



รายงานการวิจัย
เรื่อง

การใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวระยะอ่อนจากข้าวไทยสายพันธุ์ต่างๆ
ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง

Utilization of flour from immature rice grains of various
Thai rice cultivars in bread

ผศ.อมรรัตน์ สีสุกอง
นางสาวขวัญจิต อิศระสุข
ดร.มณชัย เดชสังกรานนท์
ดร. ณัชนก มีประถม
ดร. หทัยรัตน์ ปิ่นแก้ว
ดร.จิราภรณ์ บุราคร

มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสวนดุสิต



รายงานการวิจัย

เรื่อง

การใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวระยะอ่อนจากข้าวไทยสายพันธุ์ต่างๆ
ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง

Utilization of flour from immature rice grains of various
Thai rice cultivars in bread

ผศ.อมรรัตน์ สีสุทอง

(กลุ่มวิชาชีววิทยา/คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)

นางสาวขวัญจิต อิศระสุข

(หลักสูตรวิทยาศาสตรเครื่องสำอาง /คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)

ดร.มณชัย เดชสังกรานนท์

(กลุ่มวิชาชีววิทยา/คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)

ดร. ณัชนก มีประถม

(หลักสูตรเทคโนโลยีการประกอบอาหารและการบริการ/โรงเรียนการเรือน)

ดร. หทัยรัตน์ ปิ่นแก้ว

(หลักสูตรเทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร/โรงเรียนการเรือน)

ดร.จิราภรณ์ บุราคร

(กรมวิทยาศาสตร์บริการ)

มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสวนดุสิต

(งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดินด้านการวิจัย ปีงบประมาณ 2560)

หัวข้อวิจัย	การใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวระยะอ่อนจากข้าวไทยสายพันธุ์ต่าง ๆ ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง
ผู้ดำเนินการวิจัย	ผศ.อมรรัตน์ สีสุกอง นางสาวขวัญจิต อิศระสุข ดร.มณชัย เดชสังกรานนท์ ดร. ณัชนก มีประถม ดร. หทัยรัตน์ ปิ่นแก้ว ดร.จิราภรณ์ บุราคร
หน่วยงาน	กลุ่มวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
ปี พ.ศ.	2561

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเმა (9-10 วันหลังข้าวออกดอก) ระยะฮาง (13-14 วันหลังข้าวออกดอก) ระยะปลับปลิง (17-19 วันหลังข้าวออกดอก) และระยะข้าวแก่ (26-28 วันหลังข้าวออกดอก) และศึกษาการนำแป้งข้าวดังกล่าวมาใช้ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการผลิตขนมปัง โดยปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (EC_{50}) จากการทดลองพบว่า สารสกัดตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะฮาง มีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับ 17.76 mg GAE/g extract ข้าวเหนียว กข6 ระยะเმა มีปริมาณฟลาโวนอยด์สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับ 21.12 mg QE/g extract สารสกัดตัวอย่างข้าวเหนียว ระยะแก่ มีค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่า EC_{50} เท่ากับ 0.49 mg/ml และได้คัดเลือกข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะเมา และระยะแก่ มาศึกษาการนำแป้งข้าวดังกล่าวมาใช้ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการผลิตขนมปัง โดยศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว 3 ระดับ คือ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 20 และ 40 พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ในระยะเมา และระยะแก่ ที่ระดับร้อยละ 40 ขนมปังจะมีปริมาตรจำเพาะต่ำ และมีค่าความแข็ง (Hardness) สูงมากเกินไป ซึ่งแตกต่างจากขนมปังสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จึงได้คัดเลือกการผลิตขนมปังจากแป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระยะเมา และระยะแก่ ที่ระดับทดแทนร้อยละ 20 มาทำการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส พบว่าขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะเมา ร้อยละ

20 มีค่าคะแนนด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และความชอบโดยรวมสูงสุด ซึ่งสูงกว่าขนมปังสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังนั้นการใช้แป้งข้าวเหนียว กข6 ระยะเหมายช่วยปรับปรุงคุณภาพของขนมปังให้ดีขึ้น

Research Title	Utilization of flour from immature rice grains of various Thai rice cultivars in bread
Researcher	Amornrat Srisukong Kwunjit Itsarasook Monchai Dejsungranon Nutchanok Mephathom Hathairat Pinkaew Jiraporn Burakorn
Organization	Suan Dusit University
Year	2018

The objective of this study was to compare the bioactive compounds of Thai rice cultivar RD6 (glutinous rice) and KDML105 (Khao Dawk Mali 105) in four different harvesting stages, ie, Mao stage (9th-10th day after flowering), Haang stage (13th-14th day after flowering), Plubplung stage (17th-19th day after flowering) and maturity stage (26th-28th day after flowering) and its application in the use of rice flour to replace some wheat flour in bread production. The total phenolic content (TPC), total flavonoids content and the antioxidant capacity (EC₅₀) of the rice extracts were determined. The result showed that the extracts of KDML 105 at Haang stage had the highest total phenolic content (p≤0.05), ie, 17.76 mg GAE / g extract. The extracts of RD6 (Mao stage) had the highest flavonoid content (p≤0.05), which was 21.12 mg QE/g extract. The extracts of RD6 (mature stage) had the highest antioxidant capacity that the EC₅₀ value was 0.49 mg / ml. Then, the rice RD6 and rice KDML 105 at Mao stage and maturity stage were selected to study the use of rice flour to replace some wheat flour in bread production. Three levels of rice flour: 0% (control formula), 20% and 40% were studied. It was found that the replacement of wheat flour with rice flour at 40%, bread had a low specific volume and had a high hardness, which was different from bread control formula (P≤0.05). Therefore, breads made from glutinous rice flour RD6 and rice flour KDML 105 at the replacement level of 20 percent were determined the preference test. It was found that bread with wheat flour substitution with 20% glutinous rice flour RD6 at Mao

stage had the highest score on appearance, flavor, softness and overall liking which was significantly higher than that of control bread ($p \leq 0.05$). Therefore, the use of glutinous rice flour RD6 help improve the quality of bread.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยสวนดุสิต ประจำปีงบประมาณ 2560

ขอขอบคุณ กลุ่มวิชาชีววิทยา ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และโรงเรียนการเรือน มหาวิทยาลัยสวนดุสิต ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำงาน วิจัยอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณ คุณธีรเมศ ไหลครบุรี ที่ช่วยให้คำแนะนำในการทำขนมปัง

คณะผู้วิจัย

มิถุนายน 2561

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
ข้าวที่นิยมปลูกและบริโภคกันมากในประเทศไทย	6
ข้าวหอมมะลิ	6
ข้าวเหนียว	7
แป้งข้าว	9
แป้งสาลี	11
สตาร์ช	13
อนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระ	20
ขนมปัง	24
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28

	หน้า
บทที่ 3	
วิธีดำเนินการวิจัย	33
วัตถุประสงค์	33
สารเคมี	33
อุปกรณ์และเครื่องมือ	35
วิธีการทดลอง	36
บทที่ 4	
ผลการวิจัย และอภิปรายผล	46
ผลการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวเหนียว กข6	46
และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน	
ผลการศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเหนียว กข6 และข้าว	49
ขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน	
ผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าสีของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105	52
ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน	
ผลการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว	53
บทที่ 5	
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	62
สรุปผลการวิจัย	62
ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้	64
ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป	65
บรรณานุกรม	66
บรรณานุกรมภาษาไทย	66
บรรณานุกรมภาษาต่างประเทศ	68
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี	71
ภาคผนวก ข ภาพจากการทดลอง	78
ประวัติผู้วิจัย	85

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณลักษณะที่ต้องการของแป้งข้าว	11
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาลี	14
2.3	สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	15
3.1	วันที่ปลูกข้าวและเก็บเกี่ยวข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105	37
3.2	ส่วนผสมในการทำขนมปังสูตรต่างๆ	41
4.1	ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวเหนียวและข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน	46
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน	51
4.3	ค่าสีของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน	52
4.4	ค่าคุณภาพทางกายภาพของขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวชนิดต่างๆ และในอัตราส่วนต่างๆ	55
4.5	ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว สูตรต่างๆ	57
4.6	ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของขนมปังสูตรต่างๆ	59
4.7	ผลการศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของขนมปัง	60

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	scanning electron micrograph ของสตาร์ชจากข้าวสาลี	13
2.2	โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส	14
2.3	โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคติน	16
3.1	กรรมวิธีการผลิตขนมปัง	43
ภาพผนวก ข-1	ฟุงนาข้าวที่ใช้ในการวิจัย จ.นครพนม	79
ภาพผนวก ข-2	เกษตรกรกำลังจัดเตรียมข้าว คัดแยก และบรรจุในถุง	80
ภาพผนวก ข-3	ข้าวสายพันธุ์ต่างๆ ที่ระยะการเก็บเกี่ยวต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย	81
ภาพผนวก ข-4	หมักโดจนขึ้นฟูเป็น 2 เท่า ใช้เวลาประมาณ 90 นาที ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิ ประมาณ 37 องศาเซลเซียส	82
ภาพผนวก ข-5	ตัดแบ่งโดเป็นก้อนๆละ 100 กรัม คลึงให้เป็นก้อนกลม พักโดไว้ 20 นาที	82
ภาพผนวก ข-6	รีดโดและม้วนให้เป็นก้อน จัดวางในพิมพ์ที่ทาเนย พักโดจนขึ้นฟูเกือบเต็มพิมพ์ ใช้เวลาประมาณ 60 นาที	83
ภาพผนวก ข-7	อบขนมปังที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20-25 นาที	83
ภาพผนวก ข-8	ขนมปังที่อบสุกแล้ว	84

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกข้าวรายใหญ่ของโลก แต่ประชากรของประเทศส่วนใหญ่คือชาวนากลับมีฐานะยากจน เพราะต้องประสบกับปัญหาทางด้านราคาข้าวเปลือกตกต่ำ จึงทำให้มีผลผลิตข้าวล้นตลาด ส่งผลกระทบต่อรายได้ของชาวนา และยังส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ แนวทางหนึ่งที่จะช่วยบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้นนี้คือการนำข้าวมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในการเก็บเกี่ยวข้าว สามารถเก็บเกี่ยวได้หลายระยะ เช่น การเก็บเกี่ยวข้าวระยะเმა ระยะฮาง ระยะพลับพลึง และระยะข้าวแก่เต็มที ซึ่งจะพบการเกี่ยวข้าวระยะเมา เพื่อนำมาผลิตข้าวเมาและแปรรูปข้าวเมาให้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์จากข้าว และเพิ่มมูลค่าข้าว การเกี่ยวข้าวระยะข้าวเมามีข้อดีในเรื่องระยะเวลาการปลูกและเก็บเกี่ยวที่สั้นกว่าการปลูกข้าวทั่วไป การเก็บเกี่ยวข้าวให้เร็วขึ้นยังลดความเสี่ยงต่อภัยน้ำท่วมข้าวที่อาจเกิดขึ้นได้ในบางพื้นที่ ข้าวเมาในความหมายของคนอีสาน หมายถึง ข้าวเหนียวที่ปลูกแล้วตั้งท้องออกรวงผ่านระยะน้ำนมมาช่วงหนึ่ง ประมาณ 5-7 วัน ข้าวเริ่มมีเมล็ดเต็มเมล็ด แต่ยังไม่แก่จัด ซึ่งข้าวในระยะนี้เรียกว่า กำลังเมา (วิเชียร, 2542)

ข้าวเมามีลักษณะเฉพาะตัวที่มีความหอม มีสีเขียวยุทธรมชาติของเมล็ดข้าว คุณค่าทางอาหารคล้ายกับข้าวกล้อง เป็นข้าวที่ยังไม่สีเอารำออก จึงมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายอยู่ครบถ้วน ได้มีผู้วิจัยศึกษาคุณค่าทางอาหารของข้าวระยะอ่อน โดย Lin Pei-Yin (2011) ได้ศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวที่กำลังเจริญเติบโต 2 สายพันธุ์ พบว่าปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและฟลาโวนอยด์ ในข้าวระยะอ่อนทั้ง 2 สายพันธุ์ มีค่าสูงกว่าข้าวที่แก่เต็มที่แล้วอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ข้าวอ่อนที่กำลังเจริญเติบโตจะอุดมไปด้วยสาร tocopherol, วิตามินอี และยังมีปริมาณกรดเพอร์รูลิกที่สูง มีเส้นใยละลายน้ำ และมีสาร oryzanol โดยจะพบในข้าวอ่อนในระยะ 15 และ 18 วัน หลังดอกข้าวติดเมล็ด นอกจากนี้ Ji Chen-Ming (2013) ได้ศึกษาองค์ประกอบของสารอาหารที่พบในข้าวของเกาหลี 2 สายพันธุ์ โดยเปรียบเทียบระยะเวลาเก็บเกี่ยว โดยใช้ข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยว 15 และ 25 วัน หลังจากออกดอก ซึ่งถือเป็นระยะข้าวอ่อน และใช้ข้าวที่เก็บเกี่ยวในวันที่ 40 หลังจากออกดอก ซึ่งเป็นระยะข้าวแก่เต็มที ผลการทดลองพบว่าปริมาณโปรตีน และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ ในข้าวระยะอ่อน มีค่าสูงกว่าในข้าว

ระยะแก่เต็มที่มีอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสและโปตัสเซียมพบมากในข้าวระยะอ่อนที่กำลังเจริญทั้ง 2 สายพันธุ์ ส่วนปริมาณวิตามินซีและ provitaminA (เบตาแคโรทีน) พบเฉพาะในข้าวระยะอ่อนทั้ง 2 สายพันธุ์ นอกจากนี้ ในข้าวระยะอ่อนยังมีปริมาณ vitaminB2, B3 และ B6 ในปริมาณสูงเมื่อเปรียบเทียบกับในข้าวระยะแก่เต็มที่ และปริมาณ Tocochromanols ในข้าวระยะอ่อนยังมีปริมาณสูงกว่าในข้าวสุกแก่เต็มที่ ดังนั้นข้าวระยะอ่อนจึงมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้เป็นอาหารโภชนเภสัช

ขนมปังเป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบชนิดหนึ่งที่มีเนื้อนุ่ม เนียน หวาน มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ ผลิตจากแป้งสาลีชนิดหนัก (bread flour) ยีสต์ น้ำ ผงฟู เกลือ นม น้ำตาล และไขมัน ด้วยกระบวนการหมักทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โปรตีนในแป้งสาลี ได้แก่ ไกลอะตินและกลูเตนิน เมื่อนวดกับน้ำจะได้กลูเตน ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูง และสามารถกักเก็บแก๊สไว้ได้ทำให้ขนมปังเกิดการขึ้นฟู และอบให้สุก (จิตธนา และอรอนงค์, 2541) ขนมปังเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการบริโภคมาตั้งแต่สมัยโบราณ โดยเฉพาะในแถบทวีปยุโรปมีการบริโภคขนมปังเป็นอาหารหลัก สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันมีความนิยมในการบริโภคขนมปังกันมากขึ้น โดยเฉพาะสังคมเมืองที่มีความรีบเร่งมากในการดำเนินชีวิต หรือการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งต้องการความสะดวกและรวดเร็ว ส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมกรรมการบริโภคอาหารโดยเฉพาะอาหารเช้า โดยส่วนใหญ่จะบริโภคขนมปังร่วมกับนม ชา หรือกาแฟ ซึ่งขนมปังราคาไม่สูงมาก และสามารถหาซื้อได้ง่าย จึงสะดวกต่อการบริโภค จึงทำให้ตลาดต้องการผลิตภัณฑ์ขนมอบประเภทขนมปังมากขึ้น และตลาดยังมีความต้องการผลิตภัณฑ์ขนมอบที่มีการปรับปรุงคุณภาพและส่งผลดีต่อสุขภาพมากขึ้น ขนมปังโดยทั่วไปผลิตจากแป้งสาลี แต่ในปัจจุบันมีการพยายามใช้แป้งชนิดอื่นแทนแป้งสาลีกันมากขึ้น เนื่องจากในหลายประเทศรวมทั้งประเทศไทยด้วยไม่ได้ปลูกข้าวสาลีเป็นธัญพืชหลัก ต้องนำเข้าแป้งสาลีจากต่างประเทศ ในประเทศไทยมีข้าวที่มีคุณภาพดีและเป็นข้าวสุขภาพหลากหลายสายพันธุ์ หากมีการศึกษาการนำข้าวไทยที่มีระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน ที่มีคุณสมบัติเหล่านี้ และใช้ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการผลิตขนมปัง จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวไทยสายพันธุ์ต่าง ๆ ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน ยังมีน้อยมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวไทยสายพันธุ์ต่าง ๆ ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน และศึกษาการใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวไทยสายพันธุ์ต่าง ๆ ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน เพื่อใช้ทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการผลิตขนมปัง โดยศึกษาในข้าว 2 สายพันธุ์ได้แก่ ข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน คือ ระยะเฒ่า ระยะฮาง ระยะพลับพลึง และระยะแก่เต็มที่ และศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ได้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่า และเพิ่มการใช้ประโยชน์จากข้าวไทย ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค สามารถผลิตและแข่งขันได้ในเชิงพาณิชย์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และองค์ประกอบทางเคมี ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน
2. เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน
3. เพื่อศึกษาคุณภาพทางด้านกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัส ของขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวบางส่วน

ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ข้าวที่ใช้ศึกษา มี 2 สายพันธุ์ ได้แก่ ข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยศึกษาข้าวในระยะการเก็บเกี่ยว 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเฒ่า ระยะฮาง ระยะปลับปลิง และระยะแก่
2. วิเคราะห์คุณภาพของข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวต่าง ๆ จากข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ คุณภาพทางเคมี ได้แก่ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด และความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH) และองค์ประกอบทางเคมี
3. ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน โดยศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวในระดับต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละ 0, 20 และ 40 และตรวจสอบคุณภาพของขนมปังจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าว ได้แก่ คุณภาพด้านกายภาพ คุณภาพทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัส

คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

สารต้านอนุมูลอิสระ คือโมเลกุลของสารที่สามารถจับกับตัวรับและสามารถยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลสารอื่น ๆ ได้ ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยังตัวออกซิไดซ์ ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถให้ผลิตภัณฑ์เป็นสารอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งสารอนุมูลอิสระเหล่านี้จะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่และทำลายเซลล์ของร่างกาย สารต้าน

อนุมูลอิสระจะเข้ายัติปฏิกิริยาถูกโซ่เหล่านี้ด้วยการเข้าจับกับสารอนุมูลอิสระและยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยถูกออกซิไดซ์ ดังนั้นสารต้านอนุมูลอิสระจึงถือเป็นตัวรีดิวซ์ อาทิ ไธออล กรดแอสคอร์บิก และโพลีฟีนอล

สารประกอบฟีนอลิก เป็นสารกลุ่มหนึ่งที่มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ สารประกอบฟีนอลิกเป็นสารประกอบที่เป็นวงแหวนอะโรมาติก และมีหมู่ไฮดรอกซิลอย่างน้อย 1 หมู่ รวมไปถึงอนุพันธ์ของสารประกอบฟีนอลซึ่งมีการแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น ฟลาโวนอยด์ ลิกนิน กรดซินนามิก และโคเอ็นไซม์คิว สารประกอบฟีนอลิก เป็นสารที่พบได้ในพืช

สารประกอบฟลาโวนอยด์ เป็นสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) ประเภทพอลิฟีนอล (polyphenol) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนอะโรมาติก (aromatic ring) ที่มีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) รวมอยู่ในโมเลกุล ตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป สามารถละลายในน้ำได้ ส่วนใหญ่มักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาล ในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) สารประกอบ flavonoids ได้แก่ flavonol, flavonone, flavone, isoflavone, flavonol catechin และ anthocyanins ฟลาโวนอยด์เป็นสารพฤษเคมีที่มีคุณสมบัติต่อต้านอนุมูลอิสระ พบในเมล็ดสีชนิดละลายในน้ำของผัก ผลไม้ เมล็ดธัญพืช ใบไม้ และเปลือกไม้

ขนมปัง เป็นอาหารที่ทำจากแป้งสาลีที่ผสมกับน้ำและยีสต์ หรือนมผง นอกจากนี้ยังมีการใช้ส่วนผสมอื่น ๆ เพื่อแต่งสี รสชาติและกลิ่น แตกต่างกันไปตามแต่ละประเภทของขนมปัง และ แต่ละประเทศที่ทำ โดยนำส่วนผสมมาตีให้เข้ากันและนำไปอบ ขนมปังมีหลายประเภท เช่น ขนมปังฝรั่งเศส ขนมปังไรย์ หรือเพรดเซล ของขึ้นชื่อประเทศเยอรมนี เป็นต้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และองค์ประกอบทางเคมี ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน
2. ทราบสูตรการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน
3. ทราบคุณภาพทางด้านกายภาพ เคมี และประสาทสัมผัส ของขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวบางส่วน
4. เป็นการเพิ่มการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าของข้าว โดยเฉพาะข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ข้าวที่นิยมปลูกและบริโภคกันมากในประเทศไทย

ข้าวที่นิยมปลูกและบริโภคกันมากในประเทศไทยจำแนกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ข้าวเจ้า (Non-glutinous rice; *Oryza sativa*) มีลักษณะเนื้อของเมล็ดข้าวสารขาวใส เมื่อหุงหรือหนึ่งจนสุกข้าวสุกจะร่วนไม่เกาะตัวติดกันสีขาวขุ่นโดยองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทสตาร์ช (Starch) ซึ่งประกอบด้วยแอมิโลเพกติน (Amylopectin ;Polymer ของ D-Glucose ที่ต่อกันแบบ Branch Chain) ประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 และแอมิโลส (Amylose ; Polymer ของ D-Glucose ที่ต่อกันแบบ Linear Chain) ประมาณร้อยละ 10 ถึง 30 ซึ่งเมื่อรวมกันแล้วคิดเป็นร้อยละที่แตกต่างกันจะให้ลักษณะของข้าวสุกที่มีความร่วนแข็งหรือนุ่มแตกต่างกัน

2. ข้าวเหนียว (Glutinous rice; *Oryza glutinosa*) มีลักษณะเนื้อของเมล็ดข้าวสารสีขาวขุ่นเมื่อนำมาหุงให้สุกข้าวสุกจะจับตัวติดกันเหนียวติดมือและมีลักษณะเมล็ดที่ใสเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทสตาร์ช ซึ่งมีแอมิโลเพกตินเป็นส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 95 ถึง 100 ที่ให้ลักษณะเหนียวแก่ข้าวเหนียวโดยมีแอมิโลสเพียงเล็กน้อยหรืออาจไม่มีเลย อัตราส่วนของแอมิโลเพกตินและแอมิโลสในเมล็ดข้าวสารนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ข้าวมีคุณสมบัติในการหุงต้มและรับประทานแตกต่างกันคือข้าวเจ้ามีแอมิโลสสูงจะดูดน้ำและขยายปริมาตรในระหว่างการหุงต้มได้มากกว่าข้าวที่มีแอมิโลสต่ำ ปริมาณแอมิโลสที่สูงทำให้ข้าวเจ้าสุกมีลักษณะร่วนและแข็ง ส่วนข้าวเหนียวหรือข้าวที่มีแอมิโลสต่ำจะดูดน้ำและขยายตัวได้น้อยกว่าข้าวเจ้า ข้าวเหนียวสุกจึงมีลักษณะเหนียวและนุ่มกว่า

2. ข้าวหอมมะลิ

ข้าวพันธุ์ที่นิยมบริโภคในประเทศไทยคือข้าวหอมมะลิ ซึ่งเป็นข้าวที่ถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศไทย เมล็ดข้าวมีลักษณะจำเพาะแตกต่างจากข้าวพันธุ์อื่น ๆ อย่างเด่นชัด เช่น มีกลิ่นหอม และมีเมล็ดข้าวสารสุกนุ่มทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเป็นข้าวใหม่หรือข้าวเก่ามากน้อยเพียงใด เมื่อแปรสภาพข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้องและข้าวขาวแล้ว เมล็ดข้าวสารมีลักษณะยาวเรียวยาว มีปริมาณอะมิโลส ร้อยละ 12 - 19 โดยน้ำหนักและมี

