของโดที่บ่มแล้ว ที่มา Yano (2019)

ลักษณะสีของขนมปังก็แตกต่างกัน โดยขนมปังสาลีมีสีน้ำตาลเข้มเกิดจากปฏิกิริยา Maillard ระหว่างโปรตีนและน้ำตาลรีดิวซ์ ในขณะที่ขนมปังปราศจากกลูเตนมีสีที่ซีดกว่า เนื่องจากปริมาณโปรตีนต่ำกว่าทำให้การเกิดปฏิกิริยา Maillard ได้จำกัด

โดยสรุป ความแตกต่างระหว่างขนมปังแป้งสาลีและขนมปังปราศจากกลูเตนเกิดจากการขาดโครงสร้างกลูเตน ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญต่อโครงสร้าง เนื้อสัมผัส สี และปริมาณของผลิตภัณฑ์ แม้ว่าขนมปังปราศจากกลูเตนจะสามารถช่วยผู้บริโภคที่แพ้กลูเตนหรือผู้ที่เลือกหลีกเลี่ยงได้ แต่การพัฒนาสูตรยังคงเป็นความท้าทายทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร และจำเป็นต้องอาศัยการใช้วัตถุดิบเสริม และเทคนิคการแปรรูปเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ใกล้เคียงกับขนมปังจากแป้งสาลีมากที่สุด ทั้งในด้านคุณภาพการอบ คุณค่าทางโภชนาการ และการยอมรับทางประสาทสัมผัส

### 2.3 โปรตีน

โปรตีนที่ได้จากการพืช เช่น โปรตีนถั่วเหลือง โปรตีนถั่ว เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นแหล่งกรดอะมิโนซึ่งสามารถตอบสนองความต้องการของร่างกายมนุษย์อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการในอาหาร (Henchion et al., 2017) ในการเลือกใช้โปรตีนในอาหาร

จำเป็นต้องคำนึงถึงคุณลักษณะของโปรตีนในทางชีวเคมี และสมบัติเชิงหน้าที่หลายประการ (Du et al., 2012) (ตารางที่ 6) สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน เช่น ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการเกิดเจล สมบัติการไหล ความสามารถในการกักเก็บน้ำ และน้ำมัน ความสามารถในการทำให้เป็นอิมัลชัน และความสามารถในการเกิดโฟม เป็นต้น (Ragab et al., 2004) ซึ่งจะมีสมบัติที่แตกต่างกันไปตามขนาดโมเลกุล โครงสร้าง องค์ประกอบของกรดอะมิโนอื่น ๆ ของโปรตีนแต่ละชนิด (Shevkani et al., 2015)

**ตารางที่ 6** สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีน และบทบาทของโปรตีน

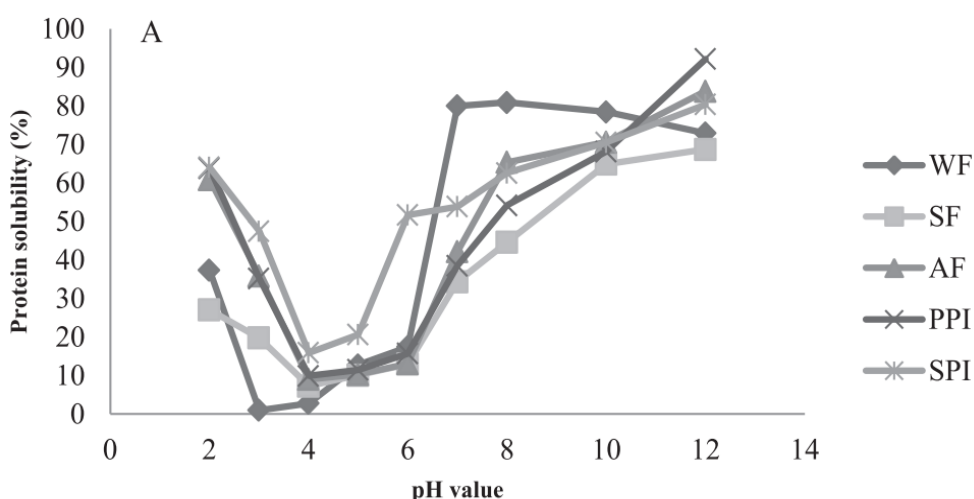
หน้าที่	บทบาทของโปรตีน	ตัวอย่างอาหาร
การละลาย	Protein solvation	เครื่องดื่ม
ดูดซับน้ำ	เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำทำให้น้ำจับไว้ในโมเลกุลของโปรตีน	อาหารประเภทเนื้อ ไส้กรอก ขนมปัง และเค้ก
ความหนืด	ทำให้ข้นหนืด และจับกับน้ำ	ซูป สลัดครีม และขนมหวานบางชนิด
ทำให้เกิดเจล	ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมแบบร่างแห	อาหารประเภทเนื้อ ไส้กรอก ซีส และขนมอบ
ความยืดหยุ่น	เป็น hydrophobic bonding เช่น โปรตีนและเกิดพันธะไดซัลไฟด์ในเจล	อาหารประเภทเนื้อ และผลิตภัณฑ์ขนมอบ
การเกิดอิมัลชัน	ทำให้อิมัลชันคงตัว โดยการเกิดฟิล์มที่ผิวรอยต่อระหว่างเฟส	ไส้กรอก ซูป และเค้ก
ตัวดูดไขมัน	ช่วยดูดจับไขมันอิสระด้วย hydrophobic bonding	อาหารประเภทเนื้อ ไส้กรอก และโดนัท
ตัวจับสารให้กลิ่น	ช่วยดูดซับสารให้กลิ่นด้วย hydrophobic bonding	เนื้อเทียม และผลิตภัณฑ์ขนมอบ
ทำให้เกิดโฟม	ห่อหุ้มฟองอากาศไว้ ทำให้โฟมคงตัว	ไอศกรีม วิฟครีม ชิฟฟอน เค้ก

ที่มา : สมฤดี ไทพานิชย์ (2553)

### 2.3.1 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนที่สำคัญในนมผง

#### สมบัติการละลาย (Solubility)

สมบัติการละลาย (Solubility) ความสามารถในการละลายของโปรตีนเป็นสมบัติที่สำคัญและมีผลต่อสมบัติเชิงหน้าที่อื่นๆ เช่น ความหนืด การเกิดโฟม อิมัลชัน และการเกิดเจลของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากองค์ประกอบของอาหารโดยส่วนใหญ่คือน้ำ โปรตีนที่สามารถยึดจับน้ำหรือละลายน้ำได้จึงสามารถรวมตัวเข้ากับอาหารและแสดงสมบัติเชิงหน้าที่ได้ โปรตีนที่นำมาใช้ประโยชน์เชิงหน้าที่จึงควรมีความสามารถในการละลาย การวิจัยส่วนมากจึงใช้ความสามารถในการละลายของโปรตีนบ่งชี้คุณภาพของโปรตีน หรือโครงสร้างของโปรตีนทางอ้อม ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายคือ การปรับค่า pH ให้เท่ากับจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่โปรตีนมีประจุบวก และประจุลบเท่ากัน โมเลกุลของโปรตีนจะดึงดูกัน และแขวนลอยในน้ำได้น้อยที่สุด และตกตะกอนออกมา หากโปรตีนยังละลายอยู่ได้ในน้ำ จะทำให้เกิดความหนืดสูง หรือเกิดเจล (gel) (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) ดังภาพที่ 4 นอกจากนี้ สัดส่วนของส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำของผิวหน้าโปรตีน อุณหภูมิ ค่าความแรงของไอออน (Ionic strength) ค่าความเข้มข้นของโปรตีน และสารประกอบอื่นๆ เช่น โลหะ หรือ ตัวทำละลายอินทรีย์ และปริมาณไขมันที่มีอยู่ในโปรตีน ก็มีผลต่อความสามารถในการละลายเช่นกัน โดยถ้ามีปริมาณไขมันอยู่มากจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง (Kristinsson & Rasco, 2000)



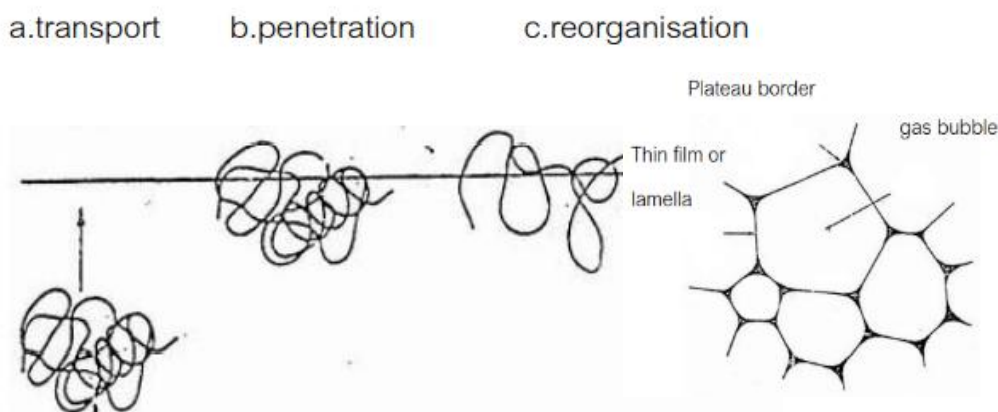
ภาพที่ 4 ความสามารถในการละลายของโปรตีนจากเมล็ดฟักทองไอโซเลต (PPI) กับโปรตีนเมล็ดฟักทองที่ถูกสกัดตามลำดับชั้นด้วยตัวทำละลายที่ต่างกัน ได้แก่ Water fraction (WF), Salt fraction (SF) และ Alkali fraction (AF) เปรียบเทียบกับโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (SPI)

ที่มา : Vinayashree and Vasu (2021)

### สมบัติการเกิดฟอง (Foaming properties)

สมบัติการเกิดฟอง (Foaming properties) สมบัติการเกิดฟองของโปรตีน หมายถึง ความสามารถของโปรตีนที่ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับของเหลว และรักษาความคงตัวให้กับฟิล์มไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากแรงกระทำจากภายนอก ผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการสมบัติการเกิดฟอง ได้แก่ ไอศกรีม เค้ก เป็นต้น สมบัติการเกิดฟองจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้าง ประจุ และค่าจุดไอโซอิเล็กทริก (Isoelectric point) ของโปรตีน เช่น Globular protein จะเพิ่มความคงตัวของฟอง (Foaming stability) ในขณะที่ Fibrous protein จะช่วยให้เกิด Interfacial ของโปรตีนระหว่างอากาศกับของเหลวอย่างรวดเร็วทำให้เกิด Foaming activity สูง (Damodaran & Paraf, 1997)

โปรตีนทำหน้าที่สร้างความคงตัวให้กับโครงสร้างของฟอง ซึ่งกลไกการเกิดฟองของโปรตีน แสดงดังภาพที่ 5 กระบวนการดูดซับของโปรตีนที่ผิวหน้าระหว่างอากาศกับน้ำ ซึ่งประกอบด้วยสาม ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกโปรตีนที่สามารถละลายได้จะเกิดการเคลื่อนที่ (Transport) ไปยังผิวหน้าระหว่างอากาศกับน้ำ (Air – Water interface) ส่วนในขั้นตอนที่ 2 โปรตีนที่เคลื่อนตัวมาที่ผิวหน้า จะเกิดการแทรกตัว (Penetration) ระหว่างชั้นของอากาศกับ น้ำ ทำให้ความเข้มข้นที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้น แรงดึงผิวลดลง สำหรับในขั้นตอนสุดท้ายโปรตีนจะเกิดการคลายตัว (Unfolding) และจัดเรียงตัวใหม่ (Reorganization) โดยหมู่ไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic groups) จะหันเข้าหาเฟสของเหลว (Aqueous phase) และหมู่ไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic groups) หันเข้าหาเฟสอากาศ (Air phase) ซึ่งในที่สุด จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโพลีเปปไทด์เพื่อสร้างเป็นฟิล์มห่อหุ้มอากาศไว้ภายใน ทั้งนี้พบว่าขณะเกิด กลไกข้างต้นโปรตีนอาจมีการเสียสภาพบางส่วน (Partial denaturation) แล้วรวมตัวกันตกตะกอน (Coagulation) (รัตนานา จินดาพรธณ, 2547) โดยทั่วไปจะไม่เสถียรถ้าฟองมีขนาดเล็กเกินไป เพราะโปรตีนแต่ละสายพยายามจะจัดเรียงตัวเองเข้าที่เดิมหากโมเลกุลอยู่ใกล้กัน ในทางกลับกัน หากฟองมีขนาดใหญ่เกินไป ฟองจะยุบตัวได้ง่าย เกิดการแตกของโครงสร้าง ได้รวดเร็ว ทั้งนี้เพราะฟิล์มโปรตีน ไม่หนาแน่นและแข็งแรงพอ ทำให้อากาศภายในดันออกได้ง่าย



ภาพที่ 5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) ที่ผิวหน้าระหว่างอากาศกับน้ำของโปรตีน และโครงสร้างฟอง

ดัดแปลงมาจาก : รัตนา จินดาพรรณ (2547)

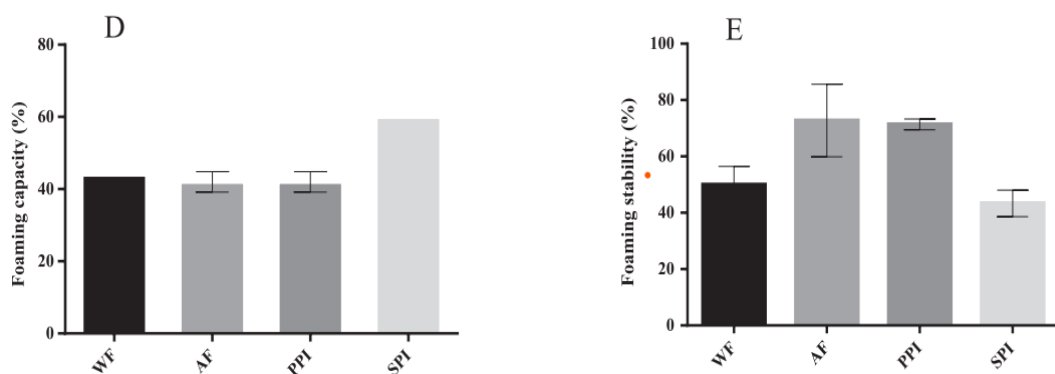
Cherry and McWatters (1981) ได้สรุปลักษณะของโปรตีนที่มีสมบัติการเกิดฟองได้ดี และช่วยให้ฟองมีความคงตัวดังนี้ คือ ละลายได้ดี ยึดอยู่ในชั้นระหว่างอากาศและน้ำได้ดี คลายเกลียวและเรียงตัวเป็นระเบียบในชั้นระหว่างอากาศและน้ำได้ตลอดเวลา และยึดโมเลกุลข้างเคียงได้หนาแน่น แต่ยึดหยุ่นรองรับแรงอัดอากาศเข้าและออกได้ดี จะได้ฟองที่มีความคงตัว สมบัติการเกิดโฟมของโปรตีนพิจารณาจาก Formability หรือ Foam capacity ของโปรตีน

ในรายงานของ Vinayashree and Vasu (2021) แสดงให้เห็นว่าถึงความสามารถในการเกิดโฟม และความคงตัวของโฟมระหว่างโปรตีนจากเมล็ดพืชของไอโซเลทเปรียบเทียบกับโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (ภาพที่ 6) พบว่าโปรตีนจากเมล็ดพืชของไอโซเลทมีความสามารถในการเกิดโฟมต่ำกว่าโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท ในขณะที่เมล็ดพืชของไอโซเลทจะมีความคงตัวของโฟมที่ต่ำกว่าโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท

### สมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์

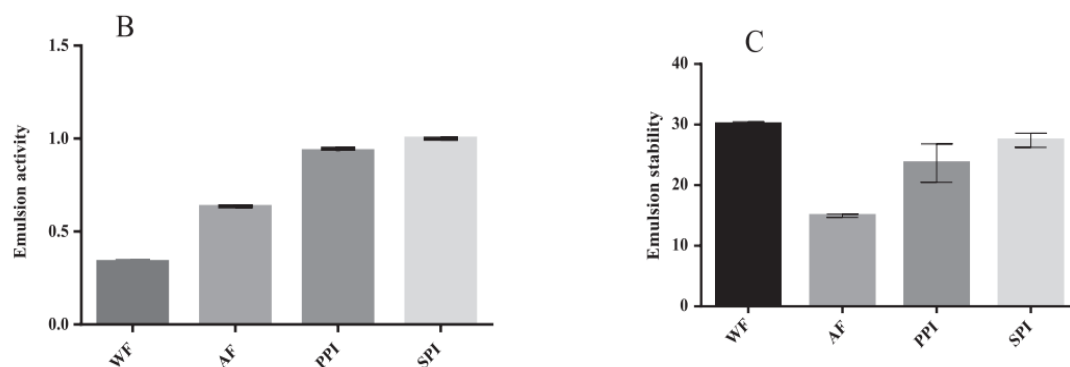
สมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ โปรตีนมีสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่สำคัญในอาหาร โดยโปรตีนที่ละลายน้ำสามารถเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่อยู่ระหว่างเฟสของน้ำ น้ำมัน และโปรตีนจะจัดเรียงตัวระหว่างเฟส โดยหันเอาส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าสู่ส่วนน้ำมัน และหันด้านที่ชอบน้ำไปยังเฟสน้ำ โดยโปรตีนอาจมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่บริเวณระหว่างเฟสและอาจจัดรูปแบบโครงสร้างต่างๆ กัน เช่น เทรนลูป (Train Loop) หรือ เทล (Tail) (ปุณณานิ สัมภาวะผล และ ธรรมรัตน์ แก้วมณี, 2554) ซึ่งล้วนมีผลต่อสมบัติการเกิดอิมัลชันรวมทั้งความคงตัวของอิมัลชัน โดยปัจจัยที่มีผลหรือมีบทบาท

กำหนดสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีน ได้แก่ สมบัติของอิมัลชันได้รับผลกระทบจากมวลโมเลกุล ความไม่ชอบน้ำ ความสามารถในการละลาย ความคงตัวของโครงสร้าง ประจุ pH ความแรงของไอออนิก และอุณหภูมิ (Moure et al., 2006)



ภาพที่ 6 ความสามารถในการเกิดโฟม และความคงตัวของโฟมระหว่างโปรตีนจากเมล็ดฟักทองไอโซเลต (PPI) และโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (SPI) ที่มา : Vinayashree and Vasu (2021)

