ผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่

โดย

นางสาวฐิตาภา เหลี่ยวเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่

โดย
นางสาวฐิตาภา เหลี่ยวเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF HYDROCOLLOIDS ON THE QUALITIES OF GLUTEN-FREE BREADCRUMBS AND APPLICATION IN CHICKEN NUGGETS

By

MISS Titapa LEAUJAROEN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Science (FOOD TECHNOLOGY)

Department of FOOD TECHNOLOGY

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	ผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่
โดย	ฐิตาภา เหลี่ยวเจริญ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงใจ ถิรธรรมถาวร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงใจ ถิรธรรมถาวร)

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

61403205 : เทคโนโลยีอาหาร แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
คำสำคัญ : ไฮโดรคอลลอยด์, เกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน, นักเก็ตไก่

นางสาว ฐิตาภา เหลี่ยวเจริญ: ผลของไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงใจ ถิรธรรมถาวร

อาหารคลุกด้วยเกล็ดขนมปังเป็นหนึ่งในอาหารที่ได้รับความนิยมในการบริโภคทั่วโลก แต่อย่างไรก็ตามเกล็ดขนมปังโดยทั่วไปผลิตมาจากส่วนเนื้อใน (crumb) ของขนมปังที่ทำจากแป้งสาลี ซึ่งมีองค์ประกอบของโปรตีนกลูเตน การบริโภคโปรตีนกลูเตนจะก่อปัญหากับผู้ป่วยที่เป็นให้โรคซิลิ-แอค (celiac disease) ทำให้ไม่สามารถดูดซึมสารอาหารได้ ดังนั้นจึงต้องพัฒนาอาหารปลอดกลูเตนสำหรับผู้บริโภคกลุ่มนี้ การใช้แป้งปลอดกลูเตนทำให้ไม่สามารถสร้างโครงสร้างร่างแหยืดหยุ่นที่ช่วยกักเก็บอากาศในขนมปัง ซึ่งถูกสร้างขึ้นระหว่างกระบวนการหมักไว้ได้ ขนมปังปลอดกลูเตนจึงมักมีปริมาตรจำเพาะต่ำและเนื้อแน่นแข็ง การเติมไฮโดรคอลลอยด์ในขนมปังปลอดกลูเตนช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ วัตถุประสงค์การศึกษาในครั้งนี้เพื่อศึกษาสูตรที่เหมาะสมกับขนมปังปลอดกลูเตนสำหรับการเตรียมเกล็ดขนมปังและการประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่ และเพื่อการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของไฮดรอคอลลอยด์ ได้แก่ ไฮดรอกซิลโพลพิลเมททิลเซลลูโลส (HPMC) แซนแทนกัม (XG) และกัวกัม (GG) ต่อคุณภาพของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและนักเก็ตไก่ จากการทดลองพบว่าขนม-ปังสูตรที่มีการใช้แป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพดมีปริมาตรจำเพาะมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ใช้แป้งข้าวเพียงอย่างเดียว นักเก็ตไก่ที่ผลิตได้มีสีเหลืองอมน้ำตาล ขนมปังสูตรที่เติมไฮดรอกซิลโพลพิล-เมททิลเซลลูโลส 3.0% (HPMC 3.0) มีปริมาตรจำเพาะสูงที่สุด ส่วนขนมปังสูตรที่เติมแซนแทนกัมและกัวกัมทุกความเข้มข้นมีปริมาตรจำเพาะต่ำ ขนมปังที่เติมไฮดรอกซิลโพลพิลเมทิลเซลลูโลสและกัวกัมทุกความเข้มข้นมีค่า crumb fineness สูง โครงสร้างระดับจุลภาคของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนหลังทอดสูตรที่เติมกัวกัม 1.5% (GG 1.5) มีโพรงอากาศคล้ายเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลี นอกจากนี้เกล็ดขนมปังสูตร GG 1.5 มีปริมาณไขมันน้อยที่สุด (12.04%) และมีค่าความแข็ง (hardness) ต่ำที่สุด ส่วนค่าสีของนักเก็ตที่คลุกด้วยเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนทุกสูตรมีสีเข้มน้อยกว่านักเก็ตที่คลุกด้วยเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลี

61403205 : Major (FOOD TECHNOLOGY)
Keyword : Hydrocolloids, Gluten-free bread crumb, Chicken nuggets

MISS TITAPA LEAUJAROEN : EFFECT OF HYDROCOLLOIDS ON THE QUALITIES OF GLUTEN-FREE BREADCRUMBS AND APPLICATION IN CHICKEN NUGGETS THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DOUNGJAI THIRATHUMTHAVORN, Ph.D.

Food with breadcrumbs coating is one of a popular worldwide food. However, breadcrumbs is typically made from wheat bread that contains gluten. The patients who suffer from Celiac disease cannot consume food containing gluten. This can lead to malabsorption of nutrients in gluten intolerance patients. So, it is necessary to develop gluten-free food for these consumers. The application of gluten-free flour for bread making cannot form a viscoelastic network to retain gas produced during fermentation. Therefore, a low specific volume and dry crumb of bread were obtained. Hydrocolloids applied in gluten-free bread can improve those properties. The objectives of this study were to investigate the appropriate formular of gluten-free bread for preparing breadcrumbs applied in chicken nuggets and to study the effect of types and levels of hydrocolloids including hydroxypropyl methylcellulose (HPMC), xanthan gum (XG) and guar gum (GG) on the properties of gluten-free breadcrumbs and nuggets. The results indicated that bread containing the combination of rice flour and corn flour had higher specific volume than that having only rice flour. Chicken nuggets showed golden brown color. Bread containing 3.0% HPMC had the highest specific volume. Bread containing XG and GG at both levels showed low specific volume. A fine crumb structure was found in bread added with HPMC and GG. The microstructure of breadcrumbs containing with 1.5% GG (GG 1.5) coated on fried nuggets presented a lots of tiny pores similar to wheat breadcrumbs. In addition, fried breadcrumbs with GG 1.5 provided the lowest fat content (12.04%) and hardness. The color of chicken nuggets coated with all gluten-free breadcrumbs showed less darkness than wheat breadcrumbs.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงใจ ถิรธรรมถาวร ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และให้ความช่วยเหลือด้านความรู้และคำปรึกษา ที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึงคำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์และจัดทำรูปเล่มนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกพันธ์ แก้วมณีชัย ที่กรุณาให้แนวคิดในการทำวิจัยเรื่องนี้ รวมทั้งอาจารย์และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมที่ให้ความรู้และอำนวยความสะดวกในการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. ศันสนีย์ อุดมระติ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศิริวงศ์วิไลชาติ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการในการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ สำนักงานบริหารการวิจัย นวัตกรรมและการสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ที่มอบทุนสนับสนุนการวิจัยแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัวที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ที่ให้กำลังใจมาโดยตลอดและให้ความช่วยเหลือ ทำให้งานของข้าพเจ้าสำเร็จลุล่วงไปได้

ฐิตาภา เหลี่ยวเจริญ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญภาพ ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 2

1.3 ขอบเขตการศึกษา 2

1.4 สมมติฐานของการศึกษา 3

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 เกล็ดขนมปัง 4

2.2 มาตรฐานเกล็ดขนมปัง 4

2.2.1 ลักษณะทั่วไป 4

2.2.2 การทดสอบโดยการตรวจพินิจ 4

2.3 สมบัติของเกล็ดขนมปัง 5

2.3.1 ขนาดของเกล็ดขนมปัง 5

2.3.2 การเกิดสีน้ำตาล 6

2.3.2 อัตราเร็วในการดูดซึมน้ำ 6

2.3.4 ความกรอบ 7

2.3.4.1 ชนิดของแป้งที่เป็นส่วนผสมหลัก 7
2.3.4.2 ปริมาณโปรตีนในแป้ง 7
2.3.4.3 วิธีให้ความร้อนในการทอดแบบน้ำมันท่วม 8
2.3.5 การอมน้ำมัน 8
2.3.6 ขนาดรูพรุนและความหนาแน่น 8
2.4 ขนมปังปลอดกลูเตน 8
2.5 ไฮโดรคอลลอยด์และการใช้ในขนมปังปลอดกลูเตน 10
2.5.1 ไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) 12
2.5.2 แซนแทนกัม (xanthan gum, XG) 13
2.5.3 กัวกัม (guar gum, GG) 15
2.6 การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการลดการดูดซับน้ำมันในอาหารทอด 16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 17
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ 17
3.1.1 สารไฮโดรคอลลอยด์ 17
3.1.2 วัตถุดิบการผลิตขนมปังปลอดกลูเตน 17
3.1.3 วัตถุดิบการผลิตนักเก็ตไก่ 17
3.1.4 อุปกรณ์เครื่องครัว อุปกรณ์เบเกอรี่ และอุปกรณ์เครื่องแก้ว 17
3.1.5 อุปกรณ์วิเคราะห์ 18
3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์และประมวลผล 18
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย 18
3.2.1 การศึกษาสูตรที่เหมาะสมกับขนมปังปลอดกลูเตนสำหรับการเตรียมเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการนำไปประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่ 18
3.2.1.1 วิธีการเตรียมขนมปังปลอดกลูเตน 18
3.2.1.2 วิธีการเตรียมเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน 19

3.2.1.3 วิธีการเตรียมนักเก็ตชุบเกล็ดขนมปังทอด 20
3.2.1.4 การวิเคราะห์คุณภาพแป้งปลอดกลูเตน ขนมปัง เกล็ดขนมปัง และการนำไปใช้ในนักเก็ตไก่ของสูตรต้นแบบ 20
3.2.2 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อลักษณะคุณภาพของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตน 22
3.2.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ 24
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 26
4.1 ผลการศึกษาสูตรที่เหมาะสมกับขนมปังปลอดกลูเตนสำหรับการเตรียมเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการนำไปประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่ 26
4.1.1 ความหนืดของแป้งปลอดกลูเตน 26
4.1.2 ลักษณะปรากฏและ Binary image ของขนมปังปลอดกลูเตน 27
4.1.3 ปริมาตรจำเพาะและโครงสร้างเนื้อในของขนมปังปลอดกลูเตน 28
4.1.4 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน 30
4.1.5 ความชื้น ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน 30
4.1.6 ลักษณะปรากฏของนักเก็ตไก่ 31
4.1.7 ค่าสีของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตน 32
4.2 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อลักษณะคุณภาพของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตน 34
4.2.1 ความหนืดของแป้งสาลีและแป้งปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ . 34
4.2.2 ลักษณะปรากฏและ Binary image ของขนมปังแป้งสาลีและขนมปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 37
4.2.4 ค่าสีของขนมปังสูตรแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ 41
4.2.5 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 41

4.2.6 ความชื้น ผลผลิต ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดของขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 43
4.2.7 ค่าของสีเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ 44
4.2.8 ค่าปริมาณไขมันและลักษณะเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่ที่เคลือบด้วยเกล็ดขนมปังแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 44
4.2.9 ลักษณะพื้นผิวของนักเก็ตที่ถูกถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 45
4.2.10 ลักษณะปรากฏของนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและสูตรไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 48
4.2.11 ค่าสีนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ 48
บทที่ 5 สรุป 50
5.1 ผลการศึกษาสูตรที่เหมาะสมกับขนมปังปลอดกลูเตนสำหรับการเตรียมเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการนำไปประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่ 50
5.2 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อลักษณะคุณภาพของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตน 50
5.3 ข้อเสนอแนะ 51
รายการอ้างอิง 52
ภาคผนวก 58
ภาคผนวก ก สูตรต้นแบบ 59
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณปริมาณแป้งที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหนืด 61
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง 66
ประวัติผู้เขียน 85

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 การใช้แป้งในขนมปังปลอดกลูเตน 10

ตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมของขนมปังปลอดกลูเตน (หน่วย : กรัม) 19

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนที่ความเข้มข้น 12% 27

ตารางที่ 4 ปริมาตรจำเพาะและโครงสร้างเนื้อใน ของขนมปังปลอดกลูเตนวิเคราะห์โดยโปรแกรม imageJ 29

ตารางที่ 5 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 30

ตารางที่ 6 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มและร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 31

ตารางที่ 7 ค่าสีของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 .. 33

ตารางที่ 8 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาลีและแป้งปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆที่ความเข้มข้น 12% 36

ตารางที่ 9 การสูญเสียความชื้น ปริมาตรจำเพาะของก้อนขนมปัง ขนาด และปริมาณรูพรุนวิเคราะห์โดยโปรแกรม imageJ ของขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 40

ตารางที่ 10 ค่าสีของขนมปังสูตรแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ 41

ตารางที่ 11 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 42

ตารางที่ 12 ความชื้น ผลผลิตความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 43

ตารางที่ 13 ค่าสีของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่เติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ 44

ตารางที่ 14 ปริมาณไขมันและลักษณะเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่ชุบเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 45

ตารางที่ 15 ค่าสีนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ 49

ตารางที่ 16 แสดงส่วนผสมของขนมปังแซนวิช 60

ตารางที่ 17 แสดงปริมาณความชื้นของสารต่างๆ 62

ตารางที่ 18 แสดงส่วนผสมในการวิเคราะห์ความหนืด 65

ตารางที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตน 67

ตารางที่ 20 ปริมาตรจำเพาะและโครงสร้างเนื้อในของขนมปังปลอดกลูเตนวิเคราะห์โดยโปรแกรม imageJ 69

ตารางที่ 21 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 70

ตารางที่ 22 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มและร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 71

ตารางที่ 23 ค่าสีของขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 71

ตารางที่ 24 ค่าสีของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 72

ตารางที่ 25 ค่าสีของนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 72

ตารางที่ 26 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาลีและแป้งปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 73

ตารางที่ 27 การสูญเสียความชื้น ปริมาตรจำเพาะของก้อนขนมปัง ขนาด และปริมาณรูพรุนวิเคราะห์โดยโปรแกรม imageJ ของขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 79

ตารางที่ 28 ค่าสีของขนมปังสูตรแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ 80

ตารางที่ 29 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 81

ตารางที่ 30 ความชื้น ผลผลิตความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 82

ตารางที่ 31 ปริมาณไขมันและลักษณะเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่สูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ 83

ตารางที่ 32 ค่าสีของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ..... 84

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกล็ดขนมปังกับการเกาะติดชิ้นอาหาร (coverage) 5

ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกล็ดขนมปังกับความกรอบ (crispiness)..... 6

ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างกลูเตนและลักษณะปรากฏของโดขนมปัง 12

ภาพที่ 4 โครงสร้างโมเลกุลของไฮดรอกซิลโพรพิลเมททิลเมทิลเซลลูโลส..... 13

ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลของแซนแทนกัม..... 14

ภาพที่ 6 โครงสร้างโมเลกุลของกัวกัม..... 15

ภาพที่ 7 ลักษณะปรากฏขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1 สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 สูตรที่ 4 และสูตรที่ 5 ตามลำดับ..... 27

ภาพที่ 8 Binary image ของขนมปังสูตรที่ 1 สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 สูตรที่ 4 และสูตรที่ 5..... 28

ภาพที่ 9 ลักษณะปรากฏนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรต่างๆ 31

ภาพที่ 10 ลักษณะปรากฏด้านตัดขวางขนมปังแป้งสาลีและขนมปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ..... 37

ภาพที่ 11 ภาพเนื้อในขนมปังและ Binary image ของขนมปังแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ..... 38

ภาพที่ 12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจากด้านบนของผิวนักเก็ตไก่ 47

ภาพที่ 13 นักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ..... 48

ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนที่ความเข้มข้น 12%..... 68

ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาลีและแป้งปลอดกลูเตนที่ความเข้มข้น 12%..... 74

ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนและแป้งปลอดกลูเตนที่เติม HPMC ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้น 12%..... 75

ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนและแป้งปลอดกลูเตนที่เติมแซนแทนกัม ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้น 12%..... 76

ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนและแป้งปลอดกลูเตนที่เติมกัวกัมความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้น 12%..... 77
ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนที่ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆที่ความเข้มข้น 12%..... 78

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อาหารหลายประเภท เช่น อาหารทะเล เนื้อสัตว์ และผัก สามารถนำมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าและความหลากหลายของผลิตภัณฑ์โดยการนำไปชุบด้วยแบตเตอร์ (batter coating) ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยแป้ง (flour) น้ำ นม ไข่ และเครื่องเทศ หรือการนำไปคลุกกับแป้งพรีดัส (predust) ที่ช่วยดูดซับความชื้นของชิ้นอาหารเพื่อให้เกล็ดขนมปังเกาะติดกับชิ้นอาหารได้ดี (Ali และคณะ, 2016) แล้วจึงคลุกด้วยเกล็ดขนมปัง (bread crumb หรือ breader coating) แล้วทำการทอดหรืออบด้วยเตาอบ เพื่อช่วยรักษาการสูญเสียน้ำภายในชิ้นอาหาร การเคลือบอาหารด้วยเกล็ดขนมปังจะช่วยสร้างรูปลักษณ์หรือลักษณะปรากฏ (appearance) และช่วยเพิ่มลักษณะเนื้อสัมผัส (texture) ให้กับอาหาร นอกจากนี้ยังมีการเติมส่วนผสมที่ให้สี (เช่น สีเหลือง สีส้ม) และสารให้กลิ่นรส (เช่น เครื่องเทศผงปรุงรสต่างๆ) ลงไปในเกล็ดขนมปังที่ใช้เคลือบอาหารด้วย เกล็ดขนมปังจึงสามารถทำหน้าที่ได้ทั้งการให้ลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส กลิ่นและรสชาติ แก่อาหารที่นำมาเคลือบ ทำให้น่ารับประทานและแตกต่างไปจากอาหารเดิม (Voong และคณะ, 2018) อย่างไรก็ตามเกล็ดขนมปังโดยทั่วไปผลิตมาจากส่วนเนื้อใน (crumb) ของขนมปังที่ทำจากแป้งข้าวสาลี ทำให้ผู้ป่วยโรค celiac disease ซึ่งเป็นโรคที่ทำให้เกิดการดูดซึมอาหารบริเวณลำไส้ผิดปกติ สามารถถ่ายทอดได้ทางพันธุกรรม (Wang และคณะ, 2017) มีผลกระทบต่อระบบการย่อยอาหารในลำไส้เล็กที่ทำให้ไม่สามารถดูดซึมสารอาหารได้ โดยเกิดขึ้นจากระบบภูมิคุ้มกันมีปฏิกิริยาต่อกลูเตนจากข้าวสาลี และโปรตีนจากข้าวบาร์เลย์และข้าวไรย์ ซึ่งก่อให้เกิดการอักเสบ การทำลายเซลล์เยื่อบุลำไส้ (Wünsche และคณะ, 2018) จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เกล็ดขนมปังแบบปลอดกลูเตน สำหรับผู้บริโภคเหล่านี้ ปัจจุบันพบว่าวิธีการเดียวในการรักษาและควบคุมโรค celiac disease คือ การควบคุมการบริโภคโดยผู้ป่วยจะต้องไม่บริโภคอาหารที่มีส่วนผสมของกลูเตน (Gallagher และคณะ, 2003) จากปัจจัยดังกล่าวทำให้อาหารปลอดกลูเตนเป็นที่นิยมมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นมีผลการสำรวจหลายแห่งพบว่ามีผู้บริโภคที่ไม่มีปัญหาในการแพ้อาหารจำนวนมากเลือกรับประทานอาหารปลอดกลูเตนมากขึ้น (Wang และคณะ, 2017) แม้ว่าจำนวนผู้ป่วยของโรค celiac disease จะคงที่อยู่ประมาณ 1% แต่พบว่าประชากรร้อยละ 25 ในประเทศสหรัฐอเมริกาบริโภคอาหารปลอดกลูเตน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความนิยมในการบริโภคอาหารปลอดกลูเตน ตลาดของอาหารปลอดกลูเตนมีอัตราการเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยในประเทศเยอรมันปี ค.ศ. 2010 มีรายได้จากการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ปลอดกลูเตน 39 ล้านยูโร และในปี ค.ศ. 2015 มีรายได้ถึง 105 ล้านยูโร (www.marketandmarkets.com, 2015) ตลาดโลกสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ปลอดกลูเตนมีรายได้

ถึง 4.5 พันล้านเหรียญสหรัฐ ในปี ค.ศ. 2018 และคาดว่าตลาดผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตนทั่วโลกจะมีมูลค่า 6.7 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี ค.ศ. 2024 (www.imarcgroup.com, 2019)

การศึกษาเพื่อพัฒนาเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน มีความจำเป็นต่อการผลิตเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนเชิงพาณิชย์ เนื่องจากการผลิตขนมปังโดยปกติทั่วไปจะใช้แป้งสาลีซึ่งมีกลูเตนที่ให้ความยืดหยุ่นและสร้างเนื้อสัมผัสให้แก่แป้งที่ถูกนวดผสมกับน้ำและส่วนผสมอื่นๆ ซึ่งเรียกว่า โด (dough) การใช้แป้งปลอดกลูเตนทดแทนแป้งสาลีในการทำขนมปังนั้น จะก่อให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น มีลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสที่ไม่น่าพึงพอใจ เพราะไม่มีกลูเตนจึงทำให้ไม่สามารถสร้างร่างแหที่มีความยืดหยุ่นได้เช่นเดียวกับกลูเตนได้ ดังนั้นการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยีสต์สร้างขึ้นระหว่างกระบวนการหมักไว้ได้ไม่ดี ขนมปังที่ได้จึงมักมีการขึ้นฟูน้อย ปริมาตรต่ำ เนื้อแน่นแข็ง ทำให้เมื่อนำไปทอดเป็นนักเก็ตจะทำให้ผิวของนักเก็ตแข็งและแห้ง ดังนั้นการเพิ่มสารบางประเภท เช่น ไฮโดรคอลลอยด์ จะช่วยให้ส่วนผสมหรือโดมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและอุ้มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ได้มากขึ้นจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ช่วยแก้ไขปัญหานี้ได้ จึงเป็นเหตุผลสำคัญในการศึกษาในครั้งนี้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาสูตรที่เหมาะสมกับขนมปังปลอดกลูเตนสำหรับการเตรียมเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการนำไปประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของชนิดและระดับของไฮโดรคอลลอยด์ที่มีผลต่อขนมปัง เกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 แป้งที่ใช้ผลิตเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน ได้แก่ แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวโพด

1.3.2 ไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) แซนแทนกัม (xanthan gum, XG) และกัวกัม (guar gum, GG) ที่ระดับความเข้มข้น 0.75-3.0%

1.3.3 เกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่ศึกษาเป็นเกล็ดขนมปังแห้งและการเตรียมแบบ home-style ทั่วไป

1.3.4 การทดสอบการเคลือบเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนในผลิตภัณฑ์นักเก็ตไก่เปรียบเทียบกับเกล็ดขนมปังจากแป้งสาลี

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

การใช้แป้งปลอดกลูเตนชนิดต่างๆทดแทนแป้งสาลีในการทำขนมปังปลอดกลูเตนนั้น จะก่อให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือ มีลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสที่ไม่น่าพึงพอใจ เช่น การขึ้นฟูหรือปริมาตรจำเพาะต่ำ ความเป็นรูพรุนน้อย และเนื้อสัมผัสแน่นแข็ง เนื่องจากไม่มีกลูเตนทำให้ไม่สามารถสร้างร่างแหที่มีความยืดหยุ่นและไม่สามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยีสต์สร้างขึ้นระหว่างกระบวนการหมักไว้ได้ ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงต้องการศึกษาการใช้สารไฮโดร-คอลลอยด์ ได้แก่ ไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) แซนแทนกัม (xanthan gum, XG) และกัวกัม (guar gum, GG) เพื่อใช้เป็นโครงสร้างร่างแหที่สามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และช่วยให้ขนมปังมีการขึ้นฟูที่ดี มีปริมาตรจำเพาะมากขึ้น และได้เกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่ผู้บริโภคยอมรับ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพิ่มองค์ความรู้เกี่ยวกับผลของชนิดและปริมาณสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อลักษณะคุณภาพของขนมปังและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน

1.5.2 พัฒนาผลิตภัณฑ์ปลอดกลูเตนและได้สูตรที่เหมาะสมกับขนมปังปลอดกลูเตนสำหรับการเตรียมเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการนำไปประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่ รวมถึงลดต้นทุนจากการใช้แป้งสาลีและลดการนำเข้าแป้งสาลี

1.5.3 ทำให้ได้อาหารที่ปลอดภัยต่อกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นโรค celiac disease หรือโรคที่เกิดจากการแพ้กลูเตน

1.5.4 ผลงานวิจัยสามารถนำไปเผยแพร่ให้กับนักวิจัยในสถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกลุ่มผู้ผลิตเกล็ดขนมปังในอุตสาหกรรมอาหาร

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เกล็ดขนมปัง

เกล็ดขนมปัง (bread crumbs) หมายถึง ผลิตภัณฑ์แป้งที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการประกอบอาหารทอด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2536) ผลิตจากธัญชาติที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน มีลักษณะเป็นเกล็ดหรือชิ้นเล็กมีขนาด สี กลิ่นรส ความสามารถในการดูดซึมน้ำ เนื้อสัมผัส และความหนาแน่นต่างกัน โดยมากมักใช้กับอาหารที่มีความชื้นสูงบางครั้งเกล็ดขนมปังอาจรวมไปถึงขนมปังที่ผสมแป้งหรือองค์ประกอบอื่น เกล็ดขนมปังจะมีผลต่อการปรับปรุงเนื้อสัมผัสและลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ (Dyson, 1983)

2.2 มาตรฐานเกล็ดขนมปัง

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมขนมปังป่น (เกล็ดขนมปัง) กำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2536) กระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งมีส่วนหนึ่งประกอบด้วย