อุณหภูมิแบ่งสุกต่ำซึ่งมีค่าการสลายเมลต์ในต่าง (Alkali Spreading Value) ระดับ 6 - 7 ข้าวหอมมะลิที่ผลิตในประเทศไทย ซึ่งกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ประกาศรองรับ เช่น พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105, กข. 15, ข้าวเจ้าหอมคลองหลวง 1 และปทุมธานี 1 เป็นต้น

โดยพันธุ์ข้าวที่จัดเป็นข้าวที่มีคุณภาพพิเศษในตลาดโลก ได้แก่ พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งจัดเป็นข้าวไวต่อช่วงแสง ปลูกได้เฉพาะนาปี เป็นข้าวพันธุ์พื้นเมือง ต้นสูง มีลักษณะเด่นคือ เมล็ดข้าวสารใส แกร่ง ยาวเรียว มีกลิ่นหอม ข้าวหุงสุกนุ่มและมีกลิ่นหอมคนนิยมบริโภค เป็นพันธุ์ที่มีความสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดีพันธุ์หนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพนาดอนทั่วไป ค่อนข้างทนแล้ง ทนดินเค็มและดินเปรี้ยวปานกลาง ต้านทานไส้เดือนฝอย (อรอนงค์, 2547)

3. ข้าวเหนียว

การผลิตและบริโภคข้าวเหนียวเป็นไปอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้าน สำหรับประเทศไทยนั้นข้าวเหนียวจัดเป็นอาหารหลักประจำวันสำหรับคนไทยส่วนใหญ่ โดยพบได้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือที่อาหารประจำภาคมักจะได้รับประทานกับข้าวเหนียว เช่น ส้มตำลาบ ชุป หน่อไม้ แจ่ว น้ำพริก เป็นต้น นอกจากนี้มีการนำวัฒนธรรมการบริโภคข้าวเหนียวติดตัวไปแม้จะย้ายถิ่นฐานไปอยู่ในภูมิภาคอื่น ๆ ของโลก ในขณะที่คนไทยในประเทศไทยส่วนใหญ่จะนิยมบริโภคข้าวเหนียวซึ่งผ่านการแปรรูปเป็นขนมหวานแล้ว เช่น ข้าวหลาม ข้าวต้มมัด หรือขนมหวาน จากแป้งข้าวเหนียว เช่น ขนมถั่วแปบ บัวลอย เป็นต้น

ข้าวเหนียวที่นิยมปลูกในประเทศไทยและเป็นพันธุ์ที่ปลูกมากเป็นอันดับสองรองจากข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 คือ ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 ซึ่งได้จากการปรับปรุงพันธุ์ในปี พ.ศ. 2508 โดยการนำข้าวขาวดอกมะลิ ไปชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ด้วยรังสีแกมมา ที่ปริมาณความเข้ม 20 กิโลแลต ณ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติแห่งประเทศไทย และนำเมล็ด 37 เมล็ดไปปลูกคัดเลือกพันธุ์ ที่สถานีทดลองข้าวบางเขน และพิจิตร เมื่อทดลองเปรียบเทียบผลผลิตตามสถานีวิจัยข้าวในเขตภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ปรากฏว่าพันธุ์ข้าวใหม่ที่ได้กลายเป็นข้าวเหนียวและให้ชื่อข้าวพันธุ์ใหม่ว่า “พันธุ์ข้าว กข 6” มีรหัสสายพันธุ์ KDML105'65-G2U-68-254 ผ่านความเห็นชอบของคณะกรรมการวิจัย กรมวิชาการเกษตร ให้ขยายพันธุ์ได้เมื่อวันที่ 4 พฤษภาคม พ.ศ.2520 ลักษณะทั่วไปของข้าว กข6 เป็นข้าวเหนียวต้นสูงประมาณ 154 เซนติเมตร เป็นพันธุ์ข้าวไวต่อช่วงแสงปลูกได้ครั้งเดียวเฉพาะในฤดูนาปี เป็นพันธุ์ที่ปลูกได้ทั้งภาคเหนือ (ตอนบน) และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ตอนบน) ต้นข้าวจะมีรูปทรงกอแตกกระจายเล็กน้อยใบยาวสีเขียวเข้มใบธงตั้งวันที่ออกดอก ประมาณ 21 ตุลาคม และเก็บ

เกี่ยว ประมาณ 21 พฤศจิกายน เมล็ดพันธุ์มีระยะพักตัวประมาณ 5 สัปดาห์เมล็ดข้าวเปลือกมีสีน้ำตาล เมล็ดข้าวกล้องกว้าง x ยาว x หนา = $2.2 \times 7.2 \times 1.7$ มิลลิเมตร รูปร่างเมล็ดเรียวยาว คุณภาพข้าวหุงสุกนุ่มเหนียวและมีความหอม ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 666 กิโลกรัมต่อไร่ และเนื่องจากข้าวเหนียว กข6 เป็นข้าวที่ไวต่อแสง จึงปลูกได้เฉพาะในช่วงนาปี โดยอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก ในการเพาะปลูกซึ่งเริ่มเตรียมดินปลูกตั้งแต่เดือนพฤษภาคม และเริ่มเก็บเกี่ยวช่วงเดือนพฤศจิกายน ข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 เป็นข้าวเหนียวพันธุ์เดียวในโลกที่มีความหอมและรูปร่างสวยงามคือมีความเรียวยาวข้าวหุงสุกจะมีความใสเลื่อมเป็นมัน เป็นข้าวที่ให้ผลผลิตสูงกว่าข้าวเหนียวสันป่าตองและทนแล้งดีกว่ามีลำต้นแข็งแรงไม่ล้มง่ายต้านทานโรคไหม้และโรคใบจุดสีน้ำตาลเป็นข้าวต้นสูงเก็บเกี่ยวผลผลิตง่ายเมล็ดไม่ร่วง คุณภาพการขัดสีดี ในด้านการบริโภค ข้าวเหนียว กข 6 มีลักษณะโดดเด่นเหมือนกับพันธุ์ข้าวโบราณที่คนไทยนิยมนำมาทำข้าวเหนียวมูน เพราะเมล็ดมีความยาวเรียวยาวพันธุ์ข้าวที่นำมาทำขนมไทยนี้เรียกว่าข้าวเหนียวเขี้ยววง ปัจจุบันพันธุ์ข้าวเหนียวเขี้ยววงที่เป็นพันธุ์พื้นเมืองไม่ค่อยพบว่ามีปลูกอยู่ ณ ที่ใดแม้ในอดีตจะปลูกมากในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน การค้าข้าวเหนียวในปัจจุบันจึงคงรักษาคุณลักษณะของข้าวเหนียวยอดนิยมอยู่ว่าต้องมีเมล็ดเรียวยาว บางข้าวหุงสุกแล้วจะมีความใสสวยงาม ด้วยเหตุนี้ข้าวเหนียว กข6 ซึ่งมีลักษณะที่เหมือนกับข้าวเหนียวเขี้ยววง จึงจัดอยู่ในกลุ่มข้าวเหนียวคุณภาพดีเป็นที่นิยมในการบริโภคสามารถใช้ในการบริโภคข้าวหุงสุกโดยตรงหรือนำไปแปรรูปเป็นอาหารคาวหวานได้หลากหลายประเภทปลายข้าวสามารถใช้ในการแปรรูปเป็นเครื่องดื่มต่าง ๆ ทั้งที่มีแอลกอฮอล์และ ไม่มีแอลกอฮอล์

ในด้านแหล่งผลิตข้าวเหนียวที่สำคัญ ข้อมูลจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พบว่า แหล่งผลิตใหญ่ของข้าวเหนียวอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือโดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งพันธุ์ข้าวที่ปลูกส่วนใหญ่จะปลูกข้าวพันธุ์ กข 6 เพราะได้ผลดีทั้งคุณภาพเมล็ด และกลิ่นหอมประกอบกับราคาดีกว่าพันธุ์อื่น ๆ จึงจูงใจให้เกษตรกรนิยมปลูกข้าว กข 6 แหล่งผลิตที่สำคัญอยู่ในจังหวัดทางตอนบนของภาค ได้แก่ ขอนแก่น อุดรธานี อุบลราชธานี สกลนคร และมหาสารคาม ในภาคเหนือเกษตรกรจะปลูกทั้งพันธุ์ กข 6 และพันธุ์เหนียวสันป่าตอง โดยจะมีแหล่งผลิตที่สำคัญอยู่ในจังหวัดทางตอนบนของภาค ได้แก่ เชียงราย ลำปาง เชียงใหม่ แพร่ น่าน และ ลำพูนสำหรับภาคกลาง มีจำนวนการปลูกข้าวเหนียวไม่มากนัก ส่วนมากจะปลูกข้าวเจ้าเป็นหลัก จังหวัดที่มีการปลูกข้าวเหนียว ได้แก่ สระแก้ว ปราจีนบุรี และฉะเชิงเทรา เช่นเดียวกับภาคใต้ที่พบว่าการปลูกข้าวเหนียวน้อยมาก จังหวัดที่มีการปลูกข้าวเหนียว ได้แก่ นครศรีธรรมราช พัทลุง สงขลา และสุราษฎร์ธานี

4. แป้งข้าว

แป้งข้าว ตามความหมายของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2529) ระบุว่าแป้งที่ได้จากข้าวขาว อาจเป็นข้าวเต็มเมล็ดข้าวหัก หรือปลายข้าว ซึ่งได้จากการสีข้าวเปลือกที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L.

แป้งข้าวนับเป็นผลิตภัณฑ์จากข้าวในขั้นการแปรรูปปฐมภูมิหรือการแปรรูปขั้นต้น ยังไม่สามารถนำมาบริโภคได้โดยตรง จะต้องนำแป้งข้าวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร กึ่งอาหารและไม่ใช่อาหารต่อไป การผลิตแป้งข้าวเริ่มโดยใช้เมล็ดข้าวเต็ม หรือข้าวหักที่มีความยาวตั้งแต่ 5 ส่วนขึ้นไป หรือข้าวหักที่มีความยาวไม่ถึง 6.5 ส่วน และไม่ผ่านตะแกรงเบอร์ 7 นำมาทำความสะอาดด้วยชุดเครื่องทำความสะอาด เช่นเดียวกับการทำความสะอาดข้าวเปลือกและข้าวสารร่วมกัน ได้แก่ การผ่านเครื่องแยกแม่เหล็ก เครื่องแยกหิน และเครื่องขัดข้าว เพื่อขัดผิวข้าวหักให้สะอาด (อรอนงค์, 2547) จากนั้นจึงนำไปผ่านขั้นตอนการโม่ให้เป็นแป้ง ซึ่งทำได้ 3 วิธี (งามชื่น, 2537) ดังนี้

1. การโม่เปียกหรือการโม่แห้ง

เป็นวิธีการผลิตแป้งที่แพร่หลายในปัจจุบัน การผลิตเริ่มจากการนำปลายข้าวมาแยกสิ่งสกปรก อาจมีการสีขัดเอาผิวนอกของเมล็ดออก เพื่อขัดผิวนอกที่มักลื่นหื่นออกไปขั้นตอนต่อไปจึงนำเมล็ดข้าวมาแช่น้ำ จะมีการกวนข้าวเพื่อให้สิ่งเจือปนลอยขึ้นมาและตักออกการล้างข้าวนี้จะล้างหลายๆ ครั้งจนน้ำที่ล้างใส หลังจากนั้นจึงทำการแช่ข้าวต่อไปเพื่อให้ข้าวดูดซับน้ำไว้ ทำให้ข้าวอ่อนตัวลง ซึ่งอาจใช้เวลา 3-4 ชั่วโมง แล้วจึงระบายน้ำออกให้ข้าวสะเด็ดน้ำ หลังจากนั้นจึงนำข้าวเข้าเครื่องโม่พร้อมกับน้ำ โดยควบคุมอัตราการเติมน้ำให้เหมาะสมเพื่อให้ได้แป้งละเอียดตามต้องการ น้ำแป้งที่เข้าสู่ระบบการกรองหรือเครื่องแยกน้ำแป้ง ในปัจจุบันโรงงานผลิตแป้งนิยมให้เครื่องกรองระบบแบบ filter plate หลังจากกรองน้ำออกแป้งหมาดจะค้างอยู่ในชั้นของแผ่นกรองเป็นก้อน จากนั้นจึงนำก้อนแป้งที่ได้ไปเข้าเครื่องตี เพื่อให้มีขนาดเล็กลงแล้วจึงนำไปอบเพื่อลดความชื้น ในสมัยก่อนการลดความชื้นมักใช้แสงแดด ซึ่งต้องใช้เวลานานและแป้งมักมีกลิ่นเปรี้ยวซึ่งเกิดมาจากปฏิกิริยาการหมัก ปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้ระบบการเป่าด้วยลมร้อนอุณหภูมิสูง ซึ่งประหยัดเวลาและได้แป้งที่มีคุณภาพดีขึ้น การใช้อุณหภูมิจะทำให้ผิวด้านนอกของแป้งสุกบางส่วน (gelatinized) ทำให้คุณภาพแตกต่างจากแป้งที่ได้จากวิธีการโม่แห้ง ซึ่งเป็นแป้งดิบ เมื่อลดความชื้นของแป้งลงถึงระดับที่ต้องการ (ประมาณร้อยละ 9-10) จึงนำแป้งแห้งนี้ไปโม่อีกครั้งให้ละเอียดเป็นผง และร่อนให้มีความละเอียดตามต้องการ แป้งที่ผ่านการผลิตโดยวิธีนี้เป็นแป้งที่มีคุณภาพดี มีความละเอียดและมีสิ่งเจือปนน้อยแต่อาจสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการไปกับน้ำที่ล้างและน้ำที่ใช้ในขั้นตอนโม่ได้

2. การไม่แห้ง

เนื่องจากวัตถุดิบที่นิยมใช้มักเป็นปลายข้าว ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ดังนั้นจึงมักมีสิ่งเจือปนอยู่มาก การแยกสิ่งเจือปนอาจใช้วิธีร่อนแป้งเพื่อแยกสิ่งที่มีน้ำหนักเบากว่าข้าวออก แต่เนื่องจากปลายข้าวมีขนาดค่อนข้างเล็ก จึงยังคงมีสิ่งเจือปนเหลือค้างอยู่ ดังนั้นแป้งที่ได้จึงมีขนาดน้อย เมล็ดข้าวยังมีความแกร่งอยู่มาก ทำให้ลำบากที่จะทำให้แตกละเอียดแป้งที่ได้จากมากโมจึงมักจะเป็นหยาบ นอกจากนี้ไขมันยังเหลือในเมล็ดข้าวอาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนง่าย ในประเทศไทยจึงไม่นิยมใช้แป้งข้าวชนิดไม่แห้ง อย่างไรก็ตามแป้งที่ได้การไม่ด้วยวิธีนี้ก็ยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการหลงเหลืออยู่มากกว่าการไม่เปียก ในต่างประเทศมีรายงานว่าการใช้แป้งชนิดนี้ในการทำขนมเค้กและขนมปังกรอบ

3. การไม่ผสม

เริ่มกระบวนการผลิตโดยการทำความสะอาด ล้าง และแช่ข้าวเช่นเดียวกันกับวิธีการมาเปียก หลังจากนั้นจึงนำข้าวดิบที่มีความชื้นมาอบที่ระดับอุณหภูมิสูงเพื่อทำให้ข้าวสุกและลดความชื้นลงจนมีระดับความชื้นต่ำ(ร้อยละ 9-10) ต่อจากนั้นจึงนำข้าวสุกไปตีให้แตกเป็นก้อนเล็กๆ แล้วจึงนำไปไม่ละเอียด จากนั้นจึงร่อนแป้งให้มีความละเอียดตามต้องการ แป้งที่ได้จะมีความละเอียดน้อยกว่าการไม่เปียก เพราะเมล็ดข้าวสุกแห้งจะมีความแข็งมาก แต่การนึ่งข้าวที่ความร้อนสูงจะช่วยทำลายเอ็นไซม์ไลเปส ซึ่งจะทำให้เกิดกรดไขมันอิสระและเป็นสาเหตุของการเกิดกลิ่นหืนได้ ดังนั้นแป้งที่ได้จึงเป็นแป้งคุณภาพ ในปัจจุบันนิยมใช้ในการผลิตแป้งข้าวเหนียวสำหรับทำขนมโก๋

เมื่อนำแป้งข้าวมาส่องดูกล้องจุลทรรศน์กำลังขยายสูง จะพบว่าเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กประมาณ 2-9 ไมโครเมตร มีรูปทรงเหลี่ยมกระจายตัวอยู่และบางส่วนจับตัวกันเป็นกลุ่มโดยแต่ละเม็ดสตาร์ช จะมีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสเกาะกันเป็นสายโซ่ยาวเรียกว่า อะไมโลส (amylose) หากน้ำตาลกลูโคสเกาะเกี่ยวในรูปที่มีกิ่งก้านที่แตกแขนงออกไปคล้ายกิ่งไม้ จะเรียกพอลิเมอร์นี้ว่า อะไมโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดนี้จะเกาะเกี่ยวกันอย่างแน่นหนาด้วยพันธะไฮโดรเจน สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง ในกรณีของแป้งข้าวมีรายงานว่า อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่ต่างกันของข้าว จะส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งนั้น และเป็นปัจจัยที่ผู้ใช้แป้งข้าวเป็นวัตถุดิบจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม จึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีตามต้องการ (สายสนม, 2537)

แป้งข้าวสามารถจำแนกได้เป็น 4 ชนิด ตามปริมาณอะไมโลส ดังนี้

1. แป้งข้าวจากข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำมาก (waxy)

มีร้อยละของน้ำหนักแห้งของ อะไมโลส เป็นองค์ประกอบเท่ากับ 0-2 นิยมใช้ในการทำขนมหวานและน้ำสลัด

2. แป้งข้าวจากข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ

มีร้อยละของน้ำหนักแห้งของอะไมโลสที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับ 9-20 นิยมใช้ในการผลิตภัณฑอาหารสำหรับเด็ก อาหารเช้า และขนมปังที่ใช้เชื้อยีสต์เพื่อขึ้นฟู

3. แป้งข้าวจากข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสปานกลาง

มีร้อยละของน้ำหนักแห้งของอะไมโลสที่เป็นองค์ประกอบเท่ากับ 20-25 ในประเทศฟิลิปปินส์นิยมใช้ในการทำเค้กที่ต้องการหมัก (fermented rice cake) และซูปรอง

4. แป้งข้าวจากข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง

มีร้อยละของน้ำหนักแห้งของอะไมโลสที่เป็นองค์ประกอบมากกว่า 25 นิยมใช้ในการทำเส้นก๋วยเตี๋ยว

5. แป้งสาลี

แป้งสาลีผลิตได้จากการนำเมล็ดข้าวสาลีมาโม่ด้วยวิธีโม่แห้ง และทำความสะอาดโดยการดักกรองผ่านตะแกรงขนาดต่าง ๆ ผลผลิตที่ได้ คือ แป้งฟลาว (wheat flour) ซึ่งอุดมไปด้วยโปรตีน เกือบร้อยละ 12-14 เหมาะสำหรับทำอาหาร เช่น ขนมปังต่าง ๆ แต่ถ้าจะผลิตเป็นแป้งสตาร์ช (starch) จะต้องใช้น้ำเป็นตัวกลางแยกสิ่งปลอมปนอื่น ๆ ได้แก่ ไขมัน และโปรตีนออกจากแป้งฟลาว (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2543)

ข้าวสาลีที่นำมาโม่เป็นแป้งสาลีมี 2 ประเภท คือ ข้าวสาลีชนิดแข็ง เมื่อนำมาโม่จะได้แป้งสาลีชนิดแข็งซึ่งเป็นแป้งที่มีโปรตีนสูง เหมาะสำหรับใช้ในการทำขนมอบ เช่น ขนมปัง แป้งสาลีชนิดนี้มีโปรตีนที่มีคุณภาพดี สามารถนวดผสมให้ได้ก้อนแป้งที่มีความยืดหยุ่นดี ทนต่อสภาพการผสม การหมัก อุณหภูมิของห้องและเครื่องผสม มีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำที่ดีเป็นผลให้ขนมอบมีปริมาตรที่ดี มีความสามารถดูดน้ำได้สูงเหมาะสำหรับการทำขนมปัง เคนนิชเพสตรีส่วนข้าวสาลีอีกปริมาณหนึ่ง คือ ข้าวสาลีชนิดอ่อน เมื่อนำข้าวมาโม่จะได้แป้งสาลีชนิดอ่อน ซึ่งเป็นแป้งที่มีโปรตีนต่ำ มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ต่ำกว่า แป้งชนิดแข็ง มีความทนทานต่อการผสมและการหมักที่ต่ำ จึงเหมาะสำหรับนำมาทำเค้ก คุกกี้ สำหรับแป้งสาลีที่มีขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาดสามารถแบ่งได้ 3 ชนิด

1. แป้งขนมปัง

มีโปรตีนสูงประมาณร้อยละ 12-14 เหมาะสำหรับการทำขนมปังหรือผลิตภัณฑ์ที่หมักด้วยยีสต์ แป้งสาลีชนิดนี้ไม่จากข้าวสาลีชนิดแข็งลักษณะของแป้งจะหยาบมีสีครีมไม่ขาว ตัวที่ทำให้แป้งขึ้นฟู ได้แก่ ยีสต์

2. แป้งอเนกประสงค์

แป้งชนิดนี้มีโปรตีนปานกลางประมาณร้อยละ 10-12 เหมาะสำหรับการทำคุกกี้ เพสตรีรี่ ปาท่องโก๋ บะหมี่ เป็นแป้งที่ได้จากการผสมแป้งสาลีชนิดแข็งกับชนิดอ่อนเข้าด้วยกันในสัดส่วนที่เหมาะสม มีลักษณะของแป้งขนมปังกับแป้งเค้กรวมกัน ตัวที่ทำให้แป้งขึ้นฟูได้แก่ ยีสต์และผงฟู

3. แป้งเค้ก

มีโปรตีนต่ำประมาณร้อยละ 7-9 เหมาะสำหรับการทำเค้ก คุกกี้ แป้งสาลีชนิดนี้มีลักษณะละเอียด สีขาว ทำให้ขึ้นฟูได้ด้วยสารเคมีเท่านั้น ได้แก่ ผงฟู และโซดาไบคาร์บอเนต

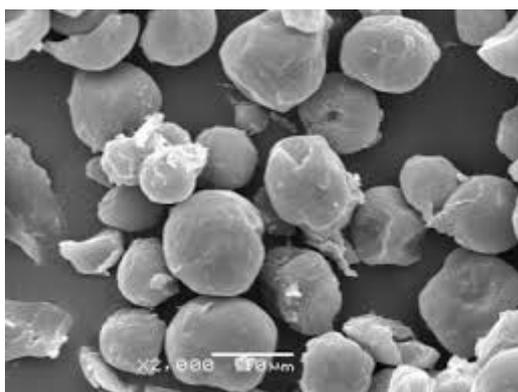
คุณค่าทางสารอาหารของแป้งสาลีประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ นอกนั้นเป็นโปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ ได้แก่ โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม แคลเซียม และวิตามินหลายชนิด เช่น วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 ไนอะซิน เป็นต้น แป้งสาลีเป็นแป้งที่ใช้ทำขนมอบทุกชนิด ไม่มีแป้งชนิดอื่นที่นำมาใช้แทนกันได้ ถึงแทนกันได้บ้างแต่คุณสมบัติจะไม่เหมือนแป้งสาลี ทั้งนี้เพราะแป้งสาลีมีโปรตีนสองชนิดรวมกันอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม คือ กลูเตนิน และไกลอะดิน (glutenin and gliadin) ซึ่งเมื่อนำแป้งสาลีมาผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้เกิดสารชนิดหนึ่งเรียกว่า กลูเตน มีลักษณะเป็นยางเหนียว ยืดหยุ่นได้ กลูเตนนี้จะเป็นตัวเก็บก๊าซเอาไว้ทำให้โครงสร้างที่จำเป็นของขนมอบและจะเป็นโครงสร้างแบบฟองน้ำเมื่อได้รับความร้อนจากเตาอบ

