

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

4.1 ตอนที่ 1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งข้าวฟ่างงอก แป้งข้าวฟ่างที่ไม่งอกและแป้งสาลี

เมื่อนำแป้งข้าวฟ่างที่ผลิตผ่านการแช่น้ำ 1 วัน และทิ้งให้แห้ง 2 วัน มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์และปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เปรียบเทียบกับแป้งข้าวฟ่างไม่งอกและแป้งสาลีทางการค้า ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังตาราง 4.1-4.4 และภาพประกอบ 4.1- 4.2 ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.1.1) องค์ประกอบทางเคมี

แป้งข้าวฟ่างงอก แป้งข้าวฟ่างไม่งอกและแป้งสาลีมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และเส้นใยอาหารแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$ แสดง ได้ดังตาราง 4.1 ทั้งนี้ปริมาณความชื้นในแป้งข้าวฟ่างไม่งอกมีค่าสูงที่สุด (11.53 เปอร์เซ็นต์) รองลงมา คือ แป้งสาลี (9.89 เปอร์เซ็นต์) และแป้งข้าวฟ่างงอกมีปริมาณความชื้นต่ำที่สุด (6.19 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งมีสาเหตุจากมีการอบเมล็ดข้าวฟ่างที่ออกจนแห้งก่อนนำมาบด เพื่อป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์

ปริมาณโปรตีนในแป้งสาลีมีค่าสูงที่สุด คือ 14.84 เปอร์เซ็นต์ และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากแป้งข้าวฟ่างงอกและไม่งอกที่มีปริมาณโปรตีนใกล้เคียงกัน คือ 8.73 เปอร์เซ็นต์ และ 8.59 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการศึกษาที่ได้นี้มีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Abad *et al.* (2005) ที่รายงานปริมาณโปรตีนเฉลี่ยของข้าวฟ่างงอก 10 สายพันธุ์มีค่าอยู่ระหว่าง 10.08-16.45 เปอร์เซ็นต์ และงานวิจัยของ Chanapamokkhot and Thongngam (2007) ซึ่งพบปริมาณโปรตีนในแป้งสาลีชนิดหนัก 14.89 เปอร์เซ็นต์ ในแป้งสาลีชนิดเบา 11.24 เปอร์เซ็นต์ และในข้าวฟ่างไม่งอก 2 สายพันธุ์ 6.28-9.49 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวฟ่างงอกมีมากกว่าในแป้งข้าวฟ่างไม่งอกเล็กน้อย ($p > 0.05$) เนื่องจากในระหว่างการงอก มีปริมาณเอนไซม์โปรติเอสเพิ่มขึ้น ทำให้โปรตีนบางส่วนถูกย่อยไปเป็นกรดอะมิโนและเปปไทด์สายสั้นๆ เพิ่มมากขึ้น ดังเช่นผลการวิจัยของ Elkhaila and Bernhardt (2010) ซึ่งพบว่าข้าวฟ่างงอกมีค่า Nitrogen solubility index เพิ่มขึ้น

ปริมาณไขมันในแป้งข้าวฟ่างทั้งสองชนิดมีมากกว่าในแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยแป้งข้าวฟ่างงอกและแป้งข้าวฟ่างไม่งอกมีไขมัน 3.43 และ 3.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนแป้งสาลีมีปริมาณไขมันเพียง 0.89 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abad *et al.* (2005) ที่รายงานว่าในข้าวฟ่างงอก 10 สายพันธุ์มีไขมันประมาณ 2.28-5.36 เปอร์เซ็นต์

ปริมาณเถ้าในแป้งทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยแป้งข้าวฟ่างไม่งอกมีปริมาณเถ้าสูงที่สุด (1.35 เปอร์เซ็นต์) รองลงมา คือ แป้งข้าวฟ่างงอก (1.08 เปอร์เซ็นต์) และแป้งสาลี (0.46 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abad *et al.* (2005) ที่พบว่า ในข้าวฟ่างงอก 10 สายพันธุ์มีปริมาณเถ้าอยู่ระหว่าง 1.06-5.24 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้การลดลงของปริมาณเถ้าของแป้งข้าวฟ่างงอกนั้น Elmaki *et al.* (1999) อธิบาย

สาเหตุไว้ว่า เนื่องจากในขั้นแรกของการบ่มการงอก เมล็ดข้าวฟ่างจำเป็นต้องใช้สารอาหารจำนวนมาก สำหรับการแตกหน่อ โดยเฉพาะแร่ธาตุต่างๆ

ปริมาณเส้นใยอาหารหยาบในแป้งข้าวฟ่างทั้งสองชนิดมีมากกว่าในแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยแป้งข้าวฟ่างไม่งอกและแป้งข้าวฟ่างงอกมีปริมาณเส้นใยอาหาร 1.78 และ 1.55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนแป้งสาลีมีเส้นใยอาหาร 0.14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Elmakl *et al.* (1999) ที่รายงานว่า ข้าวฟ่างสายพันธุ์ Gadamelhamam ชนิดแทนนินต่ำที่ผ่านการแช่น้ำนาน 30 ชั่วโมง ก่อนนำไปงอกนาน 72 ชั่วโมง มีปริมาณเส้นใยอาหารลดลงจาก 3.26 เป็น 1 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากการทำงานของเอนไซม์ในขณะงอก

ตาราง 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาลี แป้งข้าวฟ่างไม่งอกและแป้งข้าวฟ่างงอก

ชนิดของแป้ง	เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง)				
	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	เส้นใยอาหาร
แป้งสาลี (ควบคุม)	9.89±0.02 ^b	14.84±0.49 ^a	0.89±0.04 ^c	0.46±0.00 ^c	0.14±0.00 ^c
แป้งข้าวฟ่างไม่งอก	11.53±0.02 ^a	8.59±0.11 ^b	3.14±0.11 ^b	1.35±0.02 ^a	1.78±0.02 ^a
แป้งข้าวฟ่างงอก	6.19±0.04 ^c	8.73±0.01 ^b	3.43±0.04 ^a	1.00±0.01 ^b	1.55±0.01 ^b

หมายเหตุ: a, b, c ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี LSD

กิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และเอนไซม์โปรติเอสของแป้งสาลี แป้งข้าวฟ่างงอกและแป้งข้าวฟ่างไม่งอก แสดงดังตาราง 4.2

ผลการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส พบว่า มีค่าสูงที่สุดในแป้งข้าวฟ่างงอก คือ 32.62 U/g ในขณะที่แป้งข้าวฟ่างไม่งอกและแป้งสาลีมีกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (0.13×10^{-2} และ 1.55×10^{-2} CU/g ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากการงอกของเมล็ดกระตุ้นให้มีการสร้างและปล่อยเอนไซม์ออกมาเพิ่มขึ้น (Dicko *et al.*, 2006; Elkhaliifa, and Bernhardt, 2010) กิจกรรมของเอนไซม์อะไมเลสมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการงอก โดยมีค่ามากที่สุดในวันที่ 3 ของการงอก (Elkhaliifa, and Bernhardt, 2010) และหลังจาก 3 วัน (72 ชั่วโมง) กิจกรรมของเอนไซม์ อะไมเลสไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการสังเคราะห์เอนไซม์เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่เพิ่มขึ้นนี้ เพื่อใช้ย่อยสลายแป้งให้เป็นน้ำตาลมอลโตส และนำไปใช้ในการเจริญของต้นอ่อน (Elemo *et al.*, 2011) เมื่อเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยของ Agu and Palmer (1998) ซึ่งพบว่า ข้าวฟ่างที่ผ่านกระบวนการงอกที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีกิจกรรมเอนไซม์อะไมเลสในช่วง 39-135 U/g จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกัน โดยเกิดจากความแตกต่างของสายพันธุ์ข้าวฟ่างที่ใช้และกระบวนการงอกที่แตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอส พบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส กล่าวคือ แป้งข้าวฟ่างงอกมีกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสสูงที่สุด

(1.46×10^{-4} units/g) ส่วนแป้งสาลีและแป้งข้าวฟ่างไม่ออก มีกิจกรรมของเอนไซม์ที่ไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีค่า 1.20×10^{-4} และ 1.11×10^{-4} units/g ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ Elkhaila and Bernhardt (2010) ที่พบการเพิ่มขึ้นของกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสในข้าวฟ่างตามระยะเวลาที่ใช้ออกและมีค่าสูงสุดในวันที่ 3 ของการงอก

ตาราง 4.2 กิจกรรมเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และโปรติเอสของแป้งสาลี แป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งข้าวฟ่างออก

ชนิดของแป้ง	กิจกรรมเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (units/g)	กิจกรรมเอนไซม์โปรติเอส (units/g)
แป้งสาลี (ควบคุม)	$1.55 \times 10^{-2} \pm 0.00^b$	$1.20 \times 10^{-4} \pm 0.00^b$
แป้งข้าวฟ่างไม่ออก	$0.13 \times 10^{-2} \pm 0.00^b$	$1.11 \times 10^{-4} \pm 0.00^b$
แป้งข้าวฟ่างออก	32.62 ± 1.13^a	$1.46 \times 10^{-4} \pm 0.00^a$