2.2.1 ลักษณะทั่วไป

- ต้องมีสีขาวนวล ไม่มีชิ้นสีน้ำตาลของผิวขนมปัง (crust) ปะปน
- ต้องไม่มีกลิ่นอับ หรือกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์
- ต้องเป็นเกล็ด หรือชิ้นเล็ก ร่วน ไม่เกาะติดกัน ขนมปังป่นที่บรรจุภายในภาชนะเดียวกัน ส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นอย่างเดียวกัน

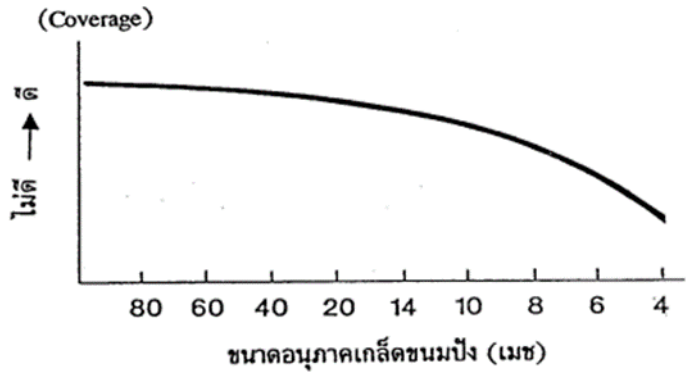
2.2.2 การทดสอบโดยการตรวจพินิจ

- สิ่งแปลกปลอม: ต้องปราศจากสิ่งแปลกปลอม เช่น ดิน ทราย เศษโลหะ แมลง ชิ้นส่วนของแมลง ขนสัตว์การทดสอบให้ทำโดยการตรวจพินิจ
- ความชื้น: ต้องไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก
- ลักษณะภายหลังการทอด: เมื่อตรวจสอบโดยวิธีการให้คะแนนกับผลิตภัณฑ์มันฝรั่งชุบแป้งและขนมปังป่น ทอดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส นาน 90 วินาที ด้วยคณะผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบขนมปังป่นอย่างน้อย 5 คน

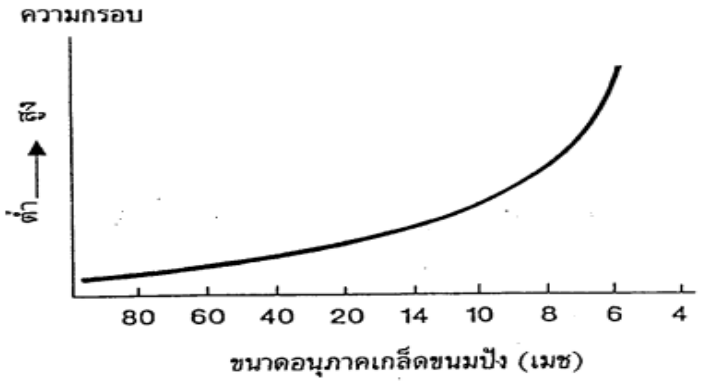
2.3 สมบัติของเกล็ดขนมปัง

2.3.1 ขนาดของเกล็ดขนมปัง

ขนาดที่แตกต่างกันของเกล็ดขนมปังมีผลต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ อัตราเร็วในการดูดซึมน้ำจากแบตเตอร์หรือจากชิ้นอาหารในกระบวนการผลิต (Dyson, 1983) ความกรอบ และความสามารถในการเกาะติดกับชิ้นอาหารในกระบวนการผลิต (Sasiela, 1990) ดังแสดงในภาพที่ 1 และ 2 เกล็ดขนมปังที่มีขนาดใหญ่จะมีรูพรุนภายในขนาดใหญ่กว่าเกล็ดขนมปังขนาดเล็ก ทำให้น้ำมันเข้าไปแทนที่น้ำและระเหยน้ำออกได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้มีความกรอบสูง (Voong และคณะ, 2018) ในขณะที่เกล็ดขนมปังขนาดเล็กสามารถดูดซึมน้ำจากแบตเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วยทำให้แบตเตอร์มีความหนืดสูงขึ้นและสามารถเกาะติดกับชิ้นอาหารได้ดี แม้ว่าการใช้เกล็ดขนาดใหญ่จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏและเนื้อสัมผัสเป็นที่ยอมรับก็ตาม แต่การใช้เกล็ดขนาดใหญ่มีข้อเสีย คือ เมื่อใช้เกล็ดขนมปังขนาดใหญ่บนชิ้นอาหารที่มีขนาดเล็ก เกล็ดขนมปังจะหลุดออกได้ง่ายในขั้นตอนการขนส่งขณะการแช่เยือกแข็ง (Dyson, 1990)



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกล็ดขนมปังกับการเกาะติดชิ้นอาหาร (coverage)
ที่มา: Sasiela (1990)



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกล็ดขนมปังกับความกรอบ (crispiness)
ที่มา: Sasiela (1990)

ขนาดของเกล็ดที่ใหญ่จะให้ลักษณะปรากฏและน้ำหนักแก่ผลิตภัณฑ์ แต่เนื่องจากมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักน้อยทำให้มีอัตราการดูดซับน้ำต่ำ ต้องใช้เวลามากขึ้นในการทำให้เกล็ดขนมปังติดกับชิ้นอาหาร ส่วนเกล็ดที่เล็กลงจะมีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับชิ้นอาหารได้มาก ทำให้เกิดการดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วและลดเวลาการผลิตได้ (ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ และ ทศพล สุธาสิริทรัพย์, 2553)

2.3.2 การเกิดสีน้ำตาล

การเกิดสีน้ำตาลในแป้งชุบทอดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากชิ้นอาหารถูกจุ่มลงในน้ำมันร้อน อัตราการเกิดสีน้ำตาลขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เป็นส่วนผสมในแป้ง (Altunakar และคณะ, 2006) แหล่งของน้ำตาลรีดิวส์ได้แก่ หางนม นมผง น้ำตาลแล็กโทส (Krupa-Kozak และคณะ, 2013) และคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านการดัดแปรด้วยเอนไซม์ การใช้เกล็ดขนมปังที่มีอัตราการเกิดสีน้ำตาลสูงในการผลิตอาหารชุบทอด ช่วยทำให้ลดระยะเวลาในการทอดลงหรือสามารถใช้อุณหภูมิต่ำในการทอดได้ ซึ่งเป็นการประหยัดทั้งในแง่ของพลังงานและระยะเวลาในการผลิต รวมทั้งยังช่วยลดการอมน้ำมัน เนื่องจากใช้เวลาทอดสั้นลง (Suderman, 1990) สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารชุบทอดบางชนิดที่ต้องใช้เวลาทอดนาน เช่น ไก่ชุบแป้งทอด อาจเลือกใช้เกล็ดขนมปังที่มีอัตราการเกิดสีน้ำตาลต่ำและมีอัตราการดูดซึมน้ำมันได้ช้า เช่น เกล็ดขนมปังที่มีขนาดเล็ก ความหนาแน่นสูงและไม่มีส่วนผสมที่มีน้ำตาลรีดิวซ์ (Dyson, 1983)

2.3.2 อัตราเร็วในการดูดซึมน้ำ

อัตราเร็วในการดูดซึมน้ำของเกล็ดขนมปังขึ้นอยู่กับขนาดของเกล็ด ความเป็นรูพรุน (Suderman, 1990) และการให้ความร้อนในกระบวนการผลิตเกล็ดขนมปัง อัตราเร็วในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเกล็ดขนมปังมีขนาดเล็กลง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นซึ่งช่วยให้การจับตัวระหว่างแป้งขนมปังกับแบตเตอร์ดีขึ้น การเคลือบผิวอาหารจึงเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แต่โดยทั่วไปเกล็ดขนมปังที่มี

ขนาดใหญ่เป็นที่ต้องการมากกว่าขนาดเกล็ดเล็ก เพราะทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏสวยงาม เนื้อสัมผัสดี (Dyson, 1983) ดังนั้นเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นที่ยอมรับและมีอัตราการดูดซึมน้ำได้อย่างรวดเร็ว จึงต้องมีการพัฒนากระบวนการผลิตโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิหลากหลายในระหว่างการผลิตเกล็ดขนมปังที่มีขนาดต่างๆ (Dyson, 1990) อัตราการดูดซับน้ำจากแป้งชุบทอดนั้นจะกำหนดระยะเวลาเพื่อให้ชิ้นอาหารที่ทำการเคลือบอยู่ตัวพร้อมที่จะทอด

เกล็ดขนมปังที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนสามารถดูดซึมน้ำและปลดปล่อยน้ำออกขณะทอด ทำให้สามารถดูดซึมน้ำมันเข้าไปแทนที่รวดเร็วกว่าเกล็ดขนมปังที่มีขนาดเกล็ดเท่ากัน แต่มีความหนาแน่นสูงกว่าเนื่องจากเกล็ดขนมปังที่มีความหนาแน่นสูงมักมีลักษณะโครงสร้างแบบปิด ซึ่งลักษณะโครงสร้างและความเป็นรูพรุนของเกล็ดขนมปังมีแตกต่างกันออกไปตามกรรมวิธีการผลิต ทำให้อัตราเร็วในการดูดซึมน้ำของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน (Dyson, 1983)

โครงสร้างที่เป็นรูพรุนและขนาดของเกล็ดขนมปังไม่เพียงแต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซึมน้ำเท่านั้น ยังมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อีกด้วย ปัจจัยทั้ง 2 ประการสามารถทำการปรับปรุงเพื่อให้ได้ลักษณะตรงตามความต้องการ โดยการปรับอุณหภูมิในการอบและวิธีการให้ความร้อนในขั้นตอนการผลิตเกล็ดขนมปัง (Dyson, 1983)

2.3.4 ความกรอบ

ความกรอบเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเกล็ดขนมปัง ความกรอบขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังนี้

2.3.4.1 ชนิดของแป้งที่เป็นส่วนผสมหลัก

แป้งแต่ละชนิดมีผลต่อความกรอบของผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสมบัติของแป้ง ได้แก่ อัตราส่วนของอะมิโลสต่ออะมิโลเพคติน จากการศึกษาพบว่าแป้งที่มีองค์ประกอบของอะมิโลสสูง จะให้ความกรอบและเปราะกับผลิตภัณฑ์ชุบทอดมากขึ้น เนื่องจากในระหว่างกระบวนการทอดเม็ดสตาร์ชจะพองตัว อะมิโลสจะเกิดฟิล์มที่แข็งแรงป้องกันการซึมผ่านของน้ำมันและความชื้นจากวัตถุดิบได้ (Alutunakar และคณะ, 2006) จึงทำให้แป้งที่มีอะมิโลสสูงให้ผลิตภัณฑ์แป้งทอดมีความกรอบสูง แต่ถ้าสูงเกินไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จะกระด้างจนผู้บริโภคไม่ยอมรับ (Davis, 1983)

2.3.4.2 ปริมาณโปรตีนในแป้ง

โปรตีนมีผลต่ออุณหภูมิแป้งสุกและให้โครงสร้างที่แข็งแรง แป้งที่มีโปรตีนสูงอุณหภูมิแป้งสุกจะสูงขึ้นด้วย ระดับโปรตีนที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์แป้งชุบทอดอยู่ระหว่างร้อยละ 9-11 ถ้าสูงกว่านี้ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะแข็งเกินไป (Davis, 1983)

2.3.4.3 วิธีให้ความร้อนในการทอดแบบน้ำมันท่วม

การทอดแบบน้ำมันท่วมต้องควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันที่ใช้ทอดให้อยู่ระหว่าง 150-200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์จะมีความพองกรอบน้อยลง และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 220 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (caramelization) เร็วขึ้น ทำให้ผิวด้านนอกของผลิตภัณฑ์มีสีน้ำตาลอย่างรวดเร็วโดยที่น้ำในชิ้นอาหารระเหยออกไปได้เพียงเล็กน้อย ความกรอบของผลิตภัณฑ์จึงลดลง (Robbin, 1976)

2.3.5 การอมน้ำมัน

การดูดซับน้ำมันจะมีผลต่อการอมน้ำมัน ปริมาณไขมัน และแคลอรี่ของผลิตภัณฑ์อาหารทอดที่เคลือบเกล็ดขนมปัง การดูดซับน้ำมันเป็นผลจากขนาด ความพรุน และชนิดของเกล็ดขนมปัง การอมน้ำมันของอาหารชุบเกล็ดขนมปังทอดที่ทอดแบบน้ำมันท่วมขึ้นกับปัจจัยหลายประการ (Dyson, 1983) เช่น อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ทอด โดยเวลาที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณน้ำมันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ทอดจะทำให้ปริมาณน้ำมันแตกต่างกันขึ้นกับคุณสมบัติของอาหารที่นำมาทอด (Liu และคณะ, 2021) แต่โดยทั่วไปหากใช้อุณหภูมิสูงในการทอดจะเร่งให้เกิดการระเหยน้ำและมีปริมาณความชื้นต่ำเมื่อเปรียบเทียบที่เวลาทอดเท่ากัน ซึ่งหากความชื้นต่ำจะทำให้มีโพรงอากาศภายในชิ้นอาหารมากและเมื่อนำไปทอดจะทำให้น้ำมันเข้าสู่ภายในชิ้นอาหารได้มากและรวดเร็ว (Liu และคณะ, 2021) เกิดเปลือกที่แข็งได้อย่างรวดเร็วป้องกันน้ำมันซึมเข้าภายในชิ้นอาหารได้น้อยลงและลดการอมน้ำมัน (จันทร์จิรา ตั้งสันทัศน์กุล, 2554)

2.3.6 ขนาดรูพรุนและความหนาแน่น

ขนาดรูพรุนและความหนาแน่นมีผลต่อการดูดซับน้ำมัน โดยรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก จะทำให้เกิดการเคลือบของน้ำมันได้ช้าและไม่ทั่วถึง (Liu และคณะ, 2021) เนื่องจากรูพรุนขนาดเล็กทำให้น้ำเกิดการระเหยออกได้ยากและดึงน้ำมันเข้าสู่ภายในชิ้นอาหารได้ช้า ทำให้มีปริมาณน้ำมันและเกิดการดูดซับน้ำมันได้น้อย (จันทร์จิรา ตั้งสันทัศน์กุล, 2554)

2.4 ขนมปังปลอดกลูเตน

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมามีการใช้แป้งจากวัตถุดิบหลากหลายชนิด เช่น แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเหนียว สตาร์ชมันสำปะหลัง เป็นต้น (Wang และคณะ, 2017) เพื่อทดแทนแป้งสาลี จากการศึกษาพบว่าแป้งที่นิยมนำมาผลิตขนมปังปลอดกลูเตน คือ แป้งข้าว เนื่องจากแป้งข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจากธรรมชาติ มีรสชาติอ่อน ก่อให้เกิดอาการแพ้ต่ำ มีโปรตีน โซเดียม ไขมัน และใยอาหารต่ำ เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยง่ายอีกด้วย (Numfon, 2017) มีรายงานการใช้แป้งข้าวตั้งแต่ความเข้มข้นร้อยละ 50-100 ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยการใช้แป้งข้าวทดแทนแป้งสาลีทั้งหมดด้วยแป้งข้าวจะเป็นปัญหา

ต่อผลิตภัณฑ์ที่มีการขึ้นฟูด้วยยีสต์ เช่น ขนมปัง โดยปัญหาสำคัญ คือ ปริมาตรจำเพาะต่ำ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.38-1.40 cm^3/g ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าที่ผู้บริโภคยอมรับเมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังแป้งสาลี เนื่องจากขาดโครงสร้างกลูเตนที่ทำหน้าที่อุ้มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหมักของยีสต์ และยังพบว่าเนื้อขนมปังที่ได้มีลักษณะที่ค่อนข้างร่วน ไม่เกาะกัน จึงทำให้ มีค่าความแข็ง (hardness) และค่าความสามารถในรวมตัวกัน (cohesiveness) อยู่ในระดับค่อนข้างน้อย (ฐิติมา ธันวราคม, 2557) ตนอกจากนี้ยังพบว่าสีของขนมปังค่อนข้างขาว เนื่องจากเกิดปฏิกริยาสีน้ำตาลได้น้อยลงเพราะขาดโปรตีนกลูเตน (Numfon, 2017) จึงมีการใช้ร่วมกับแป้งชนิดอื่นด้วย เช่น การใช้แป้งข้าวผสมกับแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 80:20 (จันทร์เฉิดฉาย สังเกตกิจ และคณะ, 2557) แป้งข้าวผสมกับแป้งข้าวโพดในอัตราส่วน 70:30 ทำให้เกิดช่องเก็บอากาศได้ใหญ่กว่ากว่า เกิดรูพรุนมากขึ้น (Mohammadi และคณะ, 2014) รวมถึงมีการใช้แป้งร่วมกันถึง 3 ชนิด ได้แก่ แป้งข้าว แป้งข้าวโพด และแป้งควินัวในอัตราส่วน 50:30:20 (Encina-Zelada และคณะ, 2019) เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปลอดกลูเตนให้นุ่มขึ้น

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 1 การใช้แป้งในขนมปังปลอดกลูเตน

ผลิตภัณฑ์	แป้งปลอดกลูเตน	อ้างอิง
ขนมปังหวาน	แป้งข้าวหอมมะลิ 80% แป้งมันสำปะหลัง 20%	จันทร์เฉิดฉาย สังเกตกิจ และคณะ (2557)
ขนมปัง	แป้งข้าว 100%	ฐิติมา ธันวราคม (2557)
ขนมปัง	แป้งข้าว:แป้งข้าวโพด (5:1)	Maghaydah และคณะ (2013)
ขนมปังแฟลตเบรด	แป้งข้าวโพด 70% แป้งข้าวเจ้า 30%	Mohammadi และคณะ (2014)
ขนมปัง	แป้งข้าว 50% แป้งข้าวโพด 30% แป้งควินัว 20%	Encina-Zelada และคณะ (2018)
ขนมปัง	แป้งข้าว 100%	Thiranusornkij และคณะ (2018)
ขนมปัง	แป้งข้าว 50% แป้งข้าวโพด 30% แป้งควินัว 20%	Encina-Zelada และคณะ (2019)

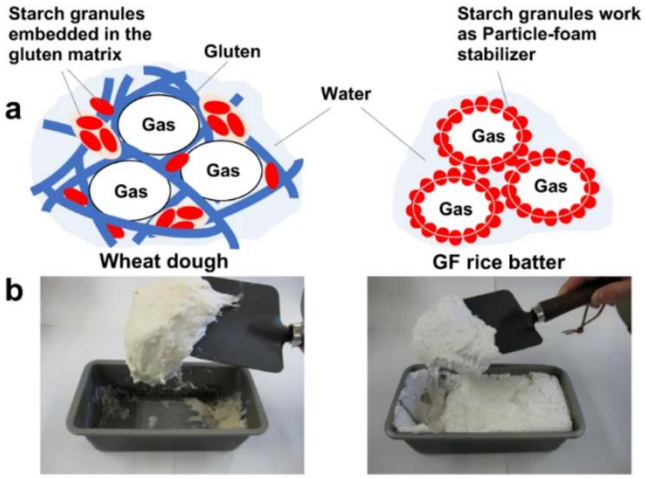
2.5 ไฮโดรคอลลอยด์และการใช้ในขนมปังปลอดกลูเตน

ไฮโดรคอลลอยด์ คือ สารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์กัม (polysaccharide gum) เกิดจากการที่มีโมเลกุลเดี่ยวมาต่อกัน ทำให้มีโมเลกุลใหญ่เป็นสายยาว เมื่อนำไปละลายในน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดสูง ดังนั้นจึงนิยมใช้สารไฮโดรคอลลอยด์เป็นสารเพิ่มความหนืดและเพิ่มความคงตัวในอาหารต่างๆ (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) ซึ่งรวมไปถึงอาหารประเภทขนมอบหรือผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ต่างๆ ที่มีการใช้สารไฮไดรคอลลอยด์ ได้แก่ โซเดียมแอลจิเนต (sodium alginate) แซนแทนกัม (xanthan gum) แคปปาคาราจีแนน (k-carrageenan) และไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) มาใช้ปรับปรุงคุณภาพของขนมปังและใช้เป็นสารลดการเกิดสเตลลิ่ง (stalling) ในขนมปังจากแป้งสาลี (Gujral และ Rosell, 2004)

โดยปกติแล้วในการผลิตขนมปังจะใช้แป้งสาลีเป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากแป้งสาลีมีโปรตีนกลูเตน ซึ่งเป็นโปรตีนที่ประกอบด้วยโครงร่างแหของโปรตีนที่มีชื่อว่า ไกลอะดินและกลูเตนิน ซึ่งเป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำมีคุณสมบัติที่สามารถอุ้มน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่นทำให้ขนมปังนุ่มและคงตัวเมื่อขึ้นฟู หากมีการใช้แป้งปลอดกลูเตนจะทำให้ไม่มีโปรตีนประเภทไกลอะดิน (Chartrand และคณะ, 1997) เป็นองค์ประกอบ โดของขนมปังจึงไม่สามารถสร้าง

โครงสร้างร่างแหยืดหยุ่นที่กักเก็บอากาศ (Gujral และ Rosell, 2004) ดังแสดงในภาพที่ 3 จึงทำให้อากาศลอยขึ้นสู่ผิวหน้าของโด ในขณะที่ยีสต์และเม็ดสตาร์ชตกตะกอนลงสู่ด้านล่าง (Yano, 2019) ดังนั้นขนมปังที่ได้จะมีปริมาตรจำเพาะต่ำ และเนื้อในแน่นแข็งกว่าขนมปังทั่วไปที่ใช้แป้งสาลีเป็นองค์ประกอบหลัก (Gallagher และคณะ, 2003) เนื่องด้วยคุณภาพของขนมปังปลอดกลูเตนด้อยกว่าขนมปังที่ได้จากแป้งสาลีอย่างมาก จึงมีความจำเป็นต้องศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของขนมปังปลอดกลูเตนให้ดีขึ้น จากการศึกษาพบว่าการใช้สารไฮโดรคอลลอยด์สามารถทำหน้าที่ปรับปรุงโครงสร้างและคุณลักษณะของโดที่ไม่มีกลูเตนให้ดีขึ้น โดยไฮโดรคอลลอยด์สามารถปรับปรุงความหนืดทำให้อากาศและเม็ดสตาร์ชสามารถกระจายตัวในโดได้ (Yano, 2019) เมื่อได้รับความร้อนเม็ดสตาร์ชจะเกิดการเจลาติไนซ์เซชัน ทำให้เม็ดสตาร์ชแตกออกและแข็งตัวบนเมมเบรนของไฮโดรคอลลอยด์ (Yano, 2019) เกิดเป็นโครงสร้างเลียนแบบกลูเตนให้แก่ขนมปังแบบปลอดกลูเตน นอกจากนี้ยังพบว่าไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดสามารถเกิดโครงสร้างฟิล์ม เช่น ไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลส ที่คอยจับกับเม็ดสตาร์ชด้วยพันธะไฮโดรฟิลิกและจับกับอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก (Yano, 2019) ทำให้ฟองอากาศมีความคงตัวและเกิดโครงสร้างให้ขนมปังปลอดกลูเตนได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงเลือกไฮโดรคอลลอยด์มาศึกษาในครั้งนี้

สารไฮโดรคอลลอยด์ที่นิยมนำมาศึกษาเพื่อใช้ในขนมอบที่ปราศจากกลูเตน ได้แก่ กัมและอนุพันธ์ของเซลลูโลส เช่น โลคัสบีนกัม (locust bean gum) กัวกัม (guar gum) แซนแทนกัม (xanthan gum) เมทิลเซลลูโลส (methylcellulose) คาราจีแนน (carrageenan) คาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส (carboxymethylcellulose, CMC) และไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) เป็นต้น (Wang และคณะ, 2017) ไฮโดรคอลลอยด์ถูกนำไปใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดและเพิ่มปริมาตรให้กับแบตเตอร์หรือโดของขนมปังได้ ช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสให้ไม่แข็งจนเกินไป



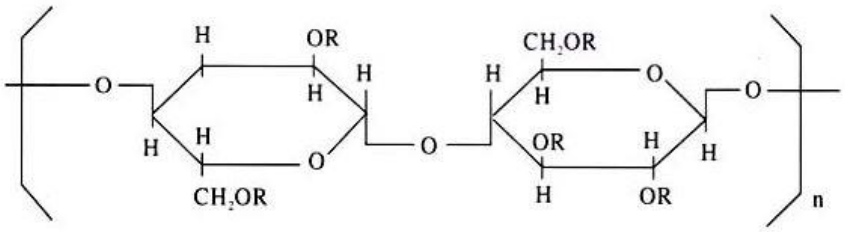
ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างกลูเตนและลักษณะปรากฏของโดขนมปัง

ที่มา: Yano (2019)

2.5.1 ไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (hydroxypropyl methylcellulose, HPMC)

ไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสมีโครงสร้างทางเคมี ดังแสดงในภาพที่ 4 มีคุณสมบัติที่ละลายได้ในน้ำเย็นแต่ไม่ละลายในน้ำร้อน เพราะเมื่อสารละลายได้รับความร้อนประมาณ 50-90 องศาเซลเซียส จะเกิดการก่อตัวของเจลขึ้น ในขณะที่ความหนืดของสารละลายจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการก่อตัวของเจล โดยอุณหภูมิที่ทำให้สารละลายที่มีเข้มข้น 1.0% ของไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสเกิดเจลได้ จะอยู่ในช่วง 60-90 องศาเซลเซียส โดยเกิดจากหมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) ของไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสสร้างพันธะไฮโดรฟิลิกกับน้ำ และเกิดโครงสร้างร่างแหของเจลทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น (Morreale และคณะ, 2018) แต่สามารถลดอุณหภูมิที่ทำให้สารละลายเกิดเจลได้ด้วยการเติมเกลือลงในสารละลาย (Joshi, 2006) และเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเติมแอลกอฮอล์ ความหนืดของสารละลายไฮดรอกซิลโพรพิล-เมทิลเซลลูโลส นั้นจะไม่ขึ้นกับค่าความเป็นกรดเบส เพราะสามารถทนความเป็นกรดเบส ได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ 2–13 (Imeson, 1997) จากการศึกษาการใช้ไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้นร้อยละ 4 ผสมในขนมปังปลอดกลูเตนที่ทำจากแป้งข้าว พบว่าปริมาตรจำเพาะอยู่ในช่วง 1.38-1.40 cm^3/g ซึ่งเป็นปริมาตรจำเพาะที่อยู่ในช่วงของขนมปังปลอดกลูเตนที่จำหน่ายทั่วไป แต่ได้ลักษณะขนมปังที่ร่วนอยู่ และสีของขนมปังมีสีขาว เนื่องจากเกิดปฏิกริยาสีน้ำตาลได้น้อยลงเพราะไม่มีโปรตีนกลูเตน (ฐิติมา ธันวราคม, 2557) เช่นเดียวกับ Morreale และคณะ (2018) ที่ได้ศึกษาผลของการใช้ไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสต่อคุณภาพของขนมปัง โดยศึกษาความหนืดที่มีผลต่อการไหลของแบตเตอร์ในระหว่างการผสม และการเกิดเป็นขนมปัง พบว่าไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิล-เซลลูโลส มีผลต่อความหนืดและลักษณะเนื้อสัมผัสที่ต้องการได้ จากการศึกษาพบว่าการใช้ไฮดรอก-

ซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสที่ความเข้มข้น 2.2% ทำให้แบตเตอร์กักเก็บน้ำได้ดีและส่งผลให้ขนมปังมีความนุ่ม

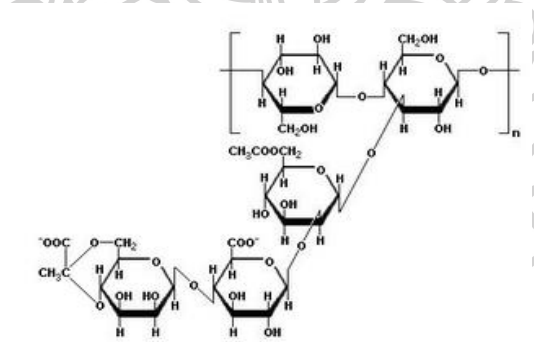


ภาพที่ 4 โครงสร้างโมเลกุลของไฮดรอกซิลโพรพิลเมททิลเมทิลเซลลูโลส
ที่มา: http://th.xutaipowders.com/hydroxypropyl-methylcellulose
สืบค้นวันที่: 21 มกราคม 2563

2.5.2 แซนแทนกัม (xanthan gum, XG)

แซนแทนกัม เป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งที่ผลิตจากกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพโดยเกิดจากกระบวนการหมักของ *Xanthomonas campestris* NRRL B-1459 แซนแทนกัมประกอบด้วยสาย 1,4 -linked β-D-glucose ซึ่งต่อด้วยกิ่งก้านที่ประกอบด้วยแมนโนส 2 โมเลกุล และกรดกลูโคโรนิก (glucoronic acid) 1 โมเลกุล (Imeson, 1997) (ภาพที่ 5) แซนแทนกัมมีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ดี โดยสามารถละลายได้ในช่วงค่าความเป็นกรดเบสที่กว้าง (2.5 – 11) เพราะฉะนั้นจึงสามารถใช้แซนแทนกัมในอาหารที่มีความเป็นกรดสูงๆได้ และสารละลายสามารถคงความหนืดไว้ได้ในช่วงอุณหภูมิ 10–90 องศาเซลเซียส (Imeson, 1997) ในอาหารหลายชนิดจะใช้แซนแทนกัมเป็นสารเพิ่มความหนืดและสารเพิ่มความคงตัว (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2545) แซนแทนกัมมีคุณสมบัติเป็นซูโดพลาสติก คือเมื่อมีการเพิ่มแรงในการกวนสารละลายที่มีแซนแทนกัมอยู่ด้วย จะทำให้ความหนืดของสารละลายนั้นยิ่งลดลงซึ่งเป็นข้อดีอย่างหนึ่ง เช่น ช่วยให้ผลิตภัณฑ์สามารถผสมเทหรือปั๊มได้ง่ายและด้วยคุณสมบัติแบบนี้ ในการทำผลิตภัณฑ์ประเภทขนมอบ แซนแทนกัมจะช่วยในการนวดโด และขึ้นรูปโดง่ายขึ้น อีกทั้งยังช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของแป้ง โดยช่วยป้องกันการเกิดรีโทรเกรเดชันและการสูญเสียน้ำภายในแป้ง โดย Mohammadi และคณะ (2014) ศึกษาผลของปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพก้อนโดของขนมปังแฟลตเบรดปลอดกลูเตน พบว่าการใช้แซนแทนกัมที่ความเข้มข้น 15 g/kg จะทำให้ได้ค่า dough yield มากที่สุด เช่นเดียวกับ Encina-Zelada และคณะ (2019) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของแซนแทนกัมและปริมาณน้ำที่เติมในระบบ พบว่าการเติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้นในช่วง 1.5-2.5% ร่วมกับการใช้น้ำ 110% ของแป้ง

ทำให้แบตเตอร์มีความเหนียวน้อยลงและมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น เนื่องจากแซนแทนกัมมีหมู่อะซิติลและกรดไพรูวิกที่ช่วยจับกับน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลทำให้มีคุณสมบัติกักน้ำได้ดี จึงช่วยในการป้องกันการสูญเสียน้ำในระหว่างการปรุงอาหารได้ (Imeson, 1997) จากการศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของแซนแทนกัมในการผลิตขนมปังปลอดกลูเตน พบว่าการเติมแซนแทนกัมเพียงร้อยละ 2 ก็สามารถช่วยยับยั้งการเกิดการแยกชั้นของน้ำได้ (Glicksman, 1982) เมื่อแทนที่แป้งสาลีด้วยแป้งข้าวพบว่าอัตราการขึ้นฟูของขนมปังลดลงเมื่อปริมาณแป้งข้าวเพิ่มขึ้น จึงต้องใช้แซนแทนกัมเพื่อทำให้ขนมปังมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น และยังพบว่ามีปริมาตรจำเพาะที่ใกล้เคียงกับขนมปังที่ทำจากแป้งสาลีอีกด้วย (จันทร์เฉิดฉาย สังเกตกิจ และคณะ, 2557) ในขณะที่ ดวงฤทัย ธำรงโชติ (2555) ได้ใช้แซนแทนกัมเพียงร้อยละ 1 และพบว่าขนมปังมีคะแนนด้านประสาทสัมผัสสูงสุดในทุกๆด้าน คือ สี กลิ่นรส และความชอบโดยรวม นอกจากนี้แซนแทนกัมยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์ประเภทขนมอบให้มีการกระจายตัวของฟองอากาศได้ดีขึ้น (Imeson, 1997) รวมถึงลดการสูญเสียความชื้นระหว่างการอบ (baking loss) ที่จะส่งผลโดยตรงต่อปริมาตรของขนมปังปลอดกลูเตนอีกด้วย (Encina-Zelada และคณะ, 2018)



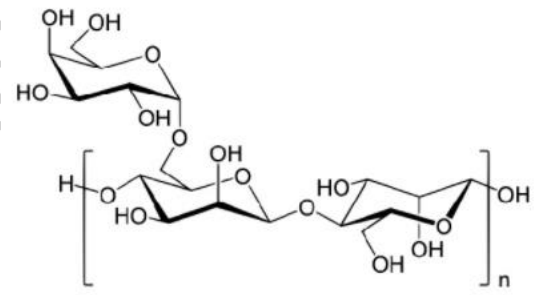
ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลของแซนแทนกัม
ที่มา: http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1112/xanthan-gum
สืบค้นวันที่: 21 มกราคม 2563

Lazaridou และคณะ (2007) ได้มีการศึกษาผลของสารไฮโดรคอลลอยด์ที่มีต่อสมบัติการไหลของโดและขนมปังปราศจากกลูเตนที่มีส่วนผสมของแป้งข้าว แป้งข้าวโพดและโซเดียมเคซิเนตเป็นหลัก โดยใช้สารไฮโดรคอลลอยด์ 5 ชนิด ได้แก่ เพกทิน คาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส อะกาโรส แซน-แทนกัม และเบต้ากลูแคน พบว่าการเพิ่มปริมาณของแซนแทนกัมจะยิ่งทำให้โดมีความแข็งแรงมากขึ้น

โดยมีคุณสมบัติการไหลเหมือนกับโดที่ทำมาจากแป้งสาลี นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมไฮโดรคอลลอยด์จะทำให้โดมีความยืดหยุ่นทนต่อการเสียรูปจากการกดได้ดีโดยเฉพาะแซนแทนกัม รองลงมาคือ คาร์-บอกซิเมทิลเซลลูโลส เพคติน อะกาโรส และเบต้ากลูเคน ตามลำดับ

2.5.3 กัวกัม (guar gum, GG)

กัวกัมเป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลแมนโนส (mannose) ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่งบีตา-1,4 และมีกิ่งแขนงของน้ำตาลกาแล็กโทส (galactose) ซึ่งต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่งแอลฟา-1,6 (ภาพที่ 6) กัวกัมเป็นสารที่มีการใช้เป็นวงกว้างในอุตสาหกรรมอาหาร ทำหน้าที่ให้ความข้นหนืดและให้ความคงตัวในอาหาร กัวกัมเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีเนื่องจากมีปริมาณน้ำตาลกาแลคโตสสูง กัวกัมสามารถสร้างพันธะ non-ionic กับน้ำได้ จึงมีความสามารถในการจับน้ำในขนมปังปลอดกลูเตนได้ (Chochkov และคณะ, 2019) จากการศึกษาพบว่าการใช้กัวกัมความเข้มข้น 1.0% ทำให้มีค่าปริมาตรจำเพาะ 1.23 ml/g และเมื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปลอดกลูเตนพบว่ามีค่าความแข็ง (hardness) ต่ำที่สุด และมีค่าการคืนตัวหลังการเสียรูปร่างของตัวอย่าง (springiness) มากที่สุด นั่นหมายความว่าขนมปังปลอดกลูเตนที่เติมกัวกัมจะมีลักษณะที่นุ่มและมีความยืดหยุ่นสูง (Numfon, 2017) นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมกัวกัมที่ความเข้มข้น 1.5% ทำให้โดของขนมปังมีความคงตัว และปริมาตรเพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ (Chochkov และคณะ, 2019)



ภาพที่ 6 โครงสร้างโมเลกุลของกัวกัม

ที่มา: https://www.crueltyfreereviews.com/e412-vegan/

สืบค้นวันที่: 10 ตุลาคม 2563

2.6 การใช้ไฮโดรคอลลอยด์ในการลดการดูดซับน้ำมันในอาหารทอด

ในระหว่างกระบวนการทอดจะเกิดการดูดซับน้ำมันบริเวณผิวของชิ้นอาหาร รวมถึงเกิดการระเหยน้ำออกอย่างรวดเร็ว (Lumanlan และคณะ, 2020) ส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายแห้งและแข็ง การเคลือบผิวของอาหารทอดจะช่วยป้องกันการดูดซับน้ำมันและการสูญเสียความชื้นของอาหารที่นำมาทอด (Varela และ Fiszman, 2011) ซึ่งการเติมหรือการเคลือบด้วยไฮโดร-คอลลอยด์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการจับกับน้ำเพื่อลดการสูญเสียความชื้นและลดปริมาณไขมันในอาหาร (Varela และ Fiszman, 2011) เนื่องจากไฮโดรคอลลอยด์มีคุณสมบัติลดแรงตึงผิว การเกิดเจล และการเกิดฟิล์ม (Lumanlan และคณะ, 2020) นอกจากนี้ไฮโดรคอลลอยด์ที่ความเข้มข้นสูงทำให้เกิดความหนืดแก่แบตเตอร์ที่ใช้เคลือบอาหารทอด (Altunakar และคณะ, 2006) ไฮโดรคอลลอยด์ที่มีการใช้ในอาหารทอดเพื่อลดการดูดซับน้ำมันอย่างกว้างขวาง คืออนุพันธ์ของเซลลูโลส (Singthong และ Thongkaew, 2009) เช่น ไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลส ซึ่งเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่เกิดเจลเมื่อได้รับความร้อน สามารถเกิดโครงสร้างฟิล์มได้ดี และป้องกันการซึมผ่านของไขมันได้ดี (Sahin และคณะ, 2005) จากการศึกษาพบว่าการใช้ไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสที่ระดับความเข้มข้น 1.0% ผสมในแบตเตอร์ที่ใช้เคลือบผิวของนักเก็ตไก่ ทำให้ลดปริมาณไขมันได้ 54% Rekas และ Marciniak-Lukasiak (2015) ได้ศึกษาผลของเติมไฮโดรคอลลอยด์ต่อคุณภาพของบะหมี่ทอดกึ่งสำเร็จรูป พบว่าการใช้ไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 0.4% ทำให้บะหมี่ทอดกึ่งสำเร็จรูปมีปริมาณไขมันลดลง 7% เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ นอกจากนี้ยังมีการใช้กัมชนิดต่างๆ เช่น กัวกัมและแซนแทนกัม เนื่องจากมีราคาถูก (Lumanlan และคณะ, 2020) กัวกัมเป็นสารที่จับกับน้ำได้ดี ใช้เป็นสารให้ความคงตัวและเพิ่มความหนืด (Sahin และคณะ, 2005) จากการศึกษาพบว่าการเคลือบด้วยกัวกัมที่ความเข้มข้น 1.0% ในผลิตภัณฑ์เฟรนช์-ฟายส์ ทำให้ลดปริมาณน้ำมันได้ถึง 26.41% (Jia และคณะ, 2017) Sothornvit (2011) พบว่าการเคลือบด้วยกัวกัม 1.5% ในผลิตภัณฑ์กล้วยทอด สามารถลดการดูดซับน้ำมันได้ 25.22% ส่วนแซนแทนกัมเป็นสารที่ละลายน้ำได้อย่างรวดเร็วและให้ความหนืดสูง รวมถึงให้ความคงตัวกับระบบอิมัลชันและโครงสร้างฟิล์ม (Sahin และคณะ, 2005) จากการศึกษาพบว่าการใช้แซนแทนกัมความเข้มข้น 1.0% ลงในแบตเตอร์ของผลิตภัณฑ์กล้วยทอด ทำให้ลดปริมาณน้ำมันได้ 22.11% เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ และกล้วยทอดยังมีความชื้นสูงถึง 58.0% (Norizzah และคณะ, 2016) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเคลือบด้วยแซนแทนกัมในผลิตภัณฑ์มันฝรั่งทอด พบว่าการเติมแซนแทนกัมที่ความเข้มข้น 0.3% ทำให้มันฝรั่งทอดมีปริมาณน้ำมันลดลง 57.4% (Yousef, 2017)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 สารไฮโดรคอลลอยด์

3.1.1.1 กัวกัม (เกรดอาหาร บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด ประเทศไทย)

3.1.1.2 ไฮดรอกซิโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (METHOCEL K4M Food Grade, Vicchi Enterprise, Thailand)

3.1.1.3 แซนแทนกัม (Food Grade, Thai Food and Chemical, Thailand)

3.1.2 วัตถุดิบการผลิตขนมปังปลอดกลูเตน

3.1.2.1 แป้งข้าวเจ้า (ตรา ชวนชม, บริษัท วราวุธ อุตสาหกรรม จำกัด, ประเทศไทย)

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

3.1.2.3 น้ำตาล (ตรา มิตรผล, บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.2.4 ยีสต์ผง (ตรา ซาฟ อินสแตน์, บริษัท โซไซตี้ อินดัสเตรียล จำกัด, ประเทศฝรั่งเศล)

3.1.2.5 เกลือ (ตรา ปรุงทิพย์, บริษัท อุตสาหกรรมเกลือบริสุทธิ์, ประเทศไทย)

3.1.2.6 นมผง (ตรา ฟาร์มนม, บริษัท พรีเซิร์ฟฟู้ด สเปเชี่ยลตี้ จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.2.7 น้ำมันปาล์ม (ตรา มรกต, บริษัท ไซม์ ดาร์บี้ ออยส์ มรกต จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.3 วัตถุดิบการผลิตนักเก็ตไก่

3.1.3.1 อกไก่สดบด (ตรา CP, บริษัท เจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด มหาชน, ประเทศไทย)

3.1.3.2 พริกไทย (ตราเอโร่, บริษัท สยามแม็คโค จำกัด มหาชน, ประเทศไทย)

3.1.3.3 ซอสปรุงรส (ตรา ภูเขาทอง, บริษัท ไทยเทพรส จำกัด, ประเทศไทย)

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

3.1.3.5 ไข่ไก่สด (ตรา KCF, บริษัท เกษมชัยฟู้ด จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.4 อุปกรณ์เครื่องครัว อุปกรณ์เบเกอรี่ และอุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.1.4.1 เตาอบแก๊สควบคุมไฟฟ้า (ยี่ห้อ LinkRich, รุ่น QL SERIES AUTOMATIC GAS OVEN, ประเทศจีน)

3.1.4.2 เครื่องทอด (ยี่ห้อ LinkRich, รุ่น LR-EF-061, ประเทศจีน)

3.1.5 อุปกรณ์วิเคราะห์

3.1.5.1 กล้องดิจิตอล (Nikon D3200, Nikon Corporation, Japan)

3.1.5.2 เครื่อง Moisture Balance Analyzer (ยี่ห้อ Sartorious รุ่น ma35, Germany)

3.1.5.3 เครื่องวัดสี (ยี่ห้อ Gardner รุ่น Color-view 9000, USA)

3.1.5.4 เครื่องร่อนเขย่า (ยี่ห้อ Retch AS200 basic, บริษัท ไซแอนติฟิค โปรโมชั่น จำกัด, ประเทศไทย)

3.1.5.5 ตะแกรงร่อนขนาด 5.6 mm (No. 3.5), 3.35 mm (No. 6), 2.0 mm (No. 10), 1.4 mm (No. 14), 850 µm (No. 20), 500 µm (No. 35)

3.1.5.6 เครื่อง Soxhlet (ยี่ห้อ TECATOR, Sweden)

3.1.5.7 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (ยี่ห้อ Tescan รุ่น Mira3, Czech Republic)

3.1.5.8 เครื่อง Texture Analyzer (ยี่ห้อ Stable รุ่น TA.XT. PLUS, UK)

3.1.5.9 เครื่องวัดคุณสมบัติแป้ง Rapid Visco Amylograph (RVA) (ยี่ห้อ Perten รุ่น RVA4500, Sweden)

3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์และประมวลผล

3.1.6.1 โปรแกรม ImageJ (ImageJ 1.42q, USA) ใช้วิเคราะห์โครงสร้างเนื้อในของขนมปัง

3.1.6.2 โปรแกรม SPSS เวอร์ชั่น 18.0 เพื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติ

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การศึกษาสูตรที่เหมาะสมกับขนมปังปลอดกลูเตนสำหรับการเตรียมเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการนำไปประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่

3.2.1.1 วิธีการเตรียมขนมปังปลอดกลูเตน

เติมส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 2 โดยผสมส่วนผสมที่เป็นของแห้งในอ่างผสม ได้แก่ แป้งข้าว แป้งข้าวโพด เกลือ นมผง และไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (HPMC) จากนั้นละลายยีสต์ ผงและน้ำตาล ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เทผสมในอ่างผสมที่มีของแห้งอยู่ผสมให้เข้ากันเทน้ำมัน

ปาล์มผสมให้เข้ากัน และเทส่วนผสมลงในพิมพ์ขนมปังก่อนนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที นำออกจากพิมพ์ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นบนตะแกรง

ตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมของขนมปังปลอดกลูเตน (หน่วย : กรัม)

ส่วนผสม	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5
แป้งข้าวเจ้า	100	100	100	50	50
แป้งข้าวโพด	-	-	-	50	50
เกลือ	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
น้ำตาล	9	9	5	5	5
ยีสต์	2	2	2	2	3
น้ำ	84	84	84	84	84
น้ำมันพืช	8	8	8	8	8
HPMC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
นมผง	8	3.2	3.2	3.2	3.2

ที่มา : สูตรที่ 1 (ดัดแปลงจาก วิภาวัน จุลยา (2549))

3.2.1.2 วิธีการเตรียมเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน

นำขนมปังที่ผลิตได้มาพักจนเย็นลงที่อุณหภูมิห้องบรรจุในถุงพลาสติกไล่อากาศออกให้ถุงพลาสติกแนบผิวขนมปังและมัดปากถุงให้แน่น นำไปเก็บในตู้เย็นอุณหภูมิ (-1.0)-1.0 °C เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง นำขนมปังออกจากตู้เย็นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนหายเย็นประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นตัดเปลือกขนมปังออก สไลด์ขนมปังหนา 1 นิ้ว และแบ่งออกเป็น 4 ส่วน นำไปบดด้วยเครื่องปั่นอาหาร (ยี่ห้อ TEFAL SMALL รุ่น DPA 130) เป็นเวลา 15 วินาที นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยเตาอบแก๊สควบคุมไฟฟ้า (ยี่ห้อ LinkRich, รุ่น QL SERIES AUTOMATIC GAS OVEN, ประเทศจีน) จนกระทั่งความชื้นอยู่ในช่วง 6.00±1.00% โดยทดสอบด้วยเครื่อง Moisture Balance Analyzer

3.2.1.3 วิธีการเตรียมนักเก็ตชุบเกล็ดขนมปังทอด

นำอกไก่บด 1 กิโลกรัม ปรุงรสด้วยซอสปรุงรส 45 กรัม เกลือและพริกไทยอย่างละ 5 กรัม ผสมกับแป้งข้าวโพด 90 กรัม นวดจนส่วนผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวและบรรจุใส่พิมพ์ซิลิโคน ขนาดต่อช่อง 1.5×1.5×1.5 เซนติเมตร จากนั้นแช่แข็งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เนื้อไก่คงรูป แล้วจึงนำคลุกกับแป้งข้าวโพดและชุบไข่ไก่ ก่อนนำไปคลุกเกล็ดขนมปังและนำไปทอดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องทอด (ยี่ห้อ LinkRich, รุ่น LR-EF-061, ประเทศจีน) เป็นเวลา 3 นาที ทิ้งให้สะเด็ดน้ำมัน 3 นาที บนตะแกรง

3.2.1.4 การวิเคราะห์คุณภาพแป้งปลอดกลูเตน ขนมปัง เกล็ดขนมปัง และการนำไปใช้ในนักเก็ตไก่ของสูตรต้นแบบ

นำแป้งปลอดกลูเตน ก้อนขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ที่ได้มาทำการตรวจสอบดังต่อไปนี้ โดยแต่ละการทดสอบจะทำทั้งหมด 2 ซ้ำ

ก. แป้งปลอดกลูเตน

- การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตน ด้วยเครื่อง Rapid Visco-Analyzer (RVA) ที่ความเข้มข้น 12% โดยใช้ตัวอย่างแป้ง 3 ชนิด ได้แก่ แป้งข้าว แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพด (อัตราส่วน 1:1) ใส่ในถ้วยทดสอบ ทำการบันทึกค่าต่างๆ ดังนี้ ความหนืดสูงสุด (peak viscosity, cP) ความหนืดต่ำสุด (trough, cP) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity, cP) ผลต่างของความหนืดสูงสุดกับความหนืดต่ำสุด (breakdown, cP) ค่าการคืนตัว (setback, cP) อุณหภูมิที่เครื่องเริ่มวัดความหนืดได้ (pasting temperature, °C)

ข. ขนมปัง

- ลักษณะปรากฏ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล (Nikon D3200, Nikon Corporation, Japan)

- ปริมาตรจำเพาะ (specific volume) ของก้อนขนมปังตามวิธี AACC 72-10 ด้วยวิธีการแทนที่ด้วยเมล็ดงา โดยเทเมล็ดงาลงในภาชนะจนเต็มและตวงใส่กระบอกตวงเพื่อหาปริมาตรของภาชนะ จากนั้นนำตัวอย่างก้อนขนมปังมาชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักก้อนขนมปังแต่ละก้อน เทเมล็ดงาลงในภาชนะประมาณ 1 ใน 3 นำก้อนขนมปังวางในภาชนะที่มีเมล็ดงาอยู่ และเติมเมล็ดงาจนเต็มภาชนะพอดี นำก้อนขนมปังออกจากภาชนะและนำงาที่อยู่ในภาชนะตวงใส่กระบอกตวงเพื่อหาปริมาตรงาหลังแทนที่ด้วยขนมปังและนำไปคำนวณปริมาตรจำเพาะของก้อนขนมปัง จากสูตร

$$\text{ปริมาตรจำเพาะ } (cm^3/g) = \frac{\text{ปริมาตรงาเต็มภาชนะ} - \text{ปริมาตรหลังแทนที่ด้วยขนมปัง}}{\text{น้ำหนักของขนมปัง}}$$