โปรตีนในแป้งสาลีจะดูดซึมน้ำได้อย่างน้อยสองเท่าของน้ำหนักของตัวเองโดยแป้งสาลีที่มีโปรตีนสูงจะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีกว่าแป้งสาลีที่มีโปรตีนต่ำ เมื่อเติมน้ำลงไปแป้งสาลีแล้วนวด โปรตีนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นกลูเตน แป้งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะถูกเรียกว่า โด ถ้าหมักโดได้ระยะหนึ่งแล้วนำมาล้างน้ำ ส่วนประกอบต่าง ๆ จะหลุดออกไปเหลือเพียงส่วนที่เรียกว่า กลูเตน ซึ่งเป็นโปรตีนที่ยืดหยุ่นได้และเป็นโครงสร้างของโด กลูเตนจะอุ้มน้ำก๊าซที่เกิดจากการหมักไว้ ทำให้โดขึ้นฟูเมื่อนำโดไปอบ ความร้อนขณะอบจะทำให้กลูเตนแข็งตัวและเกิดเป็นโครงสร้างของขนมอบขึ้นมา

นอกจากการนำแป้งสาลีมาใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ แล้วยังมีการนำแป้งสาลีมาใช้เป็นวัตถุดิบในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ไดอัลดีไฮด์สตาร์ช (dialdehyde starch), สตาร์ชแซนไทด์ (starch xanthide) และเป็นวัตถุดิบในการหมักกรดอินทรีย์อีกมากมาย (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2543)

6. สตาร์ช

สตาร์ช (starch) เป็นผลิตภัณฑ์แป้งที่ประกอบไปด้วยสารอาหารที่เป็นคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่สตาร์ชจัดเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในแป้งสาลีในปริมาณมากที่สุด เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูลักษณะของสตาร์ชในแป้งสาลี จะมองเห็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) มีรูปร่างกลมหรือรีมีทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กปนกันอยู่ (ภาพที่ 2.1)



ภาพที่ 2.1 scanning electron micrograph ของสตาร์ชจากข้าวสาลี

ที่มา: http://www.uaeh.edu.mx/investigacion/icbi/LI_MicroAlim/Javier_Castro/8.pdf

โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ช จะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวที่มีขนาดใหญ่โดยส่วนใหญ่สตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด ได้แก่ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) ซึ่งอัตราส่วนอะไมโลสและอะไมโลเพคตินของสตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันก็จะแตกต่างกันไป (รุ่งนภา และคณะ, 2546) สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสเปรียบเทียบกับอะไมโลเพคตินแสดงดังตารางที่ 2.1

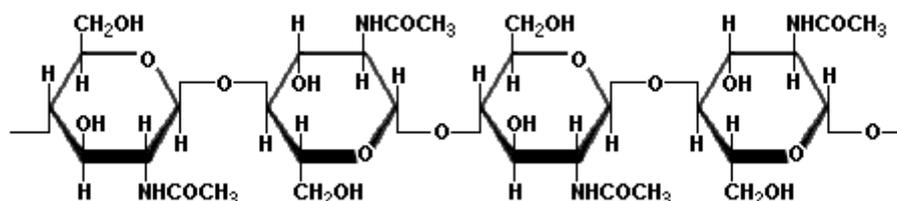
ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน

สมบัติ	อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha(1 \rightarrow 4)$	$\alpha(1 \rightarrow 4)$ และ $\alpha(1 \rightarrow 6)$
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การคืนตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับ ตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

ที่มา: Beynum และ Roels (1985)

6.1 อะไมโลส

อะไมโลสเป็นโพลีเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ $\alpha(1 \rightarrow 4)$ glucoside linkages มีกิ่งโซ่ (branched chain) อยู่ประมาณ 3-4 กิ่ง เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ $\alpha(1 \rightarrow 6)$ glucoside linkages (อรอนงค์, 2547) โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส

ที่มา : Chaplin (2001)

สตาร์ชจากพืชต่างชนิดกันจะมีปริมาณอะไมโลสที่แตกต่างกัน ในสตาร์ชข้าวสาลีจะมีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณร้อยละ 28 ในสตาร์ชข้าวเจ้ามีประมาณร้อยละ 17 สตาร์ชบางชนิดจะมีอะไมโลสต่ำมาก เช่น wax starch จะมีอะไมโลสน้อยละ 1 หรือไม่มีเลย ส่วนสตาร์ช amylo maize มีอะไมโลสสูงมากถึงร้อยละ 80 น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะไมโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับจำนวนกลูโคสในโมเลกุลของอะไมโลส หรือ degree of polymerization (DP) ในสตาร์ชข้าวสาลีจะมีค่า DP ของอะไมโลสอยู่ในช่วง 200-1,200 สตาร์ชที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ลดลง

อะไมโลสสามารถรวมตัวกันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ เช่น butanol, fatty acid และ hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารอินทรีย์ นอกจากนี้อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงสตาร์ชที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส

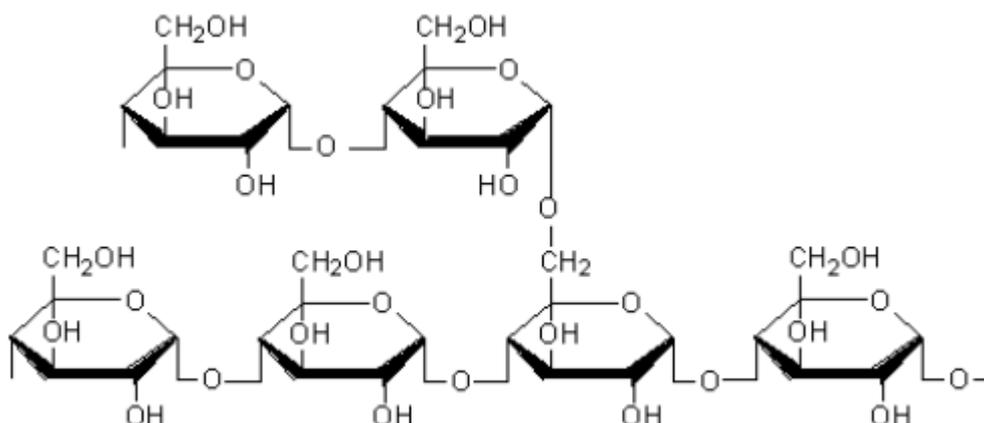
ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช อะไมโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพคติน บางส่วนกระจายตัวอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และ ส่วนผลึก (crystalline) สตาร์ชข้าวสาลีจะพบอะไมโลสกระจายตัวอยู่ในส่วนอสัณฐาน จากการศึกษาพบว่าอะไมโลสทั่วไปมักอยู่ในส่วนบริเวณรอบนอกเม็ดสตาร์ชมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนกลางเม็ดสตาร์ช อะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะไมโลเพคตินบริเวณใจกลางเม็ดสตาร์ช ส่วนอะไมโลสขนาดโมเลกุลเล็กมักพบอยู่ตามขอบเม็ดสตาร์ช

โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ เป็นเกลียวม้วน (helix), เกลียวที่คล้ายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (random coil) อะไมโลสภายในเม็ดสตาร์ชมีทั้งที่อยู่ในสภาพอิสระ อยู่ร่วมกับอะไมโลเพคตินเป็นเกลียวคู่ (double helix) ในส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ช หรืออาจอยู่ร่วมกับไขมันเป็นโครงสร้าง amylose-lipid complex เกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมความแข็งแรงให้กับเม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชของตัวได้ช้าลง (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2543)

6.2 อะไมโลเพคติน

อะไมโลเพคตินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ $\alpha(1 \rightarrow 4)$ glucoside linkages และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นโพลิเมอร์กลูโคสสาย

สั้น มี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ $\alpha(1\rightarrow4)$ glucoside linkages โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคตินแสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคติน

ที่มา: Chaplin (2001)

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ $\alpha(1\rightarrow4)$ glucoside linkages มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด ในสตาร์ชข้าวสาลีจะมีปริมาณอะไมโลเพคตินประมาณร้อยละ 72 ในสตาร์ชข้าวเจ้ามีประมาณร้อยละ 83 ค่า DP ของอะไมโลเพคตินในสตาร์ชแต่ละชนิดมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าอะไมโลสประมาณ 1,000 เท่า คือประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคั้นตัวต่ำเนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่ต่างกันทำให้สมบัติของสตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป เช่น แป้ง wax maize ที่ไม่มีอะไมโลส จะให้สตาร์ชที่มีสมบัติไม่เกิดเจล เกิดการคั้นตัวของแป้งน้อย แป้งเปียกมีลักษณะในและทนต่อการเกิด syneresis ส่วนแป้ง amylo maize ที่ปริมาณอะไมโลส สูงถึงร้อยละ 70 จะให้สตาร์ชที่มีสมบัติเกิดเจลแข็งได้ เม็ดสตาร์ชพองตัวยาก แป้งเปียกมีลักษณะขุ่น และอุณหภูมิการเกิดแป้งเปียกสูง (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

6.3 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ช

การเปลี่ยนแปลงสมบัติของสตาร์ชเมื่อผสมกับน้ำในขณะที่น้ำยังเย็นอยู่ โดยถ้าปริมาณน้ำมากกว่าแป้งในสัดส่วนร้อยละ 1-5 เมื่อผสมกันในระยะแรกจะเห็นว่า ส่วนผสมมีลักษณะขาวขุ่น อยู่ใน

ลักษณะแป้งแขวนลอยในน้ำ แต่ถ้าตั้งทิ้งไว้ระยะหนึ่งพบว่า แป้งตกตะกอนแยกจากส่วนน้ำคล้ายกับแป้งก่อนที่จะผสม แสดงว่าเม็ดสตาร์ชในแป้งไม่ดูดซึมน้ำขณะที่เย็นหรือดูดซึมน้ำได้น้อยมาก เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนผสมน้ำและแป้งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสตาร์ชโดยเกิดการพองตัวอูมน้ำมากขึ้นในขณะที่ยอดหนึ่มสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนเข้าไปทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เกาะเกี่ยวกันเองในบริเวณอณูพื้นฐานของโครงสร้างอะไมโลเพคตินคลายตัวลง ทำให้สามารถจับกับโมเลกุลของน้ำในส่วนผสมหรืออูมน้ำเข้าไปภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้พองขึ้นเรื่อยๆ พร้อมกับเริ่มขึ้นหนืด เรียกว่าเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) เม็ดสตาร์ชพองขึ้นได้โดยไม่จำกัดถ้าอยู่ในส่วนผสมที่มีน้ำมาก จนในที่สุดน้ำเข้าไปในบริเวณผลึก ทำลายโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชพร้อมทั้งมีความขึ้นหนืดสูงสุด เพราะน้ำเข้าไปอยู่ในเม็ดจนไม่เหลือเป็นน้ำอิสระในส่วนผสม เนื่องจากโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลของอะไมโลเพคตินและอะไมโลส ไหลออกจากเม็ดสตาร์ชและแขวนลอยในส่วนผสม เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้เย็นเกิดการคืนตัวหรือรีโทรเกรเดชัน (retrogradation หรือ setback) ส่วนผสมจะมีลักษณะขุ่นกลับคืน และมีความขึ้นหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง

เมื่อตั้งทิ้งไว้อีกระยะอาจจะเห็นน้ำแยกตัวออกจากเม็ดสตาร์ชขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำให้เย็นตัวลงโดยถ้าทำให้เย็นตัวลงช้าๆ น้ำจะแยกตัวออกจากโมเลกุลของสตาร์ชได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลของอะไมโลสที่มีสายสั้นเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายมาเกาะเกี่ยวกันเอง ทำให้น้ำแยกตัวออก เกิดการแยกชั้นหรือตกตะกอนแต่น้ำในส่วนโมเลกุลของอะไมโลเพคตินจะอูมน้ำไว้ได้ดีกว่า ดังนั้นความสามารถในการอูมน้ำของเจลที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่มีอยู่ในเม็ดสตาร์ช แต่ถ้าทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว จะทำให้น้ำที่อะไมโลสและอะไมโลเพคตินอูมน้ำไว้ในโครงสร้างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงช้ามาก (อรอนงค์, 2547)

6.3.1 การพองตัว (swelling) และการละลาย (solubility)

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่น ๆ สามารถแพร่เข้าไปในร่างแหไมเซลล์ (micelles) ในเม็ดสตาร์ช ของแป้งได้อย่างอิสระ โดยปกติแป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจล (gelatinization temperature) เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆกัน แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจล พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับของหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการเกิด birefringence จะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแห

ภายในเม็ดแป้ง และการตัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิด จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

ค่ากำลังการพองตัว (swelling power) และ ความสามารถในการละลาย (solubility) ของสตาร์ช สามารถหาได้โดยการใช้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ชในน้ำที่มากเกินไป ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและบางส่วนของสตาร์ชจะละลายออกมา แล้วจึงคำนวณหาค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลาย โดยกำลังการพองตัวของสตาร์ชจะแสดงเป็นปริมาณหรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด เมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ ส่วนความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่มารละลายได้ (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

6.3.2 การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization)

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดสตาร์ชอยู่ในร่างแห micelles ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้เม็ดสตาร์ชละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่สตาร์ช อยู่ในน้ำเย็นเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อยแต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายสตาร์ช พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลงเม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผลของสารละลายสตาร์ชจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดสตาร์ชมีน้อยลง เม็ดแป้งจะเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาตินในเซชัน เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืดมักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในสตาร์ชแต่ละชนิด

ความหนืดสูงสุดของสารละลายสตาร์ชในระหว่างการเกิดเจลาตินในเซชันจะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของสตาร์ชสำหรับสตาร์ชข้าวสาลีจะมีความหนืดสูงสุดต่ำเนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีกำลังการพองตัวอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งเป็นผลจากมาปริมาณอะไมโลสและไขมันนอกจากนี้ระดับอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของสตาร์ช เช่น ปริมาณไขมัน สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากการเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินภายในเม็ดสตาร์ชมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ทำให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดต่างกัน สตาร์ชต่างชนิดกันจะมีลักษณะการเกิดเจลาตินแตกต่างกัน การเกิดเจลาตินในเซชันไม่ได้เกิดเฉพาะอุณหภูมิหนึ่งแต่เกิดในช่วงอุณหภูมิที่มีความกว้างประมาณประมาณ 8-12°C สตาร์ชแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินต่างกัน (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

6.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน(retrogradation)

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาตินในเซชัน แล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออกโมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแห 3 มิติ โครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น ทำให้เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว หรือ setback เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายสตาร์ชทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นมีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคสตาร์ชที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมานอกเจล ถ้าการคืนตัวของสตาร์ชเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน แต่ถ้าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

การคืนตัวของสตาร์ชขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิระยะเวลา ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณ และขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในช่วง pH 5-7 สตาร์ชสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูง หรือต่ำกว่านี้สตาร์ชจะคืนตัวได้ช้าลง

ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของสตาร์ช สตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายที่ต่ำที่สุด) ที่ degree of polymerization ของอะไมโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะไมโลสสั้นหรือยาวกว่านี้ ในการทำให้อะไมโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งนั้น ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100-160°C อะไมโลเพคตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน ในสตาร์ชข้าวสาลีจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าสตาร์ชมันฝรั่งและสตาร์ชมันสำปะหลังเนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูงมีอะไมโลกุลเล็ก และมีไขมันในปริมาณสูง ทำให้เกิดการจับตัวเป็นโครงสร้าง amylose-lipid complex

การตรวจสอบความสามารถในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของสตาร์ชแต่ละชนิด สามารถทำได้โดยใช้เครื่อง Brabender หรือ Rapid Visco Analyzer(RVA) โดยอาจ

ประมาณได้จากค่า setback ของแป้ง ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (setback from peak) หรือความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from trough) เนื่องจากในแป้งส่วนใหญ่จะมีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง และการเกิดการคืนตัวหรือรีโทรเกรเดชันนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จึงมักสร้างปัญหาให้กับผลิตภัณฑ์อาหารในระหว่างการเก็บรักษา เช่น การเกิด staling ในขนมปัง (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

7. อนุมูลอิสระและสารต้านอนุมูลอิสระ

7.1 อนุมูลอิสระ

เป็นสารที่มีอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในวงนอกของอะตอมหรือโมเลกุล มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยรับอิเล็กตรอนจากสารอื่น ๆ ใกล้เคียงมีผลให้ตัวมันเองเสถียรมากขึ้นในขณะเดียวกันก็ชักนำให้สารที่ให้อิเล็กตรอนไปนั้นมีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่จนอาจกลายเป็นสารที่มีความรุนแรง ซึ่งถ้าเกิดขึ้นในระบบสิ่งมีชีวิต อาจทำอันตรายส่วนสำคัญต่อเซลล์รอบๆ บริเวณนั้น ไม่ว่าจะเป็นโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต หรือ ดีเอ็นเอ (DNA) ทำให้สารชีวโมเลกุลเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและเสียหายที่การทำงาน

อนุมูลอิสระเกิดขึ้นในร่างกายจากการขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการเผาผลาญอาหารให้เกิดเป็นพลังงาน โดยใช้ออกซิเจนในไมโทคอนเดรียอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกจับ โดยออกซิเจนเกิดเป็นอนุมูลของออกซิเจนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา เรียกว่า Reactive oxygen species (ROS) ตัวอย่าง เช่น ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) ซุปเปอร์ออกไซด์ (Superoxide) และเพอร์ออกไซด์ (Peroxide) อนุมูลอิสระชนิดอื่นที่เกิดขึ้นในร่างกาย เช่น Reactive nitrogen species (RNS) เช่น ไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide) และเมทิล (Methyl) นอกจากการเผาผลาญอาหารที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระแล้ว แหล่งอื่นในร่างกายที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ได้แก่ ปฏิกิริยาทางเอนไซม์ เช่น แชนทีนออกซิเดส (Xanthine oxidase) พรอสตาแกลนดิน ซินเทส (Prostaglandin synthase) ลิพอกซีจีเนส (Lipoxygenase) แอลดีไฮด์ออกซิเดส (Aldehyde oxidase) ปฏิกิริยาเพอร์ออกซิเดชันของไขมัน (Lipid peroxidation) โดยกรดไขมันไม่อิ่มตัว สภาวะทางอารมณ์ เช่น ความเครียด และพยาธิสภาพของร่างกาย เช่น การมีไข้ การติดเชื้อ เป็นต้น แหล่งอนุมูลอิสระจากภายนอกร่างกาย ได้แก่ รังสี ไอโซทอक्सิน ตัวทำลายอินทรีย์ และมลภาวะต่าง ๆ (ชัยรัตน์ พิงเพียร, 2552)

7.2 กลไกการเกิดออกซิเดชัน

ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันจัดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ซึ่งมีกลไกการเกิดปฏิกิริยา 3 ระยะ คือ ระยะแรก เรียกว่าระยะเหนี่ยวนำ (Initiation) เป็นระยะที่ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ ระยะที่สอง เรียกว่า ระยะเพิ่มจำนวน (Propagation) เป็นระยะที่อนุมูลอิสระเปลี่ยนไปเป็นอนุมูลตัวอื่น และระยะสุดท้าย เรียกว่า ระยะสิ้นสุด (Termination) เป็นระยะที่มีการรวมกันของอนุมูลอิสระ 2 อนุมูลที่มีความเสถียร

7.2.1 ระยะเหนี่ยวนำ

ปฏิกิริยาการเกิดอนุมูลอิสระในเซลล์ มักเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) แสง (Photolysis) รังสี (Radiolysis) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) รวมถึงโมเลกุลที่มีความไวสูงในการทำปฏิกิริยา เช่น ไนตริกออกไซด์ ($\cdot\text{NO}$) และ Singlet oxygen ($^1\text{O}_2$) ซึ่งเป็นออกซิเจนในสถานะที่ถูกกระตุ้น สิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น

พันธะ O-O ในโมเลกุลของไฮโดรเพอร์ออกไซด์เป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง จึงถูกสลายได้ง่ายทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ โดยในปฏิกิริยาที่มีโลหะไอออน เช่น เหล็ก และทองแดง จะช่วยในการเร่งสลายโมเลกุลของไฮโดรเพอร์ออกไซด์ ทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น

7.2.2 ระยะเพิ่มจำนวน

อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในระยะเหนี่ยวนำจะเกิดปฏิกิริยาต่อไปนี้โดยเกิดปฏิกิริยาขึ้น 2 ทาง คือ โดยดึงเอาอะตอมไฮโดรเจนออกจากโมเลกุลข้างเคียง หรือโดยการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจนที่อยู่ในสถานะพื้น (Ground state) ทำให้เกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่

7.2.3 ระยะสิ้นสุด

เป็นระยะที่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น 2 อนุมูลมารวมกัน ได้เป็นสารที่มีความเสถียร จึงเป็นการหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเกิดอนุมูลอิสระ (ซัยรต์น ฟิงเพียร์, 2552)

7.3 สารต้านอนุมูลอิสระ

สารที่มีปริมาณน้อยที่สามารถป้องกันหรือชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยอนุมูลอิสระต่าง ๆ ได้ สารเหล่านี้มีกลไกการทำงานต้านอนุมูลอิสระด้วยกันหลายแบบ เช่น ดักจับ (Scavenge) อนุมูลอิสระโดยตรง ยับยั้งการสร้างอนุมูลอิสระ หรือเข้าจับ (Chelate) กับเหล็ก หรือป้องกันการสร้างอนุมูลอิสระเป็นต้น มีการแบ่งกลุ่มของสารต้านอนุมูลอิสระไว้ 5 กลุ่ม ดังนี้

7.3.1 สารต้านอนุมูลอิสระปฐมภูมิ (Primary antioxidants)

เป็นสารที่หยุดปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระโดยการให้อนุมูลไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนแก่ อนุมูลอิสระโดยตรงเป็นผลให้อนุมูลนั้นกลายเป็นสารที่มีความเสถียรภาพมากขึ้น สารที่สมบัตดังกล่าว เช่น สารประกอบฟีนอลิก หรือสารต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น บิวทิลไฮดรอกซีโทลูอีน (Butylated hydroxyl toluin, BHT) บิวทิลไฮดรอกซีอะนิโซล (Butylated hydroxyl anisole, BHA) และเทอร์เชียรีบิวทิลไฮโดรควิโนน (Tertiary butyl hydroquinone, TBHQ) เป็นต้น

7.3.2 สารต้านอนุมูลอิสระทุติยภูมิ (Secondary antioxidants)

สารต้านอนุมูลอิสระประเภทนี้ไม่ทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอนุมูลอิสระ แต่จะทำหน้าที่สลายไฮโดรเปอร์ออกไซด์ของไขมัน ให้เกิดเป็นสารที่มีความเสถียร เช่น กรดไทโอโพรพิก (Thiopropionic acid)

7.3.3 สารที่ทำหน้าที่ดักจับออกซิเจน (Oxygen scavengers)

เป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน แล้วกำจัดออกไปจากระบบได้ซึ่งสารจับออกซิเจนจะช่วยเสริมฤทธิ์ หรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) กรดอีริทโรบิก (Erythobic acid) แอสคอร์บิลปาล์มิเตต (Ascorbyl palmitate) เป็นต้น

7.3.4 เอนไซม์ที่ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Enzymatic antioxidants)

เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่กำจัดออกซิเจน เช่น กลูโคสออกซิเดส (Glucose oxidase) หรือกำจัดสารที่เกิดออกซิเดชันได้ เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ ดิสมูเทส (Superoxide dismutase)