การในศึกษาของ Vinayashree and Vasu (2021) พบว่า ความสามารถการเป็นอิมัลซิไฟเออร์และความคงตัวของโปรตีนจากเมล็ดฟักทองไอโซเลต (PPI) และโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (SPI) มีระดับที่ใกล้เคียงกัน ความสามารถการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ SPI ( $0.990 \pm 0.001$ ) ตามด้วย PPI ( $0.930 \pm 0.015$ ) นอกจากนี้ความคงตัวของอิมัลชัน SPI ( $27.41 \pm 1.17$ ) ตามด้วย PPI ( $23.65 \pm 3.15$ ) (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 ความสามารถการเป็นอิมัลซิไฟเออร์และความคงตัวของโปรตีนจากเมล็ดฟักทองไอโซเลต (PPI) และโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (SPI) ที่มา : Vinayashree and Vasu (2021)

### สมบัติการเป็นเกิดเจลของโปรตีน

โดยทั่วไปเจลเป็นสถานะกลางระหว่างของแข็งและของเหลว ในระบบอาหาร ของเหลวคือน้ำ และมีโครงข่ายข่ายโมเลกุลซึ่งประกอบด้วย โปรตีน โพลีแซ็กคาไรด์ หรือโดยส่วนผสมของทั้งสอง โปรตีนจะมีประสิทธิภาพในการก่อเจลมากกว่าคาร์โบไฮเดรต เพราะโมเลกุลขนาดใหญ่ กล่าวคือ โปรตีนสามารถสร้าง crosslinks ในโครงข่ายสามมิติ หรือการเกิดเจลจะดีขึ้นอยู่กับขนาดโปรตีน เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่สามารถเกิดโครงข่ายร่างแหที่กว้างขวางโดยการเชื่อมกันเป็นโครงข่ายสามมิติ อาศัยความยืดหยุ่น และความสามารถของโปรตีนในการเสียสภาพ (denaturation) (Oakenfull et al., 1997) ทำให้เกิดเป็นเจลที่แข็งแรง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเกิดเจลของโปรตีน ได้แก่ pH ความแรงของไอออนิก สารรีดิวซ์ ยูเรีย อุณหภูมิ ส่วนประกอบอื่นในระบบที่ไม่ใช่โปรตีน และแรงทางกล (shear stress) ที่ใช้กับระบบ (Damodaran & Paraf, 1997; Sathe, 2002) โปรตีนที่ทนต่อความร้อนสามารถทำให้เสียสภาพได้ด้วยแรงเฉือน หรือสารละลายแอลกอฮอล์ สามารถแบ่งเจลตามสมบัติของเจลได้ 2 ชนิด ได้แก่ เจลแบบใส และ เจลแบบขุ่น ขึ้นอยู่กับชนิดของโปรตีน องค์ประกอบของกรดอะมิโน และ ปัจจัยภายนอกอื่นๆ เช่น pH และความแข็งแรงของไอออนโปรตีน โดยทั่วไปถ้าโปรตีนมีกรดอะมิโนที่ไม่มีขั้วอยู่มากจะเกิดเป็นเจลแบบขุ่น (Shimada & Matsushita, 1980) ในขณะที่มีกรดอะมิโนที่ชอบน้ำมากจะเป็นเจลแบบใส

### สมบัติความสามารถในการกักเก็บน้ำ

ความสามารถในการกักเก็บน้ำ คือความสามารถของโปรตีนในการกักเก็บน้ำไว้กับแรงโน้มถ่วง สมบัติการทำงาน คุณภาพการบริโภค และความคงตัวในการจัดเก็บของอาหารที่มีโปรตีนนั้น สัมพันธ์กับปริมาณน้ำและการจับตัวของน้ำ การจับกับน้ำของโปรตีนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ และ โครงสร้างของโมเลกุลโปรตีน (Zayas, 1997) เช่น ชนิดของกรดอะมิโนและปริมาณ ประจุ ความชอบหรือไม่ชอบน้ำ pH อุณหภูมิ ความแรงของไอออน และความเข้มข้นของโปรตีน (Damodaran & Paraf, 1997) โปรตีนที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำ (WRC) สามารถใช้กับเนื้อสัตว์ที่หมัก แป้งอบ ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ไล้กรอก และผลิตภัณฑ์เจล เป็นต้น (Vinayashree & Vasu, 2021)

### 2.3.2 อิทธิพลของโปรตีนต่อสมบัติของแป้งปราศจากกลูเตน

การเติมโปรตีนมีผลกระทบต่อสมบัติของแป้งโดยตรง เช่น การกักเก็บน้ำ ความหนืด (pasting properties) (ภาพที่ 8) โครงสร้างของแป้ง เป็นต้น ซึ่งสมบัติตามที่กล่าวมานั้น มักมีอิทธิพลอย่างมากต่อลักษณะคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตน เนื่องจากทำให้สมบัติทางเคมีกายภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนเปลี่ยนแปลงไป (Sudheesh et al., 2021)

### ผลกระทบต่อสมบัติของแป้งปราศจากกลูเตน

**การกักเก็บน้ำ:** การเติมโปรตีนเพิ่มความสามารถในการจับน้ำของแป้งปราศจากกลูเตน ส่งผลให้การดูดซับน้ำสูงขึ้นและเนื้อแป้งมีความนุ่มขึ้น

**ความหนืด:** โปรตีนสามารถปรับพฤติกรรมการเจลาตินไนซ์และการเกิดเจลของแป้ง ส่งผลต่อความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายของแป้ง

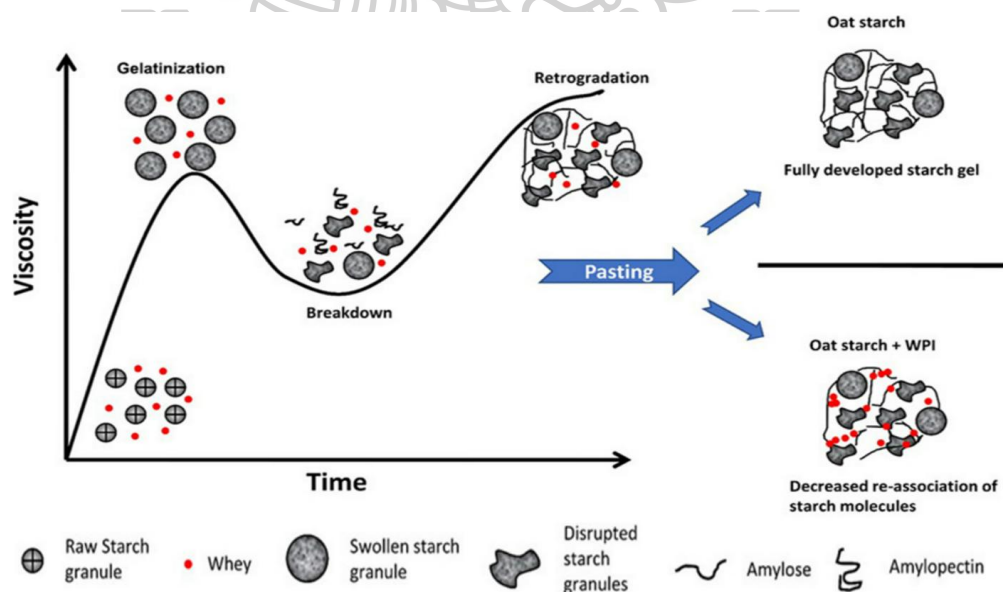
**โครงสร้าง:** โปรตีนช่วยให้โครงสร้างเจลแป้งแข็งแรงขึ้น ซึ่งช่วยปรับปรุงคุณภาพโครงสร้างและเนื้อสัมผัสโดยรวม

**เนื้อสัมผัส:** การเสริมโปรตีนสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์จากแป้งปราศจากกลูเตน เช่น พาสต้า และขนมปัง มีเนื้อสัมผัสนุ่มและยืดหยุ่นมากขึ้น

**ปริมาตรจำเพาะ:** การเติมโปรตีนสามารถเพิ่มปริมาตรจำเพาะของขนมปัง โดยเฉพาะเมื่อเกิดโครงข่ายที่แข็งแรง

**สี:** แป้งที่เสริมโปรตีนมักทำให้สีของผลิตภัณฑ์สุดท้ายเข้มขึ้นได้ ทำให้เพิ่มคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสโดยรวมที่ดีขึ้น

**เปลือกและเนื้อใน:** โปรตีนจะช่วยปรับปรุงคุณภาพเนื้อสัมผัสให้นุ่มขึ้น แต่ในบางกรณี การเติมโปรตีนมากเกินไปกลับทำให้ เนื้อสัมผัสแข็งมากขึ้น นอกจากนี้ ยังทำให้สีของเปลือกและเนื้อในขนมปังเปลี่ยนแปลงไปตามสีและปริมาณของโปรตีนที่เติมในขนมปัง เนื่องจากแหล่งที่มาของโปรตีนอาจมีกลุ่มรงควัตถุอยู่ด้วยธรรมชาติ



ภาพที่ 8 แสดงกลไกที่เป็นไปได้ของผลของโปรตีนเวย์ไอโซเลต (WPI) ต่อสมบัติความหนืด (pasting properties) ของสตาร์ชข้าวโอ๊ต

ที่มา: Kumar et al. (2022)

### 2.3.3 โพรตีนจากพืชที่ใช้ในขนมปังปราศจากกลูเตน

มีงานวิจัยจำนวนมากที่รายงานการใช้โปรตีนจากพืชที่มีความเข้มข้นสูงในสูตรขนมปังปราศจากกลูเตน (ตารางที่ 7) การใช้แหล่งโปรตีนเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงไม่เพียงแต่คุณภาพของขนมปังปราศจาก แต่ยังรวมถึงการปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการด้วย นอกจากนี้การใช้โปรตีนจากพืชที่มีปริมาณโปรตีนสูงได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากแหล่งโปรตีนจากสัตว์มีข้อจำกัดด้านการก่อให้เกิดอาการแพ้ เช่น โปรตีนจากไข่ เวย์โปรตีน เป็นต้น ดังนั้นขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมโปรตีนจากพืชจึงให้คุณภาพของขนมปังและปริมาณสัดส่วนการใช้โปรตีนที่แตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 7 แหล่งโปรตีนพืชที่มีปริมาณสูงหลากหลายชนิดที่ใช้ในการปรับปรุงขนมปังปลอดกลูเตน

ประเภท	แหล่งโปรตีน	ความเข้มข้นต่อแป้ง	สูตรขนมปัง	อัตราส่วน (%)	
		100 กรัม (%)			
ธัญพืช	โปรตีนข้าว	30%	สตาร์ชข้าวโพด	100	
	โปรตีนข้าว	5%, 10%	แป้งข้าวเจ้า:สตาร์ชข้าวโพด	50:50	
	รำข้าว	2%, 4%	แป้งข้าวเจ้า	100	
	ซีน (Zein)	15%	กลูเตน:แป้งข้าวเจ้า	15:85	
	ซีน (Zein)	15%	สตาร์ชมันฝรั่ง	100	
	ซีน (Zein)	2.5%, 5%, 10%	สตาร์ชข้าวโพด:สตาร์ชมันฝรั่ง	88:12	
พืชตระกูลถั่ว	ถั่วลันเตา	30%	สตาร์ชข้าวโพด	100	
	ถั่วลันเตา	5%, 10%	แป้งข้าวเจ้า:สตาร์ชข้าวโพด	50:50	
	ถั่วลันเตา	~10%	สตาร์ชข้าวโพด:สตาร์ชมันฝรั่ง	80:20	
	ลูพิน	2%	สตาร์ชมันฝรั่ง	100	
	ลูพิน	~10%	สตาร์ชข้าวโพด:สตาร์ชมันฝรั่ง	80:20	
	ถั่วเหลือง	2%, 4%, 6%	แป้งข้าวเจ้า	100	
	ถั่วเหลือง	~10%	สตาร์ชข้าวโพด:สตาร์ชมันฝรั่ง	80:20	
	ถั่วเหลือง	2%	สตาร์ชมันฝรั่ง	100	
	เมล็ดพืชน้ำมัน	เมล็ดองุ่น	6%, 9%, 12%, 15%	สตาร์ชข้าวโพด:สตาร์ชมันฝรั่ง	80:20
		คาโนลา	3%, 6%, 9%	แป้งข้าวเจ้า	100
เมล็ดทานตะวัน		5%, 10%, 20%	แป้งข้าวเจ้า:สตาร์ชข้าวโพด	70:30	
ห้วพืช					
ห้วพืช	มันฝรั่ง	2%, 6%, 10%	สตาร์ชข้าวโพด:สตาร์ชมันฝรั่ง	80:20	
	มันฝรั่ง	2%	สตาร์ชมันฝรั่ง	100	

ดัดแปลงจาก : Skendi et al. (2021)

### 2.3.4 โพรตีนสกัดจากเมล็ดฟักทอง

เมล็ดฟักทองใช้เป็นหลักในการทำอาหารและการสกัดน้ำมัน น้ำมันเมล็ดฟักทองได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง ไม่เพียงแต่เป็นน้ำมันที่บริโภคได้เท่านั้น แต่เนื่องจากสารอาหารที่ให้ประโยชน์ต่อสุขภาพมากมาย สิ่งสำคัญคือการมีฤทธิ์ต้านภาวะต่อมลูกหมากโตที่เป็นพิษเป็นภัย การศึกษาผลของน้ำมันเมล็ดฟักทองต่อสัตว์ยังเปิดเผยว่าสามารถชะลอการเกิดของความดันโลหิตสูง ลดไขมันในเลือด และบรรเทาโรคเบาหวานโดยการลดน้ำตาลในเลือด (Xanthopoulou et al., 2009) การสกัดน้ำมันจากเมล็ดฟักทองมีมูลค่าทางการค้าต่ำมากและส่วนใหญ่จะใช้เป็นอาหารสัตว์ เมล็ดฟักทองมีปริมาณโปรตีนสูงถึง 60–65% ซึ่งทำให้เป็นแหล่งโปรตีนจากพืชที่น่าสนใจ นอกจากนี้โปรตีนจากเมล็ดฟักทองมีความคล้ายคลึงกับโปรตีนถั่วเหลืองโดยพิจารณาจากปริมาณกรดอะมิโนจำเป็น (Nwokolo & Sim, 1987) (ตารางที่ 8)

El-Adawy and Taha (2001) กล่าวว่ากากของเมล็ดแตงโมและเมล็ดฟักทองที่ได้จากการสกัดน้ำมันแล้ว สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งโปรตีนสำหรับการบริโภคได้โดยพบว่า เมล็ดแตงโมและเมล็ดฟักทองมีโปรตีนระดับสูง 35.7–36.5% ซึ่งมากกว่าพืชตระกูลถั่วที่พบโปรตีนอยู่ 24.4% จึงเป็นทางเลือกดีในการเปลี่ยนกากเมล็ดแตงโม และเมล็ดฟักทองให้เป็นผลิตภัณฑ์โปรตีนเข้มข้นที่มีมูลค่าเพิ่ม (Venuste et al., 2013)

**ตารางที่ 8** องค์ประกอบกรดอะมิโนที่จำเป็นโดยทั่วไปของเมล็ดพืชน้ำมัน ถั่วเหลือง และเนื้อดิบ (เป็นกรัมต่อ 100 กรัม)

Amino acid	Ile	Leu	Lys	Met	Cys	Phe	Tyr	Thr	Trp	Val	AA sum
Standard protein <sup>b</sup>	3.01	5.30	4.50	2.21		3.81		2.30	0.61	3.90	25.64
Soybean seeds	1.97	3.47	2.37	0.59	0.80	2.25	1.35	1.63	0.57	1.94	16.94
Chia seeds	0.73	1.35	0.98	0.80	0.53	1.10	0.58	0.76	0.79	0.93	8.55
Coconut kernel, desiccated	0.22	0.43	0.31	0.12	0.11	0.29	0.16	0.22	0.06	0.35	2.27
Evening primrose <sup>a</sup>	0.83	1.54	0.26	0.60	0.60	0.41	0.71	1.58	1.31	1.07	8.91
Flaxseed (brown)	0.87	1.18	0.75	0.32	0.32	0.95	0.53	0.72	0.30	1.07	7.01
Hemp seeds	1.29	2.16	1.28	0.93	0.67	1.45	1.26	1.27	0.37	1.78	12.46
Milk thistle (defatted flour)	5.41	9.84	7.38	2.46	2.16	6.10	5.41	5.12	nd	7.97	51.85
Nigella seeds <sup>a</sup>	0.64	1.11	0.63	0.23	0.19	0.64	0.54	0.63	0.12	0.82	5.54
Pumpkin seeds	1.29	2.49	1.36	0.73	0.39	1.81	1.19	1.04	0.61	1.71	12.62
Rapeseed (meal)	1.25	2.51	2.04	0.47	0.59	1.44	0.99	1.59	0.43	1.55	12.86
Sesame	0.79	1.48	0.64	0.67	0.43	0.99	0.78	0.80	0.37	1.02	7.97
Sunflower seeds	0.92	1.40	0.86	0.53	0.38	1.05	0.57	0.81	0.35	1.11	7.98
Beef (raw, lean, 3% fat)	0.97	1.71	1.82	0.57	0.23	0.86	0.68	0.85	0.11	1.08	8.88
Pork (raw, lean, 4% fat)	0.96	1.68	1.81	0.56	0.24	0.90	0.89	0.89	0.27	1.06	9.26
Chicken (raw breast, skinless)	1.10	1.86	2.16	0.58	0.24	0.91	0.81	1.01	0.28	1.16	10.11

<sup>a</sup>ค่าโดยประมาณที่คำนวณจากโปรตีนแยกสกัดจากเมล็ดหรือกากเมล็ด

<sup>b</sup>อ้างอิงกรดอะมิโนที่จำเป็นในโปรตีนจาก WHO/FAO/UNU 2007

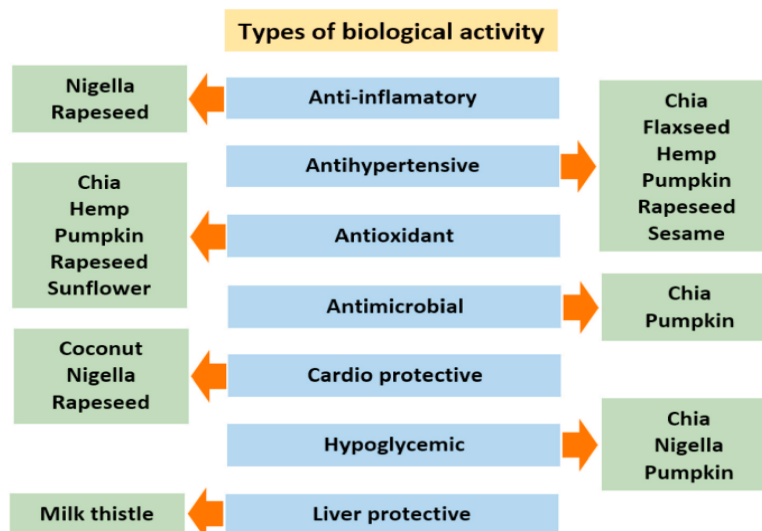
ที่มา : Kotecka-Majchrzak et al. (2020)