หมายเหตุ: a, b ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี LSD

4.1.2) คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์

จากการนำแป้งสาลี แป้งข้าวฟ่างไม่ออก และแป้งข้าวฟ่างออกมาทดสอบคุณสมบัติด้านความหนืด (pasting properties) ด้วยเครื่อง (RVA) เพื่อวิเคราะห์อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (trough viscosity) ค่าความหนืดลดลง (breakdown) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และค่าเซตแบค (setback) ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังตาราง 4.3

จากตาราง พบว่า ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ RVA ของแป้งแต่ละตัวอย่างมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้ในช่วงแรกของการให้ความร้อนแก่แป้งไม่มีความหนืดเกิดขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่เม็ดแป้งเริ่มดูดน้ำ จนเมื่อเม็ดแป้งได้รับอุณหภูมิสูงขึ้น มีการดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ ความหนืดของแป้งจึงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืดเรียกว่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (pasting temperature) ซึ่งแป้งข้าวฟ่างไม่ออกมี pasting temperature สูงกว่าแป้งสาลี (87.82 และ 84.48 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) ส่วนในแป้งข้าวฟ่างออกมี pasting temperature ต่ำที่สุด คือ 77.80 องศาเซลเซียส ในขณะที่ Hugo *et al.* (2003) รายงานว่าแป้งข้าวฟ่างไม่ออกมีค่า pasting temperature เท่ากับ 71 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้ในงานวิจัยนี้ อาจเนื่องมาจากใช้สายพันธุ์ของข้าวฟ่างและแหล่งที่ปลูกแตกต่างกัน

แป้งสาลีมีเวลาเริ่มเกิดความหนืด (peak time) เท่ากับ 5.49 นาที ซึ่งมากกว่าแป้งข้าวฟ่างออกและแป้งข้าวฟ่างไม่ออก แสดงว่าแป้งสาลีใช้เวลาในการเกิดเจลนานกว่า ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Chanapamokkhot and Thongngam (2007) รายงานว่าสตาร์ชข้าวสาลีชนิดหนักมีค่า peak time สูงที่สุด (10.80 นาที) รองลงมาคือแป้งสาลีชนิดเบา (10.43 นาที) สตาร์ชข้าวฟ่างสายพันธุ์ 804 (7.55 นาที) และสตาร์ชข้าวฟ่างสายพันธุ์ 309 (7.29 นาที) ตามลำดับ

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความหนืดของแป้งจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด เรียกว่า ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) โดยแป้งข้าวฟ่างไม่งอกมีค่า Peak viscosity สูงที่สุด รองลงมาคือแป้งสาลีและแป้งข้าวฟ่างงอกตามลำดับ (168.72, 154.46 และ 29.44 RVU ตามลำดับ) ซึ่งจากงานวิจัยของ Chanapamokkhot and Thongngam (2007) พบว่า สตาร์ชข้าวฟ่างสายพันธุ์ 439 และ 804 มีค่า Peak viscosity (340.21 และ 280.44 RVU ตามลำดับ) สูงกว่าสตาร์ชแป้งสาลีชนิดหนักและชนิดเบา (269 และ 267 RVU ตามลำดับ) เนื่องจากในแป้งสาลีมีปริมาณโปรตีนสูงทำให้ขัดขวางการพองตัวของแป้ง เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวฟ่าง 2 ชนิด พบว่าแป้งข้าวฟ่างไม่งอกมีค่า peak viscosity สูงกว่าแป้งข้าวฟ่างงอก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hugo *et al.* (2000) ที่รายงานว่าแป้งข้าวฟ่างงอกที่ทำแห้งด้วยอุณหภูมิต่างๆ 50, 80, 100, 120, 150 องศาเซลเซียส มีค่า peak viscosity ต่ำกว่าแป้งข้าวฟ่างไม่งอกที่มีค่าอยู่ระหว่าง 80 - 483 และ 2,267 SNU ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีในระหว่างการงอก กล่าวคือในระหว่างการงอกเอนไซม์จะย่อยแป้งให้เป็นเดกตรินท์และกลูโคส และย่อยโปรตีนเป็นกรดอะมิโน จึงทำให้สตาร์ชในข้าวฟ่างงอกเกิดเจลาตินไนซ์ได้ง่าย ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดและความหนืดของแป้งต่ำลง และในทำนองเดียวกันกับงานวิจัยของ Yan *et al.* (2010) พบว่าเมื่อนำข้าวฟ่าง 5 สายพันธุ์ ได้แก่ DK5400, DK5311, Asgrow567, Pio8313 และ Pio82G10 ไปผ่านการงอกทำให้ค่า Peak viscosity ของแป้งข้าวฟ่างงอกจะต่ำกว่าข้าวฟ่างไม่งอก เนื่องจากเอนไซม์อะไมเลสที่เพิ่มสูงขึ้นในข้าวฟ่างงอกจะย่อยเม็ดแป้งให้มีขนาดเล็กลง เม็ดแป้งจึงพองตัวได้เร็วและง่าย ทำให้ความหนืดต่ำ

เมื่อเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่แล้วและยังเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปอีก พร้อมกับมีการกวนอย่างต่อเนื่อง โครงสร้างภายในของเม็ดแป้งจะแตกออกและมีผลทำให้ความหนืดลดลง ค่า breakdown viscosity จึงบ่งบอกความทนต่อแรงเฉือนของเม็ดแป้ง จากงานวิจัยนี้แป้งสาลีมีค่า breakdown viscosity สูงกว่าแป้งข้าวฟ่างไม่งอกและแป้งข้าวฟ่างงอก (59.96, 31.58 และ 6.03 ตามลำดับ) ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Chanapamokkhot and Thongngam (2007) ที่พบว่าแป้งสาลีชนิดหนักและชนิดเบา มีค่า breakdown viscosity (75.50 และ 57.96 RVU ตามลำดับ) สูงกว่าแป้งข้าวฟ่างสายพันธุ์ 439 และ 804 (56.83 และ 9.56 RVU ตามลำดับ)

สำหรับค่าความหนืดท้ายสุด (final viscosity) บ่งชี้ว่ามีการรวมตัวกันอีกครั้งของโมเลกุล อะมิโลส (amylose) ที่แพร่ออกมาจากเม็ดแป้ง ในระหว่างการเย็นตัวหลังการเกิดเจลาตินไนซ์และการเกิดเป็นโครงร่างของเจล ซึ่งทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีกครั้ง จากผลการวิจัยที่ได้ในแป้งข้าวฟ่างไม่งอกมีค่า final viscosity สูงที่สุด (247.50 RVU) รองลงมาคือแป้งสาลีและแป้งข้าวฟ่างงอกตามลำดับ (168.13 และ 24.47 RVU ตามลำดับ) ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chanapamokkhot and Thongngam, 2007 พบว่าค่า Final viscosity ของแป้งข้าวฟ่างสายพันธุ์ 439 และ 804 มีค่าสูงกว่าแป้งสาลีชนิดหนักและชนิดเบา

ค่าการคืนตัว (setback) ที่แสดงถึงการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่แพร่ออกมาจากแป้งหรือเป็นค่าที่บ่งบอกการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) พบว่า แป้งข้าวฟ่างไม่งอกมีค่า setback สูงที่สุด (111.47 RVU) ตามด้วยแป้งสาลีและแป้งข้าวฟ่างงอกตามลำดับ (73.62 และ 1.06 RVU ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวฟ่างงอกมีอัตราการเกิดรีโทรเกรเดชันต่ำ อาจเนื่องมาจากโมเลกุลอะมิโลสอิสระที่หลุดออกมาหลังการพองตัวมีขนาดสั้นเกินไป จึงทำให้มีการเคลื่อนที่ที่อยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากขึ้น (จิตธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์

นัยวิกุล, 2539) นอกจากนี้ Yan *et al.* (2010) ยังพบว่า ค่า setback ของแป้งข้าวฟ่าง 5 สายพันธุ์ ได้แก่ DK5400, DK5311, Asgrow567, Pio8313 และ Pio82G10 ที่ไม่ผ่านการงอกมีค่าสูงกว่าข้าวฟ่างงอก

ตาราง 4.3 คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งสาลีแป้งข้าวฟ่างไม่งอกและแป้งข้าวฟ่างงอก

