

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

ตอนที่ 1 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ของแป้งข้าว และคุณลักษณะของขนมปังจากแป้งข้าว

1) เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว 4 ชนิด ได้แก่ แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวไม่ออก แป้งข้าวงอก และแป้งข้าวงอกที่นำไปอบ แสดงดังตาราง 4.1 พบว่าแป้งข้าวทั้ง 4 ชนิด มีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยปริมาณความชื้น และโปรตีนของแป้งข้าวสาลีมีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.53 และ 13.20 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณความชื้นมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 5.38-9.53 และปริมาณโปรตีนมีค่าระหว่างร้อยละ 6.94-13.20 โดยแป้งข้าวงอกที่นำไปอบมีปริมาณความชื้นและปริมาณโปรตีนต่ำที่สุด ในทางตรงกันข้ามปริมาณ ไขมันและเถ้าของแป้งข้าวงอกมีค่าสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 2.85 และ 1.44 ตามลำดับ โดยปริมาณไขมัน มีค่าระหว่างร้อยละ 0.76-2.85 ส่วนปริมาณเถ้ามีค่าระหว่างร้อยละ 0.46-1.44

ตาราง 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว (ร้อยละ)

ตัวอย่าง	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า
แป้งข้าวสาลี	9.53 ± 0.102^a	13.20 ± 0.425^a	0.76 ± 0.056^c	0.46 ± 0.011^c
แป้งข้าวไม่ออก	7.82 ± 0.064^b	7.06 ± 0.223^b	2.79 ± 0.076^a	1.39 ± 0.169^b
แป้งข้าวงอก	6.86 ± 0.198^c	7.21 ± 0.494^b	2.85 ± 0.069^a	1.44 ± 0.005^a
แป้งข้าวงอกยับยั้งเอนไซม์	5.38 ± 0.468^d	6.94 ± 0.302^b	2.56 ± 0.114^b	1.41 ± 0.027^b

^a แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวตั้งเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

ผลการทดลองวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวทั้ง 4 ชนิด ดังตาราง 4.1 พบว่า แป้งข้าวงอกจะมีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าแป้งสาลีเนื่องจากในแป้งสาลีมีโปรตีนชนิดไกลอะดีนกับกลูเตนิน แป้งข้าวงอกมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าแป้งข้าวไม่ออกและแป้งข้าวงอกที่นำไปอบซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Moongngarm และ Saetung (2010) พบว่า ในระหว่างกระบวนการงอกข้าวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของข้าวทำให้ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น และ Watanabe และคณะ (2004) พบว่า แป้งข้าวกล้องงอกมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าแป้งข้าวกล้องไม่ออก และปริมาณเถ้าของแป้งข้าวกล้องงอกจะมีค่าสูงกว่าแป้งข้าวกล้องไม่ออก ส่วน Ohtsubo และคณะ (2005) พบว่า ข้าวกล้องไม่ออกจะมีปริมาณ ความชื้น โปรตีน และไขมัน สูงกว่าแป้งข้าวกล้องงอก ขณะที่ข้าวงอกเมื่อนำมายับยั้งเอนไซม์โดยการให้ความร้อนทำให้ปริมาณโปรตีนลดต่ำลง เนื่องจากอุณหภูมิสูงเกินไป ทำให้เอนไซม์เสียสภาพธรรมชาติ

2) ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และกิจกรรมแอลฟาอะไมเลส

ผลของการศึกษาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และสารประกอบฟีนอลิกของแป้งทั้ง 4 ชนิด แสดงดังตาราง 4.2 จากตารางพบว่า

แป้งข้าวงอกมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่นๆ เท่ากับ 82 mg/100g อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของแป้งข้าวมียะระหว่าง 23-82 (mg/100g) และแป้งข้าวไม่งอกมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์น้อยที่สุด และเมื่อเทียบกับแป้งข้าวชนิดอื่นๆ

จากผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของแป้งข้าว ทั้ง 4 ชนิด ดังตาราง 4.2 พบว่า ข้าวที่ผ่านการงอกจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น สอดคล้องงานวิจัยของ อนุชิตา มุ่งงาม และณฐนนท์ ทรายู (2549) พบว่า ในกระบวนการงอกจะมีการสร้างเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสเกิดขึ้นในส่วนคัพภะ และเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสมีผลกระตุ้นให้เชื้อหุ้มเนื้อเมล็ดผลิตเอนไซม์ชนิดอื่นๆ เข้าไปทำการย่อยสลายสารอาหารต่างๆ ที่สะสมอยู่ในส่วนในเนื้อเมล็ด เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสสารได้เป็นน้ำตาลรีดิวซ์ชนิดต่างๆ

ส่วนกิจกรรมของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสระหว่างการงอกของแป้งข้าวยางาน ดังตาราง 4.2 พบว่า กิจกรรมของแป้งข้าวงอกมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 18.85 CU/g ของแป้ง ขณะที่กิจกรรมของเอนไซม์จากแป้งข้าวสาลี และแป้งข้าวไม่งอกมีกิจกรรมเพียงเล็กน้อย เท่ากับ 0.02 CU/g ของแป้งกิจกรรมของอะไมเลสของแป้งข้าวงอกที่นำไปอบตรวจไม่พบ เนื่องจากตัวอย่างแป้งข้าว ถูกเตรียมโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง เป็นสาเหตุให้ยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Iwasaki และ Tani (1966) พบว่า เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจะไม่มีกิจกรรมเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 80 องศาเซลเซียสนาน 1 ชั่วโมง

ตาราง 4.2 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และแอลฟาอะไมเลสของแป้งข้าว

ชนิดของแป้ง	น้ำตาลรีดิวซ์ (mg/100g)	แอลฟาอะไมเลส (CU/g flour)
แป้งข้าวสาลี	23 ± 0.02 ^d	0.02 ± 0.00 ^c
แป้งข้าวไม่งอก	35 ± 0.03 ^c	0.02 ± 0.00 ^c
แป้งข้าวงอก	82 ± 0.40 ^a	18.85 ± 0.50 ^b
แป้งข้าวงอกที่นำไปอบ	75 ± 0.00 ^b	Not found

^a แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวดังเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

หมายเหตุ : CU/g: ceralpha units / g flour

3) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก แคมมาออริซานอล และแอลฟาโทโคเฟอรอล

จากการทดลองหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิก แคมมาออริซานอลและปริมาณโทโคเฟอรอลของแป้งทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวไม่งอก แป้งข้าวงอก และแป้งข้าวงอกยับยั้งเอนไซม์ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงดังตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก แคมมาออริซานอลและแอลฟาโทโคเฟอรอลของแป้งข้าว

ชนิดของแป้ง	สารประกอบฟีนอลิก (mg GAE/100g)	แคมมาออริซานอล (mg/100g)	แอลฟาโทโคเฟอรอล (mg/100g)
แป้งข้าวสาลี	98.1 ± 0.000 ^c	5 ± 0.01 ^c	0.07 ± 0.06 ^d
แป้งข้าวไม่งอก	125.2 ± 0.022 ^b	317 ± 0.58 ^b	2.64 ± 0.23 ^c
แป้งข้าวงอก	135.9 ± 0.036 ^a	389 ± 0.37 ^a	3.84 ± 0.20 ^a
แป้งข้าวงอกที่นำไปอบ	125.8 ± 0.003 ^b	344 ± 0.35 ^{ab}	3.05 ± 0.15 ^b

^a แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวตั้งเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

แป้งข้าวงอกมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิก สูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งชนิดอื่นๆ เท่ากับ 135.9 mgGAE/100g อย่างไรก็ตามปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของแป้งข้าวมีค่าอยู่ระหว่าง 98.1-135.9 mgGAE/100g และเมื่อเทียบกับแป้งข้าวชนิดอื่นๆ แป้งข้าวสาลีมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกน้อยที่สุด

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบฟีนอล ซึ่งจะแตกต่างกันตามสายพันธุ์โดยปริมาณสารประกอบฟีนอลในข้าวกล้องงอกและข้าวกล้องจะมีปริมาณสูงกว่าข้าวขาวเพราะส่วนใหญ่จะอยู่ในชั้นรำของเมล็ดข้าว (Shallan et al, 2010)

ปริมาณแคมมาออริซานอลจากแป้งข้าวงอกมีปริมาณสูงที่สุด เท่ากับ 317 mg/100g เมื่อเทียบกับแป้งชนิดอื่น เนื่องจากในข้าวที่ผ่านการงอกจะมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิดรวมถึงแคมมาออริซานอล และแอลฟาโทโคเฟอรอล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Moongngarm และ Saetung (2010) พบว่า ข้าวเหนียว กข 6 ที่ผ่านการงอกทั้งเปลือกมีปริมาณแคมมาออริซานอลสูงกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการงอกและข้าวกล้องงอก (66 mg/100g – 106 mg/100g) ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการงอก ส่วนแอลฟาโทโคเฟอรอลของแป้งมีค่าระหว่าง 0.07-3.84 mg/100g ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chotimargorn และคณะ (2005) พบว่า ข้าวเหนียว กข 6 ในข้าวไม่งอก (UGR), ข้าวกล้อง (GBR), ข้าวเปลือกงอก (GRR) และ แป้งข้าวเปลือกงอก (GRP) มีปริมาณแอลฟาโทโคเฟอรอลเท่ากับ 0.93, 0.86, 1.36 และ 1.50 mg/100g ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโทโคเฟอรอลขึ้นอยู่กับชนิดของสายพันธุ์ของข้าว และวิธีการในการวิเคราะห์

4) การศึกษาคุณสมบัติด้านความหนืด

ผลของการวัดคุณสมบัติด้านความหนืด ได้แก่ ความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Trough) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (Breakdown) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (Setback) เวลาในการให้ค่าความหนืดสูงสุด (Peak time (min)) และอุณหภูมิแป้งเปียก (Pasting temperature (°C)) ผลของคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าวทั้ง 4 ชนิด แสดงดังตาราง 4.4 พบว่า

แป้งข้าวสาลีมีความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ความหนืดต่ำสุด (Trough) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด (Breakdown) ความหนืดสุดท้าย (Final viscosity) ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (Setback) เวลาในการให้ค่าความหนืดสูงสุด (Peak time (min)) และอุณหภูมิแป้งเปียก (Pasting temperature (องศาเซลเซียส)) สูงที่สุดเท่ากับ 154.47 95.83 58.72 170.45 และ 74.61 (RVU), 5.58 (min), 84.77 (องศาเซลเซียส) ตามลำดับ

แป้งข้าวไม่งอก (90.20 RVU) และแป้งข้าวงอก (89.72 RVU) มีความหนืดสูงสุดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่แป้งข้าวงอกยับยั้งเอนไซม์มีความหนืดสูงสุด ต่ำที่สุด เท่ากับ 25.59 RVU และในทำนองเดียวกันค่าความหนืดต่ำสุดของแป้งข้าว อยู่ระหว่าง 24.22-199.97 RVU และแป้งข้าวงอกยับยั้งเอนไซม์มีค่าความหนืดต่ำสุด ต่ำที่สุด ความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด ของแป้งข้าวไม่งอกและแป้งข้าวงอกมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่แป้งข้าวไม่งอกมีค่าสูงกว่าแป้งข้าวงอก ในทำนองเดียวกันความหนืดสุดท้าย ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด เวลาในการให้ค่าความหนืดสูงสุด และอุณหภูมิแป้งเปียก ของแป้งข้าวไม่งอกและแป้งข้าวงอกมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.36-58.72, 24.69-170.45 และ 0.47-74.61 RVU, 2.98-5.58 min และ 0-84.77 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ส่วนแป้งข้าวงอกที่นำไปอบมีค่าความหนืดสุดท้าย ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด เวลาในการให้ค่าความหนืดสูงสุด และมีอุณหภูมิแป้งเปียก ต่ำที่สุด เนื่องจากกระบวนการอบแห้งแป้งข้าวงอกที่นำไปอบจะถูกลดอุณหภูมิและเอนไซม์และเม็ดแป้งของอะไมโลสเพื่อยับยั้งเอนไซม์ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (Anderson et al, 2002) และเมื่อเทียบกับข้าวนี้ พบว่าการนี้ทำให้เกิดเจลลาทีนซ์และก่อให้เกิดการสูญเสียความหนืด (Panchan และ Naivikul, 2009) และแป้งข้าวงอกมีอุณหภูมิแป้งเปียกต่ำกว่าแป้งข้าวสาลีและแป้งข้าวไม่งอกเนื่องจากในกระบวนการอบมีการผลิตเอนไซม์เข้าไปสลายสารอาหารต่างๆ รวมทั้งเนื้อในเมล็ดแป้ง ทำให้มีอุณหภูมิแป้งเปียก ลดลงเท่ากับ 70.22 องศาเซลเซียส

ตาราง 4.4 คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าว

Pasting behaviour (RVU)	ชนิดของแป้ง			
	แป้งข้าวสาลี	แป้งข้าวไม่งอก	แป้งข้าวงอก	แป้งข้าวงอกที่นำไปอบ
Peak viscosity	154.47±2.19 ^a	90.20±3.83 ^b	89.72±7.66 ^b	25.59±0.52 ^c
Trough	95.83±1.74 ^a	73.72±2.30 ^b	72.25±3.87 ^b	24.22±0.29 ^c
Breakdown	58.72±2.17 ^a	16.47±1.87 ^b	17.47±3.83 ^b	1.36±.27 ^c
Final viscosity	170.45±3.45 ^a	87.69±3.36 ^b	86.64±4.86 ^b	24.69±.34 ^c
Setback	74.61±1.98 ^a	13.97±1.18 ^b	14.39±1.11 ^b	0.47±0.05 ^c
Peak time (min)	5.58±0.19 ^a	4.04±.075 ^b	4.09±0.17 ^b	2.98±0.08 ^c
Pasting temperature (°C)	84.77±0.03 ^a	70.77±0.45 ^b	70.22±0.85 ^b	24.33±0.08 ^c

^aแสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c) ในแนวนอนเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

5) คุณลักษณะของขนมปังจากแป้งข้าว

ขนมปังมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามชนิดของแป้งที่ใช้ โดยขนมปังจากแป้งสาลีจะมีสีขาว มีรูปร่างกลม เนื้อสัมผัสนุ่ม ยืดหยุ่นเนื่องจากมีโปรตีนชนิดไกลอะดินและกลูเตนินที่ให้ลักษณะเหนียวและยืดหยุ่น ขนมปังจากแป้งข้าวไม่งอกจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสแข็ง มีรูปร่างกลม ไม่มีความนุ่มเหนียว ส่วนขนมปังจากแป้งข้าวงอกและแป้งข้าวที่นำไปอบมีลักษณะค่อนข้างสีเหลือง โปร่งอากาศใหญ่ นุ่ม ผิวหน้ายุบ จึงทำให้ไม่มีลักษณะของขนมปัง (ดังตาราง 4.5)

(1) ค่าสีของขนมปัง

ผลของการทดสอบคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ มีการรายงานเป็นค่า L^* a^* และ b^* โดยค่า L^* เป็นค่าความมืด-ความสว่าง ปกติมีค่าตั้งแต่ 0-100 (ค่า 0 บ่งบอกถึงความมืด และค่า 100 บ่งบอกถึงความสว่าง) ค่า a^* เป็นค่าสีแดง-เขียว (ค่าสีแดงเมื่อมีค่าเป็นบวก และค่าสีเขียวเมื่อมีค่าเป็นลบ) ส่วนค่า b^* เป็นค่าสีเหลือง-น้ำเงิน (ค่าสีเหลืองเมื่อมีค่าเป็นบวกและค่าสีน้ำเงินเมื่อมีค่าเป็นลบ) จากผลการทดลองการวัดค่าสีในส่วนของเนื้อเปลือกนอก (crust) และเนื้อเปลือกใน (crumb) ของขนมปังโดย

ตาราง 4.5 ลักษณะของขนมปังของแป้งข้าว

สูตร	รูป	ลักษณะ
แป้งสาลี		โตมีการพองตัวมาก แป้งมีลักษณะ ยืดหยุ่น นุ่ม
แป้งข้าวไม่ออก		โตมีการพองตัวเล็กน้อย แป้งมีลักษณะ เหนียว และ
แป้งข้าวออก		โตมีการพองตัวเล็กน้อย แป้งเหนียว และ และแฉะ
แป้งข้าวออกที่นำไปอบ		โตมีการพองตัวเล็กน้อย แป้งเหนียว และ

ตาราง 4.6 ค่าสีของขนมปังจากแป้งข้าว

ชนิดแป้ง	crust			crumb		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
1	42.60±1.97 ^c	15.34±1.66 ^a	26.10±1.79 ^c	62.87±3.40 ^a	0.42±0.06 ^c	24.35±1.57 ^b
2	47.28±1.57 ^b	11.57±1.09 ^b	33.45±0.56 ^a	47.25±1.71 ^c	8.38±1.25 ^a	27.18±1.60 ^a
3	47.03±1.03 ^b	6.24±0.91 ^d	27.19±0.72 ^c	45.99±.98 ^c	8.14±0.65 ^a	19.94±0.66 ^c
4	51.61±0.98 ^a	7.75±0.46 ^c	30.31±0.30 ^b	54.22±0.52 ^b	7.19±0.34 ^b	20.66±0.32 ^c

^a แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวนอนเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

หมายเหตุ : 1= ขนมปังจากแป้งข้าวสาลี, 2= ขนมปังจากแป้งข้าวไม่งอก

3= ขนมปังจากแป้งข้าวงอก, 4=ขนมปังจากแป้งข้าวงอกที่นำไปอบ

ผลของการวัดสีของภายในขนมปังของขนมปังจากแป้งข้าวทั้ง 4 ชนิด จากตาราง 4.6 พบว่า ขนมปังทั้ง 4 สูตรมีค่า L^* a^* และ b^* แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่า L^* มีค่าระหว่าง 45.99-62.87 ค่า a^* มีค่าระหว่าง 0.42-8.38 และ ค่า b^* มีค่าระหว่าง 19.94-27.18 ซึ่งขนมปังจากแป้งข้าวสาลีมีค่า L^* สูงที่สุด เท่ากับ 62.87 และแป้งข้าวงอกมีค่า L^* ต่ำที่สุด เนื่องจากในกระบวนการงอกเอนไซม์มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเนื้อเมล็ดแป้งเกิดเป็นน้ำตาลรีดิวซ์จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดในระหว่างการอบผลิตภัณฑ์ขนมปังมีสีน้ำตาลอ่อน

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า สีของเปลือกนอกขนมปังมีค่า L^* อยู่ระหว่าง 42.60 -47.28 ส่วนค่า a^* มีค่าอยู่ระหว่าง 6.24-15.34 ค่า b^* มีค่าอยู่ระหว่าง 26.10-33.45 ซึ่งแป้งข้าวสาลีจะมีความสว่างน้อยที่สุด เนื่องจากในแป้งสาลีจะมีโปรตีนสูงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tong et al, 2010 พบว่าการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดเกิดขึ้นโดยอีสต์เปลี่ยนน้ำตาลซูโคสเป็นน้ำตาลกลูโคสกับฟรุกโตสทำให้เกิดปฏิกิริยากับโปรตีนในแป้งสาลีซึ่งมีในปริมาณสูงเมื่อได้รับความร้อน และเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลเมื่อได้รับความร้อนในสภาพที่ไม่มีน้ำหรือน้ำน้อยเกิดเป็นน้ำตาลไหม้ เกิดเป็นสารเพอร์ฟิวราลที่มีสีน้ำตาลจึงทำให้มีสีน้ำตาลมากกว่าแป้งอื่นๆ

(2) ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปัง

ผลของการวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังจากแป้งข้าวชนิดต่างๆ ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ ค่า ความแข็ง ความเกาะติดกัน ความเหนียวติดกัน ความยืดหยุ่น ความเหนียวติดยึด และการเคี้ยว แสดงดังตาราง 4.7 พบว่า

ขนมปังจากแป้งข้าวชนิดต่างๆ มีค่า ความแข็ง ความเกาะติดกัน ความเหนียวติดกันความยืดหยุ่น ความเหนียวติดยึด และ การเคี้ยว แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยขนมปังจากแป้งข้าวงอกมีค่าความแข็งสูงที่สุด เท่ากับ 38.07 N รองลงมาคือ ขนมปังจากแป้งข้าวงอกที่นำไปอบ (37.17 N) แป้งข้าวไม่งอก (27.01 N) และแป้งข้าวสาลี (5.46 N) ตามลำดับ ส่วนความเกาะติดกันของขนมปังมีค่าอยู่ระหว่าง 1.26-2.81 โดยพบว่าขนมปังจากแป้งข้าวงอกมีค่าความเกาะติดสูงที่สุดเนื่องจากแป้งข้าวงอกถูกย่อยด้วยเอนไซม์ระหว่างกระบวนการงอก ซึ่งมีการผลิตเอนไซม์ขึ้น จึงทำให้เม็ดแป้งสูญเสียการจัดเรียงตัว และทำให้โครงสร้างของเม็ดสตาร์ชถูกทำลายด้วยเอนไซม์ด้วย และแป้งข้าวสาลีมีค่าความเกาะติดต่ำที่สุดเนื่องจากมีโครงสร้างของกลูเตนที่แข็งแรง

ในด้านความเหนียวติดกัน ขนมปังจากแป้งข้าวพบว่าขนมปังจากแป้งข้าวไม่งอก แป้งข้าวงอก และแป้งข้าวงอกที่นำไปอบ มีค่าความเกาะติดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนขนมปังจากแป้งสาลีมีความเหนียวติดกันน้อยที่สุด เนื่องจากแป้งสาลีมีโครงสร้างกลูเตนที่แข็งแรง ส่วนในด้านของค่าความยืดหยุ่น พบว่าขนมปังมีค่าความยืดหยุ่นอยู่ระหว่าง 2.56-2.92 ซึ่งขนมปังจากแป้งข้าวสาลี

ตาราง 4.7 ลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของขนมปังจากแป้งข้าว

สูตรขนมปัง	ลักษณะเนื้อสัมผัส					
	ความแข็ง (N)	ความเกาะติดกัน	ความเหนียวติดกัน (N.s)	ความยืดหยุ่น	ความเหนียว ติดยึด (N)	การเคี้ยว (N.mm)
1	5.46± 0.09 ^c	1.26±0.01 ^c	-0.035±0.01 ^a	2.92± 0.04 ^a	6.86± 0.10 ^d	18.44±0.36 ^d
2	27.01±0.96 ^b	2.13±0.09 ^b	-2.16±0.83 ^b	2.56± 0.13 ^c	57.23±4.50 ^c	146.17±4.95 ^c
3	38.07± 0.45 ^a	2.81±0.18 ^a	-2.57±1.34 ^b	2.69±0.02 ^{bc}	107.04±6.47 ^a	328.55±5.86 ^a
4	37.17±5.06 ^a	2.67±0.37 ^a	-1.83±0.14 ^b	2.72± 0.04 ^b	98.01±2.85 ^b	266.30±8.38 ^b

^aแสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวนอนเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

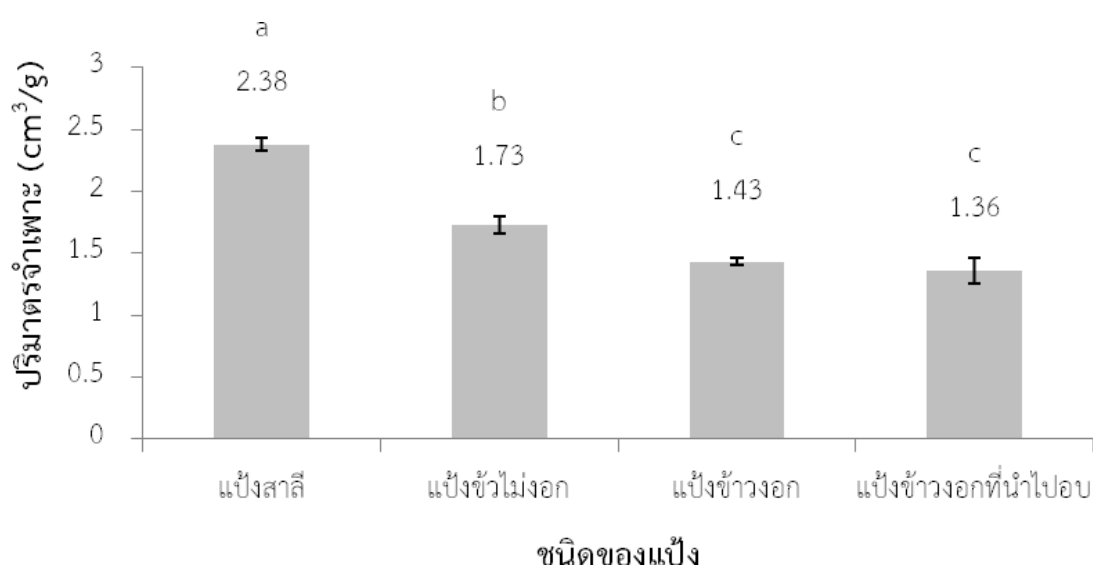
หมายเหตุ : 1= ขนมปังจากแป้งข้าวสาลี, 2= ขนมปังจากแป้งข้าวไม่ออก

3= ขนมปังจากแป้งข้าวงอก, 4=ขนมปังจากแป้งข้าวงอกที่นำไปอบ

มีความยืดหยุ่นมากที่สุด เนื่องจากมีโปรตีนกลูเตนชนิดไกลอะดินและกลูเตนิน โดยไกลอะดินทำให้กลูเตนมีคุณสมบัติในการยืดตัว และยืดหยุ่นได้ นั่นคือกลูเตนินนั้นให้ความแข็งแรงตัวกับกลูเตนและไกลอะดินซึ่งเป็นสารที่อ่อนและเหนียวจะเป็นตัวเชื่อม ส่วนค่าความเหนียวติดยืดและการเคี้ยวของขนมปังจากแป้งข้าวเหนียวมีค่าสูงที่สุด และสตราซจากแป้งสาลีมีค่าต่ำที่สุด

(3) ปริมาตรจำเพาะของขนมปัง

ปริมาตรจำเพาะของขนมปังเป็นการหาโดยการแทนที่ขนมปังด้วยเม็ลตงา โดยปริมาตรจำเพาะแสดงดังภาพประกอบ 4.1 พบว่า ขนมปังจากแป้งข้าวสาลีมีปริมาตรจำเพาะสูงที่สุด ($2.38 \text{ cm}^3/\text{g}$) รองลงมาคือ ขนมปังจากแป้งข้าวไม่ออก เท่ากับ $1.72 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามด้วยแป้งข้าวออก เท่ากับ $1.43 \text{ cm}^3/\text{g}$ และแป้งข้าวออกที่นำไปอบ ($1.36 \text{ cm}^3/\text{g}$) ซึ่งไม่แตกต่างกันต่างสถิติ จากผลการทดลองมีสาเหตุเนื่องจากแป้งข้าวสาลีมีส่วนของโปรตีนไกลอะดินและกลูเตนินซึ่งทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายที่เรียกว่า กลูเตน ที่ช่วยในการกักเก็บก๊าซทำให้ขนมปังเกิดโดได้ดี (Sramkova, Gregova และ Sturdik, 2009) ส่วนขนมปังจากแป้งข้าวออกมีส่วนของเอนไซม์อะไมเลสที่ช่วยในการกักเก็บแก๊ส โดยจะเพิ่มอัตรา และคุณภาพในการหมักน้ำตาล และเนื่องจากกิจกรรมของอะไมเลสไม่เพียงพอทำให้ปริมาตรลดลงและมีลักษณะผิวหน้าแห้ง (Sapna Arora, 2003) ทำให้ขนมปังมีการกักเก็บความชื้นไว้ภายในขนมปัง แต่มีโดเกิดขึ้นน้อยกว่าขนมปังจากแป้งข้าวสาลี



ภาพประกอบ 4.1 ปริมาตรจำเพาะของขนมปังจากแป้งข้าว

หมายเหตุ: a, b, c หมายถึง ระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95
 I หมายถึง ระดับความคาดเคลื่อนของส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย

(4) คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของขนมปัง

ผลการทดสอบคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของขนมปังจากแป้งข้าว ทั้ง 4 ชนิด โดยศึกษาคุณลักษณะด้านคุณลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และการยอมรับรวม แสดงดังตาราง 4.8 พบว่า

ขนมปังจากแป้งข้าวไม่งอกมีคุณลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และการยอมรับรวมสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวชนิดอื่นๆ แต่น้อยกว่าแป้งสาลี โดยมีคะแนนการยอมรับในด้านคุณลักษณะปรากฏ สี กลิ่น และการยอมรับรวมในระดับความชอบไม่ชอบเล็กน้อย ส่วนในด้านรสชาติ ความนุ่มมีระดับคะแนนความชอบไม่ชอบมาก เนื่องจากลักษณะขนมปังที่ทำจากแป้งข้าวที่ไม่มีกลูเตนซึ่งเป็นแป้งข้าวเหนียวจึงมีลักษณะโดเหนียวแน่น ไม่ขึ้นโด ไม่เกิดโพรงอากาศ ทำให้ขนมปังไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค จึงเหมาะที่จะนำไปพัฒนาให้ดีขึ้น

ตอนที่ 2 ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของแป้งข้าวเพื่อผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าว

เนื่องจากตอนที่ 1 ขนมปังที่ผลิตได้จากแป้งข้าว ไม่สามารถผลิตเป็นขนมปังเพราะทำให้ขนมปังมีลักษณะ สีคล้ำ เนื้อสัมผัสเหนียว และ และคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสอยู่ในระดับที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับคือ ไม่ชอบมาก ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงคุณภาพของขนมปังให้มีการขึ้นฟู เนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้นแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้าจึงถูกนำมาใช้ในการผลิตขนมปังเนื่องจากแป้งข้าวโพดเป็นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะมีผลต่อการเกิดรีโทรเกรเดชัน ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนืดสุดท้ายเพิ่มมากขึ้น เมื่อเป็นตัวแป้งจะอยู่ตัวจับเป็นก้อนแข็งร่วน (หนูเดือน สาระบุตร, 2552) ส่วนแป้งข้าวประกอบไปด้วยโปรตีนที่ไม่ก่อให้เกิดอาการแพ้และย่อยง่าย มีคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยง่ายเช่นเดียวกัน ด้วยปัจจัยหลายอย่างจึงมีการนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของแป้งข้าว โดย แสดงดังตาราง 4.9

ผลจากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งข้าวโดยใช้เปรียบเทียบกับคุณสมบัติแป้งสาลี พบว่า แป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้ามีคุณสมบัติด้านความหนืดในทุกๆ ด้านสูงกว่าแป้งสาลี เนื่องจากมีกำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งสาลีจึงส่งผลให้ใช้อุณหภูมิที่ทำให้เกิดการพองตัวเต็มที่และแตกออกได้ต่ำกว่า สอดคล้องกับงานวิจัยของ Qin-lu และคณะ (2011) พบว่า ความหนืดของสตาร์ชขึ้นอยู่กับ อะไมโลส ไขมัน โปรตีน และกำลังการพองตัว โดยค่า peak time, Final viscosity และ Setback ของแป้งและสตาร์ชของข้าวสาลีพันธุ์อินดิกาสูงกว่าแป้งและสตาร์ชของข้าวสาลีพันธุ์จาปอนิกา เนื่องจากข้าวสาลีพันธุ์อินดิกามีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าซึ่งโมเลกุลของอะไมโลสจะจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง

ตาราง 4.8 คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของขนมปังจากแป้งข้าว

สูตรขนมปัง	คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส					
	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความนุ่ม	การยอมรับรวม
1	7.45±1.39 ^a	7.40±1.05 ^a	7.30±1.22 ^a	6.55±1.39 ^a	6.20±1.54 ^a	7.05±1.47 ^a
2	4.25±1.62 ^b	5.15±1.39 ^b	4.55±1.43 ^b	4.75±2.02 ^b	3.40±1.57 ^b	4.00±1.38 ^b
3	2.75±1.55 ^c	3.40±1.31 ^c	3.40±1.19 ^c	3.30±1.38 ^c	2.70±1.53 ^b	2.80±1.24 ^c
4	2.20±1.47 ^c	3.15±1.53 ^c	2.95±1.57 ^c	3.15±1.76 ^c	2.45±1.43 ^b	2.45±1.32 ^c

^aแสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวนอนเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

หมายเหตุ : 1= ขนมปังจากแป้งข้าวสาลี, 2= ขนมปังจากแป้งข้าวไม่งอก

3= ขนมปังจากแป้งข้าวงอก, 4=ขนมปังจากแป้งข้าวงอกที่นำไปอบ

และ Saeleaw และ Schleining (2010) พบว่า แป้งข้าวมี pasting temperature สูงที่สุด ขณะที่แป้งสาลีมี pasting temperature และ peak viscosity ต่ำกว่า เพราะว่าเม็ดสตาร์ชเกิดการบวมและแป้งสาลีเป็นแป้งอีกชนิดหนึ่งที่เกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไขมัน ส่วน final viscosity ของแป้งข้าวจะสูงกว่าแป้งสาลีและแป้งข้าวเหนียว และค่า setback เป็นการวัดเรียงตัวใหม่ของอะไมโลส หลังจากถูกขับออกมาเมื่อเม็ดแป้งเกิดการพองตัว

แป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้าผสมกับแป้งข้าวเพื่อให้แป้งมีความหนืดใกล้เคียงกับแป้งสาลี พบว่า แป้งข้าวที่มีการผสมกับแป้งข้าวโพด และข้าวเจ้าอย่างเดียว ได้แก่ แป้งข้าวไม่งอกโดยมีความหนืดใกล้เคียงกับแป้งสาลี แต่ยังไม่ดีมากนัก จึงมีการนำทั้งแป้งข้าวและแป้งข้าวโพดผสมกับแป้งข้าว พบว่า แป้งข้าวไม่งอก และแป้งข้าวงอกมีความหนืดใกล้เคียงกับแป้งสาลีมากที่สุด แสดงดังตาราง 4.9

เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวโพดเป็นแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจึงทำให้มีการปรับโครงสร้างของแป้งข้าวเหนียวงอกโดยการแทนที่ปริมาณแป้งข้าวเหนียวงอกทำให้โครงสร้างของแป้งดีขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Saeleaw และ Schleining (2010) พบว่า pasting properties ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาดของเม็ดแป้ง อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน ลักษณะของโมเลกุล ซึ่ง pasting temperature ของส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าว แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวสาลีมีค่าอยู่ระหว่าง 63-66 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิการเกิดเจลที่โนเซชันต่ำ (<70 องศาเซลเซียส) pasting และ peak temperature เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของแป้งข้าวที่ผสม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเม็ดสตาร์ชจะพองตัวจนถึงความหนืดสูงสุด

ตาราง 4.9 การปรับปรุงคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งข้าว

ชนิดของแป้ง	Pasting behavior (RVU)						
	Peak viscosity	Trough	Breakdown	Final viscosity	Setback	Peak time (min)	Pasting temperature (°C)
Rice Flour	254.61±3.94 ^a	199.97±2.67 ^a	54.64±4.43 ^{bc}	396.08±5.44 ^a	196.11±6.81 ^a	6.2667±.07 ^a	88.35±0.95 ^a
Wheat flour	154.47±2.19 ^b	95.83±1.74 ^d	58.72±2.17 ^{ab}	170.45±3.45 ^c	74.61±1.98 ^c	5.58±0.19 ^{bc}	84.77±0.03 ^b
Corn Flour	241.89±3.46 ^a	173.05±3.21 ^b	68.83±3.18 ^a	277.42±3.53 ^b	104.36±2.99 ^b	5.07±.07 ^c	75.95±0.05 ^d
UGRF+CF+RF	164.03±11.50 ^b	117.03±9.97 ^c	47.06±2.11 ^c	165.47±11.38 ^c	48.50±2.05 ^d	5.00±0.13 ^c	70.78±0.88 ^{ef}
GRF+CF+RF	172.11±32.45 ^b	122.25±12.59 ^c	49.86±20.64 ^{bc}	170.36±27.11 ^c	48.11±14.72 ^d	5.07±.24 ^c	71.57±2.32 ^e
HUGR+CF+RF	46.81±0.68 ^e	29.64±0.34 ^f	17.17±0.58 ^d	31.53±0.25 ^f	1.89±0.46 ^f	4.02±0.08 ^d	78.62±0.97 ^c
UGRF+CF	101.28±2.43 ^c	87.72±2.63 ^d	13.58±0.44 ^{de}	129.19±2.38 ^d	41.50±2.02 ^d	5.64±0.25 ^{abc}	71.55±0.47 ^d
GRF+CF	30.22±0.59 ^{ef}	26.47±0.46 ^f	3.75±0.42 ^{ef}	27.78±0.35 ^e	1.31±0.17 ^f	4.16±0.15 ^d	70.21±0.33 ^{efg}
HUGR+CF	29.94±0.34 ^{ef}	26.72±0.39 ^f	3.22±.009 ^{ef}	28.19±0.54 ^e	1.57±0.10 ^f	4.18±0.10 ^d	69.86±0.14 ^{fg}
UGRF+RF	76.03±1.14 ^b	69.80±1.29 ^c	6.22±0.37 ^c	91.77±1.54 ^c	21.97±0.82 ^c	6.00±0.17 ^a	69.97±0.45 ^c
GRF+RF	26.03±1.13 ^e	24.92±1.02 ^d	1.11±0.24 ^f	26.47±1.04 ^d	1.56±0.13 ^d	5.53±0.47 ^a	70.14±0.43 ^c
HUGR+RF	29.36±2.21 ^d	27.30±1.88 ^d	2.05±0.39 ^{ef}	28.42±2.09 ^d	1.44±0.34 ^d	4.31±1.02 ^b	68.69±0.30 ^d

^a แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวนั่งเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

คำอธิบายประกอบตาราง 4.9 : อัตราส่วนของแป้งข้าว (แป้งข้าวไม่งอก (UGRF) แป้งข้าวงอก (GRF) และแป้งข้าวงอกที่นำไปอบ (HGRF) ต่อแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้า

- 1) แป้งสาลี (WF) ร้อยละ 100
- 2) แป้งข้าวโพด (CF) ร้อยละ 100
- 3) แป้งข้าวเจ้า (RF) ร้อยละ 100
- 4) แป้งข้าว (แป้งข้าวไม่งอก (UGRF) แป้งข้าวงอก (GRF) และแป้งข้าวงอกที่นำไปอบ (HGRF)) ร้อยละ 70 : แป้งข้าวเจ้า (ร้อยละ 30)
- 5) แป้งข้าว (แป้งข้าวไม่งอก (UGRF) แป้งข้าวงอก (GRF) และแป้งข้าวงอกที่นำไปอบ (HGRF)) ร้อยละ 70 : แป้งข้าวโพด (ร้อยละ 30)
- 6) แป้งข้าว : แป้งข้าวเจ้า ที่เตรียมจากข้อ 4 (ร้อยละ 70) นำมาผสมกับแป้งข้าวโพด ร้อยละ 30

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของการใช้แป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้าต่อคุณภาพของขนมปังปราศจากกลูเตนจากแป้งข้าวงอก

จากตอนที่ 2 เมื่อได้ปรับปรุงคุณภาพของแป้งข้าวแล้วพบว่าแป้งข้าวงอกที่ผสมแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้ามีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับแป้งสาลี ประกอบกับข้าวงอกมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก แกมมาออริซานอล และแอลฟาโทโคเฟอรอล ซึ่งมากกว่าข้าวชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงนำแป้งข้าวงอก แป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้ามาหาสูตรที่เหมาะสมโดยออกแบบแผนการทดลอง Mixture Design แบบ Simplex Centroid ซึ่งทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ แป้งข้าวงอก แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า สิ่งทดลองที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 7 สิ่งทดลองดังต่อไปนี้

- สิ่งทดลองที่ 1 คือ ขนมปังจากแป้งข้าวงอก: แป้งข้าวโพด: แป้งข้าวเจ้า (50: 0: 50)
- สิ่งทดลองที่ 2 คือ ขนมปังจากแป้งข้าวงอก: แป้งข้าวโพด: แป้งข้าวเจ้า (90: 0: 10)
- สิ่งทดลองที่ 3 คือ ขนมปังจากแป้งข้าวงอก: แป้งข้าวโพด: แป้งข้าวเจ้า (50: 40: 10)
- สิ่งทดลองที่ 4 คือ ขนมปังจากแป้งข้าวงอก: แป้งข้าวโพด: แป้งข้าวเจ้า (70: 0: 30)
- สิ่งทดลองที่ 5 คือ ขนมปังจากแป้งข้าวงอก: แป้งข้าวโพด: แป้งข้าวเจ้า (50: 20: 30)
- สิ่งทดลองที่ 6 คือ ขนมปังจากแป้งข้าวงอก: แป้งข้าวโพด: แป้งข้าวเจ้า (70: 20: 10)
- สิ่งทดลองที่ 7 คือ ขนมปังจากแป้งข้าวงอก: แป้งข้าวโพด: แป้งข้าวเจ้า (63: 13: 23)

จากนั้นนำแป้งขนมปังไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และวิเคราะห์คุณลักษณะของขนมปังปราศจากกลูเตน ดังนี้

- 1) องค์ประกอบทางเคมีของแป้งขนมปัง

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งขนมปังจากแป้งข้าว ได้แก่ ปริมาณความชื้น โปรตีน และเถ้า แสดงดังภาพประกอบ 4.10 พบว่า ปริมาณความชื้นของแป้งขนมปังมีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 7.32-9.39 ส่วนปริมาณโปรตีนมีค่าอยู่ระหว่าง ร้อยละ 4.53-7.59 ปริมาณเถ้ามีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0.99-1.67 และปริมาณไขมันมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 1.61-2.99 โดยปริมาณความชื้นของแป้งขนมปังที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวงอกน้อยลงทำให้ปริมาณความชื้นลดลง ส่วนปริมาณโปรตีนของแป้งข้าวงอกของแป้งขนมปังจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของแป้งข้าวงอกมากขึ้น เนื่องจากในระหว่างกระบวนการงอกปริมาณโปรตีนจะเพิ่มมากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

Moongngarm และ Saetung (2010) พบว่าในระหว่างกระบวนการงอกข้าวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของข้าวทำให้ปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณเถ้าของแป้งขนมปังก็จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของแป้งข้าวงอกมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Maisont และ Narkruga (2010) พบว่าปริมาณเถ้าของแป้งข้าวงอกจะเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการการงอกเพิ่มขึ้น

ตาราง 4.10 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งขนมปังปราศจากกลูเตนจากข้าวงอก

แป้งขนมปัง (GRF:CF:RF)	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	น้ำตาลรีดิวซ์ (mg/g)
50: 0 : 50	9.22± 0.24 ^a	4.64±0.31 ^d	1.95±0.43 ^{cd}	0.99±0.05 ^d	12.47 ± 0.47 ^{cd}
90: 0: 10	8.38± 0.26 ^b	7.59±0.28 ^a	2.99±0.08 ^a	1.67±0.19 ^a	24.69 ± 0.42 ^a
50: 40: 10	9.35± 0.31 ^a	4.53±0.23 ^d	1.61±0.15 ^d	1.06±0.03 ^{cd}	13.80 ± 1.84 ^c
70: 0: 30	7.32± 0.35 ^c	7.03±0.28 ^b	2.40±0.09 ^b	1.37±0.09 ^b	17.52 ± 1.06 ^b
50: 20: 30	9.39± 0.20 ^a	5.74±0.28 ^c	1.98±0.18 ^c	1.14±0.04 ^c	11.53 ± 0.45 ^c
70: 20: 10	8.34±0.52 ^b	6.93±0.30 ^b	1.71±0.02 ^{cd}	1.41±0.05 ^b	17.76 ± 1.98 ^b
63: 13: 23	8.72±0.21 ^b	5.92±0.29 ^c	1.65±0.03 ^{cd}	1.36±0.01 ^b	12.70 ± 0.29 ^{cd}

^aแสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวตั้งเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ส่วนปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของแป้งขนมปังจากแป้งข้าวงอกพบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของแป้งขนมปังสูตรที่มีการเติมปริมาณแป้งข้าวงอก: แป้งข้าวเจ้า: แป้งข้าวโพด ในอัตราส่วน 90:10:0 มีปริมาณสูงที่สุดเนื่องจากมีส่วนผสมของแป้งข้าวงอกมากที่สุด โดยในแป้งข้าวงอกจะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่สูงซึ่งเกิดจากการย่อยสลายเม็ดแป้งของเอนไซม์ในระหว่างการงอก (อนุชิตา มุ่งงาม และ ณฐนนท์ トラฐ, 2549) และจะเห็นว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของแป้งข้าวงอกเพิ่มขึ้นด้วยในแต่ละสูตร สอดคล้องกับงานวิจัยของ อนุชิตา มุ่งงาม (2010) พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีเวลาการงอกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยแป้งของเอนไซม์

ตาราง 4.11 ปริมาณแกมมาออริซานอล และแอลฟาโทโคเฟอรอลของแป้งขนมปังปราศจากกลูเตน จากข้าววงอก

แป้งขนมปัง (GRF:CF:RF)	สารประกอบฟีนอลิก (mgGAE/100g)	แกมมาออริซานอล (mg/100g)	แอลฟาโทโคเฟอรอล (mg/100g)
50: 0 : 50	3.82 ± 0.08^e	17 ± 0.02^c	0.29 ± 0.20^d
90: 0: 10	5.15 ± 0.19^a	34 ± 0.03^a	2.69 ± 0.33^a
50: 40: 10	3.22 ± 0.10^f	15 ± 0.01^c	0.27 ± 0.16^d
70: 0: 30	4.54 ± 0.07^c	15 ± 0.01^c	1.67 ± 0.19^c
50: 20: 30	3.90 ± 0.05^e	33 ± 0.02^a	0.29 ± 0.20^d
70: 20: 10	4.20 ± 0.08^d	33 ± 0.03^a	1.76 ± 0.29^c
63: 13: 23	4.74 ± 0.04^b	23 ± 0.02^b	2.21 ± 0.19^b

^{a,b,c,d} แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวตั้งเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2) ปริมาณสารประกอบฟีนอลิก แกมมาออริซานอลและปริมาณแอลฟาโทโคเฟอรอล จากผลการทดลองของการนำแป้งขนมปังจากการพัฒนาสูตรขนมปังมาวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิก แกมมาออริซานอล และปริมาณแอลฟาโทโคเฟอรอล แสดงดังตาราง 4.12 พบว่า

ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกของแป้งขนมปังจากข้าวพบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ของแป้งขนมปังสูตรที่ 2 ที่มีการเติมปริมาณแป้งข้าววงอก: แป้งข้าวเจ้า: แป้งข้าวโพด ในอัตราส่วน 90:10:0 มีปริมาณสูงที่สุด เนื่องจากในระหว่างกระบวนการงอกมีการผลิตสารประกอบฟีนอลิกในระหว่างการเจริญเป็นต้นอ่อนเพื่อป้องกันตนเองของข้าว (ณัฐวัตร แซ่ตั้ง, 2549) จึงทำให้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณของแป้งข้าววงอกเพิ่มสูงขึ้น

ปริมาณแกมมาออริซานอลของแป้งขนมปังที่มีค่าสูงที่สุด คือสูตรที่มีการเติมปริมาณแป้งข้าววงอก: แป้งข้าวเจ้า: แป้งข้าวโพด ในอัตราส่วน 90: 0: 10, 70: 0: 30 และ 70: 20: 10 มีปริมาณแกมมาออริซานอล ระหว่าง 33-34 mg/100g ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ เนื่องจากแป้งขนมปังมีส่วนผสมของแป้งข้าววงอกที่ต่างกัน โดยสูตรของแป้งขนมปังที่มีส่วนผสมของแป้งข้าววงอกสูงจะมีปริมาณแกมมาออริซานอลสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Watanabe และคณะ (2004) พบว่า ขนมปังที่มีการเติมข้าวกล้องงอกสูงที่สุด มีปริมาณสารอาหารสูงสุด โดยรวมถึงปริมาณแกมมาออริซานอลด้วยเช่นกัน ส่วนปริมาณแอลฟาโทโคเฟอรอลของแป้งขนมปังมีค่าอยู่ระหว่าง 0.07-2.69 mg/g ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณแป้งข้าววงอกที่เติมลงไป

3) คุณลักษณะของขนมปังปราศจากกลูเตน

ลักษณะขนมปังปราศจากกลูเตน ดังตาราง 4.13 พบว่า ขนมปังสูตรที่เติมแป้งข้าว
งอก : แป้งข้าวโพด : แป้งข้าวเจ้า ในอัตราส่วน 50: 0 : 50, 50: 40: 10, 50: 20: 30, 63: 13: 23
มีลักษณะสีเหลือง มีโพรงอากาศเล็กน้อย เนื้อสัมผัสนุ่มเล็กน้อย ส่วนขนมปังสูตร 90: 0: 10 มีเนื้อสัมผัส
ที่มีลักษณะแฉะ และ มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ ดังตาราง 4.13

(1) ค่าสีของขนมปัง

จากการศึกษาค่าสีของขนมปังจากแป้งข้าวงอกและบันทึกค่า L , a , b
โดยค่า L ใช้วัดค่าความสว่าง จากสีดำ (0) ถึงสีขาว (100) ค่า a วัดค่าสีแดง (+a) และสีเขียว (-a) และ
ค่า b วัดค่าสีเหลือง (+b) และสีน้ำเงิน (-b) ผลแสดงดังตาราง 4.12

สี crust ของขนมปัง พบว่า ขนมปังมีค่าความสว่าง อยู่ระหว่าง 52.23-65.19
มีค่าสีแดง อยู่ระหว่าง 3.33-10.25 ส่วนค่าสีเหลือง มีค่าอยู่ระหว่าง 32.01-35.52 โดยขนมปังสูตรที่มี
การเติมแป้งข้าวงอก : แป้งข้าวโพด : แป้งข้าวเจ้า ในอัตราส่วน 50: 40: 10 มีค่าความสว่าง สูงที่สุด
แต่มีค่าสีแดง และค่าสีเหลืองต่ำที่สุด เนื่องจากมีสัดส่วนของแป้งข้าวงอกน้อยทำให้มีโปรตีนและปริมาณ
น้ำตาลรีดิวซ์น้อยกว่าสูตรอื่นๆ อีกทั้งแป้งข้าวงอกนี้เป็นข้าวกล้องที่มีส่วนของรำข้าวที่เป็นสีน้ำตาลและ
ยังมีส่วนผสมของแป้งข้าวโพดที่มีสีเหลืองมากที่สุด จึงทำให้ค่าความเป็นสีแดงน้อยลง และ
ค่าสีเหลืองก็ลดลงด้วยเช่นกัน

ส่วนค่าสีของเนื้อในขนมปังพบว่า ขนมปังมีค่าความสว่าง อยู่ระหว่าง 51.18-
62.76 ส่วนค่า สีแดงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.75-5.16 และค่าสีเหลือง มีค่าอยู่ระหว่าง 21.21-28.31 โดย
ขนมปังสูตรที่มีการเติมแป้งข้าวงอก : แป้งข้าวโพด : แป้งข้าวเจ้า ในอัตราส่วน 50: 40: 10 มีค่าความ
สว่างสูงที่สุดเนื่องจากมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าสูตรอื่น และมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์น้อยจึงเกิดปฏิกิริยา
เมลลาร์ดน้อยลงด้วยเช่นกัน

ตาราง 4.12 ค่าสีของขนมปังปราศจากกลูเตนจากข้าวงอก

สูตรขนมปัง (GRF:CF:RF)	crust			crumb		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
50: 0 : 50	58.47±1.46 ^{bc}	7.10±0.63 ^b	35.52±1.57 ^a	61.76±0.51 ^a	1.97±0.23 ^d	25.90±0.28 ^e
90: 0: 10	55.91±1.70 ^c	6.33±0.65 ^b	34.76±1.18 ^{ab}	51.18±1.59 ^d	5.16±0.57 ^a	21.21±0.70 ^f
50: 40: 10	65.19±0.80 ^a	3.33±0.60 ^c	32.01±0.45 ^c	62.76±0.74 ^a	1.24±0.27 ^e	26.87±0.22 ^c
70: 0: 30	57.20±0.94 ^{cd}	6.90±0.71 ^b	35.02±0.35 ^{ab}	54.05±0.57 ^c	3.53±.144 ^b	28.31±.127 ^a
50: 20: 30	59.21±1.71 ^b	6.52±0.76 ^b	34.29±0.65 ^b	61.72±0.29 ^a	0.75±0.20 ^e	27.47±0.21 ^b
70: 20: 10	56.54±1.15 ^c	6.85±0.53 ^b	34.59±0.67 ^{ab}	53.06±2.41 ^c	3.27±0.59 ^b	26.45±0.53 ^{cd}
63: 13: 23	52.23±1.26 ^d	10.25±0.95 ^a	35.27±0.40 ^{ab}	57.85±0.90 ^b	2.62±0.62 ^c	26.14±0.66 ^{de}

^{a,b,c,d} แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวตั้ง
เดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตาราง 4.13 ลักษณะของขนมปังปราศจากกลูเตน

สูตรขนมปัง (GRF:CF:RF)	รูป	ลักษณะของขนมปัง
50: 0 : 50		มีสีค่อนข้างเหลือง ขนมปังมีการขึ้นโดเล็กน้อย แป้งโดมีลักษณะแฉะเล็กน้อยและนุ่ม
90: 0: 10		มีสีค่อนข้างเหลืองเข้ม ขนมปังขึ้นโดเล็กน้อย มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ ขนมปังมีเนื้อสัมผัสแฉะและเหนียว
50: 40: 10		มีสีค่อนข้างเหลือง ขนมปังมีการขึ้นโดเล็กน้อย มีโพรงอากาศขนาดเล็ก นุ่มและแฉะเล็กน้อย
70: 0: 30		มีสีค่อนข้างเหลือง ขนมปังมีการขึ้นโดเล็กน้อย ไม่มีโพรงอากาศ เหนียวและแฉะ
50: 20: 30		มีสีค่อนข้างเหลือง ขนมปังมีการขึ้นโดเล็กน้อย มีโพรงอากาศเพียงเล็กน้อย นุ่มและแฉะเล็กน้อย

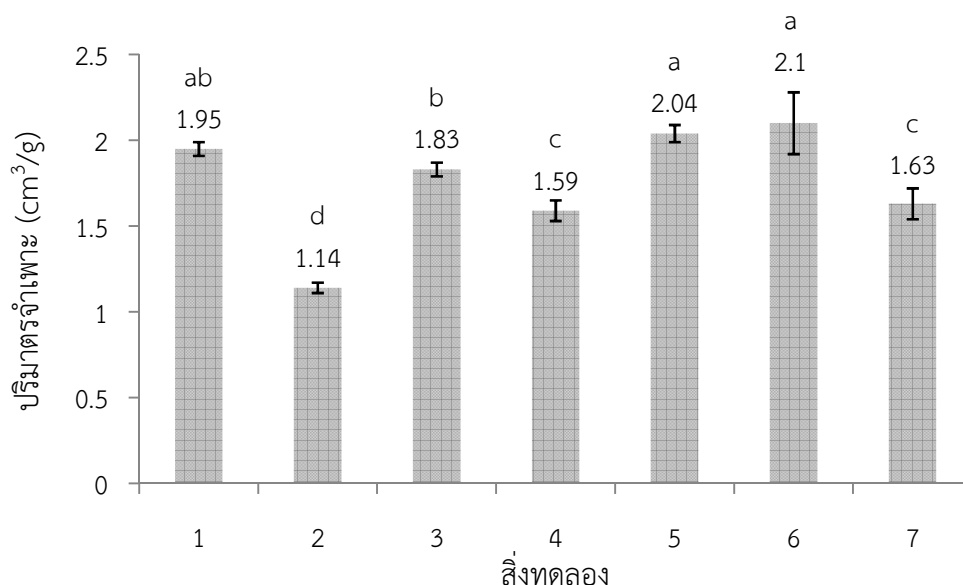
ตาราง 4.13 (ต่อ)

สูตรขนมปัง (GRF:CF:RF)	รูป	ลักษณะของขนมปัง
70: 20: 10		มีสีค่อนข้างเหลือง ขนมปังมีการขึ้นโดเล็กน้อย มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ นุ่มและแฉะเล็กน้อย
63: 13: 23		มีสีค่อนข้างเหลือง ขนมปังมีการขึ้นโดเพียงเล็กน้อย มีโพรงอากาศเล็กน้อย นุ่ม และแฉะเล็กน้อย

(2) ปริมาตรจำเพาะของขนมปัง

จากการวัดปริมาตรจำเพาะของขนมปังจากแป้งข้าวหอมมะลิและแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวโพด แสดงดังภาพประกอบ 4.2 พบว่า ขนมปังสูตรที่มีการเติมแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้าจะทำให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.10 และ 2.04 cm³/g สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lopez และคณะ (2004) พบว่าขนมปังที่ทำจากแป้งข้าวโพดจะมีปริมาตรจำเพาะสูงกว่าขนมปังที่ได้จากแป้งข้าวเจ้าและแป้งมันสำปะหลัง

เนื่องจากองค์ประกอบของแป้งข้าวสาลีมีปริมาณโปรตีนชนิดกลูเตนินและไกลอะดินสูง ส่วนแป้งข้าวไม่มีโปรตีนกลูเตนจึงไม่สามารถเกิดโครงร่างได้ ทำให้มีปริมาตรจำเพาะน้อยกว่าขนมปังจากแป้งสาลี (Guarda et al, 2004) แชนแทนกัมเป็นสารให้ความหนืดและความคงตัวช่วยในการปรับปรุงปริมาตรของขนมปัง โดยจะเก็บกักฟองอากาศในโดและให้ความคงตัวเมื่อผสมเป็นโดระหว่างการอบ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาพบว่าไฮโดรคอลลอยด์จะช่วยปรับปรุงปริมาตรและเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตน (Demirkesen et al, 2010)



ภาพประกอบ 4.2 ปริมาตรจำเพาะของขนมปังปราศจากกลูเตนจากข้าวสาลี

หมายเหตุ: a, b, c, d หมายถึง ระดับความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
I หมายถึง ระดับความคาดเคลื่อนของส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย

(3) ลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของขนมปัง

ความแข็ง (hardness) หมายถึง ค่าแรงสูงสุดจากกราฟ texture profile analysis ที่เกิดขึ้นในการกดตัวอย่างครั้งที่ 1 ที่ระยะทาง 50 % ของความสูง ค่าความแข็งที่วัดได้มีหน่วยเป็นนิวตัน (Vandeputte *et al*, 2003b) จากการวัดเนื้อสัมผัสของขนมปัง แสดงดังตาราง 4.14 พบว่า ขนมปังจากแป้งข้าวสาลี 3 มีความแข็งสูงสุดเนื่องจากมีองค์ประกอบของอะไมโลสเพิ่มมากขึ้น โดยสตาร์ชที่มีอะไมโลสสูงจะเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีอะไมโลสต่ำ ทำให้ค่าความแข็งมากขึ้นเมื่ออะไมโลสเพิ่มมากขึ้น (ยุพินทรา ชันติวัฒนกุล, 2550)

cohesiveness เป็นค่าที่บอกลักษณะการเกาะรวมตัวกันเหนียวแน่นมากน้อย หลังจากการที่ตัวอย่างถูกกดซ้ำ 2 ครั้ง chewiness คือ คุณลักษณะด้านทานการบดเคี้ยวเพื่อให้มีขนาดเล็กหรือแยกออกเป็นชิ้นเล็ก ส่วน gumminess คือคุณลักษณะกาวยางหรือแปะเปือกที่เกิดขึ้นในตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นกึ่งของแข็งขณะบดเคี้ยว เมื่อทำการวัดขนมปังพบว่า ค่า Cohesiveness Adhesiveness และ Gumminess ลดลงในขนมปังสูตร 3 เนื่องจากมีอะไมโลสสูงที่ทำให้มีการจัดเรียงตัวมากขึ้นเมื่อได้รับความร้อนเกิดเจลของสตาร์ชของอะไมโลสและเมื่อทิ้งให้เย็นจะทำให้เม็ดสตาร์ชของอะไมโลสเกิดการเรียงตัวใหม่และมีโครงร่างที่แข็งแรงจึงทำให้มี Cohesiveness Adhesiveness และ Gumminess ลดลง (ยุพินทรา ชันติวัฒนกุล, 2550)

Springiness คือความสามารถของตัวอย่างเมื่อได้รับแรงมากระทำแล้วหลังจาก
ถอนแรงออกสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิม โดยพบว่าขนมปังสูตรที่ 2 มีค่าความยืดหยุ่นสูงสุดเนื่องจาก
ขนมปังสูตรนี้มีส่วนผสมของแป้งข้าวงอกมากที่สุด ซึ่งมีโครงสร้างกิ่งสายยาวที่มีการอุ้มน้ำได้ดีกว่า
สายสั้นแบบของอะไมโลสทำให้ตัวอย่างมีความเหนียวและความคงตัว มีการอุ้มน้ำในโครงสร้างสายโซ่
ระหว่างโมเลกุล (ยุพินทรา ชันติวัฒนกุล, 2550)

ตาราง 4.14 ลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนจากข้าวงอก

สูตรขนมปัง (GRF:CF:RF)	ลักษณะเนื้อสัมผัส					
	ความแข็ง (N)	ความเกาะติดกัน	ความเหนียวติดกัน (N.s)	ความยืดหยุ่น	ความเหนียว ติดยึด (N)	การเคี้ยว (N.mm)
50: 0 : 50	8.49±0.88 ^b	1.62±0.29 ^b	-349.67±3.80 ^e	2.69±0.06 ^c	14.02±1.60 ^{cd}	37.03±6.47 ^{cd}
90: 0: 10	3.41±0.81 ^e	1.68±0.22 ^b	-654.53±1.56 ^g	3.39±0.25 ^b	27.91±1.88 ^a	25.88±2.36 ^e
50: 40: 10	12.49±0.33 ^a	0.16±0.08 ^c	-95.08±2.70 ^b	3.02±0.04 ^d	2.79±0.63 ^f	84.33±6.65 ^a
70: 0: 30	6.16±0.15 ^d	0.33±0.16 ^c	-128.76±2.64 ^c	3.53±0.10 ^a	18.72±1.06 ^b	46.65±1.11 ^b
50: 20: 30	7.82±1.06 ^{bc}	2.03±0.06 ^a	-90.26±2.53 ^a	2.97±0.06 ^b	15.87±1.69 ^c	43.77±2.09 ^{bc}
70: 20: 10	6.43±0.17 ^d	1.76±0.11 ^{ab}	-519.67±1.33 ^f	3.13±0.06 ^b	11.29±0.87 ^e	33.78±2.22 ^d
63: 13: 23	6.89±0.79 ^{cd}	1.84±0.18 ^{ab}	-273.33±3.32 ^d	3.15±0.02 ^b	12.62±1.23 ^{de}	41.42±1.28 ^{bc}

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวตั้งเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4) คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส

ผลการทดสอบคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของขนมปังในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และการยอมรับรวม แสดงดังตาราง 4.15 พบว่า คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และการยอมรับรวม ของขนมปังสูตร 3 และ 5 มีคะแนนความชอบสูงที่สุด เนื่องจากปริมาณแป้งข้าวอกที่เติมลงไป ถ้าเติมในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ขนมปังที่ได้มีความแฉะมากขึ้น เพราะฉะนั้นขั้นตอนการร่อนเอนไซม์จะทำการย่อยสลายสตาร์ชแล้วทำให้สูญเสียโครงสร้างที่แข็งแรงจึงทำให้ขนมปังที่ได้มีคุณภาพไม่ค่อยดี จึงมีการเติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวโพดในอัตราส่วนที่เหมาะสมเนื่องจากแป้งทั้งสองชนิดมีปริมาณอะไมโลสสูงที่จะทำให้โครงสร้างของแป้งแข็งแรงขึ้นด้วย เว้นแต่ในด้านลักษณะปรากฏที่ขนมปังสูตร 3 มีคะแนนความชอบมากกว่าสูตร 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนด้านสี กลิ่น รสชาติ ความนุ่มและการยอมรับรวม มีระดับเกณฑ์ความชอบอยู่ระหว่าง 5.70-7.45 ผู้บริโภคมีการยอมรับในระดับความชอบระดับเฉยๆ จนถึงระดับความชอบปานกลาง ซึ่งไม่แตกต่างกัน

ตาราง 4.15 คะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของขนมปังปราศจากกลูเตนจากข้าววงอก

สูตรขนมปัง (GRF:CF:RF)	ลักษณะทางประสาทสัมผัส					
	ลักษณะปรากฏ	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความนุ่ม	การยอมรับรวม
50: 0 : 50	6.30±1.34 ^b	5.40±1.43 ^{ab}	5.95±1.19 ^{bc}	5.70±1.49 ^{ab}	5.80±1.44 ^{ab}	5.75±1.55 ^{bc}
90: 0: 10	3.05±1.50 ^d	4.65±1.57 ^{bc}	4.00±1.84 ^d	5.00±2.18 ^b	3.85±2.41 ^c	4.00±1.78 ^d
50: 40: 10	7.50±0.83 ^a	6.10±1.45 ^a	7.45±1.14 ^a	6.85±1.56 ^a	6.35±1.69 ^a	7.10±1.45 ^a
70: 0: 30	5.90±1.55 ^b	5.45±1.54 ^{ab}	5.55±1.96 ^c	5.35±2.01 ^b	4.95±1.76 ^{bc}	5.25±1.55 ^c
50: 20: 30	6.60±1.05 ^b	5.70±1.26 ^a	6.60±1.18 ^{ab}	6.25±1.41 ^{ab}	6.30±1.38 ^a	6.30±1.17 ^{ab}
70: 20: 10	4.65±1.60 ^c	5.15±1.27 ^{abc}	5.55±1.57 ^c	5.25±1.80 ^b	4.40±1.54 ^c	4.80±1.40 ^{cd}
63: 13: 23	4.65±1.84 ^c	4.30±1.53 ^c	5.50±1.67 ^c	5.30±1.87 ^b	4.45±1.82 ^c	4.90±1.77 ^{cd}

a,b,c,d แสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตัวเลขที่มีกลุ่มอักษร (a, b, c, ...) ในแนวตั้งเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่าแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

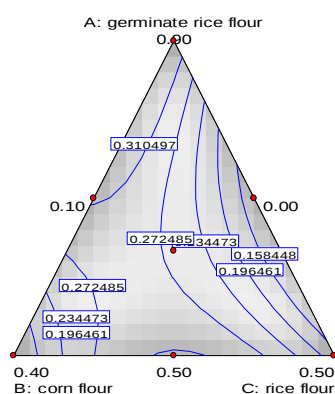
5) การทำนายสูตรที่ดีที่สุด สำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนจากข้าวงอก การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของแป้งทั้งสามชนิดทั้งหมด 7 สิ่งทดลอง โดยวัดค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทางกายภาพด้วยการวัดค่าสี เนื้อสัมผัส ปริมาตรจำเพาะ และคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสด้วยวิธีการให้คะแนนความชอบในคุณลักษณะด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 7 สิ่งทดลอง ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพและทางประสาทสัมผัส ของสิ่งทดลองทั้ง 7 สิ่งทดลอง นำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยวิธี response surface methodology (RSM) สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ linear model เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณภาพทางกายภาพและประสาทสัมผัส กับปริมาณแป้งแต่ละชนิด ดังสมการ $Y_i = \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C$ ทั้งนี้กำหนดให้ Y_i คือ ค่าคุณภาพทางกายภาพและค่าทางประสาทสัมผัส และปริมาณร้อยละของแป้งแต่ละชนิด ได้แก่ แป้งข้าวงอก (A), แป้งข้าวโพด (B) และแป้งข้าวเจ้า (C) แสดงผลดังตาราง 4.16 แบบจำลองดังกล่าวมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) และสามารถอธิบายความแปรปรวนได้สูง 80-96%

ตาราง 4.16 สมการถดถอยของคุณภาพขนมปัง

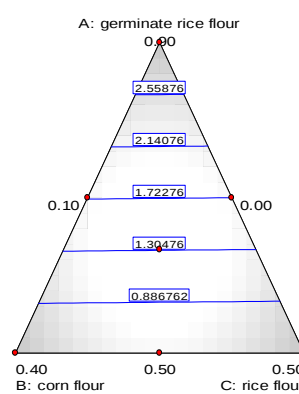
Quality	Regression*	R ²
<i>Physical Properties</i>		
สารประกอบฟีนอลิก	5.22 A + 3.42 B + 4.03 C	0.84
แกมมาออริซานอล	0.34 A + 0.15 B + 0.17 C	0.96
แอลฟาอะไมเลส	2.98 A + 0.49 B + 0.47 C	0.84
<i>Crumb color</i>		
L^*	46.41A+77.24B+76.23C	0.91
a^*	6.14A-4.48B-2.76C	0.96
b^*	15.17A+17.69B-13.20C	0.91
<i>Sensory Properties</i>		
ลักษณะปรากฏ	2.27A+11.87B+10.72C	0.82
กลิ่น	3.59A+11.54B+8.54C	0.94
รสชาติ	4.50A+9.10B+6.90C	0.82
softness	2.96A+9.31B+8.76C	0.83
Acceptance	3.31A+10.56B+8.31C	0.86

จากตาราง 4.16 ผลของแป้งที่มีผลต่อค่าสารประกอบฟีนอลิก แกมมาออริซานอล จากค่าสัมประสิทธิ์ (β_i) ของตัวแปรแต่ละตัวในสมการรีเกรสชัน พบว่าแป้งข้าวงอก (A) มีค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด รองลงมาคือ แป้งข้าวเจ้า (C) และแป้งข้าวโพด (B) ตามลำดับ แสดงว่า แป้งข้าวงอกมีผลต่อค่าสารประกอบฟีนอลิก แกมมาออริซานอล ของผลิตภัณฑ์มากที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวเจ้า และ

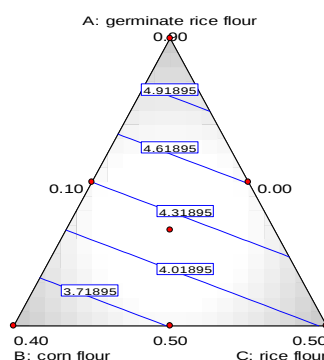
แป้งข้าวโพด ตามลำดับ แอลฟาโทโคเฟอรอล มีค่าสัมประสิทธิ์ (β_i) ของตัวแปรแต่ละตัวในสมการรีเกรสชัน พบว่าแป้งข้าวโพด (A) มีค่าสัมประสิทธิ์สูงที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวโพด (B) และแป้งข้าวเจ้า (C) ตามลำดับ แสดงว่า แป้งข้าวโพดมีผลต่อค่าแอลฟาโทโคเฟอรอล มากที่สุด รองลงมาคือแป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 4.3 พบว่าเมื่อแป้งข้าวโพดเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าสารประกอบฟีนอลิก แกมมาออริซานอล และแอลฟาโทโคเฟอรอลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าการเพิ่มแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพด



แกมมาออริซานอล

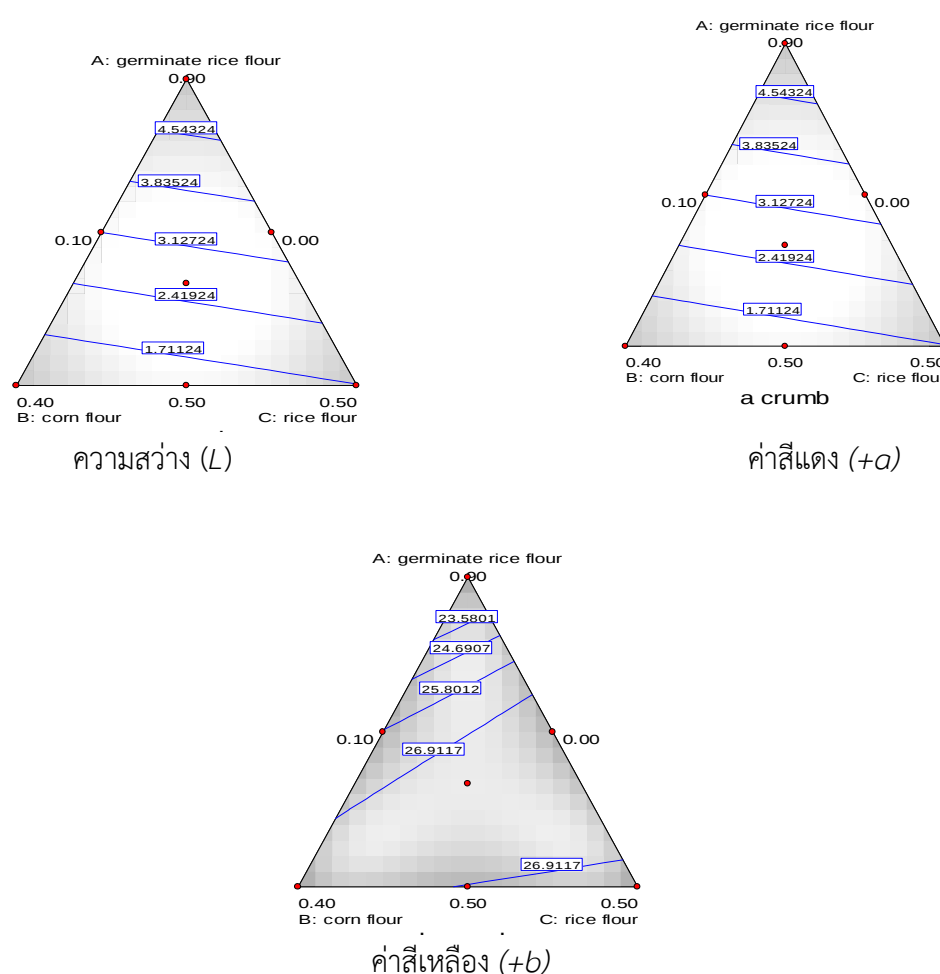


แอลฟาโทโคเฟอรอล



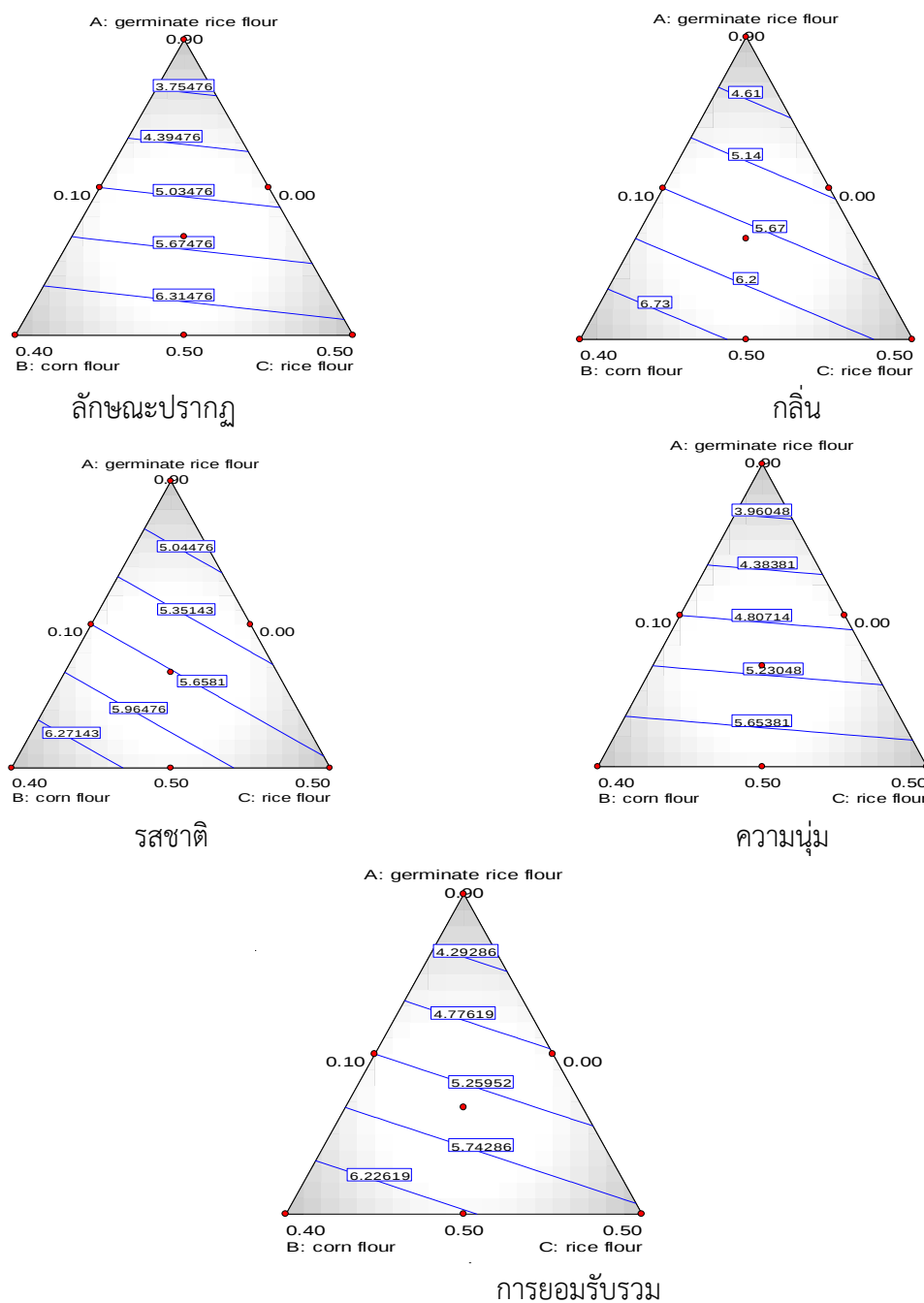
สารประกอบฟีนอลิก

ภาพประกอบ 4.3 โครงร่างพื้นผิวตอบสนองของคุณภาพด้านสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของแป้งขนมปัง



ภาพประกอบ 4.4 โครงร่างพื้นผิวตอบสนองของคุณภาพด้านสีภายในเนื้อของขนมปัง

จากตาราง 4.16 ผลของแป้งที่มีผลต่อค่าสี L , $+a$, $+b$ จากค่าสัมประสิทธิ์ (β_i) ของตัวแปรแต่ละตัวในสมการรีเกรสชัน พบว่า ผลของค่าสี L ของแป้งข้าวโพด (B) มีค่าสัมประสิทธิ์สูงที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวงอก (A) และ แป้งข้าวเจ้า (C) ตามลำดับ แสดงว่า แป้งข้าวโพดมีผลต่อมีผลต่อค่าสี L ของผลิตภัณฑ์มากที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวงอก และแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ ส่วนผลค่าสี $+a$ ของแป้งข้าวงอก (A) มีค่าสัมประสิทธิ์สูงที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวเจ้า (C) และ แป้งข้าวโพด (B) ตามลำดับ แสดงว่าแป้งข้าวงอกมีผลต่อค่าสี $+a$ ของผลิตภัณฑ์มากที่สุด รองลงมาคือแป้งข้าวเจ้า (C) และ แป้งข้าวโพด (B) ตามลำดับ และผลของค่าสี $+b$ ของแป้งข้าวงอก (A) มีค่าสัมประสิทธิ์สูงที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวโพด (B) และ แป้งข้าวเจ้า (C) ตามลำดับ แสดงว่า แป้งข้าวงอกมีผลต่อค่าสี L ของผลิตภัณฑ์มากที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 4.4 พบว่า เมื่อแป้งข้าวโพดเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าสี L มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่าการเพิ่มแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวงอก และมีผลทำให้ค่าสี $+a$ มีค่าลดลงด้วย และค่าสี $+b$ จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มแป้งข้าวเจ้า

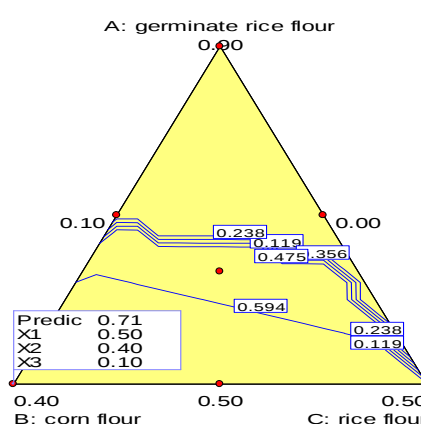


ภาพประกอบ 4.5 โครงร่างพื้นผิวตอบสนองของคุณภาพด้านคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสของขนมปัง

จากตาราง 4.16 ผลของแป้งที่มีผลต่อค่าคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม และการยอมรับรวม จากค่าสัมประสิทธิ์ (β_i) ของตัวแปรแต่ละตัวในสมการรีเกรสชัน พบว่า ผลของค่าลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ ความนุ่มและการยอมรับรวมของแป้งข้าวโพด (B) มีค่าสัมประสิทธิ์สูงที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวงอก (A) และ แป้งข้าวเจ้า (C)

ตามลำดับ แสดงว่า แป้งข้าวโพดมีผลต่อมีผลต่อค่าลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ ความนุ่มและการยอมรับรวมของผลิตภัณฑ์มากที่สุด รองลงมาคือ แป้งข้าวงอก และแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 4.5 พบว่า เมื่อแป้งข้าวโพดเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ ความนุ่มและการยอมรับรวมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมากกว่า การเพิ่มแป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวงอก

การทำนาย (prediction) สูตรที่ดีที่สุด สำหรับผลิตขนมปังปราศจากกลูเตนจากข้าวงอก ในการศึกษาครั้งนี้ ถ้ากำหนดให้โปรแกรม design expert ทำนายโดยใช้สมการถดถอย แสดงดังตาราง 4.16 กำหนดตัวแปรคุณภาพด้านต่างๆ ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก แกมมาออร์ซานอล และแอลฟาโทโคเฟอรอล โดยกำหนด criteria goal in range ของสารประกอบฟีนอลิก จาก 3.22-5.15 แกมมาออร์ซานอลในช่วง 0.15-0.34 และ แอลฟาโทโคเฟอรอลกำหนดช่วงจาก 0.27-2.69 ส่วนค่า L กำหนดในช่วง 51.8-80 ส่วนค่า $s_i + a$ กำหนดช่วง 0.15-3.0 และค่า $s_i + b$ กำหนดช่วง 24-28.3 และคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัส ได้แก่ ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ ความนุ่ม การยอมรับรวม โดยกำหนด criteria goal maximum จากช่วง 1-9 ผลที่ได้จากการทำนายแสดงได้ดังภาพประกอบ 4.6 จุดที่เหมาะสมสำหรับการทำขนมปัง คือ บริเวณที่ซ้อนทับกัน และจุดที่ได้จากการทำนาย ได้แก่ สูตรที่มีค่ารหัสของ Mixture Design คือ $A=0.50$, $B=0.40$ และ $C=0.10$ นำค่ารหัสไปแทนค่าในสมการถดถอยดังตาราง 4.16 เพื่อคำนวณค่าคุณภาพทำนาย (Quality Forecast) ดังตาราง 4.17



ภาพประกอบ 4.6 พื้นที่ซ้อนทับกันของคุณภาพที่ต้องการ

หมายเหตุ : $X_1 = A$: แป้งข้าวงอก, $X_2 = B$: แป้งข้าวโพด, $X_3 = C$: แป้งข้าวเจ้า

ตาราง 4.17 คุณภาพขนมปังจากการทำนาย

Quality	Quality Forecast
<i>Physical Properties</i>	
Phenolic compound	4.381
Oryzanol	0.247
Tocopherol	1.733
Crumb color	
L^*	61.724
a^*	1.002
b^*	13.341
<i>Sensory Properties</i>	
Apperence	6.955
Color	5.815
Flavor	7.265
Taste	6.58
Softness	6.08
Acceptance	6.71

การใช้แป้งข้าวงอก แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า ในปริมาณต่างๆ กัน ในผลิตภัณฑ์ขนมปัง ช่วยในการปรับปรุงให้ขนมปังมีคุณภาพดีขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมปังมีเนื้อสัมผัส สี ปริมาตร และคะแนนความชอบทางประสาทสัมผัสที่ดีขึ้น อีกทั้งยังประกอบไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญที่ได้จากแป้งข้าวงอก ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก แกมมาออริซานอล และแอลฟาโทโคเฟอรอล ในการสร้างพื้นผิวตอบสนองสามารถใช้ในการคัดเลือกสูตรที่เหมาะสมในแง่ของการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปัง และทำนายคุณภาพผลิตภัณฑ์ขนมปังจากสูตรที่เหมาะสมคือ การใช้แป้งข้าวงอกร้อยละ 50 แป้งข้าวโพด ร้อยละ 40 และแป้งข้าวเจ้า ร้อยละ 10 ในการทำผลิตภัณฑ์