#### 2.3.4.1 ขนาดของโปรตีนเมล็ดฟักทอง

โปรตีนเมล็ดฟักทองไอโซเลท มีขนาดของโมเลกุลน้ำหนักหลักอยู่ในช่วง 7 ถึง 50 kDa และส่วนที่รองลงมาประมาณ 90, 80, 70 และ 10 kDa ซึ่งคล้ายโปรตีนที่ได้จากถั่วและถั่วลันเตามีแถบอยู่ในช่วง 93–17 kDa และ 95–14 kDa ตามลำดับ (Shevkani et al., 2015) โปรตีนจากเมล็ดฟักทองส่วนใหญ่ประกอบด้วย 12S globulin cucurbitin รวมประมาณ MW 325 kDa ซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยที่คล้ายกัน 6 หน่วยซึ่งมีขนาด 54 kDa อีกส่วนหนึ่งประกอบด้วยอัลบูมิน 2S ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ 12.5 kDa ซึ่งประกอบด้วยสองสายที่มี MW 4.8 และ 7.9 kDa สัดส่วนของโปรตีน 12S และ 2S นี้คิดเป็น 59% ของปริมาณโปรตีนทั้งหมดในเมล็ดฟักทอง (Kotecka-Majchrzak et al., 2020)

#### 2.3.4.2 ความปลอดภัยในการใช้โปรตีนเมล็ดฟักทอง

มีรายงานการแพ้เมล็ดฟักทองมีน้อยมาก แม้ว่าเมล็ดจะถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอาหารหลายชนิด มีเพียงไม่กี่กรณีเท่านั้นที่ได้รับการอธิบายหลังจากรับประทานอาหารที่มีเมล็ดฟักทอง อย่างไรก็ตามสารก่อภูมิแพ้ที่เกิดในเมล็ดฟักทองยังไม่ได้รับการระบุลักษณะอย่างชัดเจน รายงานของ Patel and Bahna (2016) กล่าวว่า การศึกษา Immunoblot ในผู้ป่วย 3 รายพบว่าโปรตีน 14 kDa มีความคล้ายคลึงของ profilin เนื่องจากถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์โดย recombinant birch profilin 36 การศึกษาอีกชิ้นหนึ่งเสนอว่าโปรตีนที่มี MW 12 kDa อาจเป็นสารก่อภูมิแพ้หลักและอาจสามารถทนความร้อนได้ เนื่องจากผู้ที่มีอาการแพ้ส่วนใหญ่มักบริโภคเมล็ดฟักทองแบบคั่ว (Rodríguez-Jiménez et al., 2010) อย่างไรก็ตามในอีกด้านหนึ่งการศึกษาทางเภสัชวิทยาพบว่าโปรตีนจากเมล็ดฟักทองมีความสามารถในการต้านโรค (ภาพที่ 9) เช่น ฤทธิ์ต้านมะเร็ง เบาหวาน สารต้านอนุมูลอิสระ และต้านพิษในเซลล์ตับ (Caili et al., 2006)



ภาพที่ 9 ฤทธิ์ทางชีวภาพของโปรตีนและเปปไทด์จากเมล็ดพืชไขมัน

ที่มา : Kotecka-Majchrzak et al. (2020)

#### 2.3.4.3 คุณค่าทางโภชนาการของโปรตีนสกัดจากเมล็ดฟักทอง

เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของ ถั่ว ธัญชาติ เมล็ดพืชไขมัน อัลมอลต์ และถั่วเปลือกแข็ง (Nuts) (ตารางที่ 9) พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนจากเมล็ดฟักทองมีปริมาณโปรตีนที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับโปรตีนชนิดอื่น ๆ

คุณภาพโปรตีนอาจถูกประเมินโดยองค์ประกอบของกรดอะมิโนเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบอ้างอิงของกรดอะมิโน คะแนนกรดอะมิโน อัตราส่วนประสิทธิภาพของโปรตีน (PER) และอัตราส่วนของกรดอะมิโนจำเป็น (Essential Amino Acids: EAA) ต่อกรดอะมิโนทั้งหมด (Total Amino Acids: TAA) จากการศึกษาของ Vinayashree and Vasu (2021) พบว่า ค่า PER ที่คาดการณ์ไว้ที่ 2.70 ของโปรตีนเมล็ดฟักทองไอโซเลทนั้นสูงกว่าโปรตีนจากถั่วพูและ ถั่วพีเจียน เท่ากับ 1.21 และ 1.82 ตามลำดับ (Salunkhe & Kadam, 1989) ค่า PER ของโปรตีนเมล็ดฟักทองไอโซเลทใกล้เคียงกับโปรตีนจากถั่วลิ้นเต่า เมล็ดพืชตระกูลถั่วดิบ เมล็ดลูปิน และเมล็ดบัว

ตารางที่ 9 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของ ถั่ว ธัญชาติ เมล็ดพืชน้ำมัน อัลมอลต์ และถั่วเปลือกแข็ง (Nuts)

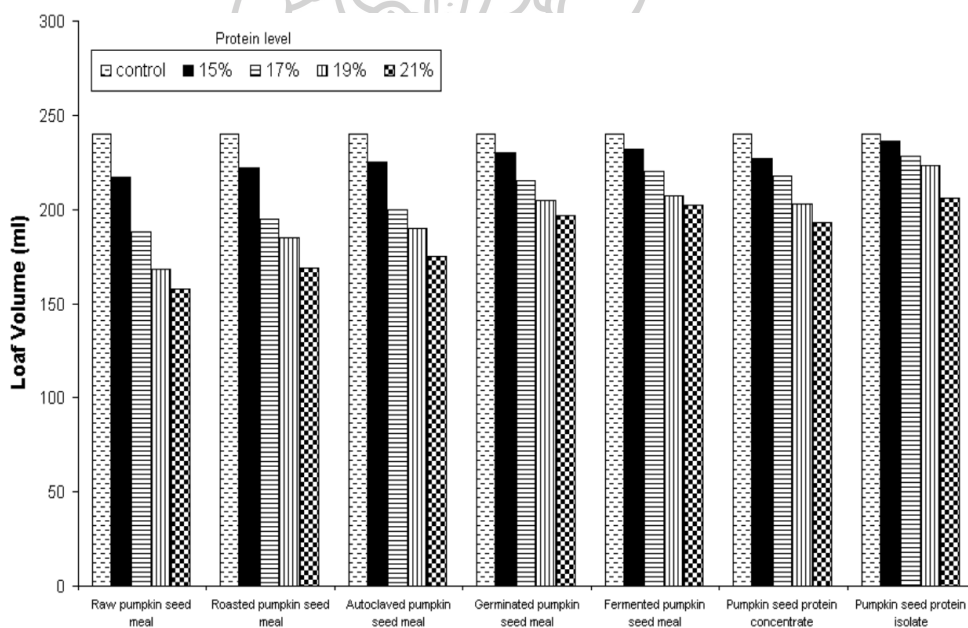
ชนิด	องค์ประกอบโดยทั่วไป(กรัม/100กรัม)				อ้างอิง
	โปรตีนทั้งหมด	ไขมัน	เส้นใย	ถั่ว	
<b>Beans</b>					
Soybean	44.53	22.44	-	5.05	Vasconcelos et al. ( 2006 )
Bean	20.9	2.1	-	4.6	Montoya et al. (2008)
Faba bean	31.2 ± 0.4	2.1 ± 0.1	24.7 ± 1.8	24.7 ± 1.8	Mattila et al. (2018)
Chickpea	24.7 ± 1.7	1.5 ± 0.3	1.5 ± 0.3	1.5 ± 0.3	Sánchez-Vioque et al. (1999)
Lupin	30.5 ± 1.6	7.3 ± 0.4	47.5 ± 1.2	3.8 ± 0.4	Mattila et al. (2018)
<b>Cereals</b>					
Amaranth	14.5	10.2	8.8	2.5	López et al. (2018)
Quinoa	13.0	7.2	9.9	2.9	López et al. (2018)
Rice	9.57 ± 0.11	2.86 ± 0.10	-	1.35 ± 0.05	Liu et al. (2017)
Buckwheat	14.8 ± 1.6	3.6 ± 0.3	8.3 ± 1.5	2.0 ± 0.1	Mattila et al. (2018)
<b>Oilseeds</b>					
Pumpkin seeds	36.5	51.01	4.43	3.21	El-Adawy and Taha (2001)
Watermelon seeds	35.7	50.10	4.83	3.60	El-Adawy and Taha (2001)
Grape seeds	11.81	12.04	42.53	2.40	Fantozzi (1981)
Sunflower seeds	32.3	49.1	-	-	Raymond et al. (1991)
<b>Almonds and nuts</b>					
Peanut	29.59 ± 0.05	46.35 ± 0.26	5.20 ± 0.11	2.27 ± 0.01	de Oliveira Sousa et al. (2011)
Baru almond	29.92 ± 0.37	41.95 ± 0.44	9.21 ± 0.21	3.18 ± 0.01	de Oliveira Sousa et al. (2011)
Cashew nut	22.67 ± 0.20	47.79 ± 0.31	3.92 ± 0.05	2.60 ± 0.01	de Oliveira Sousa et al. (2011)
Pequi almond	29.65 ± 0.55	50.00 ± 0.66	10.44 ± 0.09	4.54 ± 0.02	de Oliveira Sousa et al. (2011)

โดยทั่วไป ค่า PER ที่ต่ำกว่า 1.5 โดยประมาณจะอธิบายคุณภาพโปรตีนต่ำ ค่าระหว่าง 1.5 ถึง 2.0 เป็นคุณภาพระดับกลาง ในขณะที่ค่าที่สูงกว่า 2.0 มีคุณภาพสูง (Friedman, 1996) เนื่องจากค่า PER โปรตีนเมล็ดฟักทองมากกว่า 2.0 ดังนั้นสำหรับโปรตีนเมล็ดฟักทองไอโซเลทจึงถือเป็นโปรตีนที่ดี และมีคุณภาพสูง

#### 2.3.4.4 การเสริมแหล่งโปรตีนเมล็ดฟักทองในขนมปังแป้งสาลี

การศึกษาของ El-Soukkary (2001) พบว่าการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นช่วยเพิ่มการดูดซึมน้ำ เวลาในการบ่มโดแป้ง แต่ลดความคงตัวและปริมาตรจำเพาะของขนมปังจากแป้งสาลีลงเมื่อเติมปริมาณโปรตีนให้สูงขึ้น (ภาพที่ 10)

ในตารางที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของขนมปังที่เสริมด้วยโปรตีนเมล็ดฟักทองในระดับโปรตีน 17, 19, 21% โดยการเติมผลิตภัณฑ์เมล็ดฟักทองลงในแป้งสาลีช่วยเพิ่มปริมาณโปรตีนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )



ภาพที่ 10 ปริมาตรของขนมปังแป้งสาลีที่เติมโปรตีนฟักทองต่อ 100 กรัม น้ำหนักแป้ง

ที่มา : El-Soukkary (2001)

ตารางที่ 10 องค์ประกอบโดยประมาณของขนมปังเสริมด้วยผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จากเมล็ดฟักทอง (น้ำหนักแห้ง)\*

Product	Moisture (%)	Crude protein (%)	Crude fat (%)	Ash (%)	Carbohydrate <sup>4</sup> (%)
Control	9.60 <sup>a</sup>	13.50 <sup>a</sup>	2.55 <sup>b</sup>	1.53 <sup>a</sup>	72.82 <sup>d</sup>
Raw pumpkin seed meal <sup>1</sup>	10.31 <sup>a</sup>	17.20 <sup>b</sup>	2.72 <sup>b</sup>	1.85 <sup>c</sup>	67.92 <sup>c</sup>
Roasted pumpkin seed meal <sup>1</sup>	9.82 <sup>a</sup>	17.31 <sup>b</sup>	2.64 <sup>b</sup>	1.75 <sup>bc</sup>	68.48 <sup>c</sup>
Autoclaved pumpkin seed meal <sup>1</sup>	9.63 <sup>a</sup>	17.11 <sup>b</sup>	2.69 <sup>b</sup>	1.79 <sup>bc</sup>	68.78 <sup>c</sup>
Germinated pumpkin seed meal <sup>2</sup>	10.11 <sup>a</sup>	19.02 <sup>c</sup>	2.41 <sup>b</sup>	1.81 <sup>c</sup>	66.65 <sup>b</sup>
Fermented pumpkin seed meal <sup>2</sup>	9.93 <sup>a</sup>	19.21 <sup>c</sup>	2.89 <sup>b</sup>	1.61 <sup>ab</sup>	66.36 <sup>b</sup>
Pumpkin seed protein concentrate <sup>2</sup>	9.84 <sup>a</sup>	19.13 <sup>c</sup>	2.75 <sup>b</sup>	1.93 <sup>c</sup>	66.35 <sup>b</sup>
Pumpkin seed protein isolate <sup>3</sup>	10.11 <sup>a</sup>	21.19 <sup>d</sup>	2.11 <sup>a</sup>	1.61 <sup>ab</sup>	64.98 <sup>a</sup>
LSD	0.71	0.95	0.49	0.19	1.12

a,b,c,d Means in the same column with different letters are significantly different ( $p < 0.05$ ).

<sup>1</sup> 17% protein level, <sup>2</sup> 19% protein level, <sup>3</sup> 21% protein level, <sup>4</sup> calculated by difference.

\* Means of three determinations.

ที่มา : El-Soukary (2001)

ตารางที่ 11 แสดงองค์ประกอบกรดอะมิโนของขนมปังที่เพิ่มผลิตภัณฑ์เมล็ดฟักทองลงในแป้งสาลีมีการเพิ่มขึ้นของกรดอะมิโนที่จำเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ไอโซลูซีน ไลซีน ซีสทีน เมไทโอนีน ทรีโอนีน ทริปโตเฟน และวาเลีน เมื่อเทียบกับตัวควบคุม (control) นอกจากนี้การเปรียบเทียบองค์ประกอบกรดอะมิโนของขนมปังที่เพิ่มผลิตภัณฑ์เมล็ดฟักทองพบว่าผลิตภัณฑ์เมล็ดฟักทองมีความใกล้เคียง หรือสูงกว่าระดับกรดอะมิโนที่จำเป็นซึ่งกำหนดไว้โดย FAO/WHO

ตารางที่ 11 แสดงองค์ประกอบกรดอะมิโนของขนมปังที่เพิ่มผลิตภัณฑ์เมล็ดฟักทอง

Amino acid	Control	Raw pumpkin seed meal <sup>1</sup>	Roasted pumpkin seed meal <sup>1</sup>	Autoclaved pumpkin seed meal <sup>1</sup>	Germinate pumpkin seed meal <sup>2</sup>	Fermented pumpkin seed meal <sup>2</sup>	Pumpkin seed protein concentrate <sup>2</sup>	Pumpkin seed protein isolate <sup>3</sup>	FAO/WHO (1973)
Isoleucine	3.81	3.90	3.99	4.22	3.90	4.35	3.30	3.70	4.00
Leucine	7.93	7.29	7.71	7.54	6.39	7.96	7.30	7.80	7.00
Lysine	2.02	4.82	4.45	4.19	4.15	5.13	3.90	5.20	5.50
Cystine	1.92	1.98	2.08	1.78	1.22	1.95	1.90	1.90	—
Methionine	0.90	1.60	1.77	1.55	1.77	1.82	1.30	1.20	—
Total sulfur amino acid	2.82	3.58	3.45	3.33	2.99	3.77	3.20	3.10	3.50
Tyrosine	4.92	4.01	3.39	3.87	3.61	4.33	5.40	4.90	—
Phenylalanine	5.51	5.07	5.19	5.13	4.98	5.39	5.10	5.50	—
Total aromatic amino acid	10.43	9.08	8.38	9.00	8.59	9.62	10.50	10.40	6.00
Threonine	3.97	3.72	3.95	4.08	3.51	4.17	4.20	4.60	4.00
Tryptophan	0.59	0.83	0.65	0.73	0.62	0.90	0.90	1.00	1.00
Valine	3.71	4.54	4.78	4.85	4.79	4.92	3.20	3.80	5.00
Total essential amino acid	35.28	37.76	37.56	37.94	34.94	40.82	36.50	39.60	36.00
Histidine	3.33	4.25	3.87	4.42	4.46	4.23	3.40	3.60	—
Arginine	4.15	5.24	5.52	5.39	5.65	4.67	5.10	6.50	—
Aspartic acid	5.62	6.31	6.47	6.83	7.21	6.09	7.30	7.40	—
Glutamic acid	24.57	20.25	20.61	19.86	21.05	17.77	21.90	18.40	—
Serine	6.03	6.11	6.37	5.76	5.98	6.22	5.70	6.10	—
Proline	14.38	12.51	12.50	11.35	12.78	11.90	11.30	9.90	—
Glycine	3.34	3.47	3.21	3.87	3.04	3.91	4.70	4.30	—
Alanine	3.30	4.10	3.89	4.58	4.89	4.40	4.10	4.20	—
Total non-essential amino acids	64.72	62.24	62.44	62.06	65.06	59.18	63.50	60.40	—

<sup>1</sup> 17% protein level, <sup>2</sup> 19% protein level, <sup>3</sup> 21% protein level.