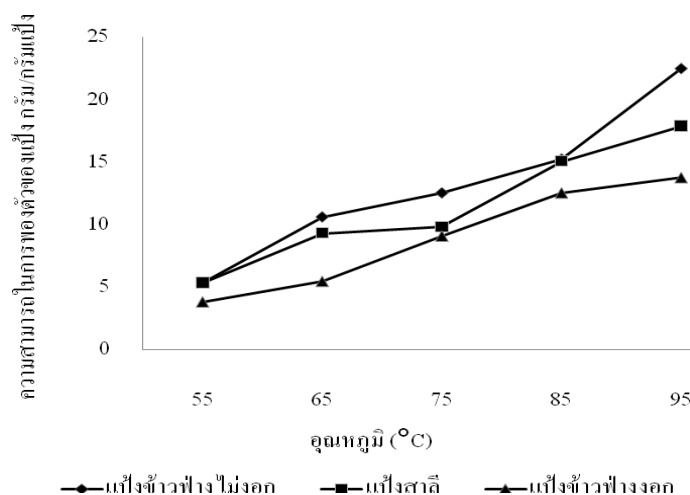
พารามิเตอร์ RVA	แป้งสาลี (ควบคุม)	แป้งข้าวฟ่างไม่งอก	แป้งข้าวฟ่างงอก
Peak time (min)	5.49 ± 0.03 ^a	5.15 ± 0.04 ^b	3.49 ± 0.03 ^c
Pasting temperature (°C)	84.48 ± 0.51 ^b	87.82 ± 0.49 ^a	77.80 ± 0.48 ^c
Peak viscosity (RVU)	154.46 ± 2.41 ^b	168.72 ± 0.69 ^a	29.44 ± 0.54 ^c
Trough viscosity (RVU)	94.50 ± 1.34 ^b	136.02 ± 2.99 ^a	23.42 ± 0.14 ^c
Break down (RVU)	59.96 ± 1.10 ^a	31.58 ± 1.80 ^b	6.03 ± 0.61 ^c
Final viscosity (RVU)	168.13 ± 2.38 ^b	247.50 ± 2.16 ^a	24.47 ± 0.46 ^c
Setback (RVU)	73.62 ± 1.06 ^b	111.47 ± 4.00 ^a	1.06 ± 0.42 ^c

หมายเหตุ: a, b, c ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ความสามารถในการพองตัวของแป้งเป็นค่าที่แสดงปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ ส่วนความสามารถในการละลายวัดจากน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กัน จากการศึกษาความสามารถในการพองตัวและการละลายของแป้งข้าวฟ่าง 2 ชนิดงอก ที่อุณหภูมิ 55-95 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับแป้งสาลี ได้ผลดังภาพประกอบ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ในภาพรวมจะเห็นว่าความสามารถในการพองตัวและการละลายของแป้งทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความร้อนที่ให้แก่แป้ง

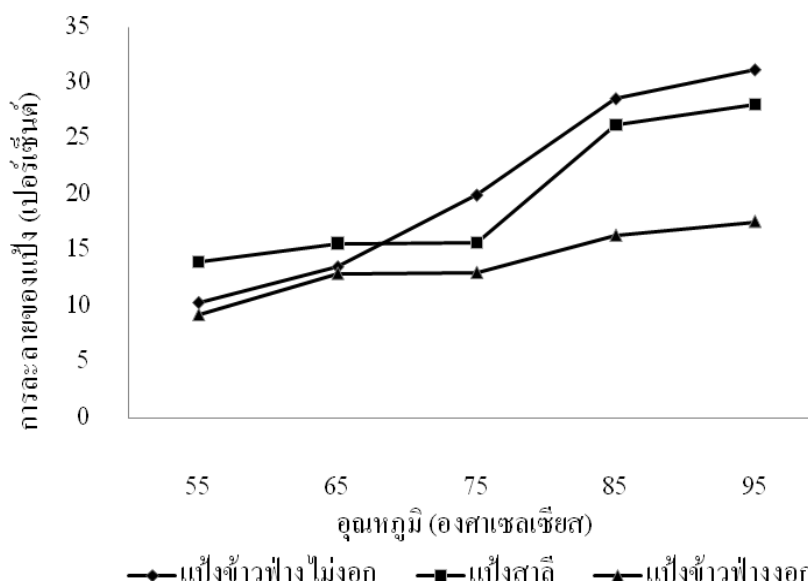
เมื่อพิจารณาความสามารถในการพองตัวที่อุณหภูมิ 55 และ 95 องศาเซลเซียส พบว่า แป้งข้าวฟ่างไม่งอกมีความสามารถในการพองตัวสูงกว่าแป้งสาลี โดยมีความสามารถในการพองตัวสูงสุดที่ 95 องศาเซลเซียส 22.52 กรัม/กรัมของแป้ง ผลการทดลองนี้มีความคล้ายคลึงกับ Chanapamokkhot and Thongngam (2007) ซึ่งพบว่า แป้งข้าวฟ่าง 2 สายพันธุ์ ที่ไม่ผ่านการงอกมีความสามารถในการพองตัวสูงกว่าแป้งสาลีชนิดหนักและเบา ความแตกต่างของความสามารถในการพองตัวของแป้ง อาจมีสาเหตุจากการมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังเช่นงานวิจัยของ Chung (2008) ที่รายงานว่าแป้งถั่วแดงหลวง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ Majesty, Red Kanner และ AC Nautica มีความสามารถในการพองตัวต่ำกว่าสตาρχที่แยกได้จากแป้งถั่ว เนื่องจากว่าแป้งถั่วมีปริมาณโปรตีน ลิพิด และเส้นใยสูงกว่าในสตาρχ โดยเฉพาะสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับลิพิด (amylose-lipid complex) ในแป้ง สามารถยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้งได้ สำหรับแป้งข้าวฟ่างงอกมีกำลังการพองตัวต่ำที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการอบแห้งแป้งข้าวฟ่างงอกก่อนนำมาบด ทำให้แป้งข้าวฟ่างงอกมีความสามารถในการพองตัวต่ำกว่าแป้งสาลีและแป้งข้าวฟ่างไม่งอก ดังเช่นในงานวิจัยของ Aviara *et al.*

(2010) ที่รายงานว่า การอบแป้งข้าวฟ่างที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 40 เป็น 60 องศาเซลเซียส ทำให้กำลังการพองตัวของแป้งลดลงจาก 12.01 เหลือ 8.96 กรัม/กรัมแป้ง และงานวิจัยของ Musa *et al.* (2011) ที่รายงานความสามารถในการพองตัวของแป้งข้าว 3 ชนิดว่า แป้งข้าวกล้องไม่ออกมีความสามารถในการพองตัวสูงกว่าข้าวกล้องงอก 1 วัน และข้าวขาวโดยมีค่า 1.76 ± 0.28 , 1.70 ± 0.08 และ 1.30 ± 0.11 กรัม/กรัมแป้ง ตามลำดับ



ภาพประกอบ 4.1 ความสามารถในการพองตัวของแป้งสาลี แป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งข้าวฟ่างงอก ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาความสามารถในการละลายของแป้งสาลี แป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งข้าวฟ่างงอกที่อุณหภูมิระหว่าง 55-95 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2 พบว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส แป้งสาลีมีเปอร์เซ็นต์การละลายสูงกว่าแป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งข้าวฟ่างงอก แต่เมื่อให้ความร้อนเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส พบว่า แป้งข้าวฟ่างไม่ออกมีการละลายสูงกว่าแป้งสาลีและแป้งข้าวฟ่างงอก โดยมีการละลายสูงสุด 28.6 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวฟ่างงอกมีการละลายที่ต่ำกว่าแป้งข้าวฟ่างไม่ออก อาจเป็นผลมาจากการอบแห้งข้าวฟ่างงอกก่อนนำมาบด ดังเช่นในงานวิจัยของ Aviara *et al.* (2010) รายงานว่า การอบแป้งข้าวฟ่างที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 40 เป็น 60 องศาเซลเซียส ทำให้ความสามารถในการละลายของแป้งลดลงจาก 7.08 เหลือ 2.85 เปอร์เซ็นต์



ภาพประกอบ 4.2 การละลายของแป้งสาลี แป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งข้าวฟ่างนอก
ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

4.1.3) สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

ข้าวฟ่างสีแดง จัดเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ โพลีฟีนอล แทนนิน แอนโทไซยานิน ฟลาโวนอยด์ ไอโซฟลาโวนด์ กรดฟีนอลิก ไฟโตสเตอรอล และโพลีโคซานอล (Awika and Rooney, 2004) สารหลายชนิดมีคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งช่วยป้องกันโรคมะเร็ง ลดคอเลสเตอรอล และลดความเสี่ยงการเป็นโรคหัวใจ เป็นต้น (Kil *et al.*, 2009) ในงานวิจัยนี้ มีการวิเคราะห์ปริมาณแทนนิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และแอนโทไซยานินทั้งหมดในแป้งข้าวฟ่างนอก และแป้งข้าวฟ่างไม่ออก ได้ผลดังแสดงในตาราง 4.4

ปริมาณแทนนินในแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 ชนิดมีค่ามากกว่าแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีปริมาณ 1.07 - 1.87 mg CE/g ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Abad *et al.* (2005) ที่พบว่า ข้าวฟ่าง 10 สายพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไนจีเรีย หลังกระบวนการงอก มีปริมาณแทนนิน 0.0012 - 0.067 เปอร์เซ็นต์ (1.2 - 67 mg/g) ทั้งนี้แป้งข้าวฟ่างไม่ออกพบแทนนินมากกว่าแป้ง ข้าวฟ่างนอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Elmaki *et al.* (2010) ที่พบว่า การแช่ข้าวฟ่าง 2 สายพันธุ์ คือ Gadamelhamam และ Cross 35:18 นาน 10 ชั่วโมง ก่อนที่จะให้เกิดการงอกนาน 72 ชั่วโมง ทำให้ปริมาณแทนนินลดลง 56 และ 98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และหากเพิ่มเวลาการแช่เป็น 30 ชั่วโมง ก่อนที่จะให้งอกนาน 72 ชั่วโมง มีการลดลงของปริมาณแทนนินเพิ่มเป็น 66 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากแทนนินที่อยู่ในเยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) ละลายไปกับน้ำในขณะงอก

