



รายงานการวิจัย

การเติมรำข้าวในผลิตภัณฑ์ข้าวพองกรอบด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน
Rice Bran Addition in Expanded Rice Products using Extrusion

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2547-2548

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2550

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้งบประมาณทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2547- 2548 ทำให้ผลงานวิจัยโครงการนี้เกิดขึ้นได้ ขอขอบคุณ บริษัทปทุมไรซ์ มิลล์แอนด์แกรนูรี จำกัด (มหาชน) ที่ให้การอนุเคราะห์ปลายข้าวและรำข้าว เพื่อใช้ในงานวิจัยการเติม รำข้าวในผลิตภัณฑ์ข้าวพองกรอบด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับอาคาร สถานที่ และเครื่องมือในการวิจัยขอขอบคุณ นายวันชัย จอกกระโทก และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดการดำเนินงานวิจัย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จหากขาด นางสาว ปทุมพร โสติดิรัตน์พันธุ์ นักศึกษาบัณฑิตศึกษาและผู้ช่วยวิจัย นางสาวจุรีรัตน์ จงรวมกลาง และ นางสาวเกษราภรณ์ ชินชาด นักศึกษาช่วยวิจัย จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

การศึกษาผลของสภาวะการแปรรูปโดยวิธีการเอกทฤษฎันด้วยเครื่องเอกทฤษฎีเดอส์สกรูในแป้งข้าวเจ้าต่อคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เอกทฤษฎีเดอส์ กำหนดสภาวะการแปรรูปที่อุณหภูมิของบาร์เรล 3 ระดับ (160 170 และ 180 องศาเซลเซียส) ความเร็วรอบสกรู 3 ระดับ (250 300 และ 350 รอบต่อนาที) และความชื้นของวัตถุดิบ 3 ระดับ (20, 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์) พบว่า เมื่ออุณหภูมิของบาร์เรล ความเร็วรอบสกรู และความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าแรงกดเอกทฤษฎีเดอส์ให้แตกเพิ่มขึ้น และพบอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิบาร์เรลกับความชื้นวัตถุดิบต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ โดยเมื่อใช้อุณหภูมิบาร์เรลสูงร่วมกับความชื้นวัตถุดิบต่ำ ส่งผลให้เอกทฤษฎีเดอส์มีความหนาแน่นต่ำ จากวิเคราะห์คุณสมบัติทางความหนืดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว พบว่า เอกทฤษฎีเดอส์ที่มีอัตราการขยายตัวสูงมีค่าความหนืดเริ่มต้นต่ำ ระดับการเกิดเจลลาติไนซ์ของเอกทฤษฎีเดอส์แป้งข้าวทั้งหมดมีค่าในช่วง 91-98 เปอร์เซ็นต์ การศึกษาการเติมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์ในแป้งข้าวไม่ส่งผลต่อค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ อัตราการขยายตัว และแรงกดแตก ต่างจากการเอกทฤษฎีเดอส์แป้งข้าวขณะที่การเติมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ค่าทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ ความดันที่หัวแบบ อัตราการขยายตัวมีค่าลดลง ส่วนแรงกดแตกและความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น การศึกษาการเติมรำข้าวที่ใช้ต่าง(โซเดียมไฮดรอกไซด์)ในแป้งข้าวแทนรำข้าวดิบที่ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่ารำข้าวที่ใช้ต่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้มีปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้าและสตาร์ชลดลง แต่มีใยอาหารเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับรำข้าวดิบ และโครงสร้างมีการเปิดตัว มีรูพรุนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการอุ้มน้ำมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อเอกทฤษฎีเดอส์ โดยพบว่า ความดันที่หัวแบบและอัตราการขยายตัวของเอกทฤษฎีเดอส์แป้งข้าวผสมรำข้าวคัดแปรด้วยต่างมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับเอกทฤษฎีเดอส์แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ การศึกษาผลการเติมรำสกัดไขมันในแป้งข้าวแทนรำข้าวดิบและการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลักษณะทางกายภาพของเอกทฤษฎีเดอส์ พบว่า เอกทฤษฎีเดอส์แป้งข้าวผสมรำสกัดไขมันมีอัตราการขยายตัวของเอกทฤษฎีเดอส์ต่ำและแรงกดแตกมากขึ้น และการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 1 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ทำให้อัตราการขยายตัวของเอกทฤษฎีเดอส์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีความกรอบมากขึ้นและผู้ทดสอบชิมให้การยอมรับ การศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เอกทฤษฎีเดอส์แป้งข้าวผสมรำสกัดไขมันเป็นระยะเวลา 2 เดือน พบว่า อายุการเก็บเอกทฤษฎีเดอส์แป้งข้าวผสมรำสกัดไขมันและแคลเซียมคาร์บอเนต 2 เปอร์เซ็นต์ สามารถเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสเล็กน้อย ซึ่งผู้ทดสอบชิมยังให้การยอมรับ

Abstract

Rice flour was extruded using a twin-screw extruder. The effects of extrusion conditions, barrel temperatures of 160, 170 and 180°C, screw speeds of 250, 300 and 350 rpm and feed moisture contents of 20, 22 and 24% on the physical properties were studied. An increase in barrel temperature, screw speed and feed moisture content had an effect on decreasing expansion ratio and increasing compression force ($p < 0.05$). The interaction between barrel temperature and feed moisture content was found, resulting in the reduction of extrudate density. From pasting property using a Rapid ViscoAnalyzer (RVA), the lower cold viscosity of rice extrudate occurred in the higher expanded extrudates. The degree of starch gelatinization showed 91-98% in all extrusion conditions. The addition of 10% native rice bran into rice flour did not show a significant difference in torque, specific mechanical energy, expansion ratio, and compression force, as compared with rice flour extrusion. A decrease in torque, specific mechanical energy, expansion ratio and an increase in compression force and density were found in the extrusion of 20% native rice bran addition. The effect of 20% alkaline(sodium-hydroxide)-treated rice bran to replace the native one was studied. The alkaline-treated rice bran at 90°C for 1 h contained a lower in protein, fat, ash and starch content, but a higher in dietary fiber as compared to native rice bran. In addition, the microstructure of alkaline-treated rice bran exhibited more open structure and greater porosity, resulting in higher water holding capacity. The die pressure and expansion ratio of alkaline-treated rice bran addition were higher than those of native rice bran. The effects of defatted rice bran and calcium carbonate addition on physical characteristics of extrudates were studied. The addition of defatted rice bran instead of native rice bran in extrudate resulted in decreasing expansion ratio and increasing

compression force. The expansion ratio of extrudate was higher with the addition 1-2% calcium carbonate. This led to a greater crispiness and an acceptance from the panelists. The shelf-life dating was studied for 2 months. The shelf-life of extrudate containing defatted rice bran and 2% calcium carbonate was found to be a month at room temperature while slight changes of physical and sensory characteristics were detected. This formulation was the highest acceptance from the panelists.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	3
1.3 การวิจัยที่เกี่ยวข้องและคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ทำ.....	3
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	12
2.1. การเตรียมวัตถุดิบ.....	12
2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวและรำข้าว.....	12
2.3 การศึกษาเบื้องต้น.....	12
2.4 การผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	12
2.5 ศึกษาผลของสภาวะการแปรรูปและการเติมรำข้าวดิบ ต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตข้าว.....	14
2.6 การตัดแปรรำข้าวด้วยต่างและการเติมในเอ็กซ์ทรูเดต.....	14
2.7 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ต่าง.....	15
2.8 การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากการใช้รำสกัดไขมันและการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต.....	16
2.9 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต.....	16
2.10 การหาอายุการเก็บ.....	18
2.11 การทดสอบทางประสาทสัมผัสและการยอมรับ.....	18
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	19
3.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น.....	19
3.2 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อตัวแปรตามการแปรรูป จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ความหนักของเอกซ์ทรูเดต.....	28
3.4 ระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชัน.....	29
3.5 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต.....	30
3.6 ผลของการเติมรำข้าวต่อต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตข้าว.....	40
3.7 ผลการใช้ต่างต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรำข้าว.....	41
3.8 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อตัวแปรตามการแปรรูป จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	45
3.9 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต.....	52
3.10 ผลการศึกษาชนิดรำข้าวและปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่อ ลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต.....	58
3.11 ผลการประเมินคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสและการยอมรับของผู้บริโภคต่อ ผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดต.....	62
3.12 ผลการศึกษาทางด้านอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดต.....	63
บทที่ 4 บทสรุป.....	68
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์.....	76
ภาคผนวก ข ค่าตอบสนองเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูป และสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์.....	86
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ.....	95
ประวัติผู้วิจัย.....	104

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	รูปแบบการจัดเรียงสกรู.....13
2	การตั้งอุณหภูมิของบารเรล.....13
3	แผนการทดลองค่าความหนืดจากการวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วของแป้งข้าว และเอกซ์ทรูเดตข้าว 100 เปอร์เซ็นต์.....14
4	ค่าความหนืดจากการวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วของแป้งข้าว และเอกซ์ทรูเดตข้าว 100 เปอร์เซ็นต์.....29
5	ค่าเฉลี่ยของระดับการเกิดเจลลาติโนสเชิงชั้นของเอกซ์ทรูเดตจากกระบวนการ เอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์.....30
6	ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างตัวแปรตามการแปรรูปกับลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต แป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....34
7	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปกับลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต แป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....41
8	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวและรำข้าว.....41
9	ผลของการใช้อุณหภูมิและระยะเวลาต่อค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าว.....44
10	องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ค้างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง.....44
11	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปและลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบกับแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ค้าง 20 เปอร์เซ็นต์.....46
1ข	ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์.....87
2ข	ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสม รำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์.....88
3ข	ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสม รำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์.....89
4ข	ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสม รำข้าวที่ใช้ค้าง 20 เปอร์เซ็นต์.....90
5ข	ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์.....91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์.....	92
7ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์.....	93
8ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์.....	94
1ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปสำหรับแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์.....	96
2ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปสำหรับแป้งข้าวผสม รำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์.....	97
3ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทรูชันสำหรับแป้งข้าว ผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์.....	98
4ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทรูชันสำหรับแป้งข้าว ผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์.....	99
5ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์.....	100
6ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว ผสมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์.....	101
7ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว ผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์.....	102
8ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว ผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์.....	103

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์กที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....21
2	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์กที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิบาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....22
3	พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....23
4	พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิบาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....24
5	พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบ และอุณหภูมิบาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....26
6	พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิบาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....27
7	พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนืดขณะเย็นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบ และอุณหภูมิบาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์.....28
8	พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิบาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....32
9	พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบ และอุณหภูมิบาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
10	พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....36
11	พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบ และอุณหภูมิใบเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....37
12	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบ และอุณหภูมิใบเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 เปอร์เซ็นต์.....38
13	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิใบเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 เปอร์เซ็นต์.....39
14	ภาพโครงสร้างรำข้าวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน.....43
15	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์คระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบและความเร็วรอบ สกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 20 เปอร์เซ็นต์.....46
16	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์คในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าว ที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบ และความเร็วรอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบและอุณหภูมิใบเรล.....47
17	พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบและ ความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 20 เปอร์เซ็นต์.....48
18	พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าว ที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบและความเร็วรอบสกรู และทำการ เปลี่ยนแปลงความชื้นวัตถุคิบและอุณหภูมิใบเรล.....49
19	พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสม รำข้าวคิบ 20 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุคิบและอุณหภูมิของใบเรล.....51
20	กราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของแป้งข้าวผสมรำข้าว ที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ กับความดันที่หัวแบบ.....51

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
21	พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและความเร็วรอบสกรู และระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิใบเรล.....	54
22	พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและความเร็วรอบ สกรู และระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิใบเรล.....	55
23	พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิใบเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์.....	56
24	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและความเร็วรอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิใบเรล.....	57
25	โครงสร้างลักษณะภายนอกของเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำข้าวดิบและรำสกัดที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างกัน.....	59
26	อัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำข้าวดิบและรำสกัดที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างกัน.....	60
27	ความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำข้าวดิบและรำสกัดที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างกัน.....	61
28	แรงกดแตกของเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำข้าวดิบและรำสกัดที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างกัน.....	61
29	แผนภาพแสดงลักษณะทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคต่อเอกซ์ทรูเดต.....	62
30	การเปลี่ยนแปลงความชื้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำข้าวที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและ 45°C เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์.....	64
31	การเปลี่ยนแปลง Aw ตามระยะเวลาการเก็บรักษาเอกซ์ทรูเดต จากส่วนผสมรำข้าวที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและ 45°C เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์.....	64
32	การเปลี่ยนแปลงแรงกดแตกตามระยะเวลาการเก็บรักษาเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำข้าวที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและ 45°C เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์.....	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
33 การเปลี่ยนแปลงค่า TBA ตามระยะเวลาการเก็บรักษาเอกซ์ทราคตจากส่วนผสมรำข้าว ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องและ 45°C เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์.....	65
34 แผนภาพแสดงลักษณะทางประสาทสัมผัสของเอกซ์ทราคตจากส่วนผสมรำข้าว ที่เก็บไว้ในอุณหภูมิห้องและ 45°C เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย และทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศไทย ในปี 2541 ไทยสามารถส่งข้าวเป็นสินค้าออกได้สูงสุดเป็นประวัติการณ์จำนวน 6.41 ล้านตัน มูลค่าประมาณ 85,676 ล้านบาท แต่ในอนาคตคาดว่าจะการค้าข้าวจะมีการแข่งขันกันสูง และประเทศผู้นำเข้าข้าวจากไทยจะผลิตข้าวได้เองมากขึ้น ทำให้ความต้องการจากไทยลดลง (ข้าวธุรกิจในประเทศไทย, 2542) ดังนั้นการแปรรูปอาหารจากข้าวเพื่อส่งขายภายในและต่างประเทศจึงเป็นทางเลือกหนึ่งและเป็นการเพิ่มมูลค่าแก่ข้าวให้สูงขึ้น อีกทั้งระหว่างกระบวนการสีข้าวในขั้นตอนของการกระเทาะเปลือกและการขัดสีจะมีรำหยาบและรำละเอียดเป็นผลพลอยได้ประมาณ 8-10 เปอร์เซ็นต์ของข้าวเปลือก รำข้าวเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูกซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ และบางส่วนนำไปสกัดเป็นน้ำมัน แต่การนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นยังไม่กว้างขวางนัก (สายสนม ประดิษฐ์ดวง, 2541; Oakenfull, 1989) เนื่องจากรำข้าวเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณวิตามินบี, oryzanol, โพรตีน และใยอาหารสูง ดังนั้นถ้าสามารถนำไปใช้เพิ่มในการผลิตผลิตภัณฑ์ฟองตัวได้ก็จะเป็นการเพิ่มปริมาณใยอาหารให้แก่ผลิตภัณฑ์และเพิ่มมูลค่าให้แก่รำข้าวอีกด้วย นอกจากนี้ผู้บริโภคในปัจจุบันได้ให้ความสำคัญในการบริโภคใยอาหารมากขึ้น เนื่องจากพบว่าการบริโภคใยอาหารในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกายจะช่วยป้องกันการเกิดโรคบางชนิด เช่น โรคอ้วน มะเร็งลำไส้ และช่วยลดระดับโคเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือดได้ (Cho et al., 1999) นอกจากนี้ oryzanol ก็เป็นสาร antioxidant ที่แรง ซึ่งมีการสกัดใช้ในอุตสาหกรรมยา ดังนั้นหากสามารถเพิ่มรำข้าวในผลิตภัณฑ์ฟองตัวได้อาจถือได้ว่าเป็นการเติม functional ingredient ให้กับผลิตภัณฑ์ฟองตัว

โดยปกติแล้วข้าวเป็นวัตถุดิบในการนำมาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวและผลิตภัณฑ์อาหารเข้าอย่าง กว้างขวาง เนื่องจากแป้งข้าวมีการฟองตัวที่ดี ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีขาวและไม่มีรสชาติ เหมาะแก่การปรุงแต่งรส สี และกลิ่น (Matz, 1991) งานวิจัยส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบเป็นแป้งข้าวหรือข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้วแทบทั้งสิ้น (Han et al., 1988; Pan et al., 1991; Yeh และ Jaw, 1999) ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้รำข้าวเติมลงในแป้งข้าวเพื่อเป็นวัตถุดิบในกระบวนการเอกซ์ทรูชันยังมีอยู่น้อย และพบว่าการเติมวัตถุดิบที่มีสารอาหารประเภทโปรตีน ไขมัน และใยอาหารสูงทำให้มีความยากในการควบคุมการแปรรูป และส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ต่ำลง คือเมื่อมีปริมาณโปรตีนสูงขึ้นจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการขยายตัวต่ำลง และความชอบทางด้านเนื้อสัมผัสต่ำลง (ประชา บุญญศิริกุล และคณะ, 2539; Pan et al., 1991) ส่วนปริมาณไขมันและใยอาหารที่

สูงขึ้นก็จะส่งผลให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น และการขยายตัวก็ต่ำลงเช่นเดียวกัน (Grenus et al., 1993; Jin et al., 1994; Berglund et al., 1994) ดังนั้นการที่จะผลิตผลิตภัณฑ์พองตัวจากแป้งข้าวและรำข้าวให้มีลักษณะทางกายภาพที่ดีได้ต้องคัดเลือกปัจจัยต่างๆ ของทั้งวัตถุดิบและสภาวะการแปรรูปที่มีความเหมาะสม เช่น ในการคัดเลือกพันธุ์ข้าวพบว่าอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีอิทธิพลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยพบว่าข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณ อะไมโลสต่ำมากจะให้ออกซ์ทรูเดทที่มีความเหนียวสูง และมีการขยายตัวต่ำกว่าออกซ์ทรูเดทจากข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำในช่วงประมาณ 12.8-16.7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อข้าวมีปริมาณอะไมโลสสูงจะส่งผลให้มีการขยายตัวลดลง (Pan et al., 1991; Yoshii และ Arisaka, 1994) ดังนั้นในผลิตภัณฑ์พองตัวจึงควรเลือกใช้พันธุ์ข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ โดยข้าวไทยที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำและเพาะปลูกกันมากคือข้าวดอกมะลิ 105 ซึ่งในอุตสาหกรรมสีข้าวหอมมะลินั้นจะมีข้าวหักและปลายข้าวเป็นผลพลอยได้ที่มีราคาต่ำ หากมีการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้น เช่น การทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหารพองตัวซึ่งสามารถขยายเป็นขนมขบเคี้ยว และอาหารเช้าสำเร็จรูป (Breakfast cereals) ได้ จะช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้เหล่านี้ได้ Lue et al. (1991) พบว่าการเติมใยอาหารร่วมกับแป้งข้าวโพดบดหยาบในกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะทำให้มีความต้องการน้ำเพื่อใช้ในการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ชเพิ่มขึ้น เนื่องจากใยอาหารมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงจึงไปแข่งขันกับสตาร์ชในการจับกับน้ำ ดังนั้นวัตถุดิบที่มีใยอาหารสูงจึงต้องการความชื้นที่แตกต่างไปจากแป้งธัญชาติปกติ Grenus et al. (1993) สรุปว่าการเติมรำข้าวลงในแป้งข้าวจะส่งผลให้ค่าตัวแปรตามจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เช่น แรงทอร์ค ความดันที่หัวแบบค่าพลังงานกลจำเพาะ และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป รวมทั้งการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อเติมรำข้าวในระดับที่สูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมใยอาหารในผลิตภัณฑ์พองตัวด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ยังไม่มีการศึกษาการเติมรำข้าวในแป้งข้าวหอมมะลิ ซึ่งหากสมมุติฐานข้างต้นใช้ได้กับการเอ็กซ์ทรูด แป้งข้าวผสมกับรำข้าวแล้ว การเติมรำข้าวอาจมีผลทำให้เกิดลักษณะการขยายตัว และเนื้อสัมผัสที่ไม่ดีต่อผลิตภัณฑ์พองตัว ดังนั้นหากมีวิธีการที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ ก็จะเป็นการเพิ่มการใช้ประโยชน์ของรำข้าวและเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์เหล่านี้ด้วยการคัดแปรคุณสมบัติของรำข้าวด้วยวิธีทางเคมีเป็นวิธีหนึ่งที่น่าจะทำให้เพิ่มปริมาณการใช้รำข้าวในผลิตภัณฑ์พองตัวได้ ดังนั้นงานวิจัยที่ใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (pH 9.0-11.0) เพื่อคัดแปรคุณสมบัติของใยอาหารจำพวกธัญชาติต่างๆ พบว่าใยอาหารที่ผ่านการคัดแปรด้วยด่างจะมีลักษณะโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น ความเป็นระเบียบของโครงสร้างใยอาหารต่ำลง และองค์ประกอบของใยอาหารที่สามารถละลายน้ำได้มีปริมาณสูงขึ้น (Ning et al.,

1991) น่าจะเป็นแนวโน้มที่แสดงให้เห็นว่าใยอาหารที่ผ่านการตัดแปรด้วยด่างจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มลง Jasberg et al. (1989a) ศึกษาถึงการใช้ใยอาหารที่ผ่านการตัดแปรด้วยด่าง (alkaline hydrogen peroxide, pH 11.5) ในผลิตภัณฑ์เด็กเพื่อเพิ่มใยอาหารและลดแคลอรี พบว่าการเติมใยอาหารที่ตัดแปรด้วยด่างแล้วในส่วนผสม 5-10 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลให้ปริมาณของเด็กเพิ่มขึ้น และการแทนที่แป้งด้วยใยอาหารที่ผ่านการตัดแปรด้วยด่างมากถึง 20 เปอร์เซ็นต์ จะไม่ทำให้ความสูงของเด็กลดลง นอกจากนี้ Jasberg et al. (1989b) ก็ได้ศึกษาถึงการนำใยอาหารที่ผ่านการตัดแปรด้วยด่างมาทดลองผลิตขนมปังพบว่าโดยจะมีความแข็งแรงและทนต่อแรงดึงมากกว่าการเติมใยอาหารปกติ และเมื่อผ่านการอบจะให้ปริมาณของขนมปังสูงกว่าเช่นเดียวกัน

จากผลงานวิจัยข้างต้นทำให้คาดการณ์ได้ว่าการเติมรำข้าวอาจส่งผลเสียต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการศึกษาผลของการเติมรำข้าวในผลิตภัณฑ์ข้าวพองตัวด้วยการแปรรูปเอ็กซ์ทรูชันจึงเป็นเรื่องที่น่าทำการวิจัยเพื่อทดสอบสมมุติฐานดังกล่าว ซึ่งหากมีผลเสียต่อลักษณะผลิตภัณฑ์ประเภทนี้แล้ว การศึกษาการใช้กระบวนการทางเคมีตัดแปรคุณสมบัติของรำข้าวจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการนำไปใช้ในงานวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์พองตัวจากแป้งข้าวและรำข้าวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเติมรำข้าวในแป้งข้าวเพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์พองตัวด้วยการเอ็กซ์ทรูชัน
2. เพื่อตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ข้าวผสมรำข้าวพองตัว
3. เพื่อศึกษาการตัดแปรรำข้าวด้วยวิธีทางเคมีและนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ข้าวผสมรำข้าวพองตัว
4. เพื่อศึกษาการใช้สารเพิ่มฟองอากาศในผลิตภัณฑ์ข้าวผสมรำข้าวพองตัว

1.3 การวิจัยที่เกี่ยวข้อง และคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ทำ

องค์ประกอบของวัตถุดิบที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์พองตัวจากธัญพืช

1. สตาร์ช (starch) ในส่วนผสมของวัตถุดิบต้องมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก และมีปริมาณมากกว่าสารอาหารอื่น เพราะสตาร์ชมีความสำคัญต่อการขยายตัว ลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส และลักษณะทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (Gordon, 1989) ปริมาณสตาร์ชที่น้อยกว่าร้อยละ 60 จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวน้อย มีเนื้อสัมผัสแข็ง และแน่น (Sunderland, 1996)

2. อะมิโลสและอะมิโลเพคติน (amylose และ amylopectin) Yoshii and Arisaka (1994) รายงานว่าปริมาณอะมิโลสของแป้งข้าวส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยมีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับอัตราการผลิต เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Feldbegr (1969) ที่

พบว่าอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในแป้งข้าวโพดมีอิทธิพลต่อคุณภาพของเนื้อสัมผัสผลิตภัณฑ์ กล่าวคืออะมิโลเพคตินช่วยในการพองตัว ทำให้น้ำหนักเบา ส่วนอะมิโลสถ้ามีมากทำให้การพองตัวลดลงหรือทำให้ค่าปริมาตรจำเพาะต่ำลง อีกทั้งผลการทดลองของ Bhattacharya and Hanna (1987) รายงานถึงการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวโพดสูงขึ้นเมื่อปริมาณอะมิโลสต่ำลง และความหนาแน่นก็มีแนวโน้มลดลงด้วย อย่างไรก็ตามพบว่าข้าวเหนียวมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเหนียวสูง และการขยายตัวต่ำกว่าข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ การเพิ่มขึ้นของปริมาณอะมิโลเพคตินในวัตถุดิบส่งผลต่อการเพิ่มความสามรถในการละลายน้ำ (water solubility index) และลดค่าความสามารถในการดูดน้ำ (water absorption index) ของเอกซ์ทรูเดต (Pan et al., 1991)