7.3.5 สารที่ทำหน้าที่จับอนุมูลอิสระ (Chelating agents)

เป็นสารที่ทำหน้าที่จับอนุมูลโลหะ ซึ่งอนุมูลโลหะ เช่น เหล็ก ทองแดง จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน สารที่ทำหน้าที่จับอนุมูลอิสระนี้จะเป็นตัวส่งเสริมการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระปฐมภูมิ ซึ่งสารเหล่านี้อาจมีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระเล็กน้อยหรือไม่มีเลย เช่น กรดซิตริก (Citric acid) กรดอะมิโน (Amino acid) ฟอสโฟลิปิด (Phospholipids) ได้แก่ เซฟาลิน (Cephalin)

7.4 แหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ (Natural antioxidants)

7.4.1 สารต้านอนุมูลอิสระสังเคราะห์ (Synthesis antioxidants)

เป็นสารประกอบฟีนอลิกที่สังเคราะห์ขึ้น โดยในโครงสร้างจะมีการเติมหมู่แอลคิลเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับการละลายในไขมันนำไปใช้เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันของ

ไขมันสารสังเคราะห์เหล่านี้ เช่น บีเอชเอ บีเอชที ทีบีเอชคิว และโพรพิลแกลเลต (Propyl gallate, PG) โดยมีการกำหนดให้บีเอชเอ บีเอชที ทีบีเอชคิวได้ในปริมาณไม่เกิน ร้อยละ 0.02

7.4.2 สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ (Natural antioxidants)

เป็นสารที่พบได้ในธรรมชาติไม่ว่าจะมาจากพืช จุลินทรีย์ หรือเนื้อเยื่อของสัตว์ มีการแบ่งกลุ่มสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มของเอนไซม์ เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมูเทอเรส กลูตาไทโอนเพอร์ออกซิเดส (Glutathione peroxidase) และคะตะเลส (Catalase) กลุ่มสารโมเลกุลใหญ่ เช่น อัลบูมิน (Albumin) เซรูโรพลาสมิน (Ceruloplasmin) เฟอริติน (Ferritin) กลุ่มสารโมเลกุลเล็ก เช่น กรดแอสคอร์บิก โทโคเฟอรอล แคโรทีนอยด์ และโพลีฟีนอล (Polyphenol) กลุ่มของฮอร์โมนบางชนิด เช่น เอสโตรเจน (Estrogen) แองจิโอเทนซิน (Angiotensin) และ เมลาโทนิน (Melatonin) เป็นต้น

7.5 สารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) เป็นสารกลุ่มเมตาบอไลต์ระดับทุติยภูมิ (Secondary metabolite) ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในกระบวนการเจริญเติบโตการขยายพันธุ์พืช และการป้องกันจากเชื้อก่อโรค นอกจากนี้อาจเป็นสารที่ให้สีหรือกลิ่นรสในผักและผลไม้ ซึ่งสารประกอบฟีนอลิกนั้นมีอยู่ในอาหารและเครื่องดื่มที่ได้มาจากพืช เช่น ผัก ผลไม้ ธัญชาติต่าง ๆ น้ำผลไม้ ไวน์ ชา และกาแฟ เป็นต้น แต่พบในปริมาณที่แตกต่างกันออกไป

สารประกอบฟีนอลิกมีลักษณะโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) ที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ หรือมากกว่า พบได้ตั้งแต่กลุ่มที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก ไปจนถึงกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ เช่น แทนนิน (Tannins)

7.5.1 สมบัติการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิก

สารประกอบฟีนอลิก ทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดออกซิเดชันของไขมัน โดยการให้ออกซิเจนอะตอมแก่อนุมูลอิสระ

เมื่อสารประกอบฟีนอลิกให้ไฮโดรเจนอะตอม แก่อนุมูลอิสระไปแล้ว อนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกจะค่อนข้างมีความเสถียร เนื่องจากเกิดการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนใน วงแหวนเบนซีน และทำให้ไม่มีตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการเข้าจับของโมเลกุลออกซิเจน นอกจากนี้ อนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกบางชนิดยังคงสามารถรวมตัวกับอนุมูลอิสระอื่นได้อีกด้วย

7.5.2 ความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิกในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ

จะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโมเลกุลสารประกอบฟีนอลิก ดังนี้

7.5.2.1 ค่าพีเอช เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล ในแต่ละตำแหน่งของสารประกอบฟีนอลิกมีบทบาทต่อสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช จะมีผลให้หมู่ไฮดรอกซิลเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงน่าจะมีผลต่อสมบัติการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลิกด้วยเช่นกัน

7.5.2.2 อุณหภูมิ มีผลต่อการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิก อุณหภูมิสูงในระหว่างการแปรรูปจะมีผลทำให้สารประกอบฟีนอลิกโมเลกุลเล็กๆ ระเหยกลายเป็นไอได้ นอกจากนี้ อุณหภูมิเก็บรักษามีผลต่อความคงตัวของสารประกอบฟีนอลิกด้วยเช่นกัน

7.5.2.3 การเกิดออกซิเดชัน สารประกอบฟีนอลิกสามารถถูกออกซิไดส์ได้ โดยอาจเกิดจากออกซิเจน หรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกซิเดชันของไขมัน โดยเฉพาะไฮโดรเพอร์ออกไซด์

7.5.2.4 การรวมตัวกับโมเลกุลอื่น ๆ สารประกอบฟีนอลิกสามารถเกิดการรวมตัวกับโมเลกุลอื่น ๆ เช่น โปรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ หรืออัลคาลอยด์ และปฏิกิริยาอาจจะเป็นแบบสามารถผันกลับได้หรือไม่ได้นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา เช่น ออกซิเจนไอออนโลหะ เอนไซม์ และกรด เป็นต้น ซึ่งจะเป็นตัวการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยา เช่น ทำให้สารประกอบในสถานะสมดุลรวมกัน และตกตะกอนแยกออกมา หรือเกิดพันธะโควาเลนต์รวมกันเป็นสารใหม่ ทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถผันกลับได้ หากปรากฏการณ์เหล่านี้มีผลทำให้สารประกอบฟีนอลิกมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไป จะทำให้สารประกอบฟีนอลิกสูญเสียสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระได้

8. ขนมอบ

ขนมปัง (bread) เกิดจากการนำเอาแป้งสาลีที่ได้จากการบดเมล็ดข้าวสาลีมาผสมให้เข้ากับน้ำในอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม เกิดเป็นสารชนิดหนึ่งที่เรียกว่ากลูเตน (gluten) มีลักษณะเป็นยางเหนียวยืดหยุ่นได้ ซึ่งกลูเตนที่ได้นี้เกิดจากโปรตีน 2 ชนิด ที่อยู่ในแป้งสาลี คือ กลูตามิน (glutamin) และไกลอะดีน (gliadin) รวมกันอยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสม โดยที่กลูเตนจะเป็นตัวทำหน้าที่ในการกักเก็บก๊าซไว้เพื่อให้เกิดโครงร่างที่จำเป็นของผลิตภัณฑ์ และเกิดเป็นโครงร่างแบบฟองน้ำเมื่อได้รับความร้อนจากเตาอบ กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า “ขนมปัง”

ขนมปังสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท (จิตธนา และอรอนงค์, 2539)

1.ขนมปังฝรั่งเศส ขนมปังอิตาลี และขนมปังเวียนนา

ขนมปังทั้ง 3 แบบ ทำจากโดที่มีปริมาณไขมันต่ำประมาณร้อยละ 0-3 โดของขนมปังทั้ง 3 แบบนี้ ส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมเหมือนกัน แป้งที่ใช้ทำขนมปังชนิดนี้จะต้องเป็นแป้งที่มีปริมาณกลูเตนสูง เพื่อที่จะสามารถทนทานต่อการหมักได้นาน ทนต่อการพักตัวและการขึ้นฟูของโดในระยะแรกของการอบ

2.ขนมปังปอนด์หัวกะโหลก และขนมปังแซนด์วิช

เป็นขนมปังที่ชาวอเมริกันนิยมบริโภคกันมาก เพราะมีเนื้อขนมปังขาวและนุ่มทำจากโดที่มีปริมาณไขมันร้อยละ 3-6 ถ้าใช้พิมพ์แบบธรรมดาในการผลิต ก็จะเป็นขนมปังปอนด์หัวกะโหลก แต่ถ้าใช้พิมพ์ที่มีฝาปิดข้างบน ก็จะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยม ซึ่งนิยมนำมาทำเป็นแซนด์วิช จึงเรียกขนมปังแซนด์วิช

3.ขนมปังเนื้อนุ่ม (soft rolls หรือ soft buns)

เป็นขนมปังที่ทำจากโดที่มีความเข้มข้นสูง ปกติทำจากโดที่มีน้ำตาลและไขมันมากกว่าขนมปัง 2 ชนิดแรก (ไขมันร้อยละ 6-12)ปริมาณไขมันอาจเพิ่มขึ้นหรืออาจไม่ใช้ก็ได้ แป้งที่ใช้ เป็นแป้งที่มีความแข็งแรงปานกลาง คือ กลูเตนไม่แข็งมาก ขนมปังที่อบได้จะมีรสหวานนุ่มและละเอียดเช่น ขนมปังแฮมเบอร์เกอร์ ขนมปังฮอตดอก

4.ขนมปังหวาน(sweet dough)

โดที่ทำขนมปังหวานจะต้องมีสูตรเข้มข้นกว่าโดที่ใช้ทำขนมปังจืด โดยมีปริมาณน้ำตาล นม ไขมัน และไข่สูงกว่าขนมปังจืด(ไขมันร้อยละ12-24) ขนมปังหวานจากสูตรพื้นฐานเพียงสูตรเดียว สามารถดัดแปลงให้เกิดเป็นขนมปังหวานมากมายหลายชนิด โดยการปั่นให้มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กัน ใส่ไส้ชนิดต่าง ๆ แป้งที่ใช้อาจใช้แป้งสาลีชนิดแข็ง และแป้งสาลีอ่อนประเภทต่าง ๆ เช่น ขนมปังไส้ต่าง ๆ

8.1 กรรมวิธีการผลิตขนมปัง

การผลิตขนมปังนั้นมีขั้นตอนต่าง ๆ (อรอนงค์, 2540) ดังนี้

1.การผสม

มีจุดประสงค์หลัก 2 ประการ คือ เพื่อให้ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันดีและเพื่อให้เกิดความยืดหยุ่นของโด สำหรับวิธีการผสมที่นิยมมี 2 แบบ คือ แบบผสมครั้งเดียว(straight dough method) และแบบผสมสองครั้ง(sponge and dough method)โดยการผสมครั้งเดียวจะผสมส่วนผสมทั้งหมดรวมกันทีเดียว จนส่วนผสมเข้ากับน้ำรวมเข้ากับส่วนผสมอื่น ได้ลักษณะโดที่ดีมีความยืดหยุ่น สำหรับการ

ผสมสองครั้งจะแบ่งการผสมเป็นสองครั้ง คือ ครั้งแรกจะผสมแป้งส่วนใหญ่กับน้ำและยีสต์เพื่อให้เข้ากันเท่านั้น แล้วหมักทิ้งไว้ เรียกส่วนนี้ว่าสปันจ์ ซึ่งจะใช้เวลาหมักประมาณ 2-3 ชั่วโมง แล้วจึงทำการผสมครั้งที่สอง โดยส่วนผสม สปันจ์ รวมกับแป้งส่วนที่เหลือและส่วนผสมอื่น ตีผสมให้เข้ากันจนได้โดที่เรียบเนียนเช่นเดียวกับการผสมครั้งเดียว

2. การหมักโด

มีจุดประสงค์เพื่อให้มีการพองตัวเนื่องจากเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นเพราะยีสต์ในส่วนผสมเจริญเติบโตและเปลี่ยนองค์ประกอบของสารอาหารในแป้งบางส่วนข้างในเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลให้ก้อนโดขยายตัวขึ้นเป็นสองเท่าจึงจำเป็นต้องไล่ลมหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากโดก้อนโดจะใหญ่เกินไปจนแตกเอง การไล่ลมนี้อาจจะทำครั้งเดียวในช่วงหมัก หรือทำสองครั้งก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของขนมปัง

3. การตัดแบ่งก้อนโด

มีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ก้อนโดที่มีขนาดเท่ากัน ตามลักษณะชนิดของขนมปังเมื่อตัดแล้วต้องให้เป็นก้อนกลมอีกครั้ง เพื่อควบคุมก๊าซให้อยู่ภายในโดได้

4. การพักโดระยะสั้น

มีจุดประสงค์เพื่อให้โดได้พักคลายหลังจากการตัดและปั้นกลม จะได้สามารถปั้นเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ ที่ต้องการได้ง่ายขึ้น เมื่อกีดได้ประมาณ 8-12 นาที จึงทำการปั้นก้อนโดเพื่อนำลงพิมพ์

5. การใส่พิมพ์

มีจุดประสงค์เพื่อให้ขนมปังมีรูปร่างและขนาดเท่ากัน และสุกอย่างสม่ำเสมอโดยนำก้อนโดที่ปั้นเป็นรูปร่างใส่ลงในพิมพ์ที่ทำเนยขาวบางๆ เพื่อไม่ให้ขนมปังติดพิมพ์เมื่อสุก

6. การหมักโดก่อนอบ

มีจุดประสงค์เพื่อให้ขนมปังได้หมักอีก จนขนมขึ้นเกือบเต็มพิมพ์

7. การอบ

จุดประสงค์เพื่อขนมปังสุก มีกลิ่นรสหวานรับประทาน อุดมภูมิที่ใช้อบอยู่ในช่วง 180- 220° C เวลาที่ใช้ในการอบขึ้นอยู่กับชนิดของขนมปัง

8.2 โดขนมปัง

โดขนมปัง(dough)เกิดจากการผสมแป้งสาลีกับน้ำ นวดผสมให้เข้ากัน ในตอนแรกก้อนแป้งจะมีลักษณะหยาบ และ เมื่อตั้งขึ้นมาจะเหนียวติดมือ เมื่อนวดต่อไปเรื่อยๆ ก้อนแป้งจะเริ่มมีความยืดหยุ่นเล็กน้อย เรียบเนียนขึ้นและแห้ง แต่ยังคงเกาะติดกับอ่างผสมและตะขอที่ใช้ในการผสมอยู่ เมื่อ

ขนาดผสมต่อไปเรื่อยๆ จนถึงระยะเวลาที่เหมาะสม จะได้ก้อนแป้งที่มีลักษณะเรียบเนียนและแห้ง ไม่เกาะติดกับอ่างผสมและตะขอกที่ใช้ในการผสมอีกต่อไป เมื่อจับดูก้อนแป้งจะมีความนุ่ม มีความยืดหยุ่นที่พอเหมาะ เมื่อดึงขึ้นมาจะไม่เหนียวติดมือและสามารถดึงยืดให้เป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ได้โดยไม่เกิดการฉีกขาด เรียกก้อนแป้งที่มีลักษณะดังกล่าวหลังจากการผสมแล้วว่า “โด”(dough) (จิตธนา และอรอนงค์, 2539)

ในขณะที่ทำการผสมโด อากาศจะถูกตีผสมเข้าไปในโด ทำให้เกิดฟองอากาศเล็กๆ ในช่วงแรกก๊าซไนโตรเจนจะเป็นก๊าซที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากไม่ละลายน้ำ จึงได้ฟองอากาศขนาดใหญ่กว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซออกซิเจนที่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อถึงจุดผสมที่เหมาะสม จะมีอากาศเพียงครึ่งเดียวเท่านั้นที่ยังคงอยู่ การทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กละเอียด และมีปริมาณมากขึ้น ทำได้โดยการไล่ลมหรือโดไปนวดอีกครั้งหนึ่ง ส่วนการหมักภายใต้สภาวะสุญญากาศซึ่งมีความดันต่ำ ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือการใช้สารลดแรงตึงผิวเพื่อทำให้เกิดฟองอากาศได้ง่ายขึ้น ในช่วงการผสมโด ส่วนของกลูเตนจะเป็นส่วนที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะดูดน้ำ แต่จะดูดซับน้ำไว้ ถือเป็นเฟสที่สม่ำเสมอ แต่แป้งและเซลล์อากาศจะเป็นเฟสที่ไม่สม่ำเสมอ โดยที่เซลล์ของยีสต์และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก ได้แก่ น้ำตาล กรดอินทรีย์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะกระจายอยู่ทั่วๆ ไปในเฟสส่วนที่เป็นของเหลว ถ้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในเฟสที่เป็นของเหลวจนอิ่มตัวแล้ว ก็จะอยู่ในรูปก๊าซที่สามารถแทรกเข้าไปในเซลล์อากาศที่มีอยู่แล้วจากการผสมได้ ทำให้ปริมาณของโดเพิ่มขึ้น เรียกว่าโดพัฒนาเต็มที่แล้ว

กระบวนการในการพัฒนาโดเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ คือ โดที่มีความยืดหยุ่นสูงเมื่อพักตัว (relax) จะได้โดที่มีความยืดหยุ่นต่ำ และเกิดการผันกลับได้เมื่อทำการนวดการที่โดมีคุณสมบัติเช่นนี้ แสดงว่าพันธะของโดนั้นต้องไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงกล่าวคือพันธะที่เกิดขึ้นในโดอาจจะเป็นพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะที่ชอบน้ำ (hydrophillic) หรือทั้งสองอย่าง สมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของโดก็คือ สมบัติในการจับอากาศเข้าไว้ได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความเหนียวของโด ในช่วงการผสมจะมีจับอากาศจากภายนอกไว้ประมาณครึ่งหนึ่ง ส่วนมากมักเป็นก๊าซไนโตรเจน ช่วงนี้จะมีค่าสำคัญมาก เพราะเป็นช่วงการสร้างเซลล์อากาศ (air cell) มีการจับอากาศได้น้อย ขนมปังที่ได้จะมีลักษณะเนื้อที่หยาบและมีเซลล์อากาศขนาดใหญ่ในการผสมโดบางครั้งอาจทำภายใต้สภาวะสุญญากาศบางส่วน (partial vacuum) ซึ่งการผสมในสภาพแบบนี้จะมีความกดอากาศต่ำ ดังนั้นฟองอากาศจะขึ้นได้อย่างรวดเร็วและเป็นจำนวนมากจึงได้ขนมปังที่มีลักษณะเนื้อละเอียดกว่าปกติ

เมื่อถึงช่วงการหมักโด ในระหว่างที่หมักโดทั้งวันนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายในโด โดยที่ยีสต์จะใช้น้ำตาลบางส่วนเป็นอาหาร และแป้งจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาลจนในที่สุดจะกลายเป็นก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์และแอลกอฮอล์ ซึ่งก๊าซนี้มีส่วนทำให้โตขยายตัวเอ็นไซม์โปรตีเอสที่มีอยู่ในยีสต์จะ ช่วยในการทำให้กลูเตนนุ่มและยืดตัวได้ นอกจากนี้จะมีกรดเกิดขึ้นในขณะที่หมักโด ซึ่งกรดที่เกิดขึ้นนี้มี ส่วนช่วยให้โดยืดตัวได้เช่นกัน หลักจากที่หมักโด ไว้นานช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดจะมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเกือบ สองเท่าตัว เมื่อถึงระยะนี้จำเป็นที่จะต้องทำให้ก้อนโดที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นนี้มีปริมาตรลดลง โดยใช้นิ้วจิ้มลง ไปในก้อนโดที่หมักขึ้นแล้วนั้นหลายๆครั้ง หรืออาจนำโดที่ขึ้นนั้นไปผสมใหม่กับส่วนผสมที่เหลือตามวิธีการ ทำผลิตภัณฑ์แต่ละวิธี (จิตธนา และอรอนงค์, 2541)

8.3 การใช้แป้งข้าวทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์ขนมปัง

ปัจจุบันการบริโภคผลิตภัณฑ์เบเกอรี่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้การนำเข้าข้าวสาลีเพื่อแปรรูปเป็นแป้ง สาลีในการทำผลิตภัณฑ์เบเกอรี่มีปริมาณสูงขึ้น ดังนั้นรัฐบาลจึงให้การสนับสนุนงานวิจัยที่สามารถใช้ ประโยชน์จากแป้งข้าวเพื่อทดแทนแป้งสาลีในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อช่วยลดการนำเข้าข้าวสาลี จากต่างประเทศ เพิ่มมูลค่าข้าวให้สูงขึ้น และได้แนวทางในการพัฒนาแป้งข้าวให้มีคุณสมบัติเหมาะสมใน การทำผลิตภัณฑ์มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ผู้บริโภคจะได้รับประโยชน์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่พัฒนาจาก ข้าวได้รับการยอมรับว่ามีคุณค่าทางโภชนาการที่ดีเพราะข้าวประกอบไปด้วยโปรตีนที่ย่อยง่ายและไม่ ก่อให้เกิดอาการแพ้ มีคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยง่ายและมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวอยู่มากกว่าร้อยละ 70 ซึ่งอุดมไป ด้วยสารยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือสารต้านอนุมูลอิสระ(antioxidant) ที่พบในธรรมชาติ (อรอนงค์, 2547)

ดังนั้นมีงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้แป้งข้าวในการผลิตเบเกอรี่หลายชนิด โดยมีทั้งการใช้แป้ง ข้าวทดแทนแป้งสาลีบางส่วน และการใช้แป้งข้าวทั้งหมดแทนที่แป้งสาลีในสูตรการผลิตผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ต่าง ๆ เช่น ขนมปัง เค้ก คุกกี้ เป็นต้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เปรมฤทัย (2542) ได้ศึกษาผลของพันธุ์และระยะเวลาการเก็บเกี่ยวกับข้าวที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ ข้าวเม่า ข้าวที่ศึกษามี 5 พันธุ์ คือ พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 กข 15 กข 6 กข 8 และสันป่าตอง ทำการเก็บ เกี่ยวแต่ละพันธุ์ 3 ระยะ คือ หลังดอกข้าวติดเมล็ด 15 20 และ 25 วัน หลังจากนั้นนำข้าวไปคั่วที่ อุณหภูมิ 90-100°ซ เป็นเวลา 45 นาที ทิ้งไว้ 1 คืน นำไปสีเพื่อแยกเอาเปลือกออก แล้วนำไปคั่วที่ อุณหภูมิ 53-69°ซ เป็นเวลา 3 นาที รีดให้แบนมีความหนา 0.6 มิลลิเมตร นำไปทำให้แห้งแล้วนำไปคั่ว หรือทอดให้พองเพื่อศึกษาอัตราส่วนการพองตัว พบว่าวิธีทอดจะให้การพองตัวที่สูงกว่าวิธีคั่วอุณหภูมิที่

เหมาะสมในการทอดคือ 190°ซ สำหรับพันธุ์ข้าวพบว่าข้าวทั้ง 5 พันธุ์สามารถนำมาทำผลิตภัณฑ์ได้ ซึ่งข้าวแต่ละพันธุ์จะให้ลักษณะเนื้อสัมผัสและรสชาติที่แตกต่างกัน สำหรับระยะเวลาที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวข้าว พบว่า พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 คือ 15 วัน และ กข 15 คือ 25 วัน ส่วนข้าวเหนียว คือ พันธุ์ กข 6 กข 8 และสันป่าตอง สามารถทำการเก็บเกี่ยวเพื่อนำมาทำผลิตภัณฑ์ได้ทั้ง 3 ระยะ หลังจากนั้นนำข้าวเม่าทั้งหมดมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้แก่ ข้าวเม่าคลุก ข้าวเม่าทอดกลิ้งกึ่งและกลิ้งปลาหมึก อาหารว่างแบบแท่ง ข้าวเม่าเคลือบน้ำตาลกลิ้งวานิลาและกลิ้งช็อคโกแลต อาหารเข้รผสมไม้ม้วน และข้าวเม่าหมี พบว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหมดผู้บริโภคให้การยอมรับ ยกเว้นข้าวเม่าคลุกผู้ชิมไม่ยอมรับเนื่องจากมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่นุ่มมากจนและ ส่วนทางด้านคุณค่าทางโภชนาการ พบว่า ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่มีไขมันและคาร์โบไฮเดรตสูง สำหรับสูงอายุการเก็บของข้าวเม่าที่บรรจุไว้ในถุงโพลีโพรพิลีน และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า สามารถเก็บไว้ได้นานเป็นระยะเวลา 1 ปี โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง

Lin Pei-Yin (2011) ได้ศึกษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในข้าวที่กำลังเจริญเติบโต 2 สายพันธุ์ คือ KFSW (ข้าวเหนียวสีแดง) และ TK16 (ข้าวเจ้าปอนิก้า) พบว่า ปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมดและฟลาโวนอยด์ ในข้าวอ่อนทั้ง 2 สายพันธุ์มีค่าสูงกว่าข้าวที่แก่เต็มที่แล้วอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ข้าวอ่อนที่กำลังเจริญเติบโตและข้าวที่เติบโตเต็มที่ จะอุดมไปด้วยสาร tocopherol, วิตามินE และยังมีปริมาณกรดเพอร์รูลิกที่สูง มีเส้นใยละลายน้ำ และมีสาร oryzanol โดยจะพบในข้าวอ่อนในระยะ 15 และ 18 วัน หลังดอกข้าวติดเมล็ด ซึ่งจะมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้เป็นอาหารโภชนเภสัช

Ji Chen-Ming (2013) ได้ศึกษาองค์ประกอบของสารอาหารที่พบในข้าวของเกาหลี 2 สายพันธุ์ ได้แก่ Chuchungbyeo และ Samkwangbyeo โดยเปรียบเทียบระยะเวลาเก็บเกี่ยว โดยใช้ข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยว 15 และ 25 วัน หลังจากออกดอกซึ่งถือเป็นระยะข้าวอ่อน และใช้ข้าวที่เก็บเกี่ยวในวันที่ 40 หลังจากออกดอก ซึ่งเป็นระยะข้าวแก่เต็มที่ ผลการทดลองพบว่า ปริมาณโปรตีน (7.46-7.92g/100g) และปริมาณน้ำตาลรีดิวซิ่ง (230.85-533.49 mg/100g) ในข้าวอ่อน ซึ่งมีค่าสูงกว่าในข้าวแก่เต็มที่อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสและโปตัสเซียมพบมากในข้าวอ่อนที่กำลังเจริญทั้ง 2 สายพันธุ์ ส่วนปริมาณวิตามินซีและ provitaminA (เบตาแคโรทีน) พบเฉพาะในข้าวอ่อนทั้ง 2 สายพันธุ์ นอกจากนี้ในข้าวอ่อนยังมีปริมาณ vitaminB2, B3 และ B6 ในปริมาณเมื่อเปรียบเทียบกับในข้าวแก่เต็มที่ และปริมาณ Tocochromanols ในข้าวอ่อนยังมีปริมาณสูงกว่าในข้าวแก่เต็มที่

พรวิñas (2544) ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวหอมมะลิ มีจุดมุ่งหมายเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับปลายข้าวหอมมะลิและเป็นการลดปริมาณการใช้แป้งสาลีซึ่งต้องนำเข้าข้าวสาลีจากต่างประเทศ จากการสำรวจพฤติกรรมและความต้องการของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ขนมปังจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวหอมมะลิ สำหรับบริโภคต่างข้าว พบว่าผู้บริโภคต้องการบริโภคขนมปังกับหมู่กระเทียมพริกไทย พะแนง และแกงเขียวหวาน ตามลำดับ จากการพัฒนาสูตรโดยศึกษาปริมาณแป้งข้าวหอมมะลิ เพิ่มขึ้น ขนมปังจะมี ปริมาตรจำเพาะลดลงและมีค่าความแข็งของเนื้อในสูตรเพิ่มขึ้น สูตรที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ประกอบด้วย แป้งสาลีชนิดทำขนมปังร้อยละ 32.83 แป้งข้าวหอมมะลิร้อยละ 14.07 หางนมผงร้อยละ 1.88 ยีสต์แห้งชนิดผงร้อยละ 0.59 น้ำตาลทรายร้อยละ 8.44 เกลือป่นร้อยละ 0.47 ไข่ไก่ร้อยละ 4.69 น้ำร้อยละ 26.72 โปรตีนร้อยละ 8.31 ไขมันร้อยละ 11.21 เถ้าร้อยละ 0.88 เยื่อใยร้อยละ 0.42 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 49.46 มีค่าความแข็งของเนื้อในขนมปัง 6.92 นิวตัน ปริมาตรจำเพาะ 3.30 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ค่า water activity 0.92 เนื้อในของขนมปังมีสีขาว มีค่าสีในระบบ $L^*a^*b^*$ เป็น 85.7,-1.8 และ 16.7 ตามลำดับ และมีจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด ยีสต์และราน้อยกว่า 100 CFU/g จากการศึกษาแบบอภิปรายกลุ่มเพื่อหาอาหารไทยที่จะมาบริโภคพร้อมกับขนมปังจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวหอมมะลิ พบว่าผู้บริโภคต้องการให้บริโภคขนมปังร่วมกับพะแนง จากการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค พบว่าผู้บริโภคชอบผลิตภัณฑ์ขนมปังในระดับชอบปานกลาง และชอบผลิตภัณฑ์ขนมปังที่บริโภคพร้อมกับพะแนงในรับความชอบเล็กน้อยถึงชอบปานกลาง ผลิตภัณฑ์ขนมปังจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวหอมมะลิ สามารถเก็บรักษาอุณหภูมิห้องได้ 3 วัน ส่วนแป้งผสมสำเร็จรูปจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวหอมมะลิ สำหรับทำขนมปังสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้นาน 6 เดือน

เนื่อทอง และ คณะ (2544) พัฒนาขนมปังเสริมแป้งข้าว โดยการใส่แป้งข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ แป้งข้าวขาวดอกมะลิ แป้งข้าวที่จำหน่ายตามท้องตลาดและแป้งข้าวเหลือง 11 โดยทดแทนแป้งสาลีที่ระดับร้อยละ 10-90 และเสริมสารยัดเกาะ 3 ชนิด คือ กลูเตนผง (spray dried gluten) สารปรับปรุงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังที่ได้ คือ ระหว่างร้อยละ 65-80 ของน้ำหนักแป้ง สำหรับเวลาที่ใช้ในการนวดผสมโดแป้งข้าวจะนานกว่าแป้งสาลี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับการทดแทนที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากปริมาณทรูเตนและคุณภาพของกลูเตนที่ลดลง ชนิดของแป้งที่เหมาะสม คือ แป้งข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างสูงได้แก่ แป้งพันธุ์เหลือง 11 และแป้งข้าวที่ขายตามท้องตลาด สำหรับสารยัดเกาะที่เหมาะสมคือ กลูเตนผงผสมกับสารปรับปรุงคุณภาพกลูเตน หรือกลูเตนผงผสมกับ CMC ทำให้ลักษณะขนมปังที่ได้มีปริมาตร และความสม่ำเสมอในการอบใกล้เคียงกัน แต่จะพบ

ลักษณะแตกง่ายเป็นชิ้นและมีคะแนนการยอมรับด้านเซลล์ขนมปัง เนื้อสัมผัส กลิ่น และรสชาติลดลงตาม ปริมาณการทดแทนที่สูงขึ้น

ภานุมาศ (2541) ศึกษาการใช้แป้งข้าวเจ้าไม่เปียกที่มีอะไมโลสร้อยละ 24.6 ร่วมกับแป้งข้าวเจ้าพรีเจลาติไนซ์เพื่อผลิตขนมปัง และทำการเสริมโปรตีนโดยใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดร่วมกับโปรตีนข้าวเจ้า พบว่า สามารถใช้แป้งข้าวเจ้าพรีเจลาติไนซ์ทดแทนแป้งข้าวเจ้าในสูตรได้ร้อยละ 20 ใช้น้ำร้อยละ 100 ของน้ำหนักแป้ง และเติมสาร hydrocolloids methylcellulose ร้อยละ 2 ขนมปังที่ได้มีปริมาณจำเพาะ 3.25 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีเนื้อในนุ่มเหนียว แน่นเล็กน้อย มีกลิ่นสาบ ผิวบนไม่แตก และเมื่อเก็บไว้มากกว่า 1 วัน เนื้อในและเปลือกจะแห้งร่วน เมื่อเสริมโปรตีนในขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า พบว่า การใช้โปรตีนถั่วเหลืองสกัดร้อยละ 5 ร่วมกับโปรตีนข้าวเจ้าร้อยละ 10 แทนที่แป้งข้าวเจ้าผสม เป็นระดับที่เหมาะสม โดยใช้น้ำร้อยละ 110 ของน้ำหนักแป้ง ขนมปังที่ได้มีเนื้อเหนียวนุ่ม เปลือกแห้งร่วน ไม่มีกลิ่นสาบ ได้ก่อนขนมปังที่สมบูรณ์ไม่มีรอยแตก

Noomhorm และคณะ (1994) ศึกษาการใช้แป้งข้าวเจ้าพันธุ์ต่าง ๆ เพื่อทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการผลิตแป้งขนมปัง โดยใช้แป้งข้าวเจ้าพันธุ์ กข 21, กข 23 และเหลืองประทิว แปรปริมาณแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ทดแทนแป้งสาลีในสูตรเป็น 4 ระดับ คือร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 น้ำหนักแป้ง ผลการทดลองพบว่า พันธุ์และปริมาณของแป้งข้าวเจ้าที่ทดแทนลงไปนสูตรจะส่งผลต่อน้ำหนัก ปริมาตรจำเพาะ และความชอบโดยรวมของผู้บริโภคที่มีต่อตัวอย่างขนมปังที่ผลิตได้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนมปังสูตรควบคุม (แป้งสาลีล้วน) กับขนมปังที่ใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งสาลีในระดับต่าง ๆ พบว่า ผู้บริโภคให้การยอมรับขนมปังที่ใช้แป้งข้าวเจ้าพันธุ์ กข 21 ซึ่งมีปริมาณอะไมโลสและอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันต่ำ โดยสามารถใช้ทดแทนแป้งสาลีได้ในระดับร้อยละ 15 ของน้ำหนักแป้ง ส่วนแป้งจากข้าวพันธุ์ กข 23 และเหลืองประทิวที่มีปริมาณอะไมโลส อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน และค่า setback viscosity สูงจะทำให้ได้ขนมปังที่มีปริมาณต่ำ

อิทธิพัทธ์ และคณะ (2551) ได้ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของส่วนผสมผลิตภัณฑ์พุดดิ้งเค้กข้าวหอมมะลิ โดยการจัดการทดลองแบบผสม (Mixture design) ศึกษา 3 ปัจจัย คือ แป้งข้าวหอมมะลิ (30-40%) ไข่ไก่ (15-30%) นมข้นจืด (30-65%) ท การวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติและสร้างสมการถดถอย quadratic canonical polynomial แบบ Scheffe วิเคราะห์ผลพื้นผิวตอบสนอง (Mixture Response Surface) ผลจากการทดลอง พบว่า ปัจจัยทั้ง 3 มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า

คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ สีเนื้อเค้ก ความนุ่ม ความชุ่มชื้น รสชาติ ความชอบรวม คุณภาพทางเนื้อสัมผัส ได้แก่ความแข็ง ความสามารถในการเกาะรวมตัวกัน ความยากง่ายในการเคี้ยว และค่าปริมาตรจำเพาะ โดยแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สูตรที่เหมาะสมพิจารณาจากการซ้อนทับของกราฟคอนทัวร์ (contour plot) ของคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส พบว่า สูตรที่เหมาะสม คือ แป้งข้าวหอมมะลิร้อยละ 30-33 ไข่ร้อยละ 15-25 และนมข้นจืดร้อยละ 45-55 พุดดิ้งเค้กข้าวหอมมะลิที่ได้มีค่าความแข็งที่เกิดจากแรงกด เท่ากับ 2.0-4.0 นิวตัน ความสามารถในการเกาะตัว เท่ากับ 0.34-0.40 ค่าความยืดหยุ่น เท่ากับ 7.2-7.5 มิลลิเมตร ความยากง่ายในการเคี้ยว เท่ากับ 0.85-1.60 นิวตันเมตร และปริมาตรจำเพาะอยู่ในช่วง 0.48-0.50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

อุทัยวรรณ และ สุนทรี (2553) ศึกษาผลของการใช้แป้งข้าวสาลีทดแทนแป้งสาลีที่ระดับร้อยละ 50-100 ต่อคุณภาพด้านต่างๆ ของบัตเตอร์เค้ก ผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มระดับการทดแทนด้วยแป้งข้าวสาลีจะทำให้ส่วนผสมเค้กมีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละความคงตัวของอิมัลชันลดลง ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาตร และความชื้นลดลง แต่มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) จากการวิเคราะห์เค้าโครงลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis) ด้วยเครื่อง Texture analyzer พบว่าบัตเตอร์เค้กที่ระดับการทดแทน ร้อยละ 50-80 มีค่าความแน่นเนื้อ ความเหนียวคล้ายยาง และความยากในการเคี้ยวต่ำกว่าสูตรควบคุมที่ใช้แป้งสาลีล้วน แต่เมื่อเพิ่มระดับการทดแทนอยู่ละ 90-100 บัตเตอร์เค้กที่ได้จะมีค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับสูตรควบคุม ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค กลุ่มเป้าหมายจำนวน 100 คนพบว่าบัตเตอร์เค้กแป้งข้าวสาลีที่ทุกระดับการทดแทนมีคะแนนการยอมรับด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมน้อยกว่าสูตรควบคุม ($p < 0.05$) โดยระดับการทดแทนสูงสุดที่ผลิตภัณฑ์ยังคงได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคคือร้อยละ 70

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุุดิบ

- 1.1 ข้าวเหนียว กข6 และข้าวหอมมะลิ ระยะการเก็บเกี่ยว 4 ระยะ คือ ระยะเฝ้า ระยะฮาง ระยะปล้ำปล้าง และระยะข้าวแก่ (จาก จ.นครพนม)
- 1.2 แป้งสาลี ชนิดทำขนมปัง (ยี่ห้อหงส์ขาว, บริษัทยูไนเต็ดฟลาวมิลล์ จำกัด)
- 1.3 ยีสต์ (ยี่ห้อ fermipan, ผลิตจากประเทศเวียดนาม)
- 1.4 น้ำตาลทราย (บริษัท น้ำตาลมิตรผล จำกัด)
- 1.5 นมผง (ร้านสอนทำไอศกรีม Miss Ice cream)
- 1.6 สารเสริมคุณภาพ (ยี่ห้อ ยู99, บริษัทยูไนเต็ดฟลาวมิลล์ จำกัด)
- 1.7 เนยสดเค็ม (ยี่ห้อ orchid)
- 1.8 เกลือ (ยี่ห้อ ประจักษ์)

2. สารเคมี

2.1 การวิเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (DPPH)

- 2.1.1 ดีพีพีเอช DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl radical, assay 90%) (Sigma Chemical Co.)
- 2.1.2 เอทานอล (Ethanol) AR grade (QRëC, New Zealand)
- 2.1.3 โฟลินซีโอแคลทู (Folin - Ciocalteu' phenol reagent) (Fluka, USA)
- 2.1.4 โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) (Na_2CO_3) (Fluka Chemical)
- 2.1.5 กรดแกลลิก (gallic acid) (Fluka Chemical)
- 2.1.6 โทรลอกซ์ (Trolox) (Sigma Chemical Co.)

2.2 การวิเคราะห์โปรตีน

- 2.2.1 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) 98% Analytical grade, RCI Labscan, ประเทศไทย
- 2.2.2 กรดบอริก (Boric acid) (Analytical grade, Ajax Finechem, Australia)
- 2.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) Analytical grade, RCI Labscan, ประเทศไทย
- 2.2.4 คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper(II)sulfate pentahydrate) Analytical grade, QRëC, New Zealand
- 2.2.5 โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulfate) Technical grade, Carlo Erba Reagents, Italy
- 2.2.6 โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) Analytical grade, Ajax Finechem, Australia
- 2.2.7 โบโรมครีซอลกรีน (Bromocresol green) Analytical grade, Ajax Finechem, Australia
- 2.2.8 เมทิลเรด (Methyl red) Analytical grade, Panreac, Spain

2.3 การวิเคราะห์ไขมัน (Crude fat)

- 2.3.1 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether) Analytical grade, J.T.Baker, USA.

2.4 การวิเคราะห์เส้นใยหยาบ (Crude fiber)

- 2.4.1 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) 98% Analytical grade, RCI Labscan, ประเทศไทย
- 2.4.2 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) Analytical grade, Merck, Germany
- 2.4.3 อะซิโตน (Acetone) Analytical grade, RCI Labscan, ประเทศไทย

3. อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพ

3.1.1 เครื่องวัดค่าสี (Handy Colorimeter, NR3000/Nippon denshoku/Japan)

3.1.2 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield, RV Spindle set, Brookfield Engineering Labs.Inc., USA)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

3.2.1 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven, Memmert 40, Germany)

3.2.2 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์โปรตีน BÜCHI Digestion Unit K-435 (BÜCHI Labortechnik AG, Switzerland)

3.2.3 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์ไขมัน (Soxtec 2050 Auto extraction unit, Switzerland)

3.2.4 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์เส้นใย (Crude fiber) (Fibertec™ System M2, Switzerland)

3.2.5 เตาเผา (Muffle furnace, Tactical 308, Gallenkamp, UK)

3.2.6 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer, Genesys 10S UV-Vis Spectrophotometer, Thermo Scientific, USA)

3.2.7 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge, Z 206 A, Hermle Labortechnik, Germany)

3.2.8 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, WB 22, Memmert GmbH+Co.KG., Germany)

3.2.9 เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer, RCT Basic, IKA® WERKE, Malaysia)

3.2.10 เครื่องชั่ง ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (รุ่น Percisa 240A, Switzerland)

3.2.11 เครื่องวัดกรด-ด่าง (pH meter, รุ่น 860033 ยี่ห้อ spher Scientific, USA)

3.2.12 เครื่องเขย่าผสมสาร (Vortex mixer, VX100, Labnet International, Inc., USA)

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตขนมปัง

3.3.1 เครื่องผสม ยี่ห้อม Kitchen Aid รุ่น 5K 566 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.2 เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง (GT4100, Ohaus, USA)

3.3.3 เตารอบ ยี่ห้อม Elextrolux ประเทศไทย

3.3.4 ภาชนะและอุปกรณ์เครื่องครัว

3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

3.4.1 อุปกรณ์สำหรับการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

4. วิธีการทดลอง

1. การศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

1.1 การปลูกข้าวและการเก็บเกี่ยวที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

การศึกษามูลของระยะเวลาการเก็บเกี่ยวต่อปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และองค์ประกอบทางเคมี โดยทำการปลูกข้าวในฤดูทำนาปี ในปีพ.ศ. 2559 ได้ปลูกข้าว 2 สายพันธุ์ คือข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 และทำการเก็บเกี่ยวข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเม่า ระยะฮาง ระยะพลับพลึง และระยะข้าวแก่ โดยมีระยะเวลาการเก็บเกี่ยวดังตารางที่ 3.1 เมื่อเกี่ยวข้าวเสร็จนำมาแยกเมล็ดข้าวออกจากรวง หลังจากนั้นนำไปแยกเปลือกออก จากนั้นนำข้าวที่เก็บเกี่ยวได้ไปศึกษาต่อไป

ตารางที่ 3.1 วันที่ปลูกข้าวและเก็บเกี่ยวข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน ของข้าวเหนียว กข6 และ ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ระยะเวลา	ข้าวเหนียว กข6	ข้าวขาวดอกมะลิ 105
วันที่หว่านข้าว	26 พค.59	24 พค.59
วันที่ข้าวออกรวง	20 ตค.59	18 ตค.59
วันที่เกี่ยวข้าวระยะเม่า	29 ตค.59 (9 วัน หลังจากข้าวออกรวง)	28ตค.59 (10 วัน หลังจากข้าวออกรวง)
วันที่เกี่ยวข้าวระยะฮาง	2 พย.59 (13 วัน หลังจากข้าวออกรวง)	1 พย.59 (14 วัน หลังจากข้าวออกรวง)
วันที่เกี่ยวข้าวระยะปลับปลิง	6 พย.59 (17 วัน หลังจากข้าวออกรวง)	6 พย.59 (19 วัน หลังจากข้าวออกรวง)
วันที่เกี่ยวข้าวระยะแก่	15 พย. 59 (26 วัน หลังจากข้าวออกรวง)	15 พย. 59 (28 วัน หลังจากข้าวออกรวง)

1.2 การศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

1.2.1 การสกัดตัวอย่างข้าว

นำข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเม่า ระยะฮาง ระยะปลับปลิง และระยะข้าวแก่ มาบดด้วยเครื่องปั่นของแห้ง (blender) ให้ละเอียด ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 60 เมช (mesh) จากนั้นนำมาสกัดด้วยสารละลาย เอทานอล ร้อยละ 50 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างข้าว ต่อตัวทำละลายเป็น 1: 3 โดยใช้ข้าวที่บดแล้ว 300 กรัม เติมเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 50 ปริมาณ 900 มิลลิลิตร ตั้งสกัดที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นทำการกรอง นำสารสกัดที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ (rotary

evaporator) จะได้สารสกัดหยาบของข้าวที่มีลักษณะขุ่นหนืด เก็บไว้ในขวดสีชาแล้วเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ต่อไป

1.2.2 การศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าว

1.2.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (total phenolic content)

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดหยาบจากข้าวสายพันธุ์ต่าง ๆ ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu assay (ดัดแปลงจากวิธีของ Maizura et al., 2011) โดยเตรียมความเข้มข้นของสารสกัด 1 mg/mL จากนั้นปิเปตต์สารสกัดมา 25 μL แล้วเติม Folin-Ciocalteu reagent ปริมาตร 125 μL ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 นาที นำมาเติม Na_2CO_3 (5%w/w) ปริมาตร 100 μL ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm ด้วยเครื่องไมโครเพลทรีดเดอร์ (Microplate reader) ทำการทดลอง 3 ครั้ง (triplicate) เทียบกับสารมาตรฐาน โดยใช้สาร gallic acid (ความเข้มข้น 0.05-0.1 mg/mL) เป็นสารมาตรฐาน และนำค่าที่ได้มาคำนวณปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดจากสมการของกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิก แสดงปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในสารสกัดในรูปแบบมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อสารสกัด 1 กรัม (gallic acid equivalents, GAE/g extract)

1.2.2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (total flavonoid content)

การวิเคราะห์หาปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมดในสารสกัดหยาบจากข้าว ด้วยวิธี aluminium chloridemethod (ดัดแปลงตามวิธีของ Meda et al., 2005) เติมน้ำละลายอะลูมิเนียมคลอไรด์ (AlCl_3) เข้มข้น 2% (w/v) ปริมาตร 100 μL ผสมกับสารสกัด (ความเข้มข้น 1.0 mg/mL) ปริมาตร 100 μL ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 415 nm ด้วยเครื่องไมโครเพลทรีดเดอร์ (Microplate reader) ทำการทดลอง 3 ครั้ง (triplicate) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ คำนวณปริมาณฟลาโวนอยด์จากสมการของกราฟมาตรฐานของเคอร์เซติน (quercetin) (ความเข้มข้น 0.05-0.1 mg/mL) คำนวณในรูปแบบมิลลิกรัมสมมูลของเคอร์เซตินต่อสารสกัด 1 กรัม (quercetin equivalents, QE/g extract)

1.2.2.3 การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ (free radical scavenging activity)

การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดจากข้าว ทดสอบด้วยวิธี DPPH assay (ดัดแปลงจากวิธีของ Itsarasook *et al.*, 2017) โดยเตรียมสารสกัดจากข้าวให้มีความเข้มข้น 0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.5, 5, 10 และ 20 mg/ml โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย จากนั้นนำสารละลายสารสกัดที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 75 μL ผสมกับสารละลาย 0.2 mM DPPH ปริมาตร 150 μL เขย่าให้เข้ากันและตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 515 nm ด้วยเครื่องไมโครเพลทรีดเดอร์ (Microplate reader) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่า Free radical scavenging activity (%) โดยใช้วิตามินซี(L-ascorbic acid) เป็นสารมาตรฐาน ทำการทดลอง 3 ครั้ง (triplicate)

$$\text{Free radical scavenging activity (\%)} = [(A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}) / A_{\text{control}}] \times 100$$

เมื่อ A_{sample} คือค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ของสารผสมระหว่างสารละลาย DPPH กับสารสกัด และ A_{control} คือค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ของสารละลาย DPPH

จากนั้นคำนวณหาค่าการกำจัดอนุมูลอิสระได้ร้อยละ 50 (half maximal effective concentration, EC_{50}) โดยใช้โปรแกรม Graph Pad Prism Graph Pad Software ประเทศสหรัฐอเมริกา)

1.2.3 การศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

นำข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเม่า ระยะฮาง ระยะปลับปลิง และระยะข้าวแก่ มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีได้แก่

1.2.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000) (ภาคผนวก ก)

1.2.3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนหรือโปรตีนวิธีเจลดาลท์ (Total nitrogen and crude protein, Kjeldahl method) (AOAC, 2000) (ภาคผนวก ก)

1.2.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยวิธีชอกห์เลท (Extractable lipid, Soxhlet method) (AOAC, 2000) (ภาคผนวก ก)

1.2.3.4 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (Dry ashing) (AOAC. 2000) (ภาคผนวก ก)

1.2.3.5 การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ (AOAC. 2000) (ภาคผนวก ก)

1.2.3.6 ปริมาณคาร์โบไฮเดรต (% คาร์โบไฮเดรต = 100 - (% ความชื้น + % โปรตีน + % ไขมัน + % เส้นใยหยาบ + % เถ้า))

จากนั้นนำข้าวระยะการเก็บเกี่ยวต่าง ๆ ไปใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป

2. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว

ทำการคัดเลือกข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์ คือข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวสายพันธุ์ละ 2 ระยะ มาทำการทดลองการพัฒนาการผลิตขนมปังทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว

2.1 การเตรียมแป้งข้าว

การเตรียมแป้งข้าว โดยนำข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่คัดเลือกจากข้าวทั้ง 2 สายพันธุ์อบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 จากนั้นนำมาบดด้วยเครื่อง Pin Mill แล้วจึงนำแป้งที่ได้มาร่อนด้วยเครื่องร่อน ที่มีความละเอียด 100 เมช จากนั้นนำไปบรรจุในถุงพลาสติกชนิด Polyethylene (PE) ปิดผนึกและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการศึกษาต่อไป

2.2 ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว

ทำการผลิตขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระยะเม่า และระยะแก่ โดยใช้สูตรพื้นฐานในการทำขนมปังที่ดัดแปลงจาก ซีรเมศ ไหลครบุรี (2560) ศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 20 และ 40 ส่วนผสมในการทำขนมปังแสดงดังในตารางที่ 3.2 และวิธีการทำขนมปังแสดงดังภาพที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมในการทำขนมปังสูตรต่าง ๆ

ส่วนผสม (กรัม)	ขนมปัง		
	สูตรควบคุม	สูตรทดแทนแป้งสาลี ด้วยแป้งข้าวร้อยละ 20	สูตรทดแทนแป้งสาลี ด้วยแป้งข้าวร้อยละ 40
แป้งสาลีชนิดทำขนมปัง	400	320	240
แป้งข้าว	-	80	160
ยีสต์แห้งชนิดผง	8	8	8
สารเสริมคุณภาพ	4	4	4
นมผง	20	20	20
น้ำตาลทราย	60	60	60
เกลือป่น	4.8	4.8	4.8
ไข่ไก่	40	40	40
น้ำ	224	224	224
เนยสด	60	60	60

ผสมแป้ง นมผง น้ำตาลทราย เกลือป่น และยีสต์เข้าด้วยกัน



ผสมไข่ไก่และน้ำ เข้าด้วยกัน



เทของเหลวในแป้ง ผสมให้เข้ากัน โดยใช้เครื่องผสม ระดับความเร็วต่ำ



เติมเนยสด



ผสมต่อโดยใช้ความเร็วปานกลาง จนได้โดที่เรียบเนียน ใช้เวลา 30 นาที



หมักโดจนขึ้นฟูเป็น 2 เท่า ใช้เวลาประมาณ 60 นาที ในตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส



ตัดแบ่งโดเป็นก้อนๆละ 100 กรัม



คลึงให้เป็นก้อนกลม พักโดไว้ 20 นาที



รีดโด และม้วนให้เป็นก้อน จัดวางในพิมพ์ที่ทาเนย



พักโด จนขึ้นฟูเกือบเต็มพิมพ์ ใช้เวลาประมาณ 60 นาที



อบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20-25 นาที



นำขนมปังออกจากถาด ทิ้งไว้ให้เย็นในตะแกรงพัก



ขนมปัง

ภาพที่ 3.1 กรรมวิธีการผลิตขนมปัง

ที่มา: ดัดแปลงจากผาณิต (2539)

2.3 การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปัง

นำขนมปัง มาวิเคราะห์คุณภาพด้านต่าง ๆ ดังนี้

2.3.1 คุณภาพทางกายภาพ

2.3.1.1 ค่าความแข็ง (Hardness) ของเนื้อในขนมปัง (bread crumb) โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer (ดัดแปลงจากวิธีของ ภัทร์ภณ, 2552)

2.3.1.2 ปริมาตรจำเพาะโดยวิธี rapeseed displacement โดยใช้เมล็ดงาในการแทนที่ (อ้างอิงวิธีของ ภัทร์ภณ, 2552)

เริ่มจากการหาปริมาตรของขนมปังทั้งก้อน (Loaf) โดยวิธีการแทนที่ด้วย เมล็ดงาขาว โดยการวัดปริมาตรของภาชนะที่จะใช้วัดปริมาตรขนมปัง (ภาชนะเป็นกล่องพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมที่สามารถบรรจุก้อนขนมปังได้ทั้งก้อน) ใส่เมล็ดงาขาวให้เต็มภาชนะและปิดฝิเมล็ดงาด้านบน ให้เรียบ เทเมล็ดงาลงในกระบอกตวงขนาด 1,000 มิลลิลิตร บันทึกค่าเป็นปริมาตรของภาชนะ จากนั้นนำขนมปังทั้งก้อนที่ปักจนเย้นวางลงในกล่องพลาสติกที่ทราบปริมาตร เทเมล็ดงาลงไปให้เต็มและปิดฝิเมล็ดงาด้านบนให้เรียบ เทเมล็ดงาลงในกระบอกตวง บันทึกค่าเป็นปริมาตรของอากาศในภาชนะ คำนวณปริมาตรของขนมปัง ดังสมการ

$$\text{ปริมาตรขนมปัง} = \text{ปริมาตรภาชนะ} - \text{ปริมาตรอากาศในภาชนะ}$$

ปริมาตรจำเพาะของขนมปัง คำนวณในหน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม (cm^3/g) ดังสมการ

$$\text{ปริมาตรจำเพาะของขนมปัง} = \frac{\text{ปริมาตรขนมปัง}}{\text{น้ำหนักขนมปัง}}$$

จากนั้นทำการคัดเลือกขนมปังสูตรที่เหมาะสม และมีความเป็นไปได้ โดยพิจารณาจากคุณภาพทางกายภาพ และจากการสังเกตลักษณะ เพื่อมาทำการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสต่อไป

2.3.2 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยวิธีการให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9 points hedonic scale) ใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝน (untrained panel) จำนวน 50 คน คุณลักษณะที่ทำการทดสอบ คือ ลักษณะปรากฏ สีของเนื้อในขนมปัง กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และความชอบโดยรวม

2.4 การศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในขนมปัง

นำขนมปังสูตรที่ได้รับคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด และขนมปังสูตรควบคุม มาศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ดังนี้

2.4.1 การสกัดตัวอย่างขนมปัง

ทำการสกัดขนมปัง (ดัดแปลงจาก อมรรัตน์, 2561) โดยใช้เอทานอล ร้อยละ 50 ในการสกัด ปริมาณขนมปัง : ตัวทำละลายเป็น 1 : 5 โดยนำขนมปังปริมาณ 10 กรัม ผสมในเอทานอล ร้อยละ 50 ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จากนั้นนำสารสกัดมาเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็วรอบ 5,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที เก็บสารละลายส่วนใส ในขวดแก้วสีชาแล้วเก็บที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระโดยวิธี DPPH scavenging activity assay

2.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content)

นำสารสกัดขนมปังที่เตรียมได้จากข้อ 2.4.1 มาวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด โดยใช้วิธี Folin-Ciocalteu reagent method ดัดแปลงจากวิธีของ Maizura *et al.* (2011) โดยนำสารสกัดตัวอย่างปริมาตร 0.4 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับ 10% Folin ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 4 นาที จากนั้นเติม 5% Na₂CO₃ ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร บ่มไว้ 30 นาที จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของกรดแกลลิกที่ความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 µg/mL รายงานผลเป็นปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อตัวอย่าง 100 กรัมตัวอย่าง) หรือ (mg Gallic acid equivalents (GAE)/100g sample)

2.4.3 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี DPPH

โดยนำสารสกัดขมปังที่เตรียมได้จากข้อ 2.4.1 มาวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดยวิธี DPPH ดัดแปลงจาก Zhang *et al.* (2015) โดยนำสารสกัดขมปัง ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับ DPPH ความเข้มข้น 200 mM ปริมาตร 2 มิลลิลิตร บ่มไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 515 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานของ Trolox ที่ความเข้มข้น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 μM รายงานผลเป็นความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ DPPH (มิลลิโมลสมมูลของ Trolox ต่อตัวอย่าง 100 กรัมตัวอย่าง หรือ mM Trolox equivalents (TE) / 100 g sample)

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทุกการทดลอง วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Designs (CRD) ส่วนการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ใช้แผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) ในทุกการทดลอง เปรียบเทียบ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยวิธี ANOVA (Analysis of Variance) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บทที่ 4

ผลการวิจัย และอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวต่าง ๆ ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยนำข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเฒ่า ระยะฮาง ระยะพลับพลึง และระยะข้าวแก่ ของข้าวเหนียวและข้าวขาวดอกมะลิ 105 มาศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (EC₅₀) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณสารฟลาโวนอยด์ ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวเหนียวและข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

สายพันธุ์ข้าว	ระยะการเก็บเกี่ยว	ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (EC ₅₀)	ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g extract)	ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (mg QE/g extract)
ข้าวเหนียว กข6	ระยะเฒ่า	1.17± 0.21 ^{cd}	11.66± 1.09 ^c	21.12 ±0.820
	ระยะฮาง	1.79± 0.01 ^b	12.31± 0.16 ^c	12.10 ±1.08
	ระยะพลับพลึง	1.83 ±0.21 ^b	11.30 ±0.48 ^c	15.83 ±1.087
	ระยะแก่	0.49± 0.05 ^e	15.20 ±0.90 ^b	9.57 ±1.250
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	ระยะเฒ่า	2.86± 0.53 ^a	15.03 ±0.85 ^b	4.10 ±0.531
	ระยะฮาง	0.86± 0.02 ^{de}	17.76 ±1.57 ^a	7.07 ±0.230
	ระยะพลับพลึง	0.87± 0.11 ^{de}	16.25 ±0.79 ^{ab}	15.24 ±0.763
	ระยะแก่	1.39± 0.10 ^c	16.61 ±0.64 ^{ab}	5.55 ±0.725

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในแต่ละแถว แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

4.1.1 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g extract)

สารประกอบกลุ่มฟีนอลิกเป็นสารกลุ่มที่สำคัญซึ่งมีสมบัติต้านอนุมูลอิสระ จากการศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g extract) ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเმა ระยะฮาง ระยะปลับปลิง และระยะแก่ พบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ของสารสกัดตัวอย่างข้าวแต่ละพันธุ์ และแต่ละระยะการเก็บเกี่ยวมีปริมาณแตกต่างกัน โดยปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 11.30 -17.76 mg GAE/g extract โดยสารสกัดตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะฮาง มีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด สูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับ 17.76 mg GAE/g extract รองลงมาคือข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ และระยะปลับปลิง คือมีค่าเท่ากับ 16.61 และ 16.25 ตามลำดับ โดยพบว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าในข้าวเหนียว กข6 โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 15.03-17.76 mg GAE/g extract ส่วนข้าวเหนียว กข6 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 11.66 -15.20 mg GAE/g extract โดยสารประกอบฟีนอลิกพบในธรรมชาติมีมากมายหลายชนิด และมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ตั้งแต่กลุ่มที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กรดฟีนอลิก (phenolic acids) ไปจนถึงกลุ่มที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ เช่น ลิกนิน (lignin) กลุ่มใหญ่ที่สุดที่พบคือ สารประกอบพวกฟลาโวนอยด์ (flavonoid) สารประกอบฟีนอลิกที่พบในพืช มักจะรวมอยู่ในโมเลกุลของน้ำตาลในรูปของสารประกอบไกลโคไซด์ (glycoside) (Velioğlu, Y. et.al 1988) นอกจากนี้ โพลีฟีนอลเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญโดยมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรีย ต้านไวรัส ต้านการอักเสบและการแพ้ รวมถึงการมีคุณสมบัติในการสลาย ลิ่มเลือด เป็นสารต้านการก่อมะเร็งและลดความดันโลหิตจากฤทธิ์ขยายหลอดเลือด ซึ่งคุณสมบัติ ดังกล่าวสอดคล้องกับคุณสมบัติของการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (โอภา และคณะ, 2549) ซึ่งการทดลองนี้ได้ค่าที่ไม่ใกล้เคียงกับการทดลองของนวลอนงค์ เสมสังข์ (2558) ที่ศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พบว่ามีปริมาณเท่ากับ 48.70 และ 28.12 mg GAE/g extract ตามลำดับ ค่าที่แตกต่างกันนี้ อาจเนื่องมาจากวิธีการสกัดที่แตกต่างกัน และแหล่งเพาะปลูกของข้าวที่แตกต่างกัน เป็นต้น

4.1.2 ปริมาณฟลาโวนอยด์ทั้งหมด

ฟลาโวนอยด์เป็นสารประกอบในกลุ่มฟีนอลิก ซึ่งมีสมบัติในการต้านออกซิเดชันที่ดี เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของฟลาโวนอยด์สามารถให้อิเล็กตรอน หรือไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระ ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระที่มีความคงตัวมากขึ้น จึงช่วยยับยั้ง หรือชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ จากการศึกษาปริมาณสารฟลาโวนอยด์ทั้งหมด (mg QE/g extract) ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเმა ระยะฮาง ระยะปลับปลึง และระยะแก่ พบว่าปริมาณฟลาโวนอยด์ของสารสกัดตัวอย่างข้าวแต่ละพันธุ์ และแต่ละระยะการเก็บเกี่ยวมีปริมาณแตกต่างกัน โดยข้าวเหนียว กข6 มีค่าอยู่ในช่วง 9.57-21.12 mg QE/g extract ส่วนข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณฟลาโวนอยด์ อยู่ในช่วง 4.10-15.24 mg QE/g extract โดยข้าวเหนียว กข6 ระยะเมามีปริมาณฟลาโวนอยด์สูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือเท่ากับ 21.12 mg QE/g extract ซึ่งการทดลองนี้ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของนวลอนงค์ เสมสังข์ (2558) ที่ศึกษาปริมาณฟลาโวนอยด์ในข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 และข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยพบว่าปริมาณฟลาโวนอยด์ในข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 มีค่าสูงกว่าในข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 โดยมีปริมาณเท่ากับ 19.67 และ 2.94 mg GAE/g extract ตามลำดับ

4.1.3 ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (EC_{50})

จากการศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ของข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเมา ระยะฮาง ระยะปลับปลึง และระยะแก่ โดยวัดค่า EC_{50} ซึ่งหมายถึง ความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถลดปริมาณอนุมูลอิสระ (DPPH) เริ่มต้นลงได้ 50% ของตัวอย่าง ดังนั้นถ้าค่า EC_{50} ของตัวอย่างต่ำแสดงว่าตัวอย่างมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูง จากการทดลองพบว่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดตัวอย่างข้าวแต่ละพันธุ์ และแต่ละระยะการเก็บเกี่ยวมีปริมาณแตกต่างกัน โดยความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของ ข้าวเหนียว กข6 มีค่า EC_{50} อยู่ในช่วง 0.49-1.83 ส่วนสารสกัดตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่า EC_{50} อยู่ในช่วง 0.86-2.86 mg/ml โดยสารสกัดตัวอย่างข้าวเหนียว ระยะแก่ มีค่าความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่า EC_{50} เท่ากับ 0.49 mg/ml รองลงมาคือ สารสกัดตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะฮาง และระยะเมา คือมีค่า EC_{50} เท่ากับ 0.86 และ 0.87 mg/ml ตามลำดับ ซึ่งพบว่าปริมาณฟลาโวนอยด์และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด

ที่เป็นองค์ประกอบในข้าวมีความสอดคล้องกันกับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่วัดได้โดยวิธี DPPH assay โดยข้าวที่มีปริมาณฟลาโวนอยด์และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ที่เป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก จะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงด้วยเช่นกัน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด เป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ทำหน้าที่เป็น free radical terminators (Abdel-Hameed, 2009) ที่โครงสร้างหลักประกอบด้วย aromatic ring ที่ถูกแทนที่ด้วย hydroxyl group ที่สามารถใช้จับกับอนุมูลอิสระผ่านกระบวนการยับยั้งปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว โดยการให้ไฮโดรเจนอะตอมแก่อนุมูลอิสระ (chain breaker) ซึ่งเป็นหลักการของ DPPH assay ดังนั้นเมื่อสารสกัดจากข้าวที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูง ทำให้มีฤทธิ์การต้านหรือสลายอนุมูลอิสระดังกล่าวสูงด้วยเช่นกัน

4.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเหนียวและข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเმა ระยะฮาง ระยะปลับปลิง และระยะข้าวแก่ มาศึกษาปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต เส้นใยหยาบ เถ้า และความชื้น ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

จากการทดลองพบว่าปริมาณโปรตีนของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเმა ระยะฮาง ระยะปลับปลิง และระยะแก่ พบว่า โปรตีนของข้าวแต่ละสายพันธุ์ และแต่ละระยะการเก็บเกี่ยวมีปริมาณแตกต่างกัน โดยปริมาณโปรตีนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 11.77 – 15.28 โดยปริมาณโปรตีนของข้าวเหนียว กข6 ระยะฮาง มีปริมาณโปรตีนสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับร้อยละ 15.28 รองลงมาคือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะฮาง และข้าวเหนียวระยะเมา คือมีค่าเท่ากับ 13.73 และ 13.50 ตามลำดับ ส่วนปริมาณไขมันมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.21-3.16 โดยข้าวเหนียว กข6 จะมีปริมาณไขมันสูงกว่าในข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยข้าวเหนียว กข6 ระยะปลับปลิง มีปริมาณไขมันสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.16 ส่วนปริมาณคาร์โบไฮเดรต พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 68.30 – 70.12 โดยข้าวเหนียวระยะแก่ มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงสุด ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ กับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ คือมีค่าเท่ากับร้อยละ 70.12 และ 70.11 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณคาร์โบไฮเดรตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บเกี่ยวข้าวที่นานขึ้น ส่วนปริมาณเส้นใยหยาบ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.56 – 2.65 โดยข้าวเหนียว ระยะเมา มีปริมาณเส้นใยหยาบสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่า

เท่ากับ 2.65 รองลงมาคือข้าวเหนียว กข6 ระยะพลับพลึง และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะฮาง คือมีค่าเท่ากับ 2.25 และ 2.23 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.93 -1.12 โดยข้าวเหนียว ระยะเมามีปริมาณเถ้าสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับ 1.12 ส่วนปริมาณความชื้น พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 11.5 -13.12 โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะเมามีปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือร้อยละ 13.12 โดยพบว่าความชื้นในข้าวมีปริมาณลดลง เมื่อระยะเวลาการเก็บเกี่ยวนานขึ้น โดยองค์ประกอบทางเคมีของข้าวมีผลมาจากสายพันธุ์ สภาพการปลูก การเก็บเกี่ยว และกระบวนการแปรรูปจากข้าวเปลือกเป็นข้าวกล้องข้าวสาร

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

สายพันธุ์ข้าว	ระยะการเก็บเกี่ยว	โปรตีน	ไขมัน	คาร์โบไฮเดรต	เส้นใยหยาบ	เถ้า	ความชื้น
ข้าวเหนียว กข6	ระยะแม่	13.50±0.10 ^c	2.84± 0.10 ^{ab}	68.30±0.21 ^c	2.65±0.02 ^a	1.12±0.02 ^a	11.59±0.01 ^{de}
	ระยะฮ้าง	15.28±0.05 ^a	2.85±0.10 ^{ab}	67.68±0.08 ^c	1.73±0.03 ^d	1.06±0.02 ^{ab}	11.37±0.05 ^f
	ระยะปลีบล้าง	11.77±0.21 ^e	3.16±0.12 ^a	69.55±0.15 ^{ab}	2.25±0.03 ^b	1.10±0.01 ^{ab}	12.15±0.06 ^b
	ระยะแก่	13.11±0.15 ^d	2.54±0.36 ^{bc}	70.12±0.47 ^a	1.56±0.02 ^e	1.10±0.05 ^{ab}	11.57±0.06 ^e
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	ระยะแม่	11.88±0.06 ^e	2.68±0.26 ^b	69.34±0.24 ^b	1.92±0.05 ^c	1.03±0.01 ^{ab}	13.12±0.04 ^a
	ระยะฮ้าง	13.73±0.01 ^b	2.55±0.39 ^{bc}	69.16±0.58 ^b	2.23±0.20 ^b	0.93±0.07 ^c	11.39±0.09 ^f
	ระยะปลีบล้าง	13.03±0.07 ^d	2.56±0.15 ^{bc}	69.61±0.59 ^{ab}	1.71±0.01 ^d	1.03±0.09 ^{ab}	11.71±0.14 ^{cd}
	ระยะแก่	13.09±0.06 ^d	2.21±0.16 ^c	70.11±0.19 ^a	1.82±0.01 ^{cd}	1.02±0.06 ^b	11.74±0.06 ^c

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.3 ผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าสีของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาเปรียบเทียบค่าสี L, a*, b* ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเฒ่า ระยะฮาง ระยะพลับพลึง และระยะข้าวแก่ แสดงผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าสีของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน

สายพันธุ์ข้าว	ระยะการเก็บเกี่ยว	ค่าสี		
		L	a*	b*
ข้าวเหนียว กข6	ระยะเฒ่า	48.23± 2.51 ^a	1.10± 2.60 ^{bc}	15.96± 1.65 ^{abc}
	ระยะฮาง	49.56± 1.62 ^a	1.46± 1.15 ^{abc}	15.56± 0.35a ^{bcd}
	ระยะพลับพลึง	47.46± 0.70 ^a	2.23± 0.73 ^{ab}	16.96 ±1.01 ^a
	ระยะแก่	47.56± 1.04 ^a	2.33± 0.56 ^a	12.60± 1.12 ^e
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	ระยะเฒ่า	41.46± 0.41 ^b	0.66 ±0.15 ^c	16.63 ±2.55 ^{ab}
	ระยะฮาง	40.76± 0.83 ^b	1.10± 0.10 ^{bc}	13.93± 1.35 ^{cde}
	ระยะพลับพลึง	40.63± 0.15 ^b	1.96± 0.71 ^{ab}	13.20 ±0.55 ^{de}
	ระยะแก่	40.43± 0.91 ^b	1.26 ±0.51 ^{abc}	14.30± 0.17 ^{bcde}