ที่มา : El-Soukary (2001)

การเพิ่มไลซีน กรดอะมิโนที่จำเป็นทั้งหมด โปรตีน ปริมาณเถ้าและแร่ธาตุ ทำให้ผลิตภัณฑ์ เมล็ดพืชทองเป็นแหล่งโปรตีน และสารอาหารที่ดีในการเสริมสร้างผลิตภัณฑ์ขนมอบโดยเฉพาะ ขนมปังโปรตีนไอโซเลต และโปรตีนเข้มข้นจากเมล็ดพืชทอง (El-Soukkary, 2001)

#### 2.3.4.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้นในขนมปัง

##### ปราศจากกลูเตน

Coşkun et al. (2020) กล่าวว่าโปรตีนสกัดเข้มข้นจากเมล็ดพืชที่แตกต่างกันสามชนิดในการเสริมโปรตีนให้กับขนมปังปราศจากกลูเตน ได้แก่ โปรตีนผงเทียนดำ (BC) เมล็ดถั่ว (GS) และเมล็ดพืชทอง (PS) ในขนมปังที่ปราศจากกลูเตนส่งผลต่อเนื้อสัมผัส ปริมาตร และ สี ในตารางที่ 12 แสดงการเพิ่มปริมาณน้ำ 8% และ 15% ทำให้ปริมาตรจำเพาะขึ้น โดยปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตนที่เสริมโปรตีนผงเทียนดำ (BC) เมล็ดถั่ว (GS) และเมล็ดพืชทอง (PS) คือ 380, 465 และ 850 มล. ตามลำดับ ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมเท่ากับ 920 มล. ในสูตรปกติ อย่างไรก็ตาม ปริมาตรขนมปังปราศจากกลูเตนเพิ่มขึ้น 15% ในสูตรที่เพิ่มปริมาณน้ำ 15% แสดงให้เห็นว่าปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตนที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจากความสามารถในการกักเก็บน้ำของโปรตีน (Sánchez-Vioque et al., 1999)

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบผลของปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร)

ตัวอย่าง	ปริมาณน้ำปกติ	เพิ่มปริมาณน้ำ 8 %	เพิ่มปริมาณน้ำ 15 %
control*	920±20.9	790.28.5	715±11.3
BC	380±30.6	565±25.1	800±15.2
GS	465±16.3	850±34	1000±20.0
PS	850±20.0	860±22.7	950±15.3

หมายเหตุ \* แป้งข้าวเจ้าผสมสตาร์ชข้าวโพด

ที่มา : Coşkun et al. (2020)

นอกจากนี้ในตารางที่ 13 เมื่อพิจารณาค่าสีตัวอย่างโปรตีนเข้มข้นจากเมล็ดพืชทอง (PS) แสดงให้เห็นถึงระดับของสีที่ใกล้เคียงกันสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม (control) ในขณะที่ตัวอย่างโปรตีนเทียนดำ และเมล็ดถั่วมีสีเข้มกว่าอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงใน (ภาพที่ 11)

ตารางที่ 13 พารามิเตอร์สีของเนื้อขนมปังที่ปราศจากกลูเตนเติมโปรตีนผงเทียนดำ (BC) เมล็ดองุ่น (GS) และโปรตีนเมล็ดฟักทอง (PS)

ตัวอย่าง	L*	a*	b*
Control*	54.59±0.8	2.43±0.1	23.34±0.1
BC	23.68±0.9	2.05±0.0	8.73±0.0
GS	30.60±1.0	7.68±0.3	12.03±0.4
PS	53.93±0.5	1.71±0.2	22.62±1.9

หมายเหตุ \* แป้งข้าวเจ้าผสมสตาร์ชข้าวโพด

ที่มา : Coşkun et al. (2020)



ภาพที่ 11 ขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมโปรตีนผงเทียนดำ (BC) เมล็ดองุ่น (GS) และโปรตีนเมล็ดฟักทอง (PS)

ที่มา : Coşkun et al. (2020)

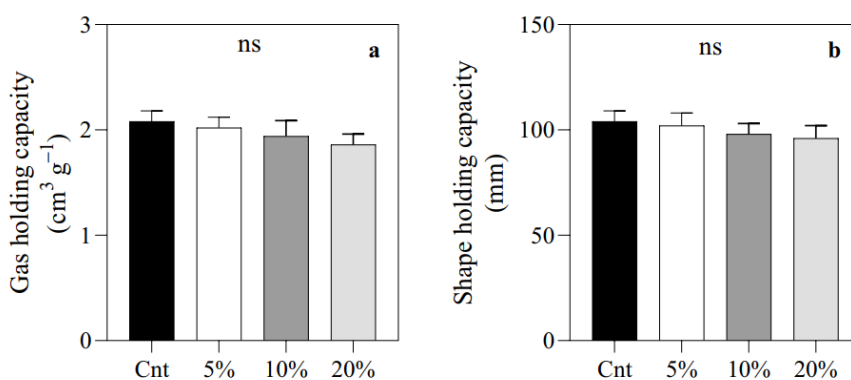
Galenko et al. (2024) กล่าวว่า ในการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ในแป้งสาลีที่ 5-10% ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \geq 0.05$ ) ยังคงให้เนื้อสัมผัส สี กลิ่น และรสชาติใกล้เคียงใกล้เคียงกับขนมปังปกติ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยแสดงความเห็นเสริมว่า ในการทดสอบด้านประสาทสัมผัส ผู้ชิมเริ่มได้กลิ่นเมล็ดฟักทองที่ระดับ 10% และได้กลิ่นชัดเจนที่ระดับ 20% (ตารางที่ 14) ในส่วนของโครงสร้างโด พบว่า การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) 5-20% ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและการกักเก็บก๊าซของโดขนมปังแป้งสาลี (ภาพที่ 12)

ด้านคุณค่าทางโภชนาการพบว่า โปรตีนเข้มข้นจากเมล็ดฟักทอง (PSPC) มีกรดอะมิโนจำเป็น (Essential Amino Acids: EAA) อยู่ในปริมาณมาก โดยเฉพาะ leucine ซึ่งพบว่าปริมาณสูงกว่าในแป้งสาลี นอกจากนี้ยังพบว่า โปรตีนเข้มข้นจากเมล็ดฟักทอง (PSPC) มีปริมาณกากใยสูงกว่าแป้งสาลี 2.3 เท่า (ประมาณ 8 %)

ตารางที่ 14 การประเมินทางประสาทสัมผัสของขนมปังที่เสริมโปรตีนจากเมล็ดฟักทอง โดยใช้ 5-point scale คำนึงถึงค่า Factor ของแต่ละตัวชี้วัดคุณภาพ

Indicators	Weighting factor	Control sample	Pumpkin seed protein concentrate (%)		
			5	10	20
Specific volume ( $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ )	0.15	4.6±0.1a	4.6±0.1a	3.5±0.1b	3.0±0.1c
Form stability	0.15	Convex upper crust	Convex upper crust	Convex upper crust	Upper crust with depressions
Color of crust	0.05	5.0±0.1a	5.0±0.1a	5.0±0.1a	4.0±0.1b
		Light yellow	Light yellow	Light brown	With greenish-brown color
Surface condition	0.05	5.0±0.1a	5.0±0.1a	5.0±0.1a	5.0±0.1a
		Smooth, without cracks	Smooth, without cracks	Smooth, without cracks	Uneven, with depressions
Color of crumb	0.05	5.0±0.1a	5.0±0.1a	5.0±0.1a	4.0±0.1b
		Light	Light	Light brown	With greenish-brown color
Porosity structure	0.09	5.0±0.1a	5.0±0.1a	5.0±0.1a	5.0±0.1a
		Even, small, thin-walled	Even, small, thin-walled	Even, small, thin-walled	Even, small, thin-walled
Elasticity of crumb	0.12	4.8±0.1a	4.8±0.1a	4.8±0.1a	4.8±0.1a
		Elastic	Elastic	Elastic	Elastic
Aroma	0.11	4.8±0.1a	4.8±0.1a	4.8±0.1a	4.8±0.1a
		Inherent in the product	Inherent in the product	Inherent in the product	With pumpkin flavor
Taste	0.13	4.6±0.1b	4.6±0.1b	4.7±0.1ab	4.8±0.1a
		Inherent in the product	Inherent in the product	With pumpkin taste	With expressed pumpkin taste
Chewability of crumb	0.10	4.8±0.1a	4.8±0.1a	4.8±0.1a	4.8±0.1a
		Good	Good	Good	Good
Score (out of 5 points)		5.0±0.1a	5.0±0.1a	5.0±0.1a	5.0±0.1a
		4.8±0.2a	4.8±0.2a	4.7±0.1a	4.4±0.1b

ที่มา : (Galenko et al., 2024)



ภาพที่ 12 (a) ความสามารถในการกักเก็บแก๊ส (b) ความสามารถในการคงรูปของแป้งขนมปังที่ทำจากแป้งสาลี (Cnt) และแป้งที่เติมโปรตีนสกัดจากเมล็ดฟักทองในระดับ 5%, 10%, และ 20% ที่มา : (Galenko et al., 2024)

การศึกษาก่อนหน้านี้เกี่ยวกับองค์ประกอบของโปรตีนเข้มข้นจากเมล็ดฟักทอง (PSPC) พบว่ามีปริมาณโปรตีนสูง (62.15%) ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งโปรตีนเสริมในแป้งปราศจากกลูเตนได้ (ตารางที่ 15) (Banu & Aprodu, 2024) นอกจากนี้ การใช้โปรตีนจากเมล็ดฟักทอง (PP) 15 % ของน้ำหนักแป้ง พบว่า ส่งผลให้ปริมาณจำเพาะของขนมปังแป้งข้าวเจ้า (RF) ผสมแป้งข้าวโอ๊ต (OFF) ลดลง

นอกจากนี้ ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมโดส่งผลกระทบต่อปริมาณจำเพาะของขนมปังที่เติมโปรตีนจากเมล็ดฟักทอง (PP) ทำให้ปริมาณจำเพาะสูงขึ้น (ตารางที่ 16) และการใช้โปรตีนจากเมล็ดฟักทอง (PP) ที่ 15 % มีแนวโน้มทำให้เนื้อของขนมปังมีสีที่เข้มมากขึ้น (ภาพที่ 13)

**ตารางที่ 15** องค์ประกอบโดยประมาณของแป้งข้าวเจ้า (RF), แป้งโอ๊ต (OFF), และโปรตีนจากเมล็ดฟักทอง (PP)

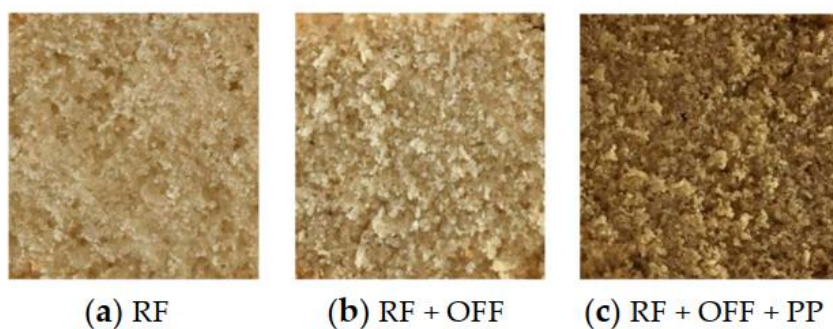
Sample	Moisture, %	Proteins, %	Fat, %	Fiber, %	Ash, %	Carbohydrates, %
RF	11.45 ± 0.01 <sup>a</sup>	7.40 ± 0.10 <sup>c</sup>	2.50 ± 0.08 <sup>c</sup>	4.20 ± 0.10 <sup>c</sup>	1.52 ± 0.02 <sup>a</sup>	72.93 <sup>a</sup>
OFF	11.35 ± 0.01 <sup>b</sup>	13.10 ± 0.10 <sup>b</sup>	6.33 ± 0.05 <sup>b</sup>	9.80 ± 0.15 <sup>b</sup>	1.49 ± 0.02 <sup>a</sup>	57.86 <sup>b</sup>
PP	9.55 ± 0.01 <sup>c</sup>	62.15 ± 0.17 <sup>a</sup>	12.67 ± 0.06 <sup>a</sup>	12.90 ± 0.10 <sup>a</sup>	0.62 ± 0.02 <sup>b</sup>	2.11 <sup>c</sup>

ที่มา : Banu and Aprodu (2024)

**ตารางที่ 16** ปริมาณจำเพาะ และ ความแน่นของเนื้อขนมปัง ของตัวอย่างขนมปังปราศจากกลูเตนที่เตรียมในอัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแป้งที่แตกต่างกัน

Bread Sample	WA, %	Specific Volume, cm <sup>3</sup> /g	Firmness, g Force
RF	70	2.43 ± 0.03 <sup>a</sup>	1366.03 ± 21.23 <sup>a</sup>
RF + OFF	70	2.40 ± 0.02 <sup>a,b</sup>	1414.64 ± 47.98 <sup>a</sup>
RF + OFF + PP	70	2.34 ± 0.04 <sup>b</sup>	1462.22 ± 43.35 <sup>a</sup>
RF	75	2.84 ± 0.04 <sup>a</sup>	716.09 ± 16.47 <sup>c</sup>
RF + OFF	75	2.61 ± 0.04 <sup>b</sup>	1007.44 ± 49.96 <sup>b</sup>
RF + OFF + PP	75	2.47 ± 0.03 <sup>c</sup>	1263.38 ± 37.21 <sup>a</sup>

ที่มา : Banu and Aprodu (2024)



**ภาพที่ 13** ลักษณะภายในเนื้อขนมปังที่เตรียมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อน้ำหนักแป้ง 70%

ที่มา : Banu and Aprodu (2024)

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

###### 3.1.1 วัตถุดิบและสารเคมี

สตาร์ชมันสำปะหลัง (ตรา ปลาไทย 5 ดาว, บริษัท ที.พี.ซี อีเยบตงจัน จำกัด, ประเทศไทย)

แป้งข้าวโพด (ตรา กระต่าย, บริษัท คิงส์ มิลลิ่ง จำกัด, ประเทศไทย)

โปรตีนเข้มข้นจากเมล็ดฟักทอง (ตรา Natural Efe Macrobiotic World, บริษัท เนเซอร์ล อีเอฟอี พงัน จำกัด, ประเทศ)

HPMC (Methocel K4M) (บริษัท วิกี้ เอนเตอร์ไพรส์ จำกัด, ประเทศไทย)

น้ำตาล (ตรา มิตรผล, บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด, ประเทศไทย)

ยีสต์ผง (ตรา ซาฟ อินสแตนท์, บริษัท โซไซตี้ อินดัสเตรียล จำกัด, ประเทศฝรั่งเศส)

เกลือ (ตรา ประทีป, บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์, ประเทศไทย)

น้ำมันปาล์ม (ตรา มรกต, บริษัท ไชม์ ดาร์บี้ ออยส์ มรกต จำกัด, ประเทศไทย)

น้ำ DI (Dionized water)

###### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่องวัดสี (ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex)

เครื่องชั่งชนิดหยาด (2 ตำแหน่ง) (PA 2102 OHAUS Crop. Pioneer™, USA)

เครื่องชั่งชนิดละเอียด (4 ตำแหน่ง) (Sartorius, BP 221S, AG Gottingen, Germany)

เตาอบลมร้อน (WTB BINDER, Germany)

เตาเผา (Carbolite, UK)

เครื่องสกัดไขมัน (Soxhlet) (ยี่ห้อ FOSS รุ่น ST 243 Soxtec, Denmark)

เครื่องกลั่นไนโตรเจน (ยี่ห้อ Gerhardt รุ่น VAP20, Germany)

เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อน(DSC) (ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น DSC 8000)

เครื่องวัดสมบัติของแป้ง RVA (Newport scientific รุ่น RVA-4)

### 3.2 ขั้นตอนและวิธีการศึกษา

#### 3.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเข้มข้นจากเมล็ดฟักทอง (PSPC)

นำโปรตีนเข้มข้นจากเมล็ดฟักทอง (PSPC) โยอาหารที่ละลายน้ำได้ และโยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ ตามวิธีของ (AOAC, 2019) ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า ตามวิธีของ (AOAC, 2000) (ภาคผนวก ก)

### 3.3 การวิเคราะห์สมบัติของแป้งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

#### 3.3.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปราศจากกลูเตน ด้วยเครื่องวัดสมบัติของแป้ง RVA (Newport scientific รุ่น RVA-4) ที่ความเข้มข้น 12% โดยตัวควบคุมใช้แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลังข้าวโพด (อัตราส่วน 80:20) ส่วนแป้งที่เติมโปรตีนเมล็ดฟักทองที่ความเข้มข้น 5%, 10% โดยคิดจากน้ำหนักแป้งทั้งหมด ชั่งน้ำหนัก  $3 \pm 0.01$  กรัมของตัวอย่างแห้ง เทน้ำกลั่นลงในกระบอกวัดให้น้ำหนักรวม  $25 \pm 0.01$  กรัม นำไปวิเคราะห์ด้วย STD.1 ซึ่งมีการกำหนดอุณหภูมิในการทดสอบไว้ดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้น  $50^{\circ}\text{C}$  คงที่นาน 1 นาที เพิ่มอุณหภูมิจาก  $50$  ถึง  $95^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 3.8 นาที อุณหภูมิ  $95^{\circ}\text{C}$  คงที่นาน 2.4 นาที ลดอุณหภูมิจาก  $95$  ถึง  $50^{\circ}\text{C}$  ในเวลา 3.8 นาที อุณหภูมิสุดท้าย  $50^{\circ}\text{C}$  คงที่นาน 2 นาที แล้วบันทึกค่าดังนี้ ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ค่าการแตกหัก (Break down) ค่าการคืนตัว (setback) อุณหภูมิที่เครื่องเริ่มวัดความหนืดได้ (pasting temperature) ทำซ้ำ 3 ครั้งในทุกตัวอย่าง

#### 3.3.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของแป้งโดเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

ทดสอบการเปลี่ยนแปลงความร้อนของโดจากแป้งผสมแป้งข้าวโพดกับสตาร์ชมันสำปะหลัง และแป้งผสมที่มีเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองที่ความเข้มข้น 5%, 10% นำไปวิเคราะห์โดยให้ความร้อนตั้งแต่  $25$  ถึง  $130^{\circ}\text{C}$  ที่  $10^{\circ}\text{C}$  ต่อนาที โดยการบรรจุใน Stainless Steel pan ดัดแปลงจากวิธีของ Zaidul et al. (2008) แล้วบันทึกค่าดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดเจลลาตินเซชัน ( $T_0$ ), อุณหภูมิสูงสุดของการเกิดเจลลาตินเซชัน ( $T_p$ ) อุณหภูมิสิ้นสุดของการเกิดเจลลาตินเซชัน ( $T_e$ ) และค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) ทำซ้ำ 2 ครั้งในทุกตัวอย่าง