- การวิเคราะห์ขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในขนมปังใช้โปรแกรม ImageJ โดยนำขนมปังตัดตามขวางความหนา 1 นิ้ว และตัดขอบถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ตามวิธีของ Rathnayake และคณะ (2018) โดยเลือกพื้นที่การวิเคราะห์ 1600 mm^2 จากสูตร

$$\text{ความละเอียดของเนื้อในขนมปัง (Crumb fineness)} = \frac{\text{จำนวนเซลล์ที่มีขนาดน้อยกว่า } \mathbf{1} \text{ มิลลิเมตร}}{\text{จำนวนเซลล์ที่มีขนาดมากกว่า } \mathbf{1} \text{ มิลลิเมตร}}$$

- การวิเคราะห์ค่าสีเนื้อในของขนมปัง โดยนำตัวอย่างขนมปังตัดตามขวางความหนา 1 นิ้ว แล้วนำไปตัดขอบขนมปัง วัดค่าสีเนื้อในของขนมปังโดยใช้เครื่อง colorimeter ซึ่งแสดงผลในรูปของความสว่าง (L*) ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*)

ค. เกล็ดขนมปัง

- การตรวจสอบการกระจายขนาดของเกล็ดขนมปัง โดยนำเกล็ดขนมปังที่อบแห้งแล้วมาเขย่าด้วยเครื่องร่อนเขย่า เริ่มด้วยการชั่งน้ำหนักตะแกรงร่อนทุกขนาด โดยเรียงตะแกรงร่อนให้ถูกต้องตามขนาดจากใหญ่ (ด้านบน) ไปเล็ก (ด้านล่าง) ดังนี้ ตะแกรงขนาด 5.6 mm (No. 3.5) ตะแกรงขนาด 3.35 mm (No. 6) ตะแกรงขนาด 2.0 mm (No. 10) ตะแกรงขนาด 1.4 mm (No. 14) ตะแกรงขนาด 850 µm (No. 20) ตะแกรงขนาด 500 µm (No. 35) แล้วบันทึกค่าน้ำหนักตะแกรง จากนั้นชั่งเกล็ดขนมปังอบแห้ง 150 กรัม ใส่ในชามสแตนเลสและเทลงในชุดตะแกรงร่อน โดยเรียงตะแกรงร่อนให้ถูกต้องตามขนาดจากใหญ่ (ด้านบน) ไปเล็ก (ด้านล่าง) จากนั้นทำการเขย่าเกล็ดขนมปังที่ amplitude 60 mm นาน 20 นาที บันทึกน้ำหนักเกล็ดขนมปังที่ค้างอยู่ในตะแกรงร่อนแต่ละชั้น

- ความชื้นของเกล็ดขนมปัง โดยชั่งตัวอย่างเกล็ดขนมปัง 3 กรัม ให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนลงในภาชนะอลูมิเนียมที่มีฝา นำไปที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส โดยเปิดฝาจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ จากนั้นปิดฝาแล้วนำออกจากตู้อบทำให้เย็นในโถดูดความชื้นและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน และนำค่ามาวิเคราะห์จากสูตร

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของเกล็ดขนมปังก่อนอบ} - \text{น้ำหนักของเกล็ดขนมปังหลังอบ}}{\text{น้ำหนักของเกล็ดขนมปังก่อนอบ}} \times 100$$

- ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (bulk density) โดยนำเกล็ดขนมปังอบแห้งใส่ในกระบอกตวงปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่เกล็ดขนมปังให้พอดีที่ขีดระดับ 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำเกล็ดขนมปังไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้และนำไปวิเคราะห์จากสูตร

$$\text{ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (g/ml)} = \frac{\text{น้ำหนักเกล็ดขนมปังในกระบอกตวง}}{100}$$

- การวิเคราะห์ค่าสีของเกล็ดขนมปัง โดยนำตัวอย่างเกล็ดขนมปังหลังอบวัดค่าสีเนื้อในของขนมปังโดยใช้เครื่อง colorimeter ซึ่งแสดงผลในรูปของความสว่าง (L*) ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*)

ง. นักเก็ตไก่

- ลักษณะปรากฏ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล (Nikon D3200, Nikon Corporation, Japan)

- ค่าร้อยละการเกาะติด ดัดแปลงจากวิธีของ ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ และทศพล สุธาสิริทรัพย์ (2553) โดยนำเนื้อไก่ที่ผ่านการอัดใส่พิมพ์ซิลิโคนและแช่แข็งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ว มาชุบแป้งข้าวโพดแล้วชุบไข่ไก่ และนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปคลุกเกล็ดขนมปังก่อนนำไปชั่งน้ำหนักและนำไปคำนวณหาค่าร้อยละการเกาะติด

$$\text{ร้อยละการเกาะติด} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นอาหารหลังคลุกเกล็ดขนมปัง} - \text{น้ำหนักชิ้นอาหารก่อนคลุกเกล็ดขนมปัง}}{\text{น้ำหนักของชิ้นอาหารหลังคลุกเกล็ดขนมปัง}} \times 100$$

- การวิเคราะห์ค่าสีของนักเก็ตไก่ โดยนำตัวอย่างผิวของนักเก็ตไก่หลังทอดวัดค่าสีเนื้อในของขนมปังโดยใช้เครื่อง colorimeter ซึ่งแสดงผลในรูปของความสว่าง (L*) ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลือง (b*)

3.2.2 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อลักษณะคุณภาพของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตน

คัดเลือกสูตรขนมปังปลอดกลูเตนจากข้อ 3.2.1 เพื่อศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อลักษณะคุณภาพของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตน โดยผลิตตามสูตรและกระบวนการผลิตในข้อ 3.2.1 โดยสารไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ไฮดรอก-ซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Hydroxypropyl methylcellulose, HPMC) ที่ระดับความเข้มข้น 1.5% (HPMC 1.5) และ 3.0% (HPMC 3.0) กัวกัม (Guar gum, GG) ที่ระดับความเข้มข้น 0.75% (GG 0.75) และ 1.5% (GG 1.5) และแซนแทนกัม (Xanthan gum, XG) ที่ระดับความเข้มข้น 0.75% (XG 0.75) และ 1.5% (XG 1.5) เปรียบเทียบกับขนมปังสูตรแป้งสาลีในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาชนิดและปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมในการผลิตเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนต่อไป โดยแต่ละการทดสอบจะทำทั้งหมด 2 ซ้ำ และมีการวิเคราะห์คุณภาพดังนี้

ก. แป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพดผสมไฮโดร-คอลลอยด์ชนิดต่างๆ

- การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตน รายละเอียดการทดสอบตามข้อ 3.2.1.4

ข. ขนมปัง

- ลักษณะปรากฏ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล (ยี่ห้อ Nikon รุ่น D3200)

- ปริมาตรจำเพาะ (specific volume) ของก้อนขนมปังตามวิธี AACC 72-10 method รายละเอียดการทดสอบตามข้อ 3.2.1.4

- ค่า %baking loss ของขนมปัง โดยนำแป้งโดก่อนอบขนมปังและขนมปังหลังอบไปชั่งน้ำหนักจากนั้นนำไปคำนวณ %baking loss โดยใช้สูตร

$$\%\text{baking loss} = \frac{\text{น้ำหนักของโด} - \text{น้ำหนักของขนมปัง}}{\text{น้ำหนักของโด}} \times 100$$

- การวิเคราะห์ขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในขนมปังใช้โปรแกรม ImageJ รายละเอียดการทดสอบตามข้อ 3.2.1.4

- การวิเคราะห์ค่าสีเนื้อในของขนมปังด้วยเครื่อง color view รายละเอียดการทดสอบตามข้อ 3.2.1.4

ค. เกล็ดขนมปัง

- การตรวจสอบการกระจายขนาดของเกล็ดขนมปัง รายละเอียดการทดสอบตามข้อ 3.2.1.4

- ความชื้นของเกล็ดขนมปังหลังอบ รายละเอียดการทดสอบตามข้อ 3.2.1.4

- %yield ของเกล็ดขนมปัง

ชั่งน้ำหนักเกล็ดขนมปังหลังอบจนกระทั่งมีความชื้นอยู่ในช่วง 6.00±1.00% จากนั้นบันทึกค่า และนำเกล็ดขนมปังไปทดสอบความชื้นด้วยวิธี moisture can จากนั้นนำค่าทั้งสองมาวิเคราะห์จากสูตร

$$\%\text{yield ของเกล็ดขนมปัง} = \frac{\text{น้ำหนักของเกล็ดขนมปังโดยน้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักรวมทั้งหมดของส่วนผสมในสูตรขนมปัง}} \times 100$$

- ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (bulk density) รายละเอียดการทดสอบตามข้อ 3.2.1.4

- การวิเคราะห์ค่าสีของเกล็ดขนมปัง รายละเอียดการทดสอบตามข้อ 3.2.1.4

ง. นักเก็ตไก่

- ลักษณะปรากฏ โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิตอล (Nikon D3200, Nikon Corporation,)

- ค่าร้อยละการเกาะติด รายละเอียดการทดสอบตามข้อ 3.2.1.4

- ลักษณะเนื้อสัมผัส โดยนำตัวอย่างนักเก็ตไก่ขนาดตัวอย่าง 1.5×1.5×1.5 เซนติเมตร วัดค่าลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ Texture profile analysis (TPA) ด้วยเครื่อง Texture analyzer ใช้หัววัดแบบ compression probe เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5.0 เซนติเมตร ระยะในการกด 80% stain กำหนดอัตราเร็วก่อนวัด (pre-test speed) 2.0 mm/s อัตราเร็วขณะวัด (test speed) 2.00 mm/s อัตราหลังวัด (post-test speed) 2.0 mm/s ทำการวัด 15 ครั้งในแต่ละซ้ำ และรายงานค่าความแข็ง (hardness) ค่า springiness และ ค่า cohesiveness

- การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน โดยแยกส่วนเกล็ดขนมปังบนผิวนักเก็ตไก่หลังทอดด้วยมีดและนำไปตัดให้เป็นชิ้นขนาดเล็ก ก่อนนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (ประมาณ 3 กรัม) ใส่ในกระดาษกรองและทิมเบิล (timble) จากนั้นตวงปิโตรเลียมอีเทอร์ 50 มิลลิลิตร เป็นตัวทำละลายใส่ลงในถ้วยที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำเข้าเครื่อง Soxhlet ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ใช้เวลา boiling 30 นาที rinsing 60 นาที และ recover 15 นาที ตามลำดับ จากนั้นนำถ้วยที่ผ่านการสกัดไขมันไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นชั่งน้ำหนักและนำไปคำนวณหาปริมาณไขมันจากสูตร

$$\text{ปริมาณไขมัน} = \frac{\text{น้ำหนักของไขมันที่สกัดได้}}{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง}} \times 100$$

- ศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของนักเก็ตไก่ โดยการนำเกล็ดขนมปังบนผิวของนักเก็ตขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร สกัดไขมันออกด้วยเครื่อง Soxhlet แล้วนำตัวอย่างไปเคลือบทองบริสุทธิ์ ด้วยเครื่อง iron sputter coater (ยี่ห้อ Cressington รุ่น 108auto) วิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคของผิวนักเก็ตไก่โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ด้วยแรงดันไฟฟ้า 10 kV ที่กำลังขยาย 25 และ 250 เท่า ตามลำดับ

3.2.3 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์สถิติเชิงปริมาณด้านกายภาพและทางเคมีกายภาพของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ จะผ่านการวิเคราะห์ ANOVA โดยมีแผนการทดลองทางสถิติแบบ CRD (Completely Randomized Design) ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New

Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$) โดยใช้โปรแกรม SPSS เวอร์-ชั่น 18.0

บทที่ **4** ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาสูตรที่เหมาะสมกับขนมปังปลอดกลูเตนสำหรับการเตรียมเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการนำไปประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่

4.1.1 ความหนืดของแป้งปลอดกลูเตน

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าว แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพดดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าแป้งทุกตัวอย่างมีค่า break down และค่า pasting temperature ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แป้งข้าวมีค่า peak viscosity และค่า final viscosity (6488.5 และ 7843.0 cP) สูงที่สุด เนื่องจากแป้งข้าวและแป้งข้าวโพดมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน เช่น ปริมาณไขมันและโปรตีน ซึ่งจะส่งผลต่อความหนืดของแป้ง โดยแป้งข้าวโพดจะมีปริมาณไขมันมากกว่าแป้งข้าว (7.13 g/100g และ 1.01g/100g ตามลำดับ) (Ibrahim และคณะ, 2019) ซึ่งไขมันสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะไมโลส ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวลดลง (ประภัสสร เชิดชูธรรม, 2548) นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งข้าวโพดมีปริมาณโปรตีนมากกว่าแป้งข้าว (7.70 g/100g และ 6.34 g/100g ตามลำดับ) (Ibrahim และคณะ, 2019) ซึ่งโปรตีนจะทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวาง (barrier) การจับของเม็ดสตาร์ชกับน้ำ (ประภัสสร เชิดชูธรรม, 2548) ด้วยเหตุผลทั้งหมดนี้จึงทำให้มีความหนืดต่ำ ส่วนค่า setback เป็นค่าที่บ่งบอกถึงค่าการคืนตัว (Retrogradation) ของแป้ง พบว่าแป้งข้าวมีค่า setback สูงที่สุด (3265.5 cP) เนื่องจากแป้งข้าวโพดมีองค์ประกอบของไขมันและโปรตีนมากกว่าแป้งข้าว ซึ่งโปรตีนและไขมันจะขัดขวางการจับกันใหม่ของอะไมโลส (Hu และคณะ, 2020) ทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันได้น้อยและค่า setback ต่ำ ซึ่งการคืนตัวของแป้งจะส่งผลกับเนื้อสัมผัสของขนมปัง โดยแป้งที่มีการคืนตัวสูงจะทำให้ขนมปังมีลักษณะที่แห้งและร่วนมากกว่า (พรรณทิพา เจริญไทยกิจ, 2555) ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการผสมแป้งข้าวและแป้งข้าวโพด เพื่อลดความหนืดของโดและแก้ปัญหาขนมปังแห้งและร่วนเนื่องจากแป้งข้าวมีการเกิดปรากฏการณ์รีโทรเกรเดชันมาก

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนที่ความเข้มข้น 12%

Pasting properties	แป้งข้าว	แป้งข้าวโพด	แป้งข้าว:แป้งข้าวโพด (1:1)
Peak viscosity (cP)	6488.5±159.1[b]	5424.0±386.1[a]	5668.0±8.5[a]
Trough (cP)	4577.5±9.2[c]	2997.5±147.8[a]	3754.0±91.9[b]
Final viscosity (cP)	7843.0±117.4[c]	4583.0±224.9[a]	6062.0±42.4[b]
Break down[ns] (cP)	1911.0±168.3	2426.5±238.3	1914.0±83.4
Setback (cP)	3265.5±126.6[c]	1585.5±77.1[a]	2308.0±49.5[b]
Pasting temperature[ns] (°C)	72.6±1.2	72.2±0.7	73.1±0.6

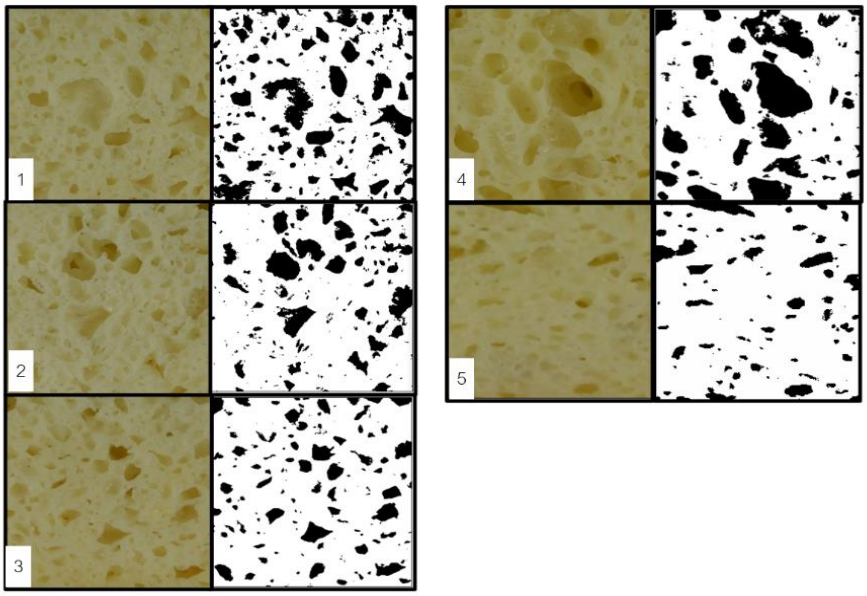
หมายเหตุ : สัญลักษณ์ [a,b] แสดงความแตกต่างกันตามแนวนอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สัญลักษณ์ ns แสดงความไม่แตกต่างกันตามแนวนอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.1.2 ลักษณะปรากฏและ Binary image ของขนมปังปลอดกลูเตน

ขนมปังปลอดกลูเตนสูตร 1-5 มีลักษณะปรากฏดังแสดงในภาพที่ 7 และเนื้อในของขนมปังดังแสดงในภาพที่ 8 โดยทุกสูตรมีรูพรุนจำนวนมาก แต่ขนมปังสูตรที่ 5 มีความสูงของขนมปังน้อยที่สุด

ภาพที่ 7 ลักษณะปรากฏขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1 สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 สูตรที่ 4 และสูตรที่ 5 ตามลำดับ



ภาพที่ 8 Binary image ของขนมปังสูตรที่ 1 สูตรที่ 2 สูตรที่ 3 สูตรที่ 4 และสูตรที่ 5

4.1.3 ปริมาตรจำเพาะและโครงสร้างเนื้อในของขนมปังปลอดกลูเตน

ค่าปริมาตรจำเพาะและโครงสร้างเนื้อในของขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า ขนมปังสูตรที่ 4 และสูตรที่ 2 มีค่าปริมาตรจำเพาะสูงสุด คือ 3.38 และ 3.21 ml/g ตามลำดับ รองลงมา คือ ขนมปังสูตรที่ 5 เมื่อพิจารณาโครงสร้างเนื้อในของขนมปัง ค่าความละเอียดของเนื้อในขนมปัง (crumb fineness) ซึ่งหากมีค่ามากแสดงว่าเนื้อในของขนมปังมีความละเอียด (Rathnayake และคณะ, 2018) จากการทดลองพบว่าขนมปังทุกสูตรมีค่า crumb fineness ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยทั่วไปหากโครงสร้างเนื้อในของขนมปังมีขนาดใหญ่และสม่ำเสมอ แสดงว่าขนมปังมีการขึ้นฟูดี แต่หากเนื้อในของขนมปังมีรูพรุนขนาดเล็กและไม่สม่ำเสมอจะส่งผลให้ขนมปังมีปริมาตรจำเพาะน้อยและมีความแน่นเนื้อมากขึ้น (จิตรา สิงห์ทอง, 2562) ส่วนขนาดและจำนวนพรุน พบว่าขนมปังสูตรที่ 4 มีขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุด โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ขนมปังสูตรที่ 1 และ 2 มีปริมาณรูพรุนมากที่สุด ส่วนขนมปังสูตรที่ 4 มีปริมาณรูพรุนน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากขนมปังสูตรที่ 4 มีการใช้แป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าว ในอัตราส่วน 1:1 แต่การใช้แป้งข้าวเพียงอย่างเดียว (สูตรที่ 3) จะมีปริมาตรจำเพาะต่ำ (2.43 ml/g) เนื่องจากแป้งข้าวมีความหนืดสูง การผสมแป้งข้าวและแป้งข้าวโพดจะช่วยลดความหนืดของโดได้ ซึ่งความหนืดที่เพิ่มขึ้นจะขัดขวางการขยายตัวของก๊าซ (Noorlaila และคณะ, 2020) ระหว่างกระบวนการอบ ทำให้มีปริมาตรจำเพาะต่ำ ส่วนขนมปังสูตรที่ 2 ที่มีการลดนมผงแต่มีปริมาตร

จำเพาะสูง (3.21 ml/g) เนื่องจากขนมปังสูตรที่ 2 มีปริมาณน้ำตาลที่เป็นอาหารของยีสต์เพียงพอต่อการเจริญเติบโตทำให้เกิดการขึ้นฟูที่ดี ทำให้โปรตีนเคซีนและเวย์โปรตีนที่อยู่ในนมผง เมื่อได้รับความร้อนโครงสร้างตติยภูมิจะถูกทำลายทำให้โปรตีนคลี่สายออกและจับกับโปรตีนสายใหม่ด้วยพันธะได-ซัลไฟด์ (Erdogdu-Arnoczky และคณะ, 1996) ที่อาจเป็นโปรตีนนมด้วยกันเองหรือจับกับโปรตีนที่อยู่ในแป้งข้าวจึงทำหน้าที่เชื่อมโยงกับโครงสร้างต่างๆ ภายในขนมปัง (Krupa-Kozak และคณะ, 2013) และขนมปังสูตรที่ 2 มีปริมาตรจำเพาะมากกว่าสูตรที่ 1 ที่มีน้ำตาลเท่ากันแต่ปริมาณนมผงมากกว่า เนื่องจากในนมผงมีโปรตีนเคซีนที่มีคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้น้อย (Krupa-Kozak และคณะ, 2013) ดังนั้นการเติมนมผงเพิ่มจะทำให้เคซีนเพิ่มขึ้นทำให้ละลายน้ำได้น้อยลงและความสามารถในการจับกับน้ำลดลง ก้อนโดจึงไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ได้ (Erdogdu-Arnoczky และคณะ,1996) ขนมปังจึงมีปริมาตรจำเพาะน้อยกว่า ส่วนสูตรที่ 3 ที่ลดทั้งนมผงและน้ำตาล ทำให้มีน้ำตาลไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของยีสต์และเกิดการขึ้นฟูที่ไม่ดี ส่วนสูตรที่ 5 ที่แม้จะมีการเติมยีสต์เพิ่มเพื่อช่วยในการขึ้นฟูแต่กลับมีค่าปริมาตรจำเพาะน้อยกว่าขนมปังสูตรที่ 4 เนื่องจากมียีสต์จำนวนมาก ยีสต์จะผลิตเอนไซม์อะไมเลสมาเพื่อย่อยแป้ง (Struyf และคณะ, 2017) ได้จำนวนมาก ทำให้โครงสร้างของขนมปังเกิดความอ่อนแอและเกิดการยุบตัว ดังนั้นปริมาตรจำเพาะจึงต่ำ

ตารางที่ 4 ปริมาตรจำเพาะและโครงสร้างเนื้อใน ของขนมปังปลอดกลูเตนวิเคราะห์โดยโปรแกรม imageJ

สูตรที่	ปริมาตรจำเพาะ (ml/g)	Number of cells	Mean cell area (mm^2)	% cell area	Crumb fineness^{ns}
1	2.40±0.09^{a}	241.17±47.32^{c}	1.31±0.24^{a}	19.20±2.58^{a}	2.91±0.23
2	3.21±0.04^{c}	214.17±40.18^{bc}	1.35±0.23^{a}	17.95±2.85^{a}	3.70±1.36
3	2.43±0.04^{a}	186.00±18.22^{b}	1.64±0.23^{a}	19.06±2.73^{a}	3.84±1.08
4	3.38±0.05^{c}	134.50±20.66^{a}	2.99±0.84^{b}	24.33±3.90^{b}	6.05±0.08
5	2.80±0.43^{b}	182.67±29.64^{b}	1.19±0.02^{a}	16.03±0.28^{a}	6.66±2.74

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
สัญลักษณ์ ^{ns} แสดงความไม่แตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)
วิเคราะห์โครงสร้างเนื้อในของขนมปังบนพื้น 1600 mm^2

4.1.4 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน

การกระจายขนาดของอนุภาคของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่าเกล็ดขนมปังมีขนาดอยู่ในช่วง 500-2,000 ไมโครเมตร ทุกสูตรมีการกระจายขนาดที่ไม่แตกต่างกันในทุกขนาดของเกล็ดขนมปังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ซึ่งขนาดของเกล็ดขนมปังจะส่งผลโดยตรงกับค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มและร้อยละการเกาะติด โดยเกล็ดขนมปังที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับชิ้นอาหารได้มาก ทำให้ความสามารถในการเกาะติดอาหารที่ผ่านการทอดสูงขึ้นและค่าร้อยละการเกาะติดสูง (ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ และ ทศพล สุธาสิริทรัพย์, 2553)

ตารางที่ 5 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5

ขนาด	สูตร				
(μm)	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4	สูตรที่ 5
<500^{ns}	2.48±2.82	7.29±5.74	2.03±0.59	3.55±1.80	6.51±2.14
500^{ns}	17.94±4.80	21.85±4.46	13.46±0.91	25.38±10.32	24.66±6.56
850^{ns}	37.51±11.95	41.46±3.38	35.92±5.42	42.00±0.90	40.35±1.71
1400^{ns}	27.45±0.24	24.44±5.97	37.67±2.54	24.03±8.99	24.6±5.52
2000^{ns}	12.60±12.08	3.93±1.11	10.73±3.30	4.87±2.03	2.64±2.83
3350^{ns}	1.74±2.45	0.52±0.34	0.13±0.06	0.10±0.14	2.94±2.55
5600^{ns}	0.28±0.35	0.51±0.09	0.06±0.04	0.06±0.06	0.84±1.11

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{ns} แสดงความไม่แตกต่างกันตามแนวนอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

4.1.5 ความชื้น ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน

ค่าความชื้น ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5 ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่าความชื้นของทุกตัวอย่างมีค่าอยู่ในในช่วง 6.32-6.95% เป็นไปตามข้อกำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.1168-2538) กระทรวงอุตสาหกรรม (ต่ำกว่า 10%) ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มและร้อยละการเกาะติด ของทุกตัวอย่างไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนทุกสูตรมีการกระจายขนาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