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในแต่ละแถว แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสี L, a* และ b* L ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเฒ่า ระยะฮาง ระยะพลับพลึง และระยะแก่ พบว่าค่าสี L (ความสว่าง) ของข้าวเหนียว กข6 มีค่าสูงกว่าในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในทุกระยะการเก็บเกี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยข้าวเหนียว กข6 มีค่าสี L อยู่ในช่วง 47.56-49.46 ส่วนค่าสี L ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าอยู่ในช่วง 40.43-41.46 ส่วนค่าสี a* (สีแดง-สีเขียว) โดยถ้าค่า a* เป็นบวกเพิ่มมากขึ้น นั่นคือ มีค่าเป็นสีแดงมากที่สุด โดยพบว่า ค่าสี a* มีค่าอยู่ในช่วง 0.66 – 2.33 โดยข้าว

เหนียว กข6 ระยะแก่ มีค่าสี a^* สูงสุดคือ 2.33 ส่วนข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะเฒ่า มีค่าสี a^* ต่ำสุด คือ 0.66 ส่วนค่าสี b^* (สีเหลือง-น้ำเงิน) พบว่า ค่า b^* เป็นค่าของสีเหลือง (ค่าเป็นบวก) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 12.60 -16.96 โดยข้าวเหนียวระยะพลับพลึงมีค่าสี b^* สูงสุด คือ 16.96 ส่วนข้าวเหนียวระยะแก่มีค่าสี b^* ต่ำสุดคือ 12.60

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (EC_{50}) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณสารฟลาโวนอยด์ และองค์ประกอบทางเคมีของข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่ต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเฒ่า ระยะฮาง ระยะพลับพลึง และระยะข้าวแก่ ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่าข้าวแต่ละสายพันธุ์ และแต่ละระยะการเก็บเกี่ยว มีปริมาณแตกต่างกัน แต่ก็ยังถือว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงได้เลือกข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะเฒ่า และระยะแก่ มาศึกษาต่อ เนื่องจากข้าวทั้ง 2 ระยะการเก็บเกี่ยวนี้ มีความแตกต่างกันในระยะเวลาการเก็บเกี่ยวที่ต่างกันมากที่สุด จึงได้เลือกเป็นตัวแทนในการศึกษาในขั้นตอนการทำขนมปังต่อไป

4.4 ผลการศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว

4.4.1 ผลการศึกษาระดับการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวที่เหมาะสม

จากการผลิตขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระยะเฒ่า และระยะแก่ โดยศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 20 และ 40 และทำการวิเคราะห์ค่าคุณภาพทางกายภาพของขนมปังต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาตรจำเพาะ ค่าความแข็ง ได้ผลการทดลองดังนี้

1) ปริมาตรจำเพาะ

จากการทดลองวัดปริมาตรจำเพาะ ของขนมปังที่ใช้แป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระยะเฒ่า และระยะแก่ ทดแทนแป้งสาลีในระดับต่าง ๆ 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 20 และ 40 พบว่า ปริมาตรจำเพาะของขนมปังที่ผลิตได้ จะให้แนวโน้มเดียวกัน คือ ขนมปังสูตรควบคุม จะมีปริมาตรจำเพาะสูงสุด ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับขนมปังสูตรที่ใช้แป้งข้าวชนิดต่าง ๆ ทดแทนแป้งสาลีในระดับต่าง ๆ โดยมีค่าเท่ากับ $4.16 \text{ cm}^3/\text{g}$

(ตารางที่ 4.4) การใช้แป้งข้าวทดแทนแป้งสาลีในอัตราส่วนที่มากขึ้น จะทำให้ค่าปริมาตรจำเพาะของขนมปังที่ผลิตได้มีแนวโน้มลดลง โดยขนมปังที่ใช้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ ร้อยละ 40 มีปริมาตรจำเพาะต่ำสุด คือมีค่าเท่ากับ $2.29 \text{ cm}^3/\text{g}$ เนื่องจากสัดส่วนแป้งข้าวที่เพิ่มขึ้น จะไปลดปริมาณกลูเตนในโดลง ทำให้โดมีการขยายตัวได้น้อยลง เมื่อนำไปอบเป็นขนมปังจึงได้ขนมปังที่ปริมาตรต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แป้งสาลีล้วนในการผลิต นอกจากนี้จากการศึกษา ยังพบว่าขนมปังที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะเฒ่า จะมีปริมาตรจำเพาะสูงกว่าแป้งข้าวใน ระยะแก่ และพบว่าขนมปังจากแป้งข้าวเหนียวจะมีปริมาตรจำเพาะสูงกว่าขนมปังจากแป้งข้าวขาวดอกมะลิ ในปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวที่เท่ากัน โดยปริมาตรจำเพาะในขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเรียงลำดับจากมากไปน้อย ได้ดังนี้ ขนมปังทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว กข6 ระยะเฒ่า ร้อยละ 20, ขนมปังทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว ระยะแก่ ร้อยละ 20, ขนมปังทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวขาวดอกมะลิ ระยะเฒ่า ร้อยละ 20, ขนมปังทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวขาวดอกมะลิ ระยะแก่ ร้อยละ 20 ส่วนในการทดแทนแป้งสาลี ในปริมาณร้อยละ 40 ก็เรียงลำดับในแบบเดียวกัน ซึ่งผลการทดลองนี้ มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของพรวิñas (2544) ที่ทดลองผลิตขนมปังโดยใช้แป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทดแทนแป้งสาลีในระดับร้อยละ 0-40 ผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณการทดแทนของแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 เพิ่มมากขึ้น ปริมาตรจำเพาะจะมีแนวโน้มลดลง และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hsu และคณะ (2004) ที่ทดลองผลิตขนมปังโดยใช้แป้งมันเทศ ทดแทนแป้งสาลีในระดับร้อยละ 0-25 พบว่า การใช้แป้งมันเทศในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังมีแนวโน้มลดลง โดยการทดแทนที่ระดับร้อยละ 10-25 จะทำให้ปริมาตรของขนมปังลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับสูตรควบคุม

ตารางที่ 4.4 ค่าคุณภาพทางกายภาพของขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวชนิดต่าง ๆ และในอัตราส่วนต่าง ๆ

ขนมปัง	ปริมาตรจำเพาะ (cm ³ /g)	ค่าความแข็ง(Hardness) (g)
สูตรควบคุม	4.16 ±0.16 ^a	212.36 ±27.55 ^h
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะเม่า ร้อยละ 20	3.99 ±0.07 ^{ab}	264.77 ±23.23 ^f
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะเม่า ร้อยละ 40	3.29 ±0.42 ^f	452.62 ±12.60 ^d
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะแก่ ร้อยละ 20	3.96 ±0.12 ^{bc}	239.62 ±38.63 ^{fg}
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะแก่ ร้อยละ 40	3.48 ±0.01 ^e	536.51 ±33.06 ^c
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105ระยะเม่า ร้อยละ 20	3.79 ±0.19 ^{cd}	346.85 ±71.05 ^e
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะเม่า ร้อยละ 40	2.53 ±0.08 ^g	614.02 ±21.82 ^b
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ ร้อยละ 20	3.65 ±0.03 ^{de}	438.64 ±10.99 ^d
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105ระยะแก่ ร้อยละ 40	2.29 ±0.12 ^h	804.19 ±45.08 ^a

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในแต่ละแถว แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2) ค่าความแข็ง(Hardness)

ค่าความแข็ง (hardness) หมายถึง ค่าแรงสูงสุดจากกราฟ texture profile analysis ที่เกิดขึ้นในการกดตัวอย่างครั้งที่ 1 ที่ระยะทาง 50 % ของความสูง ค่าความแข็งที่วัดได้มีหน่วยเป็นกรัมแรง จากการทดลองวัดค่าความแข็ง(Hardness) ของขนมปังที่ใช้แป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เก็บเกี่ยวในระยะเม่า และระยะแก่ ทดแทนแป้งสาลีในระดับต่าง ๆ 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 20 และ 40 พบว่า ค่าความแข็งของขนมปังที่ใช้แป้งข้าวชนิดต่าง ๆ ทดแทนแป้งสาลีในระดับต่าง ๆ มีค่ามากกว่าขนมปังสูตรควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขนมปังสูตรควบคุม จะมีค่าความแข็งต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 212.36 กรัมแรง (ตารางที่ 4.4) การใช้แป้งข้าวชนิดต่าง ๆ ทดแทนแป้งสาลีในอัตราส่วนที่มากขึ้น จะทำให้ค่าความแข็ง ของขนมปังที่ผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยขนมปังที่ทดแทนข้าวสาลีด้วยข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ ร้อยละ 40 มีค่าความแข็ง มากที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 804.19 กรัมแรง นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้แป้งข้าวเหนียวทดแทนแป้งสาลี จะทำให้ขนมปังมีค่าความแข็งน้อยกว่าการใช้แป้งข้าวขาวดอกมะลิ โดยค่าความแข็งที่วัดได้ จะมีความสอดคล้องกับปริมาตรจำเพาะของขนมปัง ขนมปังที่มีขนาดเล็ก มีรูพรุนน้อย มีความแข็งมากกว่าขนมปังที่ขึ้นฟูมีปริมาตรมาก ซึ่งการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ มลิวรรณ อุทธะยอด (2557) ที่ศึกษาการใช้แป้งถั่วแดงทดแทนแป้งสาลีต่อคุณภาพของขนมปังแซนด์วิช พบว่าเมื่อปริมาณแป้งถั่วแดงที่ใช้เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 ไปเป็นร้อยละ 35 ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 137.54 กรัมแรง ไปเป็น 1,396.50 กรัมแรง

ดังนั้น จากการพิจารณาปริมาตรจำเพาะ และค่าความแข็ง พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวชนิดต่าง ๆ ที่ระดับร้อยละ 40 จะมีปริมาตรจำเพาะที่ต่ำ และมีค่าความแข็งที่มาก ซึ่งต่างจากขนมปังสูตรควบคุมมาก แต่การทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวชนิดต่าง ๆ ที่ระดับร้อยละ 20 มีปริมาตรจำเพาะ และค่าความแข็ง ใกล้เคียงกับขนมปังสูตรควบคุม ดังนั้นจึงได้คัดเลือกการใช้แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ ในระยะเม่า และระยะแก่ ที่ระดับร้อยละ 20 ไปใช้ศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังต่อไป

4.4.2 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปัง

จากการคัดเลือกขนมปังสูตรที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับขนมปังสูตรควบคุม โดยพิจารณาจากปริมาตรจำเพาะ และค่าความแข็ง มาศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปัง โดยได้คัดเลือกการใช้แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ ในระยะเม่า และระยะแก่ ที่ระดับร้อยละ 20 มาศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปัง โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการฝึกฝน (untrained panel) จำนวน 50 คน คุณลักษณะที่ทำการทดสอบ คือ ลักษณะปรากฏ สีของเนื้อในขนมปัง กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และความชอบโดยรวม ได้ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว
สูตรต่าง ๆ

ขนมปัง	ลักษณะปรากฏ	สี ^{ns}	กลิ่น	รสชาติ	ความนุ่ม	ความชอบโดยรวม
สูตรควบคุม	6.60±1.32 ^b	7.00± 1.24	6.82±1.35 ^{ab}	6.70±1.02 ^{bc}	6.90±0.95 ^b	6.88±0.93 ^c
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะเม่าร้อยละ 20	7.42±1.19 ^a	7.18 ±1.02	7.22±1.16 ^a	7.46±1.28 ^a	7.94±1.07 ^a	7.74±1.00 ^a
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะแก่ ร้อยละ 20	7.22±0.97 ^a	6.94 ±1.33	6.64±1.04 ^b	7.18±1.14 ^{ab}	7.34±1.15 ^b	7.32±0.93 ^b
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105ระยะเม่าร้อยละ 20	6.98±1.31 ^{ab}	7.16± 1.09	6.46±1.32 ^b	6.66±1.25 ^c	6.32±1.20 ^c	6.74±1.04 ^c
สูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105ระยะแก่ ร้อยละ 20	7.08±1.12 ^{ab}	7.44 ±1.14	6.92±1.25 ^{ab}	6.86±1.10 ^{bc}	6.90±1.18 ^b	7.28±1.01 ^b

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns หมายถึง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

จากการทดลอง พบว่า ค่าคะแนนของลักษณะปรากฏของขนมปังมีค่าอยู่ในช่วง 6.60 - 7.42 โดยขนมปังที่ใช้แป้งข้าวชนิดต่าง ๆ ทดแทนแป้งสาลี มีค่าคะแนนสูงกว่าขนมปังสูตรควบคุม ขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว ระยะเม่า ร้อยละ 20 มีค่าคะแนนของลักษณะปรากฏสูงสุด คือ 7.42 ค่าคะแนนของสีของขนมปังสูตรควบคุม และขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวชนิดต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 6.94-7.44 โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ค่าคะแนนด้านกลิ่น มีค่าอยู่ในช่วง 6.46 -7.22 โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) โดยขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว ระยะเม่า ร้อยละ 20 มีค่าคะแนนด้านรสชาติสูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) คือมีค่า 7.22 โดยขนมปังสูตรนี้จะมีกลิ่นหอมอ่อน ๆ ของข้าว ซึ่งจะมีความหอมกว่าขนมปังสูตรควบคุม ส่วนค่าคะแนนด้านรสชาติ มีค่าอยู่ในช่วง 6.66-7.46 โดยขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะเม่า ร้อยละ 20 มีค่าคะแนนด้านรสชาติสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) คือมีค่า 7.46 ส่วนคะแนนด้านความนุ่ม มีค่าอยู่ในช่วง 6.32- 7.94 โดยขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะเม่า ร้อยละ 20 มีค่าคะแนนด้านรสชาติสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) คือมีค่า 7.94 และค่าคะแนนด้านความชอบรวม พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 6.74-7.74 โดยขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะเม่า ร้อยละ 20 มีค่าคะแนนด้านรสชาติสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) คือมีค่า 7.74

4.4.3 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของขนมปัง

จากการใช้แป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระยะเม่า และระยะแก่ มาทดแทนแป้งสาลีในการผลิตขนมปังที่ระดับร้อยละ 20 ได้ศึกษาคุณภาพทางกายภาพของขนมปัง ได้แก่ค่า สี L a* b* ปริมาณความชื้น และค่า Aw (ปริมาณน้ำอิสระ) (ตารางที่ 4.6) ได้ผลการทดลองดังนี้

1) ค่าสี L a* b* ของขนมปัง พบว่า ค่าสี L มีค่าอยู่ในช่วง 60.82-64.75 โดยขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว ระยะเม่า ร้อยละ 20 มีค่า L (ค่าความสว่าง) สูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับ 64.75 ส่วนค่าสี a* (สีแดง-สีเขียว) โดยถ้าค่า a* เป็นบวกเพิ่มมากขึ้น นั่นคือ มีค่าเป็นสีแดงมากที่สุด โดยพบว่า ค่าสี a* มีค่าอยู่ในช่วง 0.50-1.27 โดยขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ ในระดับร้อยละ 20 มีค่า a* สูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับ 1.27 ส่วนค่าสี b* (สีเหลือง-น้ำเงิน) พบว่า ค่า b* เป็นค่าของสีเหลือง (ค่าเป็นบวก) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 9.90-11.10 โดยขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว

เหนียว ระยะเม่า ที่ระดับร้อยละ 20 มีค่า b^* สูงสุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับ 11.10

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพของขนมปังสูตรต่าง ๆ

ขนมปัง	ค่าสี			ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ค่าAw
	L	a*	b*		
สูตรควบคุม	61.95 ± 2.09 ^b	0.60 ± 0.21 ^b	10.27 ± 0.29 ^b	30.14 ± 2.36 ^b	0.89 ± 0.01 ^a
สูตรทดแทนแป้ง สาลีด้วยแป้งข้าว เหนียว ระยะเม่า 20%	64.75 ± 0.70 ^a	0.72 ± 0.15 ^b	11.10 ± 0.60 ^a	32.44 ± 0.38 ^{ab}	0.86 ± 0.01 ^{bc}
สูตรทดแทนแป้ง สาลีด้วยแป้งข้าว เหนียว ระยะแก่ 20%	61.37 ± 0.94 ^b	0.50 ± 0.29 ^b	10.05 ± 0.47 ^b	33.14 ± 0.23 ^a	0.86 ± 0.01 ^c
สูตรทดแทนแป้ง สาลีด้วยแป้งข้าว ขาวดอกมะลิ 105 ระยะเม่า 20%	60.82 ± 1.08 ^b	0.82 ± 0.27 ^b	10.25 ± 0.43 ^b	30.04 ± 1.22 ^b	0.85 ± 0.01 ^c
สูตรทดแทนแป้ง สาลีด้วยแป้งข้าว ขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ 20%	62.60 ± 0.88 ^b	1.27 ± 0.20 ^a	9.90 ± 0.35 ^b	31.55 ± 1.31 ^{ab}	0.87 ± 0.01 ^{ab}

หมายเหตุ ตัวอักษรต่างกันในแนวตั้ง แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2) ปริมาณความชื้น จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในขนมปังสูตรต่าง ๆ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 30.04-33.14 โดยขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว ระยะแก่ ร้อยละ 20 มีค่าสูงสุด โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ 33.14

3) ค่า Aw หรือปริมาณน้ำอิสระ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.85-0.89 โดยขนมปังสูตรควบคุมมีค่า Aw สูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับ 0.89

จากการทดลองประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส สรุปได้ว่า ขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะแก่ ร้อยละ 20 มีค่าคะแนนด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และความชอบโดยรวม สูงสุด ซึ่งสูงกว่าขนมปังสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ดังนั้นจึงนำขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะแก่ ร้อยละ 20 มาศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพต่อไป

4.4.4 ผลการศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของขนมปัง

จากการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะแก่ ร้อยละ 20 มีค่าคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุด ดังนั้นจึงนำขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะแก่ ร้อยละ 20 และขนมปังสูตรควบคุม มาศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ผลการทดลองดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของขนมปัง

สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ	ขนมปังสูตรควบคุม ^{ns}	ขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว ระยะแก่ ร้อยละ 20 ^{ns}
ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/100g sample)	45.79 ± 0.37	45.18 ± 0.19
ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (mM TE/100g sample) DPPH	40.96 ± 1.40	42.15 ± 1.05

จากตารางที่ 4.7 พบว่า ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ในขนมปังสูตรควบคุม และขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว ระยะเฝ้า ร้อยละ 20 มีค่าที่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ วัดโดยวิธี DPPH พบว่า ขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว ระยะเฝ้า ร้อยละ 20 มีค่าสูงกว่าในขนมปังสูตรควบคุม คือมีค่าเท่ากับ 42.15 และ 40.96 mM TE/100g sample ตามลำดับ แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวต่างๆ ของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยนำข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเმა ระยะฮาง ระยะพลับพลึง และระยะข้าวแก่ โดยการศึกษาปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด ปริมาณสารฟลาโวนอยด์ และความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ (EC_{50}) จากการทดลองพบว่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดของสารสกัดตัวอย่าง ข้าวมีค่าอยู่ในช่วง 11.30 -17.76 mg GAE/g extract โดยสารสกัดตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะฮาง มีค่าปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ มีค่าเท่ากับ 17.76 mg GAE/g extract รองลงมาคือข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ และระยะพลับพลึง คือมีค่าเท่ากับ 16.61 และ 16.25 ตามลำดับ โดยพบว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงกว่าในข้าวเหนียว กข6 โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 15.03-17.76 mg GAE/g extract ส่วนข้าวเหนียว กข6 มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ในช่วง 11.66 -15.20 mg GAE/g extract ส่วนการศึกษาปริมาณฟลาโวนอยด์ พบว่าปริมาณฟลาโวนอยด์ ของสารสกัดตัวอย่างข้าวแต่ละพันธุ์ และแต่ละระยะการเก็บเกี่ยวมีปริมาณแตกต่างกัน โดยปริมาณฟลาโวนอยด์ในข้าวเหนียว กข6 มีค่าอยู่ในช่วง 9.57-21.12 mg QE/g extract ส่วนข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณฟลาโวนอยด์ อยู่ในช่วง 4.10-15.24 mg QE/g extract โดยข้าวเหนียว กข6 ระยะเมา มีปริมาณฟลาโวนอยด์สูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ เท่ากับ 21.12 mg QE/g extract ส่วนการศึกษาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่าค่า EC_{50} ของ สารสกัดตัวอย่างข้าวเหนียว กข6 ในแต่ละระยะการเก็บเกี่ยวต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 0.49-1.83 ส่วนสารสกัดตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่า EC_{50} อยู่ในช่วง 0.86-2.86 mg/ml โดยสารสกัดตัวอย่างข้าวเหนียว ระยะแก่ มีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่า EC_{50} เท่ากับ 0.49 mg/ml รองลงมาคือ สารสกัดตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะฮาง และระยะเมา คือมีค่า EC_{50} เท่ากับ 0.86 และ 0.87 mg/ml ตามลำดับ ซึ่งพบว่าสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณฟลาโวนอยด์ที่เป็นองค์ประกอบในข้าวมีความสอดคล้องกันกับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่วัดได้

โดยวิธี DPPH โดยข้าวที่มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและปริมาณฟลาโวนอยด์ ที่เป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก จะมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่สูงด้วยเช่นกัน

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของข้าวเหนียว กข6 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะการเก็บเกี่ยวที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ ระยะเฒ่า ระยะฮาง ระยะปลับปลิง และระยะแก่ พบว่า ปริมาณโปรตีนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 11.77 – 15.28 โดยปริมาณโปรตีนของข้าวเหนียว กข6 ระยะฮาง มีปริมาณโปรตีนสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 15.28 รองลงมาคือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะฮาง และข้าวเหนียวระยะเฒ่า คือมีค่าเท่ากับ 13.73 และ 13.50 ตามลำดับ ส่วนปริมาณไขมันมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 2.21-3.16 โดยข้าวเหนียว กข6 จะมีปริมาณไขมันสูงกว่าในข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยข้าวเหนียว กข6 ระยะปลับปลิง มีปริมาณไขมันสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 3.16 ส่วนปริมาณคาร์โบไฮเดรต พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 68.30 – 70.12 โดยข้าวเหนียว ระยะแก่ มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงสุด ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างทางสถิติ กับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ คือมีค่าเท่ากับร้อยละ 70.12 และ 70.11 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ปริมาณคาร์โบไฮเดรตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาการเก็บเกี่ยวข้าวที่นานขึ้น ส่วนปริมาณเส้นใยหยาบ พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.56 – 2.65 โดยข้าวเหนียว ระยะเฒ่า มีปริมาณเส้นใยหยาบสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือมีค่าเท่ากับ 2.65 รองลงมา คือข้าวเหนียว กข6 ระยะปลับปลิง และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะฮาง คือมีค่าเท่ากับ 2.25 และ 2.23 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ปริมาณเถ้า พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 0.93 -1.12 โดยข้าวเหนียว ระยะเฒ่ามีปริมาณเถ้าสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ มีค่าเท่ากับ 1.12 ส่วนปริมาณความชื้น พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 11.5 -13.12 โดยข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะเฒ่ามีปริมาณความชื้นสูงสุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คือ ร้อยละ 13.12 โดยพบว่าความชื้นในข้าวมีปริมาณลดลง เมื่อระยะเวลาการเก็บเกี่ยวนานขึ้น