### 3.4 การเตรียมสูตรขนมปังปราศจากกลูเตน

ชั่งส่วนผสมตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 17 โดยให้น้ำหนักรวม 250 กรัมจากนั้นนำส่วนผสมที่ชั่งแล้วมาร่อนผสมกันซึ่งได้แก่ แป้งข้าวโพด สตาร์ชมันสำปะหลัง และโปรตีนเมล็ดพืชของเตล่งในอ่างผสมตามด้วยเติมเกลือที่ชั่งไว้แล้ว ผสมยีสต์และน้ำตาลให้เข้ากันกับน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พักทิ้งไว้เป็นเวลา 10 นาที เเทล่งในอ่างผสม จากนั้นใช้เครื่องปั่น (ยี่ห้อ Philips, รุ่น HR 2115) ผสมที่ความเร็วเบอร์ 6 เป็นเวลา 3 นาที แล้วเติมน้ำมันพืชลงในอ่างผสม จากนั้นปั่นผสมด้วยความเร็วที่เบอร์ 4 เป็นเวลา 2 นาที จนได้เป็นแบทเตอร์ แล้วนำแบทเตอร์ไปชั่งใส่ในพิมพ์ขนมปัง แล้วจึงนำไปบ่มด้วยตู้อบอุณหภูมิ 37±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที ในส่วน PSPC5F เพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 60 นาที ส่วน PSPC5T เพิ่มอุณหภูมิการอบเป็น 200 องศาเซลเซียส 45 นาทีแล้ว จากนั้นนำขนมปังที่ได้ออกจากพิมพ์ขนมปังพักทิ้งไว้ 30 นาที ก่อนนำไปใช้วิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 17 แสดงส่วนผสมของขนมปังปราศจากกลูเตน (กรัมโปรตีน/100กรัมแป้ง)

ส่วนผสม	Control	PSPC5	PSPC10	PSPC5F	PSPC5T
แป้งข้าวโพด	80	80	80	80	80
สตาร์ชมันสำปะหลัง	20	20	20	20	20
PSPC 65%	-	5	10	5	5
ยีสต์	2	2	2	2	2
น้ำมันพืช	8	8	8	8	8
เกลือ	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
HPMC	3	3	3	3	3
น้ำกลั่น	84	84	84	84	84
เวลาบ่ม (นาที)	45	45	45	60	45
เวลาอบ (นาที)	50	50	50	50	50
อุณหภูมิอบ (°C)	170	170	170	170	200

### 3.5 การวิเคราะห์ลักษณะของขนมปังปราศจากกลูเตน

#### 3.5.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

นำขนมปังเต็มโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นไปวิเคราะห์องค์ประกอบหลักโดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน เถ้า (AOAC, 2000)

#### 3.5.2 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น

นำตัวอย่างความชื้นไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนักที่แน่นอน นำตัวอย่างขนมปังที่ลดขนาดทั้งก้อนแล้วมาชั่งน้ำหนัก 2 กรัม ตัวอย่างละ 3 ซ้ำใส่ลงใน ถ้วยอบความชื้นที่อบไว้ จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง อบจนได้น้ำหนักคงที่ หลังจากนั้นนำตัวอย่างความชื้นออกจากตู้อบใส่ในโถดูดความชื้น ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนักการคำนวณความชื้น (เปอร์เซ็นต์) จากสมการ (1)

$$\% \text{ ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (1)$$

#### 3.5.3 การวิเคราะห์ % Baking loss ในขนมปังปลอดกลูเตน

ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างขนมปังก่อนและหลังจากอบแล้วจึงนำไปคำนวณตามสมการ (2)

$$\% \text{ Baking loss} = \frac{\text{น้ำหนักขนมปังเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักขนมปังหลังอบ}}{\text{น้ำหนักขนมปังเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2)$$

#### 3.5.4 การวิเคราะห์ค่าสีของเนื้อและเปลือกของขนมปังปราศจากกลูเตน

นำตัวอย่างขนมปังมาวัดสีโดยใช้เครื่องวัดสี ใช้เครื่องวัดค่าสี (ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Color Flex) ที่สภาวะการทดสอบ CIELab Scale D65/10 โดยมี pot size ขนาด 1.25 นิ้ว รายงานค่าที่วิเคราะห์ที่ได้เป็นค่าสี L\* a\* และ b\* (โดยกำหนดให้ L\* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 -100 a\* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง a\* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว b\* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง b\* ที่เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน)

### 3.5.5 การวิเคราะห์ขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในขนมปังที่ใช้โปรแกรม ImageJ

โดยนำขนมปังตัดตามขวางความหนา 1 นิ้ว และตัดขอบถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล และนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์ตามวิธีของ Rathnayake et al. (2018) โดยเลือกพื้นที่เท่ากับ 40x40 mm และวิเคราะห์ขนาดรูพรุนที่ 0.1-infinity mm<sup>2</sup>

### 3.5.6 การวิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะของขนมปังปอดกกลูเตน

นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก (W) หาปริมาตรของตัวอย่างโดยใช้วิธีการแทนที่ด้วยเมล็ดงาดำ เริ่มจากวัดปริมาตรของภาชนะที่มีรูปทรงแน่นอนโดยบรรจุเมล็ดงาดำให้เต็มภาชนะปาดผิวหน้าให้เรียบวัดปริมาตรของเมล็ดงาดำที่เหลือในภาชนะโดยใช้กระบอกตวงขนาดต่าง ๆ บันทึกเป็นปริมาตรของภาชนะ (V1) บรรจุเมล็ดงาดำลงในภาชนะใบเดิมประมาณ 1/4 นำตัวอย่างใส่ลงไปบรรจุเมล็ดงาดำให้เต็มภาชนะปาดผิวหน้าให้เรียบเทเมล็ดงาดำและตัวอย่างออกจากภาชนะวัดปริมาตรของเมล็ดงาดำด้วยกระบอกตวงบันทึกเป็นปริมาตรของอากาศในภาชนะ (V2) คำนวณหาปริมาตรจำเพาะของตัวอย่างโดยเทียบจากปริมาตรมวลเท่ากับ 1 ซม.<sup>3</sup> จากสมการ

$$\text{ปริมาตรจำเพาะ (ซ.ม.}^3\text{/กรัม)} = \frac{V_1 - V_2}{W} \quad (3)$$

### 3.5.7 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปอดกกลูเตน

เตรียมตัวอย่างโดยตัดตัวอย่างให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร และสูง 1 เซนติเมตร วัดด้วยเครื่อง Texture Analyzer (Model TA-XT2i, Stable Micro System, UK) โดยใช้หัว probe P50 ใช้อัตราการเคลื่อนที่ของหัววัดดังนี้ pre-test speed = 3 (mm/s) test speed = 1 (mm/s) และ post-test speed = 3 (mm/s) trigger force = 0.049 N. (สุจิตตา เรืองรัมย์ และคณะ (2561)) โดยใช้วิธีแบบ TPA (ภาคผนวก ก) บันทึกค่าดังนี้ ค่า Hardness, Springiness, Cohesiveness และ Chewiness

## 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ออกแบบแผนการทดลองแบบ CRD (Completely Randomized Design) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วย ANOVA โดยแสดงข้อมูลด้วยค่ากลาง (mean)  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey HSD ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05) โดยใช้โปรแกรม SPSS Version 16.0

## บทที่ 4

### ผลทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น

##### 4.1.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ตารางที่ 18 พบว่า โปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น มีความชื้น 3.91% โปรตีน 65.49% ไขมัน 8.30% เถ้า 10.10 % เส้นใย 14.19 % และ คาร์โบไฮเดรต 1.92% ของน้ำหนักแห้งโดยโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น มีเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ และเส้นใยที่ละลายน้ำได้ อยู่ที่ 10.81% และ 3.38% ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สำหรับปริมาณโปรตีน และไขมันมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณโปรตีนที่รายงานโดยบริษัทที่จัดซื้อตัวอย่างมาโดยมีค่าเท่ากับ 65.90% และ 9.60% ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ศึกษาการสกัดโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้นจากเมล็ดพืชทอง โดยพบว่าการสกัดโปรตีน ไขมัน และเส้นใยได้อยู่ที่ 67.48%, 10.30% และ 12.53% ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Lovatto, 2020)

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC)

องค์ประกอบ	% น้ำหนักแห้ง
ความชื้น	3.91±0.11
โปรตีน (N*6.25)	65.49±0.30
ไขมัน	8.30±0.28
เถ้า	10.10±0.07
เส้นใยทั้งหมด	14.19±0.00
ไม่ละลายน้ำ	10.81±0.00
ละลายน้ำได้	3.38±0.00
คาร์โบไฮเดรต*	1.92±0.00

หมายเหตุ \*คาร์โบไฮเดรต=100 - (โปรตีน+ไขมัน+เถ้า+เส้นใย)

## 4.2 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

### 4.2.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

การวิเคราะห์ในตารางที่ 19 พบว่า การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) มีค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) และค่าการแตกหัก (Break down) สูงกว่าสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ทำให้ความหนืดของแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น เนื่องจากโปรตีนเมื่อถูกให้ความร้อน โครงสร้างของโปรตีนเสียสภาพและคลายตัว สามารถจับกับสายโพลีแซ็กคาไรด์ของแป้งเกิดเป็นโครงข่ายสามมิติส่งผลต่อการเกิดเจลทำให้ความหนืดสูงขึ้น (Zhang et al., 2025) การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ที่ 10 % ยังส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ลดลงเล็กน้อย อีกทั้งการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการคืนตัวกลับ (Setback) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p \geq 0.05$ ) แต่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้านี้ การผสมโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเข้มข้นในสตาร์ชมันสำปะหลังพบว่า เมื่อผสมโปรตีนเพิ่มมากขึ้นจะมีค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) และค่าการแตกหัก (Break down) และค่าการคืนตัวกลับ (Setback) เพิ่มขึ้นในลักษณะคล้ายกัน (Chinma et al., 2013) และเหมือนกันกับเพิ่มการใช้เวย์โปรตีนไอโซเลทผสมลงในสตาร์ชข้าวโอ๊ต (Kumar et al., 2022) แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของความสามารถในการเกิดเจลที่แข็งแรงมากขึ้นเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) อย่างไรก็ตาม การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ไม่ได้ส่งผลต่ออุณหภูมิที่เริ่มให้ความข้นหนืด (Pasting temperature)

ตารางที่ 19 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความข้นหนืด (Pasting properties) ของแป้งเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) 5 และ 10%

ตัวอย่าง	Peak viscosity (cP)	Trough (cP)	Break down (cP)	Final viscosity (cP)	Setback (cP)	Pasting temperature (°C)
Control	6344±136 <sup>a</sup>	3342±119 <sup>b</sup>	3002±127 <sup>a</sup>	5001±96 <sup>b</sup>	1659±103 <sup>ns</sup>	74.33±1.14 <sup>ns</sup>
PSPC5	7173±97 <sup>b</sup>	3006±84 <sup>a</sup>	4168±63 <sup>b</sup>	4723±81 <sup>a</sup>	1717±15	74.08±0.72
PSPC10	8321±47 <sup>c</sup>	2952±67 <sup>a</sup>	5261±42 <sup>c</sup>	4757±89 <sup>ab</sup>	1834±23	74.32±0.06

หมายเหตุ <sup>a,b,c</sup>ตัวอักษรที่ต่างกันของตัวอย่างจากคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) <sup>ns</sup>แสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \geq 0.05$ ) เมื่อ PSPC5 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5%, PSPC10 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัด 10%

#### 4.2.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนของแป้งโดเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

จากผลการทดลองในตารางที่ 20 พบว่าตัวอย่างของโดขนมปังมี peak ขึ้น 2 ตำแหน่ง ( $T_{p1}$  และ  $T_{p2}$ ) สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ León et al. (1997) อธิบายว่าตำแหน่งพีคแรก ( $T_{p1}$ ) สัมพันธ์กับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ช (เรียกว่า gelatinization endotherm) และตำแหน่งพีคที่สอง ( $T_{p2}$ ) สัมพันธ์กับการหลอมผลึกที่ตกค้างของสตาร์ช (เรียกว่า melting endotherm) โดยลักษณะดังกล่าวเป็นผลจากปริมาณน้ำในตัวอย่างที่มีจำกัด (Prakaywatchara et al., 2018) การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ที่ 10% ทำให้ค่า  $T_0$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) อาจเกิดจากความสามารถในการแย่งจับน้ำจากแป้งของโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น ทำให้การพองตัวของแป้งถูกจำกัดส่งผลต่อการเกิดเจลลาติไนซ์เซชัน (Wang et al., 2021) อุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันช่วงแรกจึงสูงขึ้น (Bajaj et al., 2018) อย่างไรก็ตาม พบว่าอุณหภูมิตำแหน่งพีคแรก ( $T_{p1}$ ) ตำแหน่งพีคที่สอง ( $T_{p2}$ ) และอุณหภูมิสุดท้าย ( $T_e$ ) ไม่มีความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างโดขนมปังสูตรควบคุม บ่งชี้ว่าการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ไม่ได้ผลกระทบต่ออุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันโดยรวม ค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่ความดันคงที่ซึ่งสัมพันธ์กับการสูญเสียโครงสร้างและความเป็นระเบียบในโมเลกุลเกลียวคู่ในสตาร์ชในระบบ การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) มีแนวโน้มทำให้ค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ผลลัพธ์นี้คล้ายกับรายงานการวิจัยของ Yang et al. (2024) พบว่าการเติมโปรตีนถั่วเหลืองในแป้งข้าวเจ้าทำให้ค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) ลดลง ในรายงานกล่าวว่า การเติมโปรตีนถั่วเหลืองปริมาณที่สูงส่งผลให้สัดส่วนปริมาณแป้งเจ้าในระบบลดลง ทำให้การหลอมเกลียวคู่ในสตาร์ชลดลง ดังนั้นค่าเอนทัลปีของระบบ ( $\Delta H$ ) จึงลดลง

ตารางที่ 20 แสดงสมบัติเชิงความร้อนของแป้งโดปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5 และ 10%

ตัวอย่าง	$T_0$	$T_{p1}$	$T_{p2}$	$T_e$	$\Delta H$ (J/g)
Control	74.38±0.29 <sup>a</sup>	80.85±0.47 <sup>ns</sup>	94.47±0.92 <sup>ns</sup>	103.51±0.80 <sup>ns</sup>	7.25±0.32 <sup>c</sup>
PSPC5	74.86±0.12 <sup>a</sup>	81.19±0.21	95.95±0.66	103.91±0.46	6.52±0.07 <sup>b</sup>
PSPC10	75.78±0.11 <sup>b</sup>	81.10±0.72	95.60±0.68	103.70±0.47	5.70±0.16 <sup>a</sup>

หมายเหตุ <sup>a,b</sup>ตัวอักษรที่ต่างกันของตัวอย่างจากคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) <sup>ns</sup>แสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \geq 0.05$ ) เมื่อ PSPC5 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5%, PSPC10 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัด 10%

#### 4.3 การวิเคราะห์ลักษณะของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

##### 4.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขนมปังเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขนมปังสูตรควบคุม สูตร PSPC5 และสูตร PSPC10 (ตารางที่ 21) พบว่า ในสูตร PSPC5 มีความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เนื่องจากความสามารถในการกักเก็บของโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น อย่างไรก็ตามในสูตร PSPC10 ทำให้ความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) อาจเนื่องจากการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นทำให้เปลือกของขนมปังสูตร PSPC10 (ภาพที่ 15) หนาขึ้นอย่างชัดเจน ส่งผลต่อการแพร่ของน้ำจากภายในสู่ภายนอกทำให้บริเวณผิวส่วนบนของขนมปังแห้งมากกว่าเนื้อขนมปังด้านใน เมื่อลดขนาดขนมปังทั้งก้อนแล้ววิเคราะห์จึงส่งผลให้ปริมาณความชื้นที่วิเคราะห์ได้มีแนวโน้มลดลง การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นช่วยเพิ่มโปรตีนในขนมปังปราศจากกลูเตนได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ปริมาณของไขมันในสูตรขนมปังที่เติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นไม่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม อาจเนื่องจากโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นมีปริมาณไขมันที่ไม่สูงมากนักจึงไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณไขมันโดยรวมของขนมปัง ปริมาณของเถ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นมีปริมาณเถ้าค่อนข้างสูงจึงทำให้ปริมาณเถ้าในขนมปังเพิ่มขึ้นเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 10% ในส่วนปริมาณของคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 63.42% 61.30% และ 66.58% ตามลำดับ

การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นอย่างน้อย 5% ของน้ำหนักขนมปังตามสัดส่วนในตารางที่ 17 สามารถช่วยเพิ่มโปรตีนในขนมปังปราศจากกลูเตนได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

#### ตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขนมปังเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

องค์ประกอบ (%)	Control	PSPC5	PSPC10
ความชื้น	31.50±0.10 <sup>b</sup>	32.39±0.39 <sup>c</sup>	25.65±0.11 <sup>a</sup>
โปรตีน (N*6.25)	0.92±0.07 <sup>a</sup>	2.23±0.03 <sup>b</sup>	3.17±0.01 <sup>c</sup>
ไขมัน	3.02±0.01 <sup>ns</sup>	2.93±0.07	3.17±1.01
เถ้า	1.14±0.01 <sup>a</sup>	1.15±0.01 <sup>a</sup>	1.43±0.01 <sup>b</sup>
คาร์โบไฮเดรต*	63.42±0.15 <sup>b</sup>	61.30±0.35 <sup>a</sup>	66.58±1.03 <sup>c</sup>

หมายเหตุ \*คาร์โบไฮเดรต=100 - (โปรตีน+ไขมัน+เถ้า+ความชื้น)

<sup>a,b,c</sup> ตัวอักษรที่ต่างกันของตัวอย่างจากคอลัมน์ซ้ายไปขวา แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

<sup>ns</sup> แสดงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \geq 0.05$ ) เมื่อ PSPC5 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5%