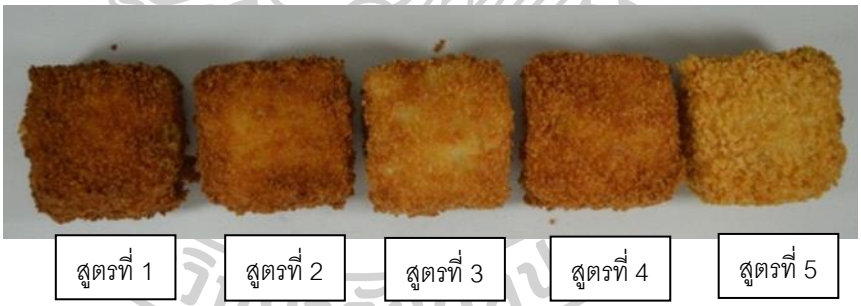
ตารางที่ 6 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มและร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5

สูตรที่	ความชื้น (g/g dry solid)	ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (g/ml)^{ns}	ร้อยละการเกาะติด (%)^{ns}
1	6.33±0.16^{a}	0.4757±0.05	13.58±2.83
2	6.45±0.07^{a}	0.4976±0.08	12.91±1.77
3	6.95±0.05^{b}	0.5153±0.02	16.50±1.23
4	6.32±0.07^{a}	0.4517±0.03	15.84±3.03
5	6.47±0.07^{a}	0.4606±0.12	14.31±3.62

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
สัญลักษณ์ ^{ns} แสดงความไม่แตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.1.6 ลักษณะปรากฏของนักเก็ตไก่

ลักษณะปรากฏของนักเก็ตไก่แสดงในภาพที่ 9 พบว่านักเก็ตสูตรที่ 1 มีสีเข้มมากกว่านักเก็ตไก่สูตรอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 9 ลักษณะปรากฏนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรต่างๆ

4.1.7 ค่าสีของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตน

ค่าสีของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ของสูตรที่ 1-5 ดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่าขนมปังทุกสูตรมีค่าความสว่างมาก (L*) เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดแป้ง (สูตรที่ 3 และ 4) โดยสูตรที่มีการใช้แป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าว (สูตรที่ 4) มีค่าความสว่างน้อยกว่า และมีค่าสีเหลือง (b*) มากกว่าสูตรที่ใช้แป้งข้าวเพียงอย่างเดียว (สูตรที่ 3) เนื่องจากแป้งข้าวโพดมีเม็ดสี เช่น แคโรทีนและสารประกอบโพลีฟีโนลิก มากกว่าแป้งข้าว ทำให้ขนมปังที่มีแป้งข้าวโพดผสมกับแป้งข้าวมีสีเหลืองมากกว่า (Ali และคณะ, 2016) และเมื่อนำไปผลิตเป็นเกล็ดขนมปัง พบว่า ทุกสูตรมีค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น เนื่องจากการอบเกล็ดขนมปังที่อุณหภูมิ 60 °C ทำให้เกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้เพิ่มขึ้นทุกสูตร จึงมีค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปผลิตเป็นนักเก็ตพบว่าเกล็ดขนมปังทุกสูตรมีค่าความสว่างลดลง ค่าสีแดง (a*) และค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น (b*) โดยนักเก็ตที่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรที่ 1 มีค่าความสว่างน้อยที่สุด รองลงมา คือ นักเก็ตคลุกเกล็ดขนมปังสูตรที่ 2 และสูตรที่ 4 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการทอดที่ใช้อุณหภูมิสูง (180 °C) ทำให้นักเก็ตคลุกเกล็ดขนมปังสูตรที่ 1 ที่มีปริมาณนมผงและน้ำตาลมากที่สุด สามารถเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดและคาราเมลไลซ์เซชันที่ให้สีน้ำตาล (Krupa-Kozak และคณะ, 2013) ได้มาก ส่วนนักเก็ตคลุกเกล็ดขนมปังสูตรที่ลดปริมาณนมผงและน้ำตาล (สูตรที่ 3-5) มีการเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลได้น้อยกว่า

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 7 ค่าสีของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5

ตัวอย่าง	สูตร	L*	a*	b*
ขนมปัง	สูตรที่ 1	86.29±0.55^{c}	6.52±0.49^{ab}	18.80±0.40^{b}
	สูตรที่ 2	86.40±0.49^{c}	6.30±0.35^{a}	17.03±0.47^{a}
	สูตรที่ 3	85.82±0.69^{c}	6.87±0.50^{b}	18.68±0.33^{b}
	สูตรที่ 4	82.85±1.35^{b}	7.71±0.12^{c}	19.16±0.72^{b}
	สูตรที่ 5	80.25±1.92^{a}	9.19±0.25^{d}	20.43±0.75^{c}
เกล็ดขนมปัง	สูตรที่ 1	85.05±0.08^{b}	8.27±0.13^{b}	25.35±0.40^{ab}
	สูตรที่ 2	85.82±0.06^{b}	7.07±0.01^{a}	23.37±0.40^{a}
	สูตรที่ 3	84.45±0.42^{ab}	8.50±0.54^{b}	26.23±0.40^{b}
	สูตรที่ 4	84.90±0.93^{ab}	8.74±0.17^{bc}	28.83±0.57^{c}
	สูตรที่ 5	83.37±0.05^{a}	9.31±0.30^{c}	26.75±1.60^{bc}
นักเก็ตไก่	สูตรที่ 1	42.61±0.21^{a}	22.60±0.40^{a}	25.35±0.89^{a}
	สูตรที่ 2	44.19±0.29^{b}	23.60±1.29^{a}	26.52±0.89^{a}
	สูตรที่ 3	51.27±0.11^{d}	23.04±2.24^{a}	32.40±0.66^{b}
	สูตรที่ 4	49.50±0.19^{c}	24.54±1.00^{a}	30.58±0.47^{b}
	สูตรที่ 5	56.64±0.34^{d}	21.51±0.44^{b}	31.26±0.62^{b}

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งในแต่ละผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ปริมาณนมผงและน้ำตาลที่เหมาะสม ร่วมกับการใช้แป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณภาพขนมปังทำให้ปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณยีสต์ที่มากเกินไปส่งผลให้ขนมปังมีปริมาตรจำเพาะลดลง ส่วนการกระจายขนาดของเกล็ดขนมปัง ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และค่าร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่นักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังจากสูตรที่มีนมผงและน้ำตาลปริมาณมากจะมีสีเข้ม ด้วยเหตุนี้จึงคัดเลือกสูตรที่ 4 เป็นสูตรต้นแบบในการศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อลักษณะคุณภาพของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตนต่อไป

4.2 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อลักษณะคุณภาพของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตน

4.2.1 ความหนืดของแป้งสาลีและแป้งปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาลีและแป้งปลอดกลูเตนที่การเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 8 เมื่อพิจารณาแป้งต่างชนิดกัน พบว่าแป้งสาลีมีค่า pasting properties ทุกค่าน้อยกว่าแป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพด เนื่องจากแป้งสาลีมีปริมาณโปรตีนสูง (17.77 g/100g) (พรรณทิพา เจริญไทยกิจ, 2555) โปรตีนจะทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวาง (barrier) การจับของเม็ดสตาร์ชกับน้ำ (ประภัสสร เชิดชูธรรม, 2548) ทำให้พองตัวได้น้อย ปริมาณน้ำรอบเม็ดสตาร์ชมาก (สุทธินี สีสังข์, 2563) ส่งผลให้ความหนืดต่ำ ซึ่งโปรตีนส่วนใหญ่ที่พบในแป้งสาลี คือ กลูเตน ที่มีความหยืดหยุ่นสูง (Hadnađev และคณะ, 2011) ด้วยเหตุผลทั้งหมดนี้จึงทำให้แป้งสาลีมีความหนืดน้อยกว่าแป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพด จากการที่แป้งสาลีมีปริมาณโปรตีนสูง ทำให้โปรตีนขัดขวางการจับกันใหม่ของอะไมโลส (Hu และคณะ, 2020) ทำให้เกิดการรีโทรเกรเดชันได้น้อย และค่า setback ต่ำ (1392.5 cP)

เมื่อพิจารณาแป้งชนิดเดียวกันแต่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ต่างชนิดกัน พบว่าความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนที่เติมแซนแทนกัมและกัวกัมทั้ง 2 ระดับความเข้มข้น (XG และ GG ตามลำดับ) มีค่า peak viscosity ที่สูงกว่าสูตรแป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพดที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ เนื่องจากแซนแทนกัมสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างกิ่งแข็ง (Demirkesen และคณะ, 2010) ในขณะที่กัวกัมสามารถสร้างพันธะ non-ionic กับน้ำได้ จึงมีความสามารถในการจับน้ำได้ดี (Chochkov และคณะ, 2019) ทำให้มีความหนืดสูง ส่วนแป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพดที่เติมไฮดรอกซิล-โพรพิลเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 3.0% (HPMC 3.0) มีค่า peak viscosity ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพดที่เติมไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 1.5% (HPMC 1.5) มีค่า peak viscosity น้อยกว่าสูตรแป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพดที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์ (5453.0 cP) เนื่องจากไฮดรอกซิลโพรพิลเมททิลเซลลูโลสจะเกิดพันธะไฮโดรฟิลิก (hydrophilic bond) กับน้ำ ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดี (Morreale และคณะ, 2018) ในขณะที่แป้งมีองค์ประกอบของอะไมโลส ไขมัน และโปรตีน ที่เมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจะทำให้จับกับน้ำได้ยาก น้ำจึงเข้าสู่เม็ดสตาร์ชได้น้อย และมีการพองตัวของแป้งต่ำ (ประภัสสร เชิดชูธรรม, 2548) ทำให้ความหนืดต่ำ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสเป็น 3.0% (HPMC 3.0) ทำให้เกิดการจับน้ำเพิ่มขึ้น น้ำรอบเม็ดแป้งลดลง ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น (สุทธินี สีสังข์, 2563) ส่วนค่า setback พบว่าแป้งข้าวผสมแป้งข้าวโพดที่เติมแซนแทนกัมทั้ง 2 ความเข้มข้นมีค่า

น้อย เนื่องจากแป้งปลอดกลูเตนที่เติมแซนแทนกัมมีความหนืดสูงทำให้โมเลกุลของอะไมโลสเคลื่อนที่มาอยู่ใกล้กันและจับกันใหม่อีกครั้งหลังถูกให้ความร้อนได้ยาก จึงเกิดปรากฏการณ์รีโทรกราเดชันได้น้อยและค่า setback ต่ำ (มาโนชญ์ สุธีรวัฒนานนท์, 2558)

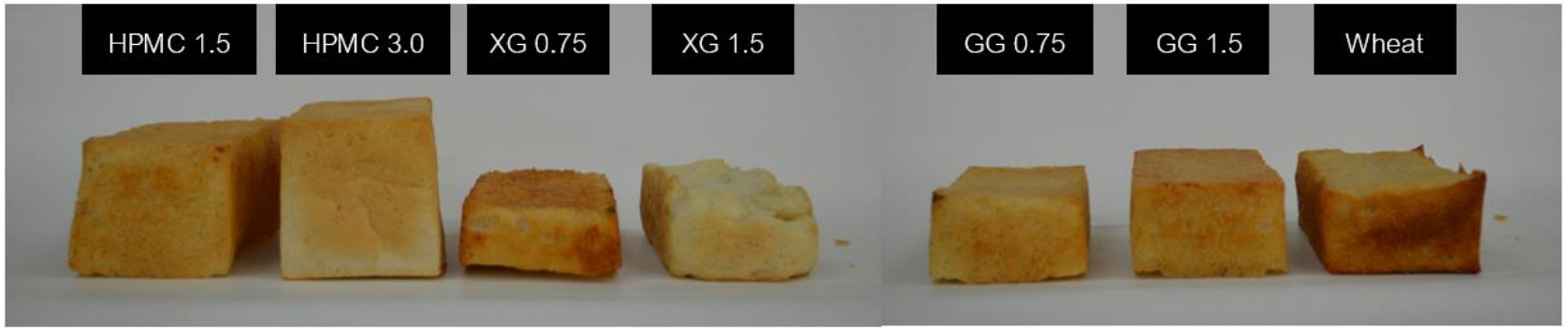
ตารางที่ 8 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาลีและแป้งปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆที่ความเข้มข้น 12%

ตัวอย่าง	Peak viscosity (cP)	Trough (cP)	Final viscosity (cP)	Break down (cP)	Setback (cP)	Pasting temperature (°C)
HPMC 1.5	5453.0±117.4^{b}	3814.5±9.2^{b}	1638.5±108.2^{bc}	6279.0±107.5^{c}	2464.5±98.3^{d}	72.7±1.2^{d}
HPMC 3.0	5688.5±36.1^{c}	4155.5±19.1^{cd}	1533.0±17.0^{ab}	6871.5±132.2^{e}	2716.0±113.1^{e}	63.1±0.6^{b}
XG 0.75	5874.0±11.3^{d}	3896.0±42.4^{bc}	1978.0±53.7^{e}	5874.5±14.9^{b}	1978.5±27.6^{b}	65.1±6.0^{b}
XG 1.5	5939.0±32.5^{d}	3986.5±187.4^{bcd}	1752.5±62.9^{ed}	6025.5±53.0^{b}	2039.0±134.4^{bc}	52.4±3.2^{a}
GG 0.75	6197.0±22.6^{e}	4151.5±208.6^{cd}	2045.5±186.0^{e}	6399.5±40.3^{c}	2248.0±168.3^{cd}	72.6±1.1^{d}
GG 1.5	6758.5±88.4^{f}	4218.0±127.3^{d}	2540.5±38.9^{f}	6670.5±99.7^{d}	2452.5±27.6^{d}	71.4±0.6^{cd}
Wheat	3526.0±46.7^{a}	2186.5±101.1^{a}	1339.5±54.5^{a}	3579.0±86.3^{a}	1392.5±14.9^{a}	66.1±0.1^{bc}
แป้งข้าว:แป้งข้าวโพด (1:1)	5668.0±8.5^{c}	3754.0±91.9^{b}	1914.0±83.4^{de}	6062.0±42.4^{b}	2308.0±49.5^{d}	73.1±0.6^{d}

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

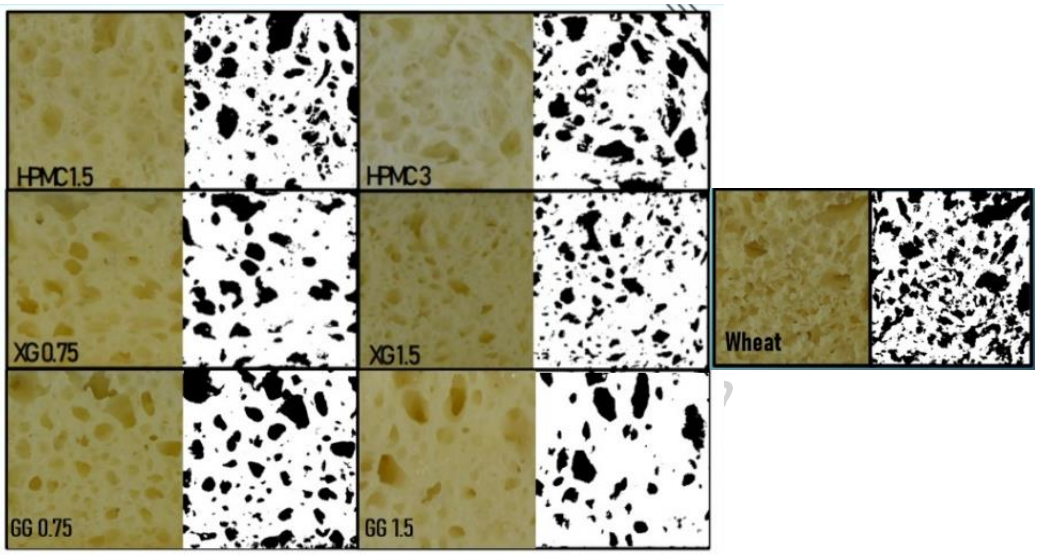
4.2.2 ลักษณะปรากฏและ Binary image ของขนมปังแป้งสาลีและขนมปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

ขนมปังสูตรแป้งสาลีและขนมปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ มีลักษณะปรากฏด้านตัดขวางดังแสดงในภาพที่ 10 พบว่าขนมปังที่เติมไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส ขนมปังมีการพองฟูมากกว่า แต่การเติมแซนแทนกัมและกัวกัมจะได้ขนมปังที่มีการพองฟูน้อยกว่า



ภาพที่ 10 ลักษณะปรากฏด้านตัดขวางขนมปังแป้งสาลีและขนมปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

รูป binary image ของขนมปังสูตรแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดร-คอลลอยด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 11 พบว่าขนมปัง สูตร HPMC 3.0 ขนมปังมีเซลล์อากาศขนาดใหญ่และมีขนาดใกล้เคียงกัน ในขณะที่ขนมปังสูตร GG 1.5 มีขนาดเซลล์อากาศไม่สม่ำเสมอ



ภาพที่ 11 ภาพเนื้อในขนมปังและ Binary image ของขนมปังแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

4.2.3 การสูญเสียความชื้นระหว่างการอบ ปริมาตรจำเพาะของก้อนขนมปัง และโครงสร้างเนื้อในของขนมปังสูตรแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

ค่าการสูญเสียความชื้นระหว่างการอบ ปริมาตรจำเพาะของก้อนขนมปัง และโครงสร้างเนื้อในของขนมปังสูตรแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 9 พบว่าขนมปังสูตรแป้งสาลีมีค่าการสูญเสียความชื้นต่ำที่สุด (7.67%) ส่วนขนมปังสูตรที่เติม HPMC 3.0 มีค่าการสูญเสียความชื้นและปริมาตรจำเพาะสูงที่สุด (15.46% และ 4.65 ml/g) ขนมปังสูตรที่เติมไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสทั้ง 2 ระดับความเข้มข้น มีค่าปริมาตรจำเพาะมากกว่าสูตรแป้งสาลี เนื่องจากขนมปังสูตรแป้งสาลีในการศึกษานี้ใช้สูตรตามสูตรต้นแบบที่คัดเลือก (ดังแสดงในภาคผนวก) เพื่อเปรียบเทียบผลจากชนิดของแป้งและไฮโดรคอลลอยด์ โดยจำกัดปริมาณน้ำให้เท่ากันทุกสูตรส่งผลให้น้ำจับกับโปรตีนกลูเตนที่อยู่ในแป้งสาลีได้น้อย จึงส่งผลให้เกิดการขึ้นฟูและปริมาตรจำเพาะต่ำ (Gallagher และคณะ, 2003) ส่วนขนมปังสูตร HPMC มีการขึ้นฟูมาก เนื่องจากไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสสามารถเกิดโครงสร้างฟิล์มกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยีสต์สร้าง และ

โครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ทำหน้าจับน้ำและโปรตีนจากนมผงได้ (Srikanlaya และคณะ, 2018) ช่วยให้เกิดโครงสร้างแก่ขนมปัง ส่วนขนมปังสูตรที่เติมแซนแทนกัมและกัวกัมทุกระดับความเข้มข้นมีค่าปริมาตรจำเพาะต่ำและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (1.75-1.89 ml/g) เนื่องจากแซนแทนกัมและกัวกัมมีความหนืดสูงกว่าไฮดรอกซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลส (Demirkesen และคณะ, 2010) ซึ่งความหนืดที่เพิ่มขึ้นจะขัดขวางการขยายตัวของก๊าซ (Noorlalia และคณะ, 2020) ระหว่างกระบวนการอบ ทำให้มีปริมาตรจำเพาะต่ำ และพบว่ามีค่าการสูญเสียความชื้นน้อยกว่าขนมปังที่มีปริมาตรจำเพาะมากกว่า จากการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ของขนมปังปลอดกลูเตนพบว่าปริมาตรมีความสัมพันธ์กับค่าการสูญเสียความชื้นแบบแปรผันตรง ($r=0.911$) เนื่องจากขนมปังที่ขึ้นฟูน้อยมีพื้นที่ระเหยน้ำออกในระหว่างกระบวนการอบน้อย ส่วนขนมปังสูตรแป้งสาลีมีปริมาตรจำเพาะสูง (2.98 ml/g) แต่กับมีค่าการสูญเสียความชื้นต่ำ (7.67%) ทั้งนี้เกิดจากขนมปังสูตรแป้งสาลีมีโปรตีนกลูเตนที่ทำหน้ากักเก็บอากาศที่จับกับน้ำจำนวนมาก (Gallagher และคณะ, 2003)

ขนาดรูพรุนของเนื้อในขนมปังพบว่าขนมปังทุกสูตรมีขนาดรูพรุนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ขนมปังสูตร XG 0.75 มีค่า %cell area และจำนวนเซลล์น้อยที่สุด ส่วนค่าความละเอียดของเนื้อในขนมปัง (crumb fineness) ของขนมปังปลอดกลูเตนที่เติมไฮดรอก-ซิลโพรพิลเมทิลเซลลูโลสและกัวกัมทุกระดับความเข้มข้นมีค่ามาก แสดงว่าเนื้อในของขนมปังมีความละเอียดสูง (Rathnayake และคณะ, 2018)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 9 การสูญเสียความชื้น ปริมาตรจำเพาะของก้อนขนมปัง ขนาด และปริมาณรูพรุนวิเคราะห์โดยโปรแกรม imageJ ของขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

สูตร	การสูญสีย ความชื้น (%)	ปริมาตรจำเพาะ (ml/g)	Number of cells	Mean cell area (mm^2) ^{ns}	% cell area	Crumb Fineness
HPMC 1.5	12.82±0.20^{c}	3.50±0.12^{c}	294.33±93.3^{b}	1.41±0.40	24.31±1.60^{ab}	4.02±0.46^{d}
HPMC 3.0	16.28±1.11^{d}	4.70±0.05^{d}	213.17±89.80^{ab}	2.70±1.61	29.41±6.37^{b}	3.50±0.38^{cd}
XG 0.75	11.71±0.37^{bc}	1.86±0.12^{a}	133.50±5.42^{a}	2.46±0.01	20.34±0.51^{a}	1.93±0.08^{ab}
XG 1.5	11.27±0.84^{b}	1.75±0.03^{a}	209.83±62.93^{ab}	1.53±0.73	18.64±3.71^{a}	2.78±0.73^{bc}
GG 0.75	11.88±0.01^{bc}	1.89±0.15^{a}	201.50±4.48^{ab}	1.96±0.07	23.86±0.28^{ab}	3.22±0.09^{cd}
GG 1.5	11.78±0.63^{bc}	1.88±0.15^{a}	205.17±26.63^{ab}	1.49±0.28	18.55±1.28^{a}	3.17±0.09^{cd}
Wheat	7.67±0.16^{a}	2.98±0.12^{b}	177.50±9.19^{ab}	3.01±0.46	31.29±3.44^{b}	1.46±0.54^{a}

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สัญลักษณ์ ^{ns} แสดงความไม่แตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

วิเคราะห์โครงสร้างเนื้อในของขนมปังบนพื้นที่ 1600 mm^2

4.2.4 ค่าสีของขนมปังสูตรแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ

ค่าสีของขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 10 พบว่าขนมปังสูตรแป้งสาลี มีค่า a* มากที่สุด ทั้งนี้เกิดจากขนมปังสูตรแป้งสาลีที่มีองค์ประกอบโปรตีนกลูเตน ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาลร่วมกับน้ำตาลได้ (Krupa-Kozak และคณะ, 2013) ขนมปังปลอดกลูเตนทุกสูตรมีค่า L* อยู่ในช่วง 77-85 และมีค่าสีเหลือง (+b*) อยู่ในช่วง 17-21 ซึ่งสีเหลืองเกิดจากแป้งข้าวโพดมีเม็ดสี เช่น แคโรทีนและสารประกอบโพลีฟีโนลิก (Ali และคณะ, 2016)

ตารางที่ 10 ค่าสีของขนมปังสูตรแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ

สูตร	L*	a*	b*
HPMC 1.5	85.08±0.04^{c}	6.77±0.08^{a}	17.28±0.16^{a}
HPMC 3.0	77.78±0.20^{a}	8.00±0.13^{b}	19.42±0.47^{b}
XG 0.75	80.18±0.52^{a}	8.10±0.11^{b}	19.81±0.33^{bc}
XG 1.5	77.88±1.74^{ab}	8.17±0.58^{b}	19.78±0.99^{bc}
GG 0.75	79.32±0.47^{a}	7.95±0.11^{b}	20.23±0.15^{bc}
GG 1.5	82.05±0.73^{b}	8.49±0.01^{b}	21.15±0.26^{c}
Wheat	81.89±1.73^{b}	11.47±0.97^{c}	20.97±0.83^{c}

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.5 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่าอนุภาคของเกล็ดขนมปังประมาณ 70% มีการกระจายอยู่ในช่วง 850-1,400 μm โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

ตารางที่ 11 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

ขนาด	สูตร						
(μm)	HPMC 1.5	HPMC 3.0	XG 0.75	XG 1.5	GG 0.75	GG 1.5	Wheat
<500	1.58±0.61^{ab}	1.28±0.25^{ab}	0.77±1.05^{a}	2.40±0.14^{b}	0.93±0.34^{ab}	2.14±0.51^{ab}	1.67±0.68^{ab}
500	16.77±1.53^{b}	17.17±3.35^{b}	8.60±5.51^{a}	20.87±2.88^{b}	9.70±0.71^{a}	14.08±1.09^{ab}	18.04±1.75^{b}
850^{ns}	44.44±2.14	42.68±4.01	32.44±12.01	40.55±0.59	36.54±3.20	39.61±0.74	38.17±3.48
1400^{ns}	31.69±0.51	31.94±5.63	37.06±2.09	28.78±3.08	37.01±0.52	31.78±1.17	33.86±6.38
2000^{ns}	4.52±2.20	5.80±2.27	20.53±16.41	6.35±0.53	6.55±0.25	7.38±0.64	4.60±1.12
3350	0.34±0.46^{a}	0.65±0.00^{a}	0.32±0.43^{a}	0.57±0.04^{a}	0.41±0.19^{a}	0.62±0.11^{a}	2.74±0.31^{b}
5600^{ns}	0.68±0.93	0.50±0.28	0.84±0.38	0.41±0.11	0.26±0.11	0.26±0.11	0.94±0.17