จากการวิเคราะห์ปริมาณน้ำของขนมปังที่ใช้แป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระยะเฒ่า และระยะแก่ ทดแทนแป้งสาลีในระดับต่างๆ 3 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 20 และ 40 พบว่า ปริมาณน้ำของขนมปังที่ผลิตได้ จะให้แนวโน้มเดียวกัน คือ ขนมปังสูตรควบคุม จะมีปริมาณน้ำสูงสุด ($4.16 \text{ cm}^3/\text{g}$) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับขนมปังสูตรที่ใช้แป้งข้าวชนิดต่างๆ ทดแทนแป้งสาลีในระดับต่างๆ การใช้แป้งข้าวทดแทนแป้งสาลีในอัตราส่วนที่มากขึ้น จะทำให้ค่าปริมาณน้ำของขนมปังที่ผลิตได้มีแนวโน้มลดลง โดยขนมปังที่ใช้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ ร้อยละ 40 มีปริมาณน้ำต่ำสุด คือมีค่าเท่ากับ $2.29 \text{ cm}^3/\text{g}$ จากการ

ทดลองวัดค่าความแข็ง (Hardness) พบว่า ค่าความแข็งของขนมปังที่ใช้แป้งข้าวชนิดต่างๆ ทดแทนแป้งสาลีในระดับต่างๆ มีค่ามากกว่าขนมปังสูตรควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขนมปังสูตรควบคุม จะมีค่าความแข็งต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 212.36 กรัมแรง การใช้แป้งข้าวชนิดต่างๆทดแทนแป้งสาลีในอัตราส่วนที่มากขึ้น จะทำให้ค่าความแข็ง ของขนมปังที่ผลิตได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยขนมปังที่ทดแทนข้าวสาลีด้วยข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะแก่ ร้อยละ 40 มีค่าความแข็งมากที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 804.19 กรัมแรง

จากการคัดเลือกขนมปังสูตรที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับขนมปังสูตรควบคุม โดยได้คัดเลือกการใช้แป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระยะเმა และระยะแก่ ที่ระดับร้อยละ 20 มาทดแทนแป้งสาลีในการผลิตขนมปัง และได้ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปัง พบว่าขนมปังสูตรทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวระยะเมา ร้อยละ 20 มีค่าคะแนนด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และความชอบโดยรวม สูงสุด ซึ่งสูงกว่าขนมปังสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งเป็นการช่วยปรับปรุงคุณภาพของขนมปังให้ดีขึ้น

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

สามารถนำแป้งข้าวเหนียว กข6 และแป้งข้าวขาวดอกมะลิ 105 ระยะการเก็บเกี่ยวต่างๆ มาใช้ทดแทนแป้งสาลีบางส่วน ในการผลิตขนมปัง โดยเฉพาะการใช้แป้งข้าวเหนียว กข6 ระยะเมา โดยใช้ระดับการทดแทนที่ร้อยละ 20 จะได้ขนมปังที่มีคะแนนคุณภาพทางด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และความชอบรวมที่สูง ซึ่งสูงกว่าขนมปังสูตรควบคุม(ขนมปังที่ใช้แป้งสาลีล้วน) เป็นการช่วยปรับปรุงคุณภาพของขนมปังให้ดีขึ้น ได้ขนมปังคุณภาพดี สามารถผลิตได้จริงในเชิงพาณิชย์ และเป็นการเพิ่มมูลค่า และเพิ่มการใช้ประโยชน์จากข้าวไทย

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. ควรมีการศึกษาระดับการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว กข6 ระยะเม่า ให้มากขึ้น เพราะแป้งข้าวเหนียว กข6 ระยะเม่า มีความเหมาะสมในการเป็นส่วนผสมในการผลิตขนมปัง ช่วยปรับปรุงคุณภาพของขนมปังให้ดีขึ้น จะได้ช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวให้มากขึ้น

2. ควรมีการศึกษาการการนำแป้งข้าวเหนียว กข6 ระยะการเก็บเกี่ยวอื่นๆ เช่น ระยะฮาง และ ระยะปล้ำปลิง มาทดแทนแป้งสาลีบางส่วนในการผลิตขนมปัง เพื่อดูความเป็นไปได้ ว่ามีความเหมาะสมในการช่วยปรับปรุงคุณภาพของขนมปังให้ดีขึ้น ได้หรือไม่ เป็นการเพิ่มการใช้ประโยชน์ของข้าวที่ระยะการเก็บเกี่ยวต่างๆ

3. ควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของขนมปังในขณะเก็บรักษา

บรรณานุกรม

บรรณานุกรมภาษาไทย

- กล้าณรงค์ ศรีรอด. (2542). *เอกสารคำสอนวิชาเทคโนโลยีของแป้ง*. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะ
อุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยจอมขวัญ. (2543). *เทคโนโลยีของแป้ง*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
กรุงเทพฯ. 292 น.
- แขขวัญ คำดี. (2544). *การพัฒนาเกร็ดขนมปังโดยใช้แป้งมันสำปะหลังทดแทนแป้งสาลี*. วิทยานิพนธ์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. น. 102.
- งามชื่น คงเสรี. (2537). *ศักยภาพพันธุ์ข้าวไทยสู่การแปรรูป*, น.7-15. ในการประชุมวิชาการ : ศักยภาพ
ข้าวไทยทิศทางใหม่สู่อุตสาหกรรม 4 กุมภาพันธ์ 2537. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- จิตรณา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล. (2541). *เบเกอรี่เทคโนโลยีเบื้องต้น*. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีการอาหาร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 263น.
- ธีรเมศ ไหลครบุรี. (2560). *เอกสารประกอบการอบรมเรื่องเทคโนโลยีขนมอบ*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคล
ตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี.
- นฤมล ศรีไว. (2555). *องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้ง และคุณลักษณะของขนมปัง
ปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวงอก*. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การ
อาหาร). ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- นวลอนงค์ เสมสังข์ (2558). *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง ปริมาณฟลาโวนอยด์และฟีนอลที่เป็น
องค์ประกอบ และการต้านอนุมูลอิสระของข้าวไทย*. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.
- นิธิยา รัตน์ปนนท. (2534). *คอลลอยด์*. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เนื่อทอง วนานุวัช และคณะ. (2544). *การใช้แป้งข้าวทดแทนแป้งสาลีในการพัฒนาผลิตภัณฑ์
อาหาร*: รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เปรมฤทัย แยมบรรจง. (2542). *ผลของพันธุ์และระยะเวลาการเก็บเกี่ยวข้าวที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ข้าวเม่า*.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ผาณิต รุจิรพิสิฐ. (2539). *เอกสารการสอนวิชาเทคโนโลยีของผลิตภัณฑ์ขนมอบ*. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์
การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, กรุงเทพฯ. 29 น.

- พรวิñas ปั่นหยยา. (2544). การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมปังจากแป้งสาลีผสมแป้งข้าวระยะอ่อน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- พัชรภรณ์ รัตนธรรม และคณะ. (2556). สารประกอบฟีนอลิก แอนโทไซยานิน และสารต้านอนุมูลอิสระของข้าวกล้องสีงอก. *ว.วิทย์.เกษตร.* 44(2) (พิเศษ) : 441-444.
- ภาณุมาศ รุ่งเรืองอารี. (2541). ผลของแป้งข้าวโพดเจลาตินไนซ์และการเสริมโปรตีนต่อคุณภาพของขนมปังจากแป้งข้าวเจ้า. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ภัทรภณ ภูเพ็ชร. (2552). สมบัติของแป้งข้าวสาลี และคุณภาพของขนมปังที่ใช้แป้งข้าวสาลีทดแทนแป้งสาลีบางส่วน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- มลิวรรณ อุดทะยอต. (2557). ผลการใช้แป้งถั่วแดงทดแทนแป้งสาลีต่อคุณภาพของขนมปังแซนด์วิช. คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- วิเชียร วรพุทธพร. (2551). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่อง การผลิตและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเข้าจากข้าวเม่า. ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร. คณะเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สายสนม ประดิษฐ์ดวง. (2537). ผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มจากแป้งข้าว. ในการประชุมวิชาการ : ศักยภาพข้าวไทยทิศทางการใหม่สู่อุตสาหกรรม 4 กุมภาพันธ์ 2537. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- อมรรัตน์ สีสุกอง. (2561). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เรื่องการสกัดแอนโทไซยานินจากปลายข้าวไรซ์เบอร์รี่ และ การประยุกต์ใช้สารสกัดในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมเพื่อสุขภาพ. มหาวิทยาลัยสวนดุสิต.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. (2547). ข้าว:วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อิทธิพัทธ์ สุขะ, ธงชัย สุวรรณสิขณน์ และเพ็ญขวัญ ชมปรีดา. (2556). การพัฒนาสูตรที่เหมาะสมของ พุดดิ้งเค้กข้าวหอมมะลิ . ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อุทัยวรรณ ทองท้วงศ์ และ สุนทรี สุวรรณสิขณน์. (2553). ผลของการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวสาลีต่อคุณภาพของบัตเตอร์เค้ก. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- โอภา วัชรระคุปต์, ปรีชา บุญจุง, จันทนา บุญยะรัตน์ และ มาลีรักษ์ อัดต์สินทอง. (2549). สารต้านอนุมูลอิสระ. พี.เอส.พรีนซ์, กรุงเทพฯ.

บรรณานุกรมภาษาอังกฤษ

- Abdel-Hameed, E. S. (2009). Total phenolic contents and free radical scavenging activity of certain Egyptian Ficus species leaf samples. *Food Chemistry*, 114(4), 1271-1277.
- Alfieri Michela and Redaelli. (2015). Oat phenolic content and total antioxidant capacity during grain development. *Journal of Cereal Science*. 65 : 39-42.
- A.O.A.C. (2000). *Official Method of Analysis of Association of Official Analysis Chemists*. 17th ed. Virginia: The Association of Official Analytical Chemists, Inc.
- Beynum, G.M.A., van, and Roels, J.A. (1985) *Starch Conversion Technology*. Marcel Dekker, Inc., New York, p. 326.
- Hsu, C.-L., Hurang, S.-L., Chen, W., Weng, Y.-M. and Tseng, C.-Y. (2004). Qualities and antioxidant properties of bread as affected by the incorporation of yam flour in the formulation. *International Journal of Food Science and Technology*. 39: 231-238.
- Itsarasook, K., Triyasuk, N., Promsomboon, C., Meepeoch, J., Rakthong, L., Imsatian, N., Sriburin, N., Chantree, K., Narnok, P. (2017). Preparation of liposome entrapping *Pluchea indica* Less. leaf extract for application in cosmetic products. *SDU Research Journal Sciences and Technology*. 1, 43-60.
- Ji Chen-Ming, Shin Jung-Ah, Cho Jin-Woong and Lee Ki-Teak. (2013). Nutritional Evaluation of Immature Grains in Two Korean Rice Cultivars during Maturation. *Food Sci.Biotechnol*. 22(4) : 903-908.
- Lin Pei-Yin and Lai His-Mei. (2011). Bioactive compounds in rice during grain development. *Food Chemistry* 127 : 86-93.
- Noomhorm, A., Bandola, D.C. and Kongseree, N. (1994). Effect of varietu, rice flour concentration and enzyme levels on composite bread quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 64 : 433-440.

- Maizura, M., Aminah, A. and Wan Aida, W. M. (2011). Total phenolic content and antioxidant activity of kesum (*Polygonum minus*), ginger (*Zingiber officinale*) and turmeric (*Curcuma longa*) extract. *International Food Research Journal*. 18 : 529-534.
- Meda, A., Lamien, C.E., Romito, M., Millogo, J., Nacoulma, O.G. (2005). Determination of the total phenolic, flavonoid and proline contents in Burkina Fasan honey, as well as their radical scavenging activity. *Food Chemistry*. 91 : 571-577.
- Velioglu.Y.S., Mazza G, Gao L., Oomah B.D. (1998). Antioxidant Activity and Total Phenolics in Selected Fruits, Vegetables, and Grain products. *J.Agric. Food Chem.* 46 : 4113-4117.
- Zhang Hongcheng, Shao Yafang, Bao Jinsong and Beta Trust. (2015). Phenolic compounds and antioxidant properties of breeding lines between the white and black rice. *Food Chemistry*. 172(1), 630–639.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมี

1. ค่าพีเอช (pH)

1.1 อุปกรณ์

1.1.1 เครื่องวัดค่า pH (pH meter)

1.1.2 ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

1.2 สารเคมี

1.2.1 บัฟเฟอร์มีค่า pH เท่ากับ 4 และ pH เท่ากับ 7

1.3 วิธีการ

ปรับมาตรฐานเครื่องวัดค่า pH โดยปรับอิเล็กโทรด (Electrode) ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution) ล้างอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่นและเช็ดให้แห้ง จากนั้นเทตัวอย่างที่ต้องการวัดใส่ลงในปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรตัวอย่าง ประมาณ 3 ใน 4 ของปีกเกอร์ แล้วจุ่มอิเล็กโทรดลงในตัวอย่าง อ่านค่า pH ที่ได้และบันทึกผล

2. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 2000)

2.1 อุปกรณ์

2.1.1 ชุดเครื่องมือและอุปกรณ์เครื่อง Soxtec A varit 2050 Auto System

2.1.2 หลอดบรรจุตัวอย่าง (Thimble) พร้อมที่จับ (Thimble holder)

2.1.3 ถ้วยสกัด (Extraction cup) พร้อมที่จับ (Extraction cup holder)

2.1.4 ตู้อบลมร้อน (hot air oven)

2.1.5 โถดูดความชื้น (Desiccator)

2.2 สารเคมี

2.2.1 ปีโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum Ether)

2.3. วิธีการ

2.3.1 เปิดทำความเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิ 12-15 องศาเซลเซียส Warm เครื่องสกัดไขมันโดยเปิดปั๊ม power ปรับอุณหภูมิและตั้งโปรแกรมการทำงานตามชนิดของตัวทำละลายที่ใช้คือ (Oven temp = 20 องศาเซลเซียส, hot plate = 155 องศาเซลเซียส, Boiling Time = 45 นาที, Rinse = 15 นาที, Recovery 15 นาที, Pre-Drying = 30 นาที)

2.3.2 ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ลงใน Extraction Thimble นำ Extraction Thimble มาใส่ในตัวเครื่องด้วย Thimble Holder

2.3.3 เติมตัวทำละลาย 50 มิลลิลิตร ใน Extraction cup ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน แล้วนำไปต่อกับ Condenser

2.3.4 กดปุ่ม start เครื่องจะเริ่มทำงานตั้งแต่ขั้นตอน Boiling จนถึงตอน pre-Drying นำ Extraction Thimble ที่สกัดเสร็จแล้วนำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 ± 3 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ระบายตัวทำละลายออกจากเครื่อง เมื่อครบเวลาการทำงานนำ Extraction cup ออบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 30 นาที

2.4. วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณไขมัน (ร้อยละ)} = [100 (W1-W2) / W]$$

กำหนด W1 = น้ำหนัก Extraction cup และน้ำหนักไขมันที่สกัดได้หลังการอบแห้ง

W2 = น้ำหนัก Extraction cup ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน

W = น้ำหนักตัวอย่างที่อบแห้งแล้ว

3. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (AOAC,2000)

3.1 อุปกรณ์

3.1.1 หลอดย่อยโปรตีน (Kjeldahl flask) ขนาด 50-300 มิลลิลิตร

3.1.2 ชุดกลั่นโปรตีน (Semi-micro distillation flask)

3.1.3 บิวเรตต์ขนาด 50 มิลลิลิตร

3.1.4 ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.1.5 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.6 กระดาษชั่งสาร

3.2 สารเคมี

2.1 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98%

2.2 สารเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์ซัลเฟตและโปตัสเซียมซัลเฟต

2.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 40

2.4 สารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริก 0.1 N

2.5 สารละลายกรดบอริกร้อยละ 4 เตรียมโดยใช้น้ำร้อน

3.2.6 Mix indicator

3.2.7 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Commercial grade สำหรับ Scrubber)

3.3 วิธีการ

ชั่งตัวอย่าง 1 กรัม รองด้วยกระดาษกรอง พับเป็นซองจดหมายแล้วใส่ลงในหลอดย่อย เติม $(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$ 0.1 กรัม (K_2SO_4) 0.9 กรัม และ glass bead 2 เม็ดลงในหลอดย่อย เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 25 มิลลิลิตร ลงในหลอดย่อย จากนั้น Warm เครื่องย่อยให้ได้อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส นำชุดหลอดย่อยที่ปิดฝาแล้วมาต่อกับชุดจับไอกรด ย่อยจนสารละลายที่ได้เป็นสีเขียว นำหลอดย่อยมาที่ Stand ที่วางไว้ข้างเตาย่อยโดยไม่ถอดฝา รอให้ไอกรดหมด ทิ้งให้เย็นนำหลอดไปต่อกับชุดกลั่นโปรตีน นำขวดรูปชมพู่เติมสารละลายกรดบอริก ร้อยละ 4 ปริมาณ 25 มิลลิลิตร หยด Mix-indicator 3 หยด นำไปตั้งในตำแหน่งรับรองเครื่องกลั่น นำขวดรูปชมพู่ที่รองรับไปโทรเทรตกับสารละลายมาตรฐาน กรดไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล บันทึกปริมาตรของกรดเมื่อถึงจุดยุติ

4. วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ)} = [(T-B) \times 1.4.007 \times 100 \times n] / W$$

กำหนดให้ N = ความเข้มข้นของสารละลายกรดมาตรฐาน

T = ปริมาณของกรดที่ใช้ในการโทรเทรตตัวอย่าง (ml)

B = ปริมาณของกรดที่ใช้ในการโทรเทรต (ml)

W = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ (mg)

Factor = 6.25

4. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

4.1 อุปกรณ์

4.1.1 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

4.1.2 ถ้วยหาความชื้น (Aluminum can, Moisture can)

4.1.3 โถดูความชื้น (Desicator)

4.1.4 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

4.1.5 Tongs หรือ Forceps

4.2 วิธีการ

4.2.1 หาน้ำหนักที่คงที่ของถ้วยเปล่าโดยนำเข้าสู่อบลมร้อนอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง ทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นชั่งน้ำหนักแล้วนำเข้าอบใหม่ดำเนินการเหมือนครั้งแรกจนได้น้ำหนักที่คงที่และบันทึกค่า (น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัม)

4.2.2 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่แน่นอนจำนวน 2.×××× กรัม ใส่ลงในถ้วยตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนแล้วเกลี่ยตัวอย่างออกอย่างสม่ำเสมอ ให้มีเนื้อที่ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้

4.2.3 อบตัวอย่างในถ้วยหาความชื้นให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 2-4 ชั่วโมง ทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักแล้วนำเข้าอบใหม่อีกครั้ง ครั้งละ 30 นาที จนได้น้ำหนักคงที่

4.2.4 นำผลที่ได้ไปคำนวณปริมาณความชื้น

4.3 วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)} = \frac{\{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}\} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}}$$

5. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC, 2000)

5.1 อุปกรณ์

5.1.1 Crucible or porcelain (ถ้วยกระเบื้อง)

5.1.2 โถดูดความชื้น (Desiccator)

5.1.3 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

5.1.4 Electric muffle furnace

5.1.5 Electric burner

5.1.6 Tong

5.2 วิธีการ

5.2.1 อบ Crucible ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของ Crucible

5.2.2 ชั่งน้ำหนักที่แน่นอนของตัวอย่างประมาณ 4-6 กรัม ใส่ลงใน Crucible แล้วนำไปเผาบน Electric burner จนควันหมด

5.2.3 นำตัวอย่างไปเผาในเตาไฟฟ้า furnace ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง จนกระทั่งได้เถ้าสีขาวหรือสีเทา

5.2.4 นำออกมาลดอุณหภูมิในตู้อบลมร้อน 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็นในอุณหภูมิแล้วนำไปชั่งเผาตัวอย่างซ้ำ ครั้งละ 30 นาทีจนได้น้ำหนักที่ต่างกันไม่เกิน 1 มิลลิกรัม

5.2.5 นำผลที่ได้คำนวณ

3. วิธีหาคำนวณ

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)} = [(W_1 - W_2)/W] \times 100$$

กำหนดให้ W_1 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องเคลือบและตัวอย่างก่อนเผา

W_2 = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องเคลือบและตัวอย่างหลังเผาจนได้น้ำหนักคงที่

W = น้ำหนักของถ้วยกระเบื้องเคลือบ

6. การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยหยาบ

6.1 อุปกรณ์

6.1.1 Crucible สำหรับกรองทำจาก Borosilicate

6.1.2 Fiber extraction unit (Hot extraction, Cold extracion)

6.1.3 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

6.1.4 โถดูดความชื้น (Desicator)

6.1.5 Furnace

6.2 สารเคมี

6.2.1 H_2SO_4 1.25%

6.2.2 NaOH 1.25%

6.2.3 Acetone

6.2.4 Celite

6.2.5 น้ำกลั่นร้อน

6.3 วิธีการ

6.3.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม โดยชั่งใน crucible เติม celite 1 กรัม เพื่อช่วยในการกรอง แล้วนำเข้าเครื่อง Fiber extraction unit Hot extraction step 1 วาง crucible ในช่องเติม H_2SO_4 1.25% ประมาณ 150 มิลลิลิตร และหยด octanol 2-4 หยด เพื่อป้องกันการ foaming ต้มให้เดือด และจับเวลา 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นร้อน 30 มิลลิลิตร 3 ครั้ง แต่แต่ละครั้งต้องระบายน้ำออกด้วย Hot extraction step 2 : เติม NaOH 1.25% ร้อนประมาณ 150 มิลลิลิตร และหยด octanol 2-4 หยด เพื่อป้องกันการเกิด foaming ต้มให้เดือดและจับเวลา 30 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นที่ร้อน 30 มิลลิลิตร 3 ครั้ง แต่แต่ละครั้งต้องระบายน้ำออกด้วย

6.3.2 นำ crucible เข้า cold extraction เติม acetone 25 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 10 นาที กรองแล้ว ทำซ้ำอีกครั้ง

6.3.3 นำ crucible เข้า hot air oven เพื่อระเหย solvent และ dry crucible ที่อุณหภูมิ $130^{\circ}C$ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำ crucible เข้า Furnace ที่อุณหภูมิ $525^{\circ}C$ 3 ชั่วโมง จากนั้นนำมาลดอุณหภูมิใน hot air oven ให้เหลือ $250^{\circ}C$ จากนั้นนำเข้าโถดูดความชื้น

6.3.4 ชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า

ภาคผนวก ข
ภาพจากการทดลอง



ภาพผนวกที่ ข1 หุ่นนาข้าวที่ใช้ในการวิจัย จ.นครพนม



ภาพผนวกที่ ข2 เกษตรกรกำลังจัดเตรียมข้าว คัดแยก และบรรจุในถุง



ภาคผนวกที่ ข3 ข้าวสายพันธุ์ต่างๆ ที่ระยะการเก็บเกี่ยวต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพผนวกที่ ข4 หมักโดจนขึ้นฟูเป็น 2 เท่า ใช้เวลาประมาณ 90 นาที ในตู้ปมควบคุมอุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ข5 ตัดแบ่งโดเป็นก้อนๆละ 100 กรัม คลึงให้เป็นก้อนกลม พักโดไว้ 20 นาที



ภาพผนวกที่ ข6 รีดโดและม้วนให้เป็นก้อน จัดวางในพิมพ์ที่ทำเนย พักโดจนขึ้นฟูเกือบเต็มพิมพ์ ใช้เวลา
ประมาณ 60 นาที



ภาพผนวกที่ ข7 อบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20-25 นาที



ภาพผนวกที่ ข8 ขนมปังที่อบสุกแล้ว

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ - สกุล นางสาว อมรรัตน์ สีสุทอง
2. วันเดือนปีเกิด 26 กันยายน 2516
3. ประวัติการศึกษา
2534-2537 วท.บ.(เทคโนโลยีชีวภาพ) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2538-2541 วท.ม.(เทคโนโลยีชีวภาพ) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. ประวัติการทำงาน
2542-2543 อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2544- ปัจจุบัน อาจารย์ประจำกลุ่มวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
5. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก
กลุ่มวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต
เลขที่ 228-228/1-3 ถ.สีรินธร แขวงบางพลัด เขตบางพลัด กทม. 10700