PSPC10 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัด 10%

### 4.3.2 ลักษณะทางกายภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น

ค่าการสูญเสียในระหว่างการอบ (Baking loss) เป็นตัวบ่งชี้การสูญเสียความชื้นของระบบขนมปังภายใต้ความร้อน โดยปริมาณความชื้นที่สูญเสียไปนั้นมีความสำคัญต่อคุณภาพของขนมปังหลังอบ ในตารางที่ 22 แสดงลักษณะทางกายภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) มีค่าการสูญเสียในระหว่างการอบ (Baking loss) แนวโน้มลดลง และค่าความชื้นของเนื้อขนมปัง (Crumb moisture) ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) บ่งชี้ถึงความสามารถโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้นต่อการกักเก็บความชื้นของขนมปังที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า พบว่าโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้นมีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้ดี (Coşkun et al., 2020) และให้ผลลัพธ์คล้ายคลึงกับการเติมโปรตีนถั่วเหลือง (SPI) ที่ช่วยลดการสูญเสียความชื้นระหว่างการอบเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ SPI ขึ้น (Yang et al., 2024) เนื่องจากโปรตีนเมื่อโดนความร้อนจะเสียสภาพทำให้เกิดโครงข่ายสามมิติที่ช่วยชะลอการสูญเสียน้ำระหว่างการอบได้อย่างไรก็ตาม การเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ในปริมาณสูงมีแนวโน้มทำให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังลดลง เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนกับโปรตีนจะเสียสภาพและคลายตัวจับกับสายโพลีแซ็กคาไรด์ของแป้งเกิดเป็นโครงข่ายสามมิติทำให้เนื้อขนมปังแน่นขึ้น (Tomić et al., 2020; Zhang et al., 2024) นอกจากนี้ พบว่าความหนืดที่เพิ่มของโดมัมทำให้ขนมปังปราศจากกลูเตนมีปริมาตรจำเพาะต่ำลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Coşkun et al. (2020) ศึกษาผลของโปรตีนสกัดเข้มข้นจากเมล็ดพืชสามชนิดเมื่อเติมในขนมปังปราศจากกลูเตน ได้แก่ โปรตีนผงเทียนดำ (BC) เมล็ดองุ่น (GS) และเมล็ดพืชทอง (PS) พบว่า ปริมาณน้ำในสูตรที่น้อยเกิดความหนืดสูงทำให้โดขยายตัวไม่เต็มที่ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำในสูตรขนมปังปริมาตรจำเพาะของขนมปังที่เติมโปรตีนทั้งสามชนิดจะเพิ่มขึ้น ในรายงานของ Brites et al. (2018) กล่าวว่า โดขนมปังปราศจากกลูเตนมักมีลักษณะคล้ายแบตเตอรี่มากกว่าเป็นเหมือนโดแป้งสาลีทั่วไป การเติมโปรตีน หรือไฮโดรคอลลอยด์เสริมลงในโดขนมปังปราศจากกลูเตนจึงมีผลอย่างมากต่อลักษณะคุณภาพของโด เช่น ให้ความหนืดของโดสูงขึ้น ส่งผลให้การแพร่ของก๊าซเกิดขึ้นช้าลงและสามารถกักเก็บก๊าซไว้ได้ในช่วงเริ่มต้นของการอบ (Salehi, 2019) จึงช่วยโดขนมปังขยายตัวในระหว่างการอบได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มเวลาอบในขนมปังสูตร PSPC5F ไม่ส่งผลต่อปริมาตรจำเพาะ ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิอบในขนมปังสูตร PSPC5T มีแนวโน้มที่ปริมาตรจำเพาะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรอื่น ๆ แม้ว่าขนมปังสูตร PSPC5T มีปริมาตรจำเพาะที่สูงขึ้น แต่ไม่ทำให้ขนมปังยุบตัวระหว่างการอบเป็นข้อสนับสนุนว่าการเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ทำให้โครงสร้างขนมปังมีความแข็งแรงมากขึ้น โดยทั่วไปขนมปังปราศจากกลูเตนมักมีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงมากพอส่งผลทำให้เนื้อขนมปังยุบตัวลงหลังจากการขยายตัวในการอบช่วงแรก (Marston et al., 2016)

ตารางที่ 22 ลักษณะทางกายภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น

ตัวอย่าง	% Baking loss	Specific volume (cm <sup>3</sup> /g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	% Crumb moisture
Control	19.22±0.32 <sup>c</sup>	3.90±0.23 <sup>c</sup>	798±38 <sup>d</sup>	44.58±0.10 <sup>a</sup>
PSPC5	17.50±0.26 <sup>b</sup>	3.06±0.09 <sup>b</sup>	639±17 <sup>b</sup>	45.98±0.02 <sup>b</sup>
PSPC10	15.40±0.30 <sup>a</sup>	1.72±0.12 <sup>a</sup>	366±25 <sup>a</sup>	46.90±0.12 <sup>c</sup>
PSPC5F	17.36±0.18 <sup>b</sup>	3.41±0.17 <sup>bc</sup>	714±30 <sup>c</sup>	46.25±0.03 <sup>b</sup>
PSPC5T	22.54±1.00 <sup>d</sup>	3.79±0.17 <sup>c</sup>	745±19 <sup>cd</sup>	44.01±0.49 <sup>a</sup>

a,b,c,d ตัวอักษรที่ต่างกันของตัวอย่างจากคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อ PSPC5 คือเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้นที่ 5%, PSPC10 คือเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัด 10%, PSPC5F คือการเพิ่มระยะเวลาอบเป็น 60 นาที, PSPC5T คือการเพิ่มอุณหภูมิอบเป็น 200 องศาเซลเซียส

โปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) มีโปรโตคลอโรฟิลล์ที่เปลือกของเมล็ดซึ่งเป็นสารตั้งต้นของคลอโรฟิลล์ที่เป็นรงควัตถุให้สีเขียว (Cui et al., 2023) เมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) จึงทำให้สีของเปลือกและเนื้อของขนมปังมีแนวโน้มสีออกเหลืองแกมเขียวมากขึ้น (ภาพที่ 14 และ ภาพที่ 15) และเมื่อโปรโตคลอโรฟิลล์ถูกให้ความร้อน โครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบอื่นๆ เช่น ฟิโอฟิติน (pheophytin) และไพโรไฟิติน (pyrophytin) ทำให้สีเปลี่ยนไปเป็นสีเหลือง

ในตารางที่ 23 และตารางที่ 24 แสดงค่าสีของเปลือกและเนื้อขนมปังที่ปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ซึ่งพบว่า เปลือกขนมปังที่เติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) มีค่าสี L\* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของค่าสี a\* และ b\* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างน้ำตาลกับโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) และปฏิกิริยาการเกิดคาราเมล (caramelization) ของน้ำตาลในระหว่างการให้ความร้อน นอกจากนี้ การเพิ่มระยะเวลาอบในขนมปังสูตร PSPC5F ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าสีเมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังสูตร PSPC5 แต่การเพิ่มอุณหภูมิอบในขนมปังสูตร PSPC5T พบว่าค่าสีเปลือกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เปรียบเทียบกับขนมปังสูตร PSPC5 และสูตรควบคุม เนื่องจากการเพิ่มความร้อนช่วยเร่งปฏิกิริยาที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ให้เกิดมากขึ้น และในส่วนของเนื้อของขนมปังที่เติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) มีค่า L\* และ a\* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) และค่า b\* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เนื่องจากสีรงควัตถุของโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ตามที่กล่าวไปข้างต้น

ตารางที่ 23 ค่าสีของเปลือกขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

ตัวอย่าง	L*	a*	b*
Control	89.24±0.25 <sup>c</sup>	0.45±0.06 <sup>a</sup>	13.54±0.09 <sup>a</sup>
PSPC5	76.80±0.63 <sup>b</sup>	5.89±0.03 <sup>c</sup>	30.89±0.08 <sup>b</sup>
PSPC10	75.88±0.77 <sup>b</sup>	4.02±0.85 <sup>b</sup>	29.75±1.47 <sup>b</sup>
PSPC5F	76.08±0.12 <sup>b</sup>	6.38±0.17 <sup>c</sup>	31.12±0.30 <sup>b</sup>
PSPC5T	60.56±1.00 <sup>a</sup>	12.92±0.40 <sup>d</sup>	36.45±0.76 <sup>c</sup>

<sup>a,b,c,d</sup>ตัวอักษรที่ต่างกันของตัวอย่างจากคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

เมื่อ PSPC5 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5%, PSPC10 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัด 10%, PSPC5F คือการเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 60 นาที, PSPC5T คือการเพิ่มอุณหภูมิอบเป็น 200 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 24 ค่าสีของเนื้อขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

ตัวอย่าง	L*	a*	b*
Control	78.61±0.46 <sup>c</sup>	-0.97±0.02 <sup>d</sup>	4.06±0.75 <sup>a</sup>
PSPC5	74.66±2.68 <sup>bc</sup>	-3.13±0.09 <sup>c</sup>	10.20±0.62 <sup>b</sup>
PSPC10	54.34±1.83 <sup>a</sup>	-4.61±0.13 <sup>a</sup>	15.83±0.59 <sup>c</sup>
PSPC5F	70.87±2.09 <sup>b</sup>	-3.11±0.08 <sup>c</sup>	9.87±0.27 <sup>b</sup>
PSPC5T	69.20±1.41 <sup>b</sup>	-3.30±0.28 <sup>b</sup>	10.56±0.76 <sup>b</sup>

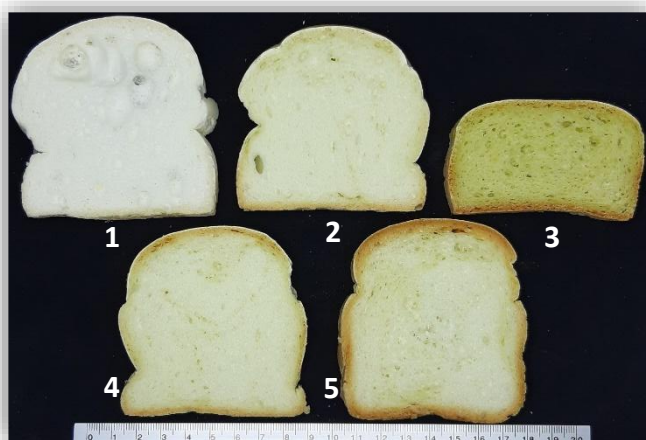
<sup>a,b,c</sup>ตัวอักษรที่ต่างกันของตัวอย่างจากคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

เมื่อ PSPC5 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5%, PSPC10 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัด 10%, PSPC5F คือการเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 60 นาที, PSPC5T คือการเพิ่มอุณหภูมิอบเป็น 200 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 14 ภาพเปลือกของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

เมื่อ 1. Control, 2. PSPC5, 3. PSPC10 4. PSPC5F และ 5. PSPC5T



ภาพที่ 15 ภาพเนื้อของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น  
เมื่อ 1. Control, 2. PSPC5, 3. PSPC10 4. PSPC5F และ 5. PSPC5T

#### 4.3.3 การวิเคราะห์ขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

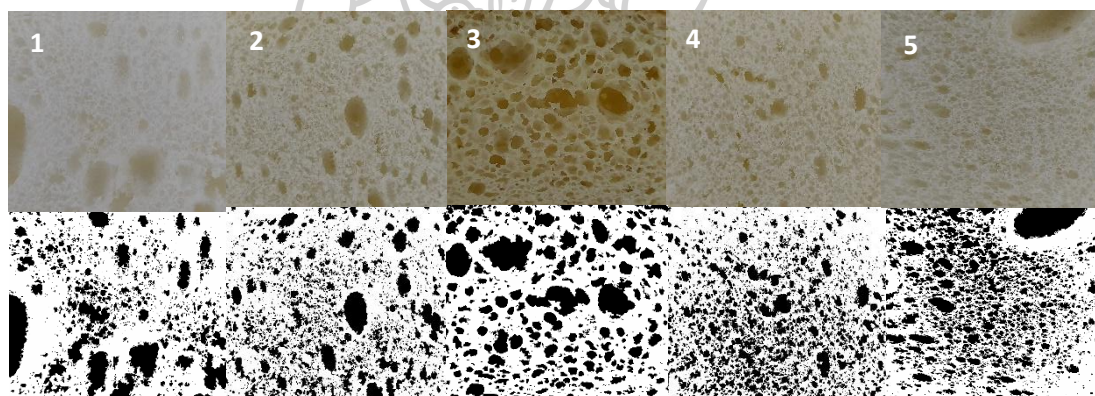
จากตารางที่ 25 และภาพที่ 16 พบว่า ขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในขนมปังเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ที่ 5% ไม่แตกต่างกันเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม แต่มีแนวโน้มทำให้ขนาดของรูพรุนเล็กลง และขนมปังมีจำนวนของรูพรุนกับความหนาแน่นของรูพรุน (Cell Density) สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม แนวโน้มดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากการแย่งจับน้ำของโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) โดของขนมปังจึงมีความหนืดสูงขึ้นทำให้โครงสร้างโดที่กักเก็บก๊าซมีความแข็งแรงมากขึ้น ฟองก๊าซจึงขยายตัวได้น้อยลงเป็นผลให้รูพรุนมีขนาดเล็กและยังช่วยให้ขนาดรูพรุนมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ในส่วนของการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มในขนมปังสูตร PSPC5F และการเพิ่มอุณหภูมิการอบในสูตร PSPC5T ไม่มีความแตกต่างจากขนมปังสูตร PSPC5 ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม และการเพิ่มอุณหภูมิการอบไม่ได้ส่งผลกระทบต่อขนาด และปริมาณรูพรุนภายในขนมปังที่เติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ในทางกลับกันการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ที่ 10% ทำให้ขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) และขนมปังมีจำนวนรูพรุนกับความหนาแน่นของรูพรุนลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเทียบกับเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ที่ 5% อาจเนื่องจากความหนืดของโดขนมปังที่สูงขึ้นส่งผลให้โดขนมปังขยายตัวได้ยาก ก๊าซที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของโดขนมปังจึงขยายตัวได้ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการรวมตัวกันของฟองก๊าซกลายเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ขึ้นเป็นสาเหตุให้ขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 25 ขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในของโครงสร้างขนมปังที่ปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีน เมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

ตัวอย่าง	Number of Cells	Mean Cell Area (mm <sup>2</sup> )	Cell Density (cells/cm <sup>2</sup> )
Control	2,168±361 <sup>ab</sup>	0.19±0.02 <sup>a</sup>	135±23 <sup>ab</sup>
PSPC5	3,147±276 <sup>b</sup>	0.13±0.01 <sup>a</sup>	197±17 <sup>b</sup>
PSPC10	1,399±146 <sup>a</sup>	0.42±0.04 <sup>b</sup>	87±9 <sup>a</sup>
PSPC5F	2,879±463 <sup>b</sup>	0.17±0.02 <sup>a</sup>	180±29 <sup>b</sup>
PSPC5T	3,090±439 <sup>b</sup>	0.17±0.01 <sup>a</sup>	193±27 <sup>b</sup>

<sup>a,b</sup>ตัวอักษรที่ต่างกันของตัวอย่างจากคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

เมื่อ PSPC5 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5%, PSPC10 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัด 10%, PSPC5F คือการเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 60 นาที, PSPC5T คือการเพิ่มอุณหภูมิอบเป็น 200 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 16 แสดงโครงสร้างขนมปังปราศจากกลูเตนเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

(1. Control, 2. PSPC5, 3. PSPC10 4. PSPC5F และ 5. PSPC5T) บนพื้นที่ขนาด 40x40 mm

#### 4.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

ตารางที่ 26 พารามิเตอร์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อขนมปังที่ปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น พบว่า การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ที่ 10% ทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความต้านทานการเคี้ยว (Chewiness) ของขนมปังมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) สอดคล้องกับลักษณะขนมปังที่มีปริมาตรจำเพาะลดลง ซึ่งมักสัมพันธ์

กับเนื้อขนมปังที่มีความแข็งและความต้านทานการเคี้ยวเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์ดังกล่าวคล้ายคลึงกับรายงานของ Yang et al. (2024) การเติมโปรตีนถั่วเหลือง (SPI) ในขนมปังที่ความเข้มข้นมากกว่า 12% ทำให้ความแข็งของขนมปังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) อย่างไรก็ตาม การเพิ่มระยะเวลาการบ่มในขนมปังสูตร PSPC5F และการเพิ่มอุณหภูมิการอบในขนมปังสูตร PSPC5T พบว่าค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความต้านทานการเคี้ยว (Chewiness) ค่า Springiness (ค่าความยืดหยุ่น) และค่าการยึดเกาะ (Cohesiveness) ในทั้งสองสูตรนี้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัย ( $p \geq 0.05$ ) เมื่อเทียบกับขนมปังสูตร PSC5 และขนมปังสูตรควบคุม บ่งชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มระยะเวลาในการบ่มกับการเพิ่มอุณหภูมิการอบขนมปังในสูตรที่เติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ที่ 5% ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อเนื้อสัมผัสของขนมปังโดยรวมมากนัก นอกจากนี้ ค่าการยึดเกาะ (Cohesiveness) ในขนมปังเติม PSPC ที่ 10% มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงให้เห็นว่าขนมปังมีแนวโน้มสูญเสียความยืดหยุ่นของโครงสร้างไป ในรายงานของ da Rosa Machado and Thys (2019) กล่าวว่าขนมปังที่มีค่า cohesiveness สูง มักมีแนวโน้มเนื้อสัมผัสที่ดี เนื่องจากเนื้อขนมปังจะไม่ฉีกขาดง่ายในระหว่างการหั่นเป็นชิ้น ดังนั้น ควรใช้โปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ที่ 5% เพื่อเน้นช่วยปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของขนมปังด้านอื่น ๆ เนื่องจากหากใช้โปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) เกิน 10% มีแนวโน้มที่เนื้อสัมผัสของขนมปังจะแย่ลง

**ตารางที่ 26** พารามิเตอร์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อขนมปังที่ปราศจากกลูเตนเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น

ตัวอย่าง	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness	Chewiness
Control	155.95±13.72 <sup>a</sup>	1.55±0.07 <sup>ns</sup>	0.84±0.04 <sup>b</sup>	201.10±5.15 <sup>a</sup>
PSPC5	148.88±18.63 <sup>a</sup>	1.33±0.12	0.85±0.01 <sup>b</sup>	163.07±1.28 <sup>a</sup>
PSPC10	884.75±98.48 <sup>b</sup>	1.15±0.10	0.74±0.01 <sup>a</sup>	742.37±22.39 <sup>b</sup>
PSPC5F	150.54±19.76 <sup>a</sup>	1.55±0.05	0.84±0.01 <sup>b</sup>	179.63±15.81 <sup>a</sup>
PSPC5T	145.48±25.09 <sup>a</sup>	1.55±0.06	0.85±0.02 <sup>b</sup>	160.27±20.07 <sup>a</sup>

