

ผลของการใช้แป้งพรีเจลาติไนซ์จากถั่วเขียวและไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพของ
ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ทำจากแป้งข้าวเจ้า



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
ธันวาคม 2559
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์เรื่อง “ผลของการใช้แป้งพรีเจลาติโนซ์จากถั่วเขียวและไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพของ
ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ทำจากแป้งข้าวเจ้า”

ของนางสาวปิยพร ศิริคง

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตรและเทคโนโลยีการอาหาร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....กฤษณ์ 84.....ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร. กฤษณ์ วั่งไฉ)

.....พ.พ.ล.....ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ดร.ศศิวิมล จิตรากร)

.....ม. วีระวัฒน์.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑนา วีระวัฒน์กร)

.....ช.ร......กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิษฐา รุตรัตนมงคล)

อนุมัติ



(ดร.ภาณุ พุทธรังศ์)

รองคณบดีฝ่ายบริหารและวางแผน ปฏิบัติราชการแทน
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

6 S.ร. 2559

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งของ ดร.ศศิวิมล จิตรากร ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นที่ปรึกษาพร้อมทั้ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มณฑนา วีระวัฒนากร กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ถ่ายทอดความรู้ รวมถึงให้กำลังใจในเรื่องงานวิจัยหรือเรื่องในการดำเนินชีวิตประจำวันด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ระดับปริญญาโทประจำปี 2558 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและขอขอบคุณ คุณศศิมา อีระพันธ์ เกษตรกรจากชุมชนบ้านมะขามเรียง หมู่ที่ 3 ตำบลมะมั่ง อำเภอชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน คณาจารย์และบุคลากร ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุกด้าน ตลอดจนการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย ทำให้การดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบคุณเพื่อนและรุ่นพี่ ที่ให้ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้าน ตลอดจนให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณพ่อสุดสวาท-คุณแม่จ้อย ศิริคง ป้า และน้า ที่ให้กำลังใจและการสนับสนุนในทุกด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา

คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการและผู้สนใจไม่มากนักน้อย

ปิยพร ศิริคง

ชื่อเรื่อง	ผลของการใช้แป้งพรีเจลาตินไนซ์จากถั่วเขียวและไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนที่ทำจากแป้งข้าวเจ้า
ผู้วิจัย	ปิยพร ศิริคง
สถานที่ปรึกษา	ดร.ศศิวิมล จิตรากร
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑนา วีระวัฒนากกร
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2559
คำสำคัญ	ถั่วเขียว แป้งพรีเจลาตินไนซ์ แป้งข้าวเจ้า ไฮโดรคอลลอยด์ ขนมปังปราศจากกลูเตน

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งถั่วเขียวและศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งถั่วเขียวโดยวิธีการพรีเจลาตินไนซ์ โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) ที่แปรอุณหภูมิที่ผิวหน้าลูกกลิ้ง 3 ระดับคือ 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส (DMF 100, DMF120 และ DMF 140) และเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) ที่แปรระดับความชื้นของวัตถุดิบภายในบารเรลร้อยละ 46, 70 และ 94 (EMF46, EMF70 และ EMF94) เพื่อนำมาใช้ในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน จากการทดลองพบว่าแป้งพรีเจลาตินไนซ์จากถั่วเขียวที่ผ่านการดัดแปรทั้งสองวิธีมีดัชนีการดูดซับน้ำ กำลังการพองตัวและการละลาย เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer; RVA) พบว่า ค่าความหนืดสูงสุดและ ค่าการคืนตัวของแป้งพรีเจลาตินไนซ์ มีค่าต่ำกว่าแป้งถั่วเขียวดิบ โดยแป้ง DMF140 และแป้ง EMF46 มีค่าการคืนตัวต่ำกว่าแป้งพรีเจลาตินไนซ์ชนิดอื่นที่ผลิตด้วยวิธีเดียวกัน เมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าค่าพลังงานในการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งพรีเจลาตินไนซ์มีค่าต่ำกว่าแป้งถั่วเขียวดิบ ลักษณะของเม็ดแป้งที่ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์แสดงให้เห็นถึงการเกิดเจลาติไนเซชันอย่างสมบูรณ์ของแป้งพรีเจลาตินไนซ์การจากผลผลิตทั้งสองวิธี โดยโครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายและสูญเสียลักษณะไบรีฟริงเจนส์ (Birefringence)

จากการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของโพลีเมอร์ โดจากแป้งข้าวเจ้าที่มีการแทนที่ด้วยแป้ง
พรีเจลาติไนซ์จากการผลิตทั้งสองวิธีจะมีค่า Storage modulus (G') และค่า Loss modulus (G'')
สูงกว่าแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวดิบและจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระดับการแทนที่เพิ่มมากขึ้น
ส่วนขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าโดยการแทนที่ด้วยแป้งพรีเจลาติไนซ์ในปริมาณ
ร้อยละ 5, 10 และ 15 จะมีปริมาตรของขนมปังที่ลดลงและมีค่าความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อระดับการแทนที่
ด้วยแป้งพรีเจลาติไนซ์มากขึ้น และขนมปังที่ผลิตจากแป้ง DMF140 และ EMF46 ที่ระดับการแทนที่
แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 5 จะมีปริมาตรขนมปังที่ดี มีลักษณะของฟองอากาศ (Gas cell) ที่สม่ำเสมอ
และมีความแข็งแรงของเนื้อขนมปังที่ดีกว่าขนมปังสูตรอื่น ๆ

จากการศึกษาผลของปริมาณน้ำและ HPMC ที่ใช้ในการเติมลงในสูตรขนมปัง
ปราศจากกลูเตน ที่มีการแทนที่ด้วยแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์ DMF140 และ EMF46 ในระดับ
การแทนที่ ร้อยละ 5 โดยใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) วางแผนการทดลองแบบ
Central Composite Design (CCD) พบว่า ปริมาณ น้ำ และ Hydroxypropyl methylcellulose
(HPMC) มีผลต่อน้ำหนักและปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตน และสมการที่มีความเหมาะสม
ในการทำนายข้อมูลจากการทดลองคือสมการเส้นตรง เมื่อนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาสร้าง
กราฟพื้นผิวตอบสนองสามมิติของน้ำหนักและปริมาตรที่ได้ พบว่า สูตรที่เหมาะสมในการผลิตขนม
ปังปราศจากกลูเตนคือสูตรที่มีการใช้น้ำ 110 มิลลิลิตร และ HPMC ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักแป้ง
ทั้งหมด

ขนมปังที่ผลิตโดยใช้แป้งพรีเจลาติไนซ์ DMF140 และ EMF46 ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ
5 เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลา 3 วัน จะมีค่าความแข็งแรงของขนมปังที่ดีกว่าขนมปังจากแป้งข้าวเจ้า
และขนมปังที่ไม่มีการเติม HPMC และขนมปัง ODMF140 จะมีค่าความแข็งแรงที่ดีกว่าขนมปัง
OEMF46 เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลาสั้นขึ้น โดยสอดคล้องกับค่าเอนทัลปีของการเกิด
รีโทรเกรเดชันของ ODMF140 ที่มีค่าสูงกว่า OEMF46 จากการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์
ที่ผลิตจากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุง
คุณสมบัติของแป้งและสามารถนำไปใช้ประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมขนมอบได้

Title	EFFECT OF PREGELATINIZED MUNG BEAN FLOUR AND HYDROCOLLOID ADDITION ON THE QUALITIES OF GLUTEN FREE RICE FLOUR BREAD
Author	Piyaporn Sirikong
Advisor	Sasivimon Chittrakorn, Ph.D.
Co - Advisor	Assistant Professor Monthana Weerawatanakorn, Ph.D.
Academic Paper	Thesis M.S. in Food Science and Technology, Naresuan University, 2016
Keywords	Mung bean, Pregelatinized flour, Rice flour, Hydrocolloid, Gluten free bread

ABSTRACT

This research was conducted to study the physicochemical properties of mung bean flour and the optimum processing for production of pregelatinized mung bean flour by drum dryer and twin screw extruder. The temperature of drum was operated at 100, 120, and 140 °C (DMF100, DMF120, and DMF140) and extrusion condition was set at 3 levels of feed moisture including 46, 70 and 94 % (EMF46, EMF70, and EMF94). The results showed that all pregelatinized mung bean flours caused a significant increase in water absorption index (WAI), solubility and swelling power. Pasting properties measured by Rapid Visco Analyzer (RVA) displayed a lower peak viscosity and set back of pregelatinized flour compared to native flour. Thermal analysis showed that gelatinization enthalpy of pregelatinized flour was lower than native flour. The starch granules obtained by polarized light microscopy exhibited complete gelatinization. The granular structure was disrupted and no birefringence was observed under polarized light.

Dough rheological studies indicated that dough produced from pregelatinized flour addition had higher G' and G'' than those produced from rice flour and native mung bean flour and the level of G' and G'' increased with increasing of pregelatinized flour substitution. Gluten free bread was produced from rice flour substituted with

pregelatinized flour from drum dry and extrusion process at the level of 5, 10, and 15 %. The results indicated that the volume and hardness of gluten free bread decreased as the level of pregelatinized flour substituted increased. The bread replaced with 5% of either DMF140 or EMF46 had higher bread volume, better gas cells distribution, and lower crumb hardness than other formulas.

Response surface methodology (RSM) analytical technique with central composite design (CCD) were used to find the optimum parameters including water and HPMC level for producing gluten-free bread made from pregelatinized flour (DMF140 and EMF46) substituted at the level of 5%. The results indicated that water content and hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) addition affected on weight and volume of the gluten free bread with linear relationship. The linear equation was used to build three dimension response surface plots between weight and volume in order to predict the most suitable contents of water and HPMC for making the gluten free bread. It was found that 100 mL of water and 1.5% of HPMC could yield the gluten free bread with the best weight and volume characteristics.

During the 3 day storage, gluten free bread made from DMF140 and EMF46 at 5% substitution had lower crumb hardness than bread made from rice flour and bread without HPMC addition. The results showed that as storage time increased, the hardness of DMF140 bread was lower than EMF46 bread. This result followed the same trend of retrogradation properties measured by DSC which revealed that enthalpy of DMF140 bread was higher than EMF46 bread. Overall, these studies showed the promising results indicating that pregelatinized mung bean flour produced by drum drying and extrusion process can be used to modify flour properties and can be applied to the baking industries.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา	1
จุดมุ่งหมายของการศึกษา	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ข้าว	5
ถั่วเขียว	6
แป้งและองค์ประกอบของแป้ง	10
แป้งดัดแปร	15
ขนมปัง	20
โรคแพ้กลูเตน	25
ขนมปังปราศจากกลูเตน	26
ไฮโดรคอลลอยด์.....	28
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
วัตถุดิบที่ใช้ทดลอง	31
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	31
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี.....	31
สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ทางเคมี	32
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ	32
เครื่องประมวลผลทางสถิติ	33
ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย	33

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย.....	44
ตอนที่ 1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี กายภาพของแป้งถั่วเขียวดิบ แป้งข้าว เจ้าทางการค้า และแป้งถั่วเขียวฟรีเจลาตินไนซ์	44
ตอนที่ 2 การศึกษาปริมาณแป้งฟรีเจลาตินไนซ์จากถั่วเขียวที่เหมาะสมต่อ คุณสมบัติของโดและคุณภาพของขนมปังเพื่อใช้ผลิตขนมปัง ปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐาน.....	56
ตอนที่ 3 การศึกษาปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปัง ปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียว ฟรีเจลาตินไนซ์	70
ตอนที่ 4 ผลศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาขนมปังปราศจาก กลูเตน.....	77
5 บทสรุป.....	81
ตอนที่ 1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี กายภาพของแป้งถั่วเขียวดิบ แป้งข้าว เจ้าทางการค้าและแป้งถั่วเขียวฟรีเจลาตินไนซ์.....	81
ตอนที่ 2 การศึกษาปริมาณแป้งฟรีเจลาตินไนซ์จากถั่วเขียวที่เหมาะสม ต่อคุณสมบัติของโดและคุณภาพของขนมปังเพื่อใช้ผลิตขนมปัง ปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐาน.....	81
ตอนที่ 3 การศึกษาปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปัง ปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียว ฟรีเจลาตินไนซ์	82
ตอนที่ 4 ผลศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาขนมปังปราศจาก กลูเตน.....	82

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม.....	83
ภาคผนวก.....	95
ประวัติผู้วิจัย.....	106



สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	การจัดแบ่งข้าวตามปริมาณอะไมโลส	5
2	องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว.....	8
3	องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ต่าง ๆ	9
4	ปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ	9
5	ปริมาณวิตามินในเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ	10
6	สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	11
7	สมบัติของไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหาร	29
8	รูปแบบการจัดเรียงสกรู (จากทางป้อนวัตถุดิบถึงหน้าแปลน)	36
9	การตั้งอุณหภูมิของบารเล	36
10	ส่วนผสมของขนมปังปราศจากกลูเตน.....	39
11	รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง.....	42
12	องค์ประกอบทางเคมีของ แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวฟรีเจลาติน จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทูเดอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)	45
13	ดัชนีการละลายน้ำ ดัชนีการดูดซับน้ำ กำลังการพองตัวและการละลายของแป้งถั่ว เขียวดิบและแป้งถั่วเขียวฟรีเจลาตินจากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบ ลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทูเดอร์	46
14	ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวฟรีเจลาตินจากการดัดแปรด้วย เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทูเดอร์	48
15	ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางความหนืดของแป้งถั่วเขียวดิบ และ แป้งถั่วเขียวฟรีเจลาตินจากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและ เครื่องเอกซ์ทูเดอร์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืด แบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA)	51

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง

หน้า

16	คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่ แป้งข้าวสาลีและแป้งข้าวฟ่างเจลาตินไนซ์จากการตัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวเจ้า	63
17	ค่าสีเปลือกนอกและเนื้อในของขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้ง ข้าวสาลีและแป้งข้าวฟ่างเจลาตินไนซ์จาก การตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้ง แบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวเจ้า.....	68
18	ส่วนผสมของขนมปังสูตรมาตรฐาน.....	71
19	สภาวะและรหัสของปริมาณน้ำและ HPMC ที่ใช้ในการผลิตขนมปังปราศจาก กลูเตนจากการออกแบบการทดลองด้วย RSM วางแผนการทดลอง แบบ CCD	72
20	แบบจำลองคุณภาพสำหรับการหาปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมต่อ การผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140.....	73
21	แบบจำลองคุณภาพสำหรับการหาปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมต่อการผลิต ขนมปังปราศจากกลูเตน OEMF46.....	73
22	สมการของน้ำหนักและปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140 และ OEMF46 จากการออกแบบการทดลองด้วย RSM	74
23	ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณยีสต์ราของขนมปังปราศจากกลูเตน.....	79

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 การเตรียมแป้งถั่วเขียวดิบ	34
2 กระบวนการตัดแปรแป้งโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง	35
3 รูปแบบการจัดเรียงสกรู	37
4 กระบวนการตัดแปรแป้งโดยด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์	37
5 ขั้นตอนการผลิตขนมปัง	40
6 แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลลาคีไนซ์จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์	49
7 เทอร์โมแกรมของแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลลาคีไนซ์จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)	50
8 ความสัมพันธ์ของความหนืดและอัตราการเคี้ยวของของแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลลาคีไนซ์จากการตัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 8.....	53
9 ลักษณะโปรไฟล์แรงจลน์จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ (50X) ของแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลลาคีไนซ์จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์	55
10 ค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ Loss tangent ($\tan \delta$) ของขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียว พรีเจลลาคีไนซ์จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวเจ้า จากการทำการ frequency sweep test	56
11 ปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลลาคีไนซ์จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวเจ้า.....	60

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
12 ขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียว พรีเจลาติไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและกระบวนการ เอกซ์ทรูชัน ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวเจ้า.....	61
13 กราฟสามมิติของพื้นผิวตอบสนองต่อน้ำหนักของขนมปังปราศจากกลูเตน โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและ HPMC ที่ใช้ในการผลิตขนม ปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์; (ก) ขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140, (ข) ขนมปังปราศจากกลูเตน OEMF46	75
14 กราฟสามมิติของพื้นผิวตอบสนองต่อปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตน โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและ HPMC ที่ใช้ในการผลิตขนม ปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์; (ก) ขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140, (ข) ขนมปังปราศจากกลูเตน OEMF46	76
15 เปรียบเทียบขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐาน (DMF140 และ EMF46) และขนมปังที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วย RSM (ODMF140 และ OEMF46)	77
16 การเปลี่ยนแปลงของค่า Hardness ของขนมปังปราศจากกลูเตนระหว่างการ เก็บรักษา 0, 1 และ 3 วัน	78

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบัน มีผู้บริโภคผลิตภัณฑ์ขนมอบกันอย่างแพร่หลาย หนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างมาก คือ ขนมปัง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีข้าวสาลีเป็นองค์ประกอบหลัก ในแป้งสาลีจะมีโปรตีนที่เรียกว่า “กลูเตน” ซึ่งประกอบด้วยโปรตีน 2 ชนิด คือ กลูเตนิน (Glutenin) เป็นโปรตีนที่มีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น และไกลอะดิน (Gliadin) เป็นโปรตีนที่ทำให้ความชื้นเหนียวในโด (Xu, et al., 2007)

อาหารปราศจากกลูเตน (Gluten free products) ได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากทางการแพทย์ได้ค้นพบว่าผู้ป่วยที่เป็นโรคเนื่องจากการแพ้กลูเตน (Celiac disease) ในข้าวสาลี ข้าวไรย์ และข้าวบาร์เลย์ เป็นจำนวนมากขึ้น โดยอาการแพ้กลูเตนมีหลากหลายรูปแบบ ผู้ป่วยที่เป็นโรคนี้จะมีอาการ ท้องเสีย อาเจียน ปวดแน่นท้อง การดูดซึมวิตามิน และเกลือแร่ลดลง น้ำหนักลดลง สาเหตุเนื่องจากลำไส้เล็กส่วนบนเกิดการอักเสบ (Wieser and Koehler, 2008) โปรตีนในกลูเตนที่มีส่วนสัมพันธ์กับการเกิด Celiac disease คือ prolamins และอาหารที่ปราศจากกลูเตน ไม่ควรมีกลูเตนเกิน 20 ppm (Gallagher, et al., 2004) จากการค้นพบโรคดังกล่าวทำให้อุตสาหกรรมอาหารในต่างประเทศ มีความตื่นตัวในการหาวัตถุดิบที่จะใช้ทดแทนแป้งสาลี ในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ผลิตภัณฑ์อาหารเส้น และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ผู้ป่วยที่เป็นโรค Celiac disease ไม่ควรรับประทานอาหารที่มีส่วนประกอบของกลูเตน หรือรับประทานในปริมาณน้อย ในระดับที่ไม่ทำให้เกิดอันตราย อย่างไรก็ตามแป้งสาลีมักใช้เป็นองค์ประกอบหลัก ในการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมปัง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ยืดหยุ่นได้ในอุณหภูมิห้อง (Viscoelastic properties) สามารถอุ้มน้ำ และกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ในระหว่างการผสมและการอบ ทำให้ขนมปังขึ้นฟู นุ่ม และมีปริมาตรที่ดี (Chartrand, et al., 1997) ในปัจจุบันยังไม่สามารถหาวัตถุดิบที่มีคุณสมบัติที่ดีเพื่อใช้ทดแทนแป้งสาลีในการผลิตขนมปังได้

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทยเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญ ประเทศไทยมีการปลูกข้าวเป็นจำนวนมาก เพื่อใช้ในการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก ทั้งในรูปแบบเมล็ดข้าว และผลิตภัณฑ์จากข้าว ในปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตข้าวเพื่อส่งออกเป็นอันดับ 2 ของโลก (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2559) มีเนื้อที่เพาะปลูกข้าวทั้งหมด 6,060,746 ไร่ เดือนมกราคม

ถึงเดือนกรกฎาคม ประเทศไทยส่งออกข้าวไปแล้วเป็นจำนวน 5.43 ตัน (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2559) นอกจากการส่งออกในรูปข้าวสารแล้วยังมีการส่งออกในรูปผลิตภัณฑ์จากข้าว อาทิเช่น แป้งข้าว ซึ่งเป็นผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้าวหักแล้วนำมาไม่จนละเอียด แป้งข้าวมีคุณค่าทางโภชนาการที่ดี และมีโปรตีนที่ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้ เหมือนโปรตีนจากข้าวสาลี (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2550)

ถั่วเขียวเป็นพืชที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย นิยมปลูกกันทั่วทุกภาค ทั้งในฤดูเพาะปลูกปกติ หรือปลูกหมุนเวียนหลังฤดูการเก็บเกี่ยวข้าว ปริมาณความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์ถั่วเขียวในประเทศ และส่งออกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ในปี 2558 ประเทศไทยสามารถปลูกถั่วเขียวผิวมันเมล็ดใหญ่ได้ 98,360 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2558) ราคาถั่วเขียวผิวมัน (ชั้น 2) ในเดือนสิงหาคม ปี 2559 ขายกิโลกรัมละ 31 บาท (สมาคมพ่อค้าข้าวโพดและพืชพันธุ์ไทย, 2559) ถั่วเขียวมีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีปริมาณโปรตีนร้อยละ 20-24 มีปริมาณ Dietary fiber สูง และมีสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น Flavonoids phenolic acids และ Polyphenol ซึ่งเป็นสารที่ต้านการอักเสบ การเกิดเนื้องอก และต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Tang, et al., 2014) ถั่วเขียวสามารถนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อาหารได้หลากหลาย เช่น ขนมหวาน ขนมขบเคี้ยว และนำไปผลิตเป็นสตาร์ช ถั่วเขียวสำหรับการผลิตวุ้นเส้น นอกจากนั้นอาจใช้ทดแทนแป้งข้าวเจ้าบางส่วนร่วมกับการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์เป็นสารเพิ่มความหนืด และเพิ่มความคงตัวในอาหารต่าง ๆ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) เนื่องจากแป้งถั่วเขียวเป็นแป้งที่ปราศจากกลูเตน การนำแป้งถั่วเขียวที่มีคุณค่าทางอาหารมาผลิตเป็นขนมปังปราศจากกลูเตน อาจเพิ่มคุณค่าทางอาหารของขนมปัง เป็นทางเลือกหนึ่งของผู้บริโภคที่แพ้กลูเตน ผู้ที่ใส่ใจในสุขภาพ

ขนมปังปราศจากกลูเตนสามารถผลิตได้โดยใช้วัตถุดิบหลายชนิด เช่น แป้งข้าว สตาร์ช มันสำปะหลัง สตาร์ชมันฝรั่ง แป้งจากถั่วชนิดต่าง ๆ การใช้แป้งจากถั่ว เช่น แป้งถั่วเหลือง (Soy flour) แป้งถั่วลูกไก่ (Chick pea flour) แป้งคารอบ (Carob flour) มาผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน จะช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของขนมปังและเนื้อขนมปังจะนุ่มขึ้น (Miñarro, et al., 2012) ทั้งนี้จากการศึกษาการใช้แป้งถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์ขนมปังพบว่า แป้งถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนจะมีเอนไซม์ Lipoxxygenase ที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของขนมปัง โปรตีนในแป้งถั่วเหลืองจะช่วยให้เกิดการกักเก็บก๊าซและรักษาเสถียรภาพในแป้ง Batter ช่วยในการไหลของแป้งในระหว่างที่ก๊าซเกิดการขยายตัว ก่อให้เกิดโครงสร้าง อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนกับแป้งถั่วเหลืองอาจทำให้เอนไซม์ถูกทำลาย ทำให้โปรตีนสูญเสียโครงสร้าง และส่งผลต่อคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตน (Ribotta, et al., 2004) การใช้ถั่วเขียวนอกจากเพิ่ม คุณค่าทางอาหารให้กับขนมปังปราศจากกลูเตนแล้วปริมาณของอะไมโลสที่มีอยู่สูงในถั่วเขียว อาจมีส่วนช่วยปรับปรุง

สมบัติด้านความหนืดของขนมปัง เนื่องจากการกักเก็บก๊าซของแป้ง batter จะเกี่ยวข้องกับการยืดเกาะระหว่างเม็ดสตาร์ชกับน้ำในระหว่างการเกิดเจลลิตไนซ์จะมีสายของอะไมโลสหลุดออกมาเป็นโครงร่างตาข่ายส่งผลให้ขนมปังมีปริมาตรที่ดีขึ้น (ภานุมาศ รุ่งเรืองอารี, 2541) อย่างไรก็ตามยังไม่ได้มีการศึกษาถึงการนำแป้งถั่วเขียวมาใช้ในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้ อาจทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของแป้งถั่วเขียว สำหรับการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน รวมทั้งศึกษาผลของแป้งถั่วเขียวจากการได้รับความร้อน ที่จะส่งผลต่อคุณภาพของขนมปัง

การดัดแปรแป้ง เป็นกระบวนการที่นำแป้งมาเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีหรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน เอนไซม์ หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ โดยทั่วไปการดัดแปรจะมีสองวิธีคือทางเคมีและกายภาพ สภาวะที่ใช้ในการดัดแปรจะมีผลต่อสมบัติและการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร (พนิดา โนนใหญ่, 2549)

แป้งพรีเจลลิตไนซ์ (Pregelatinized flour) เป็นแป้งที่ดัดแปรทางกายภาพ โดยด้วยการให้ความร้อน แล้วทำให้แห้งการผลิตแป้งชนิดนี้สามารถทำได้ด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) หรือเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) แป้งพรีเจลลิตไนซ์มีความสามารถกระจายตัวได้ในน้ำเย็น ให้ความหนืดได้ทันที ดูดซับน้ำได้สูงจึงสามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหาร ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าแป้งดิบ (ดาร์วาร์ตน์ นาคลอและคณะ, 2554, หน้า 13) แป้งพรีเจลลิตไนซ์สามารถใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด เช่น ซุป ซอส และในส่วนผสมของขนมอบสำเร็จรูป (Ready to bake mixtures) การใช้แป้งพรีเจลลิตไนซ์ในผลิตภัณฑ์ขนมอบจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับน้ำ ช่วยกักเก็บก๊าซในระหว่างการผสม การหมักโด และช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Schober, et al., 2005) แป้งพรีเจลลิตไนซ์จากพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วเหลืองที่ผลิตจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์จะมีปริมาณโปรตีนสูง มีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มสูงขึ้น (Filli, et al., 2010) อย่างไรก็ตามการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตแป้งพรีเจลลิตไนซ์จากถั่วเขียวซึ่งเป็นพืชตระกูลถั่วชนิดหนึ่งยังมีจำกัด

การเติมแป้งดัดแปร เช่น แป้งพรีเจลลิตไนซ์ หรือไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่าง ๆ เช่น กวักัม แชนแทนกัม และ HPMC จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของโด และขนมปังปราศจากกลูเตน Curic, et al., (2007b) ศึกษาการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนจากวัตถุดิบ คือ ข้าวโพดบดหยาบ และแป้งถั่วเหลืองที่ผ่านเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ จากการทดลองพบว่าโดที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ผ่านเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ จะมีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น ปริมาตรขนมปังเพิ่มขึ้น และขนมปังจะมีปริมาณโปรตีนมากกว่าร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม คือ แป้งข้าวและสตาร์ช

ข้าวโพด ขนมอบที่ผลิตจากข้าวโพดบดหยาบและแป้งถั่วเหลือง ที่อัตราส่วน 75:25 ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่มีการเติม กัวกัม ในปริมาณร้อยละ 3 จะมีปริมาตรมากที่สุดและมีการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงที่สุด

เนื่องจากชุมชนบ้านมะขามเรียง หมู่ที่ 3 ตำบลมะมั่ง อำเภอชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์ ได้เริ่มมีการส่งเสริมการปลูกถั่วเขียวให้กลุ่มเกษตรกร เพื่อส่งขายให้กับโรงงานผลิตถั่วอกในเขตใกล้เคียง นอกจากการขายในรูปถั่วเขียวสดแล้วผู้ประกอบการยังมีแนวคิดในการนำถั่วเขียวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ดังนั้นการผลิตแป้งถั่วเขียว แป้งฟรีเจลาติไนซ์จากถั่วเขียว และศึกษาคุณสมบัติการนำไปใช้ทางอาหาร รวมไปถึงการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งถั่วเขียวร่วมกับแป้งข้าวเจ้าที่มีการผลิตมากในประเทศไทยจะเป็นการผลิตผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ที่มีคุณค่าทางอาหาร เป็นทางเลือกหนึ่งของผู้บริโภคที่เป็นโรค Celiac disease เป็นการเพิ่มมูลค่าของถั่วเขียวและเพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกรผู้ปลูกถั่วเขียวได้อีกทางหนึ่ง จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งถั่วเขียวโดยวิธีการฟรีเจลาติไนซ์ โดยใช้เครื่องทำแห้ง แบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) และเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) เพื่อนำมาใช้ในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน และศึกษาสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งดัดแปร
2. เพื่อศึกษาระดับการแทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งถั่วเขียวดัดแปรโดยวิธีการฟรีเจลาติไนซ์ต่อสมบัติทางรีโอโลยีของโด และคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตน
3. เพื่อศึกษาผลของปริมาณ น้ำ และ HPMC ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนและศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของขนมปังในระหว่างการเก็บรักษา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้าว

ข้าว ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน (2525) หมายถึง เมล็ดของพืชพวกหญ้า ในวงศ์ Gramineae ข้าวเป็นธัญพืชที่คนทั่วโลกบริโภคเป็นอาหารหลักโดยเฉพาะชาวเอเชีย เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต สามารถเจริญได้ดีทั้งในเขตอบอุ่นและเขตร้อน โดยมีการปลูกแพร่กระจายไปทั่วโลก แบ่งเป็น 2 ชนิดหลัก คือ ข้าวเจ้า (Non-glutinous rice) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Oryza sativa* และข้าวเหนียว (Waxy rice) สถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (International Rice Research Institute; IRRI) ได้จำแนกข้าวตามปริมาณอะไมโลส ดังตาราง 1

ตาราง 1 การจัดแบ่งข้าวตามปริมาณอะไมโลส

ประเภทข้าว	อะไมโลส (ร้อยละ)	ลักษณะข้าวสุก
ข้าวเหนียว	-	เหนียวมาก
	อะไมโลสต่ำมาก	นุ่ม-เหนียว
ข้าวเจ้า	อะไมโลสต่ำ	นุ่ม-เหนียว
	อะไมโลสกลาง	นุ่ม-เหนียว
	อะไมโลสสูง	ร่วนแข็ง

ที่มา: งามชื่น คงเสรี, 2537

1. โครงสร้างของเมล็ดข้าว

เมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนที่ห่อหุ้มเมล็ดข้าว เรียกว่า แกลบ (Hull หรือ Husk) และส่วนของเนื้อผล (True fruit หรือ Caryopsis grain) สัดส่วนของเปลือกและเนื้อในเมล็ดมีปริมาณร้อยละ 28 และ 72 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อแปรรูปข้าวเปลือกด้วยการขัดสีจะได้เป็นข้าวสารที่เฉพาะส่วนของเนื้อในเมล็ด (Starchy endosperm) ซึ่งประกอบด้วยเม็ดสตาร์ชมีลักษณะห้ำเหลี่ยมนานา 2-10 ไมครอน จับเป็นกลุ่มแน่น ส่วนโปรตีนจะเป็นอนุภาคที่มีลักษณะกลมขนาด 1-4 ไมครอน แทรกอยู่กับเม็ดสตาร์ชที่กระจายตัวอย่างอิสระโดยมีเม็ดไขมันอยู่ในบริเวณ

ใกล้เคียงแต่มีในปริมาณน้อยกว่าโปรตีน (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538) ข้าวเต็มเมล็ดจะถูกใช้ในการบริโภคด้วยการหุงสุก ส่วนข้าวหักมักจะถูกนำไปแปรรูปเป็นแป้งเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม

2. องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าว

องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดข้าวส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 90 โดยน้ำหนักแห้ง ส่วนที่เหลือจะเป็นโปรตีนร้อยละ 7 ไขมันร้อยละ 1.5 และสารอาหารอื่นอีกร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักแห้ง คาร์โบไฮเดรตที่มีในเนื้อเมล็ด ส่วนใหญ่เป็นสตาร์ชซึ่งโมเลกุลของสตาร์ชจะประกอบไปด้วยอะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์เชิงเส้น ที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย ต่อกันเป็นสายโซ่ยาวแบบขดเป็นเกลียวแบบ Helix เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic bond และส่วนน้อยเป็น α -1,6-glucosidic bond ในขณะที่อะไมโลเพคตินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glucosidic bond และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาซึ่งเป็นโพลิเมอร์กลูโคสสายสั้นเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glucosidic bond ปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช สตาร์ชจากข้าวเหนียวประกอบด้วยอะไมโลเพคตินเกือบทั้งหมด ส่วนสตาร์ชจากข้าวเจ้ามีปริมาณอะไมโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538)

ถั่วเขียว

ถั่วเขียว (Mung bean) มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Vigna radiata* L. อยู่ในวงศ์ Leguminosae มีถิ่นกำเนิดอยู่ที่ประเทศอินเดีย ถั่วเขียวเป็นพืชล้มลุก ลำต้นยาว ใบมีขนอ่อนปกคลุมเช่นเดียวกับลำต้น ถั่วเขียวมีดอกเกิดเป็นช่อ ช่อดอกเกิดตามมุมใบที่อยู่ตอนบนของลำต้น และที่ปลายยอดของลำต้นหรือกิ่งก้าน ช่อดอก ถั่วเขียวมีก้านดอกที่ยาว และมีดอกเกิดเป็นกลุ่ม ที่ปลายช่อ ดอกหนึ่ง ๆ มีกลีบดอกประมาณ 10-25 กลีบ ดอกมีสีม่วง เหลือง และขาว ดอกบาน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร ฝักถั่วเขียวมีรูปร่างกลมยาว ส่วนปลายอาจโค้งออกเล็กน้อย เมื่อฝักแก่จะมีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้ม ดำหรือขาวนวลแตกต่างกันไปตามพันธุ์ ฝักหนึ่ง ๆ มีเมล็ดประมาณ 10-15 เมล็ด (ไชยา เพ็งอุ้น, 2539)

1. ชนิดของถั่วเขียว

ถั่วเขียวสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด โดยใช้เปลือกของเมล็ดเป็นหลักในการพิจารณา ดังนี้ (ทรงเชาว์ อินสมพันธ์, 2545)

1.1 ถั่วเขียวธรรมชาติหรือถั่วเขียวเมล็ดด้าน เป็นพันธุ์ที่นิยมใช้ทำถั่วงอกและงุ่นเส้น รวมถึงส่งไปจำหน่ายต่างประเทศ

1.2 ถั่วเขียวสีทองหรือถั่วทอง ถั่วเขียวชนิดนี้มีลักษณะลำต้น ใบ และฝักเหมือนกับ ถั่วเขียวเมล็ดด้าน เมล็ดจะมีสีเหลืองทอง ใช้ในการทำขนมเพราะทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีที่สวยงาม