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สัญลักษณ์ ^{ns} แสดงความไม่แตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.2.6 ความชื้น ผลผลิต ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดของขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

ค่าความชื้น ผลผลิต ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่ใช้ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 12 พบว่าค่าความชื้นของทุกตัวอย่างมีค่าอยู่ในในช่วง 5.98%-7.04% เป็นไปตามข้อกำหนดโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.1168-2538) กระทรวงอุตสาหกรรม (ต่ำกว่า 10%) พบว่าค่าร้อยละผลผลิตของเกล็ดขนมปังทุกสูตรอยู่ในช่วง 13.94%-19.21% ส่วนค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน มีค่าอยู่ในช่วง 0.5330-0.5887 g/ml และมีค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มมากกว่าเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลี เกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนมีแนวโน้มค่าร้อยละการเกาะติดมากกว่าเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลี และมีค่าอยู่ในช่วง 14.16%-18.33%

ตารางที่ 12 ความชื้น ผลผลิตความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

สูตร	ความชื้น (g/g dry solid)^{ns}	ร้อยละผลผลิต (%)	ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (g/ml)	ร้อยละการเกาะติด (%)
HPMC 1.5	6.48±0.04	13.94±0.63^{a}	0.5390±0.00^{bc}	16.12±0.82^{bc}
HPMC 3.0	6.25±0.01	14.17±0.22^{a}	0.4791±0.03^{a}	17.06±0.96^{cd}
XG 0.75	5.86±0.21	12.84±0.61^{a}	0.5887±0.01^{e}	15.78±1.14^{bc}
XG 1.5	6.66±1.10	17.91±0.66^{cd}	0.5750±0.01^{de}	18.33±0.33^{d}
GG 0.75	6.39±0.24	16.74±1.01^{bc}	0.5569±0.01^{cd}	17.03±0.62^{cd}
GG 1.5	7.04±0.86	15.77±0.32^{b}	0.5330±0.01^{b}	14.16±1.03^{ab}
Wheat	5.98±0.04	19.21±0.03^{d}	0.4749±0.02^{a}	13.48±0.48^{a}

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

สัญลักษณ์ ^{ns} แสดงความไม่แตกต่างกันตามแนวนอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.2.7 ค่าของสีเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ

ค่าสีของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 13 พบว่าเกล็ดขนมปังทุกสูตรมีค่าสีเหลืองอยู่ในช่วง 22-29 ซึ่งเพิ่มจากสีของขนมปัง เนื่องจากเมื่อนำเกล็ดขนมปังไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เกิดสีปฏิกิริยาสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น (Krupa-Kozak และคณะ, 2013) เกล็ดขนมปังทุกสูตรจึงมีค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 13 ค่าสีของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่เติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ

สูตร	L*	a*	b*
HPMC 1.5	84.98±0.13^{b}	7.51±0.06^{ab}	27.22±0.69^{b}
HPMC 3.0	88.41±0.72^{c}	3.82±0.73^{a}	22.90±0.70^{a}
XG 0.75	80.78±0.16^{a}	10.98±0.05^{b}	29.52±0.37^{c}
XG 1.5	84.45±0.49^{b}	8.33±0.52^{ab}	27.49±0.57^{b}
GG 0.75	80.67±0.15^{a}	10.72±0.37^{b}	30.75±0.33^{c}
GG 1.5	80.57±0.48^{a}	10.80±0.10^{b}	29.54±0.32^{c}
Wheat	80.75±1.42^{a}	12.46±0.78^{ab}	30.08±1.60^{c}

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.8 ค่าปริมาณไขมันและลักษณะเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่ที่เคลือบด้วยเกล็ดขนมปังแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

ปริมาณไขมันและลักษณะเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่ที่เคลือบด้วยเกล็ดขนมปังแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 14 พบว่าปริมาณไขมันของเกล็ดขนมปังเคลือบผิวนักเก็ตไก่ที่มีการคลุกด้วยเกล็ดขนมปังสูตร GG 1.5 มีปริมาณต่ำที่สุด (12.04%) ส่วนปริมาณไขมันของเกล็ดขนมปังเคลือบผิวนักเก็ตที่คลุกด้วยเกล็ดขนมปังสูตร HPMC 3.0 มีปริมาณไขมันสูงที่สุด (22.02%)

จากการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่านักเก็ตไก่ที่มีการเคลือบด้วยเกล็ดขนมปังสูตรแซนแทนกัมทั้ง 2 ความเข้มข้น มีค่าความแข็ง (hardness) มากที่สุด (21854.97 g และ 21385.97 g ตามลำดับ) ส่วนนักเก็ตที่มีการเคลือบด้วยเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีมีค่าความแข็งน้อยที่สุด (16013.19 g) ส่วนนักเก็ตที่มีการเคลือบด้วยเกล็ดขนมปังสูตร GG 1.5 มีค่า Hardness, springiness และ cohesiveness ใกล้เคียงกับนักเก็ตที่คลุกด้วยเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลี

ตารางที่ 14 ปริมาณไขมันและลักษณะเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่ชุบเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

สูตร	Fat (%)	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness
HPMC 1.5	15.94±0.56^{c}	19685.22±344.96^{c}	0.58±0.01^{bc}	0.29±0.01^{cd}
HPMC 3.0	22.41±0.36^{e}	18533.46±358.04^{bc}	0.64±0.03^{c}	0.33±0.01^{e}
XG 0.75	16.17±0.00^{c}	21854.97±689.94^{d}	0.52±0.04^{ab}	0.28±0.02^{bc}
XG 1.5	17.49±0.36^{d}	21385.97±749.22^{d}	0.60±0.03^{c}	0.31±0.01^{de}
GG 0.75	13.89±0.59^{b}	18378.60±713.01^{bc}	0.45±0.02^{a}	0.25±0.01^{a}
GG 1.5	12.04±0.73^{a}	17773.62±631.76^{b}	0.46±0.01^{a}	0.25±0.00^{a}
Wheat	17.57±0.05^{d}	16013.19±1035.89^{a}	0.44±0.04^{a}	0.26±0.01^{a}

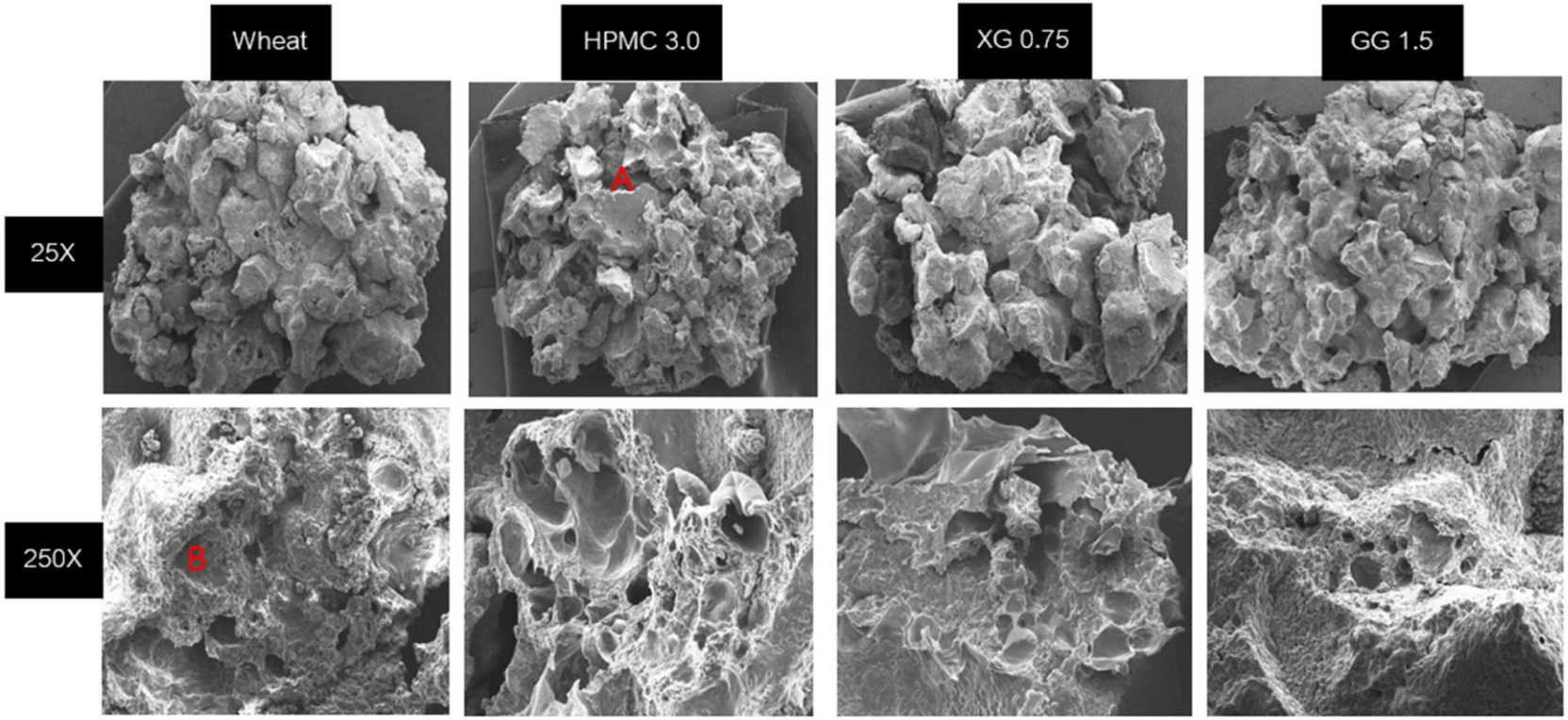
หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.9 ลักษณะพื้นผิวของนักเก็ตที่ถูกถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการศึกษาปริมาณไขมันและลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่านักเก็ตที่คลุกด้วยเกล็ดขนมปังสูตร HPMC 3.0 มีปริมาณไขมันสูงที่สุด (22.41%) ส่วนนักเก็ตที่คลุกเกล็ดขนมปังสูตร GG 1.5 มีปริมาณไขมันต่ำที่สุด (12.04%) ส่วนนักเก็ตที่คลุกเกล็ดขนมปังสูตร XG 0.75 มีค่าความแข็ง (hardness) มากที่สุด (21854.97 g) จึงคัดเลือกสูตรทั้งหมดนี้มาทดสอบลักษณะพื้นผิวของเกล็ดขนมปังหลังชุบนักเก็ตทอดโดยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในภาพที่ 12 พบว่าที่กำลังขยาย 25 เท่า เกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีที่เคลือบบนนักเก็ตมีการกลุ่มกัน เกล็ดขนมปังสูตร HPMC 3.0 มีการเกาะกลุ่มน้อยกว่าเกล็ดขนมปังสูตรสาลีและพบช่องว่างระหว่างเกล็ดขนมปังเล็กน้อย (บริเวณ A) ส่วนเกล็ดขนมปังสูตร XG 0.75 มีลักษณะเป็นแผ่นเรียงตัวซ้อนทับกันแน่นบริเวณผิวของนักเก็ตไก่ และนักเก็ตที่มีการคลุกด้วยเกล็ดขนมปังสูตร GG 1.5 มีการเกาะกลุ่มกันคล้ายเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและพบช่องว่างเกล็ดขนมปังน้อยกว่าผิวนักเก็ตที่มีการคลุกด้วยเกล็ดขนมปังสูตร HPMC 3.0 เมื่อ

พิจารณาที่กำลังขยาย 250 เท่า พบว่าผิวของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีมีโพรงอากาศขนาดเล็กอยู่จำนวนมาก (บริเวณ B) พื้นผิวของเกล็ดขนมปังสูตร HPMC 3.0 มีโพรงอากาศขนาดใหญ่และโพรงอากาศขนาดเล็กแทรกตัวอยู่ ผิวเกล็ดขนมปังสูตร XG 0.75 มีโพรงอากาศขนาดเล็กอยู่เล็กน้อย ส่วนผิวนักเก็ตที่มีการเคลือบด้วยเกล็ดขนมปังสูตร GG 1.5 มีโพรงอากาศขนาดเล็กกว่าเกล็ดขนมปังทุกสูตร ซึ่งการเรียงตัวของเกล็ดขนมปังบนผิวนักเก็ตจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณไขมันและลักษณะเนื้อสัมผัส โดยการเรียงตัวของเกล็ดขนมปังบนผิวนักเก็ตที่ช่องว่างระหว่างเกล็ดขนมปังมากกว่า รวมถึงผิวของเกล็ดขนมปังที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ เมื่อนำนักเก็ตลงทอดในน้ำมันร้อน (180 °C) จะทำให้น้ำมันแทรกซึมผ่านช่องว่างระหว่างเกล็ดขนมปังและโพรงอากาศที่ผิวเกล็ดขนมปังได้มาก ส่งผลให้ความร้อนเข้าสู่ชิ้นอาหารได้มาก ทำให้ผิวหน้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นและความชื้นในอาหารเกิดการระเหยอย่างรวดเร็ว (จันทร์จิรา ตั้งสันทัศน์กุล, 2554) ทำให้นักเก็ตที่ได้มีปริมาณไขมันสูงและมีความแข็งมาก ซึ่งเป็นลักษณะไม่พึงประสงค์ของนักเก็ตไก่

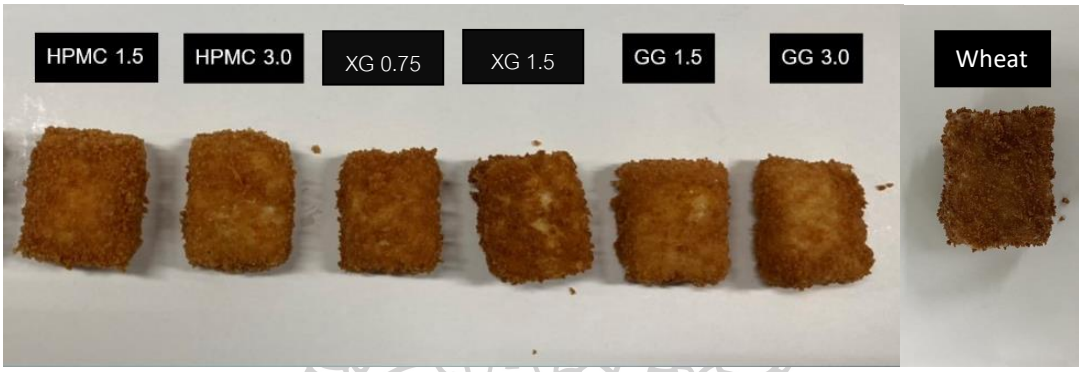
มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาพที่ 12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจากด้านบนของผิวนักเก็ตไก่
A= ช่องว่างระหว่างเกล็ดขนมปัง B= โพรงอากาศ

4.2.10 ลักษณะปรากฏของนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและสูตรไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

ลักษณะปรากฏของนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและสูตรไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 13 พบว่านักเก็ตที่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีมีสีเข้มมากกว่านักเก็ตไก่ที่มีการคลุกเกล็ดขนมปังสูตรที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 13 นักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

4.2.11 ค่าสีนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ

ค่าสีนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 15 พบว่านักเก็ตไก่ที่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีมีค่า L* ต่ำที่สุด (49.70) นักเก็ตไก่ที่มีการเคลือบด้วยเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนมีค่า L* อยู่ในช่วง 53-61 ทั้งนี้เกิดจากแป้งแต่ละชนิดมีองค์ประกอบของโปรตีนที่แตกต่างกัน โดยแป้งที่มีโปรตีนสูง เช่น แป้งสาลี (Ibrahim และคณะ, 2019) ทำให้เกิดปฏิกริยาสีน้ำตาลได้มากและส่งผลให้นักเก็ตมีสีเข้ม (Krupa-Kozak และคณะ, 2013) ซึ่งปัจจัยที่มีผลกับการเกิดสีในอาหารทอดมีหลายปัจจัย เช่น ขนาดรูพรุนของเกล็ดขนมปัง โดยขนาดรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก จะทำให้เกิดการเคลือบของน้ำมันได้อย่างไม่เต็มที่ (Liu และคณะ, 2021) และความร้อนเข้าสู่ชิ้นอาหารได้ช้าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีได้น้อยกว่าเกล็ดขนมปังมีรูพรุนขนาดใหญ่ (จันทร์จิรา ตั้งสันทัศน์กุล, 2554)

ตารางที่ 15 ค่าสีนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ

สูตร	L*	a*	b*
HPMC 1.5	53.34±0.52^{ab}	22.69±0.56^{b}	34.09±1.20^{b}
HPMC 3.0	59.68±1.71^{c}	20.62±0.74^{a}	36.92±2.11^{c}
XG 0.75	60.40±2.86^{c}	22.89±0.25^{b}	40.02±0.31^{d}
XG 1.5	62.53±1.54^{c}	22.69±0.22^{b}	38.33±0.11^{cd}
GG 0.75	57.57±1.75^{bc}	24.62±0.19^{c}	31.27±0.57^{a}
GG 1.5	61.21±3.41^{c}	23.64±0.15^{bc}	31.00±0.49^{a}
Wheat	49.70±0.39^{a}	26.51±1.28^{d}	29.80±0.73^{a}

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ ^{a,b} แสดงความแตกต่างกันตามแนวตั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ **5** สรุป

5.1 ผลการศึกษาสูตรที่เหมาะสมกับขนมปังปลอดกลูเตนสำหรับการเตรียมเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการนำไปประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่

การใช้แป้งข้าวและแป้งข้าวโพด (1:1) ทำให้ความหนืดน้อยกว่าการใช้แป้งข้าวเพียงอย่างเดียวและช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์รีโทรเกเดชัน ดังนั้นเมื่อนำไปผลิตขนมปังจะช่วยแก้ปัญหาเนื้อในขนมปังแห้งและร่วน การใช้นมผงและน้ำตาลในปริมาณที่เหมาะสม ช่วยให้ขนมปังมีปริมาตรจำเพาะเพิ่มมากขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณยีสต์มากเกินไปส่งผลขนมปังมีปริมาตรจำเพาะลดลง ส่วนการกระจายขนาดของเกล็ดขนมปัง ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่นักเก็ตไก่ที่คลุกเกล็ดขนมปังจากสูตรที่มีนมผงและน้ำตาลมากจะมีสีเข้ม ด้วยเหตุนี้จึงคัดเลือกสูตรที่ 4 สำหรับศึกษาผลของชนิดและระดับความเข้มข้นของไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

5.2 การศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ต่อลักษณะคุณภาพของขนมปัง เกล็ดขนมปัง และนักเก็ตไก่ปลอดกลูเตน

การเติมไฮดรอกซิลโพลพิลเมททิลเซลลูโลส 3.0% (HPMC 3.0) ทำให้ขนมปังมีการขึ้นฟูดีและปริมาตรจำเพาะสูงที่สุด ค่า crumb fineness ของขนมปังที่เติมไฮดรอกซิลโพลพิลเมททิล-เซลลูโลสและกัวกัมมีค่าสูง ซึ่งแสดงถึงเนื้อในขนมปังละเอียด การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังพบว่าทุกสูตรมีอนุภาคขนาดอยู่ในช่วง 850-1,400 ไมโครเมตร โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) เกล็ดขนมปังสูตร GG 1.5 หลังชุบนักเก็ตทอดคล้ายเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลี และผิวหน้าของเกล็ดขนมปังมีรูพรุนขนาดเล็กกว่าเกล็ดขนมปังทุกสูตร ซึ่งลักษณะของเกล็ดขนมปังจะส่งผลดูดซับน้ำมันระหว่างทอด จึงทำให้ผิวของนักเก็ตที่คลุกด้วยเกล็ดขนมปังสูตร GG 1.5 มีปริมาณไขมันน้อยที่สุด (12.04%) และมีค่าความแข็ง (hardness) ใกล้เคียงกับเกล็ดขนมปังแป้งสาลี ส่วนค่าสีของนักเก็ตที่คลุกด้วยเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนทุกสูตรมีสีเข้มน้อยกว่าเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลี ด้วยเหตุนี้จึงควรเลือกเกล็ดขนมปังสูตร GG 1.5 ในการประยุกต์ใช้ในนักเก็ตไก่แบบปลอดกลูเตน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ควรนำเกล็ดขนมปังสูตร GG 1.5 ไปทดสอบทางประสาทสัมผัสเปรียบเทียบกับเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลี เพื่อวิเคราะห์การยอมรับของผู้บริโภค

5.3.2 สามารถนำไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ในการศึกษาเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตน ไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่อื่นๆ เช่น เค้ก แครกเกอร์ เพื่อเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภค

รายการอ้างอิง

Ali, A., Wani, T. A., Wani, I. A. and Masoodi, F. A. (2016). Comparative study of the physico-chemical properties of rice and corn starches grown in Indian temperate climate. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 15*(1), 75-82.

Altunakar, B., Sahin, S. and Sumnu, G. (2006). Effects of hydrocolloids on apparent viscosity of batters and quality of chicken nuggets. *Chemical Engineering Communications, 193*(6), 675-682.

Chartrand, L. J., Russo, P. A., Duhaime, A. G. and Seidman, E. G. (1997). Wheat starch intolerance in patients with celiac disease. *Journal of the American Dietetic Association, 97*(6), 612-618.

Chochkov, R., Zlateva, D., Dushkova, M. and Topleva, S. (2019). Effect of hydrocolloids on properties of dough and quality of gluten-free bread enriched with whey protein concentrate. *Ukrainian Food Journal, 8*(3), 533-543, 664.

Davis, A. (1983). *Batter and Breading Ingredients.* . Westport, Connecticut: AVI Publishing Co.

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

Dyson, D. V. (1983). *Batter and breading*. westport connecticut: AVI Pub., Co.

Dyson, D. V. (1990). *Batters and Breadings in Food Processing*. St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists.

Encina-Zelada, C. R., Cadavez, V., Monteiro, F., Teixeira, J. A. and Gonzales-Barron, U. (2018). Combined effect of xanthan gum and water content on physicochemical and textural properties of gluten-free batter and bread. *Food Research International, 111*, 544-555.

Encina-Zelada, C. R., Cadavez, V., Teixeira, J. A. and Gonzales-Barron, U. (2019). Optimization of quality properties of gluten-free bread by a mixture design of xanthan, guar, and hydroxypropyl methyl cellulose gums. *Foods, 8*(5).

Erdogdu-Arnoczky, N., Czuchajowska, Z. and Pomeranz, Y. (1996). Functionality of whey and casein in fermentation and breadbaking by fixed and optimized procedures. . *Cereal Chemistry. , 73*(3), 309-316.

Gallagher, E., Gormley, T. R. and Arendt, E. K. (2003). Crust and crumb characteristics of gluten-free breads. *Journal of Food Engineering, 56*(2-3), 153-161.

Glicksman, M. (1982). *Food Hydrocolloid Volume I*. United State.: CRC Press, Inc.

Gujral, H. S. and Rosell, C. M. (2004). Improvement of the breadmaking quality of rice flour by glucose oxidase. *Food Research International, 37*(1), 75-81.

Hadnađev, T. D., Torbica, A. and Hadnađev, M. (2011). Rheological properties of wheat flour substitutes/alternative crops assessed by Mixolab. *Procedia Food Science, 1*, 328-334.

Hu, Y., He, C., Zhang, M., Zhang, L., Xiong, H. and Zhao, Q. (2020). Inhibition from whey protein hydrolysate on the retrogradation of gelatinized rice starch. *Food Hydrocolloids, 108*.

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

Imeson, A. (1997). *Thickening and Gelling Agent for Food*. Great Britain: St Edmundsbury Press Ltd.

Jia, B., Fan, D., Li, J., Duan, Z. and Fan, L. (2017). Effect of guar gum with sorbitol coating on the properties and oil absorption of french fries. *International Journal of Molecular Sciences, 18*(12).

Joshi, S. C. (2006). Modeling of thermal gelation and degelation of MC and HPMC hydrogels. *International Conference on Biomedical and Pharmaceutical Engineering*, 545-550.

Krupa-Kozak, U., Baczek, N. and Rosell, C. M. (2013). Application of dairy proteins as technological and nutritional improvers of calcium-supplemented gluten-free bread. *Nutrients, 5*(11), 4503-4520.

Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N. and Biliaderis, C. G. (2007). Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering, 79*(3), 1033-1047.

Liu, Y., Tian, J., Zhang, T. and Fan, D. (2021). Effects of frying temperature and pore profile on the oil absorption behavior of fried potato chips. *Food Chemistry, 345*, 128832.

Lumanlan, J. C., Fernando, W., Bin., M. A. D. and Jayasena, V. (2020). Mechanisms of oil uptake during deep frying and applications of predrying and hydrocolloids in reducing fat content of chips. *International Journal of Food Science and Technology, 55*(4), 1661-1670.

Maghaydah, S., Abdul-Hussain, S., Ajo, R., Tawalbeh, Y. and Alsaydali, O. (2013). Utilization of different hydrocolloid combinations in gluten-free bread making. *Food and Nutrition Sciences, 04*, 496-502.

Mohammadi, M., Sadeghnia, N., Azizi, M.-H., Neyestani, T.-R. and Mortazavian, A. M. (2014). Development of gluten-free flat bread using hydrocolloids: Xanthan and CMC. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20*(4), 1812-1818.

