

อิทธิพลของแป้งจากธัญชาติชนิดต่างๆ ต่อสมบัติทางฟิสิกส์ ของผลิตภัณฑ์พองตัวที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Influence of Various Cereal Flours on Physical Properties of Expanded Extrudates

สิงหนาท พวงจันทร์แดง (Singhanat Phoungchandang)^{1*} ศุภชัย ภูลายดอก (Subhachai Bhulaidok)²
เกษม นันทชัย (Kasem Nantachai)³ วิเชียร วรพุดทพร (Wichain Woraphuttaporn)³
สุนันทา ทองทา (Sunanta Tongta)⁴ วีระ สุวรรณศร (Vira Suvannason)⁵

บทคัดย่อ

อิทธิพลของปัจจัยการผลิตที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์พองตัว ที่ผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ประกอบด้วย วัตถุดิบและสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิต จึงทดลองหาอิทธิพลของวัตถุดิบที่ประกอบด้วย แป้งสาลี (A) แป้งข้าวโพด (B) และแป้งข้าวเจ้า (C) ผสมกันในสัดส่วน 0 ถึง 1 และสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่ประกอบด้วย อุณหภูมิ (D) 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส และปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ (E) ร้อยละ 14 ถึง 19 ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์ในด้านต่างๆ คือ อัตราการพองตัว ความหนาแน่น แรงสูงสุด ดรรชนีการดูดน้ำ ร้อยละการละลายน้ำ ด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว โดยวางแผนการทดลองแบบ D-optimal Design พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ทดลองกับลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มีความสัมพันธ์กัน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ สมการโพลิโนเมียลรีเกรสชัน ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าสามารถใช้ในการทำนายสมบัติทางฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์ได้ และสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งสาลี แป้งข้าวโพดและแป้งข้าวเจ้า ทั้งจากแป้งแต่ละชนิดแยกกัน และนำแป้งมาผสมกันในสัดส่วนต่างๆ เป็นวัตถุดิบ ควรมีปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 16.5 และสภาวะอุณหภูมิของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เท่ากับ 165 องศาเซลเซียส จึงให้ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่พองตัวเหมาะสม

Abstract

The process variables for expanded extrudates using the extrusion process comprise raw materials and process conditions. A study of raw materials, such as wheat flour (A), corn flour (B) and rice flour (C) on the physical properties of products was performed. Three kinds of flour were mixed in a ratio ranging from 0 to 1. The process conditions were temperature (D) from 150 to 180 °C and raw material moisture (E) from 14 to 19% which affect the physical properties of products such as expansion ratio, bulk density, maximum

¹รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตกาฬสินธุ์

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

⁴ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

⁵นายช่างเทคนิค ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*corresponding author, e-mail: sinpho@kku.ac.th

force, water absorption index, and percent water solubility. Physical properties were evaluated using some quality aspects including expansion ratio, bulk density, maximum force, water absorption index, percent water solubility. A single screw extruder was used to extrude the raw materials. D-optimal design was used to relate the process variables to physical properties of products. It was found that the relationship between these variables could be fitted by a mathematical model using polynomial regression. The mathematical model could be used to predict the physical properties of products. The optimum conditions of the process from the mixtures of wheat, corn and rice flour both individually or in a mixture of the flours in various ratios was 16.5% moisture content and barrel temperature of 165 °C which provided high expansion products.

คำสำคัญ: การอัดพอง ขนมขบเคี้ยว สมบัติทางฟิสิกส์

Keywords: extrusion, snack, physical properties

บทนำ

กระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมอาหารประเภทต่างๆ ได้แก่ การผลิตอาหารขบเคี้ยวประเภทที่มีการพองตัวทันที อาหารขบเคี้ยวประเภทที่ต้องผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดการพองตัวในภายหลัง อาหารเซ็ธัญชาติ พาสต้า เป็นต้น เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูงและเวลาสั้นและเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งช่วยในการประหยัดเวลาและแรงงาน รวมถึงพื้นที่สำหรับการผลิตด้วย (Harper, 1981a) กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประกอบด้วย การเกิดแรงเฉือนของวัตถุดิบและน้ำ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุล เช่น การเกิดเจลลาทีนเซชันของสตาร์ช เมื่อวัตถุดิบที่ผ่านการหุงต้มได้รับแรงดันผ่านช่องทางช่องเปิด (die) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัวอย่างรวดเร็ว โดยมีขนาดใหญ่มากกว่าขนาดของช่องเปิดหลายเท่า (Padmanabhan and Battacharya, 1989) โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้แก่ วัตถุดิบเมล็ดธัญชาติ พืชหัว (Harper, 1981b) ซึ่งมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก เพราะสตาร์ชในแป้งสามารถพองตัวได้ดี เมื่อผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เช่นเดียวกับแป้งจากเมล็ดถั่ว (ประชา, 2539) โดยแป้งที่ได้รับความนิยมใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารขบเคี้ยวโดยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน คือ