1.3 ถั่วเขียวผิวมัน เป็นถั่วเขียวที่มีเมล็ดเป็นมัน มีสีดำนเหมาะสมสำหรับปลูก เพื่อจำหน่ายทางการค้า เนื่องจากให้ผลผลิตสูงและขายได้ราคาดี ตลาดต่างประเทศนิยมถั่วเขียว ชนิดนี้ ถั่วเขียวผิวมันแบ่งออกได้เป็น สองชนิดตามสีของฝักแก่ คือ ชนิดที่เมื่อฝักแก่เปลือกฝัก จะเปลี่ยนเป็นสีขาวนวลและสีดำ ได้แก่ พันธุ์อุทอง 1 กำแพงแสน 1 กำแพงแสน 2 ชัยนาท 60 ชัยนาท 36 และ มอ 1

1.4 ถั่วเขียวผิวดำ มีลักษณะลำต้น ใบ และฝักคล้ายถั่วธรรมชาติแต่มีขนตามกิ่ง ก้าน ใบ และฝัก บางพันธุ์มีลำต้นสูง และทอดยอด ฝักแก่มีสีดำไม่แตกง่าย เมล็ดสีดำ นิยมใช้เพาะ ถั่วงอกเนื่องจากต้นถั่วงอกที่ได้จะค่อนข้างอ้วน และมีสีขาว เหมาะกับการบริโภค ได้แก่ พันธุ์อุทอง 2 และพิษณุโลก 2

2. องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว

องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดถั่วเขียวจะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของ ถั่วเขียว การเพาะปลูกและสภาวะในการเจริญเติบโต ถั่วเขียวจะมีปริมาณของกรดอะมิโน Leucine และกรดอะมิโน Lysine ในปริมาณที่สูง แต่จะขาดกรดอะมิโนที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ เช่น Methionine ปริมาณกรดอะมิโนในเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ แสดงในตาราง 2

ตาราง 2 องค์ประกอบทางเคมีของถั่วเขียว

องค์ประกอบทางเคมี	หน่วย	คุณค่าทางโภชนาการในส่วนที่กินได้ 100 กรัม
ความชื้น	g	9.05
พลังงาน	kcal	347
พลังงาน	kJ	1,452
โปรตีน	g	23.86
ไขมัน	g	1.15
เถ้า	g	3.32
คาร์โบไฮเดรต	g	62.62
เส้นใย	g	16.3
ปริมาณไขมัน		
กรดไขมันอิ่มตัว	g	0.348
10:0	g	0.000
14:0	g	0.000
16:0	g	0.250
18:0	g	0.071
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	g	0.161
16:1	g	0.000
18:1	g	0.161
20:1	g	0.000
18:2	g	0.357
18:3	g	0.027
คลอโรสเตอรอล	mg	0
ไฟโตสเตอรอล	mg	23

ที่มา: ดัดแปลงจาก USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release
25. (2011)

ถั่วเขียวแต่ละพันธุ์จะมีปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่เมล็ดถั่วเขียวมีแป้งและโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก องค์ประกอบทางเคมีในของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ต่าง ๆ แสดงในตาราง 3

ตาราง 3 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์ต่าง ๆ

สายพันธุ์	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)				
	สตาร์ช	โปรตีน	เยื่อใย	ถั่ว	ไขมัน
อุทุมพร 1	46.36±0.83	27.99±0.41	3.92±0.00	3.94±0.07	0.49±0.15
กำแพงแสน 1	46.10±0.71	23.56±0.31	4.48±0.17	3.94±0.12	0.42±0.07
กำแพงแสน 2	44.93±0.80	29.51±0.51	4.11±0.13	3.95±0.05	0.36±0.02
ชัยนาท 60	44.51±0.97	30.02±0.19	3.70±0.38	3.81±0.00	0.39±0.10
มอ 1	44.66±1.18	28.49±0.31	4.05±0.33	3.99±0.04	0.51±0.04
ชัยนาท 36	44.26±1.13	27.63±0.07	4.10±0.05	3.88±0.04	0.50±0.05

ที่มา: สุณีย์ โชตินิรนาท และคณะ, 2543

เมล็ดถั่วจะมีแร่ธาตุหลายชนิด เช่น แคลเซียม เหล็ก ทองแดง สังกะสี โพแทสเซียม และแมกนีเซียม ถั่วเขียวจะมีปริมาณแร่ธาตุโพแทสเซียม และแคลเซียมสูง (Meiners, et al., 1976) ปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดถั่วชนิดต่างๆ แสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ปริมาณแร่ธาตุในเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ

ชนิด	ปริมาณแร่ธาตุ (มิลลิกรัม/100 กรัม)					
	แคลเซียม	โพแทสเซียม	เหล็ก	แมกนีเซียม	ทองแดง	โซเดียม
ถั่วเหลือง	226	546	8.5	236	2.4	27.9
ถั่วเขียว	124	326	7.3	171	0.97	28
ถั่วเลนทิล	69	293	4.8	94	0.66	40.1
ถั่วฝรั่งเศส	260	410	5.8	195	0.95	15

ที่มา: ดัดแปลงจาก Meiners, et al., 1976

เมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ เป็นแหล่งอาหารที่มีวิตามินสูง ได้แก่ ไทอามีน (Thiamine), ไรโบฟลาวิน (Riboflavin) และไนอาซิน (Niacin) โดยในถั่วเขียวจะมีปริมาณของแคโรทีน (Carotene) 94 ไมโครกรัม/100 กรัม, ไทอามีน (Thiamine) 0.47 ไมโครกรัม/100 กรัม, ไรโบฟลาวิน (Riboflavin) 0.27 ไมโครกรัม/100 กรัม และ ไนอาซิน (Niacin) 2.3 ไมโครกรัม/100 กรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับถั่วบางชนิดพบว่าถั่วเขียวมีปริมาณวิตามินที่สูงมาก ปริมาณวิตามินในเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ แสดงในตาราง 5 (Fordham, et al., 1975)

ตาราง 5 ปริมาณวิตามินในเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ

ชนิดของถั่ว	ปริมาณวิตามิน (ไมโครกรัม/100 กรัม)			
	แคโรทีน	ไทอามีน	ไรโบฟลาวิน	ไนอาซิน
ถั่วเขียว	94	0.47	0.27	2.3
ถั่วเลนทิล	270	0.45	0.2	2.6
ถั่วฝรั่งเศส	30	0.88	0.14	2.2
ถั่วเหลือง	426	0.73	0.39	3.2

ที่มา: ดัดแปลงจาก Fordham, et al., 1975

แป้งและองค์ประกอบของแป้ง

แป้ง มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักและมีองค์ประกอบอื่น เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ ในปริมาณน้อย แป้งฟลาวัวร์ (Flour) เป็นแป้งที่ผลิตจากวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ เช่น ธัญพืช พืชตระกูลถั่ว โดยทำการบดแป้งด้วยเครื่องบดและร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดต่างกัน แป้งฟลาวัวร์ จะเป็นแป้งที่มีองค์ประกอบทางเคมีทั้งหมดเหลืออยู่ ส่วน แป้งสตาร์ช (Starch) จะเป็นแป้งที่มีการสกัดส่วนของ โปรตีน ไขมัน ไฟเบอร์ ออกจนเหลือเฉพาะส่วนของสตาร์ช (กลูโคส รงค์ ซีรีรอต และเกลือกลู ปิยะจอมขวัญ, 2546)

...แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคสมา เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า ปลายรีดิวซิง (Reducing end group) แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด

คือ อะไมโลสและอะไมโลเพคตินวางตัวในแนวรัศมี แบ่งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกันทำให้คุณสมบัติของแป้งมีความแตกต่างกัน

(กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

ตาราง 6 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

คุณสมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะ	α -1,4	α -1,4 และ α -1,6
ขนาด	200-2,000 หน่วย	มากกว่า 10,000 หน่วย
การละลายน้ำ	ละลายได้น้อย	ละลายได้ดี
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนและทิ้งไว้ จะจับตัวเป็นเจลและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

ที่มา: Van Beynum and Roels, 1985

1. องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้ง ได้แก่

1.1 อะไมโลส (Amylose) เป็นพอลิเมอร์สายตรงของน้ำตาล D-glucose ประมาณ 200-2,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α (1,4) glucosidic linkage มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 6,500 ถึง 160,000 ดาลตัน อย่างไรก็ตามในธรรมชาติจะพบอะไมโลสที่มีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่จะพบไม่มาก อะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันออกไป และแป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะไมโลสที่ต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสสายยาวจะมีแนวโน้มของการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ต่ำกว่าอะไมโลสสายสั้น (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

1.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin) เป็นโมเลกุลของน้ำตาล D-glucose เชื่อมต่อกันจัดเรียงตัวเป็นสายตรงและสายไซโดยพันธะไกลโคไซด์ 2 แบบ คือส่วนที่เป็นพันธะสายตรงเป็นพันธะ α (1,4) glucosidic linkage และส่วนที่เป็นสายไซจะเชื่อมต่อกับพันธะ

α (1,6) glucosidic linkage อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน อะไมโลเพคตินจะมีอัตราการคืบตัวต่ำเนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ สารละลายแป้งที่มีปริมาณของอะไมโลเพคตินสูงจะใสและมีความหนืดสูงเมื่อได้รับความร้อน สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะขึ้นอยู่กับชนิดของสตาρχ โดยสตาρχจากข้าวเจ้าจะมีปริมาณอะไมโลสอยู่ร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว สำหรับสตาρχจากข้าวเหนียวจะประกอบด้วยอะไมโลเพคตินเกือบทั้งหมด (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2538)

1.3 สารตัวกลาง (Intermediate material) สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้ง บางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพคตินแต่ใหญ่กว่าอะไมโลส (Rupp and Schwartz, 1988) ปริมาณและโครงสร้างของสารตัวกลางขึ้นอยู่กับชนิดและอายุการเก็บเกี่ยวของพืช (Guilbot and Mercier, 1985) ปริมาณหรือสัดส่วนของอะไมโลส อะไมโลเพคติน และสารตัวกลางในเม็ดแป้งไม่คงที่ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูก

2. ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

2.1 โปรตีน ภายในแป้งจะมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวเม็ดแป้ง มีผลต่อการกระจายของเม็ดแป้ง ทำให้แป้งมีอัตราการดูดซับน้ำ กำลังการพองตัว และอัตราการเกิดเจลลิตไนซ์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิ่ง ทำให้สี และกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงไป

2.2 ไขมัน แป้งโดยส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 ชนิดของไขมันที่มีอยู่ในแป้งมีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง เช่น มีผลต่อความหนืดของแป้ง ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของแป้งมักทำการกำจัดไขมันออกจากแป้ง โดยสกัดด้วยตัวทำละลายหรือย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ ไขมันที่รวมอยู่ในเม็ดแป้งจะมีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของแป้งโดยจะลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของแป้ง นอกจากนี้กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่บริเวณพื้นผิวเม็ดแป้งจะทำให้เกิดกลิ่นหืน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.3 เถ้า แป้งโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือเถ้าจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์

2.4 ฟอสฟอรัส แบ่งส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสอยู่น้อยกว่าร้อยละ 0.1 ฟอสฟอรัสภายในแบ่งอยู่ในรูปฟอสเฟตเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคส

3. แบ่งข้าวเจ้า

แบ่งข้าวเจ้า สามารถผลิตได้จาก ข้าวหัก หรือปลายข้าว วิธีการผลิตแบ่งข้าว มี 3 วิธี ได้แก่ วิธีไม่แห้ง วิธีไม่น้ำ และวิธีไม่ผสม สำหรับวิธีการไม่น้ำเป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการผลิตแบ่งข้าว แบ่งข้าวที่ผลิตจากวิธีไม่แห้งทำได้โดยการนำข้าวมาร่อนแยกสิ่งปลอมปนออก จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องมือให้ละเอียดเป็นแป้ง ร่อนผ่านตะแกรงร่อนแป้ง สำหรับวิธีการไม่เปียก ผลิตโดยนำเมล็ดข้าวแช่น้ำจนนิ่ม บดพร้อมน้ำ แยกแป้งออกจากน้ำ การผสมน้ำมากจะมีผลช่วย ชะล้างแป้ง และโปรตีนออกมาได้มาก นำแป้งมาทำให้แห้ง บดให้ละเอียด และผ่านตะแกรงร่อน วิธีการไม่แบบผสม จะเริ่มจากการนำเมล็ดข้าวแช่น้ำจนนิ่มคล้ายกับการไม่เปียก จากนั้นนำข้าวไปอบเพื่อลดความชื้นลง แล้วนำมาบดให้ละเอียด และนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนแป้งจนได้แป้งที่มีความละเอียดสม่ำเสมอ (งามชื่น คงเสรี, 2537) แป้งที่ได้จากการไม่แห้งจะมีคุณภาพต่ำ เพราะเมล็ดแป้งค่อนข้างหยาบ สิ่งเจือปนอยู่สูงกว่า อายุการเก็บรักษาสั้น เกิดกลิ่นหืน และถูกทำลายจากแมลงได้ง่าย (พนิดา วงศ์ปรีดี, 2552)

แบ่งข้าวเจ้าจะมีลักษณะเป็นผงสีขาว มีขนาดของเม็ดแป้ง 3-5 ไมครอน รูปร่างแบน มีหลายเหลี่ยม อุณหภูมิการเกิดเจลลิตไนซ์ 70 องศาเซลเซียส มีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 17-28 โดยน้ำหนักแห้ง มีปริมาณโปรตีน เถ้า และไขมันร้อยละ 7-8, 0.5 และ 0.8 ตามลำดับ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2529) ได้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแบ่งข้าวเจ้า โดยแบ่งข้าวเจ้าต้องเป็นผงละเอียด ไม่จับกันเป็นก้อน มีสีขาวหรือสีขาวนวล มีกลิ่นตามธรรมชาติของแบ่งข้าว ไม่มีกลิ่นหืน อับ เหม็นเปรี้ยว หรือกลิ่นไม่พึงประสงค์อื่น ๆ และปราศจากสิ่งปลอมปน ความเป็นกรด-ด่างของแป้ง 5.0-7.0 มีปริมาณสตาร์ชและอะไมโลส ไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 และ 15 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ปริมาณความชื้นและเถ้า ไม่เกินร้อยละ 13 และ 0.5 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

แบ่งข้าวเจ้าสามารถแบ่งตามปริมาณของอะไมโลส ออกเป็น 4 ชนิด (Juliano, 1984) ดังนี้

1. แบ่งข้าวเจ้าจากแป้งที่มีอะไมโลสต่ำมาก มีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 0-2 โดยน้ำหนักแห้ง นิยมนำมาใช้ในการทำขนมหวานและน้ำสลัด

2. แป้งข้าวเจ้าจากแป้งที่มีอะไมโลสต่ำ มีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 9-20 โดยน้ำหนักแห้ง นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารสำหรับเด็ก อาหารเช้าและขนมปัง

3. แป้งข้าวเจ้าจากแป้งที่มีอะไมโลสปานกลาง มีปริมาณอะไมโลส 20-25 โดยน้ำหนักแห้งในประเทศฟิลิปปินส์นิยมใช้ในการทำเค้กที่ต้องมีการหมักและชุบกระป๋อง

4. แป้งข้าวเจ้าจากแป้งที่มีอะไมโลสสูง มีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าร้อยละ 25 โดยน้ำหนักแห้ง นิยมนำมาใช้ในการทำเส้นก๋วยเตี๋ยว

4. แป้งถั่วเขียว

แป้งถั่วเขียว (Mung bean flour) สามารถผลิตได้โดยใช้ถั่วเขียวเมล็ดแห้ง การผลิตทำได้ 3 วิธี คือ วิธีไม่แห้ง วิธีไม่น้ำ และไม่ผสม กรรมวิธีการผลิตคล้ายกับการผลิตแป้งข้าว แป้งถั่วเขียวนิยมนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเส้นเช่น วุ้นเส้น ชำหริ่ม (อรอนงค์ นัยวิกุล และลินดา พงศ์ผาสุก, 2536) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งถั่วเขียว กำหนดให้แป้งถั่วเขียวต้องมีสีขาวนวลหรือสีขาวอมเขียว ไม่มีกลิ่นอับหรือกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นด้วยตาเปล่า ความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 และค่าความเป็นกรด-ด่าง 4.0-8.0

Prabhavat (1987) ศึกษาแป้งสตาร์ชจากถั่วเขียว (Mung bean starch) พบว่าเม็ดแป้งส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นวงรี ผิวเม็ดแป้งจะเรียบ มีขนาดประมาณ 18-25 ไมครอน มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้าและเยื่อใยร้อยละ 25.40 2.52 3.16 และ 1.01 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

สตาร์ชถั่วเขียวมี Degree of polymerization ประมาณ 12-13 มีอุณหภูมิการเกิดเจลาคีไนซ์ 54.6-60.2 องศาเซลเซียส (Kim, et al., 2007) ปริมาณผลึก (Relative crystallinity) ของสตาร์ชถั่วเขียวจะประมาณร้อยละ 29.0-31.7 จากการตรวจสอบโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชโดยใช้เทคนิควิธีเอกซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) พบว่าเม็ดสตาร์ชจะมีโครงสร้างผลึกแบบ C-type มวลโมเลกุลของอะไมโลเพคตินในสตาร์ชถั่วเขียวจะเท่ากับ $260-289 \times 10^6$ g/mol พลังงานที่ใช้ (ΔH) ในการเกิดเจลาคีไนซ์ และรีโทรเกรดชันเท่ากับ 8.9-10.3 และ 4.6-6.3 Jg⁻¹ ตามลำดับ (Kaur, et al., 2011) แป้งถั่วเขียวมีกำลังการพองตัวและค่าการละลายได้ค่อนข้างต่ำ อาจเป็นผลมาจากปริมาณอะไมโลสที่สูง (ร้อยละ 30-32) ทำให้ไปขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้ง แป้งถั่วเขียวมีความคงตัวสูงและมีความหนืดคล้ายคลึงกันทุกพันธุ์ สามารถย่อยด้วยเอนไซม์ alpha-amylase และ glucoamylase ได้ดี (สุนีย์ โชตินิรมาท และคณะ, 2543)

Chang, et al. (2006) ศึกษาผลของการใช้กรดแลคติกและ Steeping liquors ที่เตรียมจาก NaOH, Na₂SO₃ และน้ำกลั่น ที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชถั่วเขียวทางการค้า ผลการศึกษาพบว่าการใช้สารต่างชนิดกันจะมีผลต่อปริมาณอะไมโลส โดยถั่วเขียว

ที่ผ่านการแช่กรดแลคติกจะมีอะไมโลสร้อยละ 30.9 และตัวเชื่อมที่แช่ NaOH, Na₂SO₃ และน้ำกลั่น มีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 30.9, 31.0 และ 31.1 ตามลำดับ

แป้งดัดแปร

1. จุดประสงค์ในการดัดแปรแป้ง

แป้งดิบแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวและอาจมีข้อจำกัดสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรม แป้งฟลาวัวร์หรือแป้งสตาร์ชดัดแปร (Modified flour or modified starch) จะเป็นการนำแป้งดิบมาเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีหรือทางกายภาพ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแป้งดิบให้เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร แป้งดัดแปร (Modified starch) ตามความหมายของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง (Starch) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี และ/หรือฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน เอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ ซึ่งคุณลักษณะเกณฑ์ที่ต่างกันต่าง ๆ ของแป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร มอก.1073-2535 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการที่อาจไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม เช่น มีช่วงความหนืดที่แคบ ลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความทนทานต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิต หรือความคงทนต่อสภาวะการผลิตต่ำ การดัดแปรแป้งจะเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของแป้งดิบ เพื่อให้ได้แป้งที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะการผลิตได้ดี (Light, 1990) ทำให้การเกิดเจลาติไนซ์ (Gelatinization) การคืนตัว (Retrogradation) และการสูญเสีย น้ำของเจลลดลง มีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย (Freeze-thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลดีขึ้น มีคุณสมบัติการเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่น ๆ เพิ่มขึ้น (Bemiller, 1997)

2. ประเภทของแป้งดัดแปร

แป้งดิบสามารถนำมาดัดแปรได้หลายวิธี กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2546) ได้อธิบายถึงแป้งดัดแปรชนิดต่าง ๆ ดังนี้

2.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification) เป็นการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างแป้งกับสารเคมีชนิดต่าง ๆ โดยทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์

(45-50 องศาเซลเซียส) โดยการทำให้ปฏิกิริยาจะเกิดที่บริเวณผิวของเม็ดแป้ง การดัดแปรแป้งทางเคมี แป้งออกเป็น

การเกิดอนุพันธ์ (Derivatization)

2.1.1 การแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (Monostarch substitution)

ได้แก่ ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น แป้งแอซิเตต (Starch acetate) ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล (Hydroxyethyl starch)

2.1.2 การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ เช่น แป้งครอสลิง (Crosslinked starch)

การลดขนาดโมเลกุลแป้งโดยกรด (Acid thinning) เช่น แป้งย่อยด้วยกรด (Acid modified starch) หรือ Thin-boiling starch

เดกซ์ทรีไนเซชัน (Dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (Depolymerization/Transglycosylation) โดยใช้ความร้อน หรือความร้อนกับกรด เช่น มอลโตเดกซ์ทรีน (Maltodextrin)

ออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดของโมเลกุลของแป้งโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Bleaching และ Depolymerization) เช่น แป้งออกซิไดซ์ (Oxidized starch)

การย่อยสลาย (Hydrolysis) โดยเอนไซม์หรือกรด เพื่อย่อยสลายแป้งให้เป็น น้ำตาลที่มีโมเลกุลเล็ก เช่น Enzymatically modified starch

Witczak, et al. (2012) ทำการศึกษาอิทธิพลของสตาร์ชดัดแปรทางเคมี (Acetylated Distarch Adipate; ADA, Hydroxypropyl Distarch Phosphate; HDP) และแป้ง ข้าวโพดอะไมโลสสูง (HACS) ที่มีผลต่อสมบัติทางรีโอโลยีและสมบัติทางความร้อนของโด ของสตาร์ชข้าวโพดและมันฝรั่ง ร่วมกับการใช้เพคตินและกัวกัมจากการทดลองพบว่าโดที่เติมแป้ง ดัดแปรจะให้เจลที่มีลักษณะเป็น Weak gel ค่า Storage modulus (G') จะขึ้นอยู่กับความถี่ และค่า $\tan \delta = G''/G'$ จะเปลี่ยนไปจาก 0.32 เป็น 0.49 การดัดแปรด้วย HDP จะมีผลต่อสมบัติ ด้าน Viscoelastic ของโด โดยแป้งดัดแปรจะมีสมบัติทางด้าน viscoelastic ลดลง และยังมีผลต่อ Retardation time และ Zero shear viscosity การใช้แป้งดัดแปร (HDP และ ADA) สำหรับการเตรียมโดจะไม่มีผลกระทบกับสมบัติทางด้านความหนืด (Pasting characteristics)

2.2 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification) การดัดแปรทางกายภาพเป็นการทำให้แป้งเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติโดยใช้ความร้อน ความชื้น ความดัน แรงเฉือน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพของแป้ง การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะมีผลทำให้แป้งดัดแปรที่ได้มีสมบัติเชิงหน้าที่และคุณค่าทางโภชนาการเปลี่ยนไปซึ่งจะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมอื่น ๆ (ล้านแก้ว พงษ์อรุณ, 2554) ชนิดของการดัดแปรทางกายภาพ ได้แก่

เจลาติไนเซชัน (Gelatinization) เป็นการให้ความร้อนแป้งจนผ่านขั้นตอนของเจลาติไนเซชันแล้วทำแห้งทันที เช่น แป้งพรีเจลาติไนซ์ (Pregelatinization starch)

แป้งละลายน้ำเย็น (Granular cold water soluble starch) เป็นการแปรรูปจนได้แป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาติไนเซชัน

การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล การทำให้เม็ดแป้งแตกโดยทางกลจะได้เม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าปกติ

Annealing เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาติไนเซชัน

การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (Heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงกว่าจุดเจลาติไนเซชันแก่แป้งในขณะที่แป้งมีความชื้นต่ำ

3. แป้งพรีเจลาติไนซ์

แป้งพรีเจลาติไนซ์หรือแป้งพรีเจล (Pregelatinized flour) เป็นแป้งดัดแปรทางกายภาพ โดยให้ความร้อนแก่แป้ง ทำให้แป้งสุกหรือเกิดเจลาติไนซ์ (Gelatinization) หลังจากนั้นนำแป้งไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้ง เช่น เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) หรือเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) และบดให้ละเอียด ได้แป้งดัดแปรที่สามารถละลายกระจายตัวได้ในน้ำเย็น ให้ความหนืดได้ทันที และไม่เกิดเจล เหมาะสำหรับใช้กับอาหารที่ไม่ต้องใช้ความร้อน (กล้านรงค์ ศิริรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

3.1 การผลิตแป้งพรีเจลาติไนซ์

การผลิตแป้งพรีเจลาติไนซ์สามารถใช้ได้ในทั้งแป้งดิบและแป้งดัดแปรทางเคมีชนิดต่างๆ โดยป้อนน้ำแป้งที่มีลักษณะเป็นแป้งเปียก มีปริมาณของแข็งประมาณร้อยละ 42-44 ผ่านเครื่องทำแห้ง ความร้อนจากเครื่องทำแห้งจะทำให้น้ำระเหยออกไป จากนั้นจะได้แป้งที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางฉาบผิวหน้าลูกกลิ้งและต้องมีการควบคุมให้แป้งมีความสม่ำเสมอเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพเท่ากัน

เครื่องทำแห้งที่ใช้ในการผลิตแป้งพรีเจลาติไนซ์ มีหลายชนิด เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด เนื่องจากมีอัตราการผลิตที่สูง เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) ประกอบด้วยลูกกลิ้งเดี่ยว หรือลูกกลิ้งคู่ มักทำด้วยเหล็กปลอดสนิม ผิวเรียบภายในกลวงได้รับความร้อนจากด้านใน ด้วยไอน้ำ หรือไฟฟ้า อุณหภูมิของผิวลูกกลิ้งจะประมาณ 120-170 องศาเซลเซียส ความร้อนจะทำให้แป้งเกิดเจลาติไนซ์ อาหารที่แห้งจะเคลือบผิวลูกกลิ้งเป็นฟิล์มบางถูกขูดออกโดยใบมีด ซึ่งจะสัมผัสกับผิวของลูกกลิ้งอย่างสม่ำเสมอ ก่อนที่ลูกกลิ้งจะหมุนครบรอบ หลังจากนั้นอาหารแห้งที่มีลักษณะเป็นแผ่นบาง จะถูกนำไปบด บั๊จจัยที่มีผลต่อคุณภาพของแป้งพรีเจลาติไนซ์ ได้แก่ อัตราการหมุนและระยะห่างของลูกกลิ้ง (Powell, 1967) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งในการอบแห้งชนิดต่างๆ ได้แก่ มันฝรั่งแผ่น ผลิตภัณฑ์ที่ทำให้สุกแล้วจากธัญพืช กากน้ำตาล ชุปแห้ง และเนื้อผลไม้บางชนิด ไข่ไก่ ไช้ผง โปรตีนหางนม

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Extrusion processing) เป็นกระบวนการที่มีการให้ความร้อน การนวด การเคี้ยว และการขึ้นรูป เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) สามารถให้ความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันและใช้ระยะเวลาสั้น จึงจัดเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูงเวลาสั้น (High temperature short time) การผลิตแป้งพรีเจลาติไนซ์ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เป็นกระบวนการที่ผสมผสานกันระหว่างแรงกลและแรงเคี้ยว ในระหว่างการผลิตสตาρχจะเกิดเจลาติไนซ์ โดยการเปลี่ยนแปลงของสตาρχในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์จะเริ่มจากน้ำจะแพร่เข้าสู่เม็ดสตาρχในระหว่างการเคลื่อนที่ของวัตถุดิบภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เมื่อเข้าสู่ช่วงที่มีแรงเคี้ยวเม็ดสตาρχจะถูกบีบอัด ทำให้เสียรูปพร้อมกับเริ่มหลอมและสูญเสียโครงสร้างความเป็นผลึก ณ จุดนี้将有ความดันเพิ่มขึ้น พลังงานกลจะแพร่กระจายทำให้โมเลกุลของสตาρχแตกออก และในกระบวนการจะมีแรงเคี้ยวร่วมกับการใช้ความร้อนทำให้สตาρχเกิดการเจลาติไนซ์ (Gelatinization) สภาวะที่ใช้ในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จะทำให้เกิดความเสียหายกับเม็ดสตาρχในปริมาณที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเม็ดสตาρχเพิ่มขึ้นตามสภาวะที่ใช้ในกระบวนการที่ใช้ผลิต (Mariotti, et al., 2013)

3.2 เจลาติไนเซชัน (Gelatinization) ของแป้ง

เจลาติไนเซชันของแป้งเกิดขึ้นเมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อน โมเลกุลภายในเม็ดแป้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลง พันธะไฮโดรเจนในโมเลกุลจะถูกทำลาย สายของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน คลายตัวออกทำให้ดูดซึมน้ำได้มากขึ้น เกิดการพองตัว (Swelling) ของเม็ดแป้ง เมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวอย่างเต็มที่ จะทำให้สูญเสียลักษณะโปรฟริงเจนส์ ซึ่งบอกถึงลักษณะ

การจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในเม็ดสตาร์ชอย่างมีระเบียบ ช่วงอุณหภูมิที่แป้งมีการดูดน้ำและพองตัวขึ้น เรียกช่วงอุณหภูมินี้ว่า Gelatinization temperature การวิเคราะห์การเกิดเจลลิตไนเซชันของเม็ดแป้งสามารถใช้เครื่องมือในการตรวจสอบได้หลายชนิด

เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) เป็นเครื่องมือชนิดหนึ่ง ที่นิยมใช้วิเคราะห์หาช่วงอุณหภูมิการเกิดการเจลาติไนเซชันของแป้ง ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC จะได้ค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดการเจลาติไนเซชัน (Onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่สตาร์ชดูดความร้อนขณะเจลาติไนซ์สูงสุด (Peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายที่สตาร์ชเกิดการเจลาติไนซ์ (Conclusion temperature, T_c) ในหน่วยองศาเซลเซียส และค่าพลังงานเอนทาลปีของการเจลาติไนซ์ (Enthalpy, ΔH) เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งได้รับระดับหนึ่งจนทำให้เม็ดแป้งดูดซับน้ำและพองตัว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนืดของน้ำแป้งอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดเรียกว่า Pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับแป้งแต่ละชนิด วิธีตรวจวัดความหนืดสามารถทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความหนืดขณะที่ให้ความร้อน สามารถเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างในระหว่างการวิเคราะห์ เป็นเครื่องมือที่วิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วสามารถตรวจสอบลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting curve) ได้ในระยะเวลาสั้น ใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์ปริมาณน้อย เนื่องจากมีกลไกการส่งผ่านความร้อนที่ดี (กล้านรงค์ ศรีวรรต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

3.3 คุณสมบัติของแป้งพรีเจลาติไนซ์

แป้งพรีเจลาติไนซ์สามารถละลายและกระจายตัวได้ในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง ไม่เกิดเป็นเจลสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าแป้งดิบ ใช้เป็นสารยึดเกาะในอาหารประเภทเนื้อ เพื่อช่วยรักษาความชุ่มชื้นและอุ้มน้ำในผลิตภัณฑ์ ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมเค้กเพื่อช่วยในการดูดซับน้ำและเก็บฟองอากาศได้ดีขึ้น

Curic, et al. (2007a) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ในการผลิตข้าวโพดบดหยาบ (Cornmeal) เพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ทำการทดลองโดยแปรผันอุณหภูมิของเครื่องที่ 111-159 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นในช่วงร้อยละ 12.10-24.77 และ Screw speed 160-460 รอบต่อนาที ทำการวิเคราะห์ค่าความชื้น Expansion Index (EI), Water Absorption Index (WAI) ของ cornmeal และค่าความหนืดของแป้งสาลี และแป้งสาลีที่ผสม Cornmeal จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผลิต

Cornmeal ที่มีคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่ดี จะมีความชื้นร้อยละ 21.21; อุณหภูมิของเครื่องเท่ากับ 145 องศาเซลเซียส และ Screw speed เท่ากับ 263.5 รอบต่อนาที การเติม Cornmeal ที่ผ่านเครื่องเอกซ์ทราเดอร์จะช่วยเพิ่มการดูดซึมน้ำและความหนืด โดยความสามารถในการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และความสามารถในการดูดซึมน้ำจะมีความสัมพันธ์กับความหนืดเนื่องจากเม็ดสตาร์ชที่เสียหายในระหว่างกระบวนการจะดูดซึมน้ำและพองตัวทำให้เกิดความหนืดเพิ่มขึ้นและจะช่วยเพิ่มความสามารถในการจับน้ำในระหว่างทำการผสมและหมักโดซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีในการผลิตขนมปัง

ขนมปัง

ขนมปัง (Bread) เป็นอาหารหลักของชาวยุโรปและมีความนิยมรับประทานเพิ่มมากขึ้นในประเทศไทย โดยมีส่วนผสมหลัก คือ แป้งสาลี และน้ำ เมื่อนำแป้งสาลีผสมกับน้ำจะทำให้เกิดโดที่มีลักษณะยืดหยุ่น ในระหว่างการหมักโด ยีสต์จะเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กลูเตนจะทำหน้าที่ในการกักเก็บก๊าซ ช่วยทำให้เกิดเป็นโครงร่างของผลิตภัณฑ์ และทำให้ขนมปังมีปริมาตรที่ดี

1. วัตถุดิบในการทำขนมปัง

จิตรนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล (2541) ได้กล่าวถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ขนมปังดังนี้

1.1 แป้งสาลี แป้งสาลีที่ทำขนมปังเป็นแป้งที่มีโปรตีนสูง (ร้อยละ 12-14) แป้งจะมีสีขาวนวล มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 14 มีสามารถดูดซึมน้ำได้ดี (ร้อยละ 60-65) หน้าที่ของแป้งสาลีในขนมปัง คือเป็นโครงร่างของผลิตภัณฑ์ เมื่อผ่านการนวดจะเกิดเป็นยางเหนียว ๆ ยืดหยุ่นได้ เรียกว่า กลูเตน ซึ่งกลูเตนเป็นตัวอุ้มก๊าซที่เกิดระหว่างการหมักไว้ ทำให้โดขึ้นฟู เมื่อนำไปอบกลูเตนจะขยายตัวเพราะถูกความร้อนทำให้เกิดโครงร่างของขนมปัง

1.2 น้ำ เป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในการทำขนมปัง มีผลต่อลักษณะของโดโดยตรง เพราะน้ำจะทำหน้าที่เปลี่ยนสภาพของโปรตีนในแป้งให้เป็นกลูเตน ช่วยละลายเกลือ น้ำตาล และส่วนผสมอื่น ๆ ที่ละลายได้ให้กระจายอย่างทั่วถึง ช่วยควบคุมอุณหภูมิของโดและช่วยควบคุมความหนืดของโด