Morreale, F., Garzón, R. and Rosell, C. M. (2018). Understanding the role of hydrocolloids viscosity and hydration in developing gluten-free bread. A study with hydroxypropylmethylcellulose. *Food Hydrocolloids, 77*, 629-635.

Noorlaila, A., Hasanah, H. N., Asmeda, R. and Yusoff, A. (2020). The effects of xanthan gum and hydroxypropylmethylcellulose on physical properties of sponge cakes. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 19*(2), 128-135.

Norizzah, A. R., Junaida, A. R. and Maryam, A. A. L. (2016). Effects of repeated frying and hydrocolloids on the oil absorption and acceptability of banana (Musa acuminate) fritters. *International Food Research Journal, 23*(2), 694-699.

Numfon, R. (2017). Effects of different hydrocolloids on properties of gluten-free bread based on small broken rice berry flour. *Food Science Technology International 23*(4), 310-317.

Rathnayake, H. A., Navaratne, S. B. and Navaratne, C. M. (2018). Porous crumb structure of leavened baked products. *International Journal Food Sciences, 2018*, 8187318.

Rekas, A. and Marciniak-Lukasiak, K. (2015). A multivariate study of the correlation between addition of maltodextrin, MCG, HPMC and psyllium on the quality of instant fried noodles. *LWT - Food Science and Technology, 62*(1), 689-696.

Robbin, P. M. (1976). *Convenient Food: Recent Technology*. New Jersey: Noyes Data Corporation.

Sahin, S., Sumnu, G. and Altunakar, B. (2005). Effects of batters containing different gum types on the quality of deep-fat fried chicken nuggets. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 85*(14), 2375-2379.

Sasiela, R. J. (1990). *Batter and breading in Food Processing*. St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists Inc.

Singthong, J. and Thongkaew, C. (2009). Using hydrocolloids to decrease oil absorption in banana chips. *LWT - Food Science and Technology, 42*(7), 1199-1203.

Sothornvit, R. (2011). Edible coating and post-frying centrifuge step effect on quality of vacuum-fried banana chips. *Journal of Food Engineering, 107*(3-4), 319-325.

Srikanlaya, C., Therdthai, N., Ritthiruangdej, P. and Zhou, W. (2018). Effect of hydroxypropyl methylcellulose, whey protein concentrate and soy protein isolate enrichment on characteristics of gluten-free rice dough and bread. *International Journal of Food Science & Technology, 53*(7), 1760-1770.

Struyf, N., Verspreet, J., Verstrepen, K. J. and Courtin, C. M. (2017). Investigating the impact of α-amylase, α-glucosidase and glucoamylase action on yeast-mediated bread dough fermentation and bread sugar levels. *Journal of Cereal Science, 75*, 35-44.

Suderman, D. R. (1990). *Application of Batters and Breadings to Poulty, Seafood, Red Meat and Vegetables*. St. Paul, Minnesota: American Association of Cereal Chemists Inc.

Thiranusornkij, L., Thamnarathip, P., Chandrachai, A., Kuakpetoon, D. and Adisakwattana, S. (2018). Physicochemical Properties of Hom Nil (Oryza sativa) Rice Flour as Gluten Free Ingredient in Bread. *Foods, 7*(10).

Varela, P. and Fiszman, S. M. (2011). Hydrocolloids in fried foods. A review. *Food Hydrocolloids, 25*(8), 1801-1812.

Voong, K. Y., Norton, A. B., Mills, T. B. and Norton, I. T. (2018). Characterisation of deep-fried batter and breaded coatings. *Food Structure, 16*, 43-49.

Wang, K., Lu, F., Li, Z., Zhao, L. and Han, C. (2017). Recent developments in gluten-free bread baking approaches: a review. *Food Science and Technology, 37*, 1-9.

Wünsche, J., Lambert, C., Gola, U. and Biesalski, H. K. (2018). Consumption of gluten free products increases heavy metal intake. *NFS Journal, 12*, 11-15.

www.imarcgroup.com. (2019). Gluten-free products Market: global industry trends, share, size, growth, opportunity and forecast 2020-2025. Retrieved from https://www.imarcgroup.com/gluten-free-products-market

www.marketandmarkets.com. (2015). Gluten-free products market by type (bakery products, snacks and RTE products, condiments and dressings, pizzas ans pastas), distribution channel (conventional stores, specialty stores and drugstores and pharmacies), Form and Region - global forecast to 2025. Retrieved from https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/gluten-free-products-market-738.html

Yano, H. (2019). Recent practical researches in the development of gluten-free breads. *NPJ Science of Food, 3*, 7.

Yousef, A. R. (2017). Application of hydrocolloids as coating films to reduce oil absorption in fried potato chip-based pellets. *Pakistan Journal of Nutrition, 16*(10), 805-812.

จันทร์เฉิดฉาย สังเกตกิจ และคณะ. (2557). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังและเค้กปราศจากกลูเตนและไขมันทรานส์จากแป้งข้าวหอมมะลิ โดยกระบวนการมีส่วนร่วมของชุมชน : กรณีศึกษา กลุ่มพัฒนาบทบาทสตรี ตำบลเทพรักษา อำเภอสังขะ จังหวัดสุรินทร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์, สุรินทร์.

จันทร์จิรา ตั้งสันทัศน์กุล. (2554). การศึกษาปัจจัยและสภาวะการผลิตเพื่อพัฒนาระบบการทอดแบบพ่นฝอย. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร, ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

จิตรา สิงห์ทอง. (2562). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังเพื่อสุขภาพจากแป้งแก่นตะวัน (Helianthus tuberosus L.). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, *21*(1), 71-83.

ฐิติมา ธันวราคม. (2557). ผลของโปรตีนและสภาวะการอบต่อคุณภาพของขนมปังแป้งข้าว. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, สาขาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร.

ดวงฤทัย ธำรงโชติ. (2555). ขนมปังและขนมอบปลอดกลูเตน. กรุงเทพมหานคร: เพชรประกาย.

นิธิยา รัตนาปนนท์. (2545). เคมีอาหาร. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์.

ประภัสสร เชิดชูธรรม. (2548). ผลของโปรตีนและไขมันต่อการเกิดเจลาติไนเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันของเพสต์สตาร์ชข้าว. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปราโมทย์ คูวิจิตรจารุ และ ทศพล สุธาสิริทรัพย์. (2553). คุณสมบัติของเบรดเดอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าว. วารสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น, *15*(10), 965-972.

พรรณทิพา เจริญไทยกิจ. (2555). การพัฒนาขนมปังจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวเหนียว. กรุงเทพมหานคร: คณะเทคโนโลยีและนวัตกรรมผลิตภัณฑ์การเกษตร มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

มาโนชญ์ สุธีรวัฒนานนท์. (2558). การเพิ่มปริมาณแป้งต้านทานการย่อยในผลิตภัณฑ์พาสต้าข้าวเจ้า. นครราชสีมา: สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วิภาวัน จุลยา. (2549). เอกสารประกอบการสอนวิชาเบเกอรี่. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพวิทยาเขตพระนครใต้.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2536). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ขนมปังปิ่น มอก. *1168-2536*. กรุงเทพมหานคร: สำนักงาน.

สุทธินี สีสังข์. (2563). คุณสมบัติของแป้งที่มีผลต่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ. กองวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมสัตว์น้ำกรมประมง, 1-7.

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก สูตรต้นแบบ

ตารางที่ 16 แสดงส่วนผสมของขนมปังแซนวิช

ส่วนผสม	ปริมาณที่ใช้ (กรัม)	Baker's percentage
แป้งสาลีตราห่าน	1000	100.0
น้ำตาลทราย	90	9.0
เกลือ	15	1.5
ยีสต์	20	2.0
เนยขาว	80	8.0
น้ำเปล่า	840	84.0
KS 505	10	1.0
นมผง	80	8.0
ผงฟู	10	1.0
เอส พี	60	6.0

ที่มา : วิภาวัน จุลยา (2549)

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณปริมาณแป้งที่ใช้ในการวิเคราะห์ความหนืด

ตารางที่ 17 แสดงปริมาณความชื้นของสารต่างๆ

ตัวอย่าง	ซ้ำที่	ความชื้น (%)
แป้งข้าว	1	11.76
	2	11.96
แป้งข้าวโพด	1	12.01
	2	12.03
HPMC	1	1.57
	2	1.67
Xanthan gum	1	9.15
	2	8.95
Guar gum	1	9.10
	2	9.24

ความชื้นของสารต่างๆ

ความชื้นของแป้งข้าวเจ้า 11.86±0.15 %

ความชื้นของแป้งข้าวโพด 12.02±0.01 %

ความชื้นของแป้งสาลี 11.30±0.37 %

ความชื้นของ HPMC 1.61±0.05 %

ความชื้นของ Xanthan gum 9.05±0.14 %

ความชื้นของ Guar gum 9.17±0.09 %

มหาวิทยาลัยศิลปากร

<u>ตัวอย่างที่ 1</u> แป้งข้าวโพด

การทดสอบความหนืดแป้งข้าวโพดที่ความเข้มข้น 12% จำนวน 25 กรัม

1. คำนวณน้ำหนักแห้ง

   สารละลาย 100.00 กรัม มีแป้งโดยน้ำหนักแห้ง 12.00 กรัม

   สารละลาย 25.00 กรัม มีแป้งโดยน้ำหนักแห้ง $\frac{\mathbf{12.00\times25.00}}{\mathbf{100.00}}$ = 3.00 กรัม

2. คำนวณน้ำหนักแป้งข้าวโพดที่ต้องชั่ง

   แป้งข้าวโพด 100.00 กรัม มีน้ำ 12.02 กรัม

   แป้งข้าวโพดมีน้ำหนักแห้ง 100-12.02 = 87.98 กรัม

   น้ำหนักแห้งแป้งข้าวโพด 87.98 กรัม ต้องชั่งแป้งข้าวโพด 100.00 กรัม

   หากต้องการแป้งข้าวโพด 3.00 กรัม ต้องชั่งแป้งข้าวโพด $\frac{\mathbf{100.00\times3.00}}{\mathbf{87.98}}$= 3.41 กรัม

เติมน้ำ 25.00-3.41= 21.59 กรัม

<u>ตัวอย่างที่ 2</u> แป้งข้าว:แป้งข้าวโพด (1:1)

การทดสอบความหนืดแป้งข้าวโพดที่ความเข้มข้น 12% จำนวน 25 กรัม

1. คำนวณน้ำหนักแห้ง

   สารละลาย 100.00 กรัม มีแป้งโดยน้ำหนักแห้ง 12.00 กรัม

   สารละลาย 25.00 กรัม มีแป้งโดยน้ำหนักแห้ง $\frac{\mathbf{12.00\times25.00}}{\mathbf{100.00}}$ = 3.00 กรัม

ดังนั้น ต้องชั่งแป้งข้าวและแป้งข้าวโพดโดยน้ำหนักแห้งอย่างละ 1.50 กรัม

2. คำนวณน้ำหนักแป้งข้าวและแป้งข้าวโพดที่ต้องชั่ง

   แป้งข้าวมีน้ำหนักแห้ง 100.00-11.86 = 88.14 กรัม

   แป้งข้าวโพดมีน้ำหนักแห้ง 100.00-11.30 = 88.70 กรัม

   น้ำหนักแห้งแป้งข้าว 87.98 กรัม ต้องชั่งแป้งข้าวทั้งหมด 100.00 กรัม

   หากต้องการแห้งแป้งข้าว 1.50 กรัม ต้องชั่งแป้งข้าวทั้งหมด $\frac{\mathbf{100.00\times1.50}}{\mathbf{87.98}}$ =1.70 กรัม

   น้ำหนักแห้งแป้งข้าวโพด 88.70 กรัม ต้องชั่งแป้งข้าวโพดทั้งหมด 100.00 กรัม

   หากต้องการแป้งข้าวโพด 1.50 กรัม จากแป้งข้าวโพดทั้งหมด $\frac{\mathbf{100.00\times1.50}}{\mathbf{88.70}}$ = 1.69 กรัม

เติมน้ำ 25.00-(1.70+1.69)= 21.61 กรัม

<u>ตัวอย่างที่ 3</u> แป้งข้าว:แป้งข้าวโพด: HPMC 1.5% (ความเข้มข้นของ HPMC 1.5% ของแป้ง) การทดสอบความหนืดแป้งข้าวโพดที่ความเข้มข้น 12% จำนวน 25 กรัม

1. คำนวณน้ำหนักแห้ง

   สารละลาย 100.00 กรัม มีแป้งโดยน้ำหนักแห้ง 12.00 กรัม

   สารละลาย 25.00 กรัม มีแป้งโดยน้ำหนักแห้ง $\frac{\mathbf{12.00\times25.00}}{\mathbf{100.00}}$ = 3.00 กรัม

ดังนั้น ต้องชั่งแป้งข้าวและแป้งข้าวโพดโดยน้ำหนักแห้งอย่างละ 1.50 กรัม

จากการคำนวณตัวอย่างที่ 2 ต้องชั่งแป้ง 2 ชนิดรวมกัน 1.70+1.69 = 3.39 กรัม

จากสูตรขนมปังหากชั่งแป้ง 100.00 กรัม ต้องชั่ง HPMC 1.50 กรัม

2. คำนวณน้ำหนักแป้งข้าว แป้งข้าวโพด และ HPMC ที่ต้องชั่ง

   หากชั่งแป้ง 3.00 กรัม ต้องชั่ง HPMC $\frac{\mathbf{1.50\times3.00}}{\mathbf{100.00}}$ =0.0450 กรัม

   HPMC 100.00 กรัม มีน้ำ 1.61 กรัม

   HPMC มีน้ำหนักแห้ง 100.00-1.61= 98.39 กรัม

   น้ำหนักแห้ง HPMC 98.39 กรัม ต้องชั่ง HPMC ทั้งหมด 100.00 กรัม

หากต้องการ HPMC 0.0450 กรัม จะต้องชั่ง HPMC ทั้งหมด $\frac{\mathbf{100.00\times0.0450}}{\mathbf{98.39}}$ = 0.05กรัม

เติมน้ำ 25.00-(1.70+1.69+0.05)=21.56 กรัม

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 18 แสดงส่วนผสมในการวิเคราะห์ความหนืด

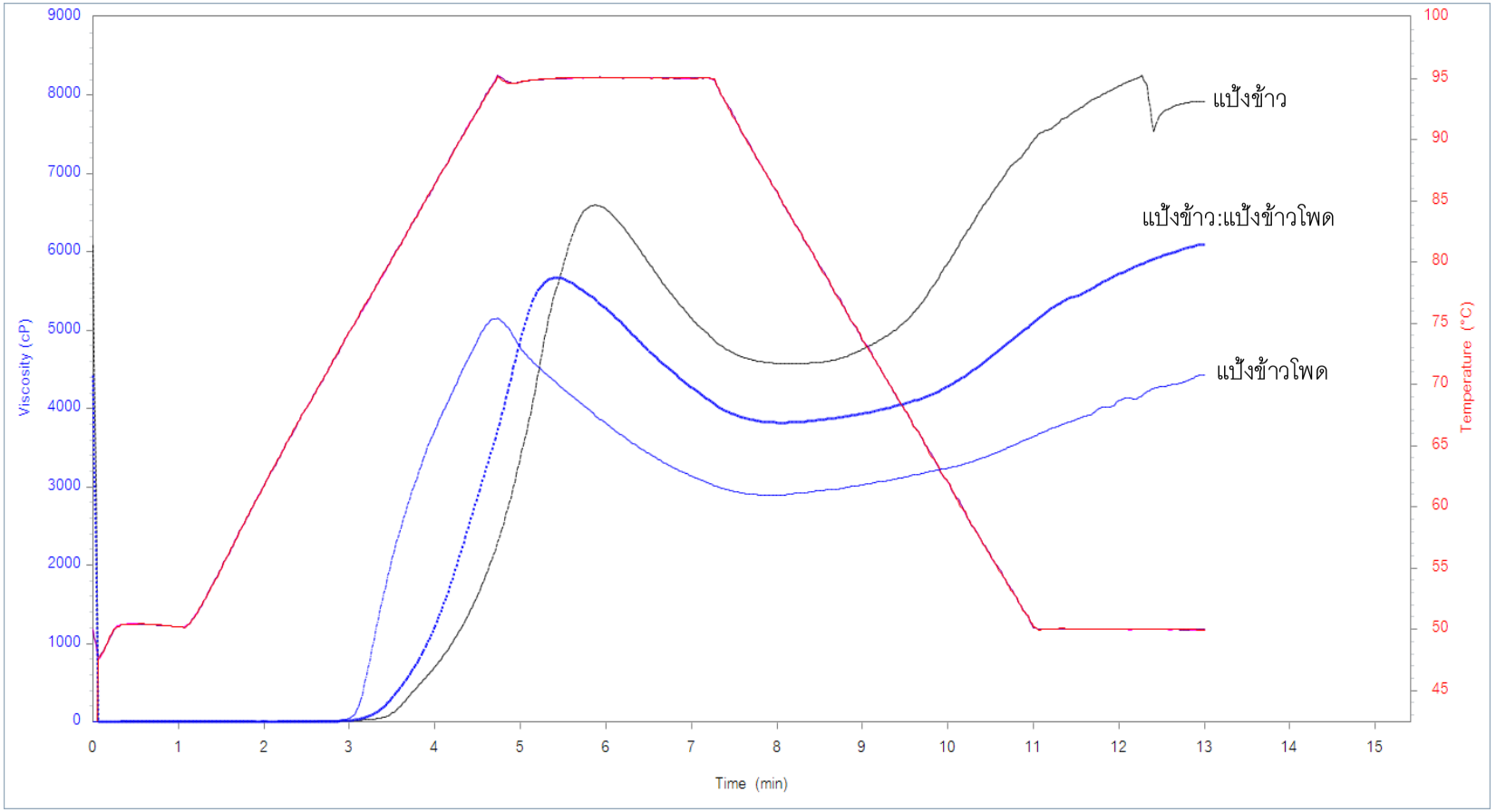
ส่วนผสม	HPMC 1.5	HPMC 3.0	XG 0.75	XG 1.5	GG 0.75	GG 1.5	แป้งข้าว:แป้งข้าวโพด	Wheat
แป้งข้าว	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	1.70	-
แป้งข้าวโพด	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	-
แป้งสาลี	-	-	-	-	-	-	-	3.38
HPMC	0.05	0.09	-	-	-	-	-	-
Xanthan gum	-	-	0.03	-	0.03	-	-	-
Guar gum	-	-	-	0.05	-	0.05	-	-
น้ำ	21.56	21.52	21.58	21.56	21.58	21.56	21.61	21.62
น้ำหนักรวม	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00

ภาคผนวก ค ผลการทดลอง

ตารางที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตน

Pasting properties (cP)	ซ้ำที่	แป้งข้าว	แป้วข้าวโพด	แป้งข้าว:แป้งข้าวโพด (1:1)
Peak viscosity	1	6601	5151	5674
	2	6376	5697	5662
Trough	1	4571	2893	3819
	2	4584	3102	3689
Final viscosity	1	2030	2258	1855
	2	1792	2595	1973
Break down	1	7926	4424	6092
	2	7760	4742	6032
Setback	1	3355	1531	2273
	2	3176	1640	2343
Pasting temperature (°C)	1	73.5	72.7	73.5
	2	71.75	71.75	72.7

มหาวิทยาลัยศิลปากร



ภาพที่ 14 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนที่ความเข้มข้น 12%

ตารางที่ 20 ปริมาตรจำเพาะและโครงสร้างเนื้อในของขนมปังปลอดกลูเตนวิเคราะห์โดยโปรแกรม imageJ

ตัวอย่าง	ซ้ำที่	ปริมาตรจำเพาะ (ml/g)	Number of cells	Mean cell area (mm^2)	% cell area	Crumb fineness
1	1	2.33	227.33	1.39	19.87	2.75
	2	2.46	255.00	1.22	18.54	3.07
2	1	3.18	213.33	1.34	17.80	2.75
	2	3.24	215.00	1.37	18.11	4.67
3	1	2.40	181.33	1.68	19.15	4.60
	2	2.46	190.67	1.61	18.96	3.08
4	1	3.34	117.67	3.59	26.10	6.11
	2	3.41	151.33	2.40	22.57	6.00
5	1	2.61	242.00	1.51	22.55	8.60
	2	2.98	190.33	2.36	22.85	4.72

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 21 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5

ขนาด (µm)	ซ้ำที่	สูตรที่				
		1	2	3	4	5
<500	1	2.48	7.29	2.03	3.55	6.51
	2	2.82	5.74	0.59	1.80	2.14
500	1	17.94	21.85	13.46	25.38	24.66
	2	4.80	4.46	0.91	10.32	6.56
850	1	37.51	41.46	35.92	42.00	40.35
	2	11.95	3.38	5.42	0.90	1.70
1400	1	27.45	24.44	37.67	24.03	24.6
	2	0.24	5.97	2.54	8.99	5.52
2000	1	12.60	3.93	10.73	4.87	2.64
	2	12.08	1.11	3.30	2.03	2.83
3350	1	1.74	0.52	0.13	0.10	2.94
	2	2.45	0.34	0.06	0.14	2.55
5600	1	0.28	0.51	0.06	0.06	0.84
	2	0.35	0.09	0.04	0.06	1.11

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 22 ค่าความหนาแน่นเชิงกลุ่มและร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5

สูตรที่	ซ้ำที่	ความชื้น (g/g dry solid)	ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (g/ml)	ร้อยละการเกาะติด(%)
1	1	6.04	0.4285	11.31
	2	5.82	0.5229	15.85
2	1	5.60	0.4281	12.13
	2	6.45	0.5670	13.69
3	1	6.95	0.5342	16.54
	2	7.37	0.4965	16.46
4	1	6.85	0.4298	13.38
	2	6.87	0.4737	18.29
5	1	5.43	0.3877	11.22
	2	5.97	0.4165	17.41

ตารางที่ 23 ค่าสีของขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5

สูตรที่	ซ้ำที่	L*	a*	b*
1	1	86.62	6.21	18.6
	2	85.97	6.82	19.0
2	1	86.18	6.45	16.62
	2	86.62	6.15	17.75
3	1	86.15	6.63	18.45
	2	85.49	7.10	18.90
4	1	83.56	7.70	19.67
	2	82.14	7.72	18.65
5	1	79.49	9.22	20.08
	2	81.01	9.16	20.77

ตารางที่ 24 ค่าสีของเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5

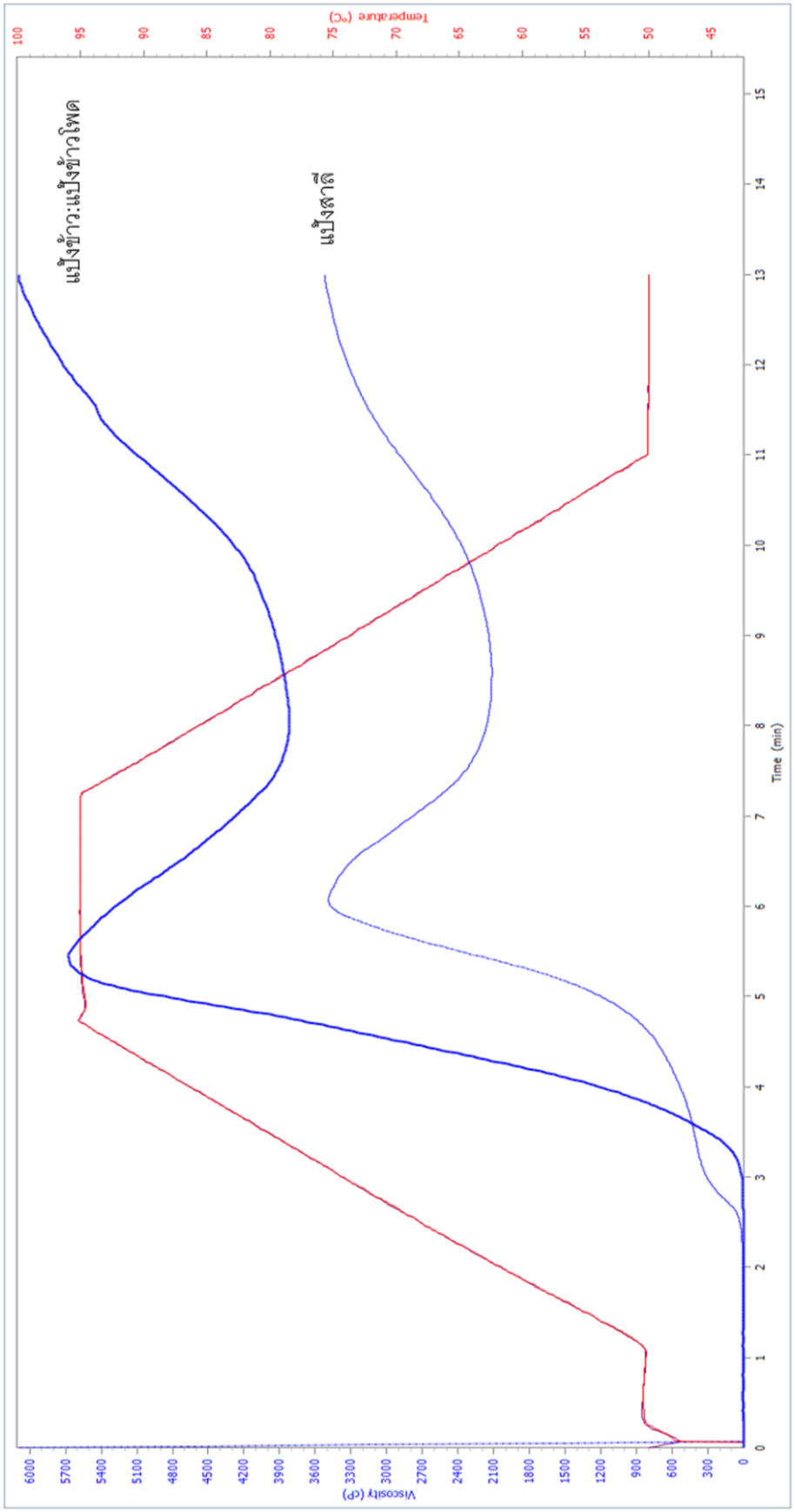
สูตรที่	ซ้ำที่	L*	a*	b*
1	1	85.10	8.36	25.63
	2	84.99	8.17	25.07
2	1	85.78	7.06	23.65
	2	85.86	7.07	23.09
3	1	84.74	8.11	26.51
	2	84.15	8.88	25.95
4	1	85.56	8.86	28.43
	2	84.24	8.62	29.23
5	1	83.40	9.10	25.62
	2	83.33	9.51	27.88