3. โปรตีน (protein) โปรตีนเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีผลต่อการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ โดย Conway and Anderson (1973) พบว่าการเพิ่มปริมาณโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (soy protein isolate) มีผลไปลดการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวโพด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Mohamed (1990) อาจเนื่องจากสาเหตุที่โปรตีนมีความสามารถในการพองตัวต่ำกว่าสตาร์ช จากการทดลองของ Bhattacharya et al. (1986) แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มแรงเหนียวด้วยการเพิ่มความเร็วรอบสกรูให้กับวัตถุดิบผสมระหว่างกลูเตนจากข้าวโพด (corn gluten meal) กับโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง จะมีส่วนช่วยปรับปรุงค่าการขยายตัว เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ ลดความหนาแน่น และลดแรงที่ใช้ในการเหนียว (shear strength) ของผลิตภัณฑ์ Bhattacharya et al. (1997) ได้ทำการทดลองถึงผลจากการเติมถั่ว (chickpea) ลงในกระบวนการเอกซ์ทรูชันของแป้งข้าวด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูเดี่ยว พบว่าเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการขยายตัวสูงสุดและความหนาแน่นต่ำสุด ซึ่งจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope) จะพบโพรงอากาศจำนวนมาก และเมื่อเพิ่มปริมาณถั่วทำให้องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ด้านปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลง ในขณะที่ปริมาณโปรตีนสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของอัตราการขยายตัว ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น พบโครงสร้างของโพรงอากาศที่ไม่สมบูรณ์ และจำนวนโพรงอากาศลดลง Onwulata et al. (1998) ศึกษาผลของการเติมเวย์โปรตีน (whey protein concentrate) ลงในสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่ง แล้วผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันทั้งแบบแรงเหนียวต่ำ และแรงเหนียวสูง ผลพบว่าการเติมเวย์โปรตีนมากกว่าร้อยละ 25 ส่งผลไปลดค่าพลังงานกลจำเพาะ (specific mechanical energy) ของกระบวนการแปรรูป และส่งผลให้การขยายตัว และค่าดัชนีการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ (water absorption indices) ลดลง รวมทั้งลักษณะเนื้อสัมผัสจะแข็งและกระด้างมากขึ้น

4. ไขมัน (fat) ปริมาณไขมันในวัตถุดิบมีผลต่อตัวแปรตามการแปรรูปด้วยเอกซ์ทรูชัน (system parameters) และลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว (Grenus et al., 1993; Ilo et al., 1999) เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณไขมันสูงขึ้นหรือมีน้ำมันส่วนที่เป็นอิสระไหลออกจากส่วนของ สกรูจะส่งผลให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ทำงานด้วยค่าทอร์คและค่าพลังงานกลจำเพาะที่ต่ำลง เนื่องจากไขมันจะไปทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น และไปลดความหนืดของโคที่อยู่ภายในบารเรล ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง ความหนาแน่นและแรงที่ใช้ในการตัดมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามวิจัยของ Mohamed (1990) พบว่าวัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันไม่เกินร้อยละ 4 จะมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณไขมันสูงขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากไขมันมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

5. โยอาหาร (fiber) Lue et al. (1991) ได้ทำการศึกษาผลของโยอาหารโดยใช้โยอาหารจาก ต้นบีท (sugar beet fiber) ต่อกระบวนการเอกซ์ทรูชันของแป้งข้าวโพด ผลพบว่าการเพิ่มปริมาณ โยอาหารมีแนวโน้มทำให้การขยายตัวในแนวรัศมีของเอกซ์ทรูเดตต่ำลง ในขณะที่การขยายตัวทาง ยาว สูงขึ้น เมื่อศึกษาโครงสร้างภายในของเอกซ์ทรูเดตโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า การเติมโยอาหารร้อยละ 30 ทำให้ลักษณะโพรงอากาศมีขนาดเล็กลง และมีความสม่ำเสมอลดลง เมื่อเทียบกับการเติมโยอาหารที่ร้อยละ 10 และ 20 ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกันเมื่อดำเนินการ แปรรูปทั้งที่ความเร็วรอบสกรู 200 และ 300 รอบต่อนาที อีกทั้งมีการศึกษาผลของการเติมรำข้าว สาลีสูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และรำข้าวโอ๊ต 20 เปอร์เซ็นต์ ที่มีต่อตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทรูชัน ของ Hsieh et al. (1989) พบการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบ แต่พบการลดลงของการขยายตัวในแนวรัศมี และการเพิ่มขึ้นของความ หนาแน่น และแรงที่ใช้ในการตัดเอกซ์ทรูเดต Onwulata et al. (2001) พบว่าการเติมโยอาหาร ด้วยรำข้าวสาลีปริมาณ 12.5 เปอร์เซ็นต์ ในการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวโพดมีผลให้พลังงานกลจำเพาะ และอัตราการขยายตัวมีค่าลดลง รวมทั้งค่าแรงที่ใช้ในการกดแตก (breaking strength) มีค่ามาก ขึ้น แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงในส่วนของความหนาแน่น อีกทั้งมีผลให้ค่าความสามารถในการเก็บกักน้ำ (water retention) ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น Berglund et al. (1994) ทำการเอกซ์ทรูดแป้งข้าว บาเลย์พันธุ์ต่างๆ ที่มีปริมาณโยอาหารสูงในช่วง 12-18 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเอกซ์ทรูเดตที่ได้มีการ ขยายตัวที่จำกัดและมีความหนาแน่นสูง แต่เมื่อผสมแป้งข้าวปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ลงไปทำให้ ความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดตลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และมีลักษณะปรากฏคล้ายกับเอกซ์ทรูเดต จากแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และจากการศึกษาทางด้านประสาทสัมผัสพบว่า เอกซ์ทรูเดตจาก วัตถุดิบผสมแป้งข้าวบาเลย์ 50 เปอร์เซ็นต์ มีคะแนนความกรอบและสีสูงกว่าเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Vasanthan et al. (2002) ได้ศึกษาผลจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อ

การเปลี่ยนแปลงปริมาณใยอาหารของแป้งข้าวบาเลย์ พบว่าปริมาณใยอาหารที่ละลายได้และปริมาณใยอาหารทั้งหมดเพิ่มขึ้นภายหลังการเอกซ์ทรูคในช่วงอุณหภูมิ 90-140 องศาเซลเซียส และความชื้นระหว่าง 20-50 เปอร์เซ็นต์ และกล่าวว่าการเพิ่มขึ้นของใยอาหารที่ละลายได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของใยอาหารส่วนที่ไม่ละลายในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

6. ความชื้น (moisture) นำมีผลอย่างมากต่อการสุกของผลิตภัณฑ์ทั้งในระบบที่มีปริมาณน้ำมากเกินไป (Burt and Russell, 1983; Camire et al., 1990) และระบบที่มีน้ำน้อยหรือจำกัดในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน น้ำทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทความร้อนและเป็นสารหล่อลื่น ช่วยในการควบคุมความดันและแรงเสียดภายในเอกซ์ทรูเดอร์ (Anderson et al., 1969; Bhattacharya and Hanna, 1987) Biliaderis et al. (1986) พบว่าปริมาณน้ำมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการสุก โดยเมื่อระดับของน้ำลดลงจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ต้องการเพื่อให้สตาร์ชสุกสูงขึ้น Garber et al. (1997) พบว่าแรงทอร์คมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นของแป้งข้าวโพดบดหยาบสูงขึ้นเนื่องจากความหนืดของโกลดลง Zasytkin and Lee (1998) ได้ศึกษาผลของความชื้นของวัตถุดิบผสมระหว่างแป้งถั่วเหลืองกับแป้งสาลีที่มีต่อลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่าในทุกๆ อัตราส่วนของวัตถุดิบผสม การให้ความชื้นวัตถุดิบในระดับต่ำสุดที่ 16 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้อกซ์ทรูเคตมีการขยายตัวสูงสุด มีความกรอบ และมีเนื้อสัมผัสที่เป็นที่ต้องการและมีการยอมรับสูงสุด และเมื่อความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบมีค่าสูงขึ้นจะทำให้อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง ที่ปริมาณความชื้นต่ำส่งผลให้แรงเสียดเนื่องจากการหมุนของสกรูภายในบารเรลสูงขึ้น ทำให้การเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชสูงขึ้น (Chinnaswamy and Hanna, 1988) และยังคงส่งผลถึงความหนืดของโกลภายในบารเรลให้สูงขึ้น ทำให้แรงดันสูง ดังนั้นอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์จึงสูงขึ้นตามด้วย (Mohamed, 1990) อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณความชื้นของวัตถุดิบต่ำเกินไปส่งผลให้สตาร์ชแตกตัว (dextrinization) จากแรงเสียดเนื่องจากการหมุนของสกรู ทำให้อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง (Chinnaswamy and Hanna, 1988)

7. ขนาดอนุภาค (particle size) Garber et al. (1997) พบว่าการเอกซ์ทรูคแป้งข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ ส่งผลต่ออัตราการขยายตัวต่างกัน โดยแป้งข้าวโพดขนาดอนุภาค 50.2-94.2 ไมโครเมตร ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการพองตัวสูงสุด เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นทำให้การพองตัวลดลง อีกทั้งการใช้ข้าวโพดบดหยาบที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 1,400 ไมโครเมตร ให้การพองตัวที่ต่ำมาก อันเนื่องมาจากการเกิดเจลลาติไนเซชันที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Desrumaux et al. (1998) ที่กล่าวว่าเมื่ออนุภาคของแป้งข้าวโพดใหญ่ขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคลดลง ทำให้มีแรงเสียดทานต่อกันต่ำลง อุณหภูมิของโกลจึงลดลง และส่งผลไปลดการขยายตัวของเอกซ์ทรูเคต โดยโพรงอากาศภายในโครงสร้างจะมีขนาดใหญ่ขึ้น

เล็กน้อยในขณะที่จำนวนของโพรงอากาศลดลง อีกทั้งยังพบว่าการผสมโยอาหารที่มีขนาดอนุภาค เล็กลงในแป้งข้าวโพด มีผลในการปรับปรุงการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งด้านยาวและแนวรัศมี (Lue et al., 1991)

ตัวแปรด้านการแปรรูปที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

1. อัตราการป้อนวัตถุดิบ (feed rate) อัตราการป้อนวัตถุดิบเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อลักษณะ ทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบสู่เครื่องจะทำให้เกิดการเพิ่มความดันที่ ทางออกของผลิตภัณฑ์ ลดพลังงานกลที่ป้อนเข้า และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่วัตถุดิบอยู่ใน เครื่อง (residence time) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ เช่น เมื่อ อัตราการป้อนวัตถุดิบสูงขึ้น หรือมีระดับการเติมของวัตถุดิบภายในบารเรล (degree of fill) มาก ส่งผลให้ออกซ์ทริบูเตตที่ได้มีค่าความสามารถในการละลายน้ำและการขยายตัวในแนวรัศมีมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่การป้อนวัตถุดิบในอัตราลดลงโดยที่ความเร็วรอบของสกรูมีค่าคงที่ ทำให้ระดับการเติมเต็ม ภายในบารเรลลดลง ส่งผลให้เกิดการสิ้นเปลืองของโคภายในบารเรลและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการขยายตัว ลดลง (Pan et al., 1991) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Kirby et al. (1988) ที่พบว่า อัตรา การป้อนวัตถุดิบเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเติมเต็มของวัตถุดิบภายในบารเรล ลักษณะ ของการควบคุมกระบวนการแปรรูป และคุณภาพของเอกซ์ทริบูเตต โดยที่ Yeh and Jaw (1999) พบว่าการเพิ่มอัตราการป้อนจะมีผลให้ค่าแรงทอร์คเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการป้อนลดลงโดยให้ ความเร็วรอบของสกรูเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะและระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของ ผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

2. ความเร็วรอบสกรู (screw speed) ระดับความเร็วรอบสกรูส่งผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ ต่างกัน โดยผลจากงานวิจัยของ Chinnaswamy and Hanna (1988) พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบ จาก 80 เป็น 150 รอบต่อนาที ส่งผลให้อัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบขึ้นไป อีกจะทำให้การขยายตัวลดลง เนื่องจากที่ความเร็วรอบสกรูสูงๆ ทำให้ได้มีเวลาอยู่ในบารเรลสั้น ลง การเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ชต่ำลงเนื่องมาจากการสุกที่ไม่สมบูรณ์ Lue et al. (1991) พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบสกรูในช่วง 200-300 รอบต่อนาที ทำให้การขยายตัวทางยาวเพิ่มขึ้น โดยที่การขยายตัวในแนวรัศมีจะลดลง และขนาดโพรงอากาศจะเล็กลงด้วย อีกทั้งยังพบลักษณะผิว รอบๆ เอกซ์ ทริบูเตตมีลักษณะเป็นปากฉลาม (sharkskin) แต่ไม่พบลักษณะดังกล่าวนี้ที่การใช้ ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม Taranto et al. (1975) พบว่าการขยายตัวในแนว รัศมีของแป้งข้าวโพดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบสกรูสำหรับเอกซ์ทริบูเตตแบบสกรูเดี่ยว Grenus et al. (1993); Guha et al. (1997) และ Garber et al. (1997) พบผลที่สอดคล้องกันโดยเมื่อ

ความเร็วรอบสกรูสูงขึ้นทำให้เกิดการลดลงของแรงทอร์คและความดันที่หัวแบบ และการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานกลจำเพาะ

3. อุณหภูมิของบาร์เรล (barrel temperature) อุณหภูมิที่ตั้งไว้ตลอดความยาวของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ถ้าอุณหภูมิทางออกของเครื่องมากกว่า 100 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่พองตัวทันที เนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะไม่พองทันทีหลังออกจากเครื่อง เกิดเนื่องจากการลดอุณหภูมิช่วงใกล้ทางออกต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส (กมลวรรณ แจ่มชัด, 2541) โดยอุณหภูมิในกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสำหรับการเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ของผลิตภัณฑ์ อัตราการขยายตัว และปริมาณในการละลายน้ำของคาร์โบไฮเดรต (Mercier and Feillet, 1975) โดยเมื่ออุณหภูมิของบาร์เรลสูงขึ้นในช่วง 50-247 องศาเซลเซียส ในการเอกซ์ทรูดข้าวโพดบดหยาบ ส่งผลให้คาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ในเอทานอลมีปริมาณลดลง พบว่าน้ำตาลจำพวกฟรักโทส กลูโคส ซูโครส และราฟฟิโนสลดลง แต่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตจำพวกที่ละลายในน้ำมากขึ้น ซึ่งเป็นสารจำพวกโพลีแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แสดงให้เห็นถึงการบวมของเม็ดสตาร์ช Guha et al. (1997) พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบาร์เรลจาก 80-100 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าแรงทอร์คลดลง Chinnaswamy and Hanna (1988) รายงานว่าอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตข้าวโพดเพิ่มจาก 11.5 เป็น 13.2 เมื่ออุณหภูมิบาร์เรลเพิ่มจาก 110 เป็น 140 องศาเซลเซียส จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงเมื่อยังคงเพิ่มอุณหภูมิ อีกทั้ง Pan et al. (1991) รายงานถึงการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวสาลีที่อุณหภูมิบาร์เรล 158 องศาเซลเซียส และการขยายตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิขณะเอกซ์ทรูชันมีผลต่อการขยายตัวของสตาร์ช และสตาร์ชต่างชนิดกันจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการขยายตัวที่ดีที่สุดแตกต่างกันด้วย

4. รูปแบบของสกรู (screw configuration) ชิ้นส่วนของสกรูที่ใช้และตำแหน่งชิ้นส่วนของสกรูมีผลต่อรูปแบบของสกรู โดยเฉพาะกับเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ ซึ่งมีผลต่อการผสมของวัตถุดิบ เวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่อง แรงเฉือน พลังงานกลที่ให้กับวัตถุดิบ และอุณหภูมิของโคภายในเครื่อง การจัดแบบสกรูที่เป็นการเพิ่มแรงเฉือนใกล้ทางออกของเครื่อง จะเพิ่มการสูญเสียโครงสร้างของโมเลกุลแป้ง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่พอง มีลักษณะรูพรุนเล็ก และความคงทนต่อแรงกดลดลง (กมลวรรณ แจ่มชัด, 2541)

ปัจจัยที่ขึ้นและการเปลี่ยนแปลงสมบัติ

องค์ประกอบหลักของรำฉัณพืช

ฉัณพืชเป็นแหล่งที่สำคัญของใยอาหาร โดยเฉพาะในส่วนเยื่อหุ้มเมล็ดของรำและฉัณพืชทั้งเมล็ด องค์ประกอบหลักของใยอาหารคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

1. เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นสารคาร์โบไฮเดรตประเภทที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยที่เหมือนกันทั้งหมด (Homo-polysaccharide) คือ β -D-glucopyranose unit ถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(1 \rightarrow 4)-glycosidic bond โมเลกุลของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีแนวโน้มที่แต่ละสายของโมเลกุลจะรวมตัวเข้าหากันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ก่อตัวเป็นชั้นของสายโมเลกุลต่อกัน มีลักษณะคล้ายร่างแหที่มีความเป็นระเบียบสูง (crystalline region) ดังนั้นเมื่อโครงสร้างของเส้นใยนี้ถูกยึดกันแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจน และเหลือตำแหน่งที่ว่างของไฮดรอกซิล (OH group) เพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยากับน้ำลดน้อยลง จึงส่งผลให้เกิดเป็นโมเลกุลที่มีแรงยึดเหนี่ยวสูง และไม่สามารถละลายได้ในน้ำ (Sjostrom, 1993)

2. เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารคาร์โบไฮเดรตประเภทที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยต่างๆ กัน (Hetero-polysaccharide) หน่วยย่อยที่เป็นองค์ประกอบหลักของโมเลกุลคือ น้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 ตัว (hexose) น้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 ตัว (pentose) และกรดยูโรนิก (uronic acid) จำนวนเล็กน้อย โครงสร้างหลักของโมเลกุลประกอบไปด้วยสายยาวที่เชื่อมต่อกันของไซโลส (xylan polymer) กลูโคสและแมนโนส (glucomanan polymer) และกาแลคโทส (galactose polymer) สายยาวของโครงสร้างหลักนี้จะมีกิ่งของกลูโคส อะราบิโนส และกรดกลูโคโรนิก (glucuronic acid) มาเกาะอยู่ด้วย ส่วนมากโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะไม่ละลายน้ำ แต่บางส่วนก็สามารถละลายน้ำได้ เฮมิเซลลูโลสหลักที่พบในผนังเซลล์ของรำฉัณพืชคือ อะราบิโนไซแลนซึ่งประกอบด้วยสายหลักของไซโลสต่อกันด้วยพันธะ β -(1 \rightarrow 4)-glycosidic bond และมีหน่วยย่อยของอะราบิโนสมาเกาะอยู่เป็นกิ่งที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 หรือ 3 ของบางโมเลกุลของไซโลส ความสามารถในการละลายน้ำของเฮมิเซลลูโลสนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยของอะราบิโนสที่มาเกาะอยู่กับสายหลักของโมเลกุล ถ้ามีจำนวนอะราบิโนสสูงจะทำให้การละลายน้ำสูงขึ้น (Johnson and Southgate, 1994)

3. ลิกนิน

ลิกนินประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของฟีนิลโพรเพน (phenylpropane unit) ไม่ใช่สารประเภทคาร์โบไฮเดรต แต่เป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่ละหน่วยถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะคาร์บอน และอีเทอร์ ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลที่ยึดกันแน่นยากต่อการ

ทำลายให้มีลักษณะเล็กลง ไม่สามารถละลายน้ำได้ และมีความสามารถในการละลายในสารเคมีต่างๆ ค่อนข้างต่ำ (Hon and Shiraishi, 1990) ลิกนินจะเชื่อมต่ออยู่กับสายคาร์โบไฮเดรต เช่น สายของแมนโนส (mannan polymer) การรวมกลุ่มกันระหว่างคาร์โบไฮเดรตและลิกนินในผนังเซลล์ของธัญพืช

การเปลี่ยนแปลงสมบัติของใยอาหาร

1. การใช้กระบวนการทางกล (mechanical treatment)

Artz et al. (1990) ใช้รำข้าวโพดเป็นวัสดุใยอาหารนำไปผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่อุณหภูมิสูงสุดคือ 150 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ใยอาหารถูกทำลายและเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนมากกว่าใยอาหารที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สถานะที่รุนแรงน้อยกว่า อย่างไรก็ตามพบว่าใยอาหารหลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สถานะต่างๆ จะทำให้ความเป็นระเบียบ (degree of crystallinity) ของเซลลูโลสเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และไม่พบการเพิ่มขึ้นของปริมาณใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (soluble fiber) อย่างมีนัยสำคัญ

2. การใช้ด่าง (alkaline treatment)

Ning et al. (1991) ศึกษาผลของการใช้ด่างต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของใยอาหาร โดยแหล่งของใยอาหารที่ใช้ในการทดลองคือ รำข้าวโพด พบว่าโครงสร้างของใยอาหารเดิมมีลักษณะที่เรียบ และแน่น ในขณะที่ใยอาหารหลังผ่านการใช้ด่างมีลักษณะ โครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น มีลักษณะของการถูกทำลาย และโครงสร้างเปิดตัวออกมากขึ้น ในด้านสมบัติของการอุ้มน้ำ พบใยอาหารที่ใช้ด่างมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่าใยอาหารดิบ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างใยอาหารคือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอ่อนลง และโครงสร้างเป็นรูพรุนมากขึ้น ทำให้น้ำสามารถส่งผ่านเข้าไปในโครงสร้างของใยอาหารและถูกดูดซับไว้ได้ดีขึ้น ดังนั้นค่าความสามารถในการอุ้มน้ำจึงสูงขึ้น

ความเป็นระเบียบของโครงสร้างใยอาหารดิบสูง ซึ่งโครงสร้างตามธรรมชาติจะประกอบไปด้วยส่วนที่มีความเป็นระเบียบสูงของเซลลูโลส ภายหลังจากการใช้ด่างพบว่าความเป็นระเบียบภายในโครงสร้างลดลงเมื่อเทียบกับใยอาหารดิบ เป็นผลมาจากการที่ด่างสามารถเข้าไปทำลายส่วนที่มีความเป็นระเบียบสูงของเซลลูโลส ในด้านองค์ประกอบทางเคมีของใยอาหาร พบว่าปริมาณของใยอาหารที่ละลายน้ำได้มีสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนปริมาณของใยอาหารที่ละลายน้ำไม่ได้มีค่าต่ำลงหลังผ่านการใช้ด่าง Larrea et al. (1997) ทำการศึกษาผลของการใช้ด่างในการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแกลบ (rice hull) แกลบเป็นวัสดุที่มีปริมาณใยอาหารสูง ส่วนปริมาณแป้ง โปรตีน และไขมันมีอยู่ต่ำมากเมื่อเทียบกับวัสดุใยอาหารประเภทรำ แล้วนำมาผ่าน

กระบวนการใช้ด่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ pH ประมาณ 11.5 ภายหลังจากการใช้ด่างพบว่าใยอาหารที่ได้มีค่าการดูดน้ำ (water absorption) และปริมาตรหลังดูดน้ำ (swollen volume) เพิ่มขึ้น เนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออกไป แต่เดิมโครงสร้างของแกลบมีปริมาณลิกนินอยู่สูง มีหน้าที่ทำให้โครงสร้างของแกลบมีความแข็งแรงมาก ในระหว่างกระบวนการใช้ด่างพบว่าด่างมีความสามารถไปทำลายพันธะที่ยึดเกาะกันของลิกนินกับส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่มักยึดกันอยู่ด้วยพันธะอีเทอร์ และเอสเทอร์ (Sjostrom, 1993) ต่อมาในขั้นตอนของการล้างส่วนของลิกนินจึงถูกกำจัดออกไป ทำให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นช่องว่างมากขึ้น การที่พันธะเดิมถูกทำลายให้ส่วนปลายของพันธะเป็นอิสระมากขึ้น ทำให้น้ำสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างได้สะดวก และไปจับอยู่กับตำแหน่งพันธะที่ว่างอยู่ ดังนั้นใยอาหารที่ใช้ด่างจึงมีความสามารถในการดูดน้ำ บวม และให้ปริมาตรของใยอาหารสูงขึ้น

3. การใช้กรด (acid treatment)

Ning et al. (1991) ใช้กรดเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของรำข้าวโพด พบว่าโครงสร้างของใยอาหารมีระดับความเป็นรูพรุนสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับรำข้าวโพดดิบ และพบค่าความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบหลักของใยอาหารถูกละลายออกไปด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ไปเป็นน้ำตาลเพนโทส และเฮกโซส เช่น กลูโคส แรมโนส อะราบิโนส ไซโลส แมนโนส และกาแลคโทส ทำให้เกิดโครงสร้างที่หลวมไม่เป็นระเบียบ และเกิดความไม่เสถียรของพันธะไกลโคซิดิกระหว่างน้ำตาลเพนโทสและเฮกโซส ผิวหน้าของใยอาหารจึงเกิดเป็นรูพรุนสูงขึ้น และน้ำผ่านเข้าไปภายในใยอาหารได้ง่ายขึ้น โดยที่อัตราของการไฮโดรไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการใช้กรด และความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

2.1. การเตรียมวัตถุดิบ

ปลายข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ105 รำข้าวขาวดอกมะลิ105 (รำข้าวดิบ) และรำสกัดไขมันข้าวขาวดอกมะลิ105 จากบริษัทปทุมไรซ์มิลลแอนด์แกรนูลรี จำกัด (มหาชน) บดปลายข้าวด้วยเครื่องบดเมล็ดพันธุ์แบบฉ้อน (hammer miller) (Retsch, SK100, standard rostfrei, Germany) ผ่านตระแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร รำข้าวร้อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช (0.85 มิลลิเมตร) เก็บแป้งข้าว และรำข้าวในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการผลิต

2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว และรำข้าว

- 2.2.1 ปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี AOAC (1997)
- 2.2.2 ปริมาณไขมัน ด้วยวิธี AOAC (1997)
- 2.2.3 ปริมาณเถ้า ด้วยวิธี AOAC (1997)
- 2.2.4 ปริมาณสตาร์ช ด้วยวิธี anthrone method (Roe, 1955)
- 2.2.5 ปริมาณอะมิโลส สำหรับแป้งข้าว ตามวิธีของ Juliano (1971)

2.3 การศึกษาเบื้องต้น

หาช่วงระดับของสภาวะการแปรรูป คือ อัตราการป้อนวัตถุดิบ อุณหภูมิบารเรล ความเร็วรอบสกรู และความชื้นของวัตถุดิบที่ทำให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สามารถดำเนินไปได้ด้วยสภาวะคงที่ และตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตด้านอัตราการขยายตัว

2.4 การผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นำแป้งข้าว และรำข้าวดิบผสมในแป้งข้าว 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มาป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ ชนิดที่สกรูซ้อนกันแบบหมุนตามกัน (APV Baker MPF 19:25, corotating and intermeshing twin screw extruder, APV Baker, Inc., Grand Rapid, MI, USA) อัตราส่วนความยาวเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เท่ากับ 25 : 1 มิลลิเมตร ประกอบด้วยบารเรล 4 ท่อนเรียงต่อกันและปิดด้วยหัวแบบ (die plate) ที่มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร โดยรูปแบบการจัดเรียงสกรู (screw configuration) เป็นแบบสำหรับผลิตกัณฑ์ชนิดพองตัวทันทีดังตารางที่ 1 นำแป้งข้าวป้อนเข้าเครื่องโดยใช้อัตราการป้อนคงที่ 9.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ด้วยถังป้อนที่มีสกรูอยู่ที่ก้นถัง ทำหน้าที่ป้อนวัตถุดิบแบบปริมาตร (K-Tron Corp.