1.3 ยีสต์ เป็นจุลินทรีย์ที่มีขนาดเล็ก ยีสต์จะทำให้เกิดการหมัก เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ขนมปังขึ้นฟู ให้กลิ่นรสที่เกิดจากหมัก ยีสต์ที่ใช้ทำขนมปังมีทั้งยีสต์สดและยีสต์แห้ง แต่ที่นิยมใช้มาก คือ ยีสต์แห้งชนิดผงสำเร็จรูปซึ่งสามารถผสมรวมกับแป้งได้ทันทีทำให้สามารถลดเวลาในการผสม

1.4 น้ำตาล ให้ความหวาน ให้กลิ่นรส ช่วยให้สีแก่ผลิตภัณฑ์ และใช้เป็นอาหารของยีสต์ในระหว่างกระบวนการหมัก น้ำตาลที่ใช้มีหลายชนิด ได้แก่ น้ำตาลทรายขาว น้ำตาลทรายแดง และน้ำตาลไอซิ่ง

1.5 เกลือ ทำให้ขนมปังมีกลิ่นรสที่ดี ช่วยควบคุมการทำงานของยีสต์ เพิ่มความแข็งแรงแก่กลูเตนและช่วยให้เกิดสีของเปลือกนอกของขนมปัง เกลือที่ใช้มักเป็นเกลือป่นละเอียดที่ใช้ประกอบอาหารทั่วไป

1.6 ไขมัน ทำหน้าที่ให้ความอ่อนนุ่มและให้กลิ่นรสที่ดี ช่วยเก็บกักก๊าซที่เกิดขึ้นทำให้ขนมปังมีปริมาตรเพิ่มขึ้น และมีเนื้อสัมผัสที่ดี นอกจากนี้ยังช่วยหล่อลื่นกลูเตนให้มีการขยายตัวได้ดี ทำให้ขนมปังมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ไขมันที่นิยมใช้ในการทำขนมปัง คือ เนยขาว ทั้งนี้สามารถใช้เนยสดหรือมาการีนแทนเนยขาวได้บางส่วนเพื่อช่วยเพิ่มกลิ่นรส

1.7 นม สามารถใช้ได้ทั้งนมสดและนมผง นมสดจะทำหน้าที่รวมส่วนผสมอื่น ๆ เข้าด้วยกัน ส่วนนมผงจะช่วยให้ส่วนผสมของแป้งขนมปังไม่เหลวเกินไป นมจะช่วยให้เกิดสีและกลิ่นรสแก่ขนมปัง

1.8 ไข่ นิยมใช้เป็นไข่ไก่ มีส่วนช่วยให้ขนมปังนุ่ม มีเนื้อสัมผัสที่ดี ไม่แห้งแข็ง มีสีสวย นิยมใช้เป็นส่วนผสมในขนมปังทั้งหวานและขนมปังหวาน

2. ชนิดของขนมปัง

ขนมปังแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ตามปริมาณไขมันในสูตร (จิตธนา แจ่มเมฆ และ อรอนงค์ นัยวิกุล, 2541) ดังนี้

2.1 ขนมปังฝรั่งเศส ขนมปังอิตาเลียน และขนมปังเวียดนามา ขนมปังทั้งสามชนิดเป็นขนมปังที่มีปริมาณไขมันน้อย ปริมาณร้อยละ 0-3 และมีปริมาณน้ำตาลน้อย ปริมาณร้อยละ 0-2 แป้งที่ใช้ทำขนมปังชนิดนี้ต้องใช้แป้งที่มีปริมาณกลูเตนสูง เพื่อทนต่อการหมักได้นาน ทนต่อการพักตัว และการขึ้นฟูของโดในระยะแรกของการอบ ผิวด้านนอกแข็ง กรอบ เนื้อค่อนข้างแห้ง และมีรสจืด

2.2 ขนมปังปอนด์หัวกะโหลกและขนมปังแซนด์วิช เป็นขนมปังที่มีปริมาณไขมันน้อย ปริมาณร้อยละ 3-6 และมีปริมาณน้ำตาลปานกลาง ปริมาณร้อยละ 4-8 เนื้อขนมปังมีลักษณะละเอียด นุ่ม รสจืด ขนมปังชนิดนี้มักจะทำให้ในการทำแซนด์วิชชนิดต่าง ๆ

2.3 ขนมปังเนื้อนุ่ม เป็นขนมปังที่มีปริมาณไขมันสูง ปริมาณร้อยละ 6-12 และมีปริมาณน้ำตาลสูงปริมาณร้อยละ 10-14 อาจมีการเติมไข่ลงไป เนื้อของขนมปังมีลักษณะนุ่ม เนื้อละเอียด และค่อนข้างหวาน ตัวอย่างเช่น ขนมปังไส้กรอก ขนมปังชอฟบัน ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์

2.4 ขนมปังหวาน เป็นขนมปังที่มีปริมาณไขมันและน้ำตาลสูงร้อยละ 12-24 และร้อยละ 16-22 ตามลำดับ เนื้อของขนมปังนุ่ม ละเอียดย รสชาติหวานมันมากกว่าขนมปังกึ่งหวาน เพราะมีปริมาณน้ำตาล นม ไขมันสูงกว่า ตัวอย่างเช่น ขนมปังไส้หมูหยอง ขนมปังไส้มะพร้าว ขนมปังไส้ลูกเกด

3. ขั้นตอนการผลิตขนมปัง

จิตรณา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล (2541) กล่าวถึงขั้นตอนการผลิตขนมปังดังนี้

3.1 ขั้นตอนการผสมหรือการนวดแป้ง เป็นขั้นตอนที่ทำให้ส่วนผสมคลุกเคล้าเป็นเนื้อเดียวกัน ขั้นตอนนี้จะทำให้แป้งผสมกันจนเป็นโดที่มีลักษณะเรียบเนียน สามารถดึงเป็นแผ่นบาง ๆ ได้โดยแป้งไม่ขาดออกจากกัน ขั้นตอนการผสมมีหลายวิธี เช่น การผสมแบบขั้นตอนเดียว เป็นวิธีการทำขนมปังโดยนำส่วนผสมทั้งหมดในสูตรมาผสมรวมกันจนได้โดที่มีลักษณะเนื้อเนียนไม่ติดมือ การผสมแบบสปองจ์-โด เป็นวิธีการทำขนมปังโดยการเตรียมสองขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอน "สปองจ์" และขั้นตอน "โด" ขั้นตอนสปองจ์ จะเป็นการเตรียมส่วนผสม ซึ่งประกอบด้วย แป้ง ยีสต์ และน้ำ ทำการหมักก้อนแป้งประมาณ 2-3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำส่วนผสมที่เหลือในสูตรได้แก่ แป้งที่เหลือ น้ำตาล น้ำ นมผง ไข่ไก่ เกลือ และกลิ่นรสต่าง ๆ ใส่ลงในสปองจ์ แป้งที่ได้ในขั้นตอนนี้เรียกว่า โด การผสมแบบทุ่นเวลา เป็นวิธีการทำขนมปังที่ใช้ระยะเวลาสั้น โดยการเติมสารเสริมคุณภาพลงในส่วนผสมแป้งเพื่อให้สามารถหมักโดได้เร็วขึ้น

3.2 ขั้นตอนการหมักโด เป็นขั้นตอนที่ยีสต์จะใช้น้ำตาลในสูตร เปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเข้าไปแทนที่ฟองอากาศที่เกิดขึ้นในระหว่างการตีและทำให้โดขึ้นฟู การหมักโดขึ้นอยู่กับปริมาณยีสต์ อุณหภูมิ และระยะเวลาการหมัก อุณหภูมิที่ใช้ในการหมักโดประมาณ 30-35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณร้อยละ 70-78 ระยะเวลาในการหมักขึ้นอยู่กับวิธีการผสม สำหรับในประเทศที่มีอากาศร้อน สามารถหมักโดได้ที่อุณหภูมิห้องและอาจควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ โดยใช้ผ้าขาวบางชุบน้ำปิดหมาด ๆ ปิดคลุมไว้ หรือใช้ภาชนะที่มีฝาครอบปิด เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวโดสัมผัสกับอากาศจนแห้ง แต่ถ้าหมักในฤดูหนาว โดจะขึ้นช้าอาจต้องใส่ยีสต์เพิ่มเล็กน้อยหรือนำไปไว้ในตู้หมักโดซึ่งควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นเพื่อป้องกันไม่ให้ก้อนโดแห้ง

3.3 ขั้นตอนการนวดไล่อากาศ เป็นขั้นตอนการนำโดมานวดไล่อากาศ เพื่อให้ก้อนโดมีอุณหภูมิที่เท่ากันทั้งก้อน การไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดใหญ่ออกจากก้อนโด ทำให้ยีสต์ทำงานได้ดีขึ้น และพร้อมที่จะขยายตัวใหม่ ทำให้โครงสร้างแป้งที่ได้ใหม่แข็งแรงขึ้น

3.4 ขั้นตอนการหมักหรือการพักแป้งครั้งสุดท้าย เมื่อมีวันหรือทำรูปวางขนมปังลงพิมพ์ จะนำไปหมักให้ขึ้นเต็มที่ ที่อุณหภูมิประมาณ 35-37 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิห้อง โดยทั่วไปใช้เวลาในการหมักครั้งสุดท้ายประมาณ 1 ชั่วโมง

3.5 ขั้นตอนการอบและการบรรจุผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการอบประมาณ 180-250 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของขนมปัง รวมทั้งขนาดและชนิดของเตาอบ เมื่อขนมปังที่อบสุกแล้วควรนำออกจากพิมพ์หรือถาดทันที แล้วนำมาวางพักให้เย็นบนตะแกรง ก่อนนำไปใส่บรรจุภัณฑ์

ภรณ์ ลิ้มปิสุต (2540) ได้ศึกษาการใช้แป้งถั่วเขียวผสมแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมอบ เมื่อนำแป้ง ถั่วเขียวผสมกับแป้งสาลีมาศึกษาสมบัติทางหน้าที่พบว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำและน้ำมันเพิ่มขึ้น ความสามารถในการเกิดเจลลดลง ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน ความสามารถในการเกิดฟองและความคงตัวของฟองเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งสาลี เมื่อนำมาศึกษาสมบัติทางด้านความหนืด พบว่าค่าความหนืดสูงสุด ค่า Setback และค่า Consistency ลดลง เมื่อนำมาทำผลิตภัณฑ์คุกกี้แล้วทดสอบทางประสาทสัมผัส พบว่าลักษณะทั่วไปและเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างจากแป้งสาลี แต่ในด้านสีและกลิ่นรสพบว่ามีสีเหลืองและกลิ่นของถั่วเพิ่มขึ้น ที่ระดับการผสมร้อยละ 10 ของแป้งถั่วเขียว ผู้บริโภคมีการยอมรับไม่แตกต่างจากการใช้แป้งสาลี

4. โดและสมบัติทางรีโอโลยีของโด (Dough and dough rheology)

โดเกิดจากการนวดผสมระหว่างแป้งสาลีกับน้ำ โดจะมีคุณสมบัติที่มีความยืดหยุ่น (Viscoelastic properties) ที่อุณหภูมิห้อง (Hsu, Lu, and Huang, 2000) ลักษณะดังกล่าวถือเป็นลักษณะเฉพาะของแป้งสาลี โดยแป้งชนิดอื่นไม่สามารถทดแทนแป้งสาลีได้ หากมีการใช้แป้งชนิดอื่นทดแทนจะส่งผลต่อสมบัติทางรีโอโลยีของโด ซึ่งจะมีผลต่อการดูดซับน้ำ การเกิดเจลและความหนืด (Dobraszczyk and Morgenstern, 2003)

สมบัติทางรีโอโลยี ใช้อธิบายถึงการไหลและการเสียรูปของวัสดุเมื่อมีแรงมากระทำ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงโครงสร้างและพฤติกรรมของวัสดุนั้น ๆ โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง วัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นของเหลว จะแสดงออกมาในรูปของความหนืด (Viscous) หรือแรงต้านทานต่อการไหล และวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นของแข็งจะแสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่น (Elastic) หรือการกลับคืนรูปร่าง (Dobraszczyk and Morgenstern, 2003)

สมบัติทางรีโอโลยีสามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของโดขนมปัง เช่น การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis) เป็นการวัดคุณลักษณะการยืดของโดและกลูเตน โดยวัดเป็นค่าแรงสูงสุดและระยะทางที่ดึงยืดจนขาด (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ,

2546) การทดสอบแบบ Oscillatory (Steffe, 1996) เป็นการศึกษาการตอบสนองต่อความเค้นหรือความเครียดภายใต้การเคลื่อนที่แบบสั่น (harmonic oscillation) ของวัสดุ viscoelastic โดยวัดเป็นค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ Loss tangent ($\tan \delta$) (ปาริดา ขุนแอ, 2550) วัสดุจะถูกให้ความเค้นหรือความเครียดแปรผันตามช่วงเวลา การทดสอบแบบ oscillatory นิยมใช้ทดสอบเพื่ออธิบายโครงสร้างและพฤติกรรมของวัสดุประเภท Viscoelastic ในอาหารโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์จากแป้งและสามารถอธิบายการเกิดกลไกต่าง ๆ ของแป้งได้ เช่น การเกิดการเจลลิตไนซ์ในแป้ง การพองตัวของความแข็งแรงของเจล การจับตัวเป็นก้อนของโปรตีน และการสลายตัวของโปรตีน เป็นต้น (สวรัภัส จันทระเทพธิมากุล, 2551) Dynamic oscillatory เป็นวิธีการทดสอบสมบัติด้านความยืดหยุ่น หรือ Elastic (G' , Shear storage modulus) รวมถึงสมบัติด้านความหนืดหรือ Viscous (G'' , Shear loss modulus) ของวัสดุ มักจะแสดงผลในการทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีเป็น Linear viscoelastic region เพราะเมื่อให้ความเครียดในระดับที่ไม่สูงมาก ($<1\%$) จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความเค้นของวัสดุ และการทดสอบด้วยวิธี Dynamic oscillatory จะไม่ทำให้ตัวอย่างเสียรูปร่าง การทดสอบด้วยวิธี Dynamic tests หลังจากได้ linear region จะสามารถวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีของตัวอย่างได้หลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิ ความเครียดหรือความถี่ในระดับที่แตกต่างกัน ในกรณีของการทดสอบ Frequency sweep หากค่า G' มีค่ามากกว่าค่า G'' จะบ่งบอกถึงพฤติกรรมวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic behavior) ที่มีแสดงลักษณะของโดเป็นของแข็ง (Upadhyay, Ghosal, and Mehra, 2012; Amemiya and Menjivar, 1992)

Lazaridou, et al. (2007) ศึกษาพฤติกรรมด้านความหนืดของโดขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่าง ๆ ในปริมาณร้อยละ 2 (w/w) ของน้ำหนักแป้ง-ข้าวเจ้า พบว่าที่ความเครียด (Strain) ระดับร้อยละ 0.1 จะทำให้ค่า Storage modulus (G') ของตัวอย่างลดลง และค่า G'' จะลดลงมากขึ้น เมื่อเพิ่มระดับความเครียดเป็นร้อยละ 1 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของโดขนมปังจะถูกทำลายเมื่อระดับความเครียดเพิ่มสูงมากขึ้น

5. การเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา (Staling)

ขนมปังมีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาทำให้การยอมรับของผู้บริโภค ลดลง โดยเกิดการสูญเสียคุณภาพทางประสาทสัมผัส เช่น สูญเสียกลิ่นรส หรือ ทางกายภาพ เช่น สูญเสียความนุ่มของเนื้อขนมปัง เนื้อขนมปังจะมีความแห้ง และร่วน โดยปกติขนมปังจะมีคุณภาพที่ดีที่สุดหลังจากที่นำออกจากเตาอบประมาณ 2-3 ชั่วโมงและเมื่อเก็บขนมปังไว้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเปลือกขนมปัง (Crust) โดยเกิดการเคลื่อนย้ายของน้ำจากเนื้อของขนมปัง (Crumb) ไปยังเปลือกนอก (Czuchajowska and Pomeranz, 1989; Ribotta and Le Bail, 2007)

ทำให้เปลือกนอกนุ่มและเหนียวขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นควบคู่ไปกับการระเหยของกลีเซอรอล ออกจากภายนอกขนมปัง (Eliasson and Larson, 1993) การเปลี่ยนแปลงของเนื้อขนมปัง (Crumb staling) อาจเกิดจากการสูญเสียความชื้นและเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี เช่น เกิดการคืนตัว (Retrogradation) ของสตาร์ช เนื้อขนมปังจะมีลักษณะที่แห้งและกระด้างขึ้น (He and Hosney, 1991) ในช่วงแรกของการเก็บรักษาการคืนตัวจะเกิดจากอะไมโลส เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นสายตรงจะทำให้การจับตัวด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้นจะเกิดการจับตัวกันของสายโซ่อะไมโลเพคติน ทำให้ขนมปังมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งขึ้น

โรคแพ้กลูเตน

กลูเตน เป็นส่วนประกอบของโปรตีนที่พบในแป้งสาลี ข้าวไรย์ และข้าวบาร์เลย์ ซึ่งนิยมใช้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ขนมอบ กลูเตนจัดเป็นอาหารที่ก่อภูมิแพ้ (Food allergen) ในปัจจุบันทางการแพทย์ได้ค้นพบว่าผู้ป่วยที่เป็นโรคเนื่องจากการแพ้กลูเตน (Celiac disease) เป็นจำนวนมากขึ้น โดยอาการแพ้กลูเตนมีหลากหลายรูปแบบ ผู้ป่วยที่เป็นโรคนี้จะมีน้ำหนักที่ลดลง เชื่องซึม ท้องบวม ปวดท้อง ท้องอืด เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน มีแผลพุพองในปาก ปลายประสาทอักเสบ ภาวะการเคลื่อนไหวที่ไม่ประสานกัน โลหิตจาง เกิดภาวะมีบุตรยาก แท้งง่าย กระดูกพรุน ปวดกระดูกและข้อต่อ มีผื่น คันที่ผิวหนัง ผิวลำ ผมหงอก อาการดังกล่าวอาจเกิดขึ้นในผู้ป่วยเพียงอาการเดียวหรือเกิดขึ้นพร้อมกันหลายอาการ สาเหตุเนื่องจากลำไส้เล็กส่วนบนเกิดการอักเสบ (Mendoza, 2005; Wieser and Koehler, 2008)

การรักษาโรคที่เกิดจากการแพ้กลูเตนสามารถทำได้โดยการหลีกเลี่ยงอาหารที่อาจทำให้เกิดการแพ้ นอกจากนี้การวินิจฉัยโรคยังคงประสบเนื่องจากคนส่วนใหญ่จะวินิจฉัยด้วยตัวเองว่าแพ้อาหารที่ทำจากข้าวสาลี โรคแพ้กลูเตนมีสาเหตุจากร่างกายสร้างภูมิคุ้มกันตนเอง ทำให้เกิดความผิดปกติของลำไส้ ระบบการดูดซึมอาหารจะผิดปกติ ทำให้ไม่สามารถนำสารอาหารไปใช้ประโยชน์ได้ สาเหตุเกิดจากการแพ้เกิดจาก โปรลามิน (Prolamins) ซึ่งเป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง พบในข้าวสาลี ข้าวไรย์ และข้าวบาร์เลย์ คุณสมบัติของ Prolamins คือสามารถละลายได้ในเอทานอลร้อยละ 40-70 โปรลามินในข้าวสาลีจะมีชื่อเรียกเฉพาะว่า ไกลอะดิน (Gliadins) (Gallagher, 2004; Mendoza, 2005) เมื่อรับประทานอาหารที่มีกลูเตนเข้าไป ระบบภูมิคุ้มกันจะสร้างสารขึ้นมาต่อต้านซึ่งจะไปทำลายส่วนที่ใช้ดูดซึมสารอาหารในลำไส้เล็ก ทำให้ร่างกายดูดซึมสารอาหารเข้าสู่กระแสเลือดไม่ได้ (Pruessner, 1998) อาหารที่ปราศจากกลูเตน ไม่ควรมีกลูเตนเกิน 20 ppm (Gallagher, 2004)

ขนมปังปราศจากกลูเตน

ขนมปังปราศจากกลูเตน เป็นขนมปังที่ไม่มีการใช้แป้งสาลีในส่วนผสม แต่จะใช้แป้งจากธัญพืชชนิดอื่นทดแทน เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งมันเทศ หรือสตาร์ชมันสำปะหลัง เป็นต้น โดยแป้งข้าวเจ้าจะเป็นแป้งที่มีการนำไปใช้ในการนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อาหารปราศจากกลูเตนมากที่สุด เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และรสชาติ รวมทั้งไม่ก่อให้เกิดการแพ้ อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน ขนมปังยังมีความคุณภาพที่ไม่ดี มีลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และกลิ่นที่ไม่น่าพอใจ ทั้งนี้เนื่องจากขาดกลูเตน ซึ่งเป็นโปรตีนที่มีส่วนช่วยในการเกิดโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ การเติมไฮโดรคอลลอยด์หรือโปรตีนลงไปสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้นและมีลักษณะใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี ปัจจุบันมีการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนทางการค้า โดยใช้วัตถุดิบหลายชนิด Mariotti, et al. (2013) ทำการผลิตขนมปังจากแป้งบัควีท โดยใช้แป้งบัควีท 2 ชนิด คือ Dehulled buckwheat flour (DBF) และ Puffed buckwheat flour (PBF) และศึกษาผลของการใช้ HPMC ต่อคุณภาพของขนมปัง จากการทดลองพบว่าในการทำขนมปังสามารถเติมแป้งบัควีทในสูตรได้มากถึงร้อยละ 40 การใช้ HPMC จะช่วยลดการแพร่ของน้ำและลดการสูญเสียน้ำของเนื้อขนมปัง การเติมแป้งบัควีทจะช่วยปรับปรุงทั้งลักษณะเนื้อสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการของขนมปังปราศจากกลูเตน

Nishita and Bean (1979) ได้ศึกษาคูณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวเจ้าต่างพันธุ์ที่มีผลต่อคุณภาพของขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า พบว่าข้าวเจ้าพันธุ์ที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำและมีอุณหภูมิแป้งสุก (Gelatinization temperature) ต่ำ คือ มีอะไมโลสน้อยกว่าร้อยละ 20 และอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์ต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียส เมื่อนำมาผลิตขนมปังจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มี เนื้อสัมผัสที่ดี

ภาณุมาศ รุ่งเรืองอารี (2541) ศึกษาการใช้แป้งข้าวเจ้าทางการค้ามาผลิตขนมปังและผลิตแป้งข้าวเจ้าฟรีเจลาติไนซ์ด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งเปรียบเทียบกับการใช้เอกซ์ทราซันที่ระดับความชื้นของแป้ง 3 ระดับ เพื่อแทนที่ข้าวเจ้าบางส่วนในการผลิตขนมปังและเสริมโปรตีนเพื่อเพิ่มคุณภาพของขนมปัง โดยใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดร่วมกับโปรตีนข้าวเจ้า ทดลองแทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้ง ฟรีเจลาติไนซ์ พร้อมกับแปรปริมาณน้ำในสูตรขนมปัง พบว่าแป้งฟรีเจลาติไนซ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ ที่ระดับความชื้นของแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 14.5 แทนที่แป้งข้าวเจ้าในสูตรร้อยละ 20 เติมน้ำร้อยละ 100 และเติม E4M ร้อยละ 2.0 จะได้รับการยอมรับมากที่สุด การเสริมโปรตีนในขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าพบว่าการใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดร้อยละ 5 ร่วมกับโปรตีน

จากข้าวเจ้า ร้อยละ 10 แทนที่แป้งข้าวเจ้าเป็นระดับที่เหมาะสม โดยใช้ปริมาณน้ำร้อยละ 110 ขนมนึ่งที่ได้จะมีเนื้อนุ่ม เหนียว เปลือกแห้งร่วน และก้อนขนมนึ่งไม่มีรอยแตก

Sivaramakrishnan, et al. (2004) ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของโดของขนมนึ่งจากแป้งข้าวเจ้า โดยวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีของโดจากแป้งข้าว 2 สายพันธุ์ ร่วมกับการใช้ hydroxylpropyl methylcellulose (HPMC) เปรียบเทียบกับโดจากแป้งข้าสาลี เพื่อหาความเหมาะสมต่อการทำขนมนึ่ง จากการทดลองพบว่าโดที่ทำจากแป้งข้าวที่เติม HPMC จะมีความคงตัวที่ 500 BU มากกว่าโดที่ทำจากแป้งสาลี ผลการทดสอบทางรีโอโลยีของโดด้วยวิธี Oscillation tests และ Creep tests แสดงให้เห็นว่าโดที่ทำจากแป้งข้าวที่เติม HPMC ที่ระดับร้อยละ 1.5 และ 3.0 จะมีคุณสมบัติการไหลแบบเดียวกับโดที่ทำจากแป้งสาลีและเหมาะสมต่อการนำไปทำขนมนึ่งจากแป้งข้าวเจ้า

Curic, et al. (2007b) ศึกษาการผลิตขนมนึ่งปราศจากกลูเตนจากวัตถุดิบ คือ ข้าวโพด บดหยาบและแป้งถั่วเหลืองที่ผ่านเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ จากการทดลองพบว่าขนมนึ่งที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ผ่านเครื่องเอกซ์ทราเดอร์จะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นและมีปริมาณโปรตีนมากกว่าร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม คือ แป้งข้าวและสตาร์ชข้าวโพด และขนมนึ่งที่ผลิตจากข้าวโพด บดหยาบและแป้งถั่วเหลือง อัตราส่วน 75:25 ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทราชันที่มีการเติม กัวกัม ในปริมาณร้อยละ 3 จะมีปริมาตรมากที่สุดและมีการยอมรับทางประสาทสัมผัสสูงที่สุดด้วยขนมนึ่งปราศจากกลูเตน จะผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักในระหว่างที่เก็บรักษา จึงง่ายต่อการเกิดการคืนตัว (Retrogradation) การคืนตัวจะเกิดขึ้นกับเนื้อในของขนมนึ่ง โดยจะเกิดขึ้นภายในไม่กี่ชั่วโมงหลังจากอบขนมนึ่ง (Kim and D'Appolonia, 1977) สาเหตุเกิดจากการจัดเรียงโครงสร้างระดับโมเลกุล เกิดรีโทรเกรเดชันของอะไมโลเพกตินหรือการเชื่อมกันของสายอะไมโลสที่ออกมาจากเม็ดสตาร์ช เกิดเป็นลักษณะแบบผลึก (Crystalline) ส่งผลให้ขนมนึ่งมีความแน่นเนื้อเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยของ Demirkesen, et al. (2014) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนมนึ่งปราศจากกลูเตนที่ผลิตด้วยแป้งเกล็ดผสมกับแป้งข้าวเจ้า ในระหว่างการเก็บรักษา 1-96 ชั่วโมง พบว่าค่าความแข็งของขนมนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา แสดงถึงเกิดรีโทรเกรเดชันที่มากขึ้นจึงต้องใช้พลังงานในการสลายโครงสร้างผลึกมากขึ้น (Santos, et al., 2008) จึงส่งผลให้ค่าเอนทัลปีของการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation enthalpy) เพิ่มขึ้น

ไฮโดรคอลลอยด์

ไฮโดรคอลลอยด์เป็นสารประกอบประเภทโพลิแซ็กคาไรด์ เกิดจากพอลิเมอร์โมเลกุลเดี่ยวมาต่อกัน ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่และมีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) เมื่อนำไปละลายหรือทำให้กระจายตัวในน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดสูงและเกิดเจล ไฮโดรคอลลอยด์นิยมใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดและเพิ่มความคงตัวในอาหารต่าง ๆ (นิธิยา รัตนปณณท์, 2545)

ไฮโดรคอลลอยด์สามารถใช้เป็นสารเติมแต่งในสูตรขนมปัง จุดประสงค์เพื่อใช้ปรับปรุงคุณภาพของขนมปัง โดยมีการศึกษาการใช้ไฮโดรคอลลอยด์ เช่น โซเดียมอัลจิเนต แชนแทนกัม แคปปาคาราจีแนน คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose; CMC) และไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose; HPMC) ในการปรับปรุงคุณภาพของขนมปัง

ไฮโดรคอลลอยด์ สกัดได้จากพืช สาหร่าย และเชื้อจุลินทรีย์ ใช้เป็นสารให้ความคงตัว ให้ความชื้นหนืด ทำให้เกิดฟิล์ม (Film-forming) ในอุตสาหกรรมอาหาร (Sharma, 1981) สมบัติของไฮโดรคอลลอยด์ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแสดงใน ตาราง 7

ในการทำผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน จะพบว่าโดที่ได้จากการนวดแป้งกับน้ำ จะไม่มีความยืดหยุ่น ในการระหว่างการหมักโดโครงสร้างของก้อนโดไม่สามารถเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ขนมปังที่ผลิตได้มีคุณภาพด้อยกว่าขนมปังที่ทำจากแป้งสาลี เนื้อขนมปังจะแน่น แข็ง และแข็ง นอกจากนั้น ขนมปังหลังอบจะมีปริมาตรจำเพาะ (Specific volume) ต่ำกว่าและมีสีที่ดกกว่าขนมปังที่ใช้แป้งสาลีเป็นองค์ประกอบหลัก (Gujral, et al., 2004; Gallagher, et al., 2003) ไฮโดรคอลลอยด์สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของขนมปังที่ปราศจากกลูเตนได้ ไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมใช้ ได้แก่ คาราจีแนน แชนแทนกัม โคลด์สตีปิ้งกัม กัวกัม และอนุพันธ์ของเซลลูโลส ซึ่งได้แก่ Methylcellulose (MC), CMC และ HPMC เป็นต้น

Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) เป็นพอลิเมอร์กิ่งสังเคราะห์จำพวกโพลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) อยู่ในกลุ่มอนุพันธ์ของเซลลูโลส (Cellulose Derivatives) นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวละเอียดคล้ายแป้ง เมื่อใส่ลงในน้ำ จะเกิดการพองตัวได้สารละลายที่ใสหรืออาจมีสีขุ่นเล็กน้อย

HPMC ที่ความเข้มข้นต่ำในช่วงร้อยละ 1-10 จะมีสมบัติไวต่ออุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิต่ำจะมีสถานะเป็นสารละลาย และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเปลี่ยนสถานะจากสารละลายเป็นเจล กลไกการเปลี่ยนจากสารละลายไปเป็นเจลเกิดจากการทำปฏิกิริยากันของส่วนที่ไม่ชอบน้ำในโมเลกุล (บริเวณหมู่แทนที่ที่เป็น Methoxy) โดยที่อุณหภูมิต่ำจะมีการละลายที่ดีจึงไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างสายพอลิเมอร์ แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โมเลกุลของ

พอลิเมอร์จะเริ่มสูญเสียโมเลกุลน้ำออกไป ทำให้เกิดปฏิกิริยากันระหว่างบริเวณที่ไม่ชอบน้ำเข้ามาเกาะรวมตัวกันเป็นโครงร่างตาข่าย ทำให้มีความหนืดสูงขึ้น (Ruel-Gariepy & Leroux, 2004)

Lazaridou, et al. (2007) ได้ศึกษาผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณสมบัติด้านความหนืดและคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและสตาร์ชข้าวโพด ไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ เพคติน คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส อะกาโรส คาราจีแนน และเบต้ากลูแคน โดยเติมลงไปในส่วนร้อยละ 1 และ 2 (w/w) ของน้ำหนักแป้งข้าวเจ้า จากการทดลองพบว่าไฮโดรคอลลอยด์ทำให้ได้มีความยืดหยุ่น ทนต่อการเสียรูปจากแรงกดได้ดี โดยที่ระดับการเติมไฮโดรคอลลอยด์ร้อยละ 2 แทนแทนกันจะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ CMC เพคติน อะกาโรส และเบต้ากลูแคน ตามลำดับ

McCarthy, et al. (2005) ศึกษาการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่มีสูตรพื้นฐานคือ แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันฝรั่งร้อยละ 50 และ 50 ตามลำดับ หางนมผงร้อยละ 10 น้ำมันพืชร้อยละ 6 ยีสต์ร้อยละ 6 น้ำตาลร้อยละ 5 และเกลือร้อยละ 2 (โดยน้ำหนักแป้ง) และศึกษาคุณสมบัติของขนมปังโดยใช้ RSM โดยมีการแปรระดับ HPMC ในช่วงร้อยละ 0.5-2.5 และปริมาณน้ำร้อยละ 70-95 จากการทดลองพบว่าระดับ HPMC และน้ำที่เหมาะสมคือร้อยละ 2.2 และ 79 ตามลำดับ

ตาราง 7 สมบัติของไฮโดรคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์อาหาร

หน้าที่	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
Adhesive	Bakery glaze
Binding agent	Sausages
Calorie control agent	Dietetic foods
Crystallization inhibitor	Ice cream, sugar syrups
Clarifying agent	Beer, wine
Cloud agent	Fruit juice
Coating agent	Confectionery
Emulsifier	Salad dressing
Encapsulating agent	Powdered flavors
Film former	Sausage casing, protective coatings

ตาราง 7 (ต่อ)

หน้าที่	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
Flocculating agent	Wine
Foam stabilizer	Whipped topping, beer
Gelling agent	Pudding, desserts, aspics
Molding	Gum drops, jelly candies
Protective colloid	Flavor emulsifiers
Stabilizer	Beer, mayonnaise
Suspending agent	Chocolate milk
Swelling agent	Processed meats
Thickening	Jams, pie fillings, sauces
Water binding (prevents syneresis)	Cheese, frozen foods
Whipping agent	Topping, icings

ที่มา: Sharma, 1981

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบที่ใช้ทดลอง

1. เมล็ดถั่วเขียวจากชุมชนบ้านมะขามเรียง หมู่ที่ 3 ตำบลมะมั่ง อำเภอชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์ เก็บเกี่ยวช่วงเดือนพฤศจิกายน 2557
2. แป้งข้าวเจ้าชนิดไม่ใส่น้ำ ตราช้างเหยียบพระมง (ห้างหุ้นส่วน จิวฮกเล็ง จำกัด)
3. แป้งสาลีชนิดทำขนมปัง ตรานงษ์ขาว (บริษัท ยูนิเท็ดฟลาวมิลล์ จำกัด (มหาชน))
4. นมผง ตราฟอนเทียรา (บริษัท ฟอนเทียรา โคโอเปอเรทีฟกรุ๊ป จำกัด, นิวซีแลนด์)
5. ยีสต์ ตราแองเจิล (บริษัท แองเจิลยีสต์ จำกัด, สาธารณรัฐประชาชนจีน)
6. น้ำตาล ตรามิตรผล (บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด)
7. เกลือ ตราปรุททิพย์ (บริษัท สหพัฒน์พิบูล จำกัด (มหาชน))
8. น้ำมันถั่วเหลือง ตรารุ่ง (บริษัท น้ำมันพืชไทย จำกัด (มหาชน))
9. ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose; HPMC) (บริษัท บี.แอล.ฮั่ว จำกัด)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องปั่นน้ำผลไม้ (HR2068, Philips, Thailand)
2. เครื่องทำแท่งแบบลูกกลิ้ง (JM-T, John-Millder)
3. เครื่องเอกซทรีเตอร์แบบสกรูคู่ (CTE-D25L32, Chareon Tut, Thailand)
4. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (1375 FX, Shellab, USA)
5. ตู้อบลมร้อน (KPO-700, Kitipoom equipment, Thailand)
6. ตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช
7. เครื่องผสม (KSM150PSOB Artisan, Kitchen aid, USA)
8. อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น ผ้าขาวบาง กระชอน ถาด และกะละมังอะลูมิเนียม

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

1. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจน (E-812 SOX, Buchi, Switzerland)
2. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (B-323, Buchi, Switzerland)

3. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใย (Fibertec system M6, Tecator, Denmark)
4. เครื่องวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (10-650-126, Fisher, United Kingdom)
5. ชุดตรวจวิเคราะห์ปริมาณแป้ง (Total starch kit, Megazyme international Ireland, Ireland)
6. เครื่องปั่นเหวี่ยง (350R, MPW, Poland)
7. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (WNB 29, Memmert, Germany)
8. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (BSA 3202S-CW, Sartorius, Germany)
9. โถดูดความชื้น (Desiccator)
10. เครื่องแก้วและอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น หลอดทดลอง ปีกเกอร์ ขวดปริมาตร ขวดรูปชมพู่ กระบอกตวง moisture can และอื่น ๆ

สารเคมีที่ใช้วิเคราะห์ทางเคมี

1. ค่ะตะลิสต์เจลด้าห์ลแบบเม็ด ($K_2SO_4: CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (9:1)), RCI Labscan, Thailand
2. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4), RCI Labscan, Thailand
3. กรดบอริก (Boric acid, H_3BO_3), RCI Labscan, Thailand
4. ไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl), RCI Labscan, Thailand
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, $NaOH$), RCI Labscan, Thailand
6. ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether), RCI Labscan, Thailand
7. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide, KOH), RCI Labscan, Thailand

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

1. เครื่องวัดสี (EZ 4500S, Hunter Lab, USA)
2. เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (QTS 25, Brookfield, England) โดยใช้หัววัดแบบกด TA 11/1000 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร (Brookfield, USA)
3. เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA) (4500, Perten Instruments, Australia)
4. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (DSC 1 Star System, Mettler Toledo, Finland)

5. เครื่อง Rheometer (Bohlin Gemini 200 HR Nano, Malvern Instruments, United Kingdom) ใช้หัววัดแบบ parallel plates ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร
6. Polarized light microscope (MX4300H, Meiji, Japan)
7. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (FiveEasy Plus, Mettler Toledo, Switzerland)

เครื่องประมวลผลทางสถิติ

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS for windows version 17.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA)
3. โปรแกรมสำเร็จรูป Design expert version DX7 trial (Stat-Ease, Inc.)

ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตแป้งพรีเจลลาติไนซ์จากถั่วเขียว และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน โดยมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

ตอนที่ 1 การเตรียมตัวอย่างแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวพรีเจลลาติไนซ์ และศึกษาองค์ประกอบทางเคมี กายภาพ

1. การเตรียมตัวอย่างแป้งถั่วเขียว

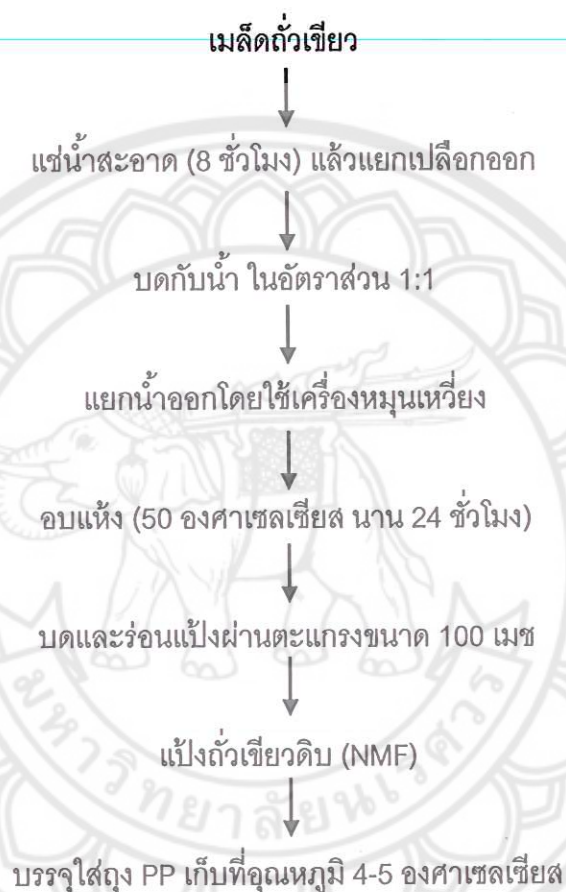
นำถั่วเขียวมาผลิตแป้งถั่วเขียว ด้วยวิธีการไม่เปียก (ภาพ 1) โดยนำถั่วเขียวแช่ในน้ำสะอาดเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อแยกเปลือกออก นำเมล็ดถั่วที่แยกเปลือก แล้วไปบดกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 แล้วแยกน้ำออก โดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยง จากนั้นนำตะกอนแป้งไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าจะมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 14 จากนั้นบดให้ละเอียด แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช เก็บตัวอย่างแป้งถั่วเขียวดิบ (NMF) ในถุง Polypropylene (PP) นำแป้งไปเก็บที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียสก่อนทำการทดลองขั้นต่อไป

2. ดัดแปรแป้งถั่วเขียวโดยวิธีพรีเจลลาติไนซ์และศึกษาองค์ประกอบทางเคมี กายภาพของแป้งพรีเจลลาติไนซ์จากถั่วเขียว นำแป้งถั่วเขียวมาดัดแปรโดยวิธีพรีเจลลาติไนซ์ โดยวิธีของ Soison, et al. (2014)

2.1 ดัดแปรแป้งโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

เตรียมตัวอย่างน้ำแป้งที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 10 นำน้ำแป้งที่ได้มาทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่ โดยปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองเป็น 0.05 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 5 รอบต่อนาที แปรรูปอุณหภูมิที่ผิวหน้าลูกกลิ้ง 3 ระดับคือ 100, 120 และ

140 องศาเซลเซียส (DMF 100, DMF 120 และ DMF 140) จากนั้นนำแผ่นแป้งแป้งพรีเจลาตินไนซ์ จากถั่วเขียวที่ได้จากทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด และร่อน ผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช บรรจุใส่ถุง PP นำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส (ภาพ 2) การเตรียมตัวอย่างแป้งถั่วเขียวดิบ มีวิธีการดังนี้



ภาพ 1 การเตรียมแป้งถั่วเขียวดิบ

การตัดแปรงโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง มีกระบวนการดังนี้

น้ำแป้งถั่วเขียว (ปริมาณของแข็งร้อยละ 10)



ผ่านเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

- ระยะระหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง 0.05 มิลลิเมตร
- ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง 5 รอบต่อนาที
- แปรรูณภูมิที่ผิวหน้าลูกกลิ้ง 3 ระดับ (100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส)



บดและร่อนแป้งผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช



แป้ง DMF100, DMF120 และ DMF140



บรรจุใส่ถุง PP เก็บที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส

ภาพ 2 กระบวนการตัดแปรงโดยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง

2.2 ตัดแปรงด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ แบบสกรูคู่

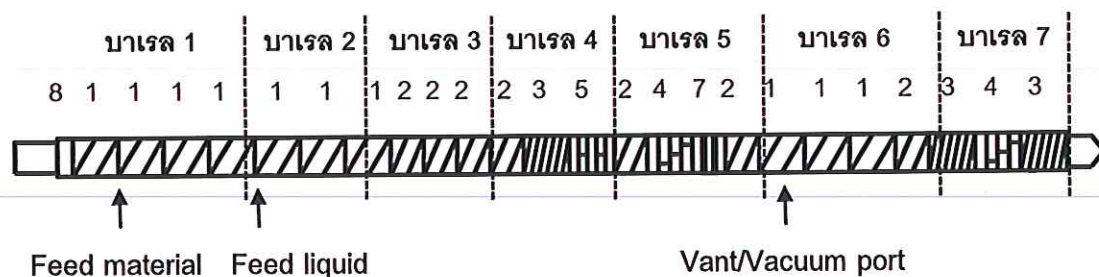
กระบวนการตัดแปรงด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มีการตัดแปรงดังภาพ 3 โดยรูปแบบการจัดเรียงสกรู (ตาราง 8 และภาพ 3) เป็นแบบผลิตภัณฑ์ไม่พองตัว (Non expanded product) ผนังบาริลของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์จะแบ่งการควบคุมอุณหภูมิได้ 7 ช่วง ช่วงที่ 1, 2 และ 3 จะควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 30, 40 และ 80 องศาเซลเซียสตามลำดับ และควบคุมอุณหภูมิของบาริลช่วงที่ 4-7 ไว้ที่อุณหภูมิเดียวกันคือที่ 90 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตาราง 9 ปรับระดับความชื้นของวัตถุดิบภายในบาริล (Feed moisture) 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 46, 70 และ 94 ตามลำดับ ป้อนตัวอย่างแป้งด้วยอัตรา (Feed rate) 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความเร็วรอบสกรู (Screw speed) 200 รอบต่อนาที และใช้หน้าแปลน (Die) ทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าแปลน (Die diameter) 10 มิลลิเมตร

ตาราง 8 รูปแบบการจัดเรียงสกรู (จากทางป้อนวัตถุดิบถึงหน้าแปลน)

Screw element type	จำนวน (ชิ้น)
CB 37.5/37.5 R (1)	7
CB 25/25 R (2)	4
CB 12.5/37.5 R (3)	1
KB 37.5/5/90 deg N (5)	1
CB 25/25 R (2)	1
KB 37.5/5/45deg N (4)	1
BL 15/2 (7)	1
CB 25/25 R (2)	1
CB 37.5/37.5 R (1)	3
CB 25/25 R (2)	1
CB 12.5/37.5 R (3)	1
KB 37.5/5/45deg N (4)	1
CB 12.5/37.5 R (3)	1

ตาราง 9 การตั้งอุณหภูมิของบารเล

บารเล	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
1	30
2	40
3	80
4	90
5	90
6	90
7	90



ภาพ 3 รูปแบบการจัดเรียงสกรู

จากนั้นนำผลิตภัณฑ์แป้ง (เอกซ์ทราคเตด) ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมงหรือจนแป้งแห้ง และมีความชื้นสุดท้ายต่ำกว่าร้อยละ 13 โดยนำพนักงานเปียก นำไป บดด้วยเครื่องบดละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช บรรจุตัวอย่างแป้งฟรีเจลาตินไนซ์ จากถั่วเขียวที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทราคเตอร์ ทั้ง 3 ตัวอย่าง (EMF46, EMF70 และ EMF94) ใส่ถุง PP นำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4-5 องศาเซลเซียส (ภาพ 4)

กระบวนการดัดแปรแป้งโดยด้วยเครื่องเอกซ์ทราคเตอร์ มีวิธีการดังนี้

แป้งถั่วเขียว



ผ่านเครื่องเอกซ์ทราคเตอร์

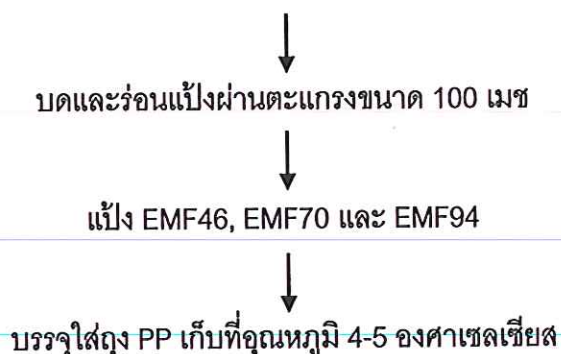
- ความเร็วรอบสกรู 200 รอบต่อนาที
- ความเร็วรอบป้อนตัวอย่างแป้งด้วยอัตรา 10 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าแปลน 10 มิลลิเมตร
- แปรปรับระดับความชื้นของวัตถุดิบภายในบาเรล (Feed moisture)

3 ระดับ คือ ร้อยละ 46, 70 และ 94



อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

ภาพ 4 กระบวนการดัดแปรแป้งโดยด้วยเครื่องเอกซ์ทราคเตอร์



ภาพ 4 (ต่อ)

3. ศึกษาสมบัติทางเคมี กายภาพของแป้งถั่วเขียวดิบ แป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์ และ แป้งข้าวเจ้าทางการค้า

3.1 ตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมี

3.1.1 วิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เยื่อใย เถ้า (AOAC, 2000)

3.1.2 ปริมาณแป้งทั้งหมดโดยวิธี Amyloglucosidase amylase method (Total starch kit, Megazyme international Ireland, Ireland)

3.1.3 ปริมาณอะไมโลสโดยวิธี Amperometric titration with potassium iodate solution ดัดแปลงจาก Takeda, et al. (1987) และ Gibson, et al. (1997)

3.2 ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่

3.2.1 วิเคราะห์สีของตัวอย่างด้วยเครื่อง Hunter Lab (EZ 4500S, Hunter Lab, USA) ใช้โปรแกรม Universal วิเคราะห์ค่า L^* , a^* , b^*

3.2.3 ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index; WAI and Water Solubility Index; WSI) ตามวิธีของ Anderson, et al. (1969)

3.2.4 กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and Solubility) ตามวิธีการของ Schoch (1964)

3.2.5 คุณสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC (Model DSC 1. Star System, Mettler Toledo, Switzerland) ตามวิธีของ Li, et al. (2011)

3.2.6 คุณสมบัติด้านความหนืด โดยใช้เครื่อง RVA (Model 4500, Perten Instruments Australia Pty Ltd. s., Australia) ตามวิธีการของ Newport Scientific Method 1 (1997)

3.2.7 การเสียสภาพของโปรตีน (Protein denaturation) โดยวิธี Nitrogen Solubility Index (NSI) ตามวิธีของ Shaheen, et al. (2012)

3.2.8 ความหนืดของน้ำแป้งพรีเจลาตินไนซ์จากถั่วเขียว ดัดแปลงวิธีจาก Kim, et al. (2012) ด้วยเครื่อง Rheometer (Bohlin Gemini 200 HR Nano, Malvern Instruments, United Kingdom)

3.2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโปรตีนของเม็ดแป้ง ด้วยเครื่อง Polarized light microscope (MX4300H, Meiji, Japan)

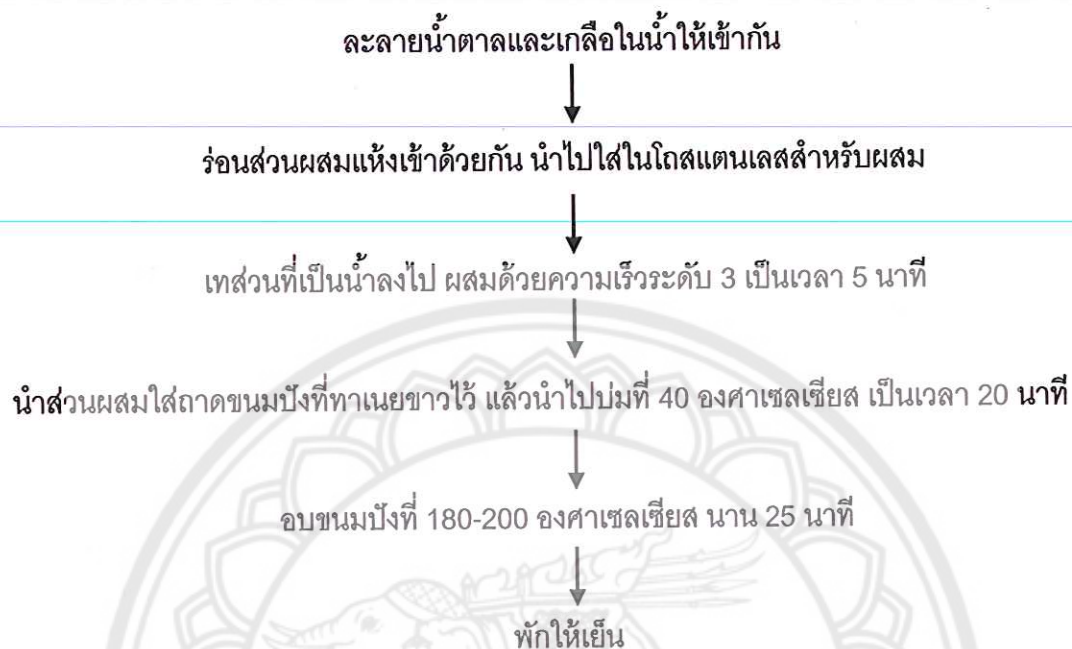
ตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณแป้งพรีเจลาตินไนซ์จากถั่วเขียวที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติของโดและคุณภาพของขนมปังเพื่อใช้ผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐาน

1. ศึกษาปริมาณแป้งพรีเจลาตินไนซ์จากถั่วเขียวและทำการคัดเลือกระดับการแทนที่ที่เหมาะสม จากการแทนที่แป้งพรีเจลาตินไนซ์ทดแทนแป้งข้าวเจ้าในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 จากสูตรขนมปัง ดังตาราง 10 โดยขั้นตอนการผลิตดังภาพ 5 คัดเลือกสูตรมาตรฐานจากคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และคุณสมบัติของโด ผลิตขนมปังจากสูตรมาตรฐาน และมีขนมปังที่ผลิตจากแป้งสาลีและแป้งข้าวเจ้าเป็นตัวอย่างควบคุม

ตาราง 10 ส่วนผสมของขนมปังปราศจากกลูเตน

ส่วนผสม	ร้อยละ (ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด)
แป้งข้าวเจ้า	100
นมผง	10
ยีสต์แห้ง	3
น้ำตาล	5
เกลือ	1
น้ำมันพืช	2
น้ำ	90

โดยขั้นตอนการผลิตขนมปัง มีดังนี้



ภาพ 5 ขั้นตอนการผลิตขนมปัง

2. ศึกษาคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตน โดยวิเคราะห์

2.1 น้ำหนักขนมปัง

2.2 ปริมาตรขนมปังโดยใช้การแทนที่ด้วยเมล็ดงา (มาตรฐานอุตสาหกรรม, 2524)

2.3 วิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเนื้อขนมปัง ดัดแปลงวิธี จาก Hera, et al. (2013)

วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (QTS 25, Brookfield, England) ใช้หัววัดแบบกด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการวัดแบบ Texture Profile Analysis (TPA)

2.4 วิเคราะห์สีของเนื้อขนมปังและเปลือกนอก ด้วยเครื่อง Hunter Lab (EZ 4500S, Hunter Lab, USA) ใช้โปรแกรม Universal วิเคราะห์ค่า L^* , a^* , b^*

2.5 ศึกษาคุณสมบัติด้านรีโอโลยีของโด (Dough rheology) ดัดแปลงวิธีจาก Sciarini, et al. (2012) ด้วยเครื่อง Rheometer (Bohlin Gemini 200 HR Nano, Malvern Instruments, United Kingdom) หา Viscoelastic linear range เพื่อหาช่วง Viscoelastic linear range โดยกำหนด Strain sweep จาก 0.1-100%, Constant frequency 1 Hz และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ทำ Frequency sweeps test วิเคราะห์โดยใช้ Strain ช่วง Viscoelastic linear range (ที่ได้จากข้างต้น) โดยกำหนดระยะห่างระหว่างหัววัด 2000 ไมโครเมตร ช่วงความถี่ 0.1-10 เฮิร์ตซ์ และความเครียด (Strain) 0.05%

ตอนที่ 3 ศึกษาปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมปังปราศจากกลูเตน

ศึกษาผลของปริมาณน้ำและ HPMC ที่ใช้เติมในสูตรขนมปังปราศจากกลูเตนมาตรฐาน ที่คัดเลือกมาจากการทดลองตอนที่ 2 (ที่คัดเลือกจากแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และแป้งแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องเอ็กซ์ทรูดอร์อย่างละ 1 ตัวอย่าง ที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนมากที่สุด) โดยจะใช้ Response Surface Methodology (RSM) วางแผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) ตัวแปรอิสระจะถูกเข้ารหัสให้อยู่ในช่วงระดับสูง (1) และระดับต่ำ (-1) โดยที่แปรปริมาณน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 90-110 และเติม HPMC ในช่วงร้อยละ 0.5-1.5 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด ดังนั้นตัวแปรที่ถูกเข้ารหัส โดยกำหนดให้จำนวนครั้งของจุดศูนย์กลางการทดลองเท่ากับ 5 จะได้ 13 ชุดการทดลอง ดังตาราง 11 ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ใน 1 ตัวอย่างการทดลอง แล้วนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ผล

ทำการศึกษาคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนโดยวิเคราะห์

1. น้ำหนักขนมปัง
2. ปริมาตรขนมปังโดยใช้การแทนที่ด้วยเมล็ดงา (มาตรฐานอุตสาหกรรม, 2524)
3. วิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเนื้อขนมปัง ดัดแปลงวิธี จาก Hera, et al. (2013) วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (QTS 25, Brookfield, England) ใช้หัววัดแบบกด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการวัดแบบ Texture Profile Analysis (TPA)
4. วิเคราะห์สีของเนื้อขนมปังและเปลือกนอก ด้วยเครื่อง Hunter Lab (EZ 4500S, Hunter Lab, USA) ใช้โปรแกรม Universal วิเคราะห์ค่า L^* , a^* , b^*

ตาราง 11 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

สภาวะ	Coded Levels ^a	
	น้ำ	HPMC
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1
5	-1.414	0
6	+1.414	0
7	0	-1.414
8	0	+1.414
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

หมายเหตุ: ^a ระดับตัวแปร (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)

น้ำ : -1.414 = 85.86 , -1 = 90, 0 = 100.00, +1 = 110.00, +1.414 = 114.14

HPMC: -1.414 = 0.29, -1 = 0.50, 0 = 1.00, +1 = 1.50, +1.414 = 1.71

ตอนที่ 4 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษาขนมปังปราศจาก
กลูเตน

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของขนมปังระหว่างการเก็บเป็นเวลา 3 วัน (วันที่ 0, 1 และ 3) โดยทำการเก็บรักษา ขนมปังในถุงพลาสติกชนิด PP ที่ปิดสนิท เก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน เปรียบเทียบกับขนมปังจากแป้งสาลี ขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าและขนมปังปราศจากกลูเตนผลิตจากสูตรมาตรฐานที่ไม่มีการเติม HPMC โดยตรวจสอบ

1. ความชื้นของขนมปัง (AOAC, 2000)
2. คุณสมบัติทางความร้อน เพื่อศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันระหว่างการเก็บรักษา โดยใช้เครื่อง DSC (Model DSC 1. Star System, Mettler Toledo, Switzerland) ดัดแปลงวิธีของ Li, et al. (2011) และ León, et al. (2006)
3. วิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเนื้อขนมปัง ดัดแปลงวิธี จาก Hera, et al. (2013) วิเคราะห์ โดยการใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (QTS 25, Brookfield, England) ใช้หัววัดแบบกด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการวัดแบบ Texture Profile Analysis (TPA)
4. ตรวจสอบคุณสมบัติทางจุลินทรีย์ ได้แก่
 - 4.1 จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ตามวิธีของ Bacteriological analytical manual Online, 2001. Chapter 3, Aerobic plate count. USFDA.
 - 4.2 จำนวนยีสต์และรา ตามวิธีของ Bacteriological Analytical Manual Online, 2001. Chapter 18, Yeasts, Molds and Mycotoxins. USFDA.

ตอนที่ 5 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ศึกษาปริมาณแป้งพรีเจลาติไนซ์จากถั่วเขียว ที่เหมาะสมในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐาน ประเมินผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 17.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) วางแผนแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (CRD) ทดสอบความแตกต่างระหว่างตัวอย่างด้วยวิธี Duncan's Multiple Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ศึกษาผลของปริมาณน้ำและ HPMC ใช้เติมในสูตรขนมปังปราศจากกลูเตนมาตรฐาน โดยใช้ RSM วางแผนการทดลองแบบ CCD โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Design expert version DX7 trial (Stat-Ease, Inc.)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการศึกษาการผลิตแป้งพรีเจลาตินซ์จากถั่วเขียวโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) และเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (Extruder) ต่อสมบัติของแป้งที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน โดยศึกษาระดับแป้งพรีเจลาตินซ์จากถั่วเขียว ปริมาณน้ำ และปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมต่อการผลิต พร้อมทั้งศึกษาคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนในระหว่างการเก็บรักษา

ตอนที่ 1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี กายภาพของแป้งถั่วเขียวดิบ แป้งข้าวเจ้าทางการค้า และแป้งถั่วเขียวพรีเจลาตินซ์

เมล็ดถั่วเขียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเมล็ดถั่วเขียวจากชุมชนบ้านมะขามเรียง หมู่ที่ 3 ตำบลมะมั่ง อำเภอชุมแสง จังหวัดนครสวรรค์ ซึ่งเก็บเกี่ยวช่วงเดือนพฤศจิกายน 2557 ตัวอย่างเมล็ดถั่วเขียวจะถูกเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาเตรียมเป็นแป้งถั่วเขียวโดยใช้วิธีการโม่เปียก แป้งถั่วเขียวมีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 32.44 และปริมาณแป้งทั้งหมดร้อยละ 78.09 แป้งข้าวเจ้ามีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 28.48 และปริมาณแป้งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 78.67

ตาราง 12 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้า แป้งถั่วเขียวดิบ และแป้งถั่วเขียวพรีเจลาตินซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ จากการศึกษาพบว่าแป้งถั่วเขียวดิบมีความชื้นร้อยละ 5.41 โปรตีนร้อยละ 2.60 ไขมัน เยื่อใย และเถ้าร้อยละ 0.35, 0.96 และ 0.86 (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ แป้งข้าวเจ้าทางการค้ามีความชื้นร้อยละ 9.78 โปรตีนร้อยละ 4.34 ไขมัน เยื่อใย และเถ้าร้อยละ 0.10, 0.14 และ 0.78 ตามลำดับ แป้งถั่วเขียวพรีเจลาตินซ์จากการดัดแปรีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน อยู่ระหว่างร้อยละ 4.58-6.4, 2.16-2.85 และ 0.29-0.32 (โดยน้ำหนักแห้ง) ตามลำดับ

ตาราง 12 องค์ประกอบทางเคมีของ แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์ จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)

ตัวอย่าง	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน ^{ns}
NMF	5.41±0.12 ^c	2.60±0.02 ^d	0.35±0.06
NRF	9.78±0.18 ^a	4.35±0.16 ^a	0.10±0.03
DMF100	6.14±0.05 ^b	2.70±0.07 ^{cd}	0.30±0.03
DMF120	4.87±0.11 ^{de}	2.71±0.04 ^{bcd}	0.29±0.03
DMF140	4.58±0.13 ^e	2.85±0.04 ^b	0.32±0.12
EMF46	5.05±0.21 ^d	2.61±0.19 ^d	0.31±0.05
EMF70	6.01±0.33 ^b	2.43±0.05 ^e	0.30±0.06
EMF94	5.44±0.31 ^c	2.83±0.08 ^{bc}	0.32±0.01

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) และ ^{ns} หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

NMF คือ แป้งถั่วเขียวดิบ

NRF คือ แป้งข้าวเจ้า

DMF100 คือ แป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งด้วยอุณหภูมิ ผิวหน้าลูกกลิ้ง 100 องศาเซลเซียส

DMF120 คือ แป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ด้วยอุณหภูมิ ผิวหน้าลูกกลิ้ง 120 องศาเซลเซียส

DMF140 คือ แป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง ด้วยอุณหภูมิ ผิวหน้าลูกกลิ้ง 140 องศาเซลเซียส

EMF46 คือ แป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ที่ปรับระดับความชื้น ของวัตถุดิบภายในบาเรลร้อยละ 46

EMF70 คือ แป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ที่ปรับระดับความชื้น ของวัตถุดิบภายในบาเรล ร้อยละ 70

และ EMF94 คือ แป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ที่ปรับระดับ ความชื้นของวัตถุดิบภายในบาเรลของแป้งร้อยละ 94

ตาราง 13 ดัชนีการละลายน้ำ ดัชนีการดูดซับน้ำ กำลังการพองตัวและการละลายของ แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

ตัวอย่าง	ดัชนีการละลายน้ำ	ดัชนีการดูดซับน้ำ	กำลังการพองตัว (ร้อยละ)	การละลาย (ร้อยละ)
NMF	3.04±0.07 ^d	2.24±0.01 ^e	11.91±0.19 ^e	9.51±0.49 ^e
DMF100	9.01±0.47 ^b	8.52±0.59 ^c	15.43±0.07 ^c	22.22±0.18 ^c
DMF120	6.60±0.98 ^c	10.10±1.07 ^b	18.82±0.29 ^b	23.05±0.34 ^c
DMF140	1.11±0.31 ^e	12.35±0.17 ^a	21.13±0.30 ^a	24.68±1.86 ^b
EMF46	11.05±0.05 ^a	3.93±0.03 ^d	15.62±0.09 ^c	31.75±0.25 ^a
EMF70	6.08±0.19 ^c	3.31±0.04 ^d	12.69±0.06 ^d	18.51±0.06 ^d
EMF94	6.25±0.05 ^c	3.26±0.02 ^d	12.13±0.05 ^e	17.35±0.13 ^d

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ดัชนีการละลายน้ำ ดัชนีการดูดซับน้ำ กำลังการพองตัว และการละลายของแป้งข้าวเจ้า แป้งถั่วเขียวดิบ และแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากการดัดแปรด้วยวิธีต่าง ๆ แสดงดังตาราง 13 ดัชนีการละลายน้ำ เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีที่มีผลต่อการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองพบว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์มีค่าดัชนีการละลายน้ำสูงกว่าแป้งถั่วเขียวดิบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ทั้งนี้อาจเนื่องจากระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ลดลงและโครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (Majzoobi, et al., 2010)

Ding, et al. (2005) กล่าวว่าอุณหภูมิและความชื้นที่ใช้ในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน มีผลต่อการเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ช โดยระดับการเกิดเจลาติไนซ์ของสตาร์ชจะลดลงเมื่อ feed moisture content สูงขึ้น และจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อน (Feed rate) มากขึ้น ส่วนสตาร์ชที่ละลายได้ (Soluble starch) จะมีปริมาณมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สูงขึ้น และ Feed moisture content ลดลง

ดัชนีการดูดซับน้ำแสดงถึงสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อน้ำ โดยสัมพันธ์กับการเกิดเจลลิตไนซ์ของแป้ง เมื่อพันธะถูกทำลายเม็ดแป้งจะเกิดการแตกออกส่งผลให้น้ำสามารถเข้าไปจับกับกลุ่มไฮดรอกซิลได้ง่ายขึ้น เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ดูดซับน้ำได้สูง แป้งฟรีเจลลิตไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง จะมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำสูงกว่าแป้งฟรีเจลลิตไนซ์จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ และแป้งถั่วเขียวดิบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเม็ดแป้งเกิดความเสียหายมากกว่าและการเกิดเจลลิตไนซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของกระบวนการดัดแปรแป้งเพิ่มสูงขึ้น (Mercier and Feillet, 1975)

กำลังการพองตัวและการละลาย ของแป้งฟรีเจลลิตไนซ์มีค่าสูงกว่าแป้งถั่วเขียวดิบ ซึ่งการพองตัวของแป้งเกิดจากการพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง ถูกทำลายด้วยอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตไนซ์ ทำให้โมเลกุลของน้ำเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ เป็นผลให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ดังนั้นอุณหภูมิของกระบวนการผลิตแป้งฟรีเจลลิตไนซ์จึงมีอิทธิพลต่อกำลังการพองตัวของแป้งถั่วเขียว จากการทดลองพบว่าแป้งฟรีเจลลิตไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง มีการเกิดเจลลิตไนซ์ของแป้งเพิ่มขึ้น ตามอุณหภูมิที่ผิวหน้าลูกกลิ้งที่ใช้ในกระบวนการดัดแปร ส่งผลให้มีค่ากำลังการพองตัวสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในส่วนของแป้งฟรีเจลลิตไนซ์จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ พบว่าเมื่อความชื้นเพิ่มมากขึ้น กำลังการพองตัวจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มระดับความชื้นของวัตถุดิบภายในบารเรล จะส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดอร์มีอุณหภูมิลดต่ำลง แป้ง EMF94 มีความชื้นของตัวอย่างที่สูงกว่า เม็ดแป้งจะถูกทำลายในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันน้อยกว่า ทำให้เม็ดแป้งมีการพองตัวต่ำกว่า

Jambrak, et al. (2010) กล่าวว่าภายหลังการทำอัลตราซาวด์สตราซ้าวโพด อุณหภูมิของสตราซ้าวโพดสูงขึ้นตามระดับพลังงานเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจึงสามารถไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ทำให้ค่าการพองตัวเพิ่มสูงขึ้น

เม็ดแป้งที่เสียหายจากกระบวนการดัดแปรทำให้การละลายของเม็ดแป้งสูงขึ้น จากการทดลองพบว่าแป้งฟรีเจลลิตไนซ์จากการผลิตทั้งสองวิธี มีค่าการละลายสูงกว่าแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่าการละลายของแป้งฟรีเจลลิตไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวหน้าลูกกลิ้งสูงขึ้น ส่วนแป้งฟรีเจลลิตไนซ์จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ จะมีค่าการละลายลดลงเมื่อระดับความชื้นของวัตถุดิบภายในบารเรลสูงขึ้น ผลของค่าการละลายน้ำจะมีความสัมพันธ์กับกำลังการพองตัวที่ได้จากการทดลอง

ตาราง 14 ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทราเดอร์

ตัวอย่าง	L^*	a^*	b^*
NMF	86.84±0.05 ^a	-1.03±0.05 ^{bc}	7.52±0.03 ^g
DMF100	82.66±0.04 ^e	-1.04±0.03 ^{bc}	9.64±0.08 ^b
DMF120	83.69±0.06 ^c	-1.14±0.05 ^d	9.43±0.08 ^c
DMF140	84.59±0.01 ^b	-1.02±0.03 ^b	8.50±0.05 ^e
EMF46	82.82±0.02 ^d	-1.09±0.02 ^{cd}	9.93±0.04 ^a
EMF70	82.51±0.02 ^f	-0.99±0.03 ^b	9.25±0.02 ^d
EMF94	81.58±0.09 ^g	-0.32±0.01 ^a	8.03±0.05 ^f