แป้งธัญชาติ เนื่องจากแป้งจากแหล่งดังกล่าวปลูกในปริมาณมาก และมีหลายชนิด (Harper, 1981b) โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ ทดลองเกี่ยวกับองค์ประกอบต่างๆ ของแป้งที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่น ปริมาณและชนิดของโปรตีน และไขมัน (Faubion and Hosenev 1982a; 1982b) ปริมาณแอมิโลสและแอมิโลเพกทิน (Bhuiyan and Blanshard, 1982a; 1982b; Bhattacharya and Hanna, 1987a; 1987b; Chinnaswamy and Hanna, 1988; Gomez et al., 1988) เป็นต้น และงานวิจัยอีกส่วนหนึ่งให้ความสนใจตรวจสอบอิทธิพลของสภาวะที่ใช้ในกระบวนการผลิตที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ เช่น ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ อุณหภูมิของบาร์เรล ความเร็วสกรู อัตราเร็วในการป้อนวัตถุดิบ (Ryu and Walker, 1995) โดยเฉพาะปริมาณความชื้นเริ่มต้นในวัตถุดิบ และอุณหภูมิของบาร์เรล พบว่าเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อลักษณะ และสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งลักษณะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันคือ อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ (Padmanabhan and Bhattacharya, 1989) ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์หลักๆ ได้แก่ วัตถุดิบ และสภาวะที่ใช้ในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แต่ยังคงขาดการทดลองเกี่ยวกับวัตถุดิบจากธัญชาติ

ชนิดต่างๆ ซึ่งทำการเปรียบเทียบกันโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดเดียวกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจตรวจสอบลักษณะของผลิตภัณฑ์พองตัวที่ผลิตจากแป้งธัญชาติ 3 ชนิด คือ แป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า นำมาผสมกันที่มีผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์พองตัว โดยควบคุมสภาวะการผลิต ได้แก่ ปริมาณความชื้น และอุณหภูมิที่เหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีวิจัย

1. วัตถุประสงค์และอุปกรณ์

แป้งธัญชาติ ได้แก่ แป้งสาลีเอนกประสงค์ตราว่าว แป้งข้าวโพดตรา Maizena Cornflour และแป้งข้าวเจ้า ตราเหรียญทองคู่ นำมาปรับความชื้นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดสกรูเดี่ยวของบริษัท Brabender รุ่น 832500 20 DN อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกต่อความยาวเท่ากับ 1/20 เส้นผ่าศูนย์กลางของบาร์เรลเท่ากับ 19.1 มิลลิเมตร ช่องเปิด (die) มีลักษณะรูปร่างวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเปิดเท่ากับ 3 มม. Compression ratio เท่ากับ 4:1

2. การตรวจวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี และขนาดอนุภาคของแป้ง

วิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแป้ง 3 ชนิด คือ แป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า โดยใช้แผนการทดลองแบบ Completely randomized block design

2.1 องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ สตาร์ช โปรตีน ไขมัน (AOAC, 1994)

2.2 ปริมาณแอมิโลส (Juliano et al., 1981)

2.3 ปริมาณสตาร์ช (Polarization method) (AOAC, 1994)

2.4 ขนาดอนุภาค (Martinez – Flores et al., 1998)

3. กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

ตรวจสอบอิทธิพลของแป้ง 3 ชนิด คือ แป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า ปริมาณความชื้น และอุณหภูมิ โดยใช้แผนการทดลองแบบ D – optimal

Design เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างปัจจัยคุณภาพของตัวอย่าง ได้แก่ ตัวแปรตาม (dependent variables) กับตัวแปรอิสระ (independent variables) ประกอบด้วยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสูตรการผลิต ได้แก่ สัดส่วนของแป้ง คือ แป้งสาลี (A) สัดส่วน 0 – 1 แป้งข้าวโพด (B) สัดส่วน 0-1 และแป้งข้าวเจ้า (C) สัดส่วน 0-1