Pitman, NJ) มีปั๊มน้ำชนิดที่มีการบีบตัวส่งน้ำเป็นระยะๆ (peristaltic pump) ปั๊มน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบภายในบารเรล หน้าหัวแบบมีใบมีดสำหรับตัดเอกซ์ทรูเดตที่ควบคุมความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที อุณหภูมิบารเรลท่อนต่างๆ ตั้งไว้ดังตารางที่ 2 การเก็บข้อมูลจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เช่น อุณหภูมิของเอกซ์ทรูเดต (product temperature) ความดันที่หัวแบบ (die pressure) และแรงทอร์ค (% torque) ถูกเก็บทุกๆ 5 นาทีหลังจากที่มีการเปลี่ยนสถานะและเมื่อค่าแรงทอร์คคงที่ เก็บตัวอย่างเอกซ์ทรูเดต นำเข้าอบในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

ตารางที่ 1 รูปแบบการจัดเรียงสกรู

screw element type	amount	length (mm)
feed screw	11D	209.00
60°forward paddles	4	19.00
feed screw	3D	57.00
60°forward paddles	4	19.00
single lead screw	2D	38.00
30°forward paddles	5	23.75
30°forward paddles	4	19.00
single lead screw	1D	19.00
60°forward paddles	6	28.50
60°forward paddles	6	23.75
single lead screw	5	19.00
total lengths (mm)	11D	475.00

ตารางที่ 2 การตั้งอุณหภูมิของบารเรล

temperature in the last section (°C)	temperature profile (°C)
160	90 / 110 / 130 / 160
170	90 / 110 / 140 / 170
180	90 / 110 / 150 / 180

การคำนวณพลังงานกลจำเพาะ (Specific Mechanical Energy, SME)

$$SME \text{ (kJ/kg)} = \frac{\text{RPM (run)}}{500 \text{ rpm}} \times \frac{\% \text{ torque (run)}}{100} \times \frac{2 \text{ kW}}{\text{feed rate (kg/s)}} \text{----- (1)}$$

2.5 ศึกษาผลของสภาวะการแปรรูปและการเติมรำข้าวดิบต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคต์ข้าว

ใช้แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design ในการศึกษาการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทราคชัน โดยศึกษาตัวแปรของสภาวะการแปรรูป 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปรแบ่งออกเป็น 3 ระดับดังนี้คือ ความชื้นวัตถุดิบที่ระดับ 20, 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู ที่ระดับ 250, 300 และ 350 รอบต่อนาที และอุณหภูมิบาร์ลท่อนที่ 4 ที่ระดับ 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส สภาวะการแปรรูปทั้งหมดประกอบด้วย 15 การทดลองดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แผนการทดลอง

sample	X1 feed moisture content		X2 screw speed		X3 barrel temperature	
	code	%	code	rpm	code	°C
1	-1	20	-1	250	0	170
2	-1	20	1	350	0	170
3	1	24	-1	250	0	170
4	1	24	1	350	0	170
5	-1	20	0	300	-1	160
6	-1	20	0	300	1	180
7	1	24	0	300	-1	160
8	1	24	0	300	1	180
9	0	22	-1	250	-1	160
10	0	22	-1	250	1	180
11	0	22	1	350	-1	160
12	0	22	1	350	1	180
13	0	22	0	300	0	170
14	0	22	0	300	0	170
15	0	22	0	300	0	170

2.6 การตัดแปรรำข้าวด้วยค่างและการเติมในเอกซ์ทราคต์

ผสมรำข้าวและน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 แล้วปรับ pH เป็น 9-11 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6.0 นอร์มัล นำไปให้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1, 4, 8 และ 16 ชั่วโมง หรือทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องพร้อมกวนเป็นระยะๆ เป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลานำส่วนผสมที่ได้ไปทำให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริกจนได้ pH ประมาณ 6-7 แล้ว

ทำการกรองสลับกับการล้างด้วยน้ำสะอาด 3 ครั้ง ทำให้แห้งด้วยลมร้อนที่ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำรำข้าวที่แห้งแล้วไปบดด้วยเครื่องบดเมล็ดพันธุ์ แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช

นำส่วนผสมวัตถุดิบระหว่างแป้งข้าวกับรำข้าวดิบ และแป้งข้าวกับรำข้าวที่ใช้ด่างที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ (w/w) มาป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ตามการทดลองข้อ 2.4 จากนั้นนำเอกซ์ทรูเดตที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

2.7 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ต่าง

2.7.1 ปริมาณความชื้น ด้วยวิธี AOAC (1997)

2.7.2 ปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี AOAC (1997)

2.7.3 ปริมาณไขมัน ด้วยวิธี AOAC (1997)

2.7.4 ปริมาณใยอาหาร ด้วยวิธี AOAC (1997)

- ใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (soluble dietary fiber)
- ใยอาหารที่ละลายน้ำไม่ได้ (insoluble dietary fiber)

2.7.5 ปริมาณเถ้า ด้วยวิธี AOAC (1997)

2.7.6 ปริมาณสตาร์ช ด้วยวิธี anthrone method (Roe, 1955)

2.7.7 การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ด่าง ตามวิธีของ Ning et al. (1991)

นำตัวอย่างรำข้าว 2 กรัม ผสมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ในหลอดปั่นเหวี่ยง เขย่าส่วนผสมเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง นำไปปั่นเหวี่ยงที่ 10,000 X g เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส วัดปริมาตรของส่วนใสที่แยกออกจากส่วนของแข็ง (supernatant) คำนวณค่าความสามารถในการดูดน้ำเป็นอัตราส่วนของปริมาตรของน้ำ (มิลลิลิตร) ที่ถูกกักไว้ในส่วนของของแข็งที่ไม่ละลายต่อน้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

2.7.8 ศึกษาโครงสร้างภายในของรำข้าวและรำข้าวที่ใช้ด่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

บดตัวอย่างรำข้าวและรำข้าวที่ใช้ด่างผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร เก็บในตู้อบสูญญากาศ เตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างรำข้าวมากระจายติดบนฐานรองตัวอย่าง (stub) แล้วนำตัวอย่างไปฉายด้วยเครื่องฉาบทอง (ion sputter) 2 ครั้ง ครั้งละ 2 นาที เพื่อลดการเสียสภาพเนื่องจากความร้อน นำไปส่องกล้องด้วยเพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (JSM-6400 Scanning Electron Microscope, JEOL, Tokyo, Japan) ที่มีกระเร่งอิเล็กตรอนด้วยความต่างศักย์ (accelerating voltage) 10 KV

2.8 การพัฒนาผลิตภัณฑ์จากการใช้วัสดุอัดไขมันและการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต

เตรียมวัตถุดิบโดยการผสมรำข้าวคิบลงในแป้งข้าว 10 % และรำสกัดไขมันผสมลงในแป้งข้าว 10% จากนั้นผสมแคลเซียมคาร์บอเนตลงในวัตถุดิบผสมทั้ง 2 ของแป้งข้าวและรำข้าวในปริมาณ 0, 1, 2 และ 3%

นำวัตถุดิบมาป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ตามการทดลองข้อ 2.4 โดยตั้งอุณหภูมิบริเวณท่อนต่างๆ ไว้ดังนี้ 90/110/140/170 จากนั้นนำเอกซ์ทรูเดตที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและหาอายุการเก็บ

2.9 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต

2.9.1 การวัดอัตราการขยายตัว (expansion ratio)

คำนวณจากอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของเอกซ์ทรูเดตที่วัดด้วย vernier caliper เทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเปิดหน้าแปลนที่ใช้ 3.0 มิลลิเมตร คำนวณค่าเฉลี่ยของการวัด 10 ตัวอย่าง (ชิ้น)

2.9.2 ความหนาแน่น (piece density)

ตามวิธีการแทนที่ด้วยทราย (sand displacement method) โดยการใช้ภาชนะที่ทราบปริมาตรมาชั่งน้ำหนัก เติมทรายลงในภาชนะประมาณ 70 กรัม สุ่มชิ้นตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักแน่นอนประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในภาชนะ เติมทรายให้ล้นภาชนะ แล้วใช้ไม้บรรทัดเหล็กกวาดทรายออกตามแนวขอบปากภาชนะโดยไม่ต้องมีการเคาะหรือกระแทกภาชนะ บันทึกน้ำหนักรวมของภาชนะ ทำซ้ำ 5 ครั้ง การคำนวณ

$$PD (g/cm^3) = \frac{Wp (g)}{Vv (cm^3) - [Ws (g) / Ds (g/cm^3)]}$$

เมื่อ

PD = ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

Wp = น้ำหนักของเอกซ์ทรูเดต (กรัม)

Vv = ปริมาตรภาชนะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

Ws = น้ำหนักทราย (กรัม)

Ds = ความหนาแน่นของทราย (1.54 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

2.9.3 แรงกดแตก (compression force)

1) การเตรียมตัวอย่าง ตัดชิ้นของเอกซ์ทรูเดตให้มีความยาว 6 ± 0.2 เซนติเมตร อบในตู้อบลมร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที บรรจุลงถุงพลาสติกปิดผนึก แล้วทิ้งไว้ข้ามคืน (ประมาณ 18 ชั่วโมง) ในกล่องโฟมปิดฝา และควบคุมความชื้นของเอกซ์ทรูเดตที่

ประมาณ 6-7 เปอร์เซ็นต์ ก่อนทำการวัดค่าแรงกดแตก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA-XT2i Texture Analyzer)

2) การวัด ใช้หัววัดแบบ P35 (35 mm. dia. cylinder aluminum) โดยมีสถานะในการวัดดังนี้ คือ วัดแรงกดแตก (measure force in compression), ความเร็วของหัววัดที่เคลื่อนที่ลงก่อนสัมผัสเอกซ์ทรูเดตมีอัตราเร็ว 5.0 มิลลิเมตรต่อวินาที (pre - test speed), ความเร็วของหัววัดขณะเคลื่อนที่ลงในเนื้อของเอกซ์ทรูเดต 5.0 มิลลิเมตรต่อวินาที (test - speed), ความเร็วของหัววัดขณะเคลื่อนที่ขึ้นออกจากเอกซ์ทรูเดต 10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที (post - test speed), ระยะทางที่หัววัดเคลื่อนที่ลงในเนื้อของเอกซ์ทรูเดต คือ 50% strian, เครื่องจะทำการบันทึกหลังจากวัดค่าแรงได้ 5 กรัม (trigger force), การวัดในแต่ละตัวอย่างทำ 10 ซ้ำ แล้วคำนวณหาค่าแรงเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่กดลงบนเอกซ์ทรูเดตแล้วทำให้แตก (average maximum peak force)

2.9.4 การวิเคราะห์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวดิบ

ใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว Rapid Visco Analyzer (RVA, Newport Scientific, Australia) โดยมีลักษณะของอุณหภูมิและเวลาเป็นดังนี้คือ เริ่มต้นการทำงานและควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 0-6 นาที (idle and hold) ด้วยความเร็วในการกวน 960 รอบต่อนาที สำหรับ 10 วินาทีเริ่มต้น และลดลงเป็น 160 รอบต่อนาที ตลอดการวิเคราะห์, เพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 6-11 นาที (ramp up), ควบคุมไว้ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 11-17.5 นาที (hold), ทำให้เย็นลงถึงอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 17.5-23.5 นาที (cooling), ควบคุมไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 23.5-32.5 นาที (hold) และทำการวัดค่าความหนืดขณะเย็น (cold viscosity) และเวลาที่ปรากฏค่าความหนืด (peak time) ซึ่งเป็นค่าความหนืดสูงสุดในช่วงเวลา 0-6 นาที, ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นค่าความหนืดสูงสุดในระหว่างช่วงการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส, ค่าความหนืดของเจลร้อน (hot paste viscosity) ซึ่งเป็นค่าความหนืดที่เวลาสิ้นสุดของการให้ความร้อน และค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ซึ่งเป็นค่าความหนืดที่เวลาสิ้นสุดการวิเคราะห์ (Whalen et al., 1997)

2.9.5 การวิเคราะห์ระดับเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ช (degree of starch gelatinization)

ทำการวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ชสำหรับเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ ตามวิธีของ Chaing and Johnson method (1977)

นำค่าที่วัดได้มาสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรในสภาวะการแปรรูปที่เลือกศึกษาโดยการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุ (multiple regression) โดยใช้โปรแกรม SPSS (version 9.0) สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการ โพลีโนเมียลกำลังสองซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 \quad \text{-----} \quad (2)$$

เมื่อ X_1 = ความชื้นของวัตถุดิบ (เปอร์เซ็นต์)
 X_2 = ความเร็วรอบสกรู (รอบ/นาที)
 X_3 = อุณหภูมิของบารเรล (องศาเซลเซียส)
 Y = ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (แรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ ความดันที่หัวแบบ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ อัตราการขยายตัว แรงกดแตก และความหนาแน่น)
 $b_0 \dots b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์รีเกรชัน

โดยทำการพิจารณาค่า R^2 (coefficient of determination) เมื่อมีค่าสูงจึงจะนำสมการมาใช้ ซึ่งสมการที่ได้จะนำมาสร้างกราฟ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STATISTICA (version 5.0) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของสภาวะการแปรรูปที่เลือกศึกษากับผลตอบสนอง

2.10 การหาอายุการเก็บ

นำตัวอย่างบรรจุในถุงพลาสติกชนิดโพลีเอทิลีน (PE) เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 เดือน วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างทุก 1 สัปดาห์ โดยวัดแรงกดแตก ตามวิธี 2.9.3 ความชื้น (AOAC, 1997) Aw และ Thiobabituric acid reactive substances (TBARS) ตามวิธีของ Gome et al (2003)

2.11 การทดสอบทางประสาทสัมผัสและการยอมรับ

การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคทางประสาทสัมผัสนั้นใช้ผู้ทดสอบที่มีประสบการณ์จำนวน 8 คนทำการประเมินทางด้านลักษณะผิว กลิ่นรส เนื้อสัมผัส (ความกรอบ ความแน่นเนื้อ) การติดตามชอกฟัน และความชอบโดยรวม โดยใช้วิธีทดสอบแบบ QDA ทำการวิเคราะห์ผลสถิติโดยหาวิเคราะห์วาเรียนซ์และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SAS system for window 6.12 (SAS Institute Inc., North Carolina, USA)

บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น

จากการศึกษาเบื้องต้นเพื่อเตรียมวัตถุดิบ พบว่าการบดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร จะได้แป้งข้าวบดหยาบสำหรับป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ความชื้นของแป้งข้าวถูกปรับเป็น 20, 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นระดับความชื้นที่ทำให้เอกซ์ทรูเดตที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง และสามารถใช้โบมิดที่อยู่ติดกับหน้าแปลนของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ตัดได้ ลักษณะของเอกซ์ทรูเดตมีความพองตัวเมื่อออกจากหน้าแปลน และมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ไม่แข็งจนเกินไปอยู่ในช่วงที่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ตั้งอัตราการป้อนวัตถุดิบในอัตราคงที่ 9.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เนื่องจากเป็นอัตราการป้อนที่มีความเหมาะสมให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ดำเนินการแปรรูปได้ที่ช่วงความเร็วรอบ สกรู 250-350 รอบต่อนาที ตั้งอุณหภูมิ바เรลตอนที่ 4 ไว้ที่ 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับนี้จะให้ลักษณะของเอกซ์ทรูเดตมีความแตกต่างกันในช่วงลักษณะที่ยอมรับได้ การใช้อุณหภูมิที่ทางออกของเครื่องมากกว่า 100 องศาเซลเซียส จะได้เอกซ์ทรูเดตที่มีความพองตัวทันทีหลังออกจากเครื่อง (กมลวรรณ แจ่มชัด, 2541) ส่วนการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป (มากกว่า 180 องศาเซลเซียส) พบว่าเอกซ์ทรูเดตมีการขยายตัวลดลง ดังนั้นผลการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันคือ อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 9.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความชื้นวัตถุดิบ 3 ระดับ คือ 20, 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 3 ระดับ คือ 250, 300 และ 350 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ바เรลตอนที่ 4 เป็น 3 ระดับ คือ 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส

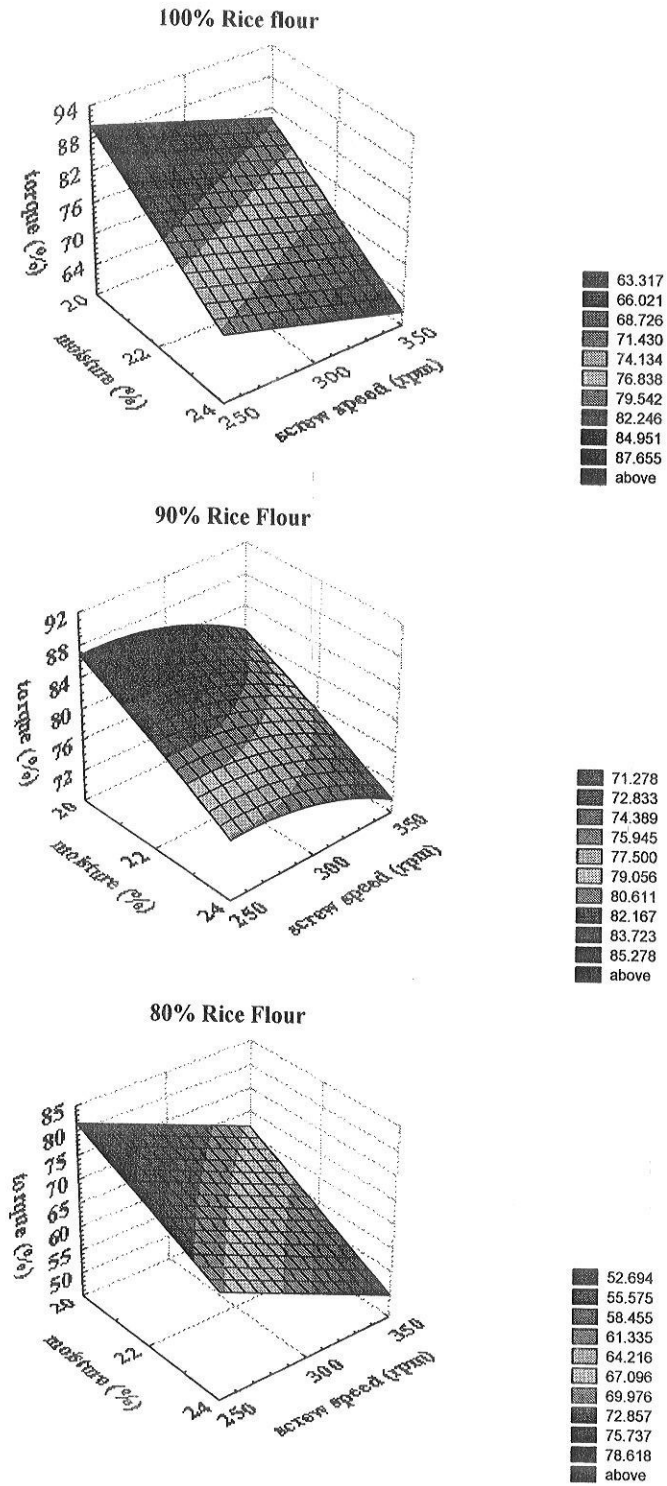
3.2 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

จากการดำเนินการแปรรูปด้วย 15 สภาวะการทดลอง จำนวน 2 ชั่วโมง สำหรับวัตถุดิบแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ แสดงผลค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปได้ดังตารางที่ 1-3 ในภาคผนวก ข. เมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยด้วยโปรแกรม SPSS แบบ stepwise method แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 1-3 ในภาคผนวก ค. จากสมการถดถอยที่ได้สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงผลตอบสนองแบบสามมิติได้จากเทอมตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ต่อผลตอบสนองตามสมการที่ 2 ผลพบว่าลักษณะแนวโน้มจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการแปรรูปที่มีต่อผลตอบสนองทั้งทางด้านแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ ความดันที่หัวแบบ อัตราการขยายตัว ความหนาแน่น และ

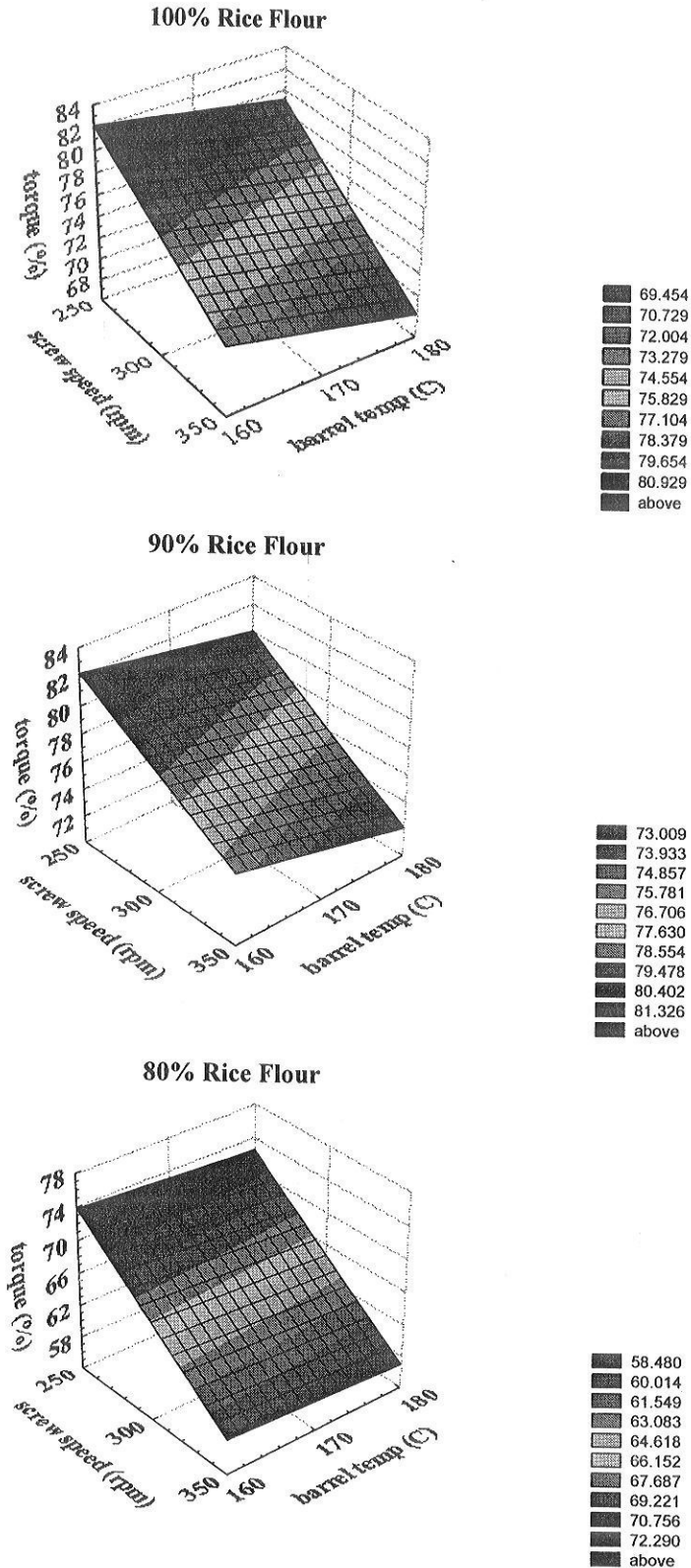
แรงกดแตก ในแต่ละวัตถุคืบทั้ง 3 ชนิด มีทิศทางของผลตอบสนองคล้ายกัน แต่มีความแตกต่างในความมากน้อยของค่าตอบสนอง

แรงทอร์คเป็นตัวแปรตามที่สำคัญในการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ค่าแรงทอร์คชี้ให้เห็นถึงน้ำหนักหรือแรงต้านทานต่อการหมุนของมอเตอร์เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ แรงทอร์คได้รับผลโดยตรงจากสภาวะการแปรรูป เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะความหนืดของโด้ และมีแนวโน้มที่จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะปรากฏของเอกซ์ทรูเดตที่จะได้ออกมา (Lue et al., 1994) จากการทดลองในครั้งนี้พบว่าความชื้นและผลร่วมของความเร็วยรอบสกรูกับอุณหภูมิบารเรลเป็นตัวแปรที่ส่งผลสำคัญต่อค่าแรงทอร์คซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 1 เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงทอร์ค ลดลง เนื่องจากโด้ภายในบารเรลมีความหนืดลดลงเมื่อมีน้ำอยู่ในส่วนผสมมากขึ้น ดังนั้นเมื่อแรงต้านทานต่อการหมุนของมอเตอร์เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ต่ำ ค่าแรงทอร์คจึงต่ำด้วย และเมื่อความเร็วยรอบสกรูเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงทอร์คลดลง เนื่องจากผลของการมีลักษณะคล้ายพลาสติกของโด้ (pseudoplastic behavior) ที่ส่งผลต่อการลดลงของความหนืดทำให้แรงทอร์คมีค่าลดลง อีกทั้งการที่สกรูหมุนเร็วขึ้นเป็นการเพิ่มแรงเฉือนที่กระทำต่อโด้ภายในบารเรลจึงทำให้ความหนืดลดลง (Bhattacharya and Hanna, 1987; Lue et al., 1994) อีกทั้งยังสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของความเร็วยรอบจะไปลดการเติมเต็มของโด้บนสกรูทำให้น้ำหนักของโด้บนสกรูต่ำลง (Jin et al., 1994) สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิบารเรลพบว่าส่งผลต่อการลดลงของแรงทอร์คเพียงเล็กน้อยดังแสดงในภาพที่ 2