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

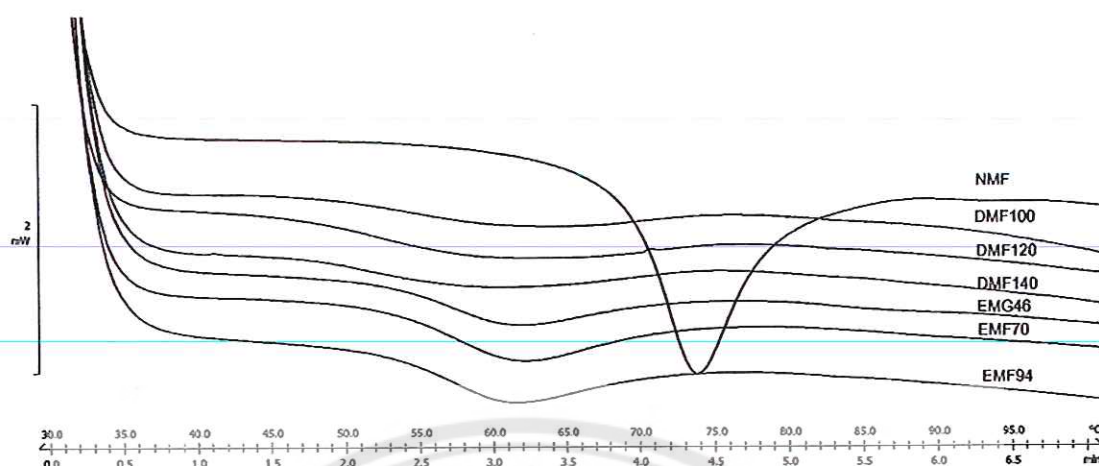
จากตาราง 14 แสดงค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของแป้งถั่วเขียวดิบ แป้งข้าวเจ้า และแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ จากผลการทดลองพบว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์จากการผลิตทั้งสองวิธีมีค่าความสว่างต่ำกว่าแป้งถั่วเขียวดิบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แป้งพรีเจลาติไนซ์ที่ผลิตจากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งที่ระดับอุณหภูมิทั้งสามระดับ มีค่าความสว่าง (L^*) สูงกว่าแป้ง EMF46, EMF70 และ EMF94

ค่า b^* ที่เป็นบวกแสดงถึงความเป็นสีเหลือง แป้งพรีเจลาติไนซ์จากการผลิตทั้งสองวิธีจะมีค่า b^* สูงกว่าแป้งถั่วเขียวดิบ และแป้งพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องเอกซ์ทราเดอร์จะมีค่าความเป็นสีเหลืองลดลงเมื่อระดับความชื้นของวัตถุดิบภายในบารเรลเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการดัดแปรทั้งสองวิธีมีผลทำให้ความสว่างของแป้งลดลงและค่าความเป็นสีเหลืองสูงขึ้น (ภาพ 6) ทั้งนี้อาจเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) หรือคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) (Cheftel, 1986) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) กับกรดอะมิโน โปรตีน หรือสารประกอบไนโตรเจนอื่น ๆ โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Menegassi, et al., 2011; Gutkoski and El-Dash, 1999)



ภาพ 6 แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

ภาพ 7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความร้อนของแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ด้วยเครื่อง DSC โดยผลที่ได้จะแสดงถึงอุณหภูมิในการเริ่มการเกิดเจลาติไนเซชัน (Onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (Peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลาติไนเซชัน (Conclusion temperature, T_c) และค่าพลังงานหรือเอนทาลปี ในการเกิดเจลาติไนเซชัน (Enthalpy, ΔH)



ภาพ 7 เทอร์โมแกรมของแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลลิตไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

จากการทดลอง พบว่า อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด (T_p) ของแป้งถั่วเขียวดิบ (73.24 องศาเซลเซียส) มีค่าสูงกว่าแป้งถั่วเขียวพรีเจลลิตไนซ์จากการผลิตทั้งสองวิธี (59.44-61.28 องศาเซลเซียส) การลดลงของอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตไนซ์ชั้นของสตาร์ช อาจเนื่องมาจากแป้งเกิดเจลลิตไนซ์จากสภาวะในการดัดแปรแป้งที่ประกอบด้วยอุณหภูมิสูงและแรงเฉือน ส่งผลให้ไปทำลายโครงสร้างของบริเวณส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนอสัณฐาน (Amorphous) ภายในเม็ดแป้ง

แป้งถั่วเขียวดิบมีพลังงานในการเกิดเจลลิตไนซ์ชั้นเท่ากับ 3.09 Jg^{-1} ส่วนแป้งพรีเจลลิตไนซ์ทุกตัวอย่าง จะมีค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตไนซ์ชั้นต่ำกว่าแป้งถั่วเขียวดิบโดยมีค่าอยู่ระหว่าง $0.78\text{-}1.17 \text{ Jg}^{-1}$ การดัดแปรแป้งด้วยวิธีพรีเจลลิตไนซ์ในสภาวะต่าง ๆ มีผลให้ค่าพลังงานในการเกิดเจลลิตไนซ์ชั้นลดลงเมื่อเทียบกับแป้งถั่วเขียวที่ไม่ผ่านการดัดแปร แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลภายในเม็ดแป้งถูกทำลาย โครงสร้างบริเวณส่วนที่เป็นผลึกมีความเป็นระเบียบลดลง Chiu and Solarek, (2009) รายงานว่ากระบวนการดัดแปรแป้งโดยใช้กระบวนการเอกซ์ทราชัน ส่งผลให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตไนซ์ชั้นต่ำลงเนื่องจากในระหว่างการดัดแปรมีการใช้อุณหภูมิสูงและแรงเฉือน ทำให้ระดับความเป็นผลึกของแป้งลดลงและปริมาณเม็ดแป้งที่เสียหายมากขึ้น

ตาราง 15 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางความหนืดของแป้งถั่วเขียวดิบ และแป้งถั่วเขียวพรีเจลลิตไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyzer, RVA)

ตัวอย่าง	Peak viscosity (cP)	Breakdown (cP)	Final viscosity (cP)	Setback (cP)	Pasting temperature (°C)
NMF	2,504.67±26.50 ^a	597.67±11.02 ^a	3,119.67±43.78 ^a	1,212.67±30.35 ^a	75.45±0.4 ^a
DMF100	1,527.00±55.03 ^c	247.00±56.35 ^b	2,286.33±184.18 ^d	1,006.33±105.97 ^b	53.58±5.82 ^d
DMF120	1,432.00±65.64 ^d	94.00±43.31 ^c	2,609.00±63.15 ^b	1,271.00±26.06 ^a	53.00±4.81 ^d
DMF140	1,751.00±34.60 ^b	279.00±26.00 ^b	2,445.33±69.53 ^c	973.33±24.85 ^b	50.05±0.00 ^d
EMF46	778.33±16.80 ^g	247.67±10.12 ^b	861.33±15.95 ^g	330.67±12.01 ^d	62.45±0.30 ^c
EMF70	1,239.33±4.04 ^e	127.00±12.17 ^c	1,562.33±21.22 ^e	450.00±14.00 ^c	66.78±0.03 ^{bc}
EMF94	926.33±14.64 ^f	46.33±5.77 ^d	1,218.00±19.08 ^f	338.00±7.55 ^d	70.00±0.48 ^b

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

ตาราง 15 แสดงผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางความหนืดของแป้งถั่วเขียวดิบ และแป้งถั่วเขียวพรีเจลลิตไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว RVA ซึ่งเป็นการทดสอบความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา อุณหภูมิและความเร็วรอบของการกวนหรือผสมน้ำแป้ง ศึกษาค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดความหนืด (Pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุด และความหนืดต่ำสุด (Peak down) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และค่าการคืนตัว (Setback viscosity)

อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดความหนืด (Pasting temperature) ของแป้งถั่วเขียวดิบมีค่าอยู่ที่ 75.45 องศาเซลเซียส และเมื่อดัดแปรแป้งด้วยสภาวะต่าง ๆ จะทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดความหนืดมีค่าที่ต่ำลง การลดลงของความหนืดเป็นผลมาจากการมีปริมาณเม็ดแป้งที่เสียหายจากกระบวนการดัดแปรเพิ่มมากขึ้นและเกิดจากการเกิดเจลลิตไนซ์ของเม็ดแป้ง

(Hagenimana, et al., 2006) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์มีความสามารถในการเพิ่มความหนืดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลของแป้งถั่วเขียวดิบ

ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) แสดงถึงความสามารถของแป้งในการจับตัวกับน้ำ และแรงที่ต้องใช้ในการกวนหรือผสม ค่า Peak viscosity ของแป้งถั่วเขียวดิบ (2,504.67 cP) มีค่าสูงกว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์ทั้งสองวิธี และแป้งพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะมีค่า Peak viscosity อยู่ระหว่าง 1,432.00-1,751.00 cP ซึ่งมีค่าสูงกว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ที่มีค่าอยู่ในช่วง 778.33-1,239.33 cP กระบวนการผลิตแป้งพรีเจลาติไนซ์ทั้งสองวิธีมีผลให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเสียหาย แป้งสามารถดูดซับน้ำและเพิ่มความหนืดได้ทันที (Glicksman, 1969; Doublier, et al., 1986; Nakorn, Tongdang, and Sirivongpaisal, 2009)

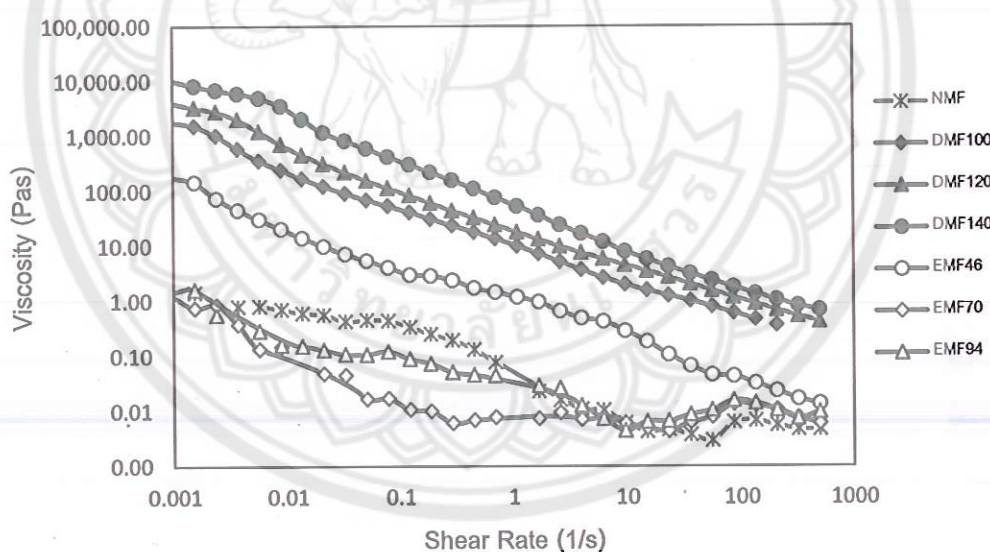
ค่าความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (Break down) แสดงถึงความสามารถในการคงทนต่ออุณหภูมิและแรงเฉือน โดยตัวอย่างที่มีค่า Break down สูงจะมีความสามารถในการคงทนระหว่างการให้ความร้อนและการกวนต่ำ จากการทดลองพบว่าค่า Break down ของแป้งถั่วเขียวดิบ (597.67 cP) มีค่าสูงกว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (94.00-279.00 cP) และมีค่าสูงกว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ที่มีค่าอยู่ในช่วง 46.33-247.67 cP เมื่อเปรียบเทียบแป้งพรีเจลาติไนซ์จากกระบวนการผลิตแป้งทั้งสองวิธี พบว่า แป้ง DMF140 และ แป้ง EMF 30 มีค่า break down สูงกว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์อื่น ๆ ที่ผลิตด้วยวิธีเดียวกัน

ค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) แสดงถึงคุณภาพของแป้งและบ่งชี้ถึงลักษณะของแป้งเมื่อผ่านการให้ความร้อน และทำให้เย็น จากการทดลองพบว่าแป้งถั่วเขียวมีค่า Final viscosity สูงกว่าแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและแป้งพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ โดยมีค่า 3,119.67 cP, 2,286.33-2,609.00 cP และ 861.33-1,562.33 cP ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเจลของแป้งถั่วเขียวดิบแข็งแรงกว่าแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและแป้งพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

ค่าการคืนตัว (Setback viscosity) แสดงถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของแป้งเมื่อเย็นตัวลง โดยค่าการคืนตัวมากหรือการเกิดรีโทรเกรเดชั่นสูงเกิดจากการจัดเรียงตัวกันใหม่ของสายโซ่สตาร์ชด้วยพันธะไฮโดรเจน ในระหว่างการทำให้เย็น เจลแป้งที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแข็ง ค่าการคืนตัวคำนวณจากผลต่างของความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และความหนืดที่จุดสูงสุด (Trough viscosity) แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีพรีเจลาติไนซ์จะมีค่าการคืนตัวที่ต่ำกว่าแป้งถั่วเขียวดิบ และแป้งพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ จะมีค่าการคืนตัวต่ำกว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์

จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ผลิตด้วยวิธีเดียวกัน พบว่าแป้ง DMF140 และแป้ง EMF46 มีค่าการคั่นตัวต่ำกว่าแป้งพรีเจลาติไนซ์วิธีอื่น กระบวนการดัดแปรแป้งด้วยวิธีพรีเจลาติไนซ์ ทำให้เกิดการสูญเสียโครงสร้างภายในเม็ดแป้ง (Granule disruption) เนื่องจากเม็ดแป้งได้รับความร้อนจากเสียดสีและแรงเฉือนในระหว่างการผลิต เป็นผลให้สายโซ่ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินกลับมาสร้างพันธะไฮโดรเจนใหม่ได้ช้ากว่าแป้งดิบ ซึ่งการคั่นตัวของสายอะไมโลเพคตินจะมีความสัมพันธ์กับค่าความแน่นเนื้อของขนมปัง (Purhagen, et al., 2012)

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสมบัติด้านความหนืดของแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งถั่วเขียวดิบ แป้งพรีเจลาติไนซ์มีค่า Pasting temperature, Peak viscosity, Break down, Final viscosity และ Setback viscosity ต่ำกว่าแป้งถั่วเขียวดิบ และสภาวะและเครื่องมือที่ใช้ในการดัดแปรแป้งจะมีผลต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้ง



ภาพ 8 ความสัมพันธ์ของความหนืดและอัตราการเฉือนของของแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากการดัดแปรด้วยวิธีต่างๆ ที่ความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 8

ค่าความหนืดของน้ำแป้งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มแรงเฉือน (Shear rate) แสดงผลของการไหลประเภท Non-newtonian และแสดงลักษณะการไหลประเภท Pseudoplastic หรือ

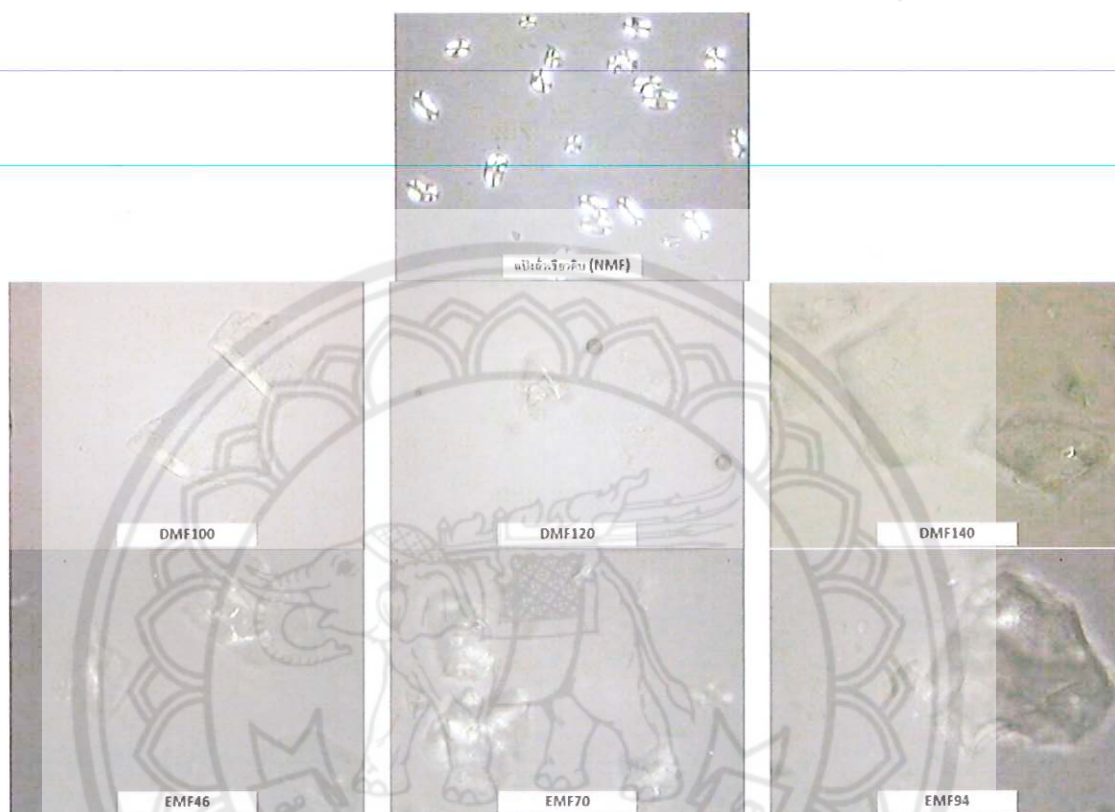
Shear thinning สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rohaya, et al., 2013; Dogan, et al., 2005; Xue and Ngadi, 2006 ที่ศึกษาพฤติกรรมการไหลของแป้ง Batter จากแป้งข้าวเจ้าที่เติมแป้งพรีเจลาติไนซ์ และแป้งอื่น ๆ ในระดับที่ต่างกัน โดยการทดลองพบว่าพฤติกรรมการไหลของแป้งแบทเทอร์ เป็นแบบ Shear thinning

ค่าดัชนีความสามารถในการละลายของไนโตรเจน (Nitrogen Solubility Index: NSI) เป็นค่าที่แสดงถึงระดับการเสียสภาพของโปรตีน ค่า NSI จะลดลงเมื่อวัตถุดิบผ่านแรงดันหรือผ่านกระบวนการที่ให้ความร้อน (วิไล รังสาทอง, 2545) แป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์มีค่าดัชนีความสามารถในการละลายของไนโตรเจนน้อยมาก (ไม่แสดงข้อมูล) ทั้งนี้เนื่องจากแป้งพรีเจลาติไนซ์ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนและแรงเฉือนค่อนข้างมาก ส่งผลให้โปรตีนเสียสภาพในระหว่างกระบวนการดัดแปร จึงมีค่าดัชนีความสามารถในการละลายของไนโตรเจนลดลง

ภาพ 9 แสดงการดัดแปรแป้งถั่วเขียวด้วยวิธีพรีเจลาติไนซ์ ที่ผลิตโดยวิธีการใช้เครื่องทำแท่งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะโปรตีนเจเนสของเม็ดแป้ง ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิด Polarized light microscopy โดยทั่วไปสายของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่อยู่ในโครงสร้างของเม็ดแป้งจะวางตัวกันในแนวรัศมีในแนวที่ขนานกันและจะสร้างพันธะไฮโดรเจนทั้งทางตรงหรือเกิดการเกาะตัวกับน้ำเกิดโครงสร้างที่เรียก Micelles หรือ Crystallites (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ส่วนของ Crystallites เป็นส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ ทำให้สามารถคงรูปอยู่ได้เรียงตัวเป็นไปในแนวตั้งฉากกับผิวของเม็ดสตาร์ช บริเวณนี้จะตอบสนองต่อแสงโพลาไรซ์ ทำให้เกิดเงาดำคาบบนเม็ดสตาร์ชเป็นกากบาท (Birefringence หรือ Polarization cross) โดยเส้นพาดขวางสีดำ (Maltese cross) มีส่วนตัดอยู่ที่รอยนูนของเม็ดสตาร์ช (Hilum) (ลัดดาวัลย์ ไกรพานนท์, 2550)

จากผลการทดลองพบว่า ในแป้งถั่วเขียวดิบจะยังคงรูปร่างและลักษณะโปรตีนเจเนสได้โดยยังพบ Maltese cross ซึ่งแสดงถึงลักษณะโมเลกุลของแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ มีพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลใกล้เคียง ๆ กันเชื่อมกันอยู่ในส่วนของแป้งพรีเจลาติไนซ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตทั้งสองวิธี พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลจะถูกทำลายส่งผลให้พันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนแอลง เม็ดแป้งสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้นและเกิดการพองตัว (ดารารัตน์ นาคลออ และคณะ, 2554) เม็ดแป้งพรีเจลาติไนซ์จากการผลิตทั้งสองวิธีจะมีการเปลี่ยนรูปร่างและสูญเสียลักษณะโปรตีนเจเนสและไม่พบ Maltese cross แสดงถึงการเกิดเจลาติไนซ์ขึ้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งการเกิดเจลาติไนซ์จะทำลายโครงสร้างภายในของสตาร์ช

ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแบบไม่ผันกลับของคุณสมบัติต่างๆ เช่น การพองตัว การหลอมเหลวของผลึก การละลายของสตาร์ช และการสูญเสียลักษณะไบรฟริงเจนส์ (Singh, et al., 2007)



ภาพ 9 ลักษณะไบรฟริงเจนส์จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงโพลาไรซ์ (50X) ของแป้งข้าวเจ้าดิบและแป้งข้าวเจ้าที่เจลาตินไนซ์จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทราเดอร์

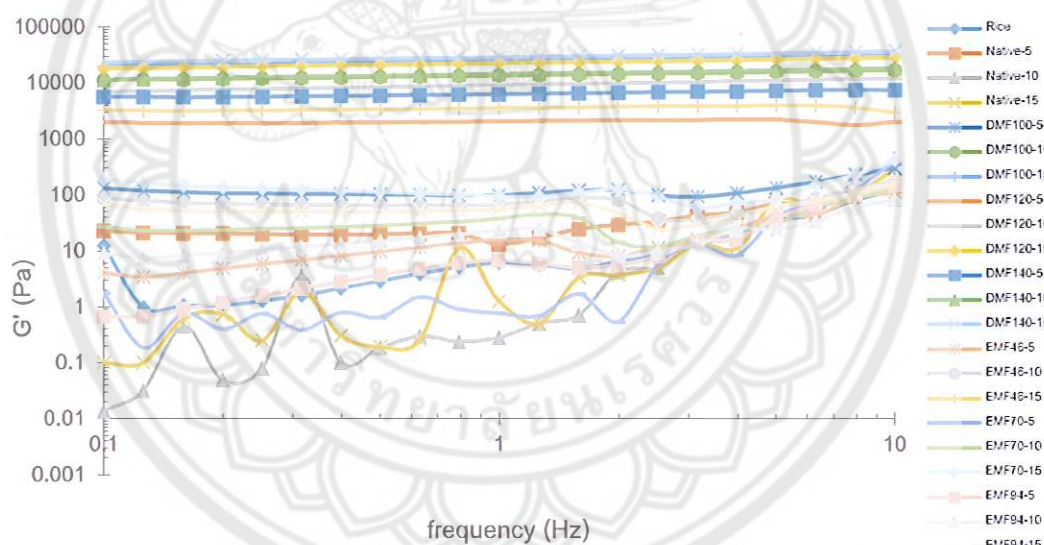
สมบัติไบรฟริงเจนส์มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างส่วนผลึกของเม็ดแป้ง การที่เม็ดแป้งมีลักษณะไบรฟริงเจนส์ที่ชัดเจนสามารถบ่งบอกถึงการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในเม็ดแป้งอย่างมีระเบียบ (French, 1984) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการตัดแปรแป้งด้วยวิธีพรีเจลาตินไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะไบรฟริงเจนส์ของเม็ดแป้ง

จากการวิเคราะห์สมบัติของแป้งข้าวเจ้าพรีเจลาตินไนซ์ที่ผ่านการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ แสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวเจ้าพรีเจลาตินไนซ์มีคุณสมบัติแตกต่างกันตามกระบวนการผลิตและสภาวะที่ใช้ในการตัดแปร ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีผลต่อการวางแผน

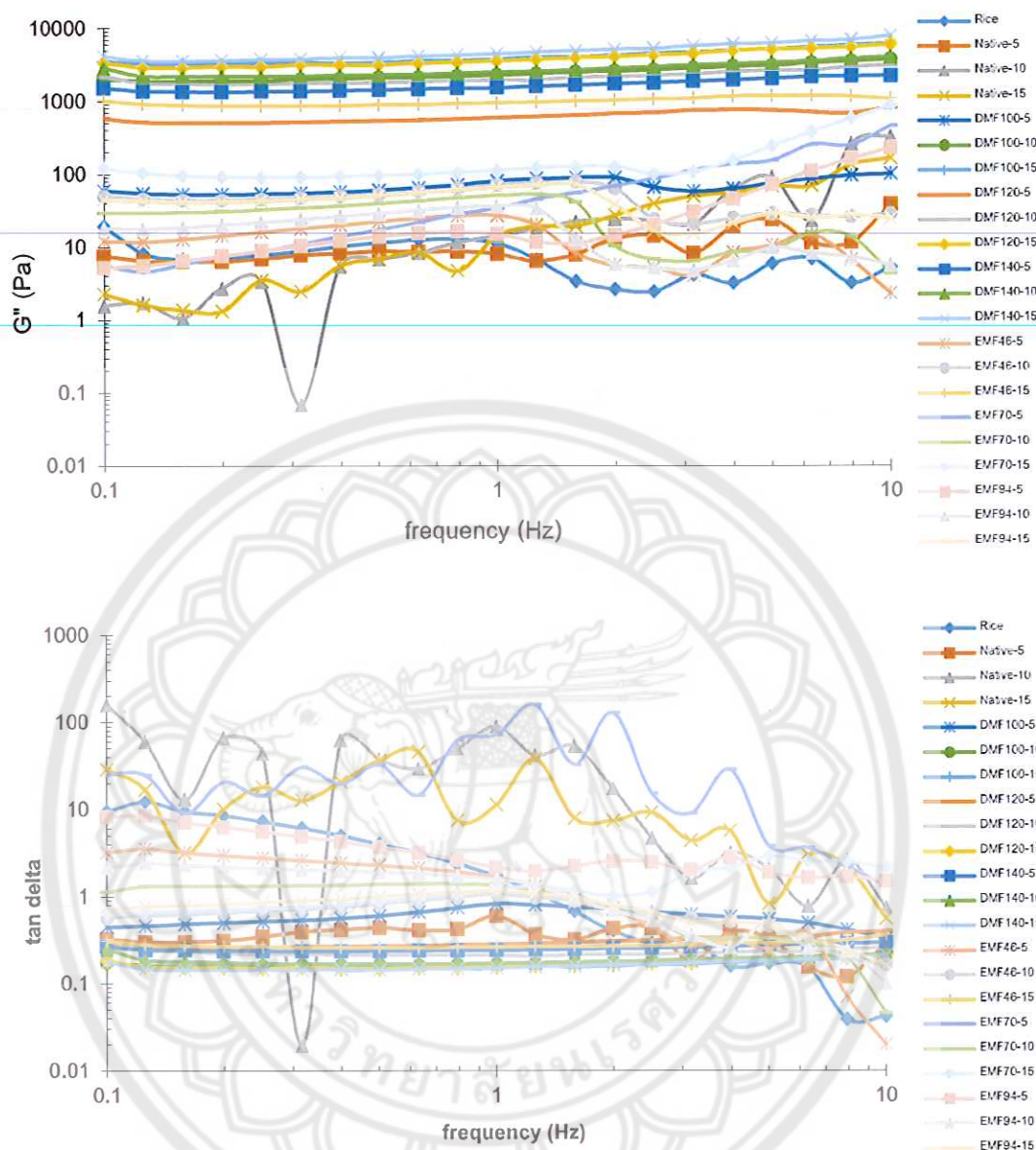
การทดลองขั้นต่อไปที่จะทดลองแปรระดับแป้งพรีเจลลัดไนซ์จากถั่วเขียวเพื่อใช้ผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวเจ้า ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการศึกษาข้างต้นจะเป็นข้อมูลสำคัญเพื่อใช้ในการอธิบายคุณสมบัติของโดและคุณภาพของขนมปัง

ตอนที่ 2 การศึกษาปริมาณแป้งพรีเจลลัดไนซ์จากถั่วเขียวที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติของโดและคุณภาพของขนมปังเพื่อใช้ผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐาน

การทดลองนี้ทำการศึกษาปริมาณแป้งพรีเจลลัดไนซ์จากถั่วเขียวและคัดเลือกระดับการแทนที่ที่เหมาะสม โดยการแทนที่แป้งพรีเจลลัดไนซ์ทดแทนแป้งข้าวเจ้าในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 และมีขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวสาลีและแป้งข้าวเจ้าเป็นตัวอย่างควบคุม โดยจะพิจารณาคุณสมบัติของโดและคุณภาพของขนมปังเพื่อใช้ผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐาน



ภาพ 10 ค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ Loss tangent ($\tan \delta$) ของขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลลัดไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวเจ้า จากการทำ Frequency sweep test



ภาพ 10 (ต่อ)

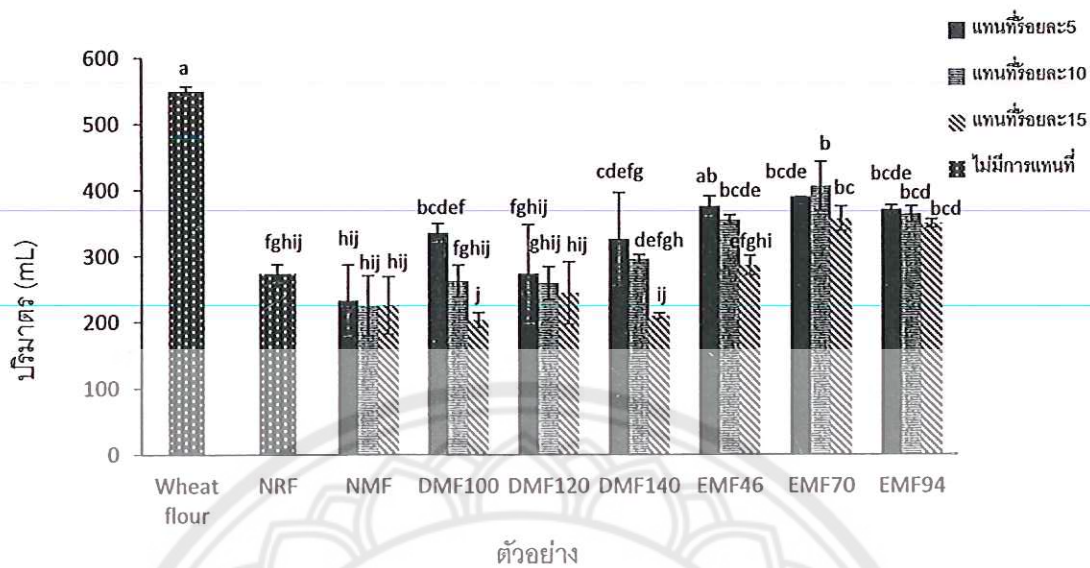
ภาพ 10 แสดงค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ Loss tangent ($\tan \delta$) ของขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทูเดอริ์ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวเจ้า โดยหาค่าเปอร์เซ็นต์ Strain ที่อยู่ในช่วง Linear viscoelastic range ทำการศึกษาในช่วง Strain sweep จาก 0.1-100%, Constant frequency 1 Hz เมื่อได้เปอร์เซ็นต์ Strain แล้วจึงนำค่าดังกล่าวไปใช้ทดสอบ Frequency sweep test การวิเคราะห์แบบสั่นทางพลวัต (Dynamic oscillation) เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองต่อความเค้น (Stress) หรือ

ความเครียด (Strain) ภายใต้การเคลื่อนที่แบบสั่นของวัสดุ Viscoelastic แสดงเป็นค่า Storage modulus (G') คือ พลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุเมื่อได้รับความเค้นหรือความเครียด (ปาริตา ขุนแอ, 2550) วัสดุจะเก็บสะสมพลังงานที่ใช้ในการเสียรูปร่างไว้ภายใน เพื่อใช้ในการคืนสู่รูปเดิม (Storage partition) เมื่อถอนแรงเค้น แสดงลักษณะความเป็นของแข็งที่สามารถยืดหยุ่น (Elastic) และค่า Loss modulus (G'') คือ พลังงานที่ถูกใช้ในการสร้างและสลายพันธะในระหว่างที่เกิดการเสียรูปร่างและจะสูญเสียไปไม่คืนสู่รูปเดิม พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากความหนืด แสดงลักษณะความเป็นของเหลวที่มีความข้นหนืด (Morris, 1995) จากการศึกษาค่า G' และ G'' ของโดขนมบั้งปราศจากกลูเตน พบว่าที่ความถี่ 1 Hz โดขนมบั้งที่ทำจากแป้งข้าวเจ้าจะมีค่า G'' สูงกว่าค่า G' แสดงให้เห็นว่าโดจากแป้งข้าวเจ้ามีลักษณะความเป็นของเหลว (Liquid-like characteristic) มากกว่าความเป็นของแข็ง (Solid-like characteristic) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองที่พบว่าโดที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าจะมีลักษณะที่ค่อนข้างเหลว โดที่ผลิตจากแป้งถั่วเขียวดิบและโดแป้งฟรีเจลาตินส์จากเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ ที่ระดับการแทนที่ทั้ง 3 ระดับ จะแสดงลักษณะใกล้เคียงกับโดของแป้งข้าวเจ้า ส่วนโดที่เติมแป้งฟรีเจลาตินส์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะมีค่า G' ที่สูงกว่าค่า G'' แสดงถึงลักษณะของโดที่มีความยืดหยุ่น และเมื่อระดับการแทนที่แป้งฟรีเจลาตินส์เพิ่มสูงขึ้นจะพบว่า ค่า G' จะเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเติมแป้งฟรีเจลาตินส์จะช่วยให้แป้งดูดซับน้ำได้มากขึ้นและมีผลต่อสมบัติทาง Viscoelastic ของโด สังเกตได้จากที่โดมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น

ค่า Loss tangent ($\tan \delta$) คือสัดส่วนของการแสดงสมบัติเป็นวัสดุไหลหนืดต่อสถานะยืดหยุ่น ($\tan \delta = G''/G'$) (ปาริตา ขุนแอ, 2550) ค่า $\tan \delta$ ของโดจากแป้งฟรีเจลาตินส์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงลักษณะโดที่ค่อนข้างแข็งและมีความยืดหยุ่น ในขณะที่โดของแป้งข้าวเจ้าและโดที่มีการทดแทนแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งฟรีเจลาตินส์จากเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ ทั้ง 3 ระดับ จะมีค่า $\tan \delta$ มากกว่า 1 ซึ่งแสดงถึงโดของขนมบั้งที่มีลักษณะเหลว อย่างไรก็ตามโดของแป้งข้าวเจ้าและโดจากแป้งข้าวเจ้าที่มีการแทนที่ด้วยแป้งฟรีเจลาตินส์จากเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ จะมีลักษณะเหลวและขึ้นโดได้มากกว่าโดที่เติมแป้งฟรีเจลาตินส์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง เมื่ออบขนมบั้งแล้วจะได้ขนมบั้งมีปริมาตรมากกว่าขนมบั้งที่เติมแป้งฟรีเจลาตินส์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง แต่เนื้อขนมบั้งจะมีรูพรุนขนาดใหญ่ โครงสร้างของขนมบั้งไม่แข็งแรงเนื่องจากโดมีปริมาณของของเหลวหรือน้ำมากเกินไปทำให้โครงสร้างตาข่ายไม่แข็งแรงพอ โดที่เติมแป้งฟรีเจลาตินส์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งมีความยืดหยุ่น เนื้อขนมบั้งมีรูพรุนละเอียด และมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่าขนมบั้งที่แทนที่ด้วยแป้งฟรีเจลาตินส์จากเครื่องเอกซ์ทราเดอร์