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ (D) (ช่วง 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส) และปริมาณความชื้น (E) (ช่วงร้อยละ 14 ถึง 19) สมมุติฐานของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (responses) กับตัวแปรอิสระ (predictor variables) ดังแสดงในสมการที่ (1)

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

เมื่อ Y = ตัวแปรตาม ได้แก่ อัตราการพองตัว (Y₁) ค่าความหนาแน่น (Y₂) แรงสูงสุด (Y₃) ดรรชนีการดูดน้ำ (Y₄) ค่าร้อยละการละลายน้ำ (Y₅)

b₀ = ค่าคงที่ของสมการ

b_{1.....n} = สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ถดถอยพหุ

x₁ x₂ x₃ x₄ x₅ = ตัวแปรอิสระ ได้แก่ แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า อุณหภูมิ ความชื้น

4. การตรวจสอบสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของผลิตภัณฑ์

4.1 ปริมาณความชื้น (AOAC, 1994)

4.2 อัตราการพองตัว (Expansion) (Ryu and Walker, 1995)

4.3 ความหนาแน่น (Bulk density) (ธนกร และคณะ, 2541)

4.4 แรงสูงสุด (Maximum force) (Onwulata et al., 1998)

4.5 ดรรชนีการดูดน้ำ (Water Absorption Index, WAI) (Gomez et al., 1988)

4.6 ร้อยละการละลายน้ำ (Percent Water Solubility, WS) (Gomez et al., 1988)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. องค์ประกอบทางเคมี และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า

องค์ประกอบทางเคมี และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างแป้งดังแสดงในตารางที่ 1

2. สมบัติทางฟิสิกส์

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้ Polynomial Regression อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามโดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 2

2.1 อัตราการพองตัว (Expansion)

$$Y_1 = -28.465 + 0.404D - 0.16E + 0.155AE + 1.966B^2 + 3.065BC + 9.142 \times 10^{-2}CE - 1.242 \times 10^3D^2 (R^2=0.70)..(2)$$

จากตารางที่ 2 และสมการที่ (2) เมื่อแยกพิจารณาแป้งแต่ละชนิดพบว่าแป้งทั้ง 3 ชนิด คือ แป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้ามีอัตราพองตัวสูงที่สุดที่ระดับของปริมาณความชื้นร้อยละ 14 และระดับของอุณหภูมิเท่ากับ 165 องศาเซลเซียส (รูปที่ 1) โดยการพองตัวของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้นจากร้อยละ 14 ถึง 19 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Chinnaswamy and Hanna (1988)

เมื่อพิจารณาอัตราการพองตัวของแป้งทั้ง 3 ชนิด ดังกล่าวแยกกัน พบว่าแป้งข้าวโพดมีอัตราการพองตัวสูงที่สุด รองลงมาคือ แป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้า ตามลำดับ โดยมีค่าอัตราการพองตัวเท่ากับ 4.11 3.75 และ 3.42 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่แป้งข้าวโพดมีอัตราการพองตัวสูงที่สุด เนื่องจากแป้งข้าวโพดมีปริมาณสตาร์ชและแอมิโลสสูงกว่า และมีปริมาณโปรตีนและไขมันต่ำกว่า (ตารางที่ 1) โดยผลิตภัณฑ์มีอัตราการพองตัวสูงขึ้นเมื่อปริมาณสตาร์ช (Mercier et al., 1989) และแอมิโลส

(Chinnaswamy and Hanna, 1988) สูงขึ้น และอาจเกิดจากโครงสร้างของโปรตีนที่แตกต่างกันโดยในแป้งสาลีมีโปรตีนที่อยู่ในรูปของ fibrillar form ซึ่งสามารถขยายตัวได้มากเมื่อให้ความดัน

ความสัมพันธ์ของแป้งทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำแป้งมาผสมกันในสูตรการผลิต พบว่าอัตราการพองตัวสูงสุดของผลิตภัณฑ์ยังคงเหมือนกับแป้งทั้ง 3 ชนิดแยกกัน คือ มีอุณหภูมิเท่ากับ 165 องศาเซลเซียส และปริมาณความชื้นร้อยละ 14

2.2 ความหนาแน่น (Bulk density)

$$Y_2 = - 1.163 + 7.314 \times 10^{-3} D + 0.105 E - 0.359AB - 0.185AC - 8.95 \times 10^{-3}AE - 9.499 \times 10^{-2} B^2 - 6.807 \times 10^{-3} CE - 5.578 \times 10^{-4} DE (R^2=0.85) \dots\dots\dots(3)$$