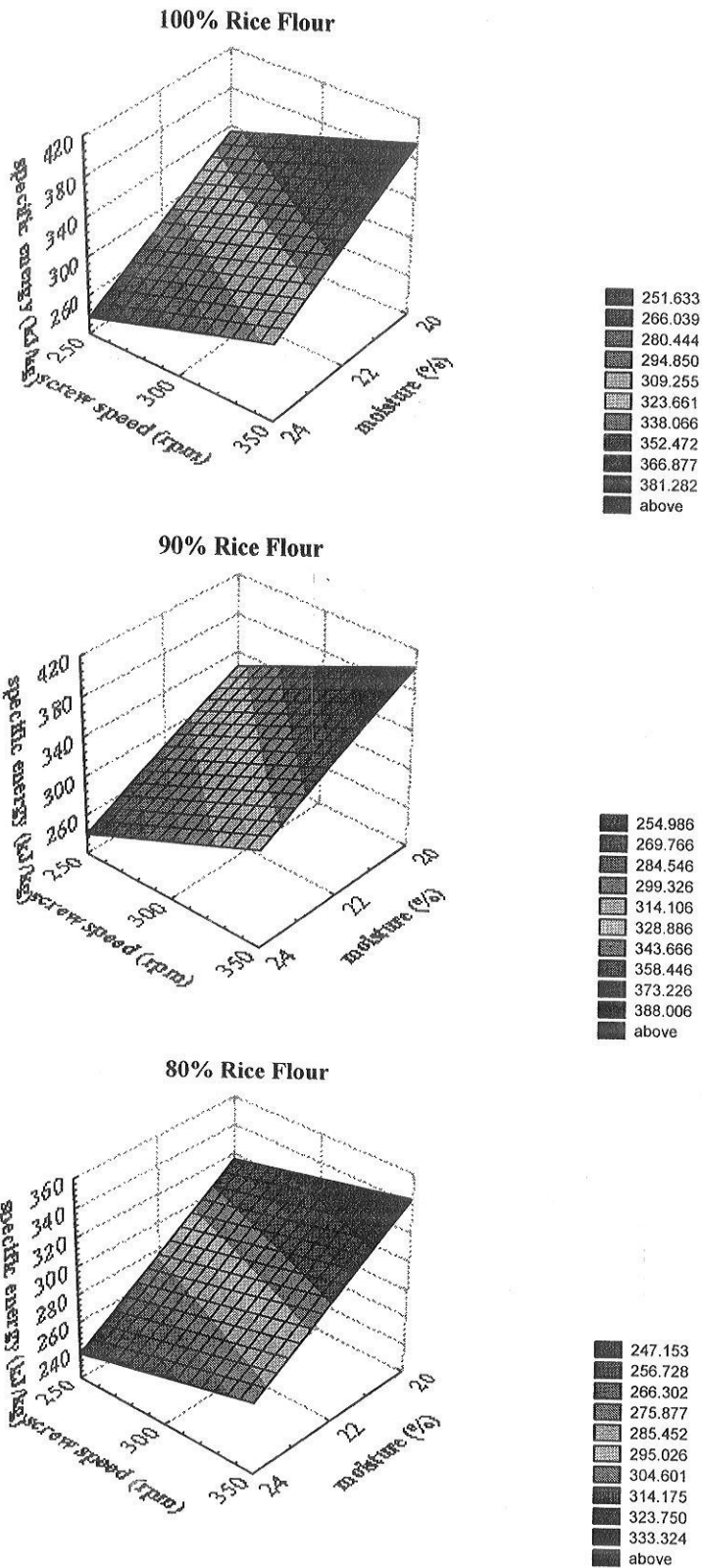
พลังงานกลจำเพาะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานกลที่ป้อนเข้าสู่วัตถุดิบภายในบารเรล เนื่องจากการหมุนของสกรูในขณะที่ดำเนินการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน วัตถุดิบได้รับพลังงานส่วนใหญ่จากทางกล จากการเสียดสีกันระหว่างวัตถุดิบทำให้เกิดความร้อน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สุก (Lue et al., 1994) โดยสามารถคำนวณพลังงานกลจำเพาะได้จากสมการที่ 1 จากการทดลองพบแนวโน้มของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่าพลังงานกลจำเพาะแสดงในภาพที่ 3 และ 4 พบว่าเมื่อความเร็วยรอบสกรูเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Grenus et al. (1993) และ Hsieh et al. (1989) สำหรับผลเนื่องจากความชื้นของวัตถุดิบพบว่าความชื้นมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงกับค่าพลังงานกลจำเพาะ ($p < 0.01$) โดยจากกราฟในภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่าเมื่อความชื้นของวัตถุดิบสูงจะส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะลดลงมาก เนื่องจากผลการลดลงของความหนืดเมื่อมีปริมาณน้ำในวัตถุดิบสูงขึ้น และน้ำเป็นตัวช่วยในการนำความร้อนระหว่างวัตถุดิบได้ดีทำให้ความต้องการพลังงานกลในการทำให้อุณหภูมิมีการสุกต่ำลง ผลการทดลองในครั้งนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Ilo et al. (1999)



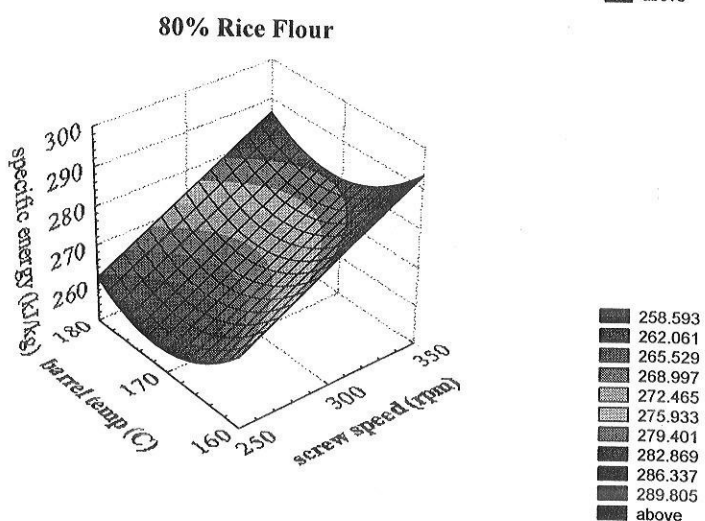
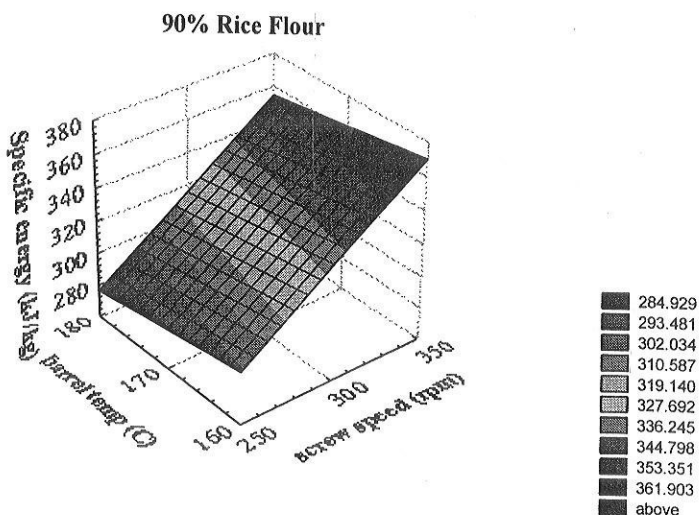
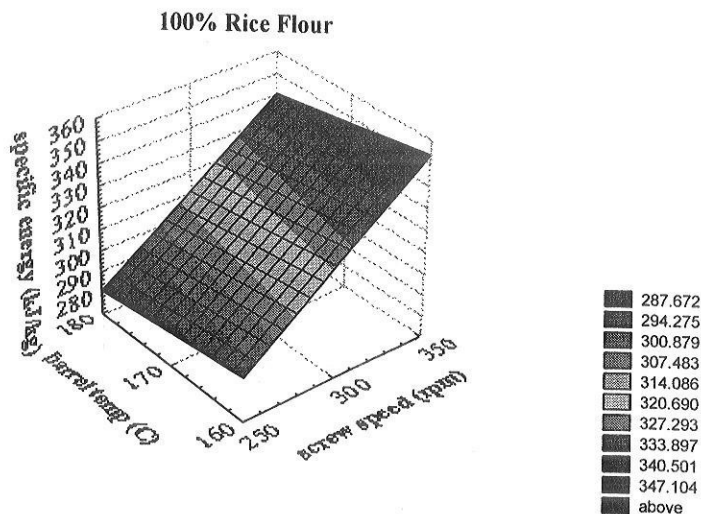
ภาพที่ 1 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์คที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 2 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์กที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิ
 บาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ
 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



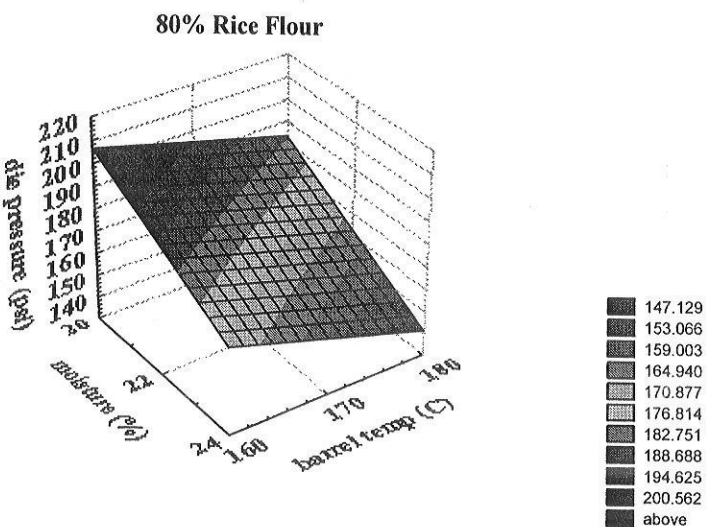
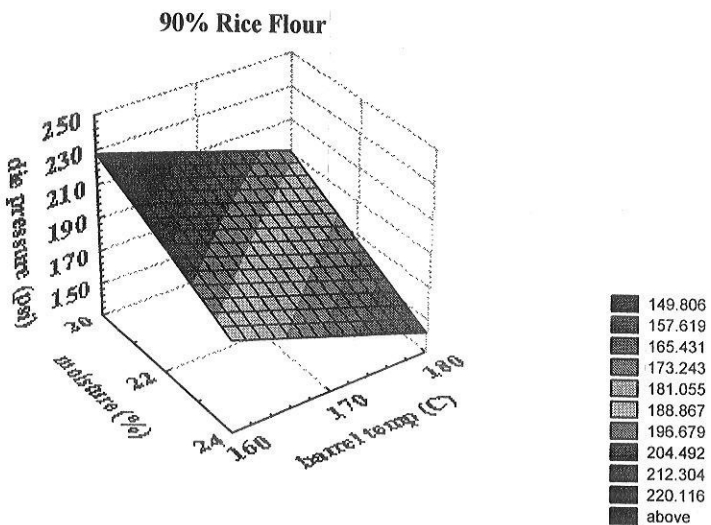
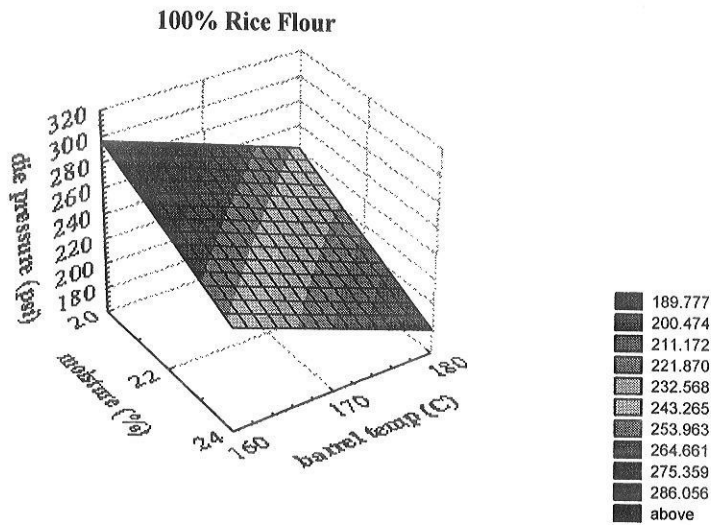
ภาพที่ 3 พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และ ความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ்தรุชั้นแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสม ำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4 พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิบาร์เรลในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

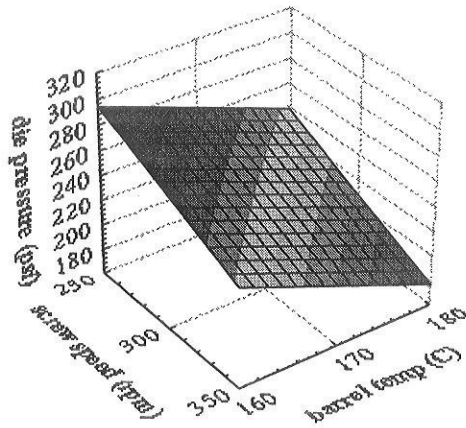
ความดันที่หัวแบบได้รับอิทธิพลจากผลร่วมของตัวแปรการแปรรูปดังตารางที่ 1-3 ในภาคผนวก ก. จากภาพที่ 5 และ 6 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูมีผลทำให้ความดันที่หัวแบบลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิเบาเรลสูงๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Hiesh et al. (1993) และ Garber et al. (1997) การลดลงของความดันที่หัวแบบเป็นผลมาจากความหนืดของโคมมีค่าต่ำ อีกทั้งในสภาวะการแปรรูปที่ความเร็วยรอบสกรูสูงๆ การเติมเต็มของโคมบนสกรูน้อยลง และแรงเสียดทานที่กระทำมากขึ้นร่วมกับอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการสะสมของโคมบริเวณทางออกของเครื่องต่ำลง ทำให้ความดันที่หัวแบบต่ำลงด้วย (Hu et al., 1993) นอกจากนี้เมื่อความชื้นของวัตถุดิบสูงขึ้นจะมีผลให้แรงเสียดทานของวัตถุดิบกับเบาเรล และวัตถุดิบกับสกรู รวมทั้งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าแปลนลดลง ส่งผลให้แรงทอร์คและความดันที่หัวแบบมีค่าต่ำลง

ในส่วนอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์นั้นพบว่าได้รับผลกระทบโดยตรงจากอุณหภูมิของเบาเรลในทิศทางเดียวกัน ($p < 0.01$) แสดงดังตารางที่ 1-3 ในภาคผนวก ก. ในขณะที่ความชื้นวัตถุดิบและความเร็วยรอบสกรูในช่วงสภาวะการแปรรูปที่ทำการศึกษานี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์น้อยมาก



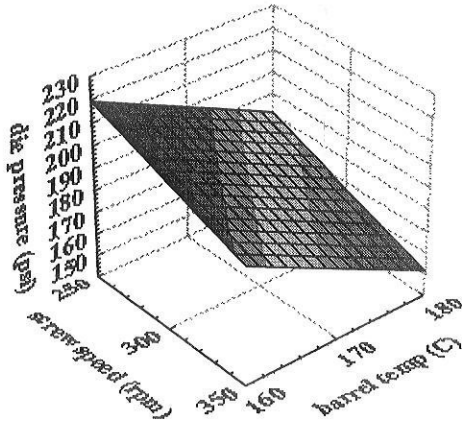
ภาพที่ 5 พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และ อุณหภูมิบาร์เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำ ข้าวคับ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

100% Rice Flour



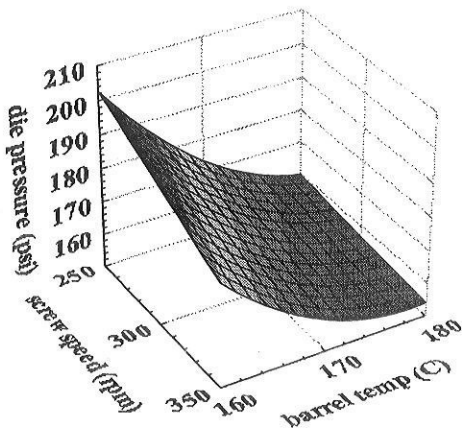
- 187.552
- 198.201
- 208.850
- 219.499
- 230.148
- 240.797
- 251.446
- 262.095
- 272.744
- 283.393
- above

90% Rice Flour



- 157.822
- 163.972
- 170.123
- 176.273
- 182.424
- 188.574
- 194.724
- 200.875
- 207.025
- 213.176
- above

80% Rice Flour

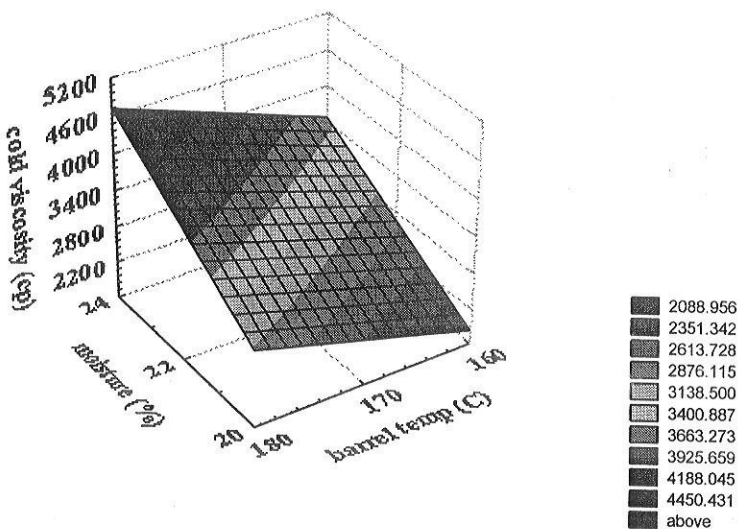


- 158.298
- 162.741
- 167.184
- 171.627
- 176.070
- 180.513
- 184.956
- 189.399
- 193.842
- 198.285
- above

ภาพที่ 6 พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และ อุณหภูมิบาร์เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าว คีบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

3.3 ความหนืดของเอกซ์ทรูเดต

ผลค่าความหนืดจากตารางที่ 4 พบว่าความหนืดขณะเย็นของเอกซ์ทรูเดตสูงกว่าแป้งข้าวคืบ 20-50 เท่า แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนจากลักษณะของแป้งคืบไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีระดับการสุกสูงอันเนื่องมาจากความร้อน และแรงกลของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าผลรวมของความชื้นกับอุณหภูมิบารเรลมีผลต่อค่าความหนืดขณะเย็น ($p < 0.01$) และให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.823 จึงนำสมการถดถอยมาสร้างกราฟแสดงผลตอบสนองแบบสามมิติได้ดังภาพที่ 7 พบว่าเมื่อความชื้นวัตถุดิบสูงขึ้นจาก 20-24 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าความหนืดขณะเย็นของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบารเรลส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นค่อนข้างน้อย เนื่องจากเมื่อความชื้นวัตถุดิบต่ำความหนืดของโดมากขึ้นดังผลจากค่าทอร์คที่สูงขึ้น อีกทั้งโคได้รับพลังงานกลสูง ดังนั้นจึงน่าจะเกิดการแตกตัวของสตาร์ช (degradation) มากกว่าวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงกว่า จึงส่งผลให้ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตมีค่าต่ำลง สำหรับค่าสหสัมพันธ์ (correlation) ของความหนืดขณะเย็นกับตัวแปรตามต่างๆ ที่วัดได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ พบว่ามีความสัมพันธ์กันในเชิงตรงข้ามอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) กับแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบ ในส่วนของค่าความหนืดสูงสุดพบว่ามีค่าสหสัมพันธ์ตรงข้ามกับแรงทอร์ค และพลังงานกลจำเพาะ ($p < 0.01$) ค่าความหนืดของเจลร้อนมีความสัมพันธ์ในเชิงตรงข้ามกับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์และพลังงานกลจำเพาะ ($p < 0.05$) และค่าความหนืดสุดท้ายมีความสัมพันธ์กับพลังงานกลจำเพาะในเชิงตรงข้ามเช่นกัน ($p < 0.01$)



ภาพที่ 7 พื้นผิวตอบสนองของความหนืดขณะเย็นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบารเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4 ค่าความหนืดจากการวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วของแป้งข้าวและเอกซ์ทรูเดตข้าว 100 เปอร์เซ็นต์

extrusion conditions			cold viscosity	peak time	peak viscosity	hot paste viscosity	final viscosity
mc	ss	temp	(cp)	(min)	(cp)	(cp)	(cp)
20	250	170	2402.5	3.90	2332.0	261.5	665.5
20	350	170	2478.5	3.43	2149.0	200.5	482.0
24	250	170	4145.5	5.00	4231.5	340.0	870.0
24	350	170	4359.5	4.20	4132.5	240.0	607.0
20	300	160	2169.0	4.34	2083.5	227.0	550.5
20	300	180	3000.5	2.20	2484.5	213.0	498.0
24	300	160	3173.5	4.97	3352.5	328.0	803.0
24	300	180	5043.0	3.93	4636.0	249.5	636.5
22	250	160	2781.0	4.97	2881.5	388.0	821.5
22	250	180	3335.0	4.40	2990.0	268.0	682.5
22	350	160	2476.0	4.64	2472.5	257.5	627.5
22	350	180	4202.0	1.37	3064.0	199.0	475.5
22	300	170	2965.0	4.87	2889.5	227.5	587.5
22	300	170	3070.5	4.60	2957.0	230.0	605.5
22	300	170	2652.5	4.60	2557.0	206.0	586.5
raw rice 1			93.0	0.07	6071.0	4038.0	6694.0
raw rice 2			86.0	0.07	5935.0	3987.0	5649.0

3.4 ระดับการเกิดเจลลาคติในซ์เซชัน

ระดับการเกิดเจลลาคติในซ์เซชันของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ จากช่วงสภาวะการทดลองในครั้งนี้อยู่ในช่วง 91-98 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 5 พบว่าระดับการเกิดเจลลาคติในซ์เซชันเฉลี่ยสูงสุดคือ 98.03 เปอร์เซ็นต์ ที่สภาวะการแปรรูปความชื้น 24 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 300 รอบต่ออนาที และอุณหภูมิบารเรล 180 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเป็นสภาวะการแปรรูปเดียวกันกับที่ทำให้เอกซ์ทรูเดตมีความหนืดขณะเย็นสูงที่สุด อย่างไรก็ตามไม่พบความสัมพันธ์กันระหว่างค่าความหนืดขณะเย็นกับระดับการเกิดเจลลาคติในซ์เซชัน ($p>0.05$) ส่วนระดับการเกิดเจลลาคติในซ์เซชันที่ต่ำสุดคือ 91.10 เปอร์เซ็นต์ ได้จากการแปรที่สภาวะความชื้น 24 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 300 รอบต่ออนาที และอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองนี้สามารถ

สังเกตได้ว่าในสภาวะการแปรรูปที่ให้อุณหภูมิ바เรลสูงที่สุดจะทำให้เอกซ์ทรูเดตเกิดการเจลลาคีไนซ์ เซชันในระดับที่สูงด้วย โดยผลจากการวิเคราะห์พบว่าระดับการเกิดเจลลาคีไนซ์เซชันมีความสัมพันธ์ ในเชิงบวก ($p < 0.05$) กับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ได้รับผลกระทบโดยตรง จากอุณหภูมิของบาเรลคังที่ได้กล่าวมา อีกทั้งยังพบว่าที่สภาวะการแปรรูปด้วยอุณหภูมิต่ำที่ 160 องศาเซลเซียส การเกิดเจลลาคีไนซ์เซชันอยู่ในระดับที่ต่ำประมาณ 91-95 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามข้อมูลของระดับการเกิดเจลลาคีไนซ์เซชันในช่วงการแปรรูปในการทดลองครั้งนี้ไม่ เหมาะสมที่จะนำไปสร้างสมการในการทำนายผลได้ เนื่องจากค่า R^2 ของข้อมูลมีค่าค่อนข้างต่ำ

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของระดับการเกิดเจลลาคีไนซ์เซชันของเอกซ์ทรูเดตจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์

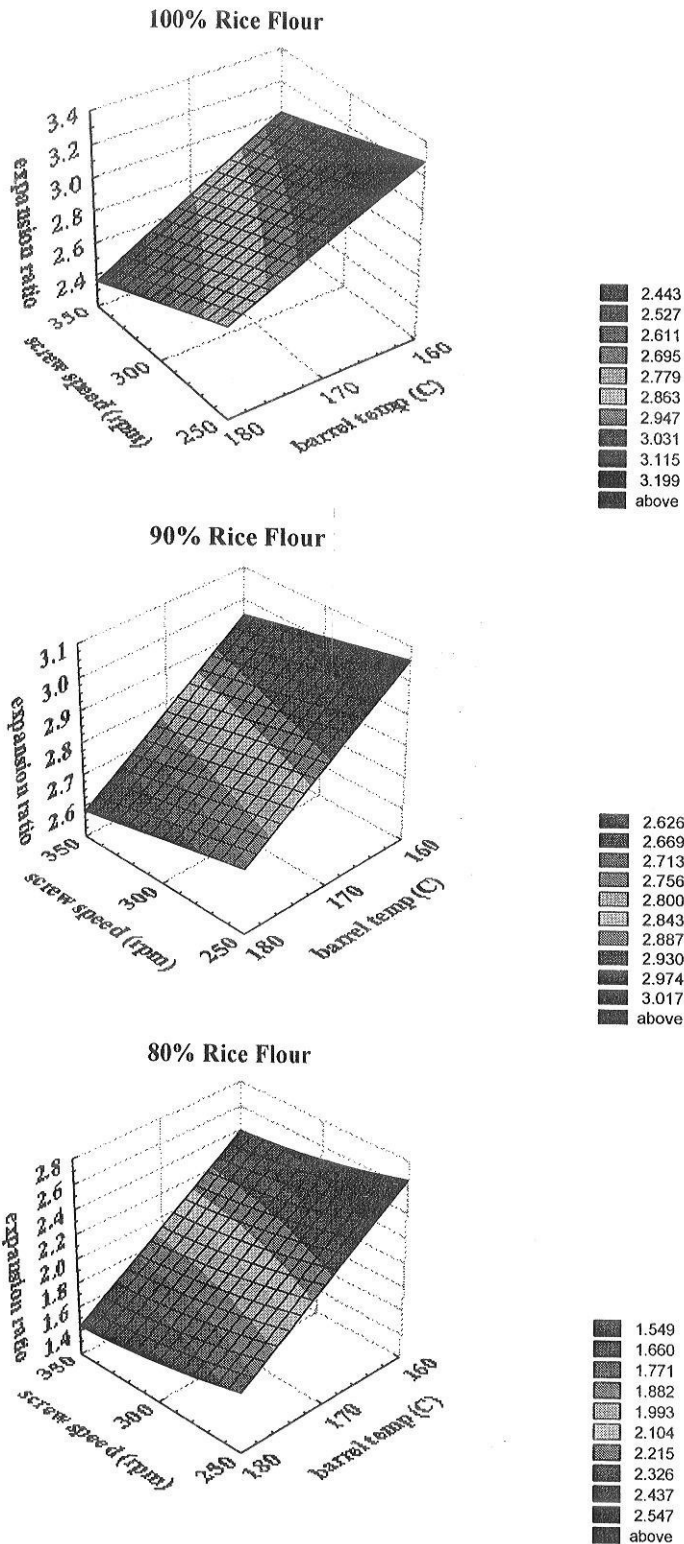
sample	feed moisture content (%)	screw speed (rpm)	barrel temperature ($^{\circ}\text{C}$)	degree of gelatinization ⁽¹⁾ (%)
1	20	250	170	97.17 a
2	20	350	170	97.73 a
3	24	250	170	95.63 a
4	24	350	170	97.23 a
5	20	300	160	92.71 bc
6	20	300	180	96.96 a
7	24	300	160	91.10 c
8	24	300	180	98.03 a
9	22	250	160	95.79 a
10	22	250	180	97.16 a
11	22	350	160	95.03 ab
12	22	350	180	96.11 a
13	22	300	170	95.44 a
14	22	300	170	96.19 a
15	22	300	170	96.18 a

(1) ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

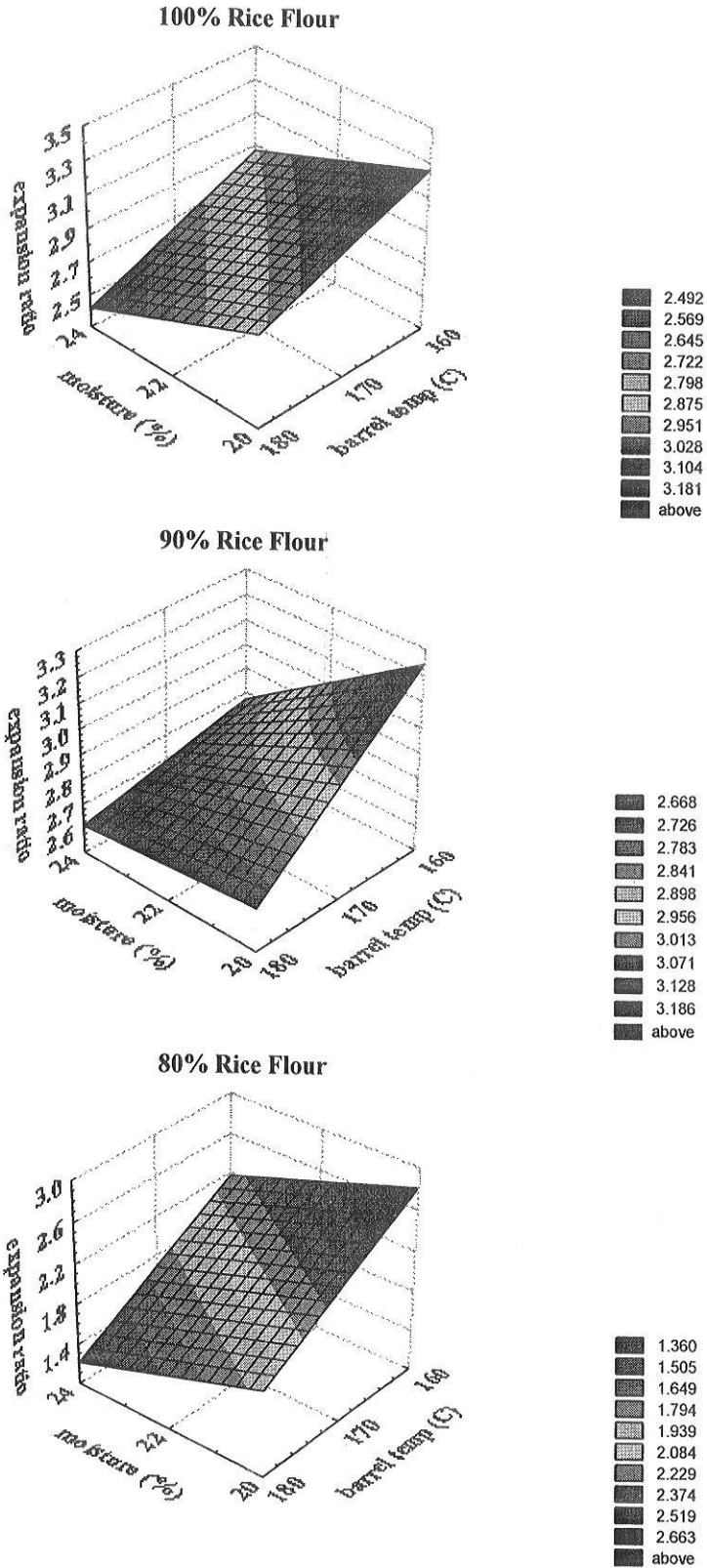
3.5 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต

การวิจัยครั้งนี้เลือกใช้แป้งข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จัดเป็นข้าวประเภทข้าวอะมิโลสต่ำซึ่ง มีปริมาณอะมิโลส 16.95 เปอร์เซ็นต์ จากผลการวิจัยของ Feldberg (1969) พบว่าวัตถุดิบที่มี

ปริมาณอะมิโลสมาจะทำให้การพองตัวและปริมาตรจำเพาะลดลง ในขณะที่อะมิโลเพคตินจะช่วยในการพองตัวและมีน้ำหนักเบา จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบตัวแปรการแปรรูปที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการขยายตัวดังตารางที่ 5-7 ในภาคผนวก ก. สามารถนำไปสร้างกราฟแสดงผลตอบสนองได้ดังภาพที่ 8 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมาบรรล่วมกับการเพิ่มความเร็วรอบสกรูส่งผลให้อัตราการขยายตัวลดลง เนื่องจากเมื่อลักษณะความยืดหยุ่นของโค (elasticity) มีค่าต่ำ และความหนืดของโคลดลง ทำให้เอกซ์ทรูเดทหลังจากออกจากเครื่องมีแนวโน้มของการขยายตัวต่ำลง ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chinnaswamy and Hanna (1988) ที่พบว่าแป้งข้าวเจ้ามีการขยายตัวต่ำลงเมื่ออุณหภูมิของบารเรลสูงกว่า 158 องศาเซลเซียส ผลจากสภาวะการแปรรูปต่ออัตราการขยายตัวในภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความชื้นของวัตถุดิบลดลงในขณะที่อุณหภูมิของบารเรลต่ำส่งผลให้อัตราการขยายตัวสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะความหนืดของโคที่สูงขึ้นภายในบารเรล ดังจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์กับลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดทดดังตารางที่ 6 พบว่าอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดททั้งจากแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ดำเนินการแปรรูปด้วยสภาวะที่ทำให้ค่าตัวแปรตามดังกล่าวสูง จะส่งผลให้อัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดทมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับ Grenus et al. (1993) ที่พบว่าเมื่อความเร็วรอบสกรูต่ำจะทำให้ค่าแรงทอร์คและความดันที่หัวแบบเพิ่มขึ้น และเมื่อมีความแตกต่างระหว่างความดันที่หัวแบบกับความดันบรรยากาศมากขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดขณะเย็นกับอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดทพบว่ามีความสัมพันธ์ในทางตรงข้าม ($p < 0.01$) ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้ขัดแย้งกับการทดลองของ Whalen et al. (1997) ที่พบว่าเอกซ์ทรูเดทแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวสาลีที่มีอัตราการขยายตัวสูงจะมีค่าความหนืดขณะเย็นสูงด้วย



ภาพที่ 8 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และ อุณหภูมิบาร์เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำ ข้าวคิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 9 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราขยายตัวที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และ อุณหภูมิบาร์ลินกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6 ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างตัวแปรตามการแปรรูปกับลักษณะทางกายภาพของ เอกซ์ทรีเดต แป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

system parameters	product characteristics		
	expansion ratio	piece density	compression force
torque (%)	0.704**	-0.564**	-0.775**
SME (kJ/kg)	0.504**	-0.652**	-0.633**
die pressure (psi)	0.661**	-0.058 ^{ns}	-0.643**
product temperature (°C)	-0.171 ^{ns}	0.314 ^{ns}	0.124 ^{ns}

** p<0.01

^{ns} ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

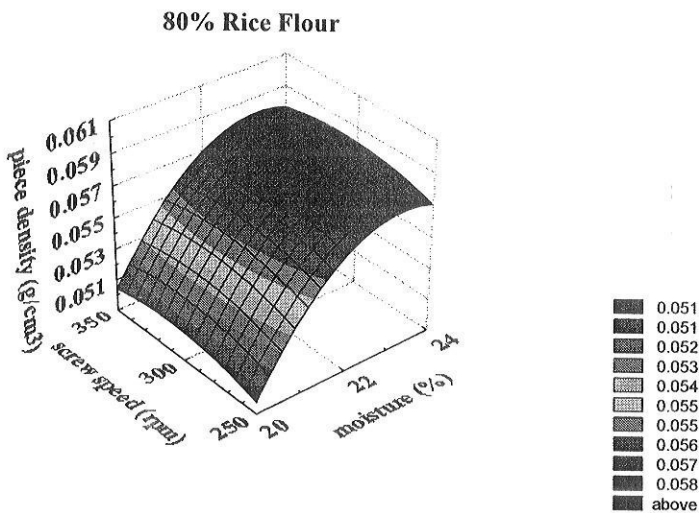
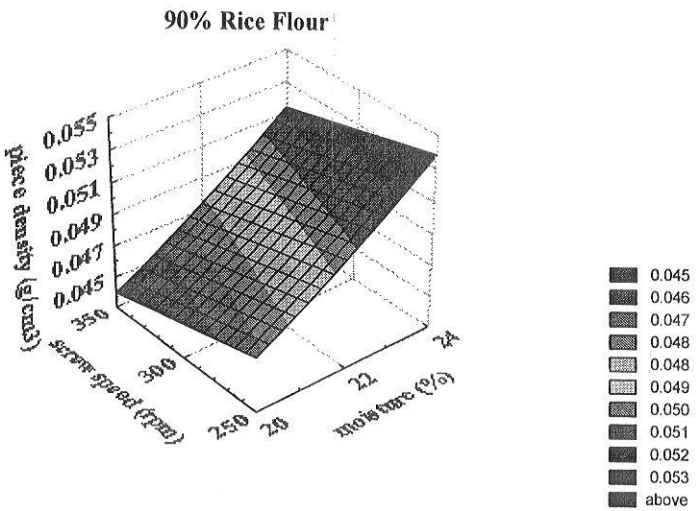
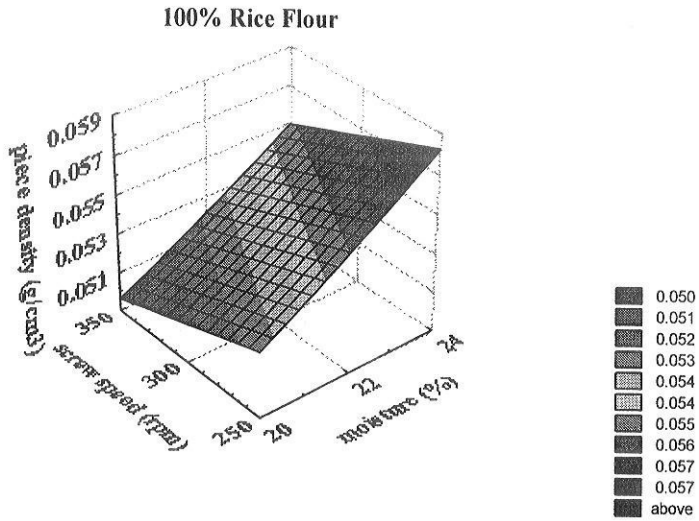
ผลของสภาวะการแปรรูปที่มีต่อความหนาแน่นของเอกซ์ทรีเดตแสดงได้ดังภาพที่ 10 พบว่าเมื่อดำเนินการแปรรูปด้วยสภาวะที่ความชื้นต่ำและความเร็วรอบสกรูสูงๆ ส่งผลให้เอกซ์ทรีเดตที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ จากภาพจะเห็นได้ว่าความชื้นของวัตถุดิบส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นชัดเจนกว่าผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบสกรู ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Tomas et al. (1994) เนื่องจากปริมาณน้ำที่ต่ำลงจะไปทำให้ค่าความหนืดของโดภายในบารเรลเพิ่มขึ้น ทำให้เอกซ์ทรีเดตที่ได้มีน้ำหนักเบา และมีโพรงอากาศขนาดใหญ่ทำให้ค่าความหนาแน่นต่ำ จากภาพที่ 11 แสดงถึงสภาวะการแปรรูปที่ความชื้นวัตถุดิบต่ำและอุณหภูมิบารเรลสูงๆ ผลผลิตให้เอกซ์ทรีเดตที่มีความหนาแน่นต่ำ อย่างไรก็ตามสภาวะแปรรูปดังกล่าวนี้ไม่ได้ผลิตให้เอกซ์ทรีเดตที่มีอัตราการขยายตัวสูงสุด ดังที่ไม่พบความสัมพันธ์กันในเชิงสถิติระหว่างอัตราการขยายตัวกับความหนาแน่น เนื่องจากค่าอัตราการขยายตัวที่ทำกรวัดในการศึกษาครั้งนี้เป็นการวัดอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรีเดตในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเอกซ์ทรีเดตเอง แต่ค่าความหนาแน่นเป็นการวัดอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรีเดตทั้งในทิศทางตั้งฉากและทิศทางเดียวกันกับการไหล ผลการศึกษาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามการแปรรูปในตารางที่ 6 พบว่าความหนาแน่นมีความสัมพันธ์ในเชิงตรงข้ามกับแรงทอร์ค (p<0.01)

อย่างไรก็ตามเอกซ์ทรีเดตที่มีอัตราการขยายตัวสูงไม่ได้แสดงถึงลักษณะที่ดีของผลิตภัณฑ์เสมอไป เพราะเอกซ์ทรีเดตที่มีอัตราการขยายตัวต่ำอันเนื่องจากการแปรรูปด้วยอุณหภูมิบารเรลสูงและมีระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันสูง อาจเป็นเอกซ์ทรีเดตที่ผู้บริโภคให้การยอมรับสูงกว่าเพราะมีความหนาแน่นต่ำกว่า การแปรรูปด้วยอุณหภูมิบารเรลสูงทำให้ความหนาแน่นของเอกซ์ทรีเดตต่ำลงได้เนื่องจาก เอกซ์ทรีเดตที่แม้ว่าจะมีการขยายตัวในแนวรัศมีต่ำลง แต่มีการขยายตัวในทางยาวมากขึ้น จึงมีผลต่อการเพิ่มปริมาตรของเอกซ์ทรีเดต นอกจากนี้เอกซ์ทรีเดตที่ได้ยังมีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนที่สม่ำเสมอ และมีผนังเซลล์บางทำให้ค่าความหนาแน่นต่ำลง จากลักษณะ

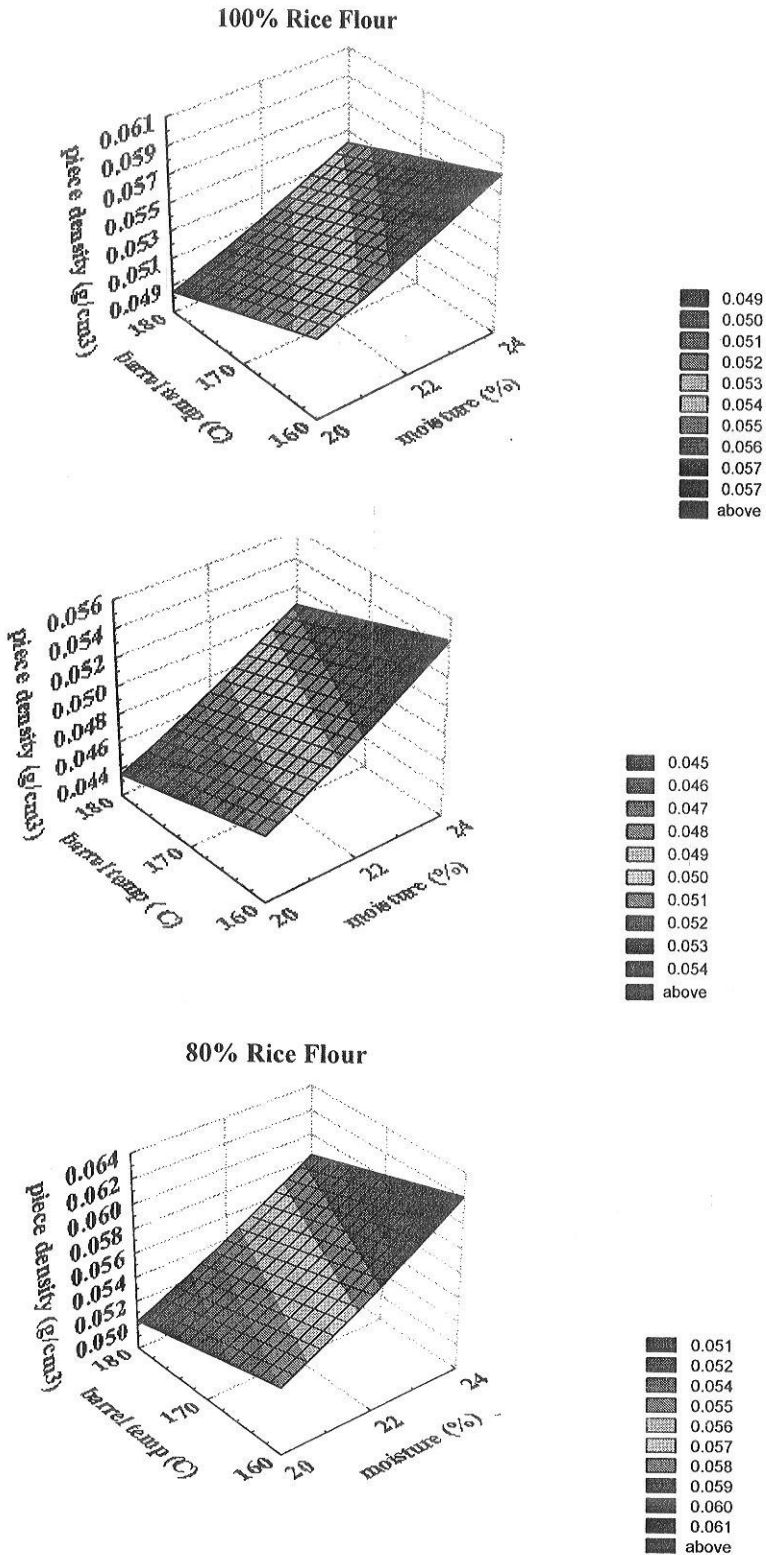
ของเอกซ์ทราเดคตังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงเป็นเหตุผลของการที่ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวกับความหนาแน่นทางสถิติ

สำหรับผลของสภาวะการแปรรูปที่มีต่อค่าแรงกดแตก พบว่าแรงกดแตกได้รับอิทธิพลจากผลรวมของตัวแปรการแปรรูปเดียวกับตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการขยายตัวดังตารางที่ 5-7 ในภาคผนวก ก. อีกทั้งพบว่าค่าแรงกดแตกมีความสัมพันธ์เชิงตรงกันข้ามกับแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 6 จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อเอกซ์ทราเดคตังมีอัตราการขยายตัวสูงหรือให้ลักษณะที่มีโพรงอากาศภายในโครงสร้างมากขึ้น ทำให้ค่าแรงที่ต้องการใช้กดให้เอกซ์ทราเดคตังมีค่าต่ำ จากกราฟแสดงผลตอบสนองแบบสามมิติในภาพที่ 12 พบว่าการเพิ่มปริมาณความชื้นวัสดุคืบร่วมกับการให้อุณหภูมิบารเรลสูงๆ มีแนวโน้มทำให้เอกซ์ทราเดคตังมีความแข็งแรงมากขึ้นดังแสดงได้จากความต้องการแรงที่ใช้ในการกดแตกมากขึ้น จากภาพที่ 13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิบารเรลสูงๆ ส่งผลให้ค่าแรงกดที่ทำให้เอกซ์ทราเดคตังเกิดการแตกหักมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Grenus et al. (1993)

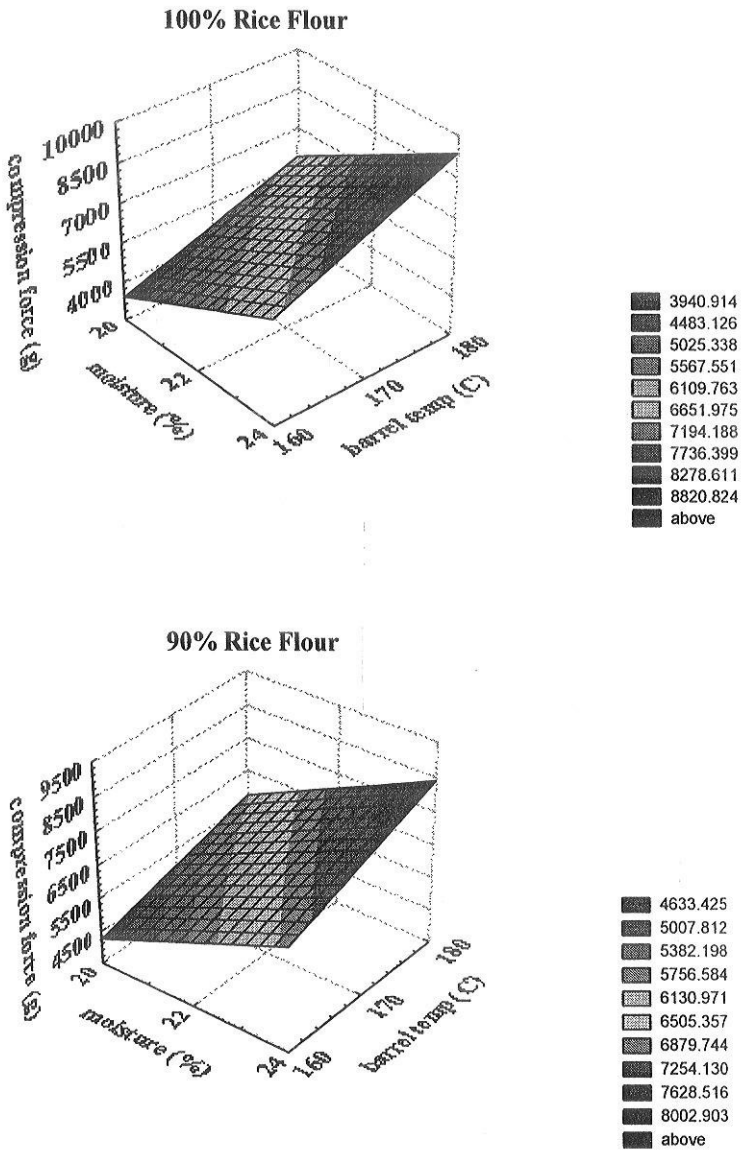
จากการที่อุณหภูมิของบารเรลสูงขึ้นแล้วทำให้อัตราการขยายตัวต่ำลง แต่ความหนาแน่นของเอกซ์ทราเดคตังลดลงนั้นเป็นผลมาจาก เอกซ์ทราเดคตังมีลักษณะโพรงอากาศที่เล็กและสม่ำเสมอมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเกิดความแน่นของชิ้นเอกซ์ทราเดคตังในแนวรัศมี ผนังเซลล์อยู่กันอย่างใกล้ชิดขึ้นจึงทำให้แรงที่ใช้ในการกดแตกมากขึ้นด้วย การศึกษานี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Lue et al. (1991) ที่พบเอกซ์ทราเดคตังแข็งขาว โปดที่มีอัตราการขยายตัวในแนวรัศมีลดลงมีความสัมพันธ์กับขนาดของโพรงอากาศที่เล็กลง จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบความสัมพันธ์ตรงข้ามระหว่างอัตราการขยายตัวกับแรงกดแตก ($p < 0.01$) แต่ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับแรงกดแตก



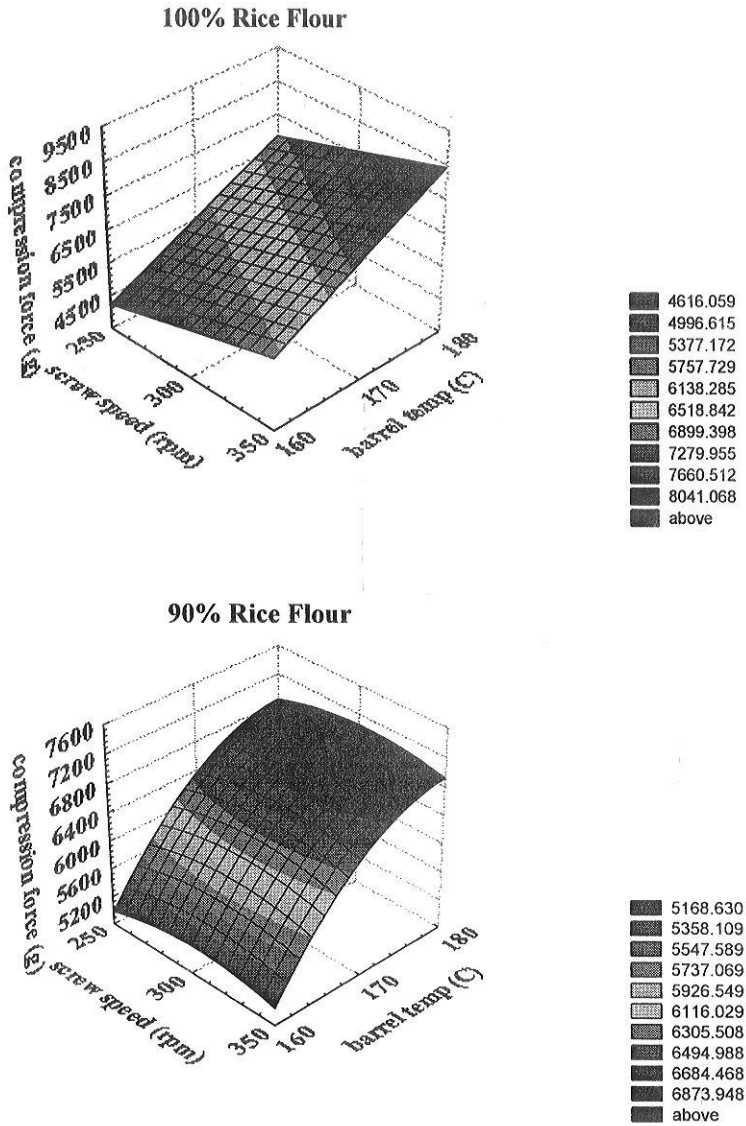
ภาพที่ 10 พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และ ความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ்தรุหินแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำ ข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 11 พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และ อุณหภูมิบาร์เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำ ข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 12 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และอุณหภูมิ
 บาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ
 10 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 13 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิ
 บารเรลในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ
 10 เปอร์เซ็นต์

3.6 ผลของการเติมรำข้าวต่อต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคตข้าว

จากตารางที่ 7 พบว่าการเติมรำข้าวในระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ อัตราการขยายตัว และแรงกดแตกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่พบการเปลี่ยนแปลงในทุกๆ ลักษณะที่ตรวจวัดเมื่อมีการเติมรำข้าวที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ ($p<0.05$) โดยมีการลดลงของแรงทอร์คและพลังงานกลจำเพาะอย่างชัดเจนที่การเติมรำข้าว 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเกิดจากผลของปริมาณไขมันที่มีอยู่ในวัตถุดิบแป้งข้าวผสมรำข้าว 20 เปอร์เซ็นต์ ดังผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบในตารางที่ 8 โดยไขมันทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้ความหนืดของโคลลดลง และไขมันอาจมีผลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน จึงทำให้ความต้องการพลังงานกลลดลง นอกจากนี้ปริมาณสตาร์ชที่ลดลงมีผลไปลดความหนืดของโคภายในบารเลตจึงส่งผลให้ค่าแรงที่ต้องการในการขับเคลื่อนสกรูของมอเตอร์ลดลง ในส่วนของปริมาณโปรตีนที่สูงขึ้นในแป้งข้าวผสมรำข้าว 20 เปอร์เซ็นต์ อนุภาคของโปรตีนอาจกระจายอยู่ในส่วนที่ต่อเนื่องของสตาร์ช ส่งผลไปรบกวนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชภายในบารเลต (Yuryev et al., 1995) ทำให้โคที่เกิดลักษณะคล้ายพลาสติกมีความหนืดลดลง แรงทอร์คจึงลดลงด้วย ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Mohamed (1990) ที่พบการลดลงของค่าแรงทอร์คเมื่อเติมโปรตีนถั่วเหลืองลงในแป้งข้าวโพด 0-25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าความดันที่หัวแบบพบว่ามีการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเติมรำข้าว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของปริมาณไขมันส่งผลไปหล่อลื่นบารเลตทำให้โคเกิดการลื่นไหลและเคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้น ทำให้การสะสมของโคบริเวณทางออกของเครื่องต่ำลง ดังนั้นค่าความดันที่หัวแบบจึงลดลงมากเมื่อเริ่มมีการเติมรำข้าว

ผลการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคตพบว่า อัตราการขยายตัวของลดลง และแรงกดแตกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อมีการเติมรำข้าวที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการลดลงของอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคตเมื่อมีการเติมใยอาหารจากข้าวโอ๊ตและข้าวสาลีสูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ (Hsieh et al., 1989) ซึ่งอาจเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉพาะในส่วนของปริมาณโปรตีนและไขมันซึ่งมีอยู่ในรำข้าว ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวต่ำลง เพราะโปรตีนมีความสามารถในการพองตัวได้ไม่เหมือนกับสตาร์ช ดังมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Bhattacharya et al. (1997) ที่มีการเติมถั่ว (chick pea) ซึ่งมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงในการผลิตขนมขบเคี้ยวจากแป้งข้าวเจ้า ส่งผลให้การขยายตัวลดลงและแรงกดแตกสูงขึ้น และจากงานวิจัยในครั้งนี้นี้พบว่าการเติมรำข้าวที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูงที่สุด อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าเอกซ์ทราคตที่เติมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นต่ำ

ที่สุด ซึ่งผลของค่าความหนาแน่นนี้ไม่สอดคล้องกับอัตราการขยายตัว แต่สามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นนี้ได้จากการที่อัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ กับเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์ มีค่าใกล้เคียงกันแต่ค่าความหนาแน่นแตกต่างกัน เนื่องจากการเติมรำข้าวอาจทำให้มีการขยายตัวในทางยาวมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lue et al. (1991) ที่มีการขยายตัวทางยาวของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวโพดมากขึ้นเมื่อมีการเติมใยอาหารจากหัวบีท จึงมีผลให้ค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าได้

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปกับลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

rice bran level	torque (%)	SME (kJ/kg)	die pressure (psi)	Expansion ratio	compression force (g)	Density (g/cm ³)
0%	75.50a ⁽¹⁾	316.31a	239.67a	2.85a	6283.70b	0.053b
10%	77.17a	322.52a	186.33b	2.78a	6242.37b	0.049c
20%	66.30b	277.39b	176.33b	2.03b	10042.77a	0.056a

(1) ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 8 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวและรำข้าว

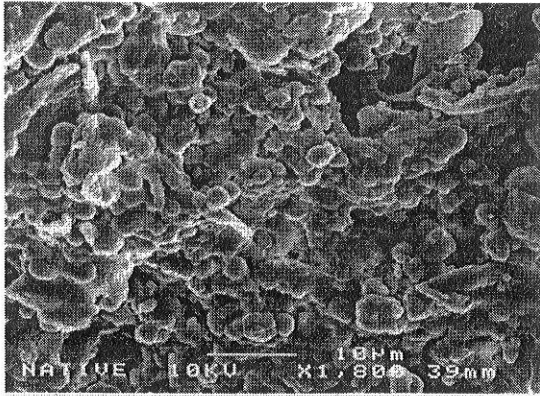
Chemical compositions	rice flour (%)	rice bran (%)
protein	6.39	15.87
fat	0.31	19.86
ash	0.30	9.21
starch	88.75	12.67
amylose	16.95	-

3.7 ผลการใช้ต่างต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรำข้าว

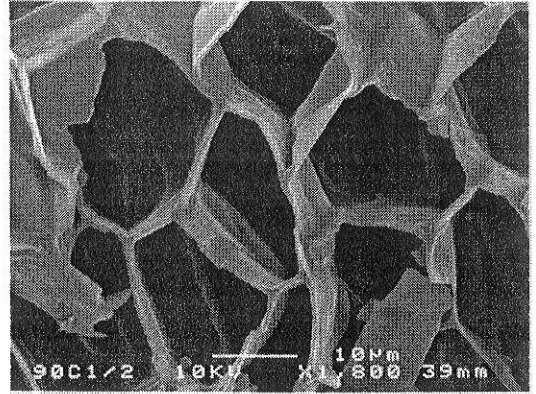
ผลการศึกษาโครงสร้างภายในของรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ต่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แสดงดังภาพที่ 14 พบว่าโครงสร้างของรำข้าวดิบในภาพที่ 14 (a) มีลักษณะแน่นและตัน โดยมีสารประกอบต่างๆ เคลือบที่ผิวหน้าของชิ้นรำ ในขณะที่โครงสร้างของรำข้าวที่ใช้ต่างในภาพที่ 14 (b-f) เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าของโครงสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวดิบ โดยรำข้าวที่ใช้ต่างมีลักษณะโครงสร้างที่เปิดตัวมาก เนื่องจากสารประกอบต่างๆ ที่เคลือบอยู่ถูกกำจัดออกไป จึงทำให้เป็นรูพรุนสูงขึ้น การใช้ต่างกับรำข้าวเป็นเวลานานขึ้นตั้งแต่ 1-16 ชั่วโมง ร่วมกับการใช้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส ทำให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างรำข้าวเกิดการแตกหักมากขึ้น ส่วนรำข้าวที่

ผ่านการใช้ต่างด้วยอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมงในภาพที่ 14 (f) นั้นพบว่าลักษณะโครงสร้างของใยอาหารเปลี่ยนแปลงไปจากรำข้าวดิบบางส่วน โดยยังคงมีลักษณะผิวหนังที่ปิดตัวคล้ายกับรำข้าวดิบ มีผิวหนังเรียบสม่ำเสมอ และเน้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวที่ใช้ต่างร่วมกับการใช้ความร้อน จากการศึกษาผลของการให้ความร้อน และระยะเวลาของกระบวนการใช้ต่างกับรำข้าวที่มีต่อความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าว (water-holding capacity) แสดงดังตารางที่ 9 พบว่าค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวที่ใช้ต่างสูงขึ้นในทุกสภาวะการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวดิบ ($p < 0.05$) สภาวะการใช้ต่างร่วมกับการใช้อุณหภูมิสูง 90 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้ต่างที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ระยะเวลาในการใช้ต่างที่ 90 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ 1-16 ชั่วโมง ส่งผลต่อค่าความสามารถในการอุ้มน้ำค่อนข้างต่ำ ($p > 0.05$) ผลค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวมีความสอดคล้องกับระดับความเป็นรูพรุนของโครงสร้างรำข้าว โดยรำข้าวดิบที่มีลักษณะของความแน่นและไม่มีการเปิดในภาพที่ 14 (a) มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ เมื่อโครงสร้างมีการเปิดตัวและเป็นรูพรุนสูงขึ้นหลังจากการใช้ต่างในภาพที่ 14 (b-e) ทำให้น้ำผ่านเข้าไปในโครงสร้างของใยอาหารได้ง่ายและสะดวก ดังนั้นรำข้าวที่ใช้ต่างจึงมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น Ning et al. (1991) กล่าวว่าค่าต่างมีผลทำให้โครงสร้างเซลลูโลสของใยอาหารเกิดการบวม และมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น อีกทั้งองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส เช่น แมนแนน สามารถละลายตัวออกจากโครงสร้างโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ ผลงานวิจัยของ Larrea et al. (1997) พบว่าค่าต่างมีความสามารถที่จะละลายเอาส่วนของเฮมิเซลลูโลสออกจากแถบได้ โดยพบว่าแถบมีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสลดลงหลังจากการใช้ต่าง ส่วนลิกนินและซิลิกาซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ก็ลดลงด้วย นอกจากนี้ผลจากศึกษาความเป็นผลึกด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray crystallography) แสดงให้เห็นถึงลักษณะความเป็นระเบียบของบริเวณผลึก (crystallinity) ของเซลลูโลสลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับใยอาหารก่อนใช้ต่าง ดังนั้นเมื่อร่างแหที่มีความเป็นระเบียบสูงของเซลลูโลสถูกทำลาย จึงทำให้ความเป็นอสัณฐานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กลูโคสบริเวณนี้อุ้มน้ำได้มากขึ้น ใยอาหารที่ผ่านการใช้ต่างจึงมีการดูดน้ำและเกิดการบวมของโครงสร้างมากขึ้น

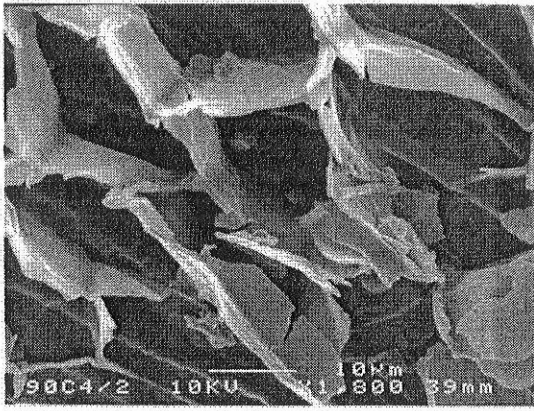
ดังนั้นจากผลการทดลองดังกล่าวจึงได้เลือกสภาวะการใช้ต่างกับรำข้าวด้วยการใช้อุณหภูมิสูง 90 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากสภาวะดังกล่าวใยอาหารที่ใช้ต่างมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่ารำข้าวก่อนการใช้ต่าง และที่สภาวะการใช้ต่างที่อุณหภูมิห้องอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ระยะเวลาในการใช้ต่างที่อุณหภูมิสูงไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาของกระบวนการใช้ต่างที่น้อยที่สุด



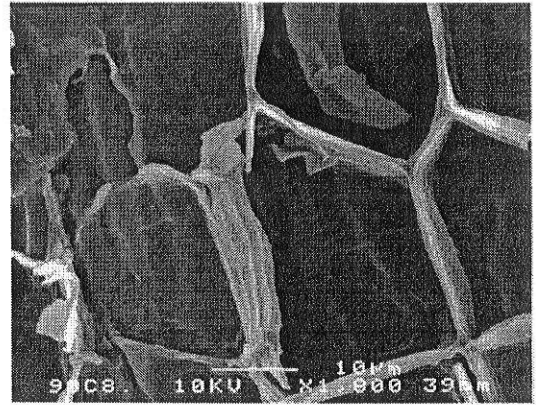
(a)



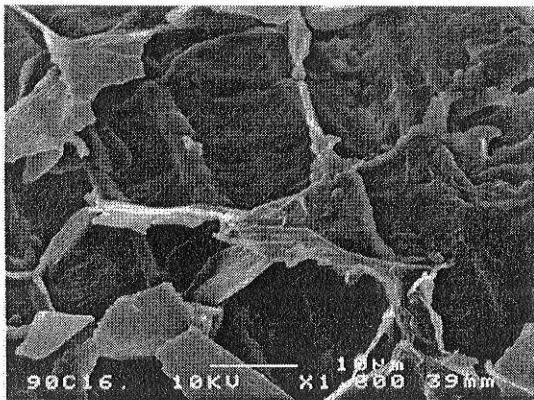
(b)



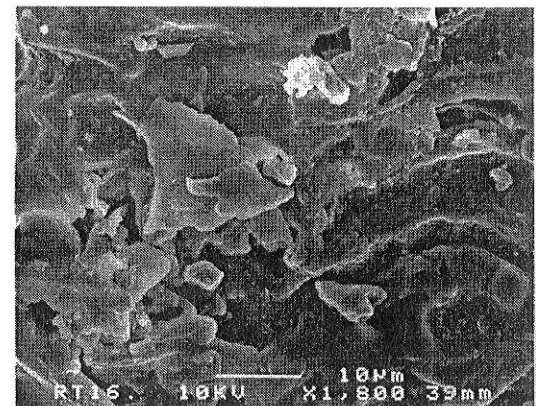
(c)



(d)



(e)



(f)

ภาพที่ 14 ภาพโครงสร้างรำข้าวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 1800 เท่า: (a) รำข้าวดิบ, (b) รำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง, (c) รำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง, (d) รำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 8 ชั่วโมง, (e) รำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง และ (f) ข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 16 ชั่วโมง

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวคิบและรำข้าวที่ผ่านการใช้ต่างที่สภาวะการให้ความร้อนอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 10 พบว่ารำข้าวหลังผ่านการใช้ต่างมีองค์ประกอบทางเคมีทั้งปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และสตาร์ชลดลง ($p < 0.01$) Larrea et al. (1997) กล่าวว่าองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าวมีปริมาณลดลงเนื่องจากกระบวนการล้างโดยโปรตีนและสตาร์ชบางส่วนถูกกำจัดออกไปในรูปของส่วนที่ละลายน้ำได้ ส่วนของไขมันที่ทำปฏิกิริยากับด่าง (saponified fatty acid) จะถูกกำจัดออกในขั้นตอนของการล้าง ส่วนปริมาณใยอาหารที่พบว่ามีปริมาณสูงขึ้นหลังการใช้ต่างมีผลมาจากการลดลงขององค์ประกอบอื่นๆ ในรำข้าว สัดส่วนของใยอาหารที่ละลายได้ของรำข้าวคิบคิดเป็น 8.18 เปอร์เซ็นต์ ภายหลังการใช้ต่างพบว่าใยอาหารที่ละลายได้มีปริมาณลดลงโดยคิดเป็นปริมาณ 7.42 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 9 ผลของการใช้อุณหภูมิและระยะเวลาต่อค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าว

Treatment	water-holding capacity (ml water /g sample)
native rice bran	2.250 c ⁽¹⁾
treated at 90°C, for 1 hr.	7.355 a
treated at 90°C, for 4 hrs	7.675 a
treated at 90°C, for 8 hrs.	7.455 a
treated at 90°C, for 16 hrs	7.780 a
treated at room temperature, for 16 hrs.	5.315 b

(1) ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 10 องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวคิบและรำข้าวที่ใช้ต่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

components	rice bran	
	raw	alkaline-treated
protein (%)	16.00 a ⁽¹⁾	11.65 b
fat (%)	22.82 a	11.98 b
ash (%)	9.20 a	2.80 b
dietary fiber (%)	27.99 b	65.61 a
- soluble	2.29	4.87
- insoluble	25.70	60.74
starch (%)	12.67 a	7.83 b

(2) ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$)

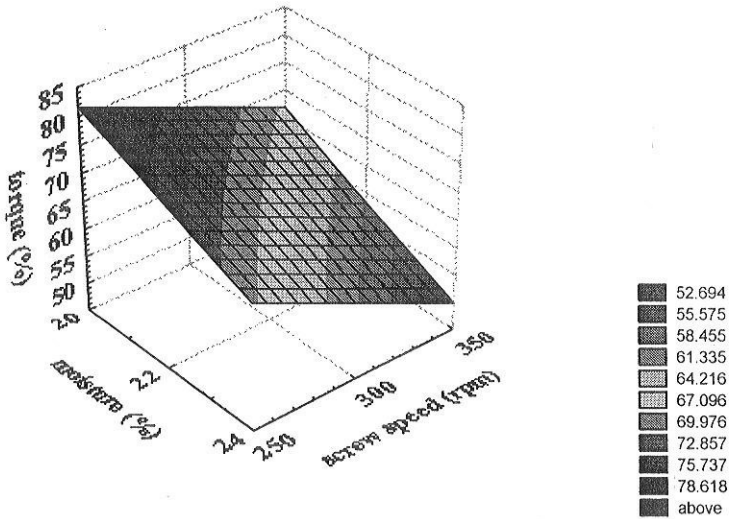
3.8 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

เมื่อนำค่า coefficients จากตารางที่ 3 ในภาคผนวก ค. มาสร้างกราฟแสดงผลตอบสนองด้านแรงทอร์คแบบสามมิติซึ่งแสดงดังภาพที่ 15 พบว่าความชื้นของวัตถุดิบผสมระหว่างแป้งข้าวกับรำข้าวดิบ และความเร็วรอบสกรูส่งผลสำคัญต่อแรงทอร์ค สภาวะการแปรรูปที่ความชื้นวัตถุดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที ทำให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ทำงานด้วยกำลังขับเคลื่อนสูงสุดเช่นเดียวกับวัตถุดิบผสมระหว่างแป้งข้าวกับรำข้าวที่ใช้ต่างแสดงดังภาพที่ 16 (a) และในภาพที่ 16 (b) พบว่าอุณหภูมิของบารเรลเข้ามามีบทบาทต่อแรงทอร์ค โดยเมื่ออุณหภูมิบารเรลต่ำลงทำให้แรงทอร์คมีค่าสูงสุด จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแม้รำข้าวจะมีสมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างเปลี่ยนไป ก็ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของผลตอบสนองด้านแรงทอร์คอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการแปรรูป Harper (1981) และ Garber et al. (1997) รายงานว่าความหนืดของโคที่อยู่ในร่องเกลียวสกรูบริเวณหัวแบบมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแรงทอร์ค จากผลการทดลองในครั้งนี้พบว่าแรงทอร์คเฉลี่ยของวัตถุดิบผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีค่าสูงกว่าวัตถุดิบผสมรำข้าวดิบเพียงเล็กน้อย โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงได้ดังตารางที่ 11 ผลดังกล่าวนี้อาจเนื่องมาจากการใช้ต่างกับรำข้าวทำให้ปริมาณไขมันลดลง ($p<0.01$) ทำให้โคของแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีความหนืดสูงขึ้น และผลการเป็นสารหล่อลื่นของไขมันมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่าแรงทอร์คสูงขึ้น อีกเหตุผลหนึ่งน่าจะมาจากการที่แป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่าแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ ดังนั้นเมื่อรำข้าวที่ใช้ต่างดูดน้ำเข้าไปในโครงสร้างได้มากกว่า จึงเหลือน้ำอิสระที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับสตาร์ชน้อยกว่า จึงทำให้ความหนืดของโคมีค่าสูง ดังนั้นจึงทำให้การเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างต้องการแรงที่ใช้ขับเคลื่อนมากกว่า อย่างไรก็ตามพบว่าแรงทอร์คของการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีค่าต่ำกว่าการเอกซ์ทรูดแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ ($p<0.05$) โดยมีสาเหตุมาจากการที่แป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ มีสัดส่วนของสตาร์ชสูงกว่าวัตถุดิบที่มีปริมาณแป้งข้าว 80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นโคที่เกิดขึ้นภายในบารเรลระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันจึงมีความหนืดสูงกว่าด้วย

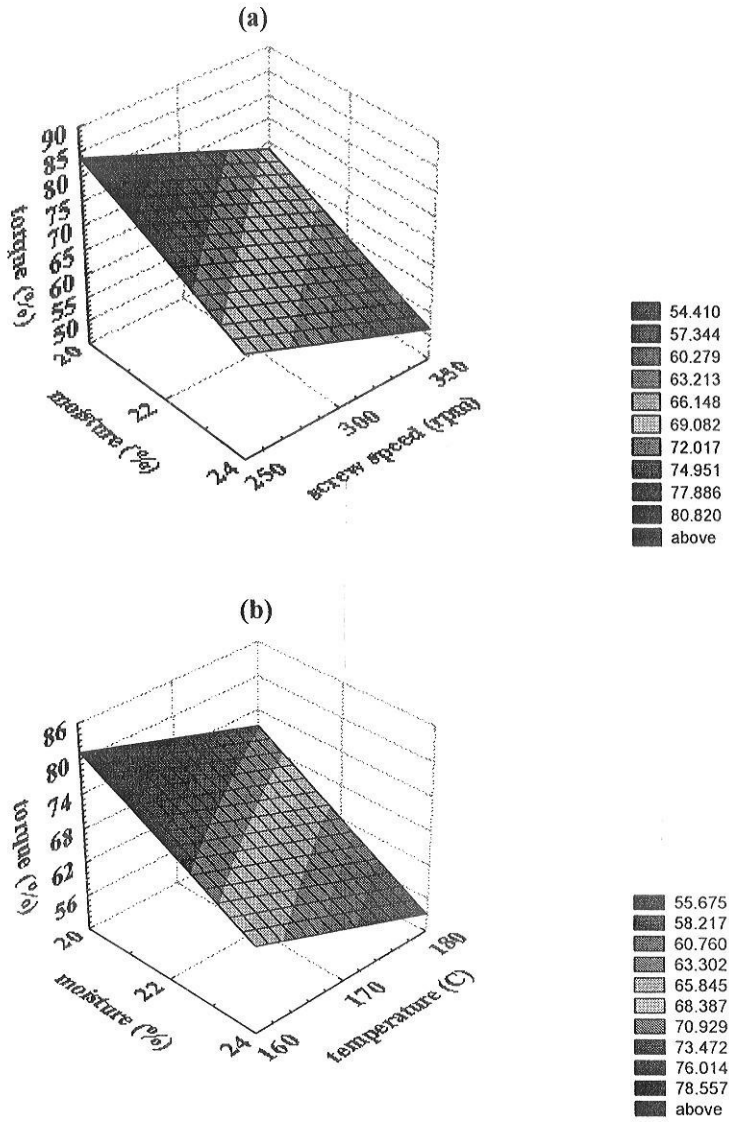
ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปและลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวคับกับแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์

parameters and characteristics	rice bran added	
	20% native bran	20% alkaline-treated bran
torque (%)	66.30 a ⁽¹⁾	67.70 a
specific energy (kJ/kg)	277.08 a	287.72 a
die pressure (psi)	174.33 b	209.67 a
expansion ratio	2.03 b	2.47 a
piece density (g/cm ³)	0.0564 a	0.0558 a
compression force (g)	10043.2 a	8750.0 a

(1) ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวอนหมายถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$).

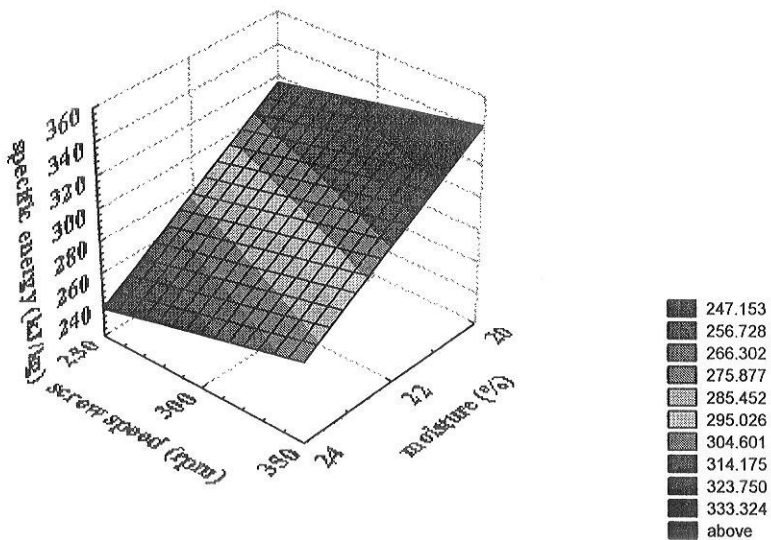


ภาพที่ 15 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์คที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวคับ 20 เปอร์เซ็นต์

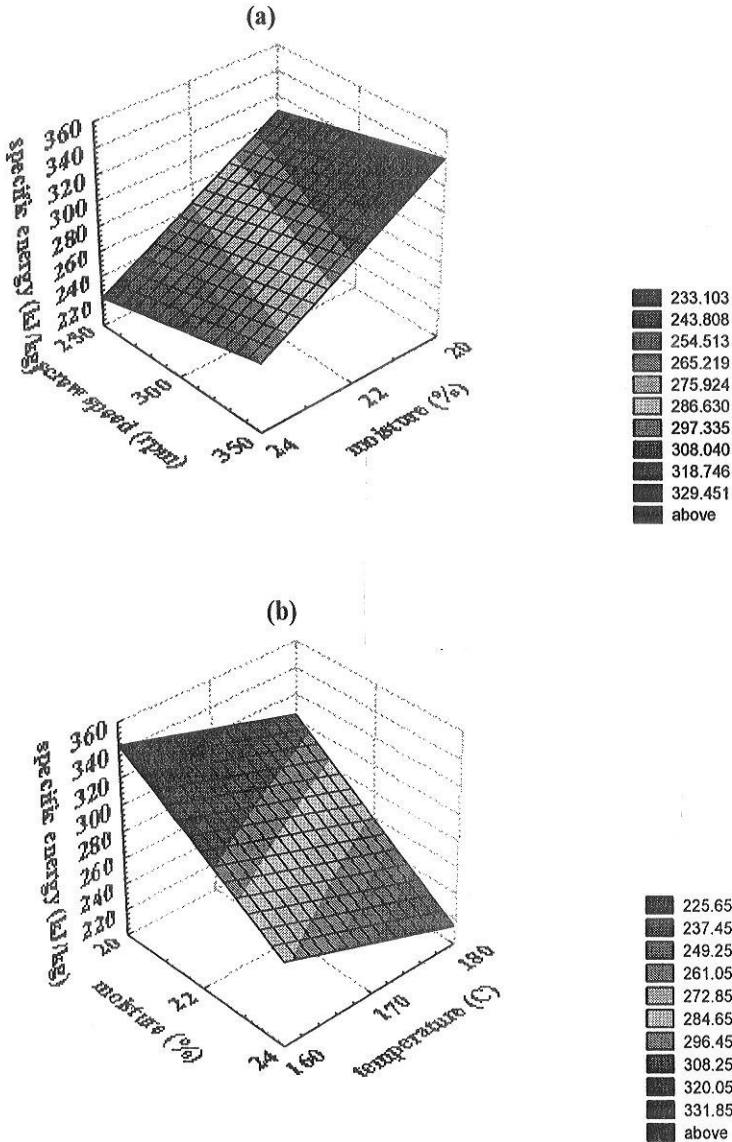


ภาพที่ 16 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์กในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิบารเรล

เมื่อศึกษาผลจากสภาวะการแปรรูปต่อพลังงานกลจำเพาะ พบว่าตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและความเร็วรอบสกรูส่งผลสำคัญต่อค่าพลังงานกลจำเพาะสำหรับวัตถุดิบแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบดงภาพที่ 17 เมื่อวัตถุดิบมีความชื้นต่ำร่วมกับการแปรรูปด้วยความเร็วรอบสกรูสูงๆ ทำให้ค่าพลังงานกลจำเพาะสูงขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลจากการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างแสดงดังภาพที่ 18 (a) ผลจากการวิเคราะห์สมการถดถอยในตารางที่ 4 ในภาคผนวก ค. พบว่าเมื่อรำข้าวมีสมบัติเปลี่ยนไปทำให้ตัวแปรด้านอุณหภูมิบารเรลเข้ามามีบทบาทต่อพลังงานกลจำเพาะ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันต่อค่าแรงทอร์ค เมื่ออุณหภูมิบารเรลต่ำลงในขณะที่ความชื้นของวัตถุดิบต่ำๆ ส่งผลให้มีความต้องการพลังงานกลจำเพาะสูงขึ้นดังภาพที่ 18 (b) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Guha et al. (1997) จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานกลจำเพาะในตารางที่ 11 พบว่าการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างส่งผลให้พลังงานกลจำเพาะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการเติมรำข้าวคิบโดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือเมื่อรำข้าวผ่านการใช้ต่างทำให้ปริมาณไขมันและโปรตีนลดลง ทำให้มีความหนืดสูงขึ้น อีกทั้งเมื่อวัตถุดิบมีปริมาณใยอาหารสูงขึ้นทำให้พลังงานกลจำเพาะที่ต้องป้อนให้แก่วัตถุดิบมีค่าสูงขึ้นเพื่อทำให้เกิดการสุก

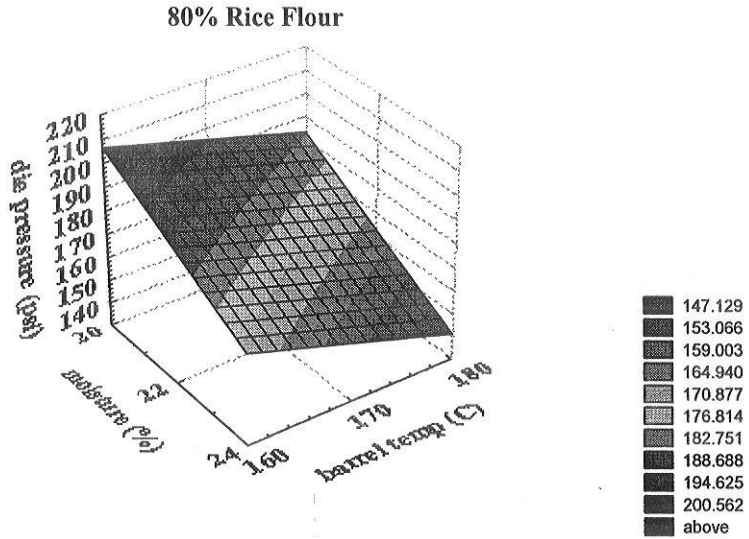


ภาพที่ 17 พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 20 เปอร์เซ็นต์

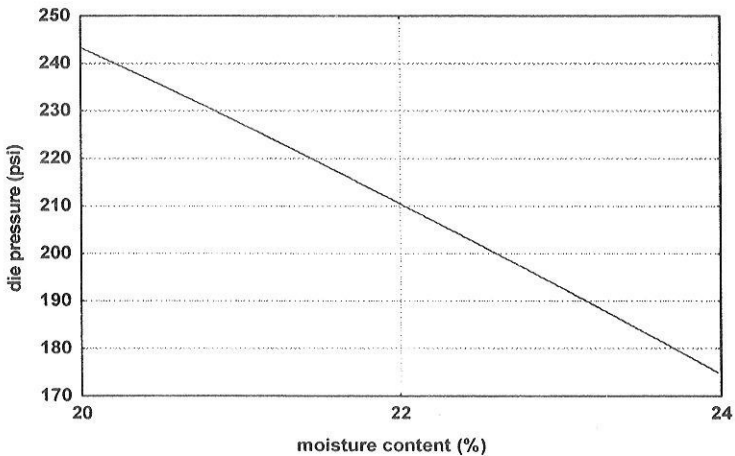


ภาพที่ 18 พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วยอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิบารเรล

ในส่วนของสภาวะการแปรรูปที่มีผลต่อความดันที่หัวแบบ พบว่าผลร่วมระหว่างความชื้น วัตถุประสงค์แป้งข้าวผสมรำข้าวคิบบกับอุณหภูมิบารเลตส่งผลต่อค่าความดันที่หัวแบบ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 3 ในภาคผนวก ค. และสามารถแสดงกราฟผลตอบสนองแบบสามมิติได้ดังภาพที่ 19 พบว่าเมื่อ ดำเนินการแปรรูปด้วยสภาวะความชื้นวัตถุประสงค์แป้งข้าวคิบบกับอุณหภูมิบารเลตต่ำ ส่งผลให้ความดันที่หัวแบบมีค่าสูงสุด แต่สำหรับการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างพบว่าตัวแปรการแปรรูปที่ส่งผล สำคัญมากต่อการเปลี่ยนแปลงความดันที่หัวแบบคือ ปริมาณความชื้นวัตถุประสงค์แป้งข้าวคิบบในเชิงกำลังสอง ($p < 0.01$) จากกราฟแสดงผลความชื้นวัตถุประสงค์แป้งข้าวคิบบที่มีต่อความดันที่หัวแบบในภาพที่ 20 แสดงให้เห็นว่า เมื่อวัตถุประสงค์แป้งข้าวคิบบมีปริมาณความชื้นสูงขึ้นทำให้ค่าความดันที่หัวแบบลดลง ซึ่งผลดังกล่าวมีความ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hsieh et al. (1993) และ Garber et al. (1997) จากการทดลองใน ครั้งนี้สังเกตได้ว่ารำข้าวหลังผ่านการใช้ต่างแล้วมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น มีผลทำให้สภาวะ การแปรรูปด้านปริมาณความชื้นและอุณหภูมิบารเลตเข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อแรงทอร์ค พลังงาน กลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบ อาจเนื่องมาจากผลการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการอุ้มน้ำไป ส่งผลที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของโดภายในบารเลต โดยอาจทำให้ความหนืดมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างจึงทำให้ตัวแปรตามการแปรรูปเหล่านี้มีค่าสูงขึ้น การเปรียบเทียบ ค่าเฉลี่ยของความดันที่หัวแบบแสดงดังตารางที่ 11 พบว่าการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างแทนรำข้าวคิบบทำให้ ความดันที่หัวแบบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ($p < 0.05$) ผลที่เกิดขึ้นอาจมาจากองค์ประกอบทางเคมี ของรำข้าวแตกต่างกัน ในส่วนของปริมาณไขมันที่ลดลงในรำข้าวที่ใช้ต่าง ($p < 0.01$) ทำให้สารหล่อ ลื่นภายในบารเลตมีปริมาณลดลง และคาดว่าช่วยลดลดความสิ้นเปลืองของโดภายในบารเลต โดจึงเกิด การสะสมบริเวณทางออกของเครื่องเป็นสาเหตุที่ทำให้ความดันที่หัวแบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลการเป็น สารหล่อลื่นของไขมันมีความสอดคล้องกับการวิจัยของ Ilo et al. (1999) นอกจากนี้ผลจากการที่ โปรตีนไปรบกวนการเกิดปฏิกิริยาของสตาร์ชในระหว่างการเกิดลักษณะที่คล้ายพลาสติกของโด (Mohamed, 1990) ทำให้การเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบบที่มีปริมาณโปรตีนสูงกว่ามีค่าความ ดันที่หัวแบบต่ำกว่าการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง



ภาพที่ 19 พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิของบารเรล



ภาพที่ 20 กราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ กับความดันที่หัวแบบ

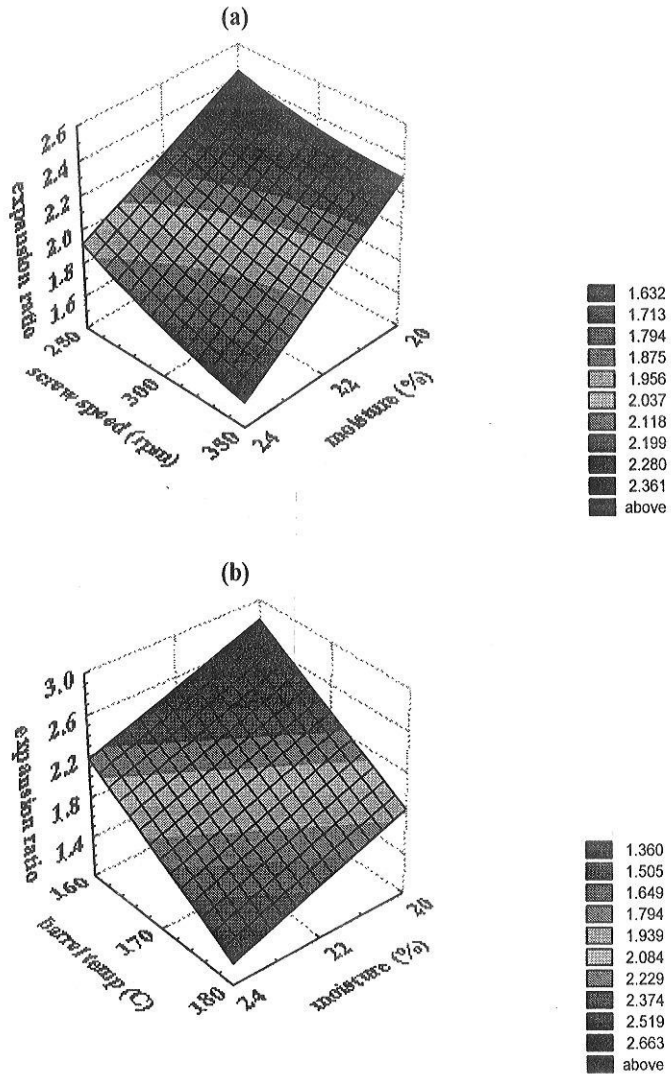
3.9 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคเตด

ผลของสภาวะการแปรรูปที่มีต่ออัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ แสดงดังตารางที่ 7 ในภาคผนวก ค. โดยสามารถแสดงกราฟผลตอบสนองแบบสามมิติได้ดังภาพที่ 21 จากภาพที่ 21 (a) พบว่าเมื่อดำเนินการแปรรูปด้วยความชื้นวัตถุดิบต่ำ 20 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วรอบสกรูต่ำ 250 รอบต่อนาที ส่งผลให้อัตราการขยายตัวมีค่าสูงสุด และในภาพที่ 21 (b) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเอกซ์ทราคเตดด้วยสภาวะอุณหภูมิ바เรลดลงกับวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำๆ ส่งผลให้เอกซ์ทราคเตดมีการขยายตัวสูงขึ้น โดยจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบสกรูส่งผลต่ออัตราการขยายตัวค่อนข้างน้อย สำหรับอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างได้รับอิทธิพลหลักจากปริมาณความชื้นทั้งในเชิงเส้นตรงและเชิงกำลังสองแสดงดังตารางที่ 8 ในภาคผนวก ค. โดยเมื่อความชื้นวัตถุดิบสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการขยายตัวลดลงดังภาพที่ 22 และจะเห็นได้ว่าทั้งความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิ바เรลมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการขยายตัวน้อยมาก แต่การเปลี่ยนแปลงหลักที่เกิดขึ้นต่ออัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดจากวัตถุดิบผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะการแปรรูปต่ออัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดระหว่างการเติมรำข้าวดิบกับการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างยังคงมีรูปแบบแนวโน้มที่คล้ายกัน

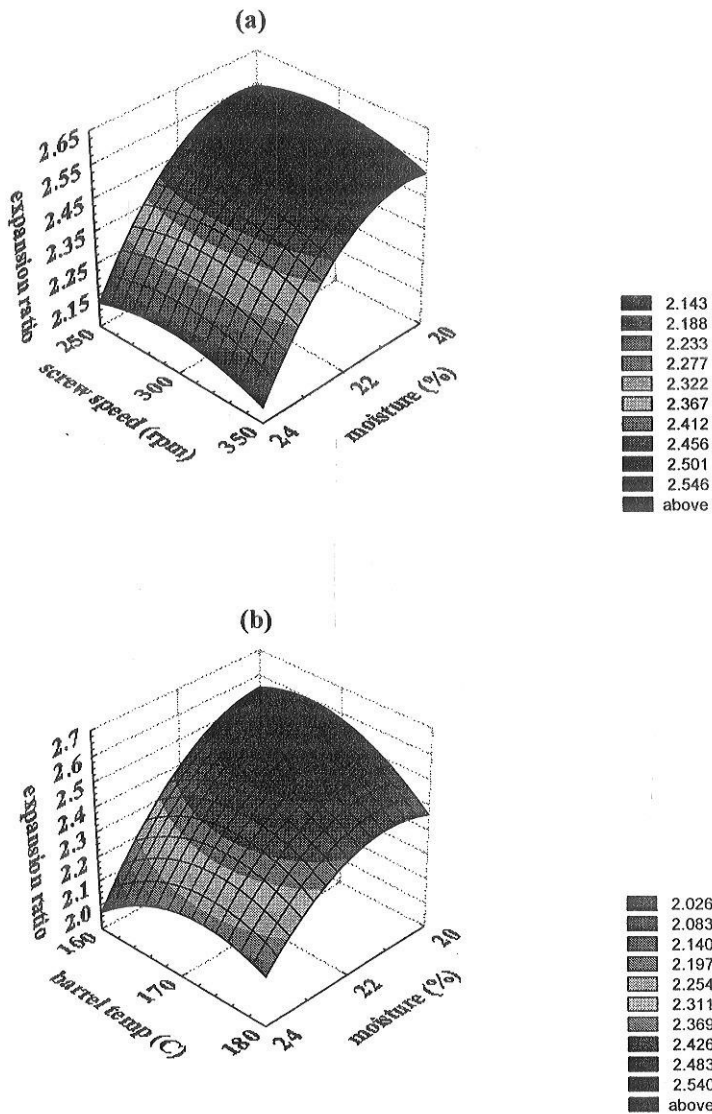
ในด้านความหนาแน่นเอกซ์ทราคเตดพบว่าได้รับอิทธิพลมาจากผลรวมของปริมาณความชื้นกับอุณหภูมิของ바เรล ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 7 ในภาคผนวก ค. สามารถแสดงผลตอบสนองในรูปกราฟสามมิติได้ดังภาพที่ 23 พบว่าที่ความชื้นวัตถุดิบต่ำๆ ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิของ바เรลต่ำ 160 องศาเซลเซียส ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบมีความหนาแน่นต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสภาวะเดียวกับที่ทำให้ได้เอกซ์ทราคเตดที่มีอัตราการขยายตัวสูงสุดดังภาพที่ 21 (b) ในขณะที่การเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างพบตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความหนาแน่นของเอกซ์ทราคเตดคือปริมาณความชื้น ซึ่งจากค่า coefficient แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นด้วยซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับการใช้รำข้าวดิบ อีกทั้งผลร่วมระหว่างความเร็วรอบสกรูกับอุณหภูมิ바เรลก็ส่งผลต่อความหนาแน่นเช่นกันแต่ถือว่าน้อยมาก แต่จากค่า R^2 ที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่เหมาะที่จะนำสมถดถอยมาสร้างกราฟสามมิติ

จากตารางที่ 11 พบว่าอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรำข้าวภายหลังการใช้ต่าง โครงสร้างรำข้าวหลังการใช้ต่างมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ความเป็นสัณฐานที่ส่วนของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างใยอาหารเกิดการเปิดตัวออกมีส่วนของไฮโดรเจนที่เป็นอิสระ

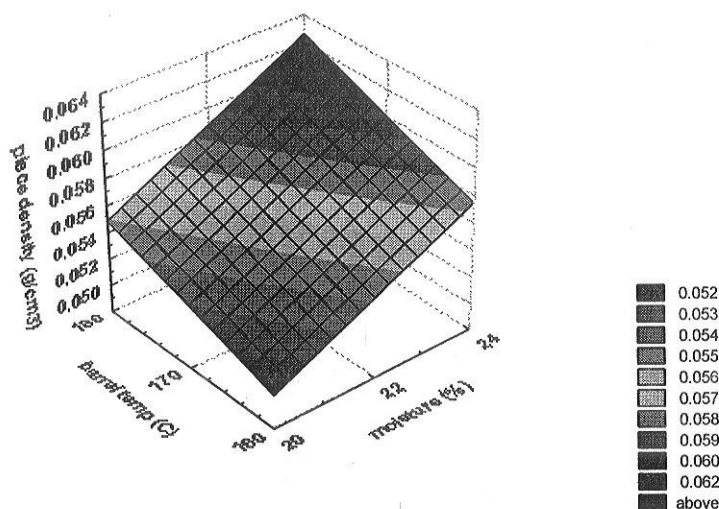
มากขึ้น ดังนั้นเมื่อน้ำจึงสามารถเข้าไปรวมตัวกับรำข้าวที่ผ่านการใช้ต่างได้มาก คงเหลือปริมาณน้ำน้อยลงในส่วนของสตาrch วัตถุประสงค์แป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างจึงมีความหนืดของโคสูงคังแสดงจากค่าทอร์คและค่าความดันที่หัวแบบที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพบการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของความดันที่หัวแบบ Mohamed (1990) และ Yuryev et al. (1995) กล่าวว่าการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความดันที่หัวแบบและความดันบรรยากาศ ดังนั้นเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างที่มีความดันที่หัวแบบสูงกว่าจึงมีอัตราการขยายตัวสูงกว่าด้วย ส่วนปริมาณโปรตีนที่มีในรำข้าวดิบมากกว่าในรำข้าวที่ใช้ต่างนั้น ($p < 0.05$) คาดว่ามีผลขัดขวางการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดต ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Mohamed (1990), Bhattacharya et al. (1997) และ Onwulata et al. (1998) ที่พบว่าการผสมโปรตีนลงในสตาrch ด้วยสัดส่วนที่สูงขึ้นส่งผลให้การขยายตัวของผลิตภัณฑ์ต่ำลง จากการเปรียบเทียบความหนาแน่นในตารางที่ 11 พบว่าค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างต่ำกว่าเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบเล็กน้อยโดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้เอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบมีอัตราการขยายตัวต่ำ และมีลักษณะเนื้อแน่นเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างภายในของรำข้าวดิบที่มีความแน่นและตันกว่ารำข้าวที่ใช้ต่างดังภาพถ่ายโครงสร้างรำข้าว ในภาพที่ 14 และจากผลงานวิจัยของ Artz et al. (1990) พบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านโครงสร้างและความสามารถในการอุ้มน้ำของโยอาหารค่อนข้างน้อย แสดงให้เห็นถึงความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของโยอาหารต่อแรงกล ดังนั้นทั้งรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ต่างหลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันน่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างน้อยมาก ส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบที่ได้มีความหนาแน่นสูงกว่าเนื่องจากโครงสร้างรำข้าวดิบแต่เดิมที่มีความแน่นมากกว่ารำข้าวที่ใช้ต่าง



ภาพที่ 21 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวคืบ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วยอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิบาร์เรล

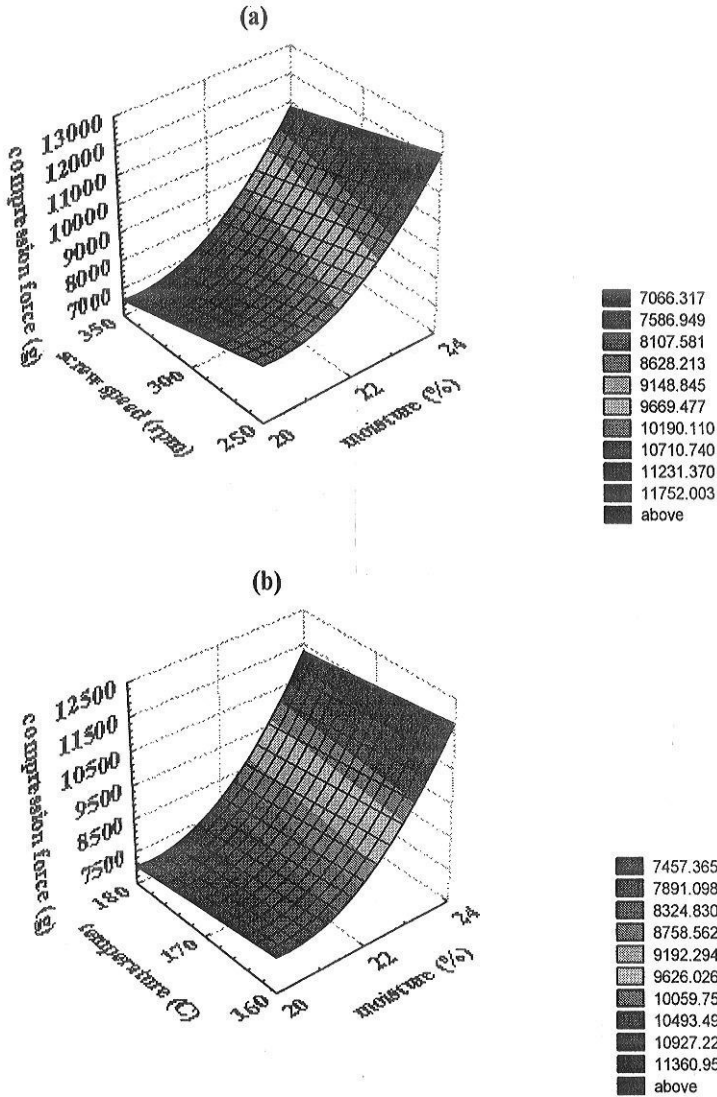


ภาพที่ 22 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราขยายตัวในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วยอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิบารเรล



ภาพที่ 23 พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับ อุณหภูมิ바เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์

ด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดตผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความชื้นเพียงตัวแปรเดียวที่มีผลต่อค่าแรงที่ใช้กดให้เอกซ์ทรูเดตเกิดการแตกหักสำหรับแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 7 ในภาคผนวก ค. โดยความชื้นที่สูงขึ้นทำให้แรงที่ใช้กดเอกซ์ทรูเดตให้แตกสูงขึ้นด้วย แต่จากค่า R^2 ที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่สามารถนำมาสร้างกราฟสามมิติได้ สำหรับการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างพบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าแรงกดแตกแสดงดังตารางที่ 8 ในภาคผนวก ค. โดยแสดงกราฟสามมิติได้ดังภาพที่ 24 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นส่งผลสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของค่าแรงที่ใช้ในการกดแตก เช่นเดียวกับที่พบในการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ โดยผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิ바เรลส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงกดแตกค่อนข้างต่ำ จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงกดแตกในตารางที่ 11 พบว่าเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างต้องการแรงกดแตกต่ำกว่าเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบแต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งผลของค่าแรงกดแตกนี้มีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับอัตราการขยายตัว แต่ความสัมพันธ์เชิงบวกกับความหนาแน่น ($p < 0.01$) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การที่เอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีค่าแรงกดแตกต่ำอาจมีผลมาจากการที่โครงสร้างของโยอาหารมีความอ่อนนุ่ม จากลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสูงทำให้น้ำสามารถเข้าไปจับกับรำข้าวได้ดี เมื่อเกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วหลังออกจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ทำให้เกิดโพรงอากาศค่อนข้างมาก มีช่องว่างภายในชิ้นเอกซ์ทรูเดตมากและสม่ำเสมอ ดังนั้นความต้องการแรงที่ใช้ในการกดแตกจึงต่ำลง

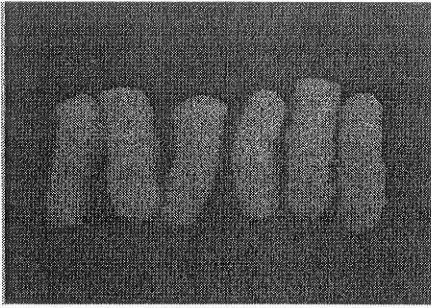


ภาพที่ 24 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วยอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิบาริล

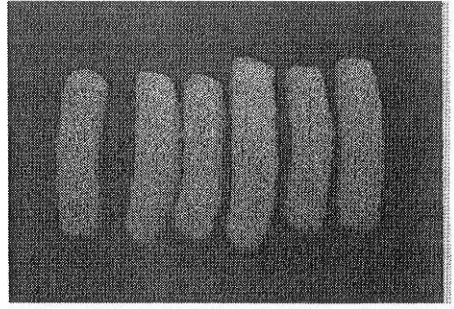
3.10 ผลการศึกษาชนิดรำข้าวและปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต

ผลการศึกษาชนิดของรำข้าวและปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลักษณะปรากฏของเอกซ์ทรูเดต แสดงดังภาพที่ 25 โดยเมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดรำข้าว พบว่า เอกซ์ทรูเดตส่วนผสมรำข้าวดิบ มีการขยายตัวตามแนวรัศมีสูงกว่าเอกซ์ทรูเดตส่วนผสมรำสีกัด เนื่องจากรำข้าวดิบมีองค์ประกอบของไขมันในปริมาณมาก โดยวัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันไม่เกินร้อยละ 4 จะมีอัตราการพองตัวสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น โดยไขมันทำให้ส่วนผสมสั้นไหลได้ดีขึ้น ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จากผลการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่า เอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำข้าวทั้ง 2 ชนิดให้ผลในทิศทางเดียวกัน โดยเอกซ์ทรูเดตที่ไม่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตจะมีการขยายตัวในแนวรัศมี แต่การขยายตัวตามแนวยาวต่ำ โปร่งอากาศมีขนาดใหญ่ ไม่สม่ำเสมอ ลักษณะผิวของเอกซ์ทรูเดตมีลักษณะขรุขระคล้ายผิวมะกรูด สำหรับเอกซ์ทรูเดตที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนต มีการขยายตัวตามแนวรัศมีลดลง แต่การขยายตัวตามแนวยาวเพิ่มขึ้น ตามปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เพิ่มขึ้น ลักษณะผิวของเอกซ์ทรูเดตเรียบเนียนที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 1% ขณะที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 2 และ 3% ผิวภายนอกของเอกซ์ทรูเดตจะมีรอยแตก โดยสามารถสังเกตได้ชัดเจนที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 3%

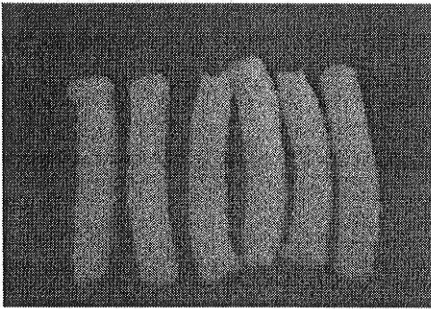
ผลของชนิดรำข้าวและปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่ออัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดต แสดงดังภาพที่ 26 อัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตให้ผลเช่นเดียวกับลักษณะปรากฏ โดยเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำข้าวดิบมีอัตราการขยายตัวสูงกว่าเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำสีกัด เนื่องจากผลของไขมัน และการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 1% ส่งผลให้อัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารช่วยในการเกิดฟองอากาศ (leavening agent) ซึ่งใช้กันในการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ขนมในการขึ้นฟูก่อนผ่านกระบวนการทอด โดยแคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อทำปฏิกิริยากับไอน้ำและออกซิเจนในอากาศซึ่งมีความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาในระหว่างการบ่ม จะเกิดการสลายตัวปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างช้าๆ ซึ่งทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากในโด (Villagran et al., 1995, Orosa et al., 2001) ดังนั้น สำหรับการเอกซ์ทรูชันเมื่อไอน้ำระเหยออกไปจากโดทำให้โครงสร้างของเอกซ์ทรูเดตมีความพรุนและมีอัตราการพองตัวสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 2% และ 3% พบว่าอัตราการขยายตัวลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นในปริมาณมากทำให้เกิดการดันตัวของโดระหว่างการขึ้นรูป ทำให้เกิดการแตกที่บริเวณผิว จึงพบได้ว่าผิวของเอกซ์ทรูเดตที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 3% มีลักษณะเป็นรอยแตก



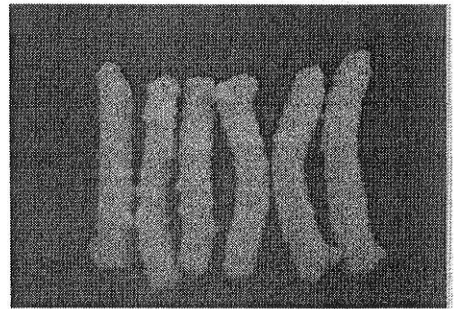
a



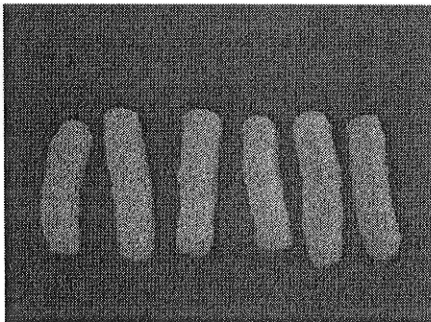
b



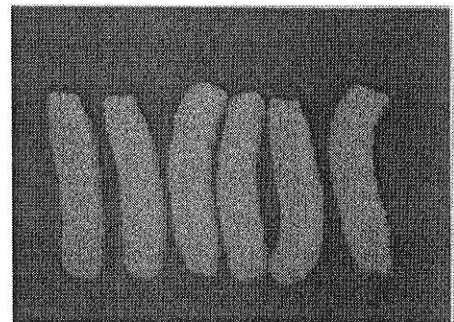
c



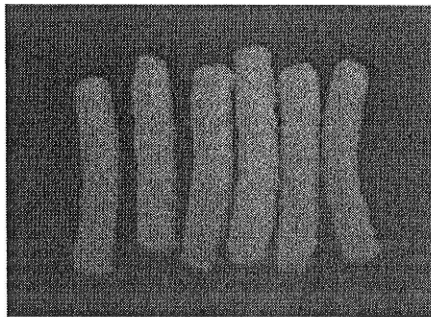
d



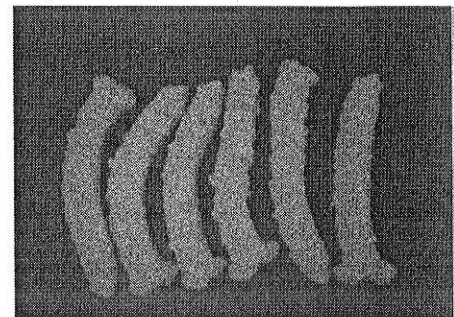
e



f

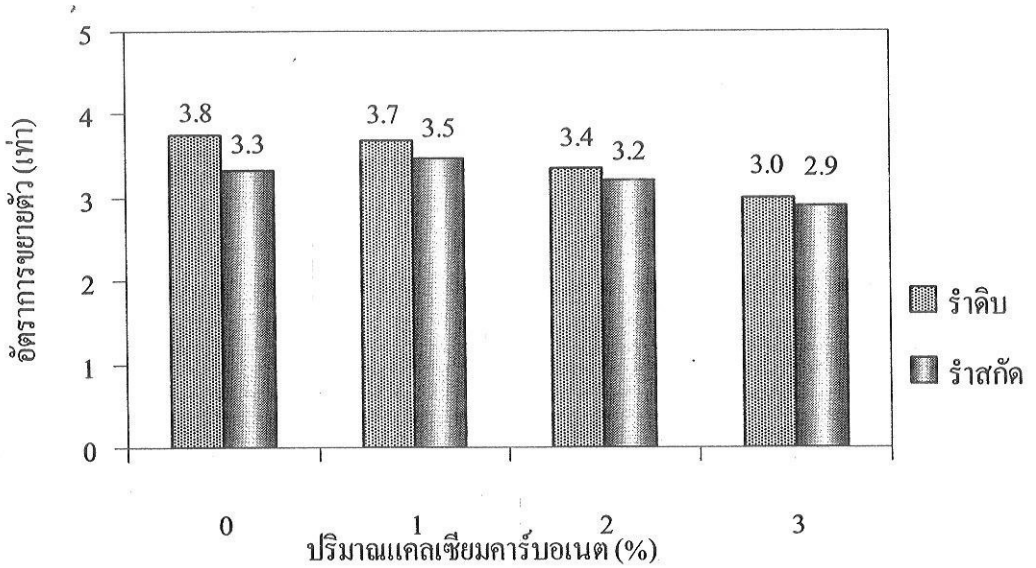


g



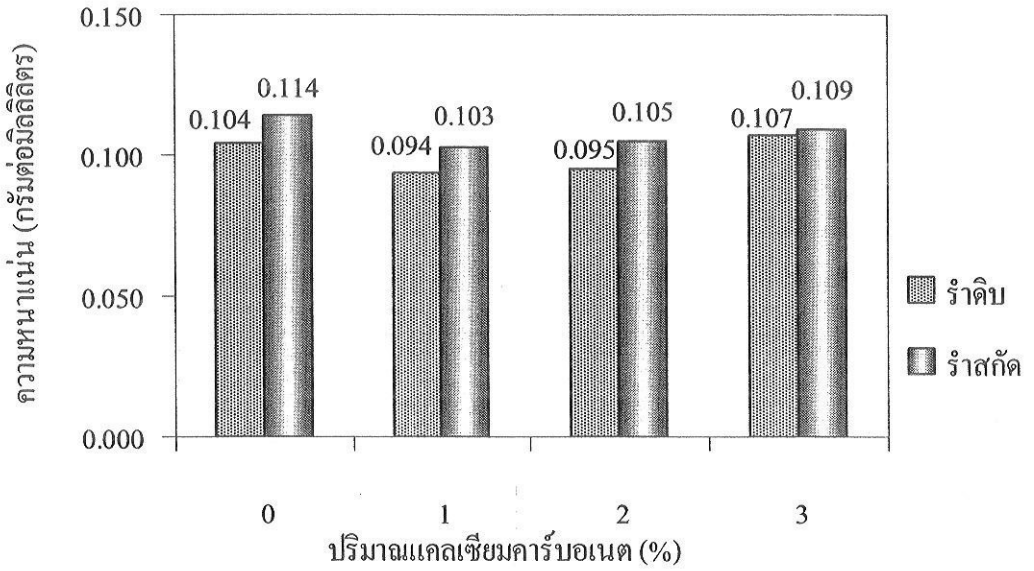
h

ภาพที่ 25 โครงสร้างลักษณะภายนอกของเอกทรูเดตจากส่วนผสมรำข้าวดิบและรำสกัดที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างกัน

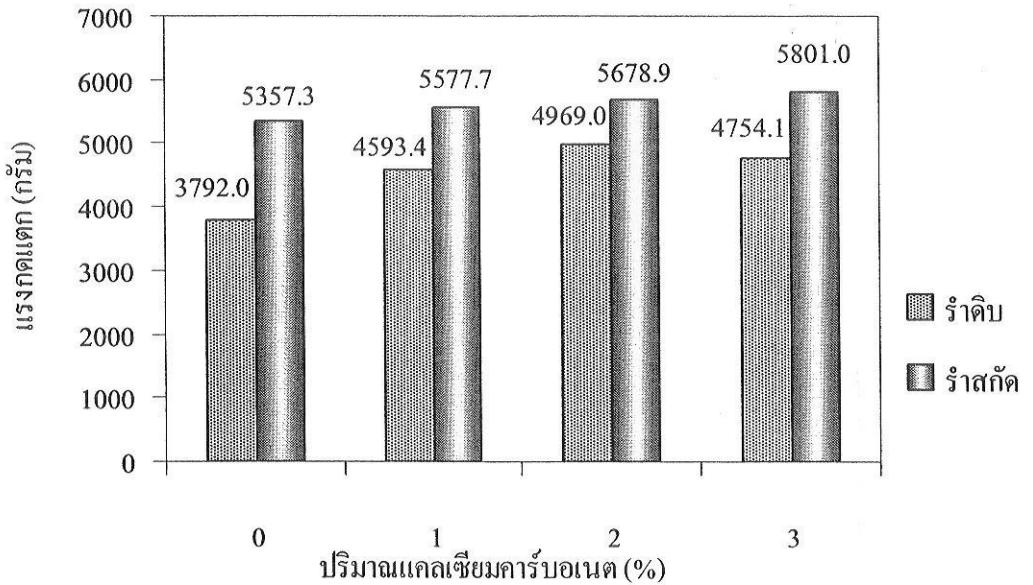


ภาพที่ 26 อัตราการขยายตัวของเอ็กซ์ทราคตจากส่วนผสมรำข้าวดิบและรำสกัดที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างกัน

ผลของชนิดรำข้าวและปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่อความหนาแน่นและแรงกดแตกของเอ็กซ์ทราคต ให้ผลในทิศทางเดียวกัน โดยแสดงดังภาพที่ 27 และ 28 พบว่า เอ็กซ์ทราคตจากส่วนผสมรำข้าวดิบมีความหนาแน่นและแรงกดแตกต่ำกว่าเอ็กซ์ทราคตจากส่วนผสมรำข้าวสกัด การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง แต่เมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณมากส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของความหนาแน่นสอดคล้องและสัมพันธ์เชิงลบกับอัตราการขยายตัวของเอ็กซ์ทราคต โดยทั่วไปเมื่ออัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นจึงมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามพบว่าแรงกดแตกเพิ่มขึ้นเมื่อเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมากขึ้น ผลการศึกษาให้ผลเช่นเดียวกับการพัฒนาขนมพองกรอบจากปลายข้าวด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทราคชันของ Boonyasirikool and Charunuch (2000) ซึ่งรายงานว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นทำให้เพิ่มจำนวนฟองอากาศขนาดเล็กส่งผลให้มีการขยายตัวต่ำลงทำให้ใช้แรงกดแตกเพิ่มขึ้น และเนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากจะเป็นสารที่ช่วยให้เกิดฟองอากาศ ยังเป็นสารที่เพิ่มความคงตัวให้กับผลิตภัณฑ์ โดยแม้ว่าเอ็กซ์ทราคตจะมีความหนาแน่นต่ำและมีการขยายตัวสูง แต่โครงสร้างของเอ็กซ์ทราคตจะมีความสม่ำเสมอของรูพรุนมาก ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมาก



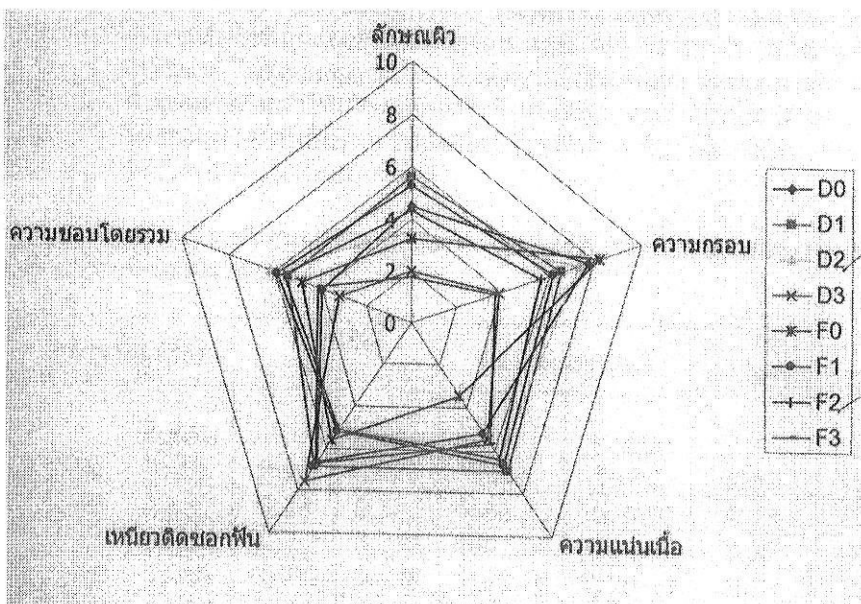
ภาพที่ 27 ความหนาแน่นของเอ็กซ์ทราคต์จากส่วนผสมรำข้าวดิบและรำสกัดที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างกัน



ภาพที่ 28 แรกกดแตกของเอ็กซ์ทราคต์จากส่วนผสมรำข้าวดิบและรำสกัดที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณต่างกัน

3.11 ผลการประเมินคุณลักษณะทางด้านประสาทสัมผัสและการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เอกซ์ทราเจต

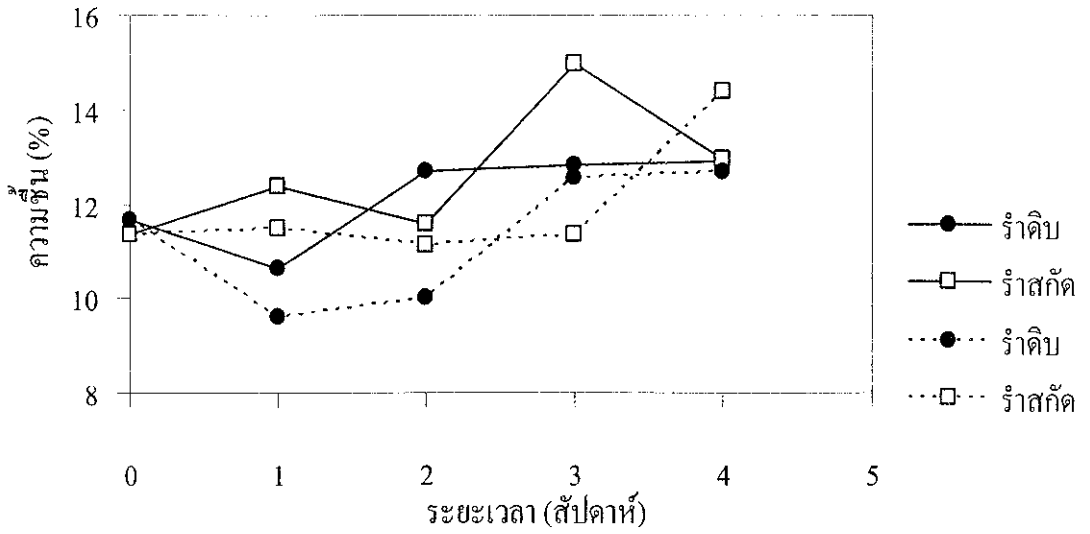
จากการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัสด้านลักษณะผิว ความกรอบ ความแน่นเนื้อ ความเหนียวติดชอกฟัน และความชอบ โดยรวมของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์เอกซ์ทราเจตจากส่วนผสมรำข้าวคืบและรำข้าวสาคัดที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 1%, 2%, และ 3% โดยใช้วิธีทดสอบแบบ QDA จำนวน 10 ระดับการทดสอบ แสดงผลดังภาพที่ 29 พบว่า เอกซ์ทราเจตจากรำสาคัดที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 2% ได้รับความชอบมากที่สุด สำหรับเอกซ์ทราเจตจากรำคืบที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 1% และ 2% ได้รับความชอบปานกลางถึงมากที่สุด ทางด้านลักษณะผิว ความกรอบ ความแน่นเนื้อ ความเหนียวติดชอกฟัน พบว่า เอกซ์ทราเจตจากรำสาคัดที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 2% มีลักษณะทางประสาทสัมผัสไม่แตกต่างทางสถิติกับเอกซ์ทราเจตจากรำคืบที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 1% และ 2% ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากช่อกทราเจตที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่เหมาะสม มีการกระจายตัวของฟองอากาศอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวและมีความกรอบ ซึ่งสอดคล้องกับค่าการทดสอบการกดแตก โดยปัจจัยทางด้านความกรอบของขนมกรอบ เป็นปัจจัยที่ใช้ในการวัดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งขนมกรอบที่ดีต้องมีเนื้อสัมผัสที่กรอบ ค่อนมาทางกรอบแน่น-นุ่ม ที่ให้ความรู้สึกในปากเมื่อขบเคี้ยวและละลายหมดไม่เหนียวติดชอกฟันและเบา (ประชา บุญญศิริกุลและจุฬาลักษณ์ จารุณูช, 2543)



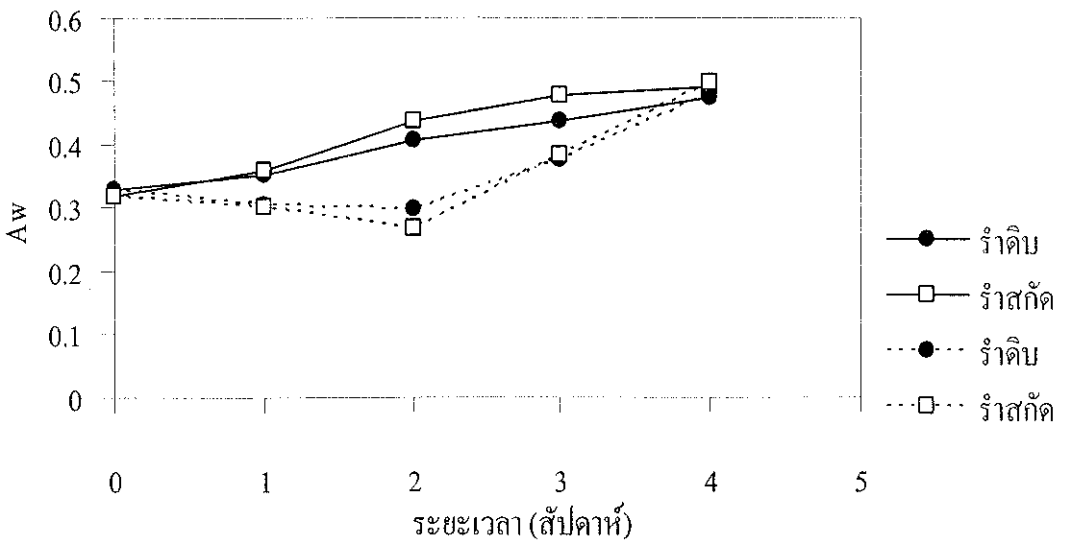
ภาพที่ 29 แผนภาพแสดงลักษณะทางประสาทสัมผัสและการยอมรับของผู้บริโภคต่อเอกซ์ทราเจต

3.12 ผลการศึกษาทางด้านอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดต

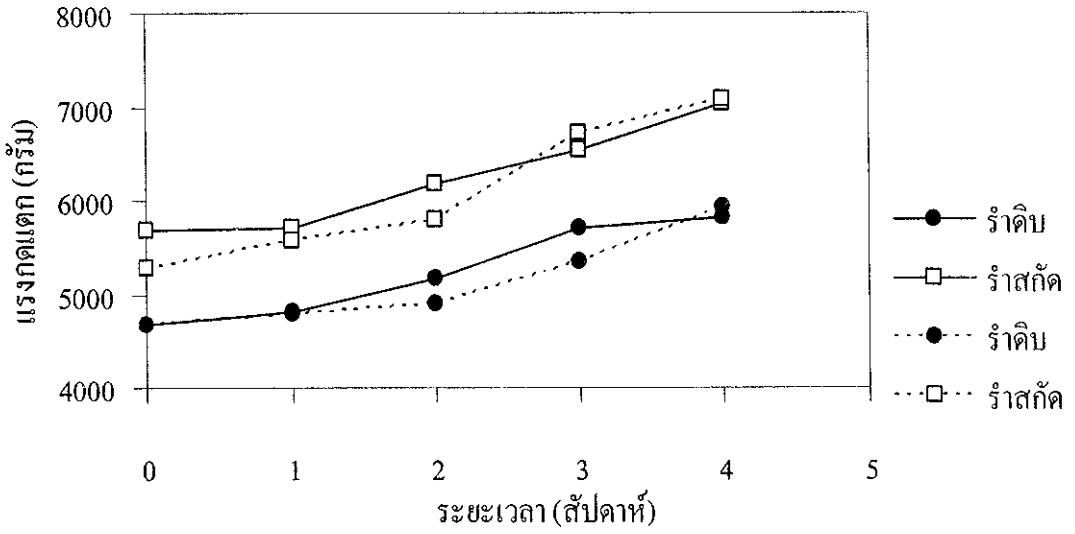
จากการศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตจากส่วนผลมร่ำข้าวคืบและร่ำสดที่ทำการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ระดับความเข้มข้น 2% โดยศึกษาที่อุณหภูมิการเก็บ 2 อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิห้องและ 45 องศาเซลเซียส แสดงผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพได้แก่ ความชื้น, Aw, แรงกดแตก และค่า TBA ตลอดระยะเวลาการเก็บ 4 สัปดาห์ ดังภาพที่ 30 - 33 ตามลำดับ จากผลการเปลี่ยนแปลงความชื้น (ภาพที่ 30) พบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บเพิ่มขึ้น ความชื้นในผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตทั้ง 4 สูตร จะเพิ่มขึ้นทั้ง 2 อุณหภูมิการเก็บ โดยการเก็บที่อุณหภูมิ 45°C มีการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นต่ำกว่าการเก็บที่อุณหภูมิห้อง ความเปลี่ยนแปลงค่า Aw ให้ผลเช่นเดียวกับค่าความชื้น (ภาพที่ 31) และพบว่าชนิดของร่ำมีผลต่อทั้งความชื้นและ Aw เมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้น สำหรับแรงกดแตกของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดต พบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บเพิ่มขึ้น แรงกดแตกของผลิตภัณฑ์มีค่ามากขึ้น โดยการเก็บที่อุณหภูมิห้องทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าแรงกดแตกมากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