โดยโดของแบริ่ง DMF140 จะแสดงสมบัติ Viscoelastic ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนมากที่สุด

ภาพ 11 แสดงปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทูเดอร์ ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 จากผลการทดลองพบว่าขนมปังที่มีการแทนที่ด้วยแป้งพรีเจลาติไนซ์จะมีปริมาตรมากกว่าขนมปังจากแป้งถั่วเขียวดิบ และขนมปังที่ผลิตด้วยแป้งจากเครื่องเอกซ์ทูเดอร์ จะมีปริมาตรมากกว่าขนมปังที่ผลิตด้วยแป้งพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง โดยเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่แป้งพรีเจลาติไนซ์จะทำให้ขนมปังมีปริมาตรลดลงตามลำดับ (ภาพ 12) ขนมปังที่แทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งพรีเจลาติไนซ์จากการตัดแปรทั้งสองวิธี ในปริมาณร้อยละ 5 จะมีปริมาตรของขนมปังมากกว่าขนมปังที่แทนที่แป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์ร้อยละ 10 และ 15 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้ อาจเนื่องจากการทดแทนแป้งข้าวเจ้าด้วยแป้ง พรีเจลาติไนซ์จากถั่วเขียวในระดับที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้ได้มีความหนืดสูงขึ้น Gill, et al. (2002) ศึกษาคุณภาพของขนมปังที่ได้จากการแทนที่ด้วยแป้งข้าวบาร์เลย์ชนิดแข็งและชนิดธรรมดา ทั้งแป้งดิบและแป้งที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทูชัน โดยใช้แป้งข้าวบาร์เลย์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทูชัน 4 สภาวะ (LTLM, LTHM, HTLM และ HTLM) และนำไปแทนที่ 3 ระดับ คือร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งสาลีทำการวิเคราะห์ปริมาตรของขนมปังและความแน่นเนื้อ ผลจากการทดลองพบว่าเมื่อแทนที่แป้งข้าวบาร์เลย์ในปริมาณที่สูงขึ้น ปริมาตรของขนมปังจะลดลงและความแน่นเนื้อของขนมปังจะเพิ่มสูงขึ้น โดยการแทนที่ในระดับร้อยละ 5 จะให้ปริมาตรและความแน่นเนื้อของขนมปังดีที่สุด



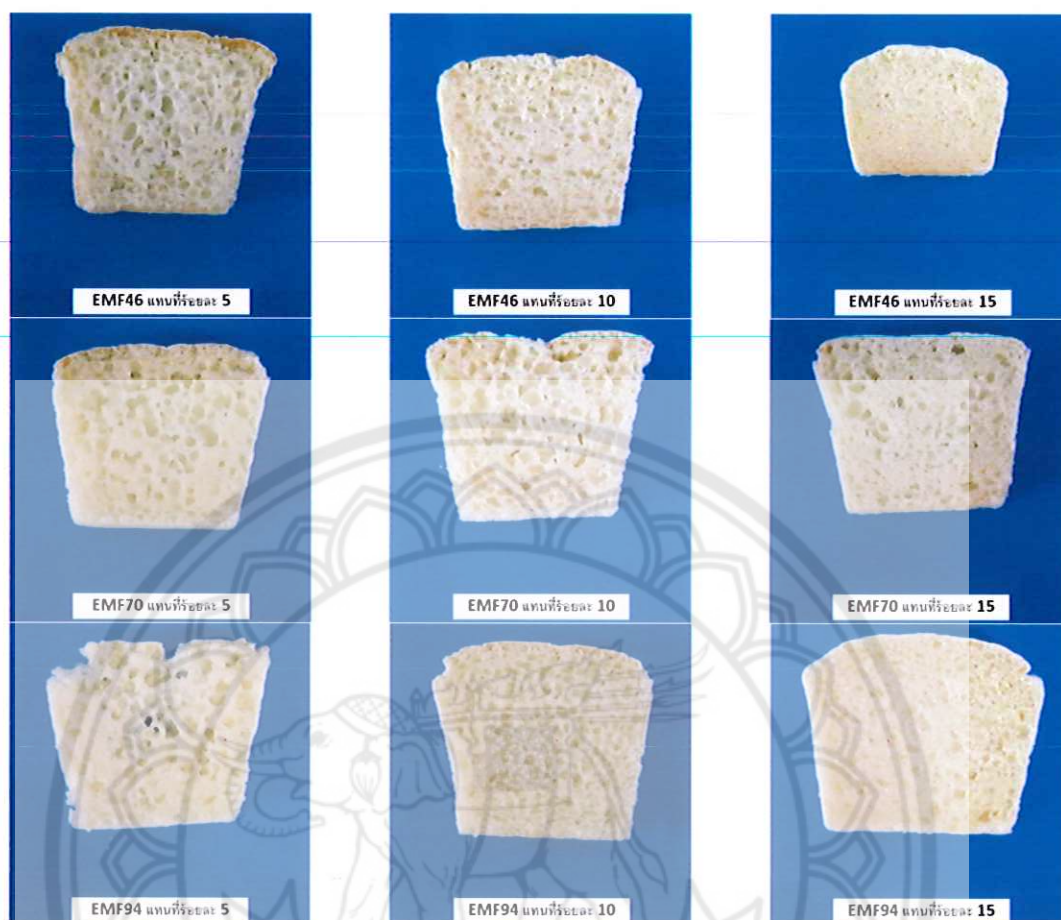
ภาพ 11 ปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งข้าวเจ้าดิบ และแป้งข้าวเจ้าฟรีเจลาตินซ์จากการตัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวเจ้า

Curic (2007a) กล่าวว่าความสามารถในการดูดซับน้ำจะมีความสัมพันธ์กับความหนืด เม็ดสตาร์ชที่เสียหายในระหว่างกระบวนการตัดแปรแป้งจะดูดซับน้ำและพองตัวทำให้มีความหนืดสูงขึ้นและช่วยเพิ่มความสามารถของโดในการจับตัวกับน้ำในระหว่างทำการผสม และหมักโด อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่ของแป้งฟรีเจลาตินซ์มากขึ้น ความสามารถในการขยายตัวของโดจะลดลง เนื่องจากโดมีความหนืดสูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรของขนมปังลดลง

ขนมปังที่แทนที่ด้วยแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะมีปริมาตรน้อยกว่าขนมปังที่แทนที่ด้วยแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโดของขนมปัง ที่แทนที่ด้วยแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะมีความหนืดมากกว่า



ภาพ 12 ขนมอบ่งปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งข้าวเหนียวดิบและแป้งข้าวเหนียว ฟรีเจลาตินซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและกระบวนการ เอกซ์ทรูชัน ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวเจ้า



ภาพ 12 (ต่อ)

ตาราง 16 คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งข้าวสาลีและแป้งข้าวโพดเจลาตินไนซ์จาก การดัดแปรด้วยวิธีต่างๆ ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวจ้าว

ตัวอย่าง	ระดับการแทนที่ (ร้อยละ)	Hardness (g)	Gumminess (g)	Adhesiveness (gs)	Cohesiveness	Chewiness (gmm)	Springiness (mm)
Wheat flour	-	365.83±34.46 ⁱ	255.24±25.42 ^h	-0.14±0.18 ^a	0.71±0.02 ^{abcdof}	1060.37±112.42 ^h	4.19±0.09 ^{bcdof}
NRF	-	3,062.83±368.49 ^{de}	2,532.74±794.32 ^{de}	-0.30±0.35 ^a	0.83±0.24 ^a	10,479.19±3117.68 ^o	4.15±0.25 ^{def}
NMF	5	2,950.67±606.24 ^{de}	2,378.85±1066.48 ^{of}	-0.40±0.51 ^a	0.78±0.22 ^{abc}	9,584.55±3733.19 ^{of}	4.10±0.26 ^{efg}
	10	4,082.83±656.23 ^c	2,543.58±342.16 ^{de}	-0.41±0.24 ^a	0.63±0.06 ^{def}	10,815.48±1636.39 ^{de}	4.25±0.15 ^{abcde}
	15	4,687.83±1056.46 ^b	3,534.88±1174.83 ^{bc}	-1.04±1.35 ^{ab}	0.74±0.13 ^{abcd}	14,317.92±4596.89 ^{bc}	4.07±0.30 ^{efg}
DMF100	5	1,640.33±272.72 ^{gh}	1,144.85±200.41 ^g	-0.47±0.36 ^a	0.70±0.03 ^{bcdof}	4,902.60±871.13 ^g	4.28±0.09 ^{abcde}
	10	2,942.67±410.86 ^{de}	2,120.83±317.39 ^{of}	-0.95±0.61 ^a	0.72±0.03 ^{abcde}	9,110.87±1519.91 ^{of}	4.29±0.14 ^{abcde}
	15	6,461.67±525.91 ^a	4,484.28±342.17 ^a	-4.89±7.12 ^c	0.70±0.08 ^{bcdof}	18,667.56±2324.79 ^a	4.16±0.35 ^{def}
DMF120	5	1,362.33±98.67 ^{gh}	9,26.00±44.20 ^{gh}	-0.61±0.48 ^a	0.68±0.06 ^{bcdof}	4,024.99±215.56 ^b	4.35±0.10 ^{abcd}
	10	3,092.00±1058.51 ^{de}	2,293.43±721.47 ^{of}	-1.67±1.43 ^{ab}	0.75±0.05 ^{abcd}	9,057.23±2496.47 ^{of}	3.99±0.25 ^{fg}
	15	5,934.17±369.90 ^a	3,997.85±383.19 ^{ab}	-3.17±2.70 ^{bc}	0.69±0.06 ^{bcdof}	15,750.62±2350.19 ^g	3.93±0.32 ^g
DMF140	5	1,553.50±369.69 ^{gh}	1,038.92±333.25 ^g	-1.10±0.48 ^{ab}	0.66±0.07 ^{cdof}	4,560.96±1435.26 ^g	4.40±0.04 ^{abc}
	10	2,575.83±117.09 ^{of}	1,834.05±123.77 ^f	-1.74±1.08 ^{ab}	0.71±0.03 ^{abcdof}	7,665.37±532.01 ^f	4.18±0.17 ^{cdof}
	15	3,406.33±1179.97 ^d	3,079.66±644.95 ^{cd}	-0.65±0.32 ^a	0.79±0.07 ^{ab}	12,881.14±2199.23 ^{cd}	4.45±0.09 ^a

ตาราง 16 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ระดับการแทนที่ (ร้อยละ)	Hardness (g)	Gumminess (g)	Adhesiveness (gs)	Cohesiveness	Chewiness (gmm)	Springiness (mm)
EMF46	5	1,275.00±256.23 ^h	807.73±193.31 ^{gh}	-0.19±0.29 ^a	0.64±0.09 ^{dof}	3,567.96±865.89 ^{gh}	4.42±0.08 ^{abc}
	10	1,615.00±301.98 ^{gh}	986.20±151.82 ^g	-0.10±0.15 ^a	0.62±0.05 ^{of}	4,216.05±595.71 ^g	4.28±0.13 ^{abcdo}
	15	3,175.67±138.79 ^{do}	2,010.98±162.15 ^{of}	-0.67±0.50 ^a	0.63±0.03 ^{dof}	8,554.12±769.13 ^{of}	4.25±0.10 ^{abcdo}
EMF70	5	1,294.00±208.24 ^h	817.75±129.69 ^{gh}	-0.17±0.21 ^a	0.63±0.05 ^{dof}	3,608.36±580.82 ^{gh}	4.41±0.05 ^{abc}
	10	1,442.67±418.54 ^{gh}	877.95±228.64 ^{gh}	-0.37±0.42 ^a	0.61±0.05 ^{of}	3,860.47±1063.69 ^g	4.38±0.10 ^{abcd}
	15	1,764.67±518.07 ^{gh}	1,094.41±432.66 ^g	-0.35±0.69 ^a	0.60±0.08 ^{of}	4,696.94±1917.20 ^g	4.27±0.07 ^{abcdo}
EMF94	5	1,404.17±410.11 ^{gh}	888.93±271.58 ^{gh}	-0.09±0.10 ^a	0.63±0.06 ^{dof}	3,847.36±1244.77 ^g	4.31±0.13 ^{abcdo}
	10	1,700.83±204.14 ^{gh}	1,034.78±126.29 ^g	-0.15±0.12 ^a	0.61±0.05 ^{of}	4,579.08±546.67 ^g	4.43±0.04 ^{ab}
	15	1,788.20±654.00 ^{fo}	1,200.91±240.21 ^g	-0.15±0.12 ^a	0.60±0.05 ^f	5,172.35±1071.70 ^g	4.30±0.07 ^{abcdo}

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตาราง 16 แสดงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่ด้วยแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพีเจลาติโนซ์จากการตัดแปรทั้งสองวิธี ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยวิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness) ค่าความเหนียวเป็นยางหรือกาว (Gumminess) ค่าการเกาะตัวกันของอาหาร (Adhesiveness) ค่าความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) ค่าการทนต่อการเคี้ยว (Chewiness) และค่าความยืดหยุ่น (Springiness)

ขนมปังปราศจากกลูเตนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบหลัก (Segura and Rosell, 2011) มีลักษณะที่ค่อนข้างแข็งและมีผิวด้านบนแตก จากการทดลองพบว่าขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพีเจลาติโนซ์จากการตัดแปรทั้งสองวิธี จะมีคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกัน

ค่าความแข็งหรือค่า Hardness คือ แรงที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างเสียรูป ขนมปังจากแป้งข้าวสาลีและขนมปังจากแป้งข้าวเจ้ามีค่า Hardness 365.83 g และ 3,062.83 g ตามลำดับ การแทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพีเจลาติโนซ์ร้อยละ 5 จะทำให้ขนมปังมีค่า Hardness ต่ำกว่าขนมปังที่จากแป้งข้าวเจ้า โดยมีค่า Hardness อยู่ในช่วง 1,294.00-2,950.67 g เมื่อระดับการแทนที่แป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวพีเจลาติโนซ์สูงขึ้นจะทำให้ค่า Hardness ของขนมปังเพิ่มสูงขึ้นตามระดับการแทนที่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีสัมพันธกับปริมาตรของขนมปัง (Gill, et al., 2002) ขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งถั่วเขียวดิบจะมีค่า Hardness สูงที่สุด (2,950.67 g) และขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่ด้วยแป้งพีเจลาติโนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งจะมีค่า Hardness (1,362.33-1,640.33 g) สูงกว่าขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่ด้วยแป้งพีเจลาติโนซ์จากเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ (1,275.00-1,404.17 g) เปรียบเทียบแป้งที่ใช้วิธีการผลิตวิธีเดียวกันในทุกะดับการแทนที่ พบว่าเมื่อมีการแทนที่ด้วยแป้ง DMF140 ขนมปังที่ได้จะมีค่า Hardness ต่ำกว่าขนมปังที่แทนที่ด้วยแป้ง DMF100 และ DMF120 ขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่ด้วยแป้งพีเจลาติโนซ์จากเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ชนิด EMF46 จะมีค่า Hardness สูงกว่าแป้ง EMF70 และ EMF94 แต่เนื้อขนมปังจะมีความสม่ำเสมอทั้งแผ่น แตกต่างกับขนมปังจากแป้ง EMF70 และ EMF94 ที่เนื้อบริเวณตรงกลางชิ้นขนมปังจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าบริเวณด้านข้าง

ค่าความเหนียวเป็นยางหรือกาว (Gumminess) แสดงถึงแรงที่ต้องใช้ในการแยกตัวอย่างที่เป็นกิ่งของแข็งจนกระทั่งเสียรูป จากผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวสาลีและขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า จะมีค่า Gumminess เท่ากับ 255.24 และ 2,532.74 g ตามลำดับ ค่า Gumminess จะเพิ่มขึ้น เมื่อระดับการแทนที่แป้งข้าวเจ้าเพิ่มมากขึ้น โดย

ในทุกตัวอย่างของขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งร้อยละ 5 และ 10 จะมีค่า Gumminess ต่ำกว่าขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า แต่จะมีค่าสูงมากกว่าเมื่อแทนที่แป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวฟรีเจลาตินซ์ร้อยละ 15 ขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่ด้วยแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ จะมีค่า Gumminess ต่ำกว่าขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าในทุกระดับการแทนที่

ค่าการเกาะตัวกันของอาหาร (Adhesiveness) แสดงถึงพลังงานที่ใช้ในการแยกแรงดึงดูดระหว่างอาหารกับพื้นผิวที่สัมผัส จากการทดลองพบว่าขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า จะมีค่า Adhesiveness สูงกว่าขนมปังจากแป้งสาลี และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการแทนที่แป้งข้าวในระดับที่สูงขึ้น

ค่าความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) แสดงถึงความแข็งแรงของพันธะภายในตัวอย่างอาหาร จากผลการทดลองพบว่าขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวฟรีเจลาตินซ์ มีค่า Cohesiveness ต่ำกว่าขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า (0.83) โดยขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งถั่วเขียวดิบ (0.63-0.78) และขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่ด้วยแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (0.66-0.79) จะมีค่า Cohesiveness สูงกว่าขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่ด้วยแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (0.60-0.64)

ค่าการทนต่อการเคี้ยว (Chewiness) แสดงถึงแรงที่ใช้ในการเคี้ยวหรือบดตัวอย่างจนกระทั่งเสียรูป ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าจะมีค่า Chewiness (10,479.19 gmm) สูงกว่าขนมปังจากแป้งสาลี (1,060.37 gmm) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และเมื่อเติมแป้งถั่วเขียวและแป้งถั่วเขียวฟรีเจลาตินซ์ลงไปแทนที่แป้งข้าวเจ้า จะทำให้ค่า Chewiness ลดลง เมื่อแทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งร้อยละ 5 และ 10 จะมีค่า Chewiness ต่ำกว่าขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า แต่เมื่อแทนที่ร้อยละ 15 ขนมปังที่ได้จะมีค่า Chewiness สูงมากขึ้น ส่วนขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่ด้วยแป้งฟรีเจลาตินซ์จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ทุกระดับจะมีค่า Chewiness ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า

ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) คือ อัตราการคืนตัวอย่างยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นเมื่อถอนแรงบีบอัดออก ค่า Springiness ของทุกตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการแทนที่แป้งข้าวเจ้าในระดับที่สูงขึ้น ขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าจะมีเนื้อสัมผัสที่แข็ง การแทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งฟรีเจลาตินซ์

ร้อยละ 5 จะให้ขนมปังที่มีเนื้อสัมผัสดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบขนมปังแต่ละสูตร พบว่าขนมปังจากแป้ง DMF140 และ EMF46 ที่ระดับการแทนที่แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 5 จะมีลักษณะของฟองอากาศ (Gas cell) สม่ำเสมอทั้งแผ่น และมีเนื้อสัมผัสดีกว่าขนมปังสูตรอื่นๆ (ภาพ 12)

ตาราง 17 แสดงค่าสีของผลิตภัณฑ์ขนมปังสูตรควบคุมที่ผลิตจากแป้งข้าวสาลีและจากแป้งข้าวเจ้า และขนมปังปราศจากกลูเตน ที่แทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์ที่ผ่านการดัดแปรทั้งสองวิธี ปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 จากการทดลองพบว่าเปลือกนอกของขนมปังจากแป้งข้าวสาลีมีสีเหลืองอมน้ำตาล ส่วนเปลือกนอกของขนมปังปราศจากกลูเตนจะมีสีขาว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าโปรตีนในแป้งข้าวสาลี ทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non enzymatic browning reaction) หรือปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ในระหว่างการอบด้วยความร้อนสูง (Matos and Rosell, 2011)

จากการวิเคราะห์ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) ของเปลือกนอกและเนื้อในของขนมปัง พบว่าค่าความสว่างของเปลือกนอกขนมปังจากแป้งข้าวสาลี ($L^* = 56.84$) จะมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับขนมปังปราศจากกลูเตน ($L^* = 63.64-80.74$) โดยเปลือกนอกของขนมปังจากแป้งข้าวสาลีจะค่าความสว่างต่ำที่สุด สอดคล้องกับงานวิจัยของ Alvarenga, et al. (2011) ที่ศึกษาความแตกต่างของลักษณะของขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง กับขนมปังจากแป้งข้าวสาลี และพบว่าสีเปลือกนอกของขนมปังปราศจากกลูเตนมีค่าความสว่างสูงกว่าขนมปังจากแป้งข้าวสาลี เนื่องจากไม่มีโปรตีนกลูเตนที่สามารถนำไปสู่ปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction)

ค่าสีเหลืองของเปลือกนอกขนมปังปราศจากกลูเตนที่แทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ มีค่าสีเหลืองอยู่ในช่วง 9.84-13.98 และ 11.89-30.30 ตามลำดับ จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่าค่าสีของเปลือกขนมปังปราศจากกลูเตนจะมีค่าอยู่ในช่วงกว้างและมีแนวโน้มไม่ชัดเจน เนื่องจากเปลือกขนมปังมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ

ตาราง 17 ค่าสีเปลือกนอกและเนื้อในของขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐานที่แทนที่แป้งถั่วเขียวดิบและแป้งถั่วเขียวพีรเจลาตินซ์จากการดัดแปรด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของแป้งข้าวจ้าว

ตัวอย่าง	ระดับการแทนที่ (ร้อยละ)	สีเปลือกนอก			สีเนื้อใน		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*
Wheat flour	-	56.84±6.78 ^g	8.33±5.66 ^a	26.63±6.11 ^{bc}	57.33±3.37 ^{efghi}	-1.20±0.11 ^a	6.76±0.37 ^{defgh}
NRF	-	72.35±4.00 ^{bcde}	-1.28±0.31 ^{fg}	10.53±4.82 ^{hi}	55.45±2.63 ^{ghij}	-1.93±0.13 ^e	6.60±0.35 ^{efghi}
NMF	5	70.44±4.39 ^{bcde}	-0.83±0.74 ^{efg}	13.48±3.51 ^{ghi}	57.39±6.75 ^{efghi}	-1.76±0.11 ^{cde}	6.77±1.14 ^{defg}
	10	63.64±4.18 ^f	-0.25±1.65 ^{efg}	12.62±3.11 ^{hi}	59.56±3.95 ^{def}	-1.87±0.22 ^{de}	6.61±0.52 ^{efghi}
	15	64.72±1.16 ^f	-1.50±0.20 ^g	9.90±0.44 ⁱ	60.14±2.82 ^{de}	-1.79±0.16 ^{cde}	7.22±0.78 ^{cde}
DMF100	5	73.57±8.24 ^{bcd}	0.36±0.81 ^{defg}	13.22±3.38 ^{hi}	51.84±6.30 ^j	-1.66±0.17 ^{cde}	6.51±0.51 ^{efghi}
	10	72.17±6.18 ^{bcde}	-0.04±1.35 ^{efg}	12.85±4.76 ^{hi}	64.63±0.70 ^e	-1.70±0.09 ^{cde}	7.03±0.32 ^{cdef}
	15	72.39±6.11 ^{bcde}	-0.95±0.25 ^{efg}	11.42±1.69 ^{hi}	68.97±2.38 ^{ab}	-1.63±0.10 ^{cde}	9.06±0.80 ^a
DMF120	5	71.18±4.64 ^{bcde}	-0.57±0.99 ^{efg}	10.57±2.47 ^{hi}	58.22±3.33 ^{efg}	-1.70±0.05 ^{cde}	6.39±0.40 ^{ghi}
	10	70.71±3.17 ^{bcde}	-0.99±0.11 ^{efg}	9.94±1.82 ⁱ	66.13±1.77 ^{bc}	-1.71±0.07 ^{cde}	8.11±0.52 ^b
	15	66.97±5.37 ^{ef}	-0.80±0.29 ^{efg}	11.17±2.00 ^{hi}	69.83±2.27 ^{ab}	-1.22±1.21 ^{ab}	9.08±0.29 ^a
DMF140	5	71.45±3.23 ^{bcde}	-0.14±1.26 ^{defg}	13.98±2.77 ^{gh}	54.94±4.68 ^{ghij}	-1.68±0.14 ^{cde}	6.08±0.34 ^{ghij}
	10	72.14±0.90 ^{bcde}	-1.12±0.44 ^{fg}	10.08±1.46 ⁱ	63.35±2.00 ^{cd}	-1.68±0.13 ^{cde}	7.36±0.49 ^{cd}
	15	69.91±3.01 ^{cde}	-1.06±0.15 ^{fg}	9.84±0.68 ⁱ	70.47±5.16 ^a	-1.51±0.30 ^{abcd}	8.83±0.33 ^a

ตาราง 17 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ระดับการแทนที่ (ร้อยละ)	สีเปลือกนอก			สีเนื้อใน		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*
EMF46	5	67.45±3.70 ^{ef}	6.60±3.63 ^{ab}	29.40±4.90 ^{ab}	51.28±3.40 ^l	-1.58±0.22 ^{cde}	4.77±0.91 ^l
	10	74.87±2.69 ^{bc}	2.05±0.62 ^d	19.32±1.61 ^{ef}	57.70±3.99 ^{efgh}	-1.66±0.09 ^{cde}	6.17±0.55 ^{ghi}
	15	80.74±3.94 ^a	-0.34±1.05 ^{efg}	11.89±2.40 ^{hi}	64.72±1.39 ^c	-1.63±0.12 ^{cde}	7.61±0.50 ^{bc}
EMF70	5	71.08±3.15 ^{bcde}	1.95±1.02 ^d	22.08±3.11 ^{de}	53.07±5.01 ^{ij}	-1.63±0.22 ^{cde}	5.25±0.74 ^{kl}
	10	68.21±5.49 ^{def}	7.27±2.76 ^a	30.30±3.26 ^a	53.43±2.19 ^{hij}	-1.54±0.19 ^{bcd}	5.44±0.63 ^{jk}
	15	75.54±3.49 ^b	0.76±1.30 ^{def}	16.75±3.68 ^{fg}	57.07±5.23 ^{efghi}	-1.48±0.14 ^{abc}	6.26±0.92 ^{ghi}
EMF94	5	71.23±4.61 ^{bcde}	1.07±1.61 ^{de}	19.19±3.00 ^{ef}	53.97±5.17 ^{ghij}	-1.53±0.16 ^{abcd}	6.48±0.54 ^{ghi}
	10	67.84±6.34 ^{ef}	5.27±1.56 ^{bc}	26.69±2.80 ^{bc}	54.18±1.47 ^{ghij}	-1.46±0.23 ^{abc}	6.02±0.44 ^{hij}
	15	70.19±3.33 ^{bcde}	4.18±0.88 ^c	23.67±2.25 ^{cd}	57.33±3.12 ^{efghi}	-1.43±0.22 ^{abc}	5.97±1.04 ^{ij}

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งแสดงถึงความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

สีเนื้อในขนมปังจากแป้งข้าวสาลี มีค่าความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และค่าสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 57.33-1.20 และ 6.76 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับขนมปังปราศจากกลูเตน สีเนื้อในขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์ มีค่าความสว่างและค่าสีเหลืองมากกว่าขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าและขนมปังที่มีการแทนที่ด้วยแป้งถั่วเขียวดิบ เนื่องจากค่าสีของขนมปังจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่นำมาใช้ (Ozola, et al., 2012) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความสว่างและค่าสีเหลืองของแป้งพรีเจลาติไนซ์ และเมื่อแทนที่แป้งพรีเจลาติไนซ์ ปริมาณมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความสว่างของขนมปังเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาสมบัติแป้งถั่วเขียวและแป้งพรีเจลาติไนซ์จากถั่วเขียวและศึกษาระดับการแทนที่ที่เหมาะสมจากการแทนที่แป้งพรีเจลาติไนซ์ทดแทนแป้งข้าวเจ้าในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ของน้ำหนักแป้งข้าวเจ้า ต่อคุณสมบัติของโดและคุณภาพของขนมปังเพื่อใช้ผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐาน โดยคัดเลือกสูตรมาตรฐานจากคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และคุณสมบัติของโด พบว่าการแทนที่แป้งข้าวเจ้าด้วยแป้งพรีเจลาติไนซ์จากถั่วเขียวร้อยละ 5 จะเป็นระดับการแทนที่ที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติของโดและคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตน การเติมแป้ง DMF140 ซึ่งเป็นแป้งพรีเจลาติไนซ์จากเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และแป้งพรีเจลาติไนซ์ EMF46 จากเครื่องเอกซ์ทรูดอร์ จะช่วยปรับปรุงคุณภาพของโดและลักษณะทางกายภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนได้ดีที่สุด

สูตรขนมปังที่ได้จากการทดลองขั้นตอนนี้จะใช้เป็นสูตรมาตรฐานเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาผลของปริมาณน้ำและไฮโดรคอลลอยด์ในขนมปังปราศจากกลูเตน โดยใช้ RSM ต่อไป

ตอนที่ 3 การศึกษาปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์

ขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตด้วยสูตรมาตรฐานที่ได้จากการเติมแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์ลงไปนั้น ยังคงมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นการเติมไฮโดรคอลลอยด์อาจช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตน อย่างไรก็ตามการเติมไฮโดรคอลลอยด์ลงไปในส่วนผสม จะทำให้ความหนืดของโดเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการแปรระดับปริมาณน้ำที่ใช้ในสูตร

การทดลองนี้จะมีการใช้ HPMC เป็นอนุพันธ์อีเทอร์ของเซลลูโลสที่มีหมู่อีเทอร์ 2 ชนิดในสายโมเลกุล คือ $-OCH_2CH(OH)CH_3$ และ $-OCH_3$ มีคุณสมบัติละลายได้ในน้ำเย็น ดูน้ำได้ดี ให้สารละลายที่มีความหนืด ไส และเนียน เกิดเจลได้ ขณะร้อน (50-85 องศาเซลเซียส) (วรรณา ตูลยธัญ, 2549) HPMC เป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตขนมปังจาก

แป้งข้าวเจ้า เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซึมน้ำและเกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ ได้ในระหว่างการหมัก จึงช่วยให้โด้สามารถกักเก็บก๊าซที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหมักได้ดีขึ้น มีผลให้โครงสร้างภายในขนมปังเรียบเนียนและมีการกระจายตัวของโพรงอากาศสม่ำเสมอ (จริยา สุขสวัสดิ์, 2554; Gujral and Rosell, 2004; Barcenas and Rosell, 2005)

ในการทดลองนี้ทำการศึกษาปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวฟรีเจลาตินส์โดยใช้วิธี RSM วางแผนการทดลองแบบ CCD (ตาราง 18) ขนมปัง ODMF140 จะผลิตจากแป้งฟรีเจลาตินส์ DMF140 และขนมปัง OEMF46 ที่ผลิตจากแป้ง EMF46 ซึ่งทดแทนแป้งข้าวเจ้าในปริมาณร้อยละ 5 ทำการวิเคราะห์น้ำหนัก ปริมาตร เนื้อสัมผัส และวิเคราะห์ค่าสี ทั้งส่วนเนื้อในและเปลือกนอกของขนมปังตัวแปรอิสระจะถูกเข้ารหัสให้อยู่ในช่วงระดับสูง (1) และระดับต่ำ (-1) แปรปริมาณน้ำอยู่ในช่วง 90-110 มิลลิลิตร และเติม HPMC ในช่วงร้อยละ 0.5-1.5 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด กำหนดให้ 1 ตัวอย่างการทดลอง จะมีจำนวนครั้งของจุดศูนย์กลางการทดลองเท่ากับ 5 จะได้ทั้งหมด 13 ชุดการทดลอง ดังตาราง 19

จากผลการทดลองเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษา คือปริมาณน้ำและ HPMC การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ต้องการศึกษากับค่าการตอบสนองของปัจจัยสามารถวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองการถดถอยที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ แบบจำลองที่มีความเหมาะสม จะพิจารณาจากค่า p-value ที่น้อยกว่า 0.0001 ($p < 0.0001$) lack of fit ที่มากกว่า 0.05 ($p > 0.05$) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้ 1 มาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง

ตาราง 18 ส่วนผสมของขนมปังสูตรมาตรฐาน

ส่วนผสม	ร้อยละของน้ำหนักแป้งทั้งหมด
แป้งข้าวเจ้า	95
แป้งฟรีเจลาตินส์จากถั่วเขียว	5
นมผง	10
ยีสต์แห้ง	3
น้ำตาล	5
เกลือ	1
น้ำมันพืช	2

ข้อมูลคุณภาพที่ได้ จะนำไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์โดยสมการถดถอยกับสูตรของสภาวะการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์ ซึ่งได้แก่สมการของปริมาณของขนมปัง ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์หารูปแบบสมการแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำ (X_1) และ HPMC (X_2) ต่อปริมาณของขนมปัง (Y) มีรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับค่าตอบสนองของปัจจัยเป็นสมการถดถอยดังตาราง 20 และ 21 จากการพิจารณาสมการถดถอยของปริมาณของขนมปังจะเห็นว่า ค่าปริมาณของขนมปังจะได้รับอิทธิพลจากปริมาณน้ำและ HPMC โดยมีความสัมพันธ์แบบสมการเส้นตรง โดยปริมาณของขนมปังจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของน้ำและ HPMC เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ McCarthy, et al. (2005; Gallagher, et al., 2003) ที่รายงานว่า การเติม HPMC เป็นสารเพิ่มความชื้นหนืด หมูไฮดรอกซิล ของ HPMC จะเข้าจับกับน้ำเพิ่มการดูดซับน้ำมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของโดเพิ่มขึ้น แต่หากโดมีความหนืดมากเกินไปส่งผลให้โดขยายตัวได้ยาก การเติมน้ำจะช่วยปรับปรุงให้ความหนืดของโดที่เติม HPMC ลดลง เพื่อให้โดสามารถขยายตัวในระหว่างการหมักได้ ดังนั้นปริมาณของขนมปังจึงเพิ่มขึ้น

ตาราง 19 สภาวะและรหัสของปริมาณน้ำและ HPMC ที่ใช้ในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนจากการออกแบบการทดลองด้วย RSM วางแผนการทดลองแบบ CCD

สภาวะ	รหัส		น้ำ (มิลลิลิตร)	HPMC (ร้อยละ)
	น้ำ	HPMC		
1	-1	-1	90.00	0.50
2	+1	-1	110.00	0.50
3	-1	+1	90.00	1.50
4	+1	+1	110.00	1.50
5	-1.414	0	85.86	1.00
6	+1.414	0	114.14	1.00
7	0	-1.414	100.00	0.29
8	0	+1.414	100.00	1.71
9	0	0	100.00	1.00
10	0	0	100.00	1.00
11	0	0	100.00	1.00
12	0	0	100.00	1.00
13	0	0	100.00	1.00