จากตารางที่ 2 และ สมการที่ (3) พบว่าอิทธิพลที่มีต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบแป้งทั้ง 3 ชนิด คือ อุณหภูมิและปริมาณความชื้น จากรูปที่ 2 แนวโน้มของค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จากแป้งทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นของวัตถุดิบมีค่าสูงขึ้นจากร้อยละ 14 เป็นร้อยละ 19 และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhattacharya and Hanna (1987b) ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จากมากไปหาน้อย คือ ผลิตภัณฑ์ที่มาจากแป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้าและแป้งสาลี ตามลำดับ โดยมีความหนาแน่น 0.24 0.22 และ 0.17 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

ความสัมพันธ์ของแป้งทั้ง 3 ชนิด นำมาผสมกันในสูตรการผลิต พบว่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ยังคงเหมือนกับแป้งทั้ง 3 ชนิด เมื่อแยกกัน คือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและปริมาณความชื้นลดลง ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าลดลง และในผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนของแป้งสาลีในวัตถุดิบสูงขึ้นค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าลดลง

2.3 แรงสูงสุด (Maximum force)

$$Y_3 = 6719.211 - 10135.101AB - 10326.028AC - 8809.286B^2 - 18885.108BC + 58.104BD - 8059.103C^2 + 45.014CD - 0.158D^2 (R^2 = 0.60).....(4)$$

จากตารางที่ 2 และ สมการที่ (4) พบว่าอิทธิพลที่มีต่อค่าแรงสูงสุดเนื่องจากอุณหภูมิโดยผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้ามีค่าแรงสูงสุดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 150 ถึง 180 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการทดลองของ Ryu and Walker (1995) แต่ผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวโพดกลับพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแรงสูงสุดของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย สอดคล้องกับการทดลองของ Bhattacharya and Hanna (1987b) ค่าแรงสูงสุดของผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า มีค่าระหว่าง 1,600.01 ถึง 3,164.21 กรัม 3,070.53 ถึง 3,249.45 กรัม และ 1,643.43 ถึง 1,857.21 กรัม ตามลำดับ ในส่วนของแป้งข้าวโพดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสสารเกิดการทำลายเนื่องจากความร้อนสูงขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแน่นขึ้น ค่าแรงจึงสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ความสัมพันธ์ของแป้งทั้ง 3 ชนิด นำมาผสมกันในสูตรการผลิตพบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราส่วนของแป้งข้าวโพดเพิ่มขึ้นค่าแรงของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนของแป้งสาลีและแป้งข้าวเจ้าเป็นส่วนผสมส่งผลให้ค่าแรงตัดสูงสุดของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง สาเหตุอาจเนื่องจากแป้งสาลีและแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงกว่าแป้งข้าวโพด (ตารางที่ 1)

2.4 ดรรชนีการดูดน้ำ (Water Absorption Index, WAI)

$$Y_4 = -28.914 + 0.179D + 2.29E + 0.262AE - 4.111B^2 - 4.614BC + 3.408 \times 10^{-2}BD + 2.99 \times 10^{-2} CD - 1.302 \times 10^{-2}DE (R^2=0.80)(5)$$

จากตารางที่ 2 และ สมการที่ (5) พบว่าแป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า มีค่า WAI สูงที่สุดที่ระดับของปริมาณความชื้นร้อยละ 19 และระดับอุณหภูมิเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ Balandrán - Quintatna et al. (1998) โดยมีค่า WAI เท่ากับ 9.32 5.34 และ 8.84 เท่าตามลำดับ และผลิตภัณฑ์มีค่า WAI ต่ำที่สุดที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 และอุณหภูมิเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส โดยมีค่า WAI เท่ากับ 6.32 3.66 และ 7.15 เท่า ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลีและแป้งข้าวเจ้ามีค่า WAI สูงกว่าผลิตภัณฑ์แป้งข้าวโพดร้อยละ 74.48 และ 65.50 ตามลำดับ เนื่องจากแป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณโปรตีนสูงกว่าแป้งข้าวโพด (รูปที่ 3)

ความสัมพันธ์ของแป้งทั้ง 3 ชนิด นำมาผสมกันในสูตรการผลิตพบว่าค่า WAI ของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้น และอุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อผลิตภัณฑ์มีสัดส่วนของแป้งสาลีและแป้งข้าวเจ้าในปริมาณสูงขึ้น จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่า WAI สูงขึ้น