<sup>a,b</sup>ตัวอักษรที่ต่างกันของตัวอย่างจากคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ )

<sup>ns</sup>แสดงความแตกต่างที่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P \geq 0.05$ ) เมื่อ PSPC5 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5%, PSPC10 คือเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัด 10%, PSPC5F คือการเพิ่มระยะเวลาบ่มเป็น 60 นาที, PSPC5T คือการเพิ่มอุณหภูมิการอบเป็น 200 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

### สรุป

การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ทำให้ความหนืดของแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชมันสำปะหลังเพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้ส่งผลต่ออุณหภูมิที่เริ่มให้ความร้อนขึ้น (Pasting temperature) ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงความร้อนของแป้งโด การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น (PSPC) ไม่ได้ผลกระทบต่ออุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันโดยรวม แต่มีผลต่อค่าเอนทัลปี ( $\Delta H$ ) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5% ของน้ำหนักขนมปัง สามารถช่วยเพิ่มโปรตีนในขนมปังปราศจากกลูเตนในระบบแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชมันสำปะหลังได้อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เพิ่มการกักเก็บน้ำของขนมปัง และลดการสูญเสียความชื้นในระหว่างการอบ การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นทำให้สีของเปลือก และเนื้อขนมปังมีสีเข้มมากขึ้นเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม ที่มีปริมาณโปรตีนเริ่มต้นที่ต่ำกว่า 1% ของน้ำหนักขนมปัง การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นมีแนวโน้มช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของขนมปังมากขึ้น ขนาดของรูพรุนในเนื้อขนมปังเล็กลง โครงสร้างของรูพรุนของเนื้อขนมปังกระจายตัวได้ดี และสม่ำเสมอมากขึ้น การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5% ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อเนื้อสัมผัสของขนมปังในระบบแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชมันสำปะหลัง แม้ว่าการเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5% มีแนวโน้มสามารถปรับปรุงคุณลักษณะต่าง ๆ ในขนมปังปราศจากกลูเตนได้ทีกล่าวมาข้างต้น แต่การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่มีโปรตีนที่ 10% ส่งผลให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) และรูพรุนของขนมปังมีขนาดใหญ่ขึ้น สัมพันธ์จำนวนเซลล์อากาศที่ลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับเนื้อสัมผัสของขนมปัง ทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความต้านทานการเคี้ยว (Chewiness) ของขนมปังมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) บ่งชี้ให้เห็นถึงความแข็งของขนมปังที่เพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน ในส่วนสีของเนื้อขนมปัง และเปลือกขนมปังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามสีของโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้น เนื่องจาก ในโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นมีโปรโตคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของคลอโรฟิลล์ที่ให้ สีเขียว นอกจากนี้ การเพิ่มระยะเวลาการอบโด และการเพิ่มอุณหภูมิการอบไม่ได้ส่งผลกระทบต่อปริมาตรจำเพาะ โครงสร้างรูพรุน และเนื้อสัมผัสของขนมปังในงานวิจัยนี้ แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มอุณหภูมิระหว่างการอบมีผลต่อการสูญเสียความชื้นในระหว่างการอบ และการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเปลือกขนมปังที่เพิ่มอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

ดังนั้น การเติมโปรตีนเมล็ดฟักทองสกัดเข้มข้นที่ 5% มีความเหมาะสมในการทำขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชมันสำปะหลัง ที่เวลาการอบ 45 นาที อุณหภูมิอบ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที (คือสูตร PSPC5) เนื่องจากช่วยสามารถเพิ่มโปรตีน

ในขนมปังปราศกลูเตน และทำให้โครงสร้างของขนมปังให้มีแข็งแรงมากขึ้น ลดขนาดของรูพรุน เพิ่มจำนวนรูพรุนในเนื้อขนมปังปราศกลูเตน โดยไม่ทำให้เนื้อสัมผัสด้อยลง และช่วยให้สีของเนื้อกับเปลือกขนมปังมีสีเข้มขึ้นอีกด้วย

### ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้สามารถนำไปศึกษาต่อยอดโดยมุ่งเน้นการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการประเมินคุณภาพของขนมปังที่เติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้นในระหว่างการเก็บรักษา เพื่อทำความเข้าใจการเปลี่ยนแปลงด้านคุณสมบัติทางกายภาพระหว่างการรักษาของขนมปัง ควบคู่ไปกับการวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาการที่เพิ่มขึ้นเมื่อเสริมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น และการยอมรับทางประสาทสัมผัสกับผู้บริโภคกลุ่มเป้าหมาย เพื่อประเมินความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจะช่วยให้ความเข้าใจเชิงลึกและเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ต่อไป



## รายการอ้างอิง

- Abera, S., & Rakshit, S. K. (2003). Processing Technology Comparison of Physicochemical and Functional Properties of Cassava Starch Extracted from Fresh Root and Dry Chips. *Starch - Stärke*, 55(7), 287-296.
- AOAC. (2000). Official Methods of Analysis. 17th ed. The Association of Official Analytical Chemists. Maryland, U.S.A.
- AOAC. (2019). Official Methods of Analysis. 21st ed. The Association of Official Analytical Chemists. Virginia, U.S.A.
- Asaoka, M., Blanshard, J. M. V., & Rickard, J. E. (1991). Seasonal Effects on the Physicochemical Properties of Starch from Four Cultivars of Cassava. *Starch - Stärke*, 43(12), 455-459.
- Bajaj, R., Singh, N., Kaur, A., & Inouchi, N. (2018). Structural, morphological, functional and digestibility properties of starches from cereals, tubers and legumes: a comparative study. *J Food Sci Technol*, 55(9), 3799-3808.  
<https://doi.org/10.1007/s13197-018-3342-4>
- Banu, I., & Aprodu, I. (2024). Assessment of the Performance of Oat Flakes and Pumpkin Seed Powders in Gluten-Free Dough and Bread Based on Rice Flour. *Applied Sciences*, 14(8), 3479.
- Bertoft, E. (2017). Understanding Starch Structure: Recent Progress. *Agronomy*, 7(3), 56.
- Brites, L. T. G. F., Schmiele, M., & Steel, C. J. (2018). Chapter 13 - Gluten-Free Bakery and Pasta Products. In A. M. Holban & A. M. Grumezescu (Eds.), *Alternative and Replacement Foods* (pp. 385-410). Academic Press.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811446-9.00013-7>
- Bučko, S., Katona, J., Popović, L., Vaštag, Ž., Petrović, L., & Vučinić-Vasić, M. (2015). Investigation on solubility, interfacial and emulsifying properties of pumpkin (*Cucurbita pepo*) seed protein isolate. *LWT - Food Science and Technology*, 64(2), 609-615.
- Caili, F., Huan, S., & Quanhong, L. (2006). A review on pharmacological activities and

utilization technologies of pumpkin. *Plant Foods Human Nutrition*, 61(2), 73-80.

- Carini, E., Curti, E., Fattori, F., Paciulli, M., & Vittadini, E. (2017). Staling of gluten-free breads: physico-chemical properties and <sup>1</sup>H NMR mobility. *European Food Research and Technology*, 243(5), 867-877.
- Charles, A. L., Chang, Y.-H., Ko, W.-C., Sriroth, K., & Huang, T.-C. (2004). Some Physical and Chemical Properties of Starch Isolates of Cassava Genotypes. *Starch - Stärke*, 56(9), 413-418.
- Cherry, J. P., & McWatters, K. H. (1981). Whippability and Aeration. In *Protein Functionality in Foods* (Vol. 147, pp. 149-176). AMERICAN CHEMICAL SOCIETY.
- Chinma, C. E., Ariahu, C. C., & Abu, J. O. (2013). Chemical composition, functional and pasting properties of cassava starch and soy protein concentrate blends. *J Food Sci Technol*, 50(6), 1179-1185. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0451-8>
- Coşkun, Ö., Pehlivanoğlu, H., & Gülseren, İ. (2020). Pilot scale assessment for seed protein enrichment of gluten-free breads at varying water content levels and after protein modification treatments. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(7), e14512.
- Cui, X., Huang, Q., & Zhang, W. (2023). Pumpkin seed coat pigments affected aqueous enzymatic extraction processing through interaction with its interfacial protein. *Food Bioscience*, 52, 102435. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102435>
- da Rosa Machado, C., & Thys, R. C. S. (2019). Cricket powder (*Gryllus assimilis*) as a new alternative protein source for gluten-free breads. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 56, 102180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102180>
- Damodaran, S., & Paraf, A. (1997). *Food proteins and their applications*. New York (N.Y.) : Dekker.
- de Oliveira Sousa, A. G., Fernandes, D. C., Alves, A. M., de Freitas, J. B., & Naves, M. M. V. (2011). Nutritional quality and protein value of exotic almonds and nut from the Brazilian Savanna compared to peanut. *Food Research International*, 44(7), 2319-

2325.

- Du, Y., Jiang, Y., Zhu, X., Xiong, H., Shi, S., Hu, J., Peng, H., Zhou, Q., & Sun, W. (2012). Physicochemical and functional properties of the protein isolate and major fractions prepared from *Akebia trifoliata* var. *australis* seed. *Food Chemistry*, 133(3), 923-929.
- El-Adawy, T. A., & Taha, K. M. (2001). Characteristics and composition of different seed oils and flours. *Food Chemistry*, 74(1), 47-54.
- El-Soukary, F. A. H. (2001). Evaluation of pumpkin seed products for bread fortification. *Plant Foods for Human Nutrition*, 56(4), 365-384.
- Elli, L., Dolfini, E., & Bardella, M. T. (2003). Gliadin cytotoxicity and in vitro cell cultures. *Toxicology Letters*, 146(1), 1-8.
- Fantozzi, P. (1981). Grape seed: A potential source of protein. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 58(12), 1027-1031.
- Fessas, D., Signorelli, M., Pagani, A., Mariotti, M., Iametti, S., & Schiraldi, A. (2008). Guidelines for buckwheat enriched bread. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 91(1), 9-16.
- Freitas, R. A., Paula, R. C., Feitosa, J. P. A., Rocha, S., & Sierakowski, M. R. (2004). Amylose contents, rheological properties and gelatinization kinetics of yam (*Dioscorea alata*) and cassava (*Manihot utilissima*) starches. *Carbohydrate Polymers*, 55(1), 3-8.
- Friedman, M. (1996). Nutritional Value of Proteins from Different Food Sources. A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44(1), 6-29.
- Galenko, O., Shevchenko, A., Ceccanti, C., Mignani, C., & Litvynchuk, S. (2024). Transformative shifts in dough and bread structure with pumpkin seed protein concentrate enrichment. *European Food Research and Technology*, 250(4), 1177-1188.
- 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), 143-152.
- Henchion, M., Hayes, M., Mullen, A. M., Fenelon, M., & Tiwari, B. (2017). Future Protein Supply and Demand: Strategies and Factors Influencing a Sustainable

Equilibrium. *Foods*, 6(7).

Houben, A., Höchstötter, A., & Becker, T. (2012). Possibilities to increase the quality in gluten-free bread production: an overview. *European food research and technology = Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung. A*, 235(2), 195-208.

Ibrahim, M. I., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., & Zuhri, M. Y. (2019). Extraction, chemical composition, and characterization of potential lignocellulosic biomasses and polymers from corn plant parts. *BioResources*, 14(3), 6485–6500.

Jagelaviciute, J., & Cizeikiene, D. (2021). The influence of non-traditional sourdough made with quinoa, hemp and chia flour on the characteristics of gluten-free maize/rice bread. *LWT*, 137, 110457.

Jia, R., Cui, C., Gao, L., Qin, Y., Ji, N., Dai, L., Wang, Y., Xiong, L., Shi, R., & Sun, Q. (2023). A review of starch swelling behavior: Its mechanism, determination methods, influencing factors, and influence on food quality. *Carbohydrate Polymers*, 321, 121260. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121260>

Kadokawa, J.-i. (2012). Preparation and Applications of Amylose Supramolecules by Means of Phosphorylase-Catalyzed Enzymatic Polymerization. *Polymers*, 4(1), 116-133.

Kotecka-Majchrzak, K., Sumara, A., Fornal, E., & Montowska, M. (2020). Oilseed proteins – Properties and application as a food ingredient. *Trends in Food Science & Technology*, 106, 160-170.

Kristinsson, H. G., & Rasco, B. A. (2000). Fish Protein Hydrolysates: Production, Biochemical, and Functional Properties. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40(1), 43-81.

Kumar, L., Brennan, M., Brennan, C., & Zheng, H. (2022). Influence of whey protein isolate on pasting, thermal, and structural characteristics of oat starch. *Journal of Dairy Science*, 105(1), 56-71. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-20711>

León, A., Durán, E., & de Barber, C. B. (1997). A new approach to study starch changes occurring in the dough-baking process and during bread storage. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und -Forschung A*, 204(4), 316-320.

<https://doi.org/10.1007/s002170050083>

- Liu, K.-l., Zheng, J.-b., & Chen, F.-s. (2017). Relationships between degree of milling and loss of Vitamin B, minerals, and change in amino acid composition of brown rice. *LWT - Food Science and Technology*, 82, 429-436.
- López, D. N., Galante, M., Robson, M., Boeris, V., & Spelzini, D. (2018). Amaranth, quinoa and chia protein isolates: Physicochemical and structural properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 152-159.
- Lovatto, N. d., Loureiro, B. B., Bender, A. B., Loureiro, C. B., Goulart, F. R., Speroni, C. S., Macagnan, F. T., Piana, M., & Silva, L. P. . (2020). Phosphorylated protein concentrate pumpkin seed (*cucurbita moschata*): Optimization by response surface methodology and nutritional characterization. *Ciência Rural*, 50(2).
- Marston, K., Khouryeh, H., & Aramouni, F. (2016). Effect of heat treatment of sorghum flour on the functional properties of gluten-free bread and cake. *LWT*, 65, 637-644. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.063>
- Mattila, P., Mäkinen, S., Euroola, M., Jalava, T., Pihlava, J.-M., Hellström, J., & Pihlanto, A. (2018). Nutritional Value of Commercial Protein-Rich Plant Products. *Plant Foods for Human Nutrition*, 73(2), 108-115.
- Mishra, S., & Rai, T. (2006). Morphology and functional properties of corn, potato and tapioca starches. *Food Hydrocolloids*, 20(5), 557-566.
- Montoya, C. A., Gomez, A. S., Lallès, J.-P., Souffrant, W. B., Beebe, S., & Leterme, P. (2008). In vitro and in vivo protein hydrolysis of beans (*Phaseolus vulgaris*) genetically modified to express different phaseolin types. *Food Chemistry*, 106(3), 1225-1233.
- Moure, A., Sineiro, J., Domínguez, H., & Parajó, J. C. (2006). Functionality of oilseed protein products: A review. *Food Research International*, 39(9), 945-963.
- Nkosi, C. Z., Opoku, A. R., & Terblanche, S. E. (2006). Antioxidative effects of pumpkin seed (*Cucurbita pepo*) protein isolate in CCl<sub>4</sub>-induced liver injury in low-protein fed rats. *Phytother Res*, 20(11), 935-940.
- Nunes, M. H. B., Ryan, L. A. M., & Arendt, E. K. (2009). Effect of low lactose dairy powder addition on the properties of gluten-free batters and bread quality. *European Food Research and Technology*, 229(1), 31-41.
- Nwokolo, E., & Sim, J. S. (1987). Nutritional assessment of defatted oil meals of melon

- (*Colocynthis citrullus* L.) and fluted pumpkin (*Telfaria occidentalis* hook) by chick assay. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 38(3), 237-246.
- Oakenfull, D. G., Pearce, R. J., & Burley, R. W. (1997). Protein Gelation. In D. Oakenfull, J. Pearce, & R. W. Burley (Eds.), *Food proteins and their applications* (Vol. 4, pp. 111-141). Marcel Dekker.
- Oladunmoye, O. O., Aworh, O. C., Maziya-Dixon, B., Erukainure, O. L., & Elemo, G. N. (2014). Chemical and functional properties of cassava starch, durum wheat semolina flour, and their blends. *Food Science & Nutrition*, 2(2), 132-138.
- Patel, A., & Bahna, S. L. (2016). Hypersensitivities to sesame and other common edible seeds. *Allergy*, 71(10), 1405-1413.
- Pico, J., Reguilón, M. P., Bernal, J., & Gómez, M. (2019). Effect of rice, pea, egg white and whey proteins on crust quality of rice flour-corn starch based gluten-free breads. *Journal of Cereal Science*, 86, 92-101.
- Prakaywatchara, P., Wattanapairoj, C., & Thirathumthavorn, D. (2018). Effects of Emulsifier Types and Levels in Combination With Glycerol on the Gelatinization and Retrogradation Properties of Gluten-Free Rice-Based Wonton Wraps. *Starch - Stärke*, 70(5-6), 1700227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/star.201700227>
- Quanhong, L., Ze, T., & Tongyi, C. (2003). Study on the hypoglycemic action of pumpkin extract in diabetic rats. *Acta NutrimentaSinica*, 25(1), 34-36.
- Ragab, D. M., Babiker, E. E., & Eltinay, A. H. (2004). Fractionation, solubility and functional properties of cowpea (*Vigna unguiculata*) proteins as affected by pH and/or salt concentration. *Food Chemistry*, 84(2), 207-212.
- Rathnayake, H. A., Navaratne, S. B., & Navaratne, C. M. (2018). Porous Crumb Structure of Leavened Baked Products. *International Journal of Food Science*, 2018, 8187318.
- Raymond, J., Inquello, V., & Azanza, J. L. (1991). The seed proteins of sunflower: Comparative studies of cultivars. *Phytochemistry*, 30(9), 2849-2856.
- Rodríguez-Jiménez, B., Domínguez-Ortega, J., Ledesma, A., González-García, J. M., & Kindelan-Recarte, C. (2010). Food allergy to pumpkin seed. *Allergologia et Immunopathologia*, 38(1), 50-51.

- Sadeghian Motahar, S. F., Ariaeenejad, S., Salami, M., Emam-Djomeh, Z., & Sheykh Abdollahzadeh Mamaghani, A. (2021). Improving the quality of gluten-free bread by a novel acidic thermostable  $\alpha$ -amylase from metagenomics data. *Food Chemistry*, 352, 129307.
- Salehi, F. (2019). Improvement of gluten-free bread and cake properties using natural hydrocolloids: A review. *Food Science & Nutrition*, 7(11), 3391-3402. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/fsn3.1245>
- Salunkhe, D. K., & Kadam, S. S. (1989). *Crc Handbook of world food legumes: Nutritional Chemistry, processing technology. and Utilization*. CRC Press.
- Sánchez-Vioque, R., Clemente, A., Vioque, J., Bautista, J., & Millán, F. (1999). Protein isolates from chickpea (*Cicer arietinum* L.): chemical composition, functional properties and protein characterization. *Food Chemistry*, 64(2), 237-243.
- Sathe, S. K. (2002). Dry Bean Protein Functionality. *Critical Reviews in Biotechnology*, 22(2), 175-223.
- Shevkani, K., Singh, N., Kaur, A., & Rana, J. C. (2015). Structural and functional characterization of kidney bean and field pea protein isolates: A comparative study. *Food Hydrocolloids*, 43, 679-689.
- Shimada, K., & Matsushita, S. (1980). Relationship between thermocoagulation of proteins and amino acid compositions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 28(2), 413-417.
- Shoukat, R., Cappai, M., Pilia, L., & Pia, G. (2025). Rice Starch Chemistry, Functional Properties, and Industrial Applications: A Review. *Polymers*, 17(1), 110. <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/1/110>
- Sigüenza-Andrés, T., Gallego, C., & Gómez, M. (2021). Can cassava improve the quality of gluten free breads? *LWT*, 149, 111923.
- Skendi, A., Papageorgiou, M., & Varzakas, T. (2021). High Protein Substitutes for Gluten in Gluten-Free Bread. *Foods*, 10(9), 1997. <https://www.mdpi.com/2304-8158/10/9/1997>
- Šmidová, Z., & Rysová, J. (2022). Gluten-Free Bread and Bakery Products Technology. *Foods*, 11(3), 480. <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/3/480>
- Sriroth, K., Santisopasri, V., Petchalanuwat, C., Kurotjanawong, K., Piyachomkwan, K., &

- Oates, C. G. (1999). Cassava starch granule structure–function properties: influence of time and conditions at harvest on four cultivars of cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, 38(2), 161-170.
- Sudheesh, C., Aaliya, B., & Sunooj, K. V. (2021). Role of Starch in Gluten-Free Breads. In S. A. Mir, M. A. Shah, & A. M. Hamdani (Eds.), *Gluten-free Bread Technology* (pp. 155-181). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-73898-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73898-3_10)
- Tomić, J., Torbica, A., & Belović, M. (2020). Effect of non-gluten proteins and transglutaminase on dough rheological properties and quality of bread based on millet (*Panicum miliaceum*) flour. *LWT*, 118, 108852. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108852>
- Torbica, A., Hadnađev, M., & Dapčević, T. (2010). Rheological, textural and sensory properties of gluten-free bread formulations based on rice and buckwheat flour. *Food Hydrocolloids*, 24(6), 626-632.
- Uthayakumaran, S., Newberry, M., Phan-Thien, N., & Tanner, R. (2002). Small and large strain rheology of wheat gluten. *Rheologica Acta*, 41(1), 162-172. <https://doi.org/10.1007/s003970200015>
- Vasconcelos, I. M., Campello, C. C., Oliveira, J. T., Carvalho, A. F., Souza, D. O., & Maia, F. M. M. (2006). Brazilian soybean glycine max (L.) Merr. cultivars adapted to low latitude regions: Seed composition and content of bioactive proteins. *Brazilian Journal of Botany [online]* 29(4), 617-625.
- Venuste, M., Zhang, X., Shoemaker, C. F., Karangwa, E., Abbas, S., & Kamdem, P. E. (2013). Influence of enzymatic hydrolysis and enzyme type on the nutritional and antioxidant properties of pumpkin meal hydrolysates. *Food & Function*, 4(5), 811-820.
- Vinayashree, S., & Vasu, P. (2021). Biochemical, nutritional and functional properties of protein isolate and fractions from pumpkin (*Cucurbita moschata* var. Kashi Harit) seeds. *Food Chemistry*, 340, 128177.
- Wang, J., Zhao, S., Min, G., Qiao, D., Zhang, B., Niu, M., Jia, C., Xu, Y., & Lin, Q. (2021). Starch-protein interplay varies the multi-scale structures of starch undergoing thermal processing. *International Journal of Biological Macromolecules*, 175,

- 179-187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.020>
- Wójcik, M., Różyło, R., Schönlechner, R., Matwijczuk, A., & Dziki, D. (2022). Low-Carbohydrate, High-Protein, and Gluten-Free Bread Supplemented with Poppy Seed Flour: Physicochemical, Sensory, and Spectroscopic Properties. *Molecules*, 27(5), 1574. <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/5/1574>
- Xanthopoulou, M. N., Nomikos, T., Fragopoulou, E., & Antonopoulou, S. (2009). Antioxidant and lipoxygenase inhibitory activities of pumpkin seed extracts. *Food Research International*, 42(5), 641-646.
- Xu, J., Bietz, J. A., & Carriere, C. J. (2007). Viscoelastic properties of wheat gliadin and glutinin suspensions. *Food Chemistry*, 101, 1028-1030.
- Yang, Y., Zhang, C., Ma, C.-M., Hu, L.-S., Bian, X., Wang, B., & Zhang, N. (2024). Impact of soybean protein isolate on gluten-free bread: a comprehensive study of physicochemical properties of gluten-free dough and bread matrix properties. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(1), 251-264. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16799>
- Yano, H. (2019). Recent practical researches in the development of gluten-free breads. *npj Science of Food*, 3(1), 7. <https://doi.org/10.1038/s41538-019-0040-1>
- Zaidul, I. S. M., Absar, N., Kim, S. J., Suzuki, T., Karim, A. A., Yamauchi, H., & Noda, T. (2008). DSC study of mixtures of wheat flour and potato, sweet potato, cassava, and yam starches. *Journal of Food Engineering*, 86(1), 68-73.
- Zayas, J. F. (1997). Water Holding Capacity of Proteins. In J. F. Zayas (Ed.), *Functionality of Proteins in Food* (pp. 76-133). Springer Berlin Heidelberg.
- Zhang, J., Liu, Y., Wang, P., Zhao, Y., Zhu, Y., & Xiao, X. (2025). The Effect of Protein–Starch Interaction on the Structure and Properties of Starch, and Its Application in Flour Products. *Foods*, 14(5), 778. <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/5/778>
- Zhang, M., Jia, R., Ma, M., Yang, T., Sun, Q., & Li, M. (2023). Versatile wheat gluten: functional properties and application in the food-related industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 63(30), 10444-10460. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2078785>
- Zhu, F. (2015). Composition, structure, physicochemical properties, and modifications of

- cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, 122, 456-480.
- 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(2), 213-220.
- Zorzi, C. Z., Garske, R. P., Flôres, S. H., & Thys, R. C. S. (2020). Sunflower protein concentrate: A possible and beneficial ingredient for gluten-free bread. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102539.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด. เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). คุณสมบัติของแป้ง: เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่สาม สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- จิตรนา แจ่มเมฆ, & อรอนงค์ นัยวิกุล. (2539). เบเกอรี่เทคโนโลยีเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่สี่ สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- ณัฐนิชา ทวีมาก. (2020). ศาสตร์แห่งขนมปัง (ออนไลน์). แหล่งที่มา : [https://krua.co/cooking\\_post/artofbread](https://krua.co/cooking_post/artofbread). 15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2564.
- นิตยา รัตนานนท์. (2545). เคมีอาหาร. พิมพ์ครั้งที่หนึ่ง สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ.
- ปยุตต์ สัมภาวะผล, & ธรรมรัตน์ แก้วมณี. (2554). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ “การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี สมบัติเชิงหน้าที่ และการออกฤทธิ์ทางชีวภาพของโปรตีนไฮโดรไลเสตจากถั่วเหลือง” ได้รับทุนภายใต้ โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีงบประมาณ 2554.
- รัตนา จินดาพรรณ. (2547). ฟองในอาหาร (Food Foams). วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 มิถุนายน 2547-พฤษภาคม 2548. หน้า 12-17.
- สมฤดี ไทพานิชย์. (2553). การดัดแปรสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนจากพืชด้วยเอนไซม์. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 มิถุนายน 2553-พฤษภาคม 2554. หน้า 9-16.
- สุจิตตา เรืองรัมย์, กนกวรรณ จิตวงศ์, & อบเชย วงศ์ทอง. (2561). การพัฒนาสูตรขนมปังแซนด์วิชโดยใช้รำข้าวไรซ์เบอร์รี่ทดแทนแป้งสาลี. วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 13(1): 123-139.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2540). ข้าวสาลี: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่สอง สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

## ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ ตามวิธีการของ (AOAC, 2000)

1. ปริมาณความชื้น ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนอย่างละเอียด 3-5 กรัม ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมสำหรับหาความชื้นที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้ว (ถ้วยอลูมิเนียมผ่านการอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนัก) นำถ้วยอลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนัก อบซ้ำอีกครั้งประมาณ 30 นาที ทำเช่นเดิมจนได้น้ำหนักที่คงที่ ซึ่งมีผลต่างของน้ำหนักไม่เกิน 2 มิลลิกรัม แล้วคำนวณหาร้อยละปริมาณความชื้น ดังนี้

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

## 2. โปรตีน

### 2.1 ขั้นตอนการย่อย

เตรียมตัวอย่าง 0.5-1.0 กรัมผสมกับ  $\text{CuSO}_4$  0.1 กรัม และ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  2 กรัม ใส่ลงในหลอดย่อยโปรตีน แล้วเติม conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  25 มิลลิลิตร และใส่ boiling chip ก่อนนำหลอดไปวางในเครื่องย่อย แบบ semi-micro เปิดเครื่องตั้งจับไอกรตและเครื่องย่อย โดยย่อยที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที จากนั้นปรับเพิ่มอุณหภูมิเป็น 380 องศาเซลเซียส ย่อยต่ออีกจนได้สารละลายใส ปิดเครื่องย่อย แล้วปล่อยให้หลอดย่อยทิ้งไว้ให้เย็น

### 2.2 ขั้นตอนการกลั่นและไตเตรท

เปิดเครื่องกลั่นหาปริมาณไนโตรเจนและเปิดน้ำหล่อเย็นเครื่องควบแน่น ใส่ boric acid (ความเข้มข้นร้อยละ 4) 25 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เติม methyl red 2 หยด แล้วนำขวดรูปชมพู่ไปรองรับของเหลวที่กลั่นได้ โดยส่วนปลายของอุปกรณ์ควบแน่นจุ่มลงในสารละลายกรด นำหลอดย่อยที่เย็นแล้วจากข้อ 2.1 มาเติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วนำเข้าเครื่องกลั่น เป็นเวลา 600 วินาที ตัวอย่างจะทำปฏิกิริยากับ NaOH (ความเข้มข้นร้อยละ 50) จะได้สารละลายสีน้ำตาลขุ่น จากนั้นนำของเหลวที่ได้ในขวดรูปชมพู่มาไตเตรทด้วย HCl (ความเข้มข้น 0.1 N) จนสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูอ่อน ทำข้อ 2.1 และ 2.2 กับหลอด blank แต่เปลี่ยนจากตัวอย่างเป็นน้ำกลั่น

คำนวณหาร้อยละปริมาณโปรตีน ดังนี้

$$\text{ร้อยละปริมาณโปรตีน} = \frac{(A - B) \times N \times 1.4007 \times F}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}} \times 100$$

A= ปริมาณ HCl ที่ใช้ในการเตรียมการไตเตรตตัวอย่าง

B= ปริมาณ HCl ที่ใช้ในการไตเตรตแบล็ง

N= โมลของ HCl

F = kjeldahl factor

### 3. ไขมัน

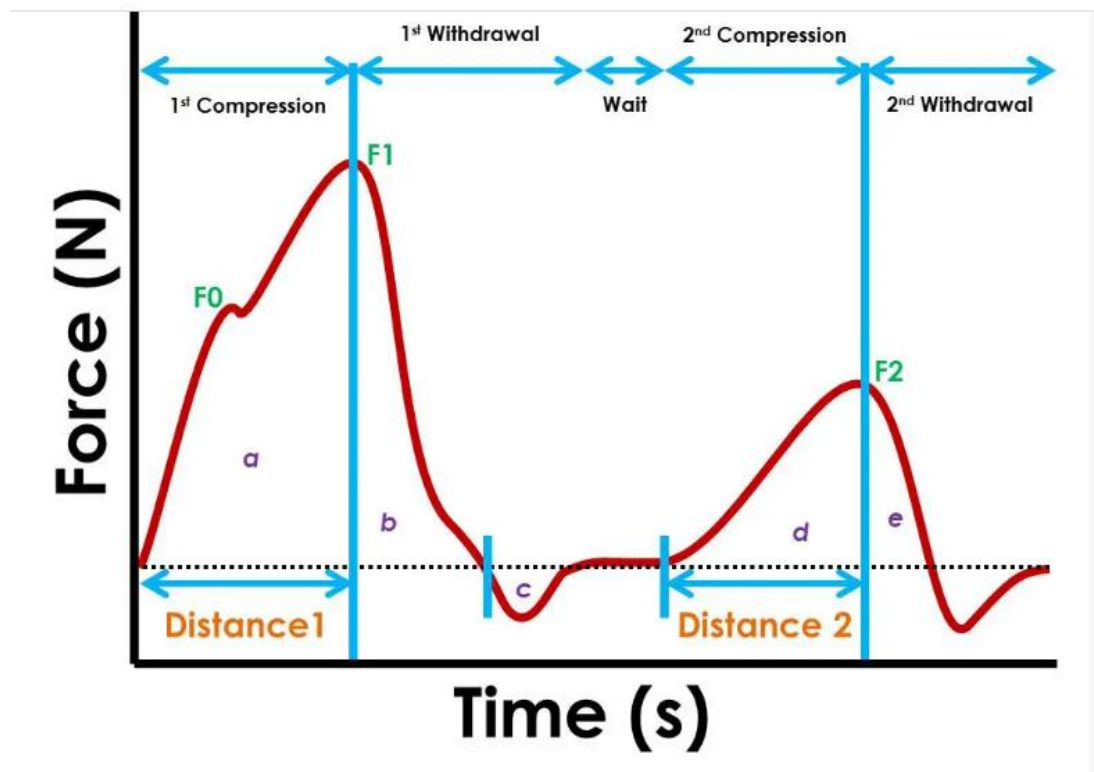
ชั่งน้ำหนักถ้วยที่ทำการอบที่ 105 °C ชำระคืน ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนอย่างละเอียด 3-5 กรัม ห่อตัวอย่างให้มิดชิด แล้วใส่ลงในทิมเบล นำทิมเบลพร้อมตัวอย่างต่อเข้ากับเครื่องสกัดไขมัน เติมตัวทำละลาย petroleum ether 250 มิลลิลิตร ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมสำหรับสกัดไขมันที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน (ถ้วยอลูมิเนียมผ่านการอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนัก) โดยให้ทิมเบลจุ่มลงในตัวทำละลายและถ้วยอลูมิเนียมวางบนแผ่นให้ความร้อนของเครื่องสกัดไขมัน ซึ่งกระบวนการสกัดมีทั้งหมด 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนแรก boiling ใช้เวลา 1 ชั่วโมง ขั้นตอนที่สอง rinsing ใช้เวลา 2 ชั่วโมง ขั้นตอนที่สาม solvent recovery ใช้เวลา 30 นาที และขั้นตอนสุดท้าย pre-drying ใช้เวลา 30 นาที เมื่อครบทั้ง 4 ขั้นตอน นำถ้วยอลูมิเนียมไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาร้อยละปริมาณไขมัน ดังนี้

$$\text{ร้อยละปริมาณไขมัน} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันที่สกัดได้ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}} \times 100$$

4. เถ้า เเผาถ้วยตัวอย่างที่ 550 °C 24 ชั่วโมง พักไว้ในเดซิเคเตอร์ 30 นาที ชั่งตัวอย่างให้ได้ น้ำหนักที่แน่นอนอย่างละเอียด 5 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องเคลือบสำหรับหาเถ้าที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน (ถ้วยกระเบื้องเคลือบผ่านการเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนัก) แล้วเผาบนเตาไฟฟ้า จนหมดควัน จากนั้นนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 5-6 ชั่วโมง จนได้เถ้าสีเทาอ่อนหรือสีขาว แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนัก เเผาซ้ำอีกครั้งประมาณ 30 นาที ทำเช่นเดิมจนได้น้ำหนักที่คงที่ ซึ่งมีผลต่างของน้ำหนักไม่เกิน 2 มิลลิกรัม แล้วคำนวณหาร้อยละปริมาณเถ้า ดังนี้

$$\text{ร้อยละปริมาณเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักเถ้าที่ได้ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}} \times 100$$

5. การคำนวณพารามิเตอร์ของลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA ด้วยเครื่อง Texture analyzer



ภาพที่ 17 แสดงตำแหน่งที่ใช้คำนวณพารามิเตอร์ลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA ด้วยเครื่อง Texture analyzer

ที่มา : [www.rheologylab.com/services/texture-analysis](http://www.rheologylab.com/services/texture-analysis)

โดยการคำนวณค่าพารามิเตอร์ ดังนี้

5.1 Hardness = (ค่าความแข็ง)  $F1$  พิกัดสูงสุดจากการกดครั้งแรก

5.2 Springiness = (ค่าความยืดหยุ่น)  $(Distance\ 1 / Distance\ 2) \times 100$

5.3 Chewiness = (ค่าความเหนียว)  $(F1 \times Distance\ 2) / (Distance\ 1 \times (d+e) / (a+b))$

5.4 Cohesiveness = (ค่าการยึดเกาะ)  $(d+e) / (a+b)$

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ธนวิชญ์ สุขแก้ว

วุฒิการศึกษา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีอาหาร)

ผลงานตีพิมพ์

ธนวิชญ์ สุขแก้ว, ดวงใจ ธีรธรรมถาวร และ ปิยะฉัตร ใจเอื้อ. (2563). การศึกษาอัตราส่วนของตัวอย่างต่อตัวทำละลายสำหรับการสกัดสีดอกดิน และผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสีของดอกดิน. การประชุมนำเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษาระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี. ครั้งที่ 13 หน้า 4485-4495.

ธนวิชญ์ สุขแก้ว และ ดวงใจ ธีรธรรมถาวร. (2565). ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแป้งข้าวโพดผสมสตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อเติมโปรตีนเมล็ดพืชทองสกัดเข้มข้น. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร. ครั้งที่ 12 หน้า 5466 – 5473