ตาราง 20 แบบจำลองคุณภาพสำหรับการหาปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140

ค่าคุณภาพ	Model	Prob (P)>F		
		Model	Lack-of-Fit	R ²
น้ำหนักขนมปัง	Linear	< 0.0001	p>0.05 (0.8890)	0.90
ปริมาตรขนมปัง	Linear	< 0.0001	p>0.05 (0.1344)	0.88
hardness	Quadratic	< 0.0001	p>0.05 (0.7599)	0.98
Gumminess	Linear	< 0.0001	p>0.05 (0.5339)	0.85
chohesiveness	Linear	0.0648	p>0.05 (0.3318)	0.54
chewiness	Linear	< 0.0001	p>0.05 (0.5098)	0.87
springiness	Linear	0.0706	p>0.05 (0.3079)	0.41

หมายเหตุ: ขนมปัง ODMF140 คือ ขนมปังที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วย RSM ที่ผลิตด้วยแป้ง DMF140 น้ำ 110 มิลลิลิตรและ HPMC ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด

ตาราง 21 แบบจำลองคุณภาพสำหรับการหาปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน OEMF46

ค่าคุณภาพ	Model	Prob (P)>F		
		Model	Lack-of-Fit	R ²
น้ำหนักขนมปัง	Linear	< 0.0001	p>0.05 (0.1141)	0.88
ปริมาตรขนมปัง	Linear	< 0.0001	p>0.05 (0.3833)	0.87
hardness	Quadratic	< 0.0001	P<0.05 (0.0035)	0.96
Gumminess	Quadratic	0.0006	P<0.05 (0.0171)	0.93
chohesiveness	Linear	0.0003	p>0.05 (0.6738)	0.81
chewiness	Quadratic	0.0007	P<0.05 (0.0368)	0.93
springiness	Linear	-	P<0.05 (0.0100)	0

หมายเหตุ: ขนมปัง OEMF46 คือ ขนมปังที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วย RSM ที่ผลิตด้วยแป้ง EMF46, น้ำ 110 มิลลิลิตรและ HPMC ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด

การทดลองเพื่อทำนายปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตนแล้ว จึงนำมาสร้างกราฟสามมิติของพื้นผิวตอบสนองต่อน้ำหนักและปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตน ดังภาพ 13 และ 14 จากภาพพบว่าปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสม (Optimization) ต่อการผลิตขนมปังคือสูตรที่เติมน้ำ 110 มิลลิลิตร และ HPMC ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด (สภาวะ 4) โดยให้น้ำหนักและปริมาตรของขนมปังมากที่สุด

จากการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง โดยใช้สูตรขนมปังที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วย RSM (ขนมปัง ODMF140 และ OEMF46) เปรียบเทียบกับขนมปังจากการทดลองเพื่อยืนยันผล พบว่าค่าที่ได้จากการประมวลผลจากสมการที่ใช้ทำนายของขนมปัง ODMF140 และขนมปัง OEMF46 มีน้ำหนักเท่ากับ 191.43 และ 190.17 กรัม และมีปริมาตร 468.67 และ 459.95 มิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักและปริมาตรของขนมปังที่ได้จากการทดลองยืนยันผล โดยที่น้ำหนักของขนมปัง ODMF140 และขนมปัง OEMF46 เท่ากับ 189.37 และ 191.48 กรัม และปริมาตรเท่ากับ 461.67 และ 470.00 มิลลิลิตร ตามลำดับ

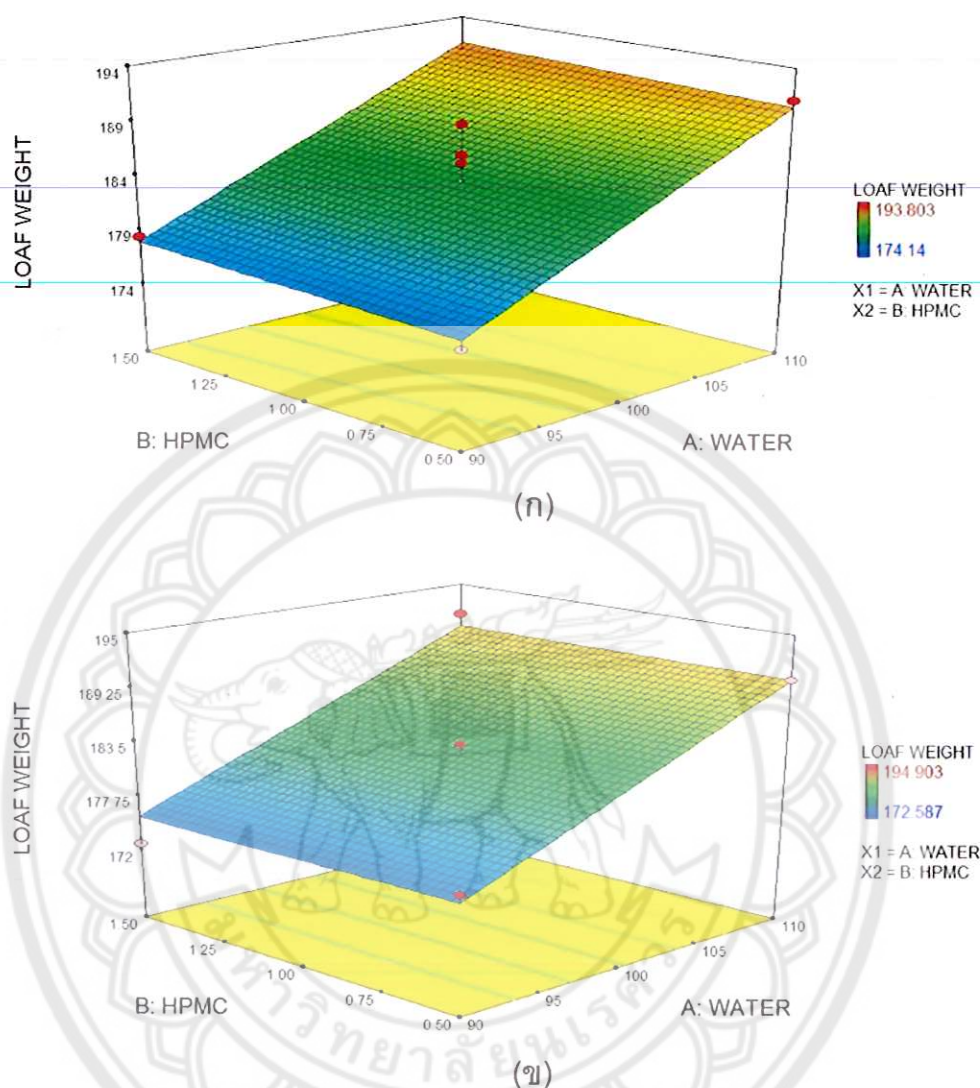
จากตาราง 20 และ 21 แสดงแบบจำลองคุณภาพสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมของขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140 และ OEMF46 เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษา คือปริมาณน้ำและ HPMC ทำการคัดเลือกเฉพาะสมการที่มีค่า p-value ที่น้อยกว่า 0.0001 ($p < 0.0001$), lack of fit ที่มากกว่า 0.05 ($p > 0.05$) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้ 1 มาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งได้แก่สมการของน้ำหนักและปริมาตรของขนมปัง โดยแสดงสมการดังตาราง 22

ตาราง 22 สมการของน้ำหนักและปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140 และ OEMF46 จากการออกแบบการทดลองด้วย RSM

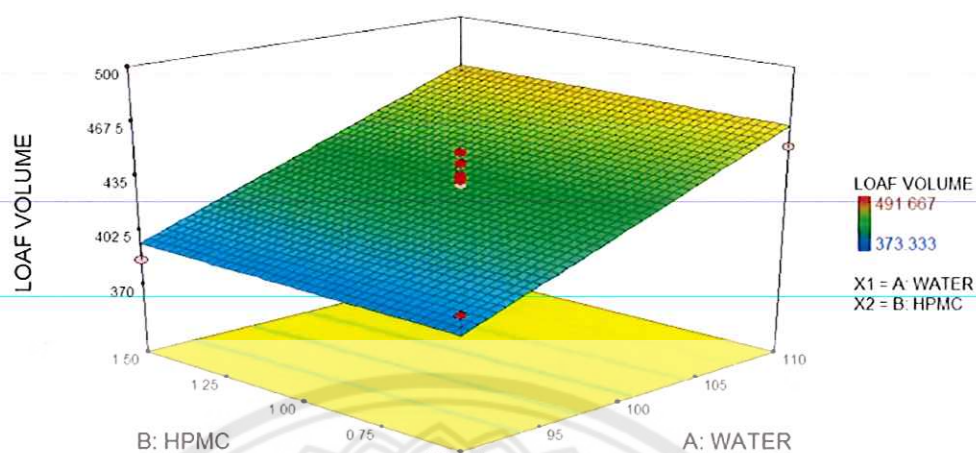
ตัวอย่าง	ค่าคุณภาพ	สมการ	R^2
ODMF140	น้ำหนัก	$Y = 148.24 + 6.71X_1 + 0.48X_2$	0.90
	ปริมาตร	$Y = 60.1885 + 3.6752X_1 + 2.8036X_2$	0.88
OEMF46	น้ำหนัก	$Y = 182.98 + 7.28X_1 - 0.082X_2$	0.88
	ปริมาตร	$Y = 158.6034 + 2.2446 X_1 + 36.2970X_2$	0.87

หมายเหตุ: X_1 หมายถึง ปริมาณน้ำ (มิลลิลิตร)

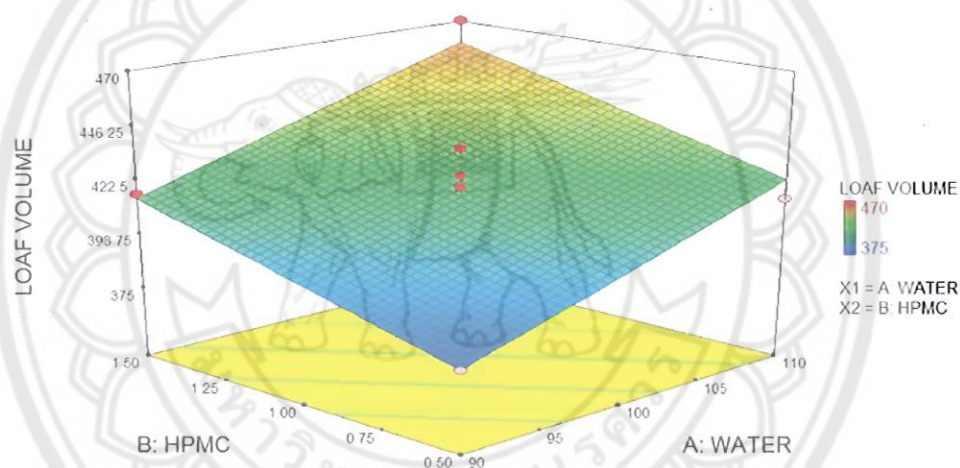
X_2 หมายถึง ปริมาณ HPMC (ร้อยละของน้ำหนักแป้งทั้งหมด)



ภาพ 13 กราฟสามมิติของพื้นผิวตอบสนองต่อน้ำหนักของขนมปังปราศจากกลูเตน โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและ HPMC ที่ใช้ในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์; (ก) ขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140, (ข) ขนมปังปราศจากกลูเตน OEMF46



(ก)

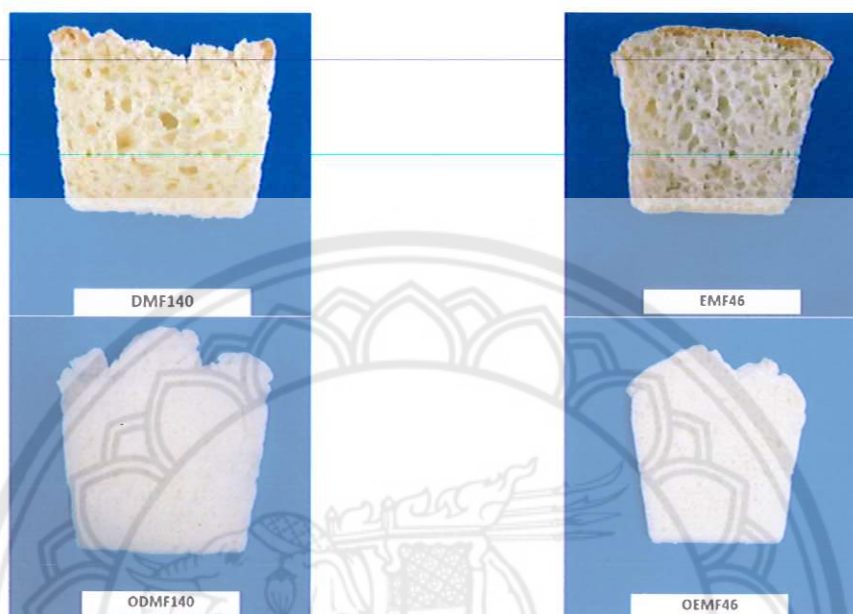


(ข)

ภาพ 14 กราฟสามมิติของพื้นผิวตอบสนองต่อปริมาตรของขนมปังปราศจากกลูเตน โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำและ HPMC ที่ใช้ในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวพีรีเจลาติไนซ์;
(ก) ขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140, (ข) ขนมปังปราศจากกลูเตน OEMF46

ขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140 และ OEMF46 สูตรที่ผลิตด้วยแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวพีรีเจลาติไนซ์ที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 5 ที่มีการใช้น้ำ 110 มิลลิลิตร และ HPMC ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด จะมีคุณภาพดีขึ้นกว่าขนมปังสูตรมาตรฐานที่ไม่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ เช่น ปริมาตรของขนมปังเพิ่มขึ้น และมีลักษณะของฟองอากาศเล็กและสม่ำเสมอกระจายทั่วทั้งแผ่นขนมปัง (ภาพ 15) แสดงให้เห็นว่าการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนด้วยสูตร

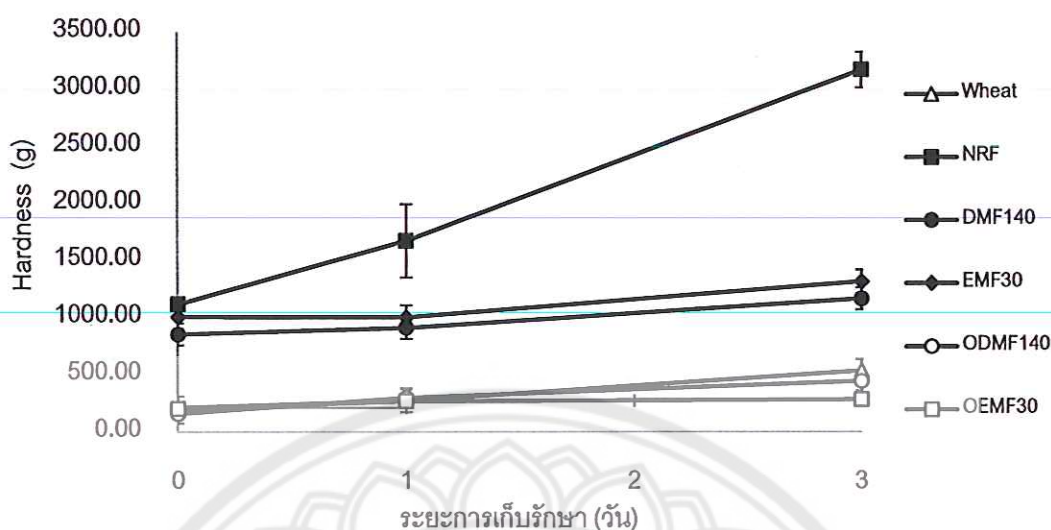
ที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วย RSM วางแผนการทดลองแบบ CCD สามารถปรับปรุงคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นได้



ภาพ 15 เปรียบเทียบขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐาน (DMF140 และ EMF46) และขนมปังที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วย RSM (ODMF140 และ OEMF46)

ตอนที่ 4 ผลศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาขนมปังปราศจากกลูเตน

จากการทดลองในตอนต้นที่ 3 ได้ทำการคัดเลือกสูตรที่ใช้ปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน ได้แก่สูตรที่เติมน้ำ 110 มิลลิลิตร และเติม HPMC ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด โดยใช้แป้ง DMF140 และแป้ง EMF46 ร้อยละ 5 นำมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษา โดยทำการเก็บรักษาขนมปังในถุงพลาสติกชนิด PP ที่ปิดสนิท เก็บที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 วัน ได้แก่ วันที่ 0, 1 และ 3 เปรียบเทียบกับขนมปังจากแป้งสาลี ขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าและขนมปังปราศจากกลูเตนผลิตจากสูตรมาตรฐานที่ไม่มีการเติม HPMC



ภาพ 16 การเปลี่ยนแปลงของค่า Hardness ของขนมปังปราศจากกลูเตนระหว่างการเก็บรักษา 0, 1 และ 3 วัน

ภาพ 16 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า Hardness ของขนมปังปราศจากกลูเตนระหว่างการทดลองพบว่า ขนมปังมีความแน่นเนื้อหรือความแข็งเพิ่มขึ้น เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากการเสื่อมเสียที่เรียกว่า สเตลิง (Staling) ซึ่งมีสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัย คือน้ำที่บริเวณเนื้อขนมปังเกิดการเคลื่อนย้ายไปยังผิวเปลือกนอกของขนมปัง (Baik and Chinachoti, 2000) และสตาร์ชเกิดรีโทรเกรเดชัน (Cauvain, 1998) จากการศึกษาของ Seyhun, et al. (2005) พบว่าการตกผลึกซ้ำ (recrystallization) ของสตาร์ช จะส่งผลต่อค่าความแน่นเนื้อของขนมปังมีค่าเพิ่มขึ้น

ในวันที่ 0 ของการเก็บรักษาขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าจะมีค่า Hardness มากที่สุด (1,115.33 g) เมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังชนิดอื่น และในวันที่ 3 ของการเก็บรักษา ค่า Hardness ของขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Hardness สูงที่สุด ดังแสดงในภาพ 15 ขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140 และ OEMF46 จะมีค่าความแน่นเนื้อและมีอัตราการเพิ่มขึ้นของค่า Hardness ต่ำกว่าขนมปังจากแป้งข้าวเจ้า สันนิษฐานได้ว่าแป้งฟรืเจลาตินโซลมีมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการจับกับน้ำมากขึ้น สายโซ่ของ HPMC จะเข้าไปสร้างพันธะกับสายพอลิเมอร์ของแป้ง ส่งผลให้ขัดขวางการคืนตัวของแป้ง ดังนั้นการเพิ่มแป้งฟรืเจลาตินโซลจากถั่วเขียวและ HPMC เข้าไปในสูตรขนมปังปราศจากกลูเตน จะสามารถช่วยชะลอการเกิดสเตลิงได้ (Barcenas and Rosell, 2005)

ขนมปังปราศจากกลูเตนมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นเพิ่มขึ้นจากความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 1-2 (ไม่แสดงข้อมูล) ในระหว่างการเก็บรักษา พบไอน้ำเกาะอยู่ที่เปลือกนอกของขนมปัง สันนิษฐานว่าไอน้ำดังกล่าวมาจากการเคลื่อนย้ายของน้ำจากเนื้อของขนมปังไปยังเปลือกนอก อีกทั้งถุงพลาสติกชนิด PP ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี จึงเป็นผลให้ทำให้เปลือกนอกของขนมปังชื้นและนิ่ม

เมื่อนำขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140 และ OEMF46 ไปศึกษาค่าเอนทาลปีของการเกิดรีโทรเกรเดชั่น พบว่าขนมปังปราศจากกลูเตน ODMF140 (0.49 Jg^{-1}) จะมีค่าเอนทาลปีของการเกิดรีโทรเกรเดชั่นสูงกว่าขนมปังปราศจากกลูเตน OEMF46 (0.21 Jg^{-1}) ซึ่งสอดคล้องกับค่า Hardness ที่ทำการศึกษา

ตาราง 23 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณยีสต์ราของขนมปังปราศจากกลูเตน

ตัวอย่าง	จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (cfu/g)			ยีสต์และรา (cfu/g)		
	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 3	วันที่ 0	วันที่ 1	วันที่ 3
Wheat	<10	2.50×10^4	2.40×10^6	< 100	< 100	5.00×10^2
NRF	<10	1.46×10^6	4.40×10^7	< 100	< 100	2.30×10^2
DMF140	<10	3.20×10^5	3.08×10^7	< 100	< 100	9.00×10^2
EMF46	<10	1.10×10^4	1.50×10^7	< 100	< 100	2.70×10^3
ODMF140	<10	1.63×10^6	5.20×10^7	< 100	< 100	2.62×10^2
OEMF46	<10	1.34×10^6	3.60×10^7	< 100	< 100	1.89×10^2

หมายเหตุ: * <10, * < 100 ตรวจไม่พบ (ในตัวอย่างที่เจือจางต่ำสุด)

ตาราง 23 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณยีสต์ราของขนมปังปราศจากกลูเตนระหว่างการเก็บรักษา 0, 1 และ 3 วัน จากการทดลองพบว่าปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของขนมปังปราศจากกลูเตนและขนมปังสูตรควบคุมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนว่าด้วยเรื่องขนมปังปอนด์ (มผช.747/2548) ที่ระบุว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดต้องไม่เกิน 1×10^4 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม พบว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดของขนมปังในทุกตัวอย่างจะเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ ตั้งแต่วันที่ 1 และ 3 ของการเก็บรักษา ปริมาณยีสต์และราจะตรวจไม่พบในวันที่ 0

และ 1 ของการเก็บรักษา แต่จะตรวจพบปริมาณยีสต์และราเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนในวันที่ 3 ของการเก็บรักษา โดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดไว้ว่าปริมาณยีสต์และราต้องน้อยกว่า 100 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม ทั้งนี้การที่ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดและปริมาณยีสต์ราของขนมปังปราศจากกลูเตนและขนมปังสูตรควบคุมมีค่าเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในระยะเวลาการเก็บรักษาที่สั้นนั้น อาจเนื่องจากขนมปังในทุกตัวอย่างมีความชื้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้จุลินทรีย์เจริญได้มากขึ้น



บทที่ 5

บทสรุป

ตอนที่ 1 การศึกษาค่าประกอบทางเคมี กายภาพของแป้งถั่วเขียวดิบ แป้งข้าวเจ้า ทางการค้าและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาตินไนซ์

แป้งพรีเจลาตินไนซ์จากถั่วเขียว ที่ดัดแปรโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง และเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มีค่าดัชนีการดูดซับน้ำ กำลังการพองตัวและการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งถั่วเขียวดิบ และค่าดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับการเกิดพรีเจลาตินไนซ์ของแป้งสูงขึ้น แป้งพรีเจลาตินไนซ์มีค่าความสว่างลดลง และมีค่าสีเหลืองเพิ่มสูงขึ้น ค่าพลังงานในการเกิดเจลาตินไนซ์ชั้นของแป้งพรีเจลาตินไนซ์ มีค่าต่ำกว่าแป้งถั่วเขียวดิบ Peak viscosity และ Set back ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA จะมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งถั่วเขียวดิบ โดยแป้ง DMF140 และแป้ง EMF46 มีการคืนตัวต่ำกว่าแป้งพรีเจลาตินไนซ์อื่น ๆ ที่ผลิตด้วยวิธีเดียวกัน การดัดแปรแป้งโดยใช้เครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งและเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ จะทำให้เม็ดแป้งสูญเสียโครงสร้างและสูญเสียลักษณะโปรฟริงเจนส์

ตอนที่ 2 การศึกษาปริมาณแป้งพรีเจลาตินไนซ์จากถั่วเขียวที่เหมาะสมต่อคุณสมบัติของโด และคุณภาพของขนมปังเพื่อใช้ผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนสูตรมาตรฐาน

แป้ง DMF140 และ EMF46 ที่ระดับการแทนที่แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 5 สามารถนำมาพัฒนาเป็นขนมปังปราศจากกลูเตนที่มีคุณภาพ มีลักษณะของฟองอากาศ (Gas cell) สม่ำเสมอทั้งแผ่น และมีเนื้อสัมผัสดีกว่าขนมปังสูตรอื่น และขนมปังจากแป้ง EMF46 จะมีปริมาตรสูงกว่าขนมปังจากแป้ง DMF140 ขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าจะมีเนื้อสัมผัสที่แข็งและเมื่อมีการแทนที่ด้วยแป้งพรีเจลาตินไนซ์จะทำให้ค่าความแข็งของขนมปังลดลง เมื่อเพิ่มระดับการแทนที่ของแป้งพรีเจลาตินไนซ์มากขึ้นขนมปังจะมีปริมาตรลดลงและมีค่าความแข็งของขนมปังสูงขึ้น

ขนมปังปราศจากกลูเตนจะมีค่าความสว่างที่เปลือกนอกของขนมปังมากกว่าขนมปังจากแป้งสาลี และมีค่าสีเหลืองของเนื้อขนมปังมากกว่าขนมปังจากแป้งข้าวเจ้าและขนมปังที่มีการแทนที่ด้วยแป้งถั่วเขียวดิบ โดยมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่าความสว่างและค่าสีเหลืองของแป้งพรีเจลาตินไนซ์ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการดัดแปร

ตอนที่ 3 การศึกษาปริมาณน้ำและ HPMC ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์

จากการประยุกต์ใช้ RSM เพื่อหาปริมาณน้ำและไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งถั่วเขียวพรีเจลาติไนซ์ พบว่าการใช้น้ำ 110 มิลลิลิตร และ HPMC ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักแป้งทั้งหมด ในสูตร จะทำให้ขนมปังมีน้ำหนักและปริมาตรของขนมปังมากที่สุด

ตอนที่ 4 ผลศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาขนมปังปราศจากกลูเตน

ความแข็งของเนื้อขนมปังจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานานขึ้น เกิดจากการเกิดรีโทรเกรเดชันของสตาร์ช ขนมปังที่เติม HPMC จะชะลอการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ ขนมปัง ODMF140 และ OEMF46 จะมีค่าความแข็งของขนมปังที่ต่ำกว่าขนมปังจากแป้งข้าวเจ้า และขนมปังที่ไม่มีการเติม HPMC

ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ของขนมปังปราศจากกลูเตนและขนมปังสูตรควบคุมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษานานขึ้น โดยขนมปังจะเสื่อมเสียภายในระยะเวลา 3 วัน



บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีแป้ง (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- งามชื่น คงเสรี. (2537). ศักยภาพพันธุ์ข้าวไทยสู่การแปรรูป. ใน การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 32 สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร ศักยภาพข้าวไทยทิศทางใหม่สู่ อุตสาหกรรม (น. 5-17). กรุงเทพฯ: คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จริยา สุขสวัสดิ์. (2554). ผลของรีซิสแทนต์สตาร์ช ซูโครสเอสเทอร์ และไฮดรอกซีโพรพิลเมทิล เซลลูโลสต่อคุณภาพของโดและขนมปัง. ว. วิทยาศาสตร์เกษตร, 42(2 พิเศษ),
- จิตธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2541). เบเกอรี่เทคโนโลยีเบื้องต้น (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ไชยา เพ็ญอุ่น. (2539). ถั่วและพืชคลุมดิน. สุพรรณบุรี: ศูนย์เทคโนโลยีเพื่อสังคม.
- ดารารัตน์ นาคลออ, อารักสา แสงนาค, และกุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์. (2554). การปรับปรุงคุณภาพ ของแป้งเมล็ดขนุนโดยวิธีการพรีเจลาติไนซ์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 16(1), 12-21.
- ทองขาว อินสมพันธ์. (2545). เอกสารประกอบคำสอนถั่วเขียว. เชียงใหม่: ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นิธยา รัตนพานนท์. (2545). เคมีอาหาร. กรุงเทพฯ: โอ เอส พริ้นติ้ง เฮ้าส์.
- ปาริตา ขุนแอ. (2550). ผลของการดัดแปรด้วยวิธีความร้อนขึ้นต่อสมบัติทางรีโอโลยีและการเกิด รีโทรเกรเดชั่นของสตาร์ชข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน.(วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต). สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พนิดา โนนใหญ่. (2549). ผลของการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นต่อคุณสมบัติของสตาร์ช ข้าวเจ้า (วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- พนิดา วงศ์ปรีดี. (2552). การพัฒนาวิธีการผลิตแป้งข้าวเจ้าที่ละลายในน้ำเย็น (วิทยานิพนธ์ ปริญญา มหาบัณฑิต). มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- ภรณี ลิ้มปิสุต. (2540). การใช้แป้งถั่วเขียวผสมในแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมอบ (รายงานการ วิจัย). กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ภานุมาศ รุ่งเรืองอารี. (2541). ผลของแป้งข้าวเจ้าฟรีเจลาตินไนซ์และการเสริมโปรตีนต่อคุณภาพของขนมปังจากแป้งข้าวเจ้า (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ราชบัณฑิตยสถาน. (2525). พจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2525. กรุงเทพฯ: อักษรเจริญทัศน์.

ลัดดาวัลย์ ไกรพานนท์. (2550). การดัดแปรสตาซ์ข้าวเจ้าโดยวิธีการให้ความร้อนขึ้นร่วมกับวิธีการทางเคมี (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ล้านแก้ว แพงอรุณ. (2554). การพัฒนาอาหารวัยอ่อนและการใช้ประโยชน์แป้งดัดแปรในอาหารระยะเริ่มต้นสำหรับปลาดุกลูกผสม (*Clarias macrocephalus* x *Clarias gariepinus*) (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วรรณา ตูลย์ธัญ. (2549). เคมีอาหารของคาร์โบไฮเดรต. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิไล รังสาดทอง. (2545). เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. (2559). แนวโน้มและทิศทางการส่งออกข้าวไทย ในปี 2559. สืบค้น 27 สิงหาคม 2559, จาก <http://fic.nfi.or.th/foodsectordatabank-detail.php?id=9>

สมาคมพ่อค้าข้าวโพดและพืชพันธุ์ไทย. (2559). ถั่วเขียว. สืบค้น 27 สิงหาคม 2559, จาก <http://www.thaimaizeandproduce.org/thaimaize/botany-green-bean>

สวรรค์ จันทระเทพนิมากุล. (2551). คุณสมบัติทางรีโอโลยีของโดและผลิตภัณฑ์อาหารเข้าสำเร็จรูป. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2529). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แป้งข้าวเจ้า มอก.638-2529. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2535). มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร มอก. 1073-2535. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2557). ถั่วเขียว. สืบค้นเมื่อ 27 สิงหาคม 2559. จาก www.oae.go.th/download/document_tendency/journalofecon2558

สุนีย์ โชตินิรมาน, กำไล เลหาพัฒนาเลิศ, เอ็จ สโรบล, และกัลยาณรงค์ ศรีรอด. (1-4 กุมภาพันธ์ 2543). สมบัติทางฟิสิกส์เคมีของแป้งถั่วเขียวที่สกัดจากพันธุ์ที่พัฒนาในประเทศไทย. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38 สาขาวิศวกรรมศาสตร์ และสาขาอุตสาหกรรมเกษตร. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2550). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ นัยวิกุล, และลินดา พงศ์ผาสุก. (2536). อาหารเข้าจากธัญชาติ. *วารสารอุตสาหกรรมเกษตร*, 4(3), 5-14.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2538). *เคมีทางธัญญาหาร*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Alvarenga, N. B., Cebola Lidon, F., Belga, E., Motrena, P., Guerreiro, S., & Carvalho, M. J. (2011). Characterization of gluten-free bread prepared from maize, rice and tapioca flours using the hydrocolloid seaweed agar-agar. *Recent Research in Science and Technology*, 3, 64-68.
- Amemiya, J., & Menjivar, J. (1992). Comparison of small and large deformation measurements to characterize the rheology of wheat flour doughs. *Journal of Food Engineering*, 16(1), 91-108.
- Anderson, R., Conway, H., Pfeifer, V., & Griffin, E. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Science Today*, 14(1), 4-12.
- AOAC. (2000). *Official method of analysis of AOAC international* (17th ed.). Virginia: The association of official analytical chemists.
- Bacteriological Analytical Manual Online. (2001). *Food and drug administration, USA Chapter 18, Yeasts, Molds and Mycotoxins*. USFDA. Retrieved May 10, 2016, from <http://www.fda.gov/Food/ScienceResearch/LaboratoryMethods/BacteriologicalAnalyticalManualBAM/ucm063346.htm>
- Bacteriological analytical manual Online. (2001). *Food and drug administration, USA Chapter 3, Aerobic plate count*. USFDA. Retrieved May 10, 2016, from <http://www.fda.gov/Food/ScienceResearch/LaboratoryMethods/BacteriologicalAnalyticalManualBAM/ucm063346.htm>
- Barcenas, M. E., & Rosell, C. M. (2005). Effect of HPMC addition on the microstructure, quality and aging of wheat bread. *Food hydrocolloids*, 19(6), 1037-1043.
- Bemiller, J. N. (1997). Starch modification: challenges and prospects. *Starch-Stärke*, 49(4), 127-131.

- Beynum, G.M.A., & Roels J.A. (1985). *Starch Conversion Technology*. New York: Academic Press:
- Chang, Y. H., Lin, C. L., & Chen, J. C. (2006). Characteristics of mung bean starch isolated by using lactic acid fermentation solution as the steeping liquor. *Food Chemistry*, 99(4), 794-802.
- Chartrand, L. J., Russo, P. A., Duhaime, A. G., & Seidman, E. G. (1997). Wheat starch intolerance in patients with Celiac disease. *Journal of the American Dietetic Association*, 97(6), 612-618.
- Cheftel, J. C. (1986). Nutritional effects of extrusion-cooking. *Food Chemistry*, 20(4), 263-283.
- Chiu, C. w., & Solarek, D. (2009). *Modification of starches. Starch: Chemistry and technology* (3rd ed.). New York: Academic Press is an imprint of Elsevier.
- Curic, D., Novotni, D., Bauman, I., Kricka, T., & Dugum, J. (2007a). Optimization of extrusion cooking of cornmeal as raw material for bakery products. *Journal of Food process engineering*, 32(2), 294-317.
- Curic, D., Novotni, D., Tušak, D., Bauman, I., & Gabric, D. (2007b). Gluten-free bread production by the corn meal and soybean flour extruded blend usage. *Agriculturae Conspectus Scientificus (ACS)*, 72(3), 227-232.
- Czuchajowska, Z., & Pomeranz, Y. (1989). in Crumb Center and Near-Crust Zones of Bread During Storage. *Cereal Chemistry*, 66(4), 305-309.
- De la Hera, E., Martinez, M., & Gómez, M. (2013). Influence of flour particle size on quality of gluten-free rice bread. *LWT-Food Science and Technology*, 54(1), 199-206.
- Demirkesen, I., Campanella, O. H., Sumnu, G., Sahin, S., & Hamaker, B. R. (2014). A study on staling characteristics of gluten-free breads prepared with chestnut and rice flours. *Food and bioprocess technology*, 7(3), 806-820.
- Ding, Q.-B., Ainsworth, P., Tucker, G., & Marson, H. (2005). The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, 66(3), 283-289.