ตารางที่ 25 ค่าสีของนักเก็ตไก่คลุกเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนสูตรที่ 1-5

สูตรที่	ซ้ำที่	L*	a*	b*
1	1	42.46	22.31	25.98
	2	42.75	22.88	24.72
2	1	44.39	22.68	25.89
	2	43.98	24.51	27.15
3	1	51.19	21.45	32.87
	2	51.34	24.62	31.93
4	1	49.36	23.83	30.91
	2	49.63	25.24	30.24
5	1	56.40	21.82	31.70
	2	56.88	21.20	30.82

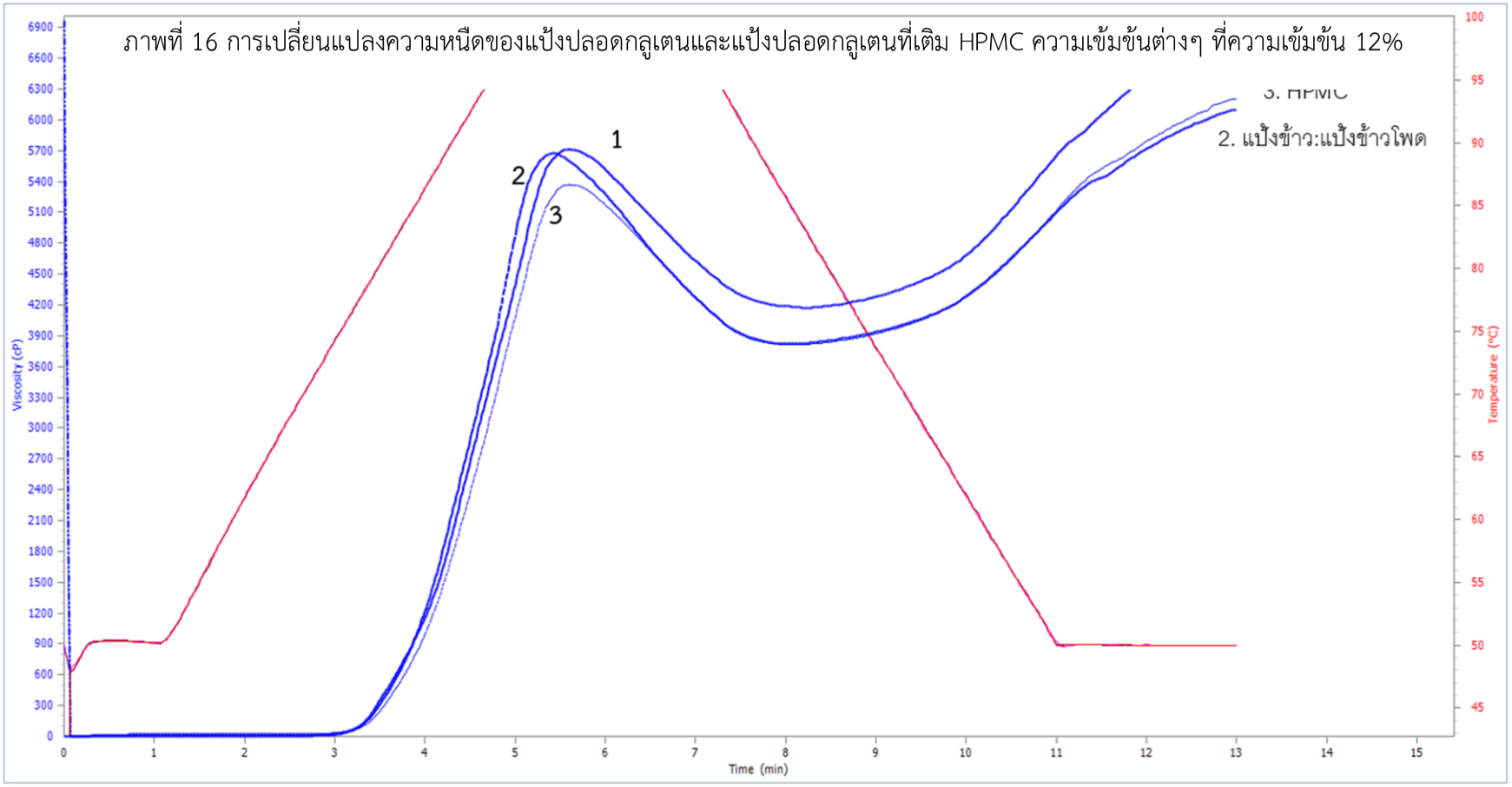
ตารางที่ 26 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาลีและแป้งปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

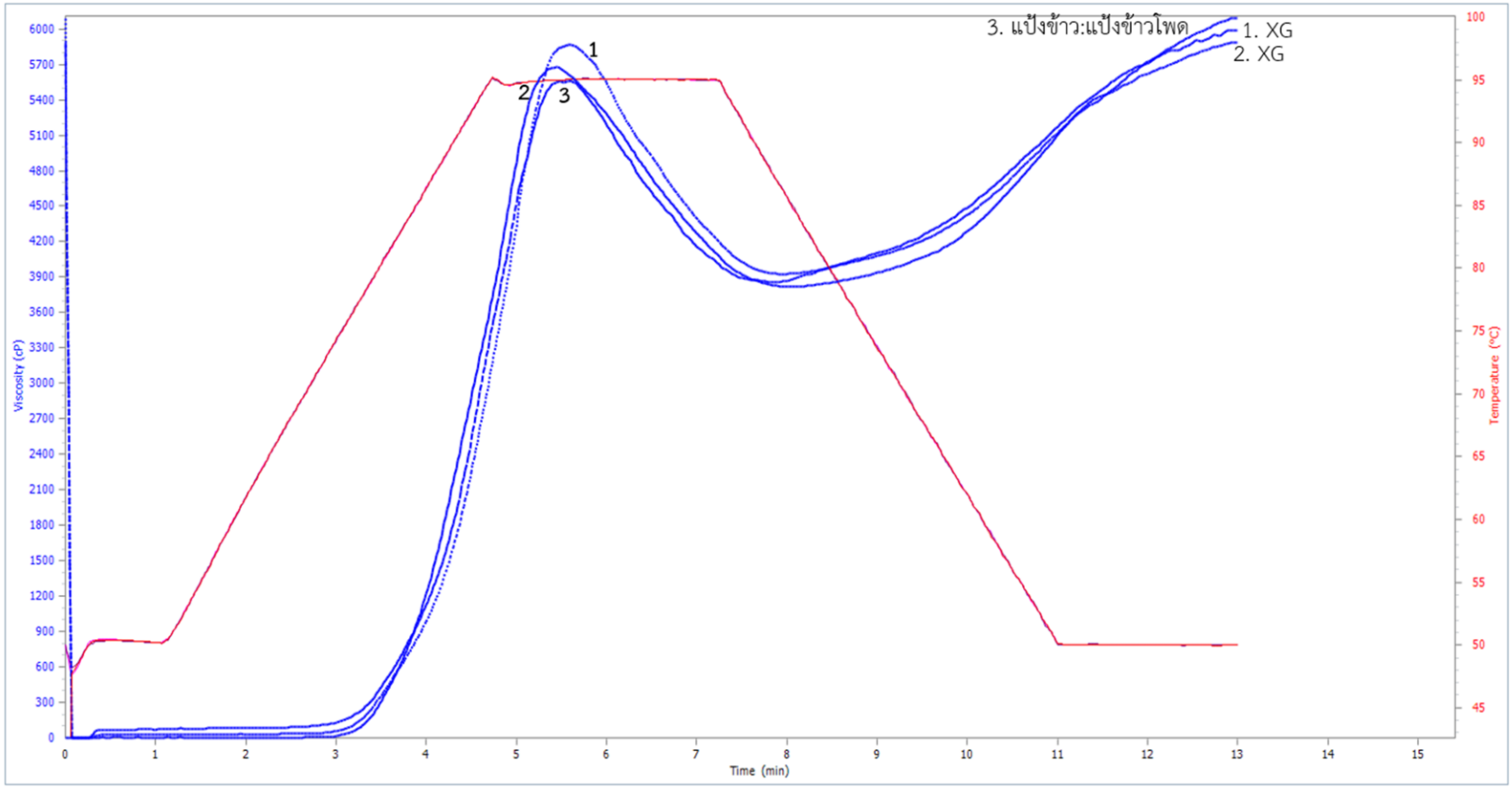
ตัวอย่าง	ซ้ำที่	Peak viscosity (cP)	Trough (cP)	Final viscosity (cP)	Break down (cP)	Setback (cP)	Pasting temperature (°C)
HPMC 1.5	1	5370	3808	1562	6203	2395	73.50
	2	5536	3821	1715	6355	2534	71.85
HPMC 3.0	1	5714	4169	1545	6965	2796	63.53
	2	5663	4142	1521	6778	2636	62.65
XG 0.75	1	5882	3866	2016	5864	1998	69.35
	2	5866	3926	1940	5885	1959	60.85
XG 1.5	1	5962	3854	1708	5988	2134	50.20
	2	5916	4119	1797	6063	1944	54.65
GG 0.75	1	6181	4004	2177	6371	2367	71.85
	2	6213	4299	1914	6428	2129	73.45
GG 1.5	1	6696	4128	2568	6600	2472	70.95
	2	6821	4308	2513	6741	2433	71.85
Wheat	1	3493	2115	1378	3518	1403	66.10
	2	3559	2258	1301	3640	1382	65.95
แป้งข้าว:แป้งข้าวโพด (1:1)	1	5674	3819	1855	6092	2273	73.50
	2	5662	3689	1973	6032	2343	72.70



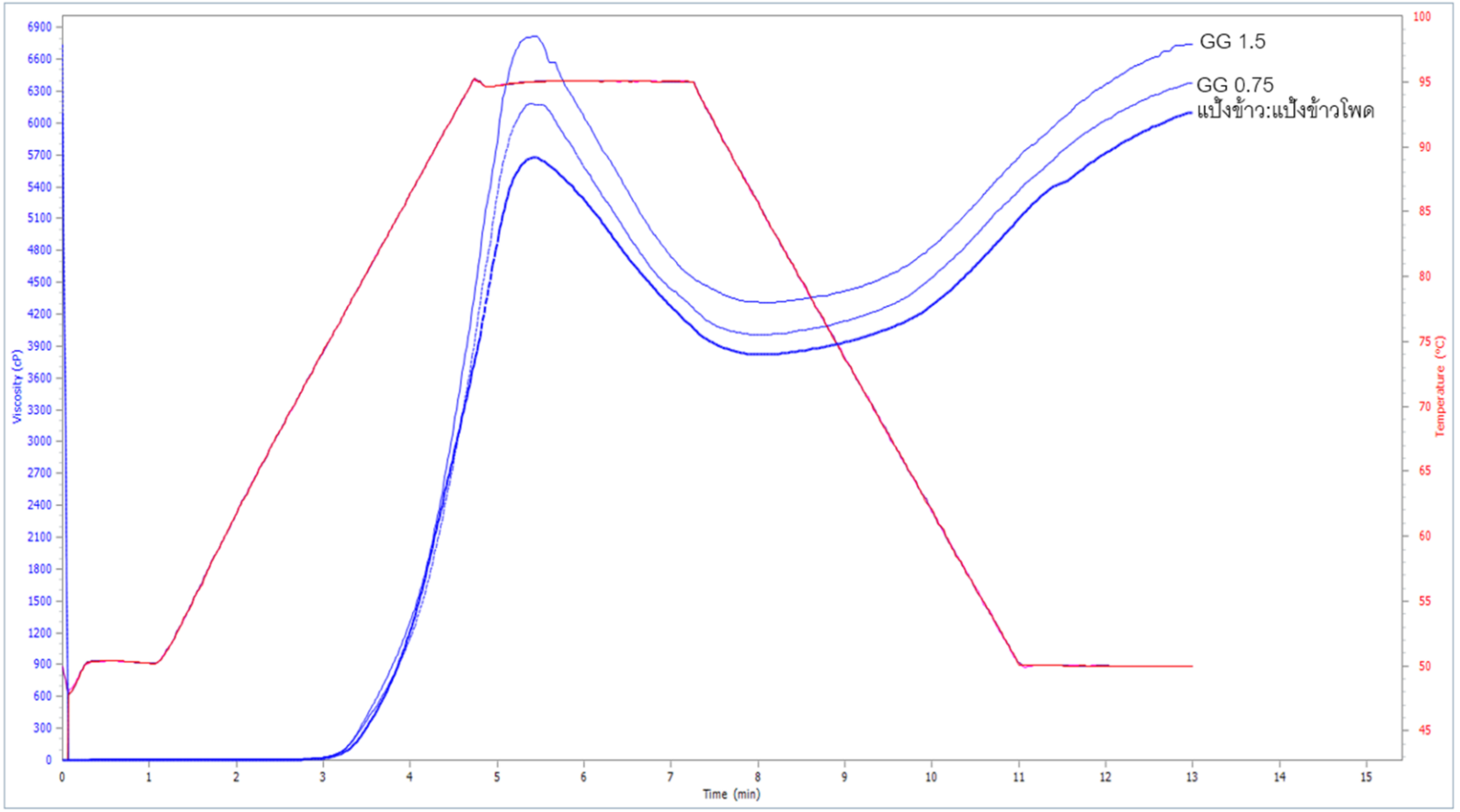
ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งสาคูและแป้งปลอดกลูเตนที่ความเข้มข้น 12%

ภาพที่ 16 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนและแป้งปลอดกลูเตนที่เติม HPMC ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้น 12%

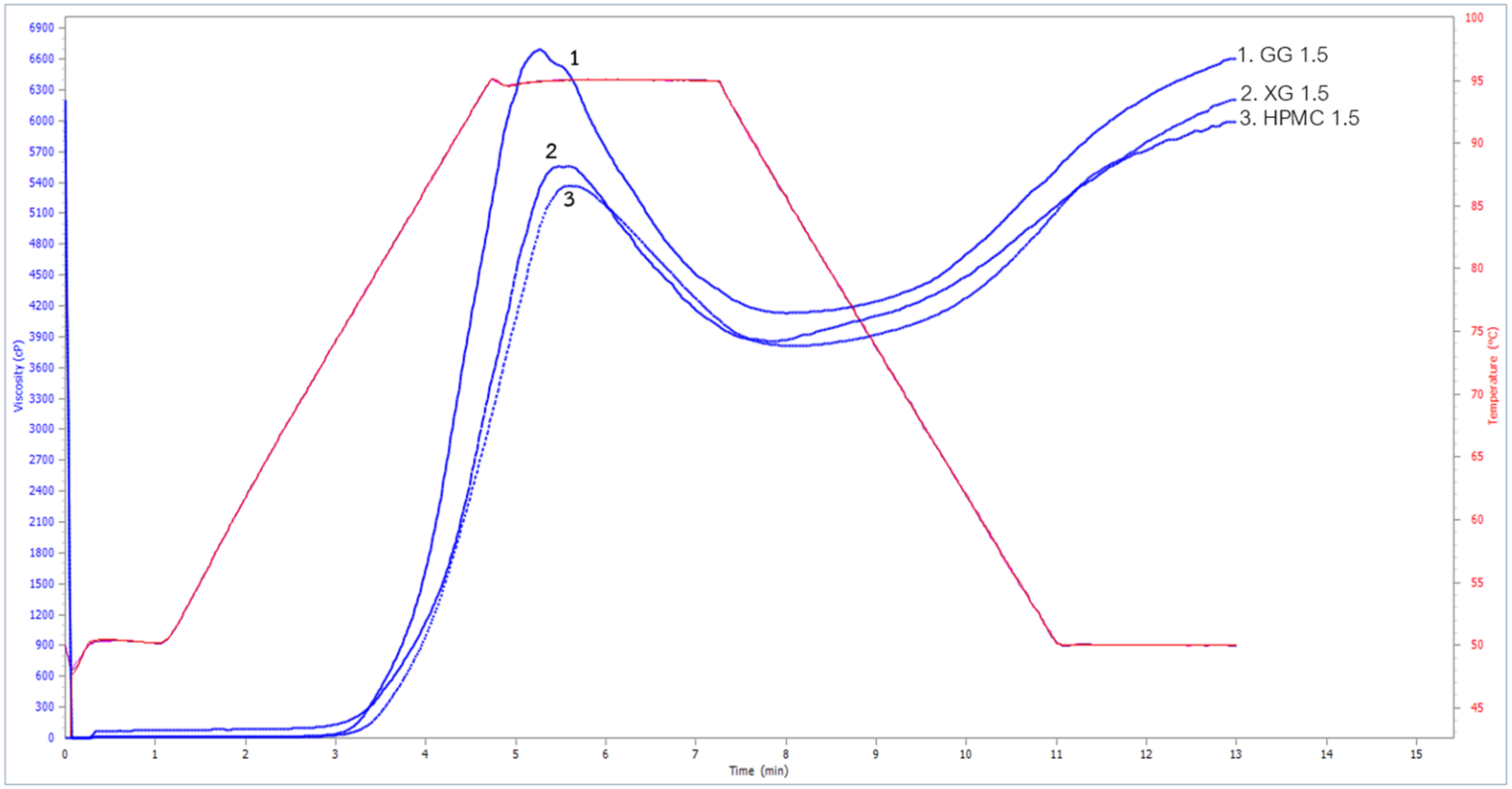




ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนและแป้งปลอดกลูเตนที่เติมแซนแทนกัมความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้น 12%



ภาพที่ 18 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนและแป้งปลอดกลูเตนที่เติมกัวกัมความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้น 12%



ภาพที่ 19 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งปลอดกลูเตนที่ไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆที่ความเข้มข้น 12%

ตารางที่ 27 การสูญเสียความชื้น ปริมาตรจำเพาะของก้อนขนมปัง ขนาด และปริมาณรูพรุนวิเคราะห์โดยโปรแกรม imageJ ของขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

สูตร	ซ้ำที่	การสูญสีย ความชื้น (%)	ปริมาตรจำเพาะ (ml/g)	Number of cells	Mean cell area (mm^2)	% cell area	Crumb Fineness
HPMC 1.5	1	12.68	3.59	228.33	1.68	23.17	3.69
	2	12.95	3.42	360.33	1.13	25.44	4.35
HPMC 3.0	1	15.50	4.66	276.77	1.56	24.91	3.77
	2	17.06	4.73	149.67	3.84	33.92	3.24
XG 0.75	1	11.45	1.87	137.33	2.45	20.70	1.87
	2	11.97	1.85	129.67	2.46	19.98	1.99
XG 1.5	1	10.67	1.73	165.33	2.05	21.27	2.27
	2	11.86	1.77	254.33	1.01	16.02	3.30
GG 0.75	1	11.87	1.95	198.33	1.91	23.66	3.16
	2	11.89	1.83	204.67	2.01	24.06	3.29
GG 1.5	1	11.33	1.99	224.00	1.29	17.65	3.11
	2	12.23	1.78	186.33	1.68	19.46	3.23
Wheat	1	7.56	2.89	184.00	2.69	28.86	1.85
	2	7.79	3.06	171.00	3.34	33.73	1.08

ตารางที่ 28 ค่าสีของขนมปังสูตรแป้งสาลีและขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ

สูตร	ซ้ำที่	L*	a*	b*
HPMC 1.5	1	85.05	6.83	17.39
	2	85.11	6.71	17.17
HPMC 3.0	1	77.64	8.09	19.75
	2	77.92	7.90	19.05
XG 0.75	1	80.54	8.18	20.04
	2	79.81	8.02	19.58
XG 1.5	1	76.65	7.76	19.08
	2	79.11	8.56	20.48
GG 0.75	1	79.65	7.87	20.12
	2	78.77	8.02	20.33
GG 1.5	1	82.56	8.48	20.96
	2	81.53	8.50	21.33
Wheat	1	80.67	12.15	21.55
	2	83.11	10.87	20.38

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 29 การกระจายขนาดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

Size		Formula						
(μm)	ซ้ำที่	HPMC 1.5	HPMC 3.0	XG 0.75	XG 1.5	GG 0.75	GG 1.5	Wheat
<500	1	1.15	17.85	45.95	32.65	2.96	0.01	0.02
	2	2.01	15.69	42.92	31.33	6.07	0.66	1.33
500	1	1.10	14.80	39.84	35.92	7.40	0.65	0.33
	2	1.45	19.54	45.51	27.96	4.19	0.65	0.70
850	1	0.03	4.70	23.94	38.53	32.13	0.63	0.04
	2	1.51	12.50	40.39	35.58	8.92	0.01	1.10
1400	1	2.30	22.90	40.96	26.60	5.97	0.60	0.66
	2	2.50	18.83	40.13	30.96	6.72	0.54	0.33
2000	1	0.21	8.32	35.96	39.01	6.02	0.00	0.03
	2	1.17	10.20	38.80	34.28	6.72	0.54	0.33
3350	1	1.07	11.77	38.05	34.27	6.02	0.00	0.03
	2	2.50	14.85	40.13	30.96	7.85	0.54	0.33
5600	1	2.12	19.27	40.63	29.35	5.39	2.43	0.82
	2	1.19	16.80	35.71	38.27	3.81	3.05	1.06

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 30 ความชื้น ผลผลิตความหนาแน่นเชิงกลุ่ม และร้อยละการเกาะติดของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

สูตร	ซ้ำที่	ความชื้น (g/g dry solid)	%yield (%)	ความหนาแน่นเชิงกลุ่ม (g/ml)	ร้อยละการเกาะติด (%)
HPMC 1.5	1	6.45	13.44	0.5376	15.54
	2	6.51	14.39	0.5406	16.70
HPMC 3.0	1	6.26	14.02	0.4609	16.38
	2	6.24	14.33	0.4974	17.74
XG 0.75	1	5.71	12.41	0.5921	14.97
	2	6.01	13.27	0.5854	16.58
XG 1.5	1	7.44	18.38	0.5794	18.10
	2	5.88	17.44	0.5705	18.57
GG 0.75	1	6.56	16.03	0.5533	17.47
	2	6.22	17.45	0.5605	16.59
GG 1.5	1	6.43	15.54	0.5355	13.43
	2	7.66	16.00	0.5306	14.89
Wheat	1	5.95	19.19	0.4604	13.14
	2	6.01	19.23	0.4895	13.82

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 31 ปริมาณไขมันและลักษณะเนื้อสัมผัสของนักเก็ตไก่สูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

ตัวอย่าง	ซ้ำที่	Fat (%)	Hardness (g)	Springiness	Cohesiveness
HPMC 1.5	1	15.54	19441.30	0.59	0.30
	2	16.34	19929.14	0.57	0.28
HPMC 3.0	1	22.66	18280.28	0.67	0.33
	2	22.15	18786.63	0.62	0.32
XG 0.75	1	16.17	21367.11	0.49	0.27
	2	16.16	22342.83	0.56	0.29
XG 1.5	1	17.24	21915.75	0.62	0.31
	2	17.74	20856.19	0.58	0.30
GG 0.75	1	14.30	17874.42	0.43	0.24
	2	13.47	18882.77	0.47	0.26
GG 1.5	1	12.56	17326.90	0.47	0.25
	2	11.53	18220.34	0.44	0.25
Wheat	1	17.50	16745.67	0.42	0.27
	2	17.56	15280.70	0.47	0.25

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 32 ค่าสีของเกล็ดขนมปังสูตรแป้งสาลีและเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนที่มีการเติมไฮโดรคลอลอยด์ชนิดต่างๆ

สูตร	ซ้ำที่	L*	a*	b*
HPMC 1.5	1	84.88	7.53	27.17
	2	85.07	7.47	27.28
HPMC 3.0	1	87.61	8.49	22.64
	2	88.03	8.57	23.40
XG 0.75	1	80.67	11.01	29.48
	2	80.89	10.94	29.55
XG 1.5	1	84.10	8.69	27.83
	2	84.80	7.96	27.15
GG 0.75	1	80.80	10.46	30.90
	2	80.54	10.98	30.61
GG 1.5	1	80.68	10.87	29.76
	2	80.47	10.73	29.32
Wheat	1	79.74	13.01	31.22
	2	81.75	11.90	28.95

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ฐิตาภา เหลี่ยวเจริญ
วัน เดือน ปี เกิด	26 พฤษภาคม 2538
สถานที่เกิด	นครปฐม
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนนารีวิทยา จังหวัดราชบุรี พ.ศ. 2560 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2561 ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	50/347 หมู่ 4 ตำบล ท่าตลาด อำเภอ สามพราน จังหวัด นครปฐม 73110
ผลงานตีพิมพ์	พ.ศ. 2563 แสดงผลงานแบบวาจา ในการการประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษาระดับชาติ ครั้งที่ 10 ในหัวข้อ ปัจจัยบางประการที่มีผลต่อคุณภาพเกล็ดขนมปังปลอดกลูเตนและการประยุกต์ในนักเก็ตไก่ วันที่ 25-26 มิถุนายน 2563

มหาวิทยาลัยศิลปากร