2.5 ร้อยละการละลายน้ำ (Percent Water Solubility, WS)

$$Y_5 = 14.105 + 37.063AC - 59.287B^2 + 0.392 BD + 54.824 C^2 - 0.338CD + 1.027 \times 10^{-3} D^2 - 1.018 \times 10^{-2} DE (R^2 = 0.74)(6)$$

จากตารางที่ 2 และ สมการที่ (6) ค่า WS เนื่องจากอิทธิพลของปริมาณความชื้น โดยผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี และแป้งข้าวโพดมีค่า WS สูงสุดที่ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 14 และอุณหภูมิเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส โดยมีค่า WS เท่ากับร้อยละ 21.73 และ 33 ตามลำดับ (รูปที่ 4) โดยเมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น และอุณหภูมิลดลงพบว่า ค่า WS มีค่าลดลง โดยมีค่า WS ต่ำที่สุด ร้อยละ 8.20 และ 7.71 ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Tang and Ding (1994) สำหรับข้าวเจ้า พบว่าที่ระดับอุณหภูมิสูงขึ้นค่า WS มีค่าลดลง โดยมีค่า WS สูงสุดที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 และ

อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 20 แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส พบว่า WS มีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 15.71 และมีค่า WS ต่ำที่สุดที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 และอุณหภูมิเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส โดยมีค่า WS เท่ากับร้อยละ 7.77 ตามลำดับ พบว่าแป้งข้าวโพดมีค่า WS สูงที่สุด เนื่องจากแป้งข้าวโพดมีปริมาณสตาร์ชและแอมิโลสสูงกว่าแป้งสาลีและแป้งข้าวเจ้า ผลิตภัณฑ์จึงมีการเจลาทิไนเซชันของแป้งมากกว่าส่งผลให้มีค่า WS สูงกว่า

ความสัมพันธ์ของแป้งทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำมาผสมกันในสูตรการผลิตพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนของแป้งข้าวโพดในวัตถุดิบสูงขึ้นค่า WS ของผลิตภัณฑ์มีค่าสูงขึ้น และค่า WS มีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น และอุณหภูมิลดลง

สรุปผลการวิจัย

ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัตถุดิบแป้ง 3 ชนิดที่ทดลองคือ แป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า มีผลกระทบเนื่องจากปริมาณความชื้น และอุณหภูมิดังนี้ คือ

อัตราการพองตัว ผลิตภัณฑ์มีอัตราการพองตัวสูงที่สุดที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 14 และ อุณหภูมิเท่ากับ 165 องศาเซลเซียส โดยอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย คือ ผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้า ความหนาแน่น ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นลดลงเมื่อปริมาณความชื้นลดลง และอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งมีค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย คือ ผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า และแป้งสาลี แรงตึงสูงสุด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าแรงตึงสูงสุดของผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้าลดลง แต่แป้งข้าวโพดมีค่าสูงขึ้น ค่าแรงตึงสูงสุด เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย คือ ผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้า ดรรชนีการดูดน้ำ ผลิตภัณฑ์มีดรรชนีการดูดน้ำสูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นสูงขึ้น และอุณหภูมิลดลง ดรรชนีการดูดน้ำของผลิตภัณฑ์เรียงลำดับจากมากไปหาน้อย คือ ผลิตภัณฑ์

จากแป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวโพด ร้อยละการละลายน้ำพบว่าผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลีและแป้งข้าวโพดมีร้อยละการละลายน้ำสูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นลดลง และอุณหภูมิสูงขึ้น แต่ข้าวเจ้ามีร้อยละการละลายน้ำสูงขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นและอุณหภูมิลดลง ร้อยละการละลายน้ำเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย คือ ผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวเจ้า

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนประเภทเงินอุดหนุนทั่วไป จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- ธนกร โรจนกร สิงหนาท พวงจันทร์แดง บวรศักดิ์ ลีนานนท์ รัชฎา ตั้งวงศ์ไชย และอารยา เชาว์เรืองฤทธิ์. 2541. **คู่มือปฏิบัติการวิชา 667 332 การแปรรูปอาหาร 2**. ขอนแก่น: ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ประชา บุญญสิริกุล. 2539. เทคโนโลยีการอัดพองในการผลิตอาหาร. **อาหาร** 26(4): 2535-2548.
- AOAC. 1994. **Official method of analysis**. Washington DC: Association of Official Analytical Chemists.
- Balandrán – Quintana, R.R., Barbosa – Cánovas, G.V., Zazueta – Morales, J.J., Anzaldúa – Morales, A. and Quintero – Ramos, A. 1998. Functional and nutritional properties of extruded whole pinto meal (*Phaseolus Vulgaris* L.). **J Food Sci** 63(1): 113-116.
- Bhattacharya, M. and Hanna, M.A. 1987a. Kinetics of starch gelatinization during extrusion cooking. **J Food Sci** 53(3): 764-766.