- Dobraszczyk, B., & Morgenstern, M. (2003). Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science*, 38(3), 229-245.
- Dogan, S. F., Sahin, S., & Sumnu, G. (2005). Effects of soy and rice flour addition on batter rheology and quality of deep-fat fried chicken nuggets. *Journal of Food Engineering*, 71(1), 127-132.
- Doublier, J., Colonna, P., & Mercier, C. (1986). Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. II. Rheological characterization of starch pastes. *Cereal Chemistry*, 63(3), 240-246.
- Eliasson, A., & Larsson, K. (1993). *Physicochemical behavior of the components of wheat flour: Cereals in Breadmaking*. New York: Marcel Dekker.
- Filli, K., Nkama, I., Abubakar, U., & Jideani, V. (2010). Influence of of extrusion variables on some functional properties of extruded millet-soybean for the manufacture of fura: A Nigerian traditional food. *African Journal of Food Science*, 4(6), 342-352.
- Fordham, J., Wells, C., & Chen, L. (1975). Sprouting of seeds and nutrient composition of seeds and sprouts. *Journal of Food Science*, 40(3), 552-556.
- French, D. (1984). *Organization of starch granules. Starch: Chemistry and technology* (2nd ed.). New York: Academic Press.
- Gallagher, E., Gormley, T., & Arendt, E. (2003). Crust and crumb characteristics of gluten free breads. *Journal of Food Engineering*, 56(2), 153-161.
- Gallagher, E., Gormley, T., & Arendt, E. (2004). Recent advances in the formulation of gluten-free cereal-based products. *Trends in Food Science and Technology*, 15(3), 143-152.
- Gibson, T., Solah, V., & McCleary, B. (1997). A procedure to measure amylose in cereal starches and flours with concanavalin A. *Journal of Cereal Science*, 25(2), 111-119.
- Gill, S., Vasanthan, T., Ooraikul, B., & Rosnagel, B. (2002). Wheat bread quality as influenced by the substitution of waxy and regular barley flours in their native and extruded forms. *Journal of Cereal Science*, 36(2), 219-237.

- Glicksman, M. (1969). *Gum Technology in Food Industry*. New York: Academic Press.
- Guilbot, A., & Mercier, C. (1985). *Starch. The polysaccharides* (3rd ed.). New York: Academic Press.
- Gujral, H. S., & Rosell, C. M. (2004). Functionality of rice flour modified with a microbial transglutaminase. *Journal of Cereal Science*, 39(2), 225-230.
- Gujral, H. S., Haros, M., & Rosell, C. M. (2004). Improving the texture and delaying staling in rice flour chapati with hydrocolloids and α -amylase. *Journal of Food Engineering*, 65(1), 89-94.
- Gutkoski, L., & El-Dash, A. (1999). Effect of extrusion process variables on physical and chemical properties of extruded oat products. *Plant Foods for Human Nutrition*, 54(4), 315-325.
- Hagenimana, A., Ding, X., & Fang, T. (2006). Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 38-46.
- He, H., & Hoseney, R. (1991). Gas retention in bread dough during baking. *Journal of Cereal chemistry*, 68(4), 334-336.
- Hsu, S., Lu, S., & Huang, C. (2000). Viscoelastic changes of rice starch suspensions during gelatinization. *Journal of Food Science*, 65(2), 215-220.
- Jambrak, A. R., Herceg, Z., Šubarić, D., Babić, J., Brnčić, M., Brnčić, S. R., ... Gelo, J. (2010). Ultrasound effect on physical properties of corn starch. *Carbohydrate Polymers*, 79(1), 91-100.
- Juliano, B. (1984). *Rice starch: production, properties and uses. Starch: Chemistry and technology* (2nd ed.). N.P.: Academic Press: Imprint.
- Kaur, M., Sandhu, K. S., Singh, N., & Lim, S. T. (2011). Amylose content, molecular structure, physicochemical properties and in vitro digestibility of starches from different mung bean (*Vigna radiata* L.) cultivars. *Starch Stärke*, 63(11), 709-716.
- Kim, S. H., Lee, B. H., Baik, M. Y., Joo, M. H., & Yoo, S. H. (2007). Chemical structure and physical properties of mung bean starches isolated from 5 domestic cultivars. *Journal of Food Science*, 72(9), C471-C477.

- Kim, S., & D'apponia, B. (1977). Bread staling studies, III: Effect of pentosans on dough, bread, and bread staling rate. *Cereal Chemistry*, 54, 225-229.
- Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N., & Biliaderis, C. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*, 79(3), 1033-1047.
- León, A. E., Barrera, G. N., Pérez, G. T., Ribotta, P. D., & Rosell, C. M. (2006). Effect of damaged starch levels on flour-thermal behaviour and bread staling. *European Food Research and Technology*, 224(2), 187-192.
- Li, S., Ward, R., & Gao, Q. (2011). Effect of heat-moisture treatment on the formation and physicochemical properties of resistant starch from mung bean (*Phaseolus radiatus*) starch. *Food hydrocolloids*, 25(7), 1702-1709.
- Light, J. M. (1990). Modified food starches: why, what, where, and how. *Cereal Foods World*, 35(11), 1081-1092.
- Majzoobi, M., Radi, M., Farahnaky, A., Jamalian, J., Tongtang, T., & Mesbahi, G. (2010). Physicochemical properties of pre-gelatinized wheat starch produced by a twin drum dryer. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 13, 193-202.
- Mariotti, M., Pagani, M. A., & Lucisano, M. (2013). The role of buckwheat and HPMC on the breadmaking properties of some commercial gluten-free bread mixtures. *Food hydrocolloids*, 30(1), 393-400.
- McCarthy, D., Gallagher, E., Gormley, T., Schober, T., & Arendt, E. (2005). Application of response surface methodology in the development of gluten-free bread. *Cereal Chemistry*, 82(5), 609-615.
- Meiners, C. R., Derise, N. L., Lau, H. C., Crews, M. G., Ritchey, S., & Murphy, E. W. (1976). The content of nine mineral elements in raw and cooked mature dry legumes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 24(6), 1126-1130.
- Mendoza, N. (2005). Coeliac disease: an overview of the diagnosis, treatment and management. *Nutrition Bulletin*, 30(3), 231-236.

- Menegassi, B., Pilosof, A. M., & Areas, J. A. (2011). Comparison of properties of native and extruded amaranth (*Amaranthus cruentus* L. – BRS Alegria) flour. *LWT Food Science and Technology*, 44(9), 1915-1921.
- Mercier, C., & Feillet, P. (1975). Modification of carbohydrate components by extrusion-cooking of cereal products [Wheat, rice, corn]. *Cereal Chemistry*, 52, 283-297.
- Miñarro, B., Albanell, E., Aguilar, N., Guamis, B., & Capellas, M. (2012). Effect of legume flours on baking characteristics of gluten-free bread. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 476-481.
- Morris, E. (1995). Polysaccharide rheology and in-mouth perception. In Stephen, A.M. (Ed.), *Food polysaccharides and their applications*, New York: Academic Press.
- Nakorn, K. N., Tongdang, T., & Sirivongpaisal, P. (2009). Crystallinity and rheological properties of pregelatinized rice starches differing in amylose content. *Starch-Stärke*, 61(2), 101-108.
- Nishita, K., & Bean, M. (1979). Physicochemical properties of rice in relation to rice bread. *Cereal Chemistry*, 56(3), 185-189.
- Ozola, L., Straumite, E., Galoburda, R., & Klava, D. (2012). Application of extruded maize flour in gluten-free bread formulations. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 64, 883-888.
- Powell, E. L. (1967). Production and use of pregelatinized starch. In Whistler, R. L. and Pasxhall, E. F. (Eds.), *Starch: Chemistry and technology Vol. II*. New York: Academic Press:
- Prabhavat, S. (1987). *Seminar on mung bean at Ambassador Hotel, Bangkok, 16-20 November 1987*. Bangkok: Ministry of Agriculture and and Cooperative, Kasetsart University, and Asian Vegetable Research and Development Centre.
- Pruessner, H. T. (1998). Detecting celiac disease in your patients. *Journal of American family physicians*, 57(5), 1023-1044.

- Purhagen, J. K., Sjöö, M. E., & Eliasson, A. C. (2012). The anti-staling effect of pre-gelatinized flour and emulsifier in gluten-free bread. *European Food Research and Technology*, 235(2), 265-276.
- Ribotta, P. D., & Le Bail, A. (2007). Thermo-physical assessment of bread during staling. *LWT-Food Science and Technology*, 40(5), 879-884.
- Ribotta, P. D., Ausar, S. F., Morcillo, M. H., Pérez, G. T., Beltramo, D. M., & León, A. E. (2004). Production of gluten-free bread using soybean flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(14), 1969-1974.
- Rohaya, M., Maskat, M. Y., & Ma'aruf, A. (2013). Rheological properties of different degree of pregelatinized rice flour batter. *Sains Malaysiana*, 42(12), 1707-1714.
- Ruel-Gariepy, E., & Leroux, J.-C. (2004). In situ-forming hydrogels—review of temperature-sensitive systems. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 58(2), 409-426.
- Rupp, P. C., & Schwartz, S. (1988). Characterization of the action of *Bacillus subtilis* alpha-amylase on sweet potato starch, amylose and amylopectin. *Journal of Food Biochemistry*, 12(3), 191-204.
- Santos, E., Rosell, C., & Collar, C. (2008). Gelatinization and retrogradation kinetics of high-fiber wheat flour blends: a calorimetric approach. *Cereal Chemistry*, 85(4), 455-463.
- Schober, T. J., Messerschmidt, M., Bean, S. R., Park, S.-H., & Arendt, E. K. (2005). Gluten-free bread from sorghum: quality differences among hybrids. *Cereal Chemistry*, 82(4), 394-404.
- Schoch, T. (1964). Swelling power and solubility of granular starches. In Whistler, R. L. (Ed.). *Methods in Carbohydrate chemistry*, Vol. IV. New York: Academic Press.
- Sciarini, L., Ribotta, P., Leon, A., & Pérez, G. (2012). Incorporation of several additives into gluten free breads: Effect on dough properties and bread quality. *Journal of Food Engineering*, 111(4), 590-597.
- Segura, M. E. M., & Rosell, C. M. (2011). Chemical composition and starch digestibility of different gluten-free breads. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66(3), 224-230.

- Shaheen, S., Harun, N., Khan, F., Hussain, R. A., Ramzan, S., Rani, S., Khalid, Z., ... Zafar, M. (2012). Comparative nutritional analysis between *Vigna radiata* and *Vigna mungo* of Pakistan. *African Journal of Biotechnology*, 11(25), 6694-6702.
- Sharma, S. (1981). Gums and hydrocolloids in oil-water emulsions. *Food Technology*, 35(1), 59-67.
- Singh, H., Chang, Y. H., Lin, J.-H., Singh, N., & Singh, N. (2011). Influence of heat-moisture treatment and annealing on functional properties of sorghum starch. *Food research international*, 44(9), 2949-2954.
- Sivaramakrishnan, H. P., Senge, B., & Chattopadhyay, P. (2004). Rheological properties of rice dough for making rice bread. *Journal of Food Engineering*, 62(1), 37-45.
- Soison, B., Jangchud, K., Jangchud, A., Harnsilawat, T., Piyachomkwan, K., Charunuch, C., & Prinyawiwatkul, W. (2014). Physico-functional and antioxidant properties of purple flesh sweet potato flours as affected by extrusion and drum drying treatments. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(9), 2067-2075.
- Steffe, J.F. (1996). *Rheological Method in Food Process Engineering* (2nd ed.). N.P.: East Lansing, Freeman Press.
- Takeda, Y., Hizukuri, S., & Juliano, B. O. (1987). Structures of rice amylopectins with low and high affinities for iodine. *Carbohydrate Research*, 168(1), 79-88.
- Tang, D., Dong, Y., Ren, H., Li, L., & He, C. (2014). A review of phytochemistry, metabolite changes, and medicinal uses of the common food mung bean and its sprouts (*Vigna radiata*). *Chemistry Central Journal*, 8(1), 1.
- Upadhyay, R., Ghosal, D., & Mehra, A. (2012). Characterization of bread dough: Rheological properties and microstructure. *Journal of Food Engineering*, 109(1), 104-113.

USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 25. (2011). *Nutrient data for 16080, Mung beans, mature seeds*. Retrieved September 20, 2016, from <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/4694?fg=andman=andlfacet=andcount=andmax=25andsort=andqllookup=mung+beanandoffset=andformat=Fullandnew=>.

Wieser, H., & Koehler, P. (2008). The biochemical basis of Celiac disease. *Cereal Chemistry*, 85(1), 1-13.

Witczak, M., Juszczak, L., Ziobro, R., & Korus, J. (2012). Influence of modified starches on properties of gluten-free dough and bread. Part I: Rheological and thermal properties of gluten-free dough. *Food hydrocolloids*, 28(2), 353-360.

Xu, J., Bietz, J. A., & Carriere, C. J. (2007). Viscoelastic properties of wheat gliadin and glutenin suspensions. *Food Chemistry*, 101(3), 1025-1030.

Xue, J., & Ngadi, M. (2006). Rheological properties of batter systems formulated using different flour combinations. *Journal of Food Engineering*, 77(2), 334-341.



การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

1. ปริมาณความชื้น วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (2000)

1.1 อบภาชนะสำหรับหาความชื้นในตูบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง นำออกจากตูบลมร้อนใส่ไว้ในโถดูดความชื้นหลังจากนั้นชั่งน้ำหนัก

1.2 ชั่งตัวอย่างแห้ง 2 กรัม ลงในภาชนะอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบจนน้ำหนักคงที่ และบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน

1.3 นำไปอบในตูบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 5-6 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่ ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก
คำนวณ

$$\text{ร้อยละความชื้น (โดยน้ำหนักเปียก)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละความชื้น (โดยน้ำหนักเปียก)} = \frac{\text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก}}{(100 - \text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก})} \times 100$$

2. ปริมาณโปรตีน วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (2000)

2.1 ชั่งตัวอย่างแห้ง 1 กรัม เติมคະตะลิสต์เจลด้าห์ลแบบเม็ด จำนวน 2 เม็ด และกรดซัลฟูริกเข้มข้น (ร้อยละ 98) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดสำหรับย่อย

2.2 นำไปย่อยโดยใช้เครื่องย่อยโปรตีนในตู้ดูดควัน ย่อยจนสารละลายมีสีฟ้าใส หรือไม่มีสี ตั้งทิ้งไว้จนเย็นที่อุณหภูมิห้อง

2.3 เติมสารละลายกรดบอริกเข้มข้นร้อยละ 2 ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 125 มิลลิลิตร และเติมอินดิเคเตอร์ 3 หยด เขย่าให้เข้ากัน

2.4 นำเข้าเครื่องกลั่น โดยให้ส่วนปลายของอุปกรณ์ควบแน่นจุ่มลงในสารละลายกรด

2.5 นำสารละลายไปไทเทรตกับกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จนได้สารละลายสีชมพู และทำ Blank เช่นเดียวกับตัวอย่าง

คำนวณ

$$\text{ร้อยละของโปรตีน} = \frac{[(V_1 - V_2)(M)(1.4007)(5.71)]}{W}$$

V_1 = ปริมาตร (มิลลิลิตร) ของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง

V_2 = ปริมาตร (มิลลิลิตร) ของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ไทเทรตกับ Blank

M = ความเข้มข้น (โมลาร์) ของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก

W = น้ำหนักตัวอย่างเป็นมิลลิกรัม

5.71 = Conversion factor ของถั่ว

3. ปริมาณไขมัน วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (2000)

3.1 อบ Extraction cup ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้นหลังจากนั้นชั่งน้ำหนักชั่งน้ำหนัก

3.2 ชั่งตัวอย่าง 5 กรัม ใส่ลงในหลอดสำหรับใส่ตัวอย่าง (Thimble)

3.3 นำหลอดตัวอย่างใส่เข้าไปใน Extraction Unit เติมน้ำมันตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ ลงใน Extraction cup จนเต็ม

3.4 ให้ความร้อนทำการสกัดไขมันจากตัวอย่างนานประมาณ 3-4 ชั่วโมง

3.5 กลั่นเอาปิโตรเลียมอีเทอร์ออกจากไขมัน นำ Extraction cup และไขมันไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก

คำนวณ

$$\text{ร้อยละของไขมัน} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันในตัวอย่าง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}} \times 100$$

4. ปริมาณเยื่อใย วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (2000)

4.1 ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ลงในปีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร เติมน้ำ Sulfuric acid 0.128 M ปริมาตร 150 มิลลิลิตร แล้วเติมน-Octanol 2-3 หยด ต้มให้เดือดเป็นเวลา 30 นาที

4.2 กรองตัวอย่างขณะร้อนผ่านด้วยกรองแบบแก้ว (Filter crucible) ล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งน้ำล้างหมดความเป็นกรด

4.3 ถ่ายกากที่ได้ในปีกเกอร์ใบเดิมเดิมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 200 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดเป็นเวลา 30 นาที

4.4 กรองขณะร้อนผ่านด้วยกรองแบบแก้ว (Filter crucible) อันเดิมล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งน้ำล้างหมดความเป็นด่าง

4.5 นำด้วยกรอง (Filter crucible) ไปอบให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาในเตาอบที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง นำมาใส่ในโถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก
คำนวณ

$$\text{ร้อยละของเยื่อใย} = \frac{(W_1 - W_2)}{W} \times 100$$

W = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

W_1 = ปริมาณเยื่อใยที่ได้หลังจากการอบ

W_2 = ปริมาณเยื่อใยที่ได้หลังจากการเผา

5. ปริมาณเยื่อใย วิเคราะห์ตามวิธี AOAC (2000)

5.1 นำ Porcelain crucible ไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก

5.2 ชั่งตัวอย่าง 2 กรัม ใส่ใน Porcelain crucible ที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปเผาบน Hot plate จนไม่มีควันดำแล้วจึงนำตัวอย่างใส่ในเตาเผาอุณหภูมิประมาณ 500-550 องศาเซลเซียส

5.3 เผาตัวอย่างจนกระทั่งได้เถ้าสีขาว (อาจนานถึง 6 ชั่วโมง) ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก

คำนวณ

$$\text{ร้อยละของเก่า} = \frac{(A-B)}{W} \times 100$$

A = น้ำหนักถ้วย + เก้า

B = น้ำหนักถ้วย

W = น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา

6. ดัชนีการละลายน้ำ (WSI) และดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI)

ดัชนีการละลายน้ำและดัชนีการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index ; WAI and Water Solubility Index: WSI) ตามวิธีของ Anderson, et al. (1969) ซึ่งตัวอย่างแป้ง 2.5 กรัม ใส่ตัวอย่างแป้งในหลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตรที่ทราบน้ำหนัก เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน และเขย่าทุกๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที นำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 2,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที เทส่วนใสลงในถ้วยอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมงหรือจนกว่าตัวอย่างจะแห้งสนิทและมีน้ำหนักคงที่ นำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก และชั่งน้ำหนักตะกอนแป้งในหลอดเหวี่ยง

คำนวณ

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

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

7. กำลังการพองตัวและการละลาย (Swelling power and solubility)

โดยชั่งตัวอย่างแป้ง 0.5 กรัม ใส่ตัวอย่างแป้งในหลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 15 มิลลิลิตร นำไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ความเร็วรอบ 2,200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเทส่วนใสด้านบนลงในภาชนะ (Moisture can) ที่ทราบน้ำหนัก

นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมงหรือจนกว่าตัวอย่างจะแห้งสนิทและมีน้ำหนักคงที่ นำไปเก็บไว้ในโถสุญญากาศความชื้น ทิ้งให้เย็นแล้วชั่งน้ำหนัก ส่วนที่ตกตะกอนนำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อนำมาคำนวณอัตราการพองตัว

คำนวณ

$$\text{ร้อยละของการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\text{ร้อยละกำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักแป้งที่พองตัว}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น} \times (100 - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น})}$$

8. คุณสมบัติทางความร้อน

โดยใช้เครื่อง DSC (Model DSC 1. Star System, Mettler Toledo, Switzerland). ตามวิธีของ Li, et al. (2011) ลักษณะของการเกิดเจลาคิโนซิสวิเคราะห์โดยเครื่อง DSC เตรียมตัวอย่างโดยใส่ตัวอย่างแป้ง 7 มิลลิกรัม ลงใน DSC aluminium pan เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร ลงไปในตัวอย่าง ปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปป้อนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา จึงนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลาคิโนซิส โดยเริ่มจากอุณหภูมิ 30 ถึง 150 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยใช้ Pan เปล่า เป็น reference วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (Onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุด (Peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (Conclusion temperature, T_c) และค่าเอนทัลปี (Enthalpy, ΔH)

9. คุณสมบัติด้านความหนืด

โดยใช้เครื่อง RVA (Model 4500, Perten Instruments Australia Pty Ltd. s., Australia) ตามวิธีการของ Newport Scientific Method 1 (1997) โดยเตรียมตัวอย่าง 3 กรัม ใส่ใน Aluminum RVA sample canister เติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตรและทำวิเคราะห์ดังนี้

ตาราง

เวลา	ประเภท	อุณหภูมิ
0:00:00	อุณหภูมิ	50 องศาเซลเซียส
0:00:00	ความเร็วรอบ	960 รอบต่อนาที
0:00:10	ความเร็วรอบ	160 รอบต่อนาที
0:01:00	อุณหภูมิ	50 องศาเซลเซียส
0:04:42	อุณหภูมิ	95 องศาเซลเซียส
0:07:12	อุณหภูมิ	95 องศาเซลเซียส
0:11:00	อุณหภูมิ	50 องศาเซลเซียส

บันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเกิดความร้อน (Pasting temperature) ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ค่าความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (Break down) ค่าความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) และค่าการคืนตัว (Setback viscosity)

10. การเสียสภาพของโปรตีน (Protein denaturation) โดยวิธี Nitrogen Solubility Index (NSI) ตามวิธีของ Shaheen, et al., (2012)

โดยเติมน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร ในตัวอย่างแป้ง 0.5 กรัม ผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 45 นาที ปรับ pH ให้เท่ากับ 7 แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำตัวอย่างปริมาตร 40 มิลลิลิตร ไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แยกตะกอนแป้งและส่วนใสออกจากกันโดยกรองส่วนใสด้านบนผ่านกระดาษกรองให้ได้ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธีเจลดาล์ (Kjeldahl method)

คำนวณ

$$\text{ร้อยละการละลายน้ำ} = \frac{\text{จำนวนไนโตรเจนในส่วนของเหลวเหนือตะกอน}}{\text{จำนวนไนโตรเจนในตัวอย่างแป้ง}} \times 100$$

11. ความหนืดของน้ำแป้งพรีเจลาติไนซ์จากถั่วเขียว ดัดแปลงวิธีจาก Kim, et al. (2012)

ด้วยเครื่อง Rheometer (Bohlin Gemini 200 HR Nano, Malvern Instruments, United Kingdom) วิเคราะห์ค่าความหนืดของแป้ง (Steady shear viscosity) ซึ่งใช้หัววัดไทเทเนียมแบบหัวเรียบ (Parallel plates) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างหัววัด 1000 ไมโครเมตร ทำการทดลองที่ 25 องศาเซลเซียส ที่อัตราเฉือน (Shear rate) ระหว่าง $0.001-1000 \text{ s}^{-1}$

12. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไบรฟริงเจนส์ของเม็ดแป้ง ด้วยเครื่อง Polarized light microscope MX4300H, Meiji, Japan)

เตรียมน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 0.5 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก) หยดน้ำแป้งลงบนแผ่นสไลด์ 1-2 หยด และปิดด้วยกระจกปิดสไลด์การนำเลนส์โพลาไรซ์วางบนแหล่งกำเนิดแสงของกล้องจุลทรรศน์ จากนั้นปรับความคมชัดของภาพแล้วถ่ายภาพเม็ดแป้งภายใต้แสงโพลาไรซ์

13. ปริมาตรขนมปังโดยใช้การแทนที่ด้วยเมล็ดงา (มาตรฐานอุตสาหกรรม., 2524)

การตรวจสอบค่าปริมาตร โดยวิธี Rapeseed displacement ใช้เมล็ดงาในการแทนที่ดัดแปลงตามวิธีของ มอก. 374-2534 การวัดค่าปริมาตรทำโดยวัดปริมาตรของภาชนะ ด้วยการเติมเมล็ดงาให้เต็มภาชนะ แล้ววัดปริมาตรของเมล็ดงาที่ใส่ในภาชนะ โดยตวงด้วยกระบอกตวงที่มีขีดแบ่งปริมาตร ใส่ขนมปังที่เย็นแล้วลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรของเมล็ดงา เติมเมล็ดงาให้เต็มช่องว่างทั้งด้านขอบข้างและด้านบนของภาชนะ วัดปริมาตรของเมล็ดงาที่ใช้เติมลงไปทั้งหมด

คำนวณ

$$\text{ปริมาตรขนมปัง} = \text{ปริมาตรงาเริ่มต้น} - \text{ปริมาตรงาหลังแทนที่ด้วยขนมปัง}$$

14. การประเมินคุณสมบัติทางลักษณะสัมผัส หรือ texture analysis ดัดแปลงวิธีจาก Hera, et al. (2013)

วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (QTS 25, Brookfield, England) ใช้หัววัดแบบกด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร ด้วยวิธีการวัดแบบ Texture Profile Analysis (TPA) เป็นการให้แรงกด (Compression test) ลงบนตัวอย่างอาหาร 2 ครั้ง กดลงไปเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความสูงของตัวอย่าง ด้วยความเร็วหัววัด 2 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยใช้ส่วนตรงกลางของก้อนขนมปัง ที่มีความหนา 10 มิลลิเมตร วิเคราะห์ค่าความแข็ง (Hardness) คือแรงที่ต้องใช้

ในการทำให้ตัวอย่างเสียรูป ค่าความสามารถเกาะรวมตัวกัน (Cohesiveness) คือ ขอบเขตของวัสดุที่สามารถเสียรูปก่อนที่จะเกิดการแตกหัก ค่าการทนต่อการเคี้ยว (Chewiness) คือ แรงที่ใช้ในการเคี้ยวหรือบดตัวอย่างจนกระทั่งเสียรูป ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) คือ อัตราการคืนตัวอย่างยืดหยุ่นที่เกิดขึ้นเมื่อถอนแรงบีบอัดออก ค่าความเหนียวเป็นยางหรือกาว (Gumminess) คือ แรงที่ต้องใช้ในการแยกตัวอย่างที่เป็นกิ่งของแข็งจนกระทั่งเสียรูป โดยเป็นตัวอย่างที่มี Hardness ต่ำและมี Cohesiveness สูง

15. วิเคราะห์สีของเนื้อขนมปัง (Crust) และเปลือกนอก (Crumb)

วิเคราะห์สี ด้วยเครื่อง Hunter Lab ใช้โปรแกรม Universal วิเคราะห์ค่า L^* , a^* , b^* โดยให้ค่าสี L^* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) ค่าสี a^* เป็นค่าสีแดงและสีเขียว (Redness/Greenness) และค่าสี b^* เป็นค่าสีเหลืองและสีน้ำเงิน (Yellowness/Blueness) นำตัวอย่างขนมปังปราคาจากกลูเตนมาวิเคราะห์โดยสลับตำแหน่งตัวอย่าง 4 ตำแหน่ง ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

16. ศึกษาคุณสมบัติของโด (Dough rheology)

ทำการศึกษาคุณสมบัติของโด ดัดแปลงวิธีจาก Sciarini, et al. (2012) ด้วยเครื่อง Rheometer (Bohlin Gemini 200 HR Nano, Malvern Instruments, United Kingdom) ศึกษาค่า Storage modulus (G'), Loss modulus (G'') และ Loss tangent ($\tan \delta$) ซึ่งใช้หัววัดแบบ Parallel plates ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร เตรียมตัวอย่างโดของขนมปังปราคาจากกลูเตนจากสูตรมาตรฐาน โดยที่ไม่ผสมยีสต์เข้าไป พักไว้ 15 นาที ก่อนนำไปวางไว้ระหว่าง Plate และพักไว้อีก 5 นาที จากนั้นตัดแต่งโดส่วนที่เกินออกให้เสมอกับ Plate ก่อนเริ่มการวิเคราะห์

หา Viscoelastic linear range โดยวางตัวอย่างบนแท่นตัวอย่าง แล้วทำการวัดค่า G' เพื่อหาช่วง Viscoelastic linear range โดยกำหนด Strain sweep จาก 0.1-100%, Constant frequency 1 Hz และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ทำ Frequency sweeps test วิเคราะห์โดยใช้ Strain ช่วง Viscoelastic linear range (ที่ได้จากข้างต้น) โดยกำหนดระยะห่างระหว่างหัววัด 2000 ไมโครเมตร ช่วงความถี่ 0.1-10 เฮิรตซ์และความเครียด (Strain) 0.05% และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (ทดสอบแบบหมุนหรือให้แรงกระทำในทิศทางสลับซ้ายขวา (Oscillation))

18. คุณสมบัติทางความร้อน เพื่อศึกษาการเกิดรีโทรเกรเดชันระหว่างการเก็บรักษาโดยใช้เครื่อง DSC (Model DSC 1. Star System, Mettler Toledo, Switzerland) ดัดแปลงวิธีของ Li, et al. (2011); León, et al. (2006)

เริ่มจากศึกษาลักษณะของการเกิดเจลาติไนซ์ โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC เตรียมตัวอย่างโดยใส่ตัวอย่างแป้ง 7 มิลลิกรัมลงใน DSC aluminium pan เติมน้ำกลั่น

15 มิลลิลิตรลงในตัวอย่าง ปิดฝาให้สนิท จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาจึงนำมาวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลาตินในเซชัน โดยเริ่มจากอุณหภูมิ 30 ถึง 150 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที โดยใช้ Pan เปลา เป็น Reference สำหรับการเกิดรีโทรเกรเดชันทำโดยเก็บ Pan ที่ผ่านการวิเคราะห์การเกิดเจลาตินแล้ว ไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน วิเคราะห์ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (Onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุด (Peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้าย (Conclusion temperature, T_c) และค่าเอนทัลปี (Enthalpy, ΔH) เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างวันที่ 0 และวันที่ 7

19. จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ตามวิธีของ Bacteriological Analytical Manual Online, 2001. Chapter 3, Aerobic plate count. USFDA. 8 pp. (<http://www.cfsan.fda.gov>)

เตรียมตัวอย่างโดยชั่งตัวอย่าง 25 กรัม ใส่ในถุง Stomacher เติม Peptone Water ร้อยละ 1 จำนวน 225 มิลลิลิตร แล้วนำไปตีผสมให้เข้ากันนาน 1 นาที สารละลายตัวอย่างที่ได้จะมีความเจือจางเท่ากับ 10^{-1} (เจือจาง 10 เท่า) เตรียมสารละลายตัวอย่างให้มีความเจือจางเพิ่มขึ้น 100, 1,000 และ 10,000 เท่า (ตัวอย่างมีความเข้มข้น 10^{-2} 10^{-3} และ 10^{-4} ตามลำดับ) หรือระดับความเจือจางที่เหมาะสม โดยปิเปตตัวอย่างที่ความเจือจาง 10^{-1} จำนวน 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดที่มีสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 90 มิลลิลิตร เขย่าให้เชื้อกระจายทั่วกัน จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 10^{-2} และทำเช่นเดียวกันในการเตรียมตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นอื่นๆ จากนั้นทำการทดสอบโดยปิเปตตัวอย่างความเข้มข้นละ 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในจานเพาะเชื้อที่ปลอดเชื้อ ความเข้มข้นละ 2 จาน เทอาหารเลี้ยงเชื้อ Plate Count Agar (PCA) ที่มีอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จำนวน 15 มิลลิลิตร ต่อหนึ่งจานเพาะเชื้อ โดยทำใน Laminar Flow วนเพลทเพื่อให้ตัวอย่างกระจายทั่วทั้งจาน ระยะเวลาตั้งแต่ถ่ายตัวอย่างจนถึงขั้นตอนการเทอาหารเลี้ยงเชื้อ PCA ไม่ควรเกิน 15 นาที ตั้งไว้ให้อาหารเลี้ยงเชื้อแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง กลับจานเพาะเชื้อให้อาหารเลี้ยงเชื้ออยู่ทางด้านบน นำไปบ่มในตู้บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง ตรวจนับจุลินทรีย์ในจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนประมาณ 25-250 โคโลนี บันทึกและรายงานผลการทดลองเป็นจำนวนโคโลนีต่อกรัมตัวอย่าง (cfu/g)

20. จำนวนยีสต์และรา ตามวิธีของ Bacteriological Analytical Manual Online, 2001. Chapter 18, Yeasts, Molds and Mycotoxins. USFDA, 4 pp. (<http://www.cfsan.fda.gov>)

เตรียมตัวอย่างโดยชั่งตัวอย่าง 25 กรัม ใส่ในถุง Atomacher เติม Peptone Water ร้อยละ 1 ปริมาตร 225 มิลลิลิตร แล้วนำไปตีผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 2 นาที สารละลายตัวอย่าง ที่ได้จะมีความเจือจางเท่ากับ 10^{-1} (เจือจาง 10 เท่า) เตรียมสารละลายตัวอย่างให้ตัวอย่างมีความเจือจางเพิ่มขึ้น 100, 1,000 และ 10,000 เท่า หรือระดับความเจือจางที่เหมาะสม โดยปิเปตตัวอย่างที่ความเจือจาง 10^{-1} จำนวน 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองที่มี Peptone Water 9 มิลลิลิตร เขย่าให้เชื้อกระจายทั่วกัน จะได้ความเข้มข้นเท่ากับ 10^{-2} และทำเช่นเดียวกันในการเตรียมตัวอย่างที่ระดับความเข้มข้นอื่นๆ ทำการทดสอบโดย ปิเปตสารละลายตัวอย่างในแต่ละระดับความเจือจาง ลงบนผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ Rose bengal agar (เทใส่จานเพาะเชื้อที่ปลอดเชื้อ และวางให้แห้งตัวที่อุณหภูมิห้อง 1 คืน) จานละ 0.1 มิลลิลิตร จำนวน 3 จาน จากนั้นใช้แท่งแก้วอปลอดเชื้อ เกลี่ยให้สารละลายตัวอย่างกระจายทั่วผิวหน้าอาหารเลี้ยงเชื้อ ทิ้งไว้ 10 นาที เพื่อให้สารละลายตัวอย่างซึมผ่านอาหารเลี้ยงเชื้อ นำจานเพาะเชื้อไปบ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยที่จานเพาะเชื้อต้องซ้อนกันไม่เกิน 3 จาน และไม่กลับด้านจานเพาะเชื้อ บ่มนาน 5 วัน ถ้าไม่มีโคโลนีขึ้น ให้บ่มต่ออีก 48 ชั่วโมง จึงตรวจนับจุลินทรีย์ นับจำนวนโคโลนีของเชื้อที่เจริญบนจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนประมาณ 10-150 โคโลนี บันทึกและรายงานผลการทดลองเป็นจำนวนโคโลนีต่อกรัมตัวอย่าง (cfu/g)