ตาราง 4.4 ปริมาณแทนนิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และแอนโธไซยานินทั้งหมดในแป้งสาลี แป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งข้าวฟ่างออก

ชนิดของแป้ง	แทนนิน (mg CE/g)	สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g)	แอนโธไซยานินทั้งหมด (mg/g)
แป้งสาลี (ควบคุม)	0.09 ± 0.04^c	0.82 ± 0.04^c	2.06 ± 0.45^c
แป้งข้าวฟ่างไม่ออก	1.87 ± 0.01^a	1.86 ± 0.10^a	0.06 ± 0.10^b
แป้งข้าวฟ่างออก	1.07 ± 0.04^b	1.36 ± 0.08^b	0.11 ± 0.10^a

หมายเหตุ: a, b, c ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี LSD

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในแป้งทั้ง 3 ชนิด มีลักษณะเช่นเดียวกับปริมาณแทนนิน คือ แป้งข้าวฟ่างไม่ออกมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงที่สุด (1.86 mg GAE/g) ตามด้วยแป้งข้าวฟ่างออก (1.36 mg GAE/g) และแป้งสาลี (0.82 mg GAE/g) ตามลำดับ แม้ว่าปริมาณฟีนอลิกในข้าวฟ่างอาจแตกต่างกันเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น สายพันธุ์ แหล่งที่ปลูก และการเจริญเติบโต (Dykes, 2005) แต่ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ข้าวฟ่างจากแหล่งเดียวกัน ดังนั้นความแตกต่างในปริมาณของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดในแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 ชนิด จึงเป็นผลมากระบวนการงอก เช่นเดียวกับกรณีของ Pasko *et al.* (2009) ซึ่งพบว่าปริมาณโพลีฟีนอลในเมล็ด amaranth และ quinoa มีค่าลดลงเล็กน้อยในระหว่างการงอก 7 วัน

ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดในแป้งสาลีมีน้อยกว่าแป้งข้าวฟ่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากข้าวฟ่างที่ใช้ในงานวิจัยเป็นข้าวฟ่างสีแดง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแป้งข้าวฟ่างทั้ง 2 ชนิด พบว่า แป้งข้าวฟ่างออกมีปริมาณแอนโธไซยานินสูงกว่าข้าวฟ่างไม่ออกประมาณ 1.9 เท่า (0.11 mg/g เทียบกับ 0.06 mg/g) ซึ่งงานวิจัยของ Pasko *et al.* (2009) รายงานว่าปริมาณแอนโธ - ไซยานินมีค่าสูงขึ้นในเมล็ด amaranth และ quinoa ที่งอก 7 วัน เกิดมาจากการสังเคราะห์โดยแสงที่ใช้ในกระบวนการงอก

4.1.4) คุณลักษณะของขนมปัง

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตขนมปังปราศจากกลูเตน โดยใช้แป้งข้าวฟ่างไม่ออก และแป้งข้าวฟ่างออก ทดแทนแป้งสาลี 100 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับขนมปังจากแป้งสาลี (ควบคุม) ได้ผลแสดงดังภาพประกอบ 4.3



ภาพประกอบ 4.3 A: ขนมปังทำจากแป้งสาลี (ควบคุม), B: ขนมปังทำจากแป้งข้าวฟ่างไม่ออก 100 เปอร์เซ็นต์ และ C: ขนมปังทำจากแป้งข้าวฟ่างออก 100 เปอร์เซ็นต์

การใช้ข้าวฟ่างไม่ออก 100 เปอร์เซ็นต์ แบบเทอร์ขึ้นโดได้ดี แต่น้อยกว่าแบบเทอร์ที่ทำจากแป้งสาลี เนื้อด้านในของขนมปังหลังการอบมีรูอากาศน้อย มีเนื้อสัมผัสแน่นและแข็ง (ดังภาพประกอบ 4.3 B) ส่วนการใช้ข้าวฟ่างออก 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แบบเทอร์ขึ้นโดได้ดีกว่าแป้งข้าวฟ่างไม่ออก แต่ขนมปังมีการยุบตัวหลังอบ เนื้อด้านในของขนมปังและและแฉะ (ดังภาพประกอบ 4.3 C) นอกจากนั้นในงานวิจัยของ Onyango *et al.* (2010) พบว่า การใช้แป้งมันสำปะหลังร่วมกับแป้งข้าวฟ่างไม่ออก ในอัตราส่วน 50 ต่อ 50 ในขณะที่ส่วนผสมอื่นๆคงที่ คือ น้ำ 100 เปอร์เซ็นต์ น้ำตาล 6.7 เปอร์เซ็นต์ ผงไข่ขาว 6.5 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 2 เปอร์เซ็นต์ เกลือ 1.7 เปอร์เซ็นต์ และยีสต์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักแป้ง ทำให้เนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลิ่นคาวโดยช่วยลดความแน่นแข็ง (firmness) และความยากง่ายในการเคี้ยว (chewiness) และเพิ่มความเกาะติดกัน (cohesiveness) ความยืดหยุ่น (springiness) และความคง (resilience) ของเนื้อด้านในขนมปัง

ดังนั้น ในขั้นตอนต่อไป จึงมีการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแป้งข้าวฟ่างให้เหมาะสมต่อการผลิตขนมปังปราศจากกลิ่นคาวมากขึ้นโดยศึกษาคุณลักษณะของขนมปังที่ได้จากการผสมแป้งข้าวฟ่างออก แป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนแตกต่างกัน 5 ระดับ คือ 50: 0: 50, 37.5: 12.5: 50, 25: 25: 50, 12.5: 37.5: 50 และ 0: 50: 50

4.2 ตอนที่ 2 การปรับปรุงคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งขนมปังที่มีอัตราส่วนของแป้งข้าวฟ่างออก แป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งมันสำปะหลังแตกต่างกัน

จากการศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งขนมปังที่ผสมแป้งข้าวฟ่างออก แป้งข้าวฟ่างไม่ออกเข้ากับแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนแตกต่างกัน ได้ผลดังแสดงในตาราง 4.6 ในภาพรวมพบว่า แป้งขนมปังผสมทั้ง 5 ตัวอย่าง มีสมบัติด้านความหนืดแตกต่างจากแป้งสาลี (ควบคุม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยแป้งสาลีมี pasting temperature สูงที่สุด (84.48 องศาเซลเซียส) รองลงไปเป็นแป้งที่มีแป้งข้าวฟ่างออก แป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0: 50: 50 และ 12.5: 37.5: 50 โดยมี pasting temperature ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) คือ มีค่า 71.07 องศาเซลเซียส และ 72.62 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้การใช้แป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นแป้งที่มี pasting temperature (65-70 องศาเซลเซียส) ต่ำกว่าแป้งสาลี (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ทำให้แป้งขนมปังผสมที่ได้มีค่า pasting temperature ลดลง นอกจากนั้นยังพบว่า pasting temperature มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อใช้แป้งข้าวฟ่างออกในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น

ส่วนค่า peak viscosity ของแป้งผสมที่มีอัตราส่วนของแป้งข้าวฟ่างออก แป้งข้าวฟ่างไม่ออก และแป้งมันสำปะหลังเป็น 0: 50: 50 มีค่าสูงกว่าแป้งสาลีและอัตราส่วนแป้งอื่นๆ โดยมีค่า 207.17 RVU และมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ เมื่อมีปริมาณแป้งข้าวฟ่างออกผสมในอัตราส่วนมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะค่า peak viscosity ของแป้งข้าวฟ่างไม่ออกมีค่าสูงกว่าของแป้งสาลีและแป้งข้าวฟ่างออก (ตาราง 4.3) และการผสมแป้งข้าวฟ่างกับแป้งมันแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นแป้งที่มีความหนืดสูงกว่าทั้งแป้งสาลีและแป้งข้าวฟ่าง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ทำให้แป้งผสมสูตรดังกล่าวมีค่า peak viscosity สูงที่สุด ซึ่งผลการทดลองในทำนองเดียวกันนี้ พบในงานวิจัยของ Osungbaro *et al.* (2010) ที่รายงานว่าแป้งมันสำปะหลังมีค่า Peak viscosity (226.67 RVU) สูงกว่าแป้งข้าวฟ่าง (68.33 RVU) เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังผสมกับแป้งข้าวฟ่างในอัตราส่วน 90: 10, 80: 20 และ 70: 30 ทำให้ค่าความหนืดอยู่ระหว่างค่าของแป้งมันสำปะหลังกับแป้งข้าวฟ่าง คือ 175.50, 148.58 และ 143.08 RVU ตามลำดับ

ส่วนค่า breakdown viscosity และค่า setback ของแป้งขนมปังที่มีแป้งข้าวฟ่างอก แป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0:50:50 มีค่า 66.08 และ 114.67 RVU ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าแป้งสาลีและอัตราส่วนแป้งอื่นๆ และมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อมีปริมาณแป้งข้าวฟ่างอกผสมในอัตราส่วนมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในแป้งขนมปังผสมมีแป้งมันสำปะหลังเป็นองค์ประกอบซึ่งเมื่อได้รับความร้อนพร้อมๆ กับการกวนจะพองตัวอย่างรวดเร็ว แป้งมันสำปะหลังยังทนต่อแรงเฉือนได้น้อยกว่าแป้งสาลี ทำให้มีเม็ดแป้งถูกตัดเนื่องจากการกวนมากขึ้น ในขณะที่แป้งสาลีจะพองตัวอย่างช้าๆ และเม็ดแป้งที่ถูกตัดจากการกวนเกิดขึ้นได้น้อยกว่า (กล้านรงค์ ศรีรอต และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) และจากการทดลองของงานวิจัยนี้ (ตาราง 4.3) พบว่าแป้งข้าวฟ่างไม่ออกมีค่า setback สูงกว่าแป้งข้าวฟ่างอก จึงทำให้ค่า setback ลดลงเรื่อยๆ ในแป้งที่มีแป้งข้าวฟ่างอกเป็นส่วนผสมมากขึ้น

ตาราง 4.5 คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งขนมปังที่มีอัตราส่วนแป้งข้าวฟ่างอก แป้งข้าวฟ่างไม่ออก และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วนต่างๆ

พารามิเตอร์	แป้งสาลี	อัตราส่วนของแป้งข้าวฟ่างอก : ข้าวฟ่างไม่ออก : แป้งมันสำปะหลัง				
RVA	(ควบคุม)	50:0:50	37.5:12.5:50	25:25:50	12.5:37.5:50	0:50:50
Peak time (min)	5.49 ± 0.03 ^a	4.18±0.41 ^c	4.73±0.07 ^b	4.73 ±0.07 ^b	4.86±0.23 ^b	5.33±0.17 ^a
Pasting temperature (°C)	84.48 ± 0.51 ^a	46.20±3.75 ^e	51.00±1.04 ^d	57.60±1.80 ^c	72.62±0.86 ^b	71.07±0.03 ^b
Peak viscosity (RVU)	54.46 ± 2.41 ^b	27.94±0.55 ^d	28.67±0.93 ^d	27.97±0.67 ^d	32.84±1.01 ^c	207.17±0.85 ^a
Trough viscosity (RVU)	94.50 ± 1.34 ^b	24.47±0.31 ^d	25.5±0.80 ^{cd}	26.0±0.48 ^{cd}	28.69±1.09 ^c	141.08±3.92 ^a
Final viscosity (RVU)	68.13 ± 2.38 ^b	25.33±0.51 ^e	27.86±0.92 ^{de}	31.08±0.98 ^d	40.78±0.93 ^c	255.75±5.34 ^a
Break down (RVU)	59.96 ± 1.10 ^b	3.47 ±0.80 ^c	3.06±0.10 ^c	1.94±0.27 ^c	4.14±0.21 ^c	66.08 ±4.28 ^a
Setback (RVU)	3.62 ± 1.06 ^b	0.86 ±0.38 ^e	2.30±0.29 ^e	5.06±0.51 ^d	12.08±0.75 ^c	114.67±2.17 ^a

หมายเหตุ: a, b, c, d, e ค่าเฉลี่ยในแนวนอนเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกัน

ทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

4.3 ตอนที่ 3 คุณลักษณะและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวฟ่าง

เมื่อนำแป้งขนมปังที่มีอัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวฟ่างอก แป้งข้าวฟ่างไม่ออก และแป้งมันสำปะหลังแตกต่างกัน มาผลิตเป็นขนมปังปราศจากกลูเตน และนำไปวิเคราะห์คุณภาพด้านกายภาพเคมี ได้แก่ ลักษณะด้านเนื้อสัมผัส สีของส่วนเปลือกนอกและเนื้อใน ปริมาณแทนนิน ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมด รวมทั้งการประเมินทางประสาทสัมผัส ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังตาราง 4.6-4.9

1) คุณลักษณะของขนมปัง

ผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนและขนมปังจากแป้งสาลีด้วยเครื่อง Texture analyzer มีการรายงานเป็นค่าความแข็ง (hardness) ความเกาะติดกัน

(cohesiveness) ความเหนียวติดกัน (adhesiveness) ความยืดหยุ่น (springiness) ความเหนียวติดยืด (gumminess) และความยากง่ายในการเคี้ยว (chewiness) แสดงได้ดังตาราง 4.6

ขนมปังปราศจากกลูเตนทั้ง 5 สูตร มีค่าความแข็ง (hardness) ความยากง่ายในการเคี้ยว (chewiness) ความเกาะติดกัน (cohesiveness) และความเหนียวติดยืด (gumminess) แตกต่างจากขนมปังจากแป้งสาลี (ควบคุม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนค่าความยืดหยุ่น (springiness) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตาราง จ.13 ภาคผนวก จ) โดยสูตรที่มีการใช้แป้งข้าวฟ่างไม่ออกในปริมาณเพิ่มขึ้น มีความแข็ง (hardness) เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 24.09-43.04 นิวตัน ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hugo *et al.* (2000) ที่รายงานว่า ขนมปังที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวฟ่างออกในระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ มีความนุ่มกว่าขนมปังที่มีแป้งข้าวฟ่างไม่ออก 50 เปอร์เซ็นต์ หลังจากเก็บไว้นาน 4 วัน โดยมีค่า 150 และ 85 นิวตัน ตามลำดับ ทั้งนี้กระบวนการงอกทำให้มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น ดังนั้นขนมปังที่มีอัตราส่วนแป้งข้าวฟ่างออกมากขึ้นจึงมีความนุ่มมากขึ้น ดังเช่นงานวิจัยของ Renzetti and Arendt (2009) ที่รายงานว่า การเติมเอนไซม์โปรตีนเอส 0.01 เปอร์เซ็นต์ ในขนมปังจากข้าว ทำให้ค่าความแข็ง (hardness) ลดลงเมื่อเทียบกับขนมปังที่ไม่เติม โดยมีค่า 34.73 และ 49.76 นิวตัน ตามลำดับ

ขนมปังปราศจากกลูเตนที่มีอัตราส่วนของแป้งข้าวฟ่างออกมากขึ้น ยังมีค่าความเกาะติดกัน (cohesiveness) ความเหนียวติดยืด (gumminess) และความยากง่ายในการเคี้ยว (chewiness) ลดลง โดยมีความเกาะติดกัน (cohesiveness) อยู่ระหว่าง 1.23-3.93 ความเหนียวติดยืด (gumminess) อยู่ระหว่าง 53.23 - 95.63 นิวตัน และค่าความยากง่ายในการเคี้ยว (chewiness) อยู่ระหว่าง 187.29 - 334.80 นิวตัน ส่วนค่าความเหนียวติดกัน (adhesiveness) มีค่า -0.52 - -0.21 นิวตันวินาที และความยืดหยุ่นมีค่า 3.50 เปอร์เซ็นต์ในทุกสูตร

ตาราง 4.6 คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อในขนมปังจากแป้งสาลีและขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวฟ่าง

ขนมปัง	Hardness	Cohesiveness	Adhesiveness	Springiness ^{ns}	Gumminess	Chewiness
GSF:UGSF:CF	(N)		(N.s)	(mm)	(N)	(N.mm)
แป้งสาลี (ควบคุม)	2.39 ^e ±0.18	1.83 ^c ±0.04	-0.04 ^a ±0.01	3.50±0.00	4.37 ^e ±0.34	15.31 ^e ±1.19
50 : 0 : 50	24.09±0.60 ^d	3.93±0.09 ^a	-0.21±0.22 ^{ab}	3.50±0.00	94.79±1.61 ^a	331.88±5.62 ^a
37.5:12.5:50	24.84±2.48 ^d	3.88±0.41 ^a	-0.81±0.17 ^c	3.50±0.00	95.63±1.35 ^a	334.80±4.57 ^a
25 : 25 : 50	29.45±0.93 ^c	2.96±0.06 ^b	-0.36±0.03 ^b	3.50±0.00	87.31±2.25 ^b	305.57±8.00 ^b
12.5:37.5:50	35.64±1.30 ^b	2.22±0.10 ^c	-0.52±0.28 ^b	3.53±0.06	77.68±1.53 ^c	274.59±9.88 ^c
0 : 50 : 50	43.04±2.50 ^a	1.23±0.06 ^d	-0.30±0.09 ^{ab}	3.52±0.03	53.23±4.62 ^d	187.29±17.93 ^d

หมายเหตุ: 1. a, b, c, d, e ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT
 2. ns หมายถึง ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)
 3. GSF: แป้งข้าวฟ่างออก; UGSF: แป้งข้าวฟ่างไม่ออก; CF: แป้งมันสำปะหลัง

ผลการวิเคราะห์ค่าสีของส่วนเปลือกนอก (crust) และเนื้อใน (crumb) ของขนมปังปราศจากกลูเตนทั้ง 5 สูตรและขนมปังจากแป้งสาลี รายงานเป็นค่า L^* a^* และ b^* โดย L^* คือ ค่าความสว่าง (0 = มืด, 100 = สว่าง) a^* คือค่าสีแดง (+)/สีเขียว (−) และ b^* คือ ค่าสีเหลือง (+)/สีน้ำเงิน (−) แสดงได้ดังตาราง 4.7

เมื่อพิจารณาค่าสีของส่วนเปลือกนอก พบว่า ค่าสี a^* และ b^* ของขนมปังจากแป้งข้าวฟ่างทั้ง 5 สูตร มีความแตกต่างจากขนมปังจากแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยขนมปังจากแป้งข้าวฟ่างมีค่าสี a^* ของเปลือกนอกน้อยกว่าขนมปังจากแป้งสาลี (8.22-9.29 เปรียบเทียบกับ 10.61) และมีค่าสี b^* มากกว่า (22.09-24.93 เปรียบเทียบกับ 19.77) ส่วนค่า L^* ของขนมปังจากแป้งข้าวฟ่างมีค่าอยู่ระหว่าง 45.09-59.60 ซึ่งมีเพียงขนมปังที่ใช้แป้งข้าวฟ่างอก แป้งข้าวฟ่างไม่ออก และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 12.5:37.5:50 และ 0:50:50 เท่านั้นที่มีค่า L^* ไม่แตกต่างจากขนมปังจากแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า การใช้แป้งข้าวฟ่างอกในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ค่าความสว่าง L^* และค่า b^* มีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาค่าสีของส่วนเนื้อใน พบว่า ขนมปังจากแป้งข้าวฟ่างมีค่า L^* และ a^* แตกต่างจากขนมปังจากแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยขนมปังจากแป้งข้าวฟ่างมีค่า L^* อยู่ระหว่าง 29.88-40.85 น้อยกว่าขนมปังจากแป้งสาลีที่มีค่า L^* สูงถึง 72.40 และมีค่า a^* มากกว่าขนมปังจากแป้งสาลี (10.41-15.31 เปรียบเทียบกับ -1.89) บ่งชี้ว่า เนื้อในของขนมปังจากแป้งข้าวฟ่างมีสีออกแดงเข้มกว่าขนมปังจากแป้งสาลี สำหรับค่าสี b^* พบว่า ขนมปังที่มีอัตราส่วนแป้งข้าวฟ่างอก แป้งข้าวฟ่างไม่ออกและแป้งมันสำปะหลังเป็น 50:0:50 มีค่าน้อยที่สุด ในขณะที่ขนมปังสูตรอื่นๆ มีค่าสี b^* อยู่ในช่วง 14.01-17.23 ทั้งนี้การใช้แป้งข้าวฟ่างอกในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ค่าความสว่าง (L^*) ของเนื้อในขนมปังลดลง

ตาราง 4.7 สีของส่วนเปลือกนอกและเนื้อในของขนมปังจากแป้งสาลีและขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวฟ่าง

ขนมปัง GSF: UGSF:CF	เปลือกนอกของขนมปัง			เนื้อในของขนมปัง		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
แป้งสาลี (ควบคุม)	57.61±0.51 ^{ab}	10.61±0.19 ^a	19.77±0.03 ^c	72.40±1.77 ^a	- 1.89±0.29 ^e	15.90±0.22 ^b
50 : 0 : 50	45.09±2.82 ^d	9.29±0.38 ^b	22.23±1.37 ^b	29.88±2.42 ^e	10.41±0.07 ^d	3.50±0.13 ^d
37.5:12.5:50	46.91±3.36 ^d	8.90±0.61 ^{bc}	22.09±1.38 ^b	33.34±1.70 ^d	15.31±0.62 ^{ab}	15.37±0.88 ^b
25 : 25 : 50	51.10±1.25 ^c	8.22±0.34 ^c	24.82±0.67 ^a	35.58±0.69 ^{cd}	14.99±0.36 ^{bc}	17.23±0.55 ^a
12.5:37.5:50	55.58±0.42 ^b	8.55±0.34 ^c	24.89±0.26 ^a	36.50±0.44 ^c	15.77±0.26 ^a	14.01±0.62 ^c
0 : 50 : 50	59.60±1.20 ^a	8.70±0.83 ^{bc}	24.93±0.30 ^a	40.85±0.05 ^b	14.66±1.10 ^c	15.40±0.26 ^b

หมายเหตุ: 1. a, b, c, d ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกัน

ทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

2. GSF: แป้งข้าวฟ่างอก; UGSF: แป้งข้าวฟ่างไม่ออก; CF: แป้งมันสำปะหลัง

ตาราง 4.8 แสดงปริมาณแทนนิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และแอนโธไซยานิน ทั้งหมดของขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวจ้าว เปรียบเทียบกับขนมปังจากแป้งสาลี ซึ่งในภาพรวม พบว่า ขนมปังจากแป้งข้าวจ้าวมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพทั้ง 3 ชนิดมากกว่าขนมปังจากแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแทนนิน พบว่า ขนมปังปราศจากกลูเตนทั้ง 5 สูตรมีแทนนิน ระหว่าง 0.43-0.86 mg CE/g มากกว่าขนมปังจากแป้งสาลีที่มีแทนนินเพียง 0.13 mg CE/g โดยปริมาณแทนนินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้แป้งข้าวจ้าวไม่ออกในปริมาณเพิ่มขึ้น และขนมปังที่มีแทนนินมากที่สุดใช้แป้งข้าวจ้าวออก แป้งข้าวจ้าวไม่ออกและแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 0:50:50 สำหรับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด พบน้อยที่สุดในขนมปังจากแป้งสาลี (ควบคุม) คือ 0.95 mg GAE/g และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กับขนมปังปราศจากแป้งข้าวจ้าวทั้ง 5 สูตรที่มีสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดอยู่ระหว่าง 1.00 - 1.20 mg GAE/g โดยมีความมากที่สุดเมื่อใช้อัตราส่วนแป้งข้าวจ้าวออก แป้งข้าวจ้าวไม่ออก และแป้งมันสำปะหลัง 25:25:50 การที่ขนมปังจากแป้งข้าวจ้าวมีปริมาณแทนนินและสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดน้อยกว่าในแป้งข้าวจ้าว ส่วนหนึ่งเนื่องจากการเติมส่วนผสมอื่นๆ ลงไป ทำให้ความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ทั้ง 2 ชนิดลดลง และส่วนหนึ่งอาจมีการสลายตัวของแทนนินจากสถานะที่ใช้ในการแปรรูป โดยเฉพาะในขั้นตอนการอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสนาน 60 นาที ดังเช่นในกรณีของ Dlamini *et al.* (2007) ที่รายงานว่ากระบวนการเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดียว ที่ใช้ความเร็ว 230 รอบต่อนาที และความร้อน 150 - 160 องศาเซลเซียส ทำให้ข้าวจ้าวสายพันธุ์ต่างๆ มีปริมาณแทนนินลดลงจาก 33.6 - 49.1 เหลือ 0.4 - 0.9 mg catechin equivalents/g flour และมีปริมาณฟีนอลทั้งหมดลดลงจาก 2.0-24.5 เหลือ 1.8-6.7 mg Catechin equivalents/ g flour เนื่องจากแทนนินชนิดคอนเดนซ์ (condensed tannins) เกิด depolymerization กลายเป็น โอลิโกเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณ พบว่า ในขนมปังสูตรที่ใช้อัตราส่วนแป้ง ข้าวจ้าวออก แป้งข้าวจ้าวไม่ออก และแป้งมันสำปะหลัง 0:50:50 มีปริมาณแทนนินสูงที่สุด (0.86 mg CE/ g flour) เนื่องจากมีอัตราส่วนของแป้งข้าวจ้าวไม่ออกสูง และเมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบ ฟีนอลิกทั้งหมด จะเห็นว่าขนมปังที่ใช้อัตราส่วนแป้งข้าวจ้าวออก แป้งข้าวจ้าวไม่ออก และแป้งมันสำปะหลัง 25: 25: 50 มีปริมาณสูงที่สุด (1.20 mg GAE/g flour) อาจเนื่องมาจากมีอัตราส่วนของแป้งข้าวจ้าวออกและแป้งข้าวจ้าวไม่ออกเท่ากัน ซึ่งในแป้งข้าวจ้าวไม่ออกมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูง และแป้งข้าวจ้าวออกมีปริมาณแอนโธไซยานินที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลิกอยู่สูง ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงไปด้วย

ตาราง 4.8 ปริมาณแทนนิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และแอนโธไซยานินทั้งหมดของขนมปังจากแป้งสาลีและขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวจ้าว

ขนมปัง GSF:UGSF:CF	แทนนิน (mg CE/g)	สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g)	แอนโธไซยานินทั้งหมด (mg/g)
แป้งสาลี (control)	0.13 ± 0.04 ^c	0.92 ± 0.01 ^e	0.16×10 ⁻² ± 0.18 ^f
50 : 0 : 50	0.43 ± 0.04 ^b	1.09 ± 0.03 ^{bc}	1.07×10 ⁻² ± 0.00 ^a
37.5:12.5:50	0.52 ± 0.07 ^b	1.16 ± 0.03 ^{ab}	1.00×10 ⁻² ± 0.38 ^b
25 : 25 : 50	0.54 ± 0.04 ^b	1.20 ± 0.02 ^a	0.94×10 ⁻² ± 0.18 ^c
12.5:37.5:50	0.58 ± 0.01 ^b	1.03 ± 0.01 ^{cd}	0.89×10 ⁻² ± 0.19 ^d
0 : 50 : 50	0.86 ± 0.18 ^a	1.00 ± 0.01 ^{de}	0.80×10 ⁻² ± 0.56 ^e

หมายเหตุ: 1. a, b, c, d, e ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

2. GSF: แป้งข้าวจ้าวออก; UGSF: แป้งข้าวจ้าวไม่ออก; CF: แป้งมันสำปะหลัง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอนโธไซยานินในตาราง 4.8 แสดงให้เห็นว่า ขนมปังจากแป้งข้าวจ้าวทั้ง 5 สูตร มีแอนโธไซยานินมากกว่าขนมปังจากแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) คือ มีค่าระหว่าง 0.80×10^{-2} - 1.07×10^{-2} mg/g เทียบกับ 0.16×10^{-2} mg/g ทั้งนี้การใช้แป้งข้าวจ้าวออก แป้ง ข้าวจ้าวไม่ออก และแป้งมันสำปะหลัง ในอัตราส่วน 50:0:50 ทำให้ขนมปังมีแอนโธไซยานินสูงที่สุด และเมื่อลดปริมาณการใช้แป้งข้าวจ้าวออกในแป้งผสม ทำให้ขนมปังที่ได้มีปริมาณแอนโธไซยานินลดลง ปริมาณแอนโธไซยานินทั้งหมดในขนมปังมีน้อยกว่าแป้งข้าวจ้าว เนื่องจากการเติมส่วนผสมอื่นๆ ลงไปในขนมปัง นอกจากนี้แอนโธไซยานินจะสลายตัวได้เร็วขึ้นในกระบวนการแปรรูปอาหาร เช่น การใช้อุณหภูมิสูง ภาวะที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลสูง พีเอช กรดอะมิโน กรดแอสคอร์บิก และภาวะที่มีออกซิเจน โดยเกิดปฏิกิริยาคอนเดนเซชัน (condensation) ของแอนโธไซยานินกับสารประกอบเหล่านี้ (นิธิยา รัตนพานนท์, 2549) ดังเช่นงานวิจัยของ Hiemori *et al.* (2009) ที่ชี้ให้เห็นว่า cyanidin-3-glucoside จะถูกสลายด้วยความร้อน โดยพบว่าปริมาณแอนโธไซยานินใน black rice (*Oryza sativa* L. japonica var. SBR) ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบใช้ความดันมีปริมาณ cyanidin-3-glucoside ลดลงมากที่สุด 79.8 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ การหุงข้าว ลดลง 74.2 เปอร์เซ็นต์

4.4 ตอนที่ 4 ผลการปรับปรุงคุณลักษณะและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวจ้าวโดยใช้ผงไข่ขาว

ในการปรับปรุงคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน ผู้วิจัยได้ทดลองเติมแซนแทนกัม หรือ เคซีน หรือ ผงไข่ขาวปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ลงไปในแป้งขนมปังผสมที่มีแป้งข้าวจ้าวออก แป้งข้าวจ้าวไม่ออก และแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 25: 25: 50 (สูตรที่มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดสูงสุด) พบว่า ขนมปังที่เติมแซนแทนกัม มีความแน่นแข็งมาก ขนมปังที่เติมเคซีนมีการขึ้นฟู

ได้ดีขณะอบ แต่เนื้อด้านในจะกลวงหลังอบ ส่วนขนมปังที่เติมไข่ขาวขึ้นฟูเพิ่มขึ้น และคงตัวหลังอบ ดังนั้นจึงศึกษาผลของการเติม ผงไข่ขาวใน 3 ระดับ คือ 3.5, 6.5 และ 13 เปอร์เซ็นต์ของแป้ง ที่มีต่อคุณลักษณะและการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวฟ่าง ได้ผลแสดงในตาราง 4.10 - 4.14

1) คุณลักษณะของขนมปัง

การเติมผงไข่ขาวในปริมาณแตกต่างกัน มีผลต่อปริมาตรจำเพาะ (specific volume) และความสูงของขนมปังจากแป้งข้าวฟ่างหลังการอบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงได้ดังตาราง 4.10

ขนมปังที่ไม่เติมผงไข่ขาวมีปริมาตรจำเพาะน้อยที่สุด คือ $1.4 \text{ cm}^3/\text{g}$ ในขณะที่การเติมผงไข่ขาวทำให้ปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้น 1.6-1.9 เท่า ขึ้นกับปริมาณผงไข่ขาวที่เติม โดยมีค่ามากที่สุดเป็น $2.75 \text{ cm}^3/\text{g}$ ในสูตรที่เติมผงไข่ขาวระดับสูงสุด 13 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแป้ง ส่วนการเติมผงไข่ขาว 3.5 และ 6.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแป้ง มีปริมาตรจำเพาะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

ความสูงของขนมปังหลังอบ พบว่า มีความสัมพันธ์ไปในทางเดียวกับปริมาตรจำเพาะ โดยขนมปังที่ไม่เติมผงไข่ขาวมีความสูงน้อยที่สุด (3.93 เซนติเมตร) และแตกต่างจากขนมปังที่เติมไข่ขาวทั้ง 3 ระดับอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) การเติมผงไข่ขาวในปริมาณมากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ความสูงของขนมปังเพิ่มขึ้น ซึ่งสูตรที่มีการเติมผงไข่ขาว 13 เปอร์เซ็นต์ มีความสูงสูงที่สุด (6.40 เซนติเมตร)

การเพิ่มขึ้นของปริมาตรและความสูงของขนมปังที่เติมผงไข่ขาว เนื่องมาจากความสามารถของโปรตีนแอลบูเมน (egg albumen) ในการเกิดโฟมได้ (นิธิยา รัตนพานนท์, 2549) โดยเมื่อตีไข่ขาวจะเกิดฟองซึ่งประกอบด้วยฟองอากาศเล็กๆ จำนวนมาก ซึ่งแต่ละฟองจะถูกล้อมรอบด้วยแผ่นโปรตีนจากไข่ การตีไข่ด้วยเครื่องและการสัมผัสของแผ่นโปรตีนบางๆ กับอากาศ จะทำให้โปรตีนบางส่วนแข็งตัวและทำให้ฟองคงตัวต่อการอบ ฟองอากาศจะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน และแผ่นโปรตีนจะยืดหยุ่นทำให้ยืดออกได้ เมื่อส่วนผสมหรือไข่ขาวที่ตีแข็งได้รับอุณหภูมิสูง โปรตีนจะแข็งตัวอย่างทั่วถึง จะสูญเสียความยืดหยุ่นและจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่แข็งของผลิตภัณฑ์ (จิตรธนา แจ่มเมฆ และอรอนงค์ นัยวิกุล, 2539)

ตาราง 4.9 ปริมาตรจำเพาะและความสูงของขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมผงไข่ขาว 3 ระดับ

ผงไข่ขาว (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาตรจำเพาะ (cm^3/g)	ความสูง (cm)
0 (control)	1.45 ± 0.10^c	3.93 ± 0.06^d
3.5	2.29 ± 0.06^b	4.90 ± 0.00^c
6.5	2.44 ± 0.12^b	5.67 ± 1.53^b
13	2.75 ± 0.29^a	6.40 ± 1.00^a

หมายเหตุ: a, b, c ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ผลการวิเคราะห์ค่าสีของส่วนเปลือกนอกและส่วนเนื้อในของขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมผงไข่ขาว 3 ระดับ แสดงดังตาราง 4.11

การเติมผงไข่ขาวมีผลต่อค่าความสว่าง (L^*) และค่าสี a^* ของเปลือกนอกของขนมปังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่า การเติมผงไข่ขาวมากขึ้น มีแนวโน้มทำให้ค่าความสว่าง (L^*) ลดลง และค่าสี a^* เพิ่มมากขึ้น ซึ่งขนมปังที่เติมผงไข่ขาว 13 เปอร์เซ็นต์ มีค่า L^* ต่ำที่สุด (34.57) และมีค่า a^* สูงที่สุด (18.71) หรืออาจกล่าวได้ว่า มีสีแดงคล้ำกว่าตัวอย่างอื่นๆ เนื่องจากโปรตีนจะทำปฏิกิริยากับน้ำตาลในสภาวะที่มีความร้อนเกิดเป็นสารสีน้ำตาล หรือเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard browning) (Dimuzio, 2009) จึงทำให้เปลือกนอกของขนมปังมีสีคล้ำมากขึ้นเมื่อเติมผงไข่ขาวมากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าสี b^* ไม่ได้รับผลกระทบจากการเติมผงไข่ขาวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีค่าระหว่าง 18.67 - 23.92

ตาราง 4.10 สีของส่วนเปลือกนอกและเนื้อในของขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมผงไข่ขาว 3 ระดับ

ผงไข่ขาว (เปอร์เซ็นต์)	เปลือกนอกของขนมปัง			เนื้อในของขนมปัง		
	L^*	a^*	b^{*ns}	L^*	a^*	b^*
0	51.1±1.26 ^a	8.22±0.34 ^d	24.82±0.67	35.58±0.69 ^c	14.99±0.36 ^a	17.23±0.55 ^a
3.5	43.89±0.59 ^b	14.26±0.27 ^c	20.86±0.94	40.40±2.71 ^b	12.58±1.12 ^b	11.14±4.99 ^a
6.5	40.64±0.41 ^c	16.16±0.11 ^b	23.92±1.66	43.63±0.40 ^b	11.76±0.36 ^b	14.10±4.63 ^a
13	34.57±1.40 ^d	18.71±0.25 ^a	18.67±6.23	48.79±1.42 ^a	9.91±0.62 ^c	15.25±2.60 ^a

หมายเหตุ: 1. a, b, c, d ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

2. ns หมายถึง ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

3. L^* = ความสว่าง (0 = มืด, 100 = สว่าง); a^* = สีแดง/สีเขียว (+ = สีแดง, - = สีเขียว); b^* = สีเหลือง/สีน้ำเงิน (+ = สีเหลือง, - = สีน้ำเงิน)

ค่าความสว่าง (L^*) ค่าสี a^* และค่าสี b^* ของเนื้อในขนมปังที่เติมผงไข่ขาวมีความแตกต่างจากขนมปังที่ไม่เติมผงไข่ขาวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่า L^* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 35.58 เป็น 48.79 ตามปริมาณผงไข่ขาวที่มากขึ้นจาก 0 เป็น 13 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าสี a^* มีแนวโน้มลดลงจาก 14.99 เป็น 9.91 ในขณะที่ค่าสี b^* ของขนมปังที่เติมผงไข่ขาวทั้ง 3 ระดับมีค่าน้อยกว่า ขนมปังที่ไม่เติมไข่ขาว โดยมีค่าระหว่าง 11.14-15.25 เทียบกับ 17.23 อย่างไรก็ตามค่าทั้งหมดมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อในของขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมผงไข่ขาวแตกต่างกัน 3 ระดับ พบว่า ขนมปังที่เติมผงไข่ขาว 13 เปอร์เซ็นต์มีค่าความแน่นแข็ง (hardness) ความเกาะติดกัน (cohesiveness) ความเหนียวติดกัน (adhesiveness) ความยืดหยุ่น (springiness) ความเหนียวติดยืด (gumminess) และความยากง่ายในการเคี้ยว (chewiness) ต่ำที่สุด โดยมีค่า 17.69 นิวตัน, 2.39, -0.03 นิวตันวินาที, 2.13 เปอร์เซ็นต์, 42.30 นิวตัน และ 90.23 นิวตัน

ตามลำดับ (ตาราง 4.12) ทั้งนี้การเติมผงไข่ขาวช่วยปรับปรุงคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของขนมปังได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อใช้มากขึ้นจาก 0 เป็น 13 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มช่วยลดค่าความแน่นแข็ง (hardness) ความยืดหยุ่น (springiness) และความยากง่ายในการเคี้ยวลง (chewiness) แต่เพิ่มค่าความเหนียวติดยืต (gumminess) ให้มากขึ้น

ตาราง 4.11 คุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเนื้อในของขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมผงไข่ขาว 3 ระดับ

ผงไข่ขาว (เปอร์เซ็นต์)	Hardness (N)	Cohesiveness	Adhesiveness (N.s)	Springiness (mm)	Gumminess (N)	Chewiness (N.mm)
0 (ควบคุม)	29.40±0.93 ^a	2.96±0.06 ^c	-0.36±0.03 ^b	3.5±0.00 ^a	87.31±2.25 ^b	305.57±8.00 ^a
3.5	23.01±1.38 ^b	4.86±0.16 ^a	-0.04±0.00 ^a	2.33±0.01 ^b	111.67±3.24 ^b	260.50±5.20 ^b
6.5	20.21±1.14 ^c	3.66±0.18 ^b	-0.12±0.02 ^a	2.30±0.04 ^b	73.95±4.56 ^c	170.29±11.49 ^c
13	17.69±0.63 ^d	2.39±0.10 ^d	-0.03±0.02 ^a	2.13±0.03 ^c	42.30±1.33 ^d	90.23±2.75 ^d

หมายเหตุ: a, b, c, d ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

2) ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังที่เติมไข่ขาว ใช้ผู้ทดสอบทั้งฝึกฝนจำนวน 20 คน ทำการทดสอบความชอบในด้านลักษณะปรากฏของรูอากาศ กลิ่นหอมของขนมปัง สีของเนื้อใน รสชาติ ความนุ่มเมื่อกัดดู และความชอบโดยรวม โดยใช้แบบทดสอบ Hedonic scale (9 = ชอบมากที่สุด; 1=ไม่ชอบมากที่สุด) ได้ผลแสดงดังตาราง 4.13

แป้งขนมปังที่ใช้อัตราส่วนของแป้งข้าวฟ่างอก แป้งข้าวฟ่างไม่ออก และแป้งมันสำปะหลังเป็น 25: 25: 50 เมื่อเติมผงไข่ขาวลงไป 3.5, 6.5 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้รับคะแนนความชอบในทุกด้านเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสูตรที่ไม่เติมผงไข่ขาวเลย มีคะแนนความชอบอยู่ระหว่าง 3.75 - 4.3 คะแนน (ไม่ชอบปานกลาง-ไม่ชอบเล็กน้อย) ส่วนสูตรที่เติมผงไข่ขาว 3.5, 6.5 และ 13 เปอร์เซ็นต์ มีคะแนนความชอบอยู่ระหว่าง 4.85 - 6.15 คะแนน (ไม่ชอบเล็กน้อย-ชอบเล็กน้อย) 4.85 - 6.55 คะแนน (ไม่ชอบเล็กน้อย-ชอบเล็กน้อย) และ 5.75 - 7.25 คะแนน (เฉยๆ-ชอบปานกลาง) ตามลำดับ ขนมปังที่เติมไข่ขาว 13 เปอร์เซ็นต์ ได้รับคะแนนความชอบในด้านกลิ่นหอม สีของเนื้อใน และการยอมรับโดยรวมมากที่สุด ส่วนในด้านลักษณะปรากฏ (รูอากาศ) สูตรที่เติมผงไข่ขาว 6.5 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ส่วนสูตรที่เติมผงไข่ขาวมีความนุ่มเมื่อกัดดูแตกต่างกับสูตรที่ไม่เติมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่การเติมผงไข่ขาวทั้ง 3 ระดับ ทำให้ขนมปังได้รับคะแนนด้านความนุ่มเมื่อกัดดูไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตาราง 4.12 ผลประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมผงไข่ขาว 3 ระดับ

	ผงไข่ขาว (เปอร์เซ็นต์)			
	0 (ควบคุม)	3.5	6.5	13
ลักษณะปรากฏ(รูอากาศ)	3.75±2.17 ^c	5.90±1.55 ^b	6.55±1.46 ^{ab}	7.25±1.55 ^a
กลิ่นหอม	4.3±1.97 ^c	5.10±1.51 ^b	5.25±1.94 ^b	6.30±1.62 ^a
สีของเนื้อใน	4.05±1.96 ^c	6.15±1.04 ^b	6.40±1.04 ^b	7.15±0.98 ^a
รสชาติ	3.45±1.88 ^c	4.85±2.01 ^b	4.85±2.01 ^b	5.75±1.55 ^a
ความนุ่มเมื่อกัดดู	3.45±2.01 ^b	6.10±1.97 ^a	5.80±2.06 ^a	6.40±1.66 ^a
การยอมรับโดยรวม	3.80±1.61 ^c	5.55±1.76 ^b	5.75±1.72 ^b	6.70±1.52 ^a

หมายเหตุ: a, b, c ค่าเฉลี่ยในแนวนอนเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

3) สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแทนนิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดและแอนโธไซยานินในขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมผงไข่ขาว 6.5 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังตาราง 4.14 จะเห็นได้ว่า ปริมาณสารออกฤทธิ์ในขนมปังที่เติมผงไข่ขาวมีน้อยกว่าขนมปังที่ไม่เติมผงไข่ขาว (ควบคุม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีปริมาณแทนนิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และแอนโธไซยานิน 0.18 mg CE/g , 0.52 mg GAE/g และ 8.13 mg/kg ตามลำดับ สำหรับปริมาณแทนนินมีค่าน้อยกว่าในขนมปังควบคุม 3 เท่า ซึ่งอาจเกิดจากการอบขนมปังที่ความร้อนสูง ทำให้แทนนินชนิดคอนเดนส์ (condensed tannins) เกิด depolymerization เป็นโอลิโกเมอร์น้ำหนักโมเลกุลต่ำ และโปรตีนที่เสถียรจากความร้อนมีผลทำให้โครงสร้างของโปรตีนคลายออก แทนนินจึงเข้าทำปฏิกิริยากับโปรตีนได้ง่ายขึ้น และเมื่อปริมาณโปรตีนจากผงไข่ขาวมากขึ้นจึงจับกับแทนนินได้มาก ทำให้ปริมาณแทนนินลดลงมาก

ตาราง 4.13 ปริมาณแทนนิน สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด และแอนโธไซยานินทั้งหมดในขนมปังปราศจากกลูเตนที่เติมผงไข่ขาว 6.5 เปอร์เซ็นต์

เติมผงไข่ขาว (เปอร์เซ็นต์)	แทนนิน (mg CE/g)	สารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด (mg GAE/g)	แอนโธไซยานินทั้งหมด (mg/kg)
0 (ควบคุม)	0.54± 0.04 ^a	1.20±0.05 ^a	9.46±0.18 ^a
6.5	0.18 ± 0.04 ^b	0.52±0.01 ^b	8.13±0.21 ^b

หมายเหตุ: a, b ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งเดียวกันที่มีอักษรกำกับเหมือนกันแสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี t-test