- Bhattacharya, M. and Hanna, M.A. 1987b. Textural properties of extrusion – cooked corn starch. **Lebensm – Wiss U – Technol** 20(4): 195–201.
- Bhuiyan, M.Z. and Blanshard, J.M.V. 1982a. The behaviour of maize flours and grits in relation to extrusion quality I. Analytical characteristics. **Starch/Starke** 34(7): 239–242.
- Bhuiyan, M.Z. and Blanshard, J.M.V. 1982b. The behaviour of maize flours and grits in relation to extrusion quality II. Gelatinization characteristics of extracted starches. **Starch/Starke** 34(8): 262–266.
- Chinnaswamy, R. and Hanna, M.A. 1988. Optimum extrusion-cooking for maximum expansion of corn starch. **J Food Sci** 53(3): 834–836, 840.
- Faubion, J.M. and Hoseney, R.C. 1982a. High Temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour I. Effect of moisture and flour type on extrudate properties. **Cereal Chem** 59(6): 529–533.
- Faubion, J.M. and Hoseney, R.C. 1982b. High temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour II. Effect of protein and lipid on extrudate properties. **Cereal Chem** 59(6): 533–537.
- Gomez, M.H., Waniska, R.D., Rooney, L.W. and Lusas E.W. 1988. Extrusion-cooking of sorghum containing different amounts of amylase. **J Food Sci** 53(4): 1818–1822.
- Harper, J.M. 1981a. **Extrusion of Food Vol. 1.** Florida: CRC Press.
- Harper, J.M. 1981b. **Extrusion of Food Vol. 2.** Florida: CRC Press.
- Juliano, B., Perez, L., Blakeney, A., Castillot, T., Kongseree, N., Laignelet, B., Lapis, E., Murty, V., Paule, C. and Webb, B. 1981. International cooperative testing on the amylase content of milled rice. **Starch/Starke** 33: 157–162.
- Martinez – Flores, H.E., Martinez – Bustos, F., Figueroa, C.J.D. and Gonzalez – Hernandez, J. 1998. Tortillas form extruded Masa as related to corn genotype and milling process. **J Food Sci** 63(1): 130–133.
- Mercier, C., Linko, P. and Harper, J.M., Editor. 1989. **Extrusion cooking.** Minnesota: American Association of Cereal Chemists., Inc.
- Onwulata, C.I., Konstance, R.P., Smith, P.W. and Holsinger, V.H. 1998. Physical properties of extruded products as affected by cheese whey. **J Food Sci** 63(5): 814–818.
- Padmanabhan, M. and Bhattacharya, M. 1989. Extrusion expansion during extrusion cooking of foods. **Cereal Foods World** 34(11): 945–949.
- Ryu, G.H. and Walker, C.E. 1995. The effects of extrusion conditions on the physical properties of wheat flour extrudate. **Starch/Starke** 47(1): 33–36.
- Tang, J. and Ding, X-L. 1994. Relationship between functional properties and macro molecular modification of extruded corn starch. **Cereal Chem** 71(4): 364–369.

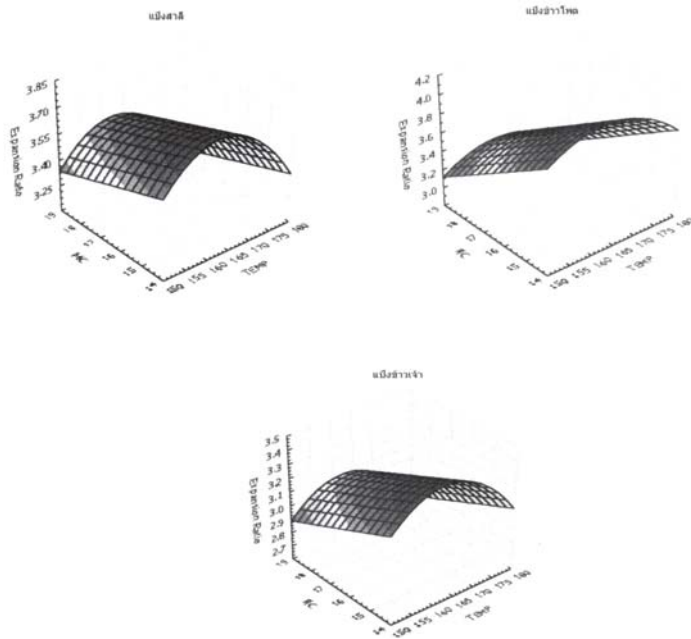
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของตัวอย่างแป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า

องค์ประกอบทางเคมี และขนาดอนุภาคเฉลี่ย	แป้ง ¹		
	แป้งสาลี	แป้งข้าวโพด	แป้งข้าวเจ้า
1. องค์ประกอบทางเคมี			
1.1 โปรตีน (ร้อยละน้ำหนักสด)	11.50 ^a	0.17 ^c	7.65 ^b
1.2 ไขมัน (ร้อยละน้ำหนักสด)	1.16 ^a	0.12 ^c	0.48 ^b
1.3 สตาร์ช (ร้อยละน้ำหนักสด)	53.50 ^c	83.56 ^a	65.14 ^b
1.4 แอมิโลส (ร้อยละน้ำหนักสด)	16.63 ^c	29.50 ^a	19.46 ^b
2. ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	152.00 ^a	78.00 ^c	115.67 ^b

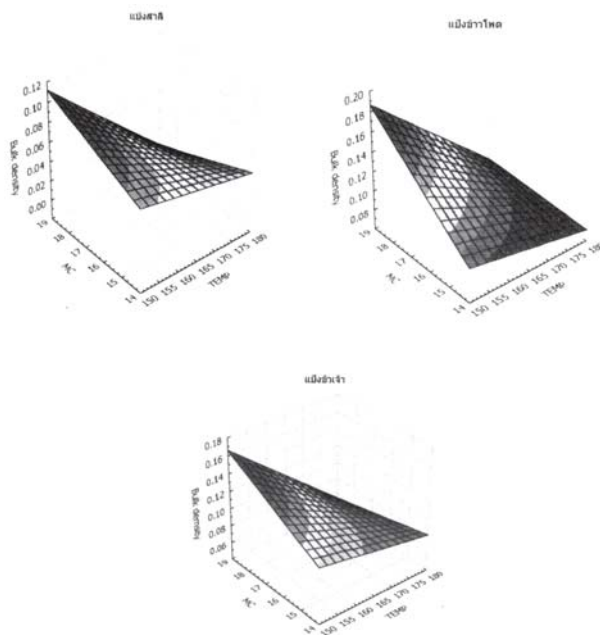
¹ตัวอักษรที่ต่างกันเหนือตัวเลขในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 2 ค่าอัตราการพองตัว ความหนาแน่น แร่งตดสูงสุด ทรชชี่การดูดน้ำ ร้อยละการละลายของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซทรีชชั่นที่ได้จากการทดลอง

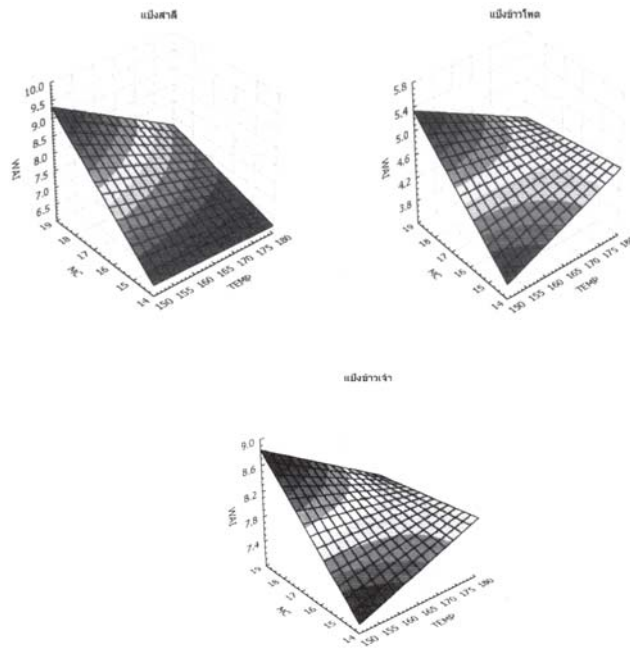
หน่วยที่	สัดส่วนของแป้ง			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความชื้น (ร้อยละ)	อัตราการพองตัว (เท่า)	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ค่าตอบสนอง	การละลายน้ำ (ร้อยละ)	
	แป้ง สาลี	แป้ง ข้าวโพด	แป้ง ข้าวเจ้า							
1	1	0	0	150	14	3.38	0.14	3,268.86	6.27	16.04
2	0	1	0	150	14	4.02	0.13	3,033.43	2.76	11.14
3	0	1/3	2/3	150	14	3.74	0.15	2,189.49	6.26	22.02
4	1	0	0	150	19	3.61	0.18	2,644.11	8.92	6.41
5	0	1	0	150	19	3.08	0.28	2,925.29	5.86	8.22
6	0	0	1	150	19	2.69	0.22	1,783.86	8.24	10.01
7	1/3	0	2/3	150	15.67	3.06	0.11	2,104.89	7.55	14.24
8	1/3	2/3	0	150	17.33	2.86	0.10	2,939.81	7.12	26.74
9	0	0	1	160	14	3.48	0.15	1,521.53	7.55	17.24
10	0	2/3	1/3	160	19	3.55	0.20	2,251.53	5.72	17.07
11	1/3	0	2/3	160	19	3.16	0.13	1,573.38	9.03	6.45
12	1/3	1/3	1/3	165	16.5	3.49	0.11	1,695.91	8.02	18.03
13	1/3	1/3	1/3	165	16.5	3.47	0.12	1,370.84	7.47	14.62
14	1/3	1/3	1/3	165	16.5	3.52	0.11	2,086.99	6.61	29.02
15	1/3	1/3	1/3	165	16.5	3.18	0.12	1,958.95	7.71	13.31
16	1	0	0	170	14	3.59	0.11	2,918.94	6.58	20.14
17	1/3	2/3	0	170	19	2.72	0.11	3,183.74	6.36	34.66
18	0	1	0	180	14	3.60	0.12	3,985.45	5.26	38.12
19	0	0	1	180	14	2.92	0.13	2,161.42	7.70	16.08
20	2/3	0	1/3	180	14	3.27	0.06	1,044.91	7.03	17.64
21	2/3	1/3	0	180	14	3.36	0.07	1,332.47	5.75	35.13
22	1	0	0	180	19	2.98	0.07	1,549.63	7.36	12.74
23	0	1	0	180	19	2.91	0.17	2,457.11	4.30	18.30
24	0	0	1	180	19	2.99	0.12	1,231.67	8.08	8.71
25	1	0	0	180	15.67	3.19	0.07	1,449.42	6.52	19.82
26	0	1/3	2/3	180	15.67	2.98	0.15	1,992.61	5.64	13.97



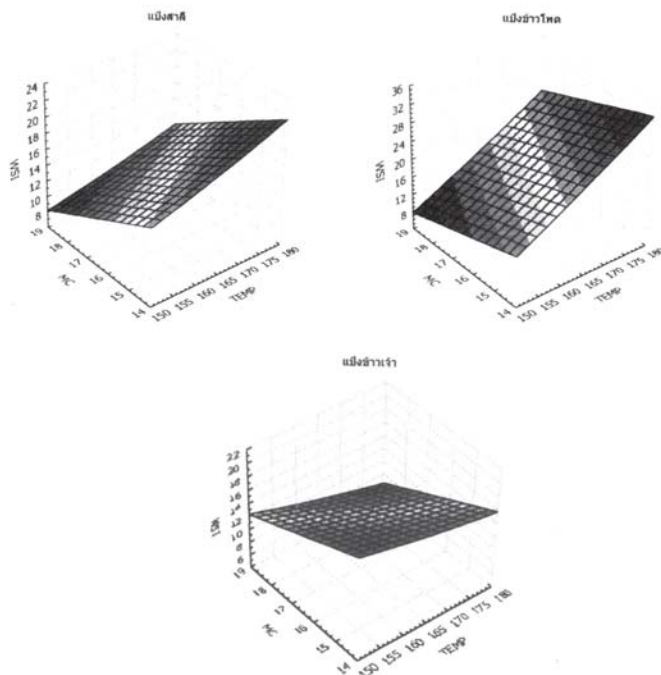
รูปที่ 1 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และแป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า เมื่อทำการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ และปริมาณความชื้นในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน



รูปที่ 2 พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์กระบวนการเอกซ์ทรูชัน จากแป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า เมื่อทำการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ และปริมาณความชื้นในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน



รูปที่ 3 พื้นที่ผิวตอบสนองของตรรกะการดูดน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันจากแป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า เมื่อทำการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ และปริมาณความชื้นในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน



รูปที่ 4 พื้นที่ผิวตอบสนองของร้อยละการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จากแป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งข้าวเจ้า เมื่อทำการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ และปริมาณความชื้นในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน