

การหาสภาวะที่เหมาะสมของ กระบวนการเอ็กชทรูชันสำหรับแป้งข้าวเจ้า : อุณหภูมิ ความชื้น และสัดส่วนผสมเบื้องต้นสำหรับผลิตภัณฑ์พองตัว

Optimization of Extrusion-Cooking Conditions for Rice Flour : Temperature, Moisture Content, and Ratio of Premixes for Extrudates

สิงหนาท พวงจันทร์แดง¹
Singhanat Phoungchandang

บวรศักดิ์ ลีนานนท์¹
Borwonsak Leenanon

ฉัตรชัย อุดลโกศาธร¹
Chatchai Adunpocaton

จันทน์ อูริยะพงษ์สรค์¹
Juntanee Uriyapongson

ABSTRACT

The effects of process variables on physical properties of extrudates using extrusion process comprised raw materials and process conditions were investigated. Moisture, protein, amylose content and particle size of corn and broken rice flour were analysed. Three types of raw materials sesame oil, corn flour, and broken rice flour were mixed in different ratio (ranging from 0-1) to study performance of extruder. Two process conditions: temperature (ranging from 150 to 180°C) and moisture of raw material (ranging from 14 to 19%) were used to study the effected on physical properties i.e. expansion ratio, bulk density, water absorption index, percent water solubility, hardness, lightness, and color of products. D-optimal design was used to relate the process variables to physical properties of products which provided high expansion, low bulk density and low hardness. The optimal conditions for the products obtained from the models were the mixtures of 2% sesame oil, 3.5% corn flour, 94.5% broken rice flour, with 14% moisture content, and setting barrel temperature of 165°C.

Keyword : Broken rice, Extrusion, Physical properties, Sesame oil

บทคัดย่อ

ได้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ ของผลิตภัณฑ์พองตัวที่ผ่านกระบวนการเอ็กชทรูชัน โดยวิเคราะห์ปริมาณความชื้น โปรตีนแอมิโลสและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้า ศึกษาอิทธิพลของวัตถุดิบซึ่งประกอบด้วยน้ำมันงา แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า ผสมกันในสัดส่วน 0 ถึง 1 ร่วมกับสภาวะที่ใช้ในการผลิต ประกอบด้วยอุณหภูมิ 2 ระดับ คือ 150 ถึง 180 องศาเซลเซียสและปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบผสมร้อยละ 14 ถึง 19 การเปลี่ยนแปลงต่อสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านต่างๆ ได้แก่ อัตราการพองตัว ความหนาแน่น ดรรชนีการดูดน้ำ ร้อยละการละลายน้ำ ความแข็ง และค่าสีของผลิตภัณฑ์ (ความสว่าง ค่าสีแดงและสีเหลือง) โดยวางแผนการทดลองแบบ D-optimal Design ผลการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตและส่วนผสมที่ให้อัตราการพองตัวสูง ความหนาแน่นต่ำและความแข็งต่ำคือ น้ำมันงาร้อยละ 2 แป้งข้าวโพดร้อยละ 3.5 และแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 94.5 อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 14

บทนำ

ข้าวเจ้าหักจัดเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกจึงควรมีการศึกษาเพื่อเพิ่มมูลค่า การแปรรูปโดยใช้กระบวนการเอ็กสทรูชัน จะให้ผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีลักษณะการพองตัวดี สีขาว ไม่มีรสชาติ เหมาะกับการใช้เป็นองค์ประกอบหลักของตัวผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการเคลือบกลืนรสต่างๆ (Moore, 1994) ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์พองตัว ได้แก่ สัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนผสม ปริมาณความชื้น และอุณหภูมิของบารเรล เป็นต้น Chiang and Johnson (1977) พบว่าการสุกของแป้งในกระบวนการเอ็กสทรูชันขึ้นกับความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิในบารเรล ศุภชัย (2545) รายงานว่ากระบวนการผลิตมีผลต่อสมบัติทางกายภาพและลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์พองตัวที่ผลิตด้วยกระบวนการเอ็กสทรูชันซึ่งประกอบด้วยวัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ และอุณหภูมิของบารเรล Chinnaswamy and Hanna (1988) ได้ศึกษาคุณสมบัติการพองตัวของผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณแอมิโลส 0-70% โดยใช้เครื่องเอ็กสทรูชัน พบว่า bulk density ของผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแอมิโลสของแป้งเพิ่มขึ้น เพราะแป้งแอมิโลสสูงจะดูดน้ำได้ดีกว่าและขยายปริมาตรได้มากกว่าแป้งที่มีแอมิโลสต่ำ Guy (1994) รายงานว่า ในการทำผลิตภัณฑ์อาหารที่มีธัญชาติหรือแป้งเป็นองค์ประกอบหลักโดยมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 25 น้ำหนักเปียก ด้วยกระบวนการเอ็กสทรูชันเมื่อเติมน้ำมันพืชลงไปในส่วนผสมของวัตถุดิบร้อยละ 0.5-1 จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์อาหารอัดพอง มีความสม่ำเสมอดี ประชาและจุฬาลักษณ์ (2543) รายงานว่าเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีควรใช้ปริมาณของน้ำมันพืชร้อยละ 2 หรือน้ำมันทั้งหมดในวัตถุดิบผสมต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 3

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความชื้นสัดส่วนของวัตถุดิบ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด น้ำมันงาและสภาวะการแปรรูปของเครื่องเอ็กสทรูเดอร์สกรูเดี่ยว ได้แก่ อุณหภูมิของบารเรลต่อสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์พองตัว

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบและอุปกรณ์

แป้งข้าวเจ้าได้จากการนำข้าวเจ้าหักพันธุ์ ชัยนาท 1 มาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช (mesh) ส่วนแป้งข้าวโพดเป็นแป้งที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ตราคนอร์ น้ำมันงา ตราช้างคู่ เครื่องเอ็กสทรูเดอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดสกรูเดี่ยวของบริษัท Brabender รุ่น 832500 20 DN อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกต่อความยาวเท่ากับ 1/20 เส้นผ่าศูนย์กลางของบารเรลเท่ากับ 19.1 มม. หน้าแปลน (die) มีลักษณะรูวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางของหน้าแปลนเท่ากับ 3 มม. Compression ratio เท่ากับ 4 : 1

วิธีการทดลอง

1. การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และขนาดอนุภาคของแป้ง

ศึกษาองค์ประกอบของแป้ง 2 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพด โดยใช้แผนการทดลองแบบ Completely randomized design จำนวน 3 ซ้ำ และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี LSD ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

- 1.1 ปริมาณความชื้น (AOAC, 1999)
- 1.2 ปริมาณไขมัน (AOAC, 1999)
- 1.3 ปริมาณโปรตีน (AOAC, 1999)
- 1.4 ปริมาณแอมิโลส (Juliano, 1981)
- 1.5 ขนาดอนุภาค (Jindal, 1985)

2. กระบวนการเลือกขรุขระ

ศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมทั้ง 3 ชนิด คือ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพดและน้ำมันงา ปริมาณความชื้น อุณหภูมิ โดยใช้แผนการทดลองแบบ D-optimal Design เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ระหว่าง ปัจจัยคุณภาพของตัวอย่าง ได้แก่ ตัวแปรตาม (dependent variables) กับตัวแปรอิสระ (independent variables) ประกอบด้วยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสูตรการผลิต ได้แก่ สัดส่วนของวัตถุดิบ ได้แก่ น้ำมันงา (A) สัดส่วน 0-0.03 แป้งข้าวโพด (B) สัดส่วน 0-1 และแป้งข้าวเจ้า (C) สัดส่วน 0 -1

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ (D) (ช่วง 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส) และ ปริมาณความชื้น (E) (ช่วงร้อยละ 14 ถึง 19) สมมติฐานของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ ระหว่างตัวแปรตาม (responses) กับตัวแปรอิสระ (predictor variables) ดังแสดงในสมการ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 + \beta_{55} x_5^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \beta_{15} x_1 x_5 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{25} x_2 x_5 + \beta_{34} x_3 x_4 + \beta_{35} x_3 x_5 + \beta_{45} x_4 x_5 \quad \dots(1)$$

เมื่อ Y = ตัวแปรตาม ได้แก่ อัตราการพองตัว (Y_1) ค่าความหนาแน่น (Y_2)
 ค่าดัชนีการดูดน้ำ (Y_3) ค่าร้อยละการละลายน้ำ (Y_4) และค่าความแข็ง (Y_5)
 β_0 = ค่าคงที่ของสมการ
 β_1, \dots, β_n = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ถดถอยพหุ
 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 = ตัวแปรอิสระ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด น้ำมันงา อุณหภูมิ ความชื้น

3. การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

- 3.1 อัตราการพองตัว (Expansion) (Ryu and Walker, 1995)
- 3.2 ความหนาแน่น (Bulk density) (ธนกร โรจนกร และคณะ, 2541)
- 3.3 ความแข็ง (Hardness) (Bourne, 2002) ความแข็งได้จากจุดสูงสุดของกราฟการกดเป็นค่าแรง (force) ในการกดครั้งแรก ด้วยเครื่อง Texture Analyzer จำนวน 10 ซ้ำ โดยใช้หัววัดแบบ Ottawa cell with wide blade extrusion plate
- 3.4 ดรรชนีการดูดน้ำ (Water absorption Index, WAI) (Gomez et al., 1988)
- 3.5 ร้อยละการละลายน้ำ (Percent Water Solubility, WS) (Gomez et al., 1988)
- 3.6 การวัดสี
 ทำการวัดสีของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากสภาวะต่างๆ โดยการวัดสีในระบบ CIE LAB เพื่อวัดค่า L^* , a^* , b^*

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

- องค์ประกอบทางเคมี และขนาดอนุภาคเฉลี่ย ของแป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า
องค์ประกอบทางเคมี และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างแป้ง ดังแสดงใน Table 1

Table 1. Chemical compositions and average particle size of corn flour and broken rice flour

Chemical compositions and average particle size	Flour	
	Corn	Broken rice
1. Chemical compositions		
1.1 Moisture content (% d.b.)	10.2	12.1
1.2 Protein (% d.b.)	0.26	9.65
1.3 Oil (% d.b.)	0.10	0.32
1.4 Amylose (% d.b.)	30.57	26.28
2. Average particle size (mm)	80 ± 3.21	112.20 ± 20.52

2. สมบัติทางกายภาพ

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Polynomial Regression อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม โดยใช้ข้อมูลใน Table 2

2.1 อัตราการพองตัว (Expansion)

$$Y1 = -6.81 + 6.45A + 11.25B + 11.08C - 88.91D + 8122.7D^2 + 13.03AC$$

$$(R^2 = 0.60) \quad \dots\dots\dots(2)$$

จากสมการที่ 2 เมื่อพิจารณาแป้งแต่ละชนิด (Figure 1a และ 2a) พบว่าทั้งแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้า มีอัตราการพองตัวสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยปริมาณความชื้นทุกระดับจะให้ค่าอัตราการพองตัวที่เท่ากันค่าอัตราการพองตัวสูงสุดของแป้งข้าวโพดอยู่ที่ 4.39 เท่า แป้งข้าวเจ้ามีค่าอัตราการพองตัวสูงสุดเท่ากับ 4.35 โดยปริมาณความชื้นร้อยละ 14 15 16.5 และ 19 ให้ค่าอัตราการพองตัวที่ไม่แตกต่างกัน เป็นที่สังเกตว่าปริมาณความชื้นไม่มีผลต่อค่าอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยอัตราการพองตัวนั้นจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 150 องศาเซลเซียส ไปจนถึงอุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ที่ทุกระดับของปริมาณความชื้น ค่าอัตราการพองตัวจะมีค่าลดลงโดยจะลดลงต่ำสุด ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียสจากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปจนถึง 180 องศาเซลเซียส ค่าอัตราการพองตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบอัตราการพองตัวระหว่างแป้งข้าวโพดกับแป้งข้าวเจ้า พบว่าอัตราการพองตัวของแป้งข้าวโพดสูงกว่า เนื่องจากแป้งข้าวโพดมีปริมาณแอมิโลสสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า แต่มีปริมาณโปรตีนและไขมันต่ำกว่าแป้งข้าวเจ้า แป้งที่มีปริมาณแอมิโลสสูงจะดูดน้ำได้ดีกว่าและขยายปริมาตรได้มากกว่า (Chinnaswamy and Hanna, 1988) แต่อัตราการพองตัวจะลดลงเมื่อปริมาณโปรตีนและไขมันเพิ่มขึ้นโดยโปรตีนจะเปลี่ยนโครงสร้างจาก fold และ unfold เกิดเป็นแคปซูลล้อมรอบเม็ดแป้ง ป้องกันการดูดน้ำ ทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้น้อยลงการเกิดเจลลิตในเซชันจึงลดลง (Badrie and Mellowed, 1992) ในขณะที่ไขมันสามารถรวมตัวกับแอมิโลเพคตินและแอมิโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ จึงมีผลยับยั้งการพองตัวและการเกิดเจลลิตในเซชัน (Arambula-Villa et al., 2001)

ความสัมพันธ์ของน้ำมันงา แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า อุณหภูมิ และปริมาณความชื้น ที่มีต่อค่าอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ (Figure 3a) พบว่าอัตราการพองตัวสูงสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของน้ำมันงาร้อยละ 2 แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 98 สภาวะเครื่องมือ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 14 15 16.5 และ 19 ให้ค่าอัตราการพองตัวสูงสุดเท่ากัน คือ 4.51 เท่า พบว่าหน่วยทดลองที่ให้อัตราการพองตัวสูงสุดนั้นจะมีไขมันอยู่ด้วยร้อยละ 2 แต่เมื่อมีการเพิ่มไขมันเป็นร้อยละ 3 ค่าอัตราการพองของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง สอดคล้องกับการทดลองของ Ilo et al. (1999) ซึ่งรายงานว่าการเพิ่มปริมาณไขมันจะช่วยให้แรงเสียดทานระหว่างการเอ็กซ์ทรูชันมีค่าลดลง แต่ถ้ามีมากเกินไปก็จะทำให้อัตราการพองตัวลดลง

2.2 ความหนาแน่น (Bulk density)

$$Y2 = -0.19 + 0.36B + 0.29C + 276.82D + 2.49E - 0.17BC - 82.07BD - 276.97CD$$

$$(R^2 = 0.70) \dots\dots\dots(3)$$

จากสมการที่ 3 เมื่อพิจารณาแบ่งแต่ละชนิด (Figure 1b และ 2b) พบว่าแป้งข้าวโพดมีค่าความหนาแน่นต่ำสุดคือเท่ากับ 0.12 กรัม/ลบ.ซม. ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เมื่อปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 14 15 16.5 และ 19 จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากัน ส่วนแป้งข้าวเจ้านั้นมีค่าความหนาแน่นต่ำสุด 0.10 กรัม/ลบ.ซม. ที่อุณหภูมิ 150 156 165 171 และ 180 องศาเซลเซียส และปริมาณความชื้นร้อยละ 14 และ 15 พบว่าค่าความหนาแน่นมีค่าสูงที่ระดับของความชื้นร้อยละ 19 เนื่องจากปริมาณน้ำในวัตถุดิบไม่สามารถระเหยออกมาได้หมดในเวลาอันรวดเร็วขณะที่ผลิตภัณฑ์ผ่านออกจากหน้าแปลน จึงมีน้ำเหลือในโครงสร้างการพองตัวจึงไม่ดี (ประชาและจุฬาลักษณ์, 2542)

ความสัมพันธ์ของน้ำมันงา แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า อุณหภูมิและปริมาณความชื้นที่มีต่อค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ (Figure 3b) พบว่าค่าความหนาแน่นต่ำสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของแป้งข้าวโพดร้อยละ 50 แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 50 ที่อุณหภูมิ 171 ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 และที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 และ 15 โดยให้ค่าความหนาแน่นต่ำสุดเท่ากันคือ 0.07 กรัม/ลบ.ซม.

2.3 ดรรชนีการดูดน้ำ (Water absorption index)

$$Y3 = 132.50 - 111.07A - 363.99B - 127.96C - 109.30D + 237.10 B^2 + 170.68AB + 240.10BC$$

$$(R^2 = 0.72) \dots\dots\dots(4)$$

จากสมการที่ 4 เมื่อพิจารณาแบ่งแต่ละชนิด (Figure 1c และ 2c) พบว่าทั้งแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้ามีดรรชนีการดูดน้ำสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส โดยปริมาณความชื้นทุกระดับจะให้ค่าดรรชนีการดูดน้ำเท่ากัน ค่าดรรชนีการดูดน้ำสูงสุดของแป้งข้าวโพดคือ 5.61 เท่า ส่วนแป้งข้าวเจ้ามีค่าเท่ากับ 4.54 เท่า พบว่าที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และปริมาณความชื้นร้อยละ 14 15 16.5 และ 19 มีค่าดรรชนีการดูดน้ำที่ไม่แตกต่างกัน แป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้ามีดรรชนีการดูดน้ำต่ำสุดเท่ากับ 4.52 และ 3.45 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และปริมาณความชื้นร้อยละ 14 15 16.5 และ 19 มีค่าดรรชนีการดูดน้ำที่ไม่แตกต่างกัน ปริมาณความชื้นจึงไม่มีผลต่อค่าดรรชนีการดูดน้ำของผลิตภัณฑ์ แต่ดรรชนีการดูดน้ำจะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิระดับต่ำ (150 องศาเซลเซียส) ค่าดรรชนีการดูดน้ำที่ทุกระดับของปริมาณความชื้นจะมีค่าสูงกว่าการใช้อุณหภูมิระดับสูงและที่ 180 องศาเซลเซียส ในทุกระดับปริมาณความชื้น ค่าดรรชนีการดูดน้ำของแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้าให้ผลเหมือน

กันสอดคล้องกับรายงานของ Balandran – Quintana et al. (1998) ที่กล่าวว่าค่าดัชนีการดูดน้ำจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีการดูดน้ำของแป้งข้าวโพดกับข้าวเจ้า พบว่าแป้งข้าวโพดมีค่าดัชนีการดูดน้ำสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า เนื่องจากแป้งข้าวโพดมีปริมาณแอมิโลสที่สูงกว่าจึงดูดน้ำและเกิดการเจลต์ในเซชันได้มากกว่า

ความสัมพันธ์ของน้ำมันงา แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า อุณหภูมิและปริมาณความชื้นที่มีต่อค่าดัชนีการดูดน้ำของผลิตภัณฑ์ (Figure 3c) พบว่าค่าดัชนีการดูดน้ำสูงสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของแป้งข้าวโพดต่อแป้งข้าวเจ้าเท่ากับ 1 : 1 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 14 15 16.5 และ 19 ซึ่งให้ค่าเท่ากันคือ 5.83 เท่า และค่าดัชนีการดูดน้ำต่ำสุดของผลิตภัณฑ์มีค่าเท่ากับ 3.06 เท่านั้นน้ำมันงาร้อยละ 3 แป้งข้าวโพดร้อยละ 97 สภาวะของเครื่องคือ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 15 16.5 และ 19

2.4 ร้อยละการละลายน้ำ (Percent water solubility)

$$Y4 = 1981.09 - 76516.42A - 1955.88B - 3925.63C + (4.815 \times 10^5)D + 78850.63A^2 + 1961.04C^2 - (2.860 \times 10^5)D^2 + 75003.11AB + 76840.77AC - (4.388 \times 10^5)AD + 1962.57BC - (4.829 \times 10^5)BD - (4.828 \times 10^5)CD$$

$$(R^2 = 0.98) \dots\dots\dots(5)$$

จากสมการที่ 5 เมื่อพิจารณาแป้งแต่ละชนิด (Figure 1d และ 2d) พบว่าแป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า มีค่าร้อยละการละลายน้ำ สูงสุดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 15 16.5 และ 19 ค่าร้อยละการละลายน้ำสูงสุดของแป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 17.39 และ 52.10 ตามลำดับ

Table 2 . Expansion ratio, bulk density, water absorption index (WAI), percent water solubility (WS), hardness, lightness (L*), redness (a*) and yellowness (b*) of extrudates.

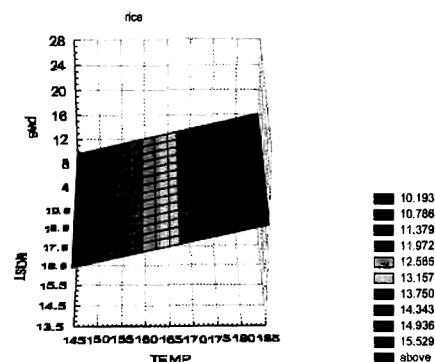
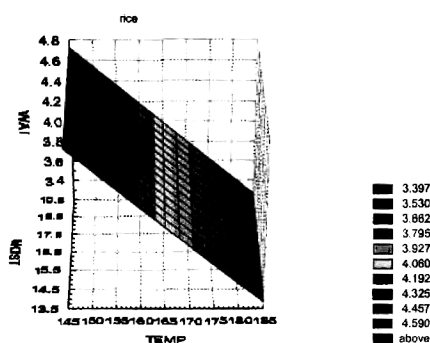
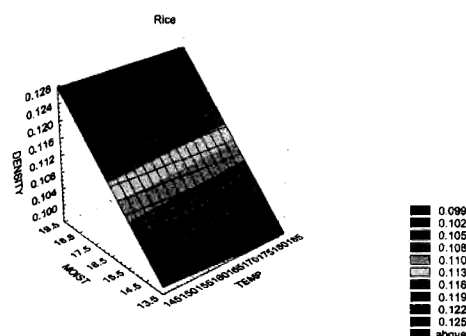
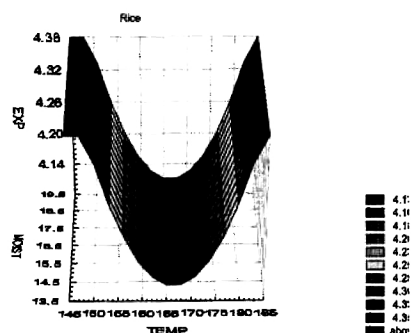
Experimental unit	Raw materials(%)			Temp (°C)	Moisture content (% w.b.)	Expansion (times)	Bulk density (g./ml)	WAI (Times)	WS (%)	Hardness (g.)	Color Value ^a		
	sesame oil	corn flour	broken rice flour								L*	a*	b*
1	3	97	0	150	14	4.34	0.18	4.63	40.98	18499.68	53.39	-1.4	5.46
2	0	0	100	150	14	4.29	0.11	4.26	15.74	7558.16	61.85	0.43	12.33
3	0	100	0	150	14	4.47	0.19	5.39	22.31	20145.21	61.86	-1.71	5.34
4	3	97	0	150	14	4.31	0.17	3.21	44.01	14745.02	50.41	-1.66	5.37
5	0	100	0	150	14	4.31	0.17	6.18	28.09	17180.61	58.36	-1.8	5.65
6	1.5	98.5	0	150	16.5	4.24	0.18	4.02	35.99	17646.5	52.27	-1.78	5.6
7	3	0	97	150	16.5	4.35	0.09	5.48	17.21	7028.14	62.27	0.07	10.41
8	3	48.5	48.5	150	19	4.39	0.11	5.79	25.97	14531.77	55.63	-0.44	8.97
9	1.5	49.25	49.25	150	19	4.22	0.13	6.16	24.1	12086.26	50.32	-1.61	6.88
10	0	0	100	150	19	4.23	0.13	5.82	17.62	12432.79	61.61	-0.24	10.15
11	0	100	0	150	19	4.24	0.18	4.39	47.17	19544.96	58.92	-1.85	5.97
12	0	0	100	150	19	4.06	0.15	5.55	16.87	14177.79	61.25	-0.28	9.86
13	0	100	0	150	19	4.42	0.18	4.78	43.05	7845.98	61.61	-1.8	6.01
14	1	74	25	156	15	4.43	0.17	4.56	31.23	13034.85	50.69	-1.64	5.54

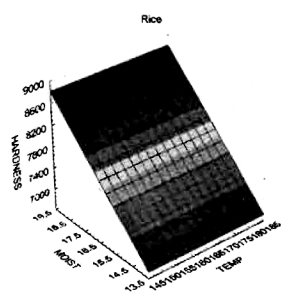
(Cont.)

Experi- mental unit	Rew materials(%)			Temp (°C)	Moisture content (% w.b.)	Expansion (times)	Bulk density (g./ml)	WAI (Times)	WS (%)	Hardness (g.)	Color Value ^a		
	sesame oil	corn flour	broken rice flour								L*	a*	b*
15	1	25	74	156	15	4.36	0.07	6.21	25.34	7907.59	49.88	-1.3	7.3
16	0	0	100	165	14	3.74	0.1	4.86	16.19	10039.31	62.31	1.01	13.27
17	1.5	98.5	0	165	14	3.97	0.15	4.62	35.43	11552.02	60.46	-1.25	6.21
18	0	50	50	165	16.5	3.93	0.13	4.27	40.16	10418.16	61.98	-0.79	8.2
19	3	97	0	165	16.5	3.87	0.23	2.57	55.4	11976.77	54.72	-0.71	7
20	2	25	73	171	15	4.2	0.13	5.43	33.16	8096.59	59.05	-0.31	9.18
21	2	73	25	171	15	4.22	0.15	4.31	46.88	11394.19	58.26	-0.56	9.11
22	0	0	100	180	14	4.18	0.1	5.40	21.82	10078.81	61.18	0.89	12.41
23	1.5	0	98.5	180	14	4.22	0.22	4.38	27.66	9997.75	62.18	0.21	10.78
24	0	100	0	180	14	4.3	0.16	3.23	82.10	18745.54	59.63	-1.66	5.94
25	3	48.5	48.5	180	14	4	0.14	4.18	42.07	8908.8	55.21	-0.16	8.78
Model	2	3.5	94.5	165	14	4.12	0.12	4.86	21.47	7751.11	63.30	-0.06	10.23
Exp ^b	2	3.5	94.5	165	14	4.33	0.09	5.10	17.6	7264.95	50.10	-0.21	10.33

^a L* a* b* are color value in CIE LAB

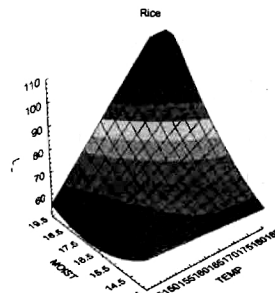
^b Exp = Experimentation





6915.809
7105.519
7295.228
7484.937
7674.646
7864.355
8054.064
8243.773
8433.482
8623.191
above

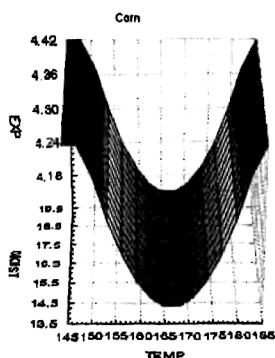
Hardness (1e)



56.452
61.807
67.161
72.516
77.871
83.226
88.581
93.936
99.290
104.645
above

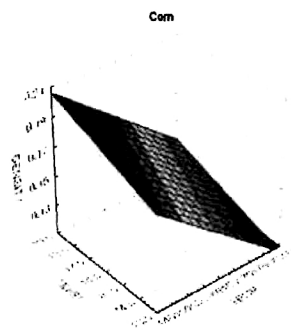
Lightness (1f)

Figure 1. Effect of temperatures and moisture contents of broken rice flour on responded of the physical properties of extrudates. (partial)



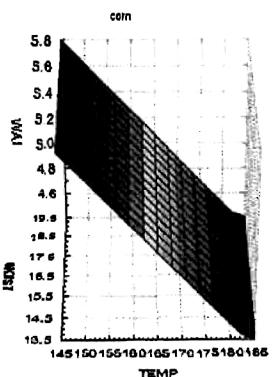
4.175
4.200
4.224
4.249
4.273
4.298
4.322
4.347
4.371
4.396
above

Expansion ration (2a)



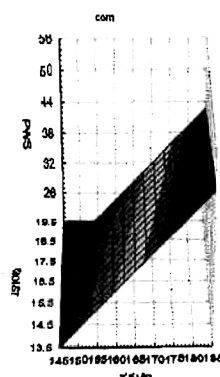
0.119
0.127
0.136
0.145
0.154
0.162
0.171
0.180
0.189
0.197
above

Bulk density (2b)



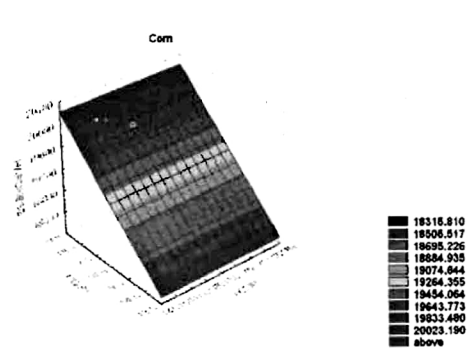
4.627
4.653
4.679
4.706
4.733
4.759
4.786
4.812
4.839
4.866
above

Water absorption (2c)

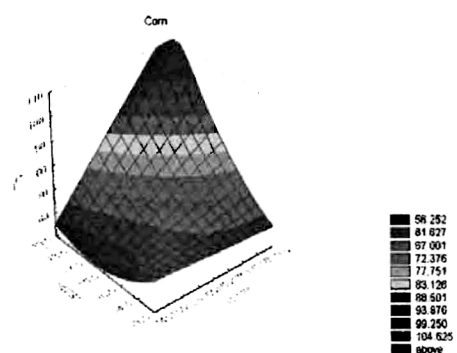


22.652
25.394
27.986
30.808
33.280
35.812
38.564
41.217
43.669
46.521
above

Percent solubility index (2d)

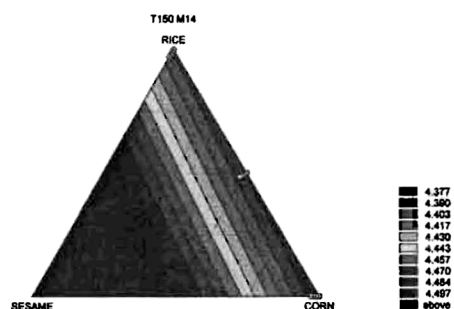


Hardness (2e)

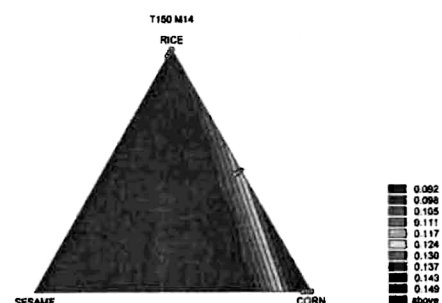


Lightness (2f)

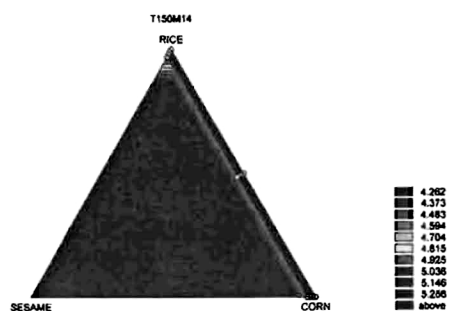
Figure 2. Effect of temperatures and moisture contents of corn flour on responded of the physical properties of extrudates. (partial)



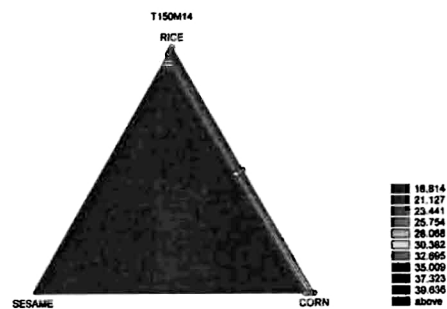
Expansion ration (3a)



Bulk density (3b)



Water absorption (3c)



Percent solubility index (3d)

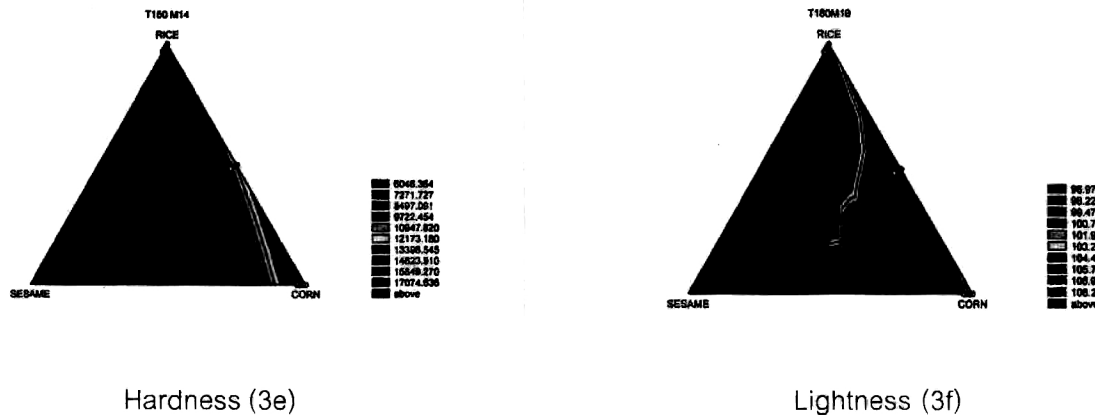


Figure 3. Effect of sesame oil, corn flour, broken rice flour, temperatures and moisture contents on the physical properties of extrudates. (partial)

แป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้ามีค่าร้อยละการละลายน้ำต่ำสุดอยู่ที่ 9.21 และ 16.50 ตามลำดับ ที่สภาวะอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 15 16.5 และ 19 ร้อยละการละลายน้ำเป็นวิธีวัดทางอ้อมในการตรวจวัดการแตกหักของโมเลกุลแป้งทำให้โมเลกุลแป้งมีขนาดเล็กลงจนสามารถละลายน้ำได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าร้อยละการละลายน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิด dextrinization ทำให้โมเลกุลของแอมิโลสและแอมิโลเพคตินมีขนาดเล็กลง จึงละลายน้ำได้มากขึ้นและไม่สามารถอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้าง (Badrie and Mellowed, 1992b) การเพิ่มปริมาณความชื้นของส่วนผสมจะทำให้แป้งสุกได้เร็วขึ้นเพราะแป้งสามารถดูดน้ำได้รวดเร็วและเพียงพอที่จะทำให้เม็ดแป้งแตก โมเลกุลแอมิโลสสามารถหลุดออกมาจากเม็ดแป้งได้มาก ทำให้ค่าร้อยละการละลายน้ำเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบร้อยละการละลายน้ำระหว่างแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้า พบว่าร้อยละการละลายน้ำของแป้งข้าวโพดสูงกว่าแป้งข้าวเจ้าเพราะแป้งข้าวโพดมีปริมาณแอมิโลสที่มากกว่า

ความสัมพันธ์ของน้ำมันงา แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า อุณหภูมิและปริมาณความชื้นที่มีต่อค่าร้อยละการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ (Figure 3d) พบว่าค่าร้อยละการละลายน้ำสูงสุดของผลิตภัณฑ์เท่ากับ 52.10 โดยมีสัดส่วนของแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 15 16 และ 19 และค่าร้อยละการละลายน้ำต่ำสุดของผลิตภัณฑ์ เท่ากับ 9.21 โดยมีสัดส่วนของแป้งข้าวโพดร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 15 16.5 และ 19

2.5 ค่าความแข็ง (Hardness)

$$Y5 = (4.152 \times 10^5) - (4.776 \times 10^5)A - (1.254 \times 10^6)B - (4.083 \times 10^5)C + (1.739 \times 10^5)E \\ + (8.571 \times 10^5)B^2 + (8.725 \times 10^5)AB + (8.511 \times 10^5)BC$$

$$(R^2 = 0.62) \dots\dots\dots(6)$$

จากสมการที่ 6 เมื่อพิจารณาแป้งแต่ละชนิด (Figure 1e และ 2e) พบว่าทั้งแป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า มีค่าความแข็งสูงสุดเมื่อมีปริมาณความชื้นร้อยละ 19 และความแข็งต่ำสุดที่ความชื้นร้อยละ 14 โดยทุกระดับอุณหภูมิให้ค่าความแข็งเท่ากัน ค่าความแข็งสูงสุดของแป้งข้าวโพดเท่ากับ 20,039 กรัม ค่าความแข็งต่ำสุดคือ 18,300 กรัม ส่วนแป้งข้าวเจ้า มีค่าความแข็งสูงสุดอยู่ 8,639 กรัม มีค่าความแข็งต่ำสุด 6,900 กรัม

ความสัมพันธ์ของน้ำมันงา แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า อุณหภูมิและปริมาณความชื้นที่มีต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ (Figure 3e) พบว่าค่าความแข็งสูงสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของแป้งข้าวโพดร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 150 156 165 171 และ 180 องศาเซลเซียส และปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 19 โดยให้ค่าความแข็งสูงสุดเท่ากันทุกอุณหภูมิ คือ 20,039 กรัม และค่าความแข็งต่ำสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของน้ำมันงาร้อยละ 3 แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 97 ที่อุณหภูมิ 150 156 165 171 และ 180 องศาเซลเซียสและปริมาณความชื้นร้อยละ 14 ให้ค่าความแข็งต่ำสุดเท่ากันทุกอุณหภูมิ คือ 4,821 กรัม โดยพบว่าค่าความแข็งต่ำมีผลจากไขมันที่เติมลงไป เนื่องจากไขมันช่วยลดแรงเสียดทานที่เกิดภายในกระบวนการเอ็กซทรูชัน ประกอบกับการที่ความชื้นต่ำ ทำให้อัตราการพองตัวมีค่าสูงและความหนาแน่นมีค่าต่ำ ค่าความแข็งที่ได้จึงมีค่าต่ำด้วย

2.6 ค่าความสว่าง (L*)

$$L^* = 60.58 + 188.65A - 27.8B + 95.29D - 2181.45E + 27.58B^2 + (2.221 \times 10^5)E^2 - 438.55AB + (4.191 \times 10^5)DE$$

$$(R^2 = 0.76) \dots\dots\dots(7)$$

จากสมการที่ 7 เมื่อพิจารณาแป้งแต่ละชนิด (Figure 1 และ 2) พบว่าแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้า มีค่าความสว่าง (L*) สูงที่สุดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 19 โดยมีค่าความสว่าง เท่ากับ 103.62 และ 103.84 ตามลำดับ ทั้งแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้าที่อุณหภูมิเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 16.5 มีค่าความสว่างต่ำสุดเท่ากับ 55.01 และ 55.23 ตามลำดับ พบว่าค่าความสว่างของแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้ามีค่าใกล้เคียงกันแต่แป้งข้าวเจ้าให้ค่ามากกว่าเล็กน้อยเนื่องจากแป้งข้าวเจ้าให้สีในขณะการพองเป็นสีขาว (Moore,1994)

ความสัมพันธ์ของน้ำมันงา แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า อุณหภูมิ และปริมาณความชื้นที่มีต่อค่าความสว่าง (L*) ของผลิตภัณฑ์ (Figure 3f) พบว่าค่าความสว่าง (L*) สูงสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของน้ำมันงาร้อยละ 3 แป้งข้าวเจ้าร้อยละ 97 ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 19 ให้ค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 109.5 และค่าความสว่าง (L*) ต่ำสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของน้ำมันงาร้อยละ 3 แป้งข้าวโพดร้อยละ 97 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 16.5 โดยมีค่าความสว่าง (L*) เท่ากับ 47.11

2.7 ค่าความแดง (a*)

$$a^* = 1513.94 - 3070.22B - 3099.74C + 72.64D - 0.64E + 1554.57B^2 + 1586.31C^2 + 3139.41BC$$

$$(R^2 = 0.92) \dots\dots\dots(8)$$

จากสมการที่ 8 เมื่อพิจารณาแป้งแต่ละชนิด (Figure 1 และ 2) พบว่าทั้งแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้า มีค่าความแดง (a*) สูงที่สุดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 และร้อยละ 15 โดยที่มีค่าความแดง (a*) เท่ากับ -0.98 และ 1.24 ตามลำดับ และทั้ง 2 ชนิด มีค่าความแดง (a*) ต่ำสุดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 15 และ 16.5 ให้ค่าเท่ากันทุกระดับของความชื้น โดยค่าความแดง (a*) เท่ากับ -1.71 และ 0.51 ตามลำดับ แป้งข้าวเจ้ามีค่าความแดงมากกว่าแป้งข้าวโพด เนื่องมาจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลในแป้งข้าวเจ้า โดยอุณหภูมิที่มีค่าความแดงสูงสุดคือ ที่ระดับ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นระดับต่ำที่ร้อยละ 14 และ

15 ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลจะเห็นผลในแป้งข้าวเจ้ามากกว่า เนื่องจากว่าข้าวเมื่อพองตัวจะมีสีขาว (Moore, 1994) เมื่อเกิดปฏิกิริยาน้ำตาลจึงวัดค่าความแดง (a^*) ได้มาก

ความสัมพันธ์ของน้ำมันงา แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า อุณหภูมิและปริมาณความชื้นที่มีต่อค่าความแดง (a^*) ของผลิตภัณฑ์ (Figure 3) พบว่าค่าความแดง (a^*) สูงสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 และ 15 ซึ่งมีค่าเท่ากัน คือ 1.24 และค่าความแดง (a^*) ต่ำสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของน้ำมันงาร้อยละ 1 แป้งข้าวโพดร้อยละ 99 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 15 16.5 และ 19 ซึ่งมีค่าเท่ากัน คือ -1.95

2.8 ค่าความเหลือง (b^*)

$$b^* = 58.95 + 4495.99A - 53.41B - 46.96C - 6.99E - 4684.93AB - 4753.39AC - 237.14 CE$$

$$(R^2 = 0.92) \dots\dots\dots(9)$$

จากสมการที่ 9 เมื่อพิจารณาแป้งแต่ละชนิด (Figure 1 และ 2) พบว่าแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้า มีค่าความเหลือง (b^*) สูงสุดที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 อุณหภูมิ 150 156 165 171 และ 180 องศาเซลเซียส โดยที่มีค่าความเหลือง (b^*) สูงสุดเท่ากับ 5.54 และ 11.99 ตามลำดับ และมีค่าความเหลือง (b^*) ต่ำสุดที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 19 อุณหภูมิ 150 156 165 171 และ 180 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่าเท่ากันทุกอุณหภูมิ โดยค่าความเหลือง (b^*) ต่ำสุดเท่ากับ 5.47 และ 9.55 ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของน้ำมันงา แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า อุณหภูมิและปริมาณความชื้นที่มีต่อค่าความเหลือง (b^*) ของผลิตภัณฑ์ (Figure 3) พบว่าค่าความเหลือง (b^*) สูงสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 150 156 165 171 และ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 โดยให้ค่าความเหลือง (b^*) สูงสุดเท่ากัน คือ 11.99 และค่าความเหลือง (b^*) ต่ำสุดของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่สัดส่วนของน้ำมันงาร้อยละ 1 แป้งข้าวโพดร้อยละ 99 ที่อุณหภูมิ 150 156 165 171 และ 180 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 19 จะให้ค่าความเหลือง (b^*) ต่ำสุดเท่ากัน คือ 4.58 ค่าความเหลือง (b^*) ของแป้งข้าวเจ้ามีค่าสูง เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลและข้าวเจ้าเมื่อพองตัวจะมีสีขาว (Moore, 1994) เมื่อเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลขึ้นจึงวัดค่าความเหลือง (b^*) ได้มาก

3. ส่วนผสมและสภาวะการผลิตซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสเหมาะสม

ผลิตภัณฑ์พองตัวที่ดีควรมีค่าความหนาแน่นและอัตราการพองตัว ดังนี้ ความหนาแน่น 0.048 – 0.064 กรัม/ลบ.ซม. (Rokey and Huber, 1987) 0.050 – 0.16 กรัม/ลบ.ซม. (Moore, 1994) 0.059 ± 0.10 กรัม/ลบ.ซม. (ประชาและจุฬาลักษณ์, 2543) อัตราการพองตัวควรมีค่าในช่วง 3.06 – 3.83 (Mohamed, 1990) 4.03 ± 0.2 (ประชาและจุฬาลักษณ์, 2543)

จากลักษณะของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวใช้ในการทำนายส่วนผสมของผลิตภัณฑ์จากแบบจำลอง พบว่าสภาวะที่ให้ผลิตภัณฑ์ลักษณะดังกล่าวโดยเฉพาะในด้านของอัตราการพองตัวที่สูง ความหนาแน่นต่ำ และแรงกดแตกต่ำประกอบด้วยน้ำมันงาร้อยละ 2 แป้งข้าวโพดร้อยละ 3.5 และแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 94.5

สรุป

ผลกระทบขององค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด และน้ำมันงาที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถแสดงด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ปริมาณความชื้นในช่วงที่ศึกษาไม่มีอิทธิพลต่ออัตราการพองตัว ควรพิจารณาการดูดน้ำและร้อยละการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ ปริมาณน้ำมันงาในช่วงที่ศึกษาไม่มีอิทธิพลต่อความหนาแน่น

และค่าความแดง อุณหภูมิในช่วงที่ศึกษาไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งและค่าความเหลืองและปริมาณแป้งข้าวเจ้าในช่วงที่ศึกษาไม่มีอิทธิพลต่อค่าความสว่างส่วนผสมและสภาวะการผลิตที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะที่เนื้อสัมผัสที่เหมาะสม จากแบบจำลองคือ สูตรที่ประกอบด้วยน้ำมันงาร้อยละ 2 แป้งข้าวโพดร้อยละ 3.5 และแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 94.5 อุณหภูมิที่ 165 องศาเซลเซียส ปริมาณความชื้นร้อยละ 14

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนประเภท เงินอุดหนุนทั่วไป จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

บรรณานุกรม

- ธนกร โรจนกร, สิงหนาท พวงจันทร์แดง, บวรศักดิ์ ลีนานนท์, รัชฎา ตั้งวงศ์ไชย, อารยา เซาว์เรืองฤทธิ์.
2541. คู่มือปฏิบัติการวิชา 667 322 การแปรรูปอาหาร 2 (Food Processing2).
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยขอนแก่น : ขอนแก่น. 80 หน้า.
- ประชา บุญญสิริกุลและ จุฬาลักษณ์ จารุณช. 2543. การพัฒนาขนมกรอบที่มีข้าวโพดเคลือบ - ปลายข้าว
เป็นองค์ประกอบหลักด้วยกระบวนการอัดพอง. อาหาร 30(1) : 17-35.
- ประชา บุญญสิริกุลและ จุฬาลักษณ์ จารุณช. 2542. การพัฒนาอาหารเข้าธัญชาติพร้อมบริโภคที่มีปลายข้าวเจ้า
เป็นองค์ประกอบหลักด้วยกระบวนการอัดพอง. เกษตรศาสตร์(วิทย) 33(3): 415 - 429.
- ศุภชัย ภูลายดอก. 2545. อิทธิพลของแป้งจากธัญชาติชนิดต่าง ๆ ต่อสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์พองตัว
ที่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร :
บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- A.O.A.C. 1999. Official Methods of Analysis Association of Official Analytical Chemists.
16thed. Washinton D.C. Chapter 32; 1, 24, 32B p.
- Arambula-Villa, G., Gonzalez-Hernandez, J., Ordarica-Falomit, C.A.2001. Physicochemical,
structural and textural properties of tortillas from extruded instant corn flour
supplemented with various type of corn lipids. J. of Cereal Science. 33: 245 - 252.
- Badrie, N. and Mellowed, W. 1992. Cassava starch or amylose effects on characteristics of
cassava (Manihot esculenta Cratz) extrudate. J. Food Science. 57(1): 103 -107.
- Badrie, N. and Mellowed, W.A. 1992. Soybean flour / oil and wheat bran effects on characteristics of
cassava (Manihot esculenta cratz) flour extrudate. J. Food Science. 57(1): 108 -111.
- Balandran – Quintana, R.R., Barbasa – Canovas, G.V., Zazueta – Molales, J.J., Anzaldua – Morales,
A. and Ramos, Q. 1998. Functional and nutritional properties of extruded
whole pinto meal (Phaseolus Vulgaris L.). J. Food Science. 63(1): 113 - 116.
- Bourne, M.C. 2002. Food Texture and Viscosity : Concept and Measurement. Charon Tec Pvc.
Ltd : India. 427p.
- Chiang, B-Y and Johnson, J.A. 1977. Gelatinization of starch in extruded products.
Cereal Chem. 54(3): 436 - 443.
- Chinnaswamy, R. and Hanna, M.A. 1988. Kinetics of starch gelatinization during cooking.
J Food Science. 52(3): 764 - 766.

- Gomez, M.H., Waniska, R.D., Rooney, L.E. and Lusas, E.W. 1988. Extrusion - cooking of sorghum containing different amounts of amylose. *J. Food Science*. 53(4): 1818 -1822.
- Guy, R.C.E. 1994. Raw materials for extrusion cooking process. Glasgow: Chapman and Hall. 52 - 73 p.
- Ilo, S., Liu, Y. and Berghofer, E. 1999. Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. *Lebensm. Wiss.u Technol*. 32(2): 79 - 88.
- Jindal, V.K. 1985. Food process engineering I. Asean Institute of Technology, Bangkok. 140 p.
- Juliano, B., Perez, C., Blakeney, A., Castillo, T., Kongseeree, N., Laignelet, B., Lapis, E., Murty, V., Paule, C. and Webb, B. 1981. International cooperative testing on the amylose content of milled rice. *Starch/Starke*. 33 : 157-162.
- Mohamed, S. 1990. Factors affecting extrusion characteristic of expanded starch – based product. *J. Food. Proc. and Preser*. 14: 437- 452.
- Moore, G. 1994. Snack food extrusion. Chapman and Hall : Glasgow. 133 -139 p.
- Ryu, G.H. and Walker C.E. 1995. The effects of extrusion conditions on the physical properties of wheat flour extrudates. *Starch / Starke*. 47(1): 33 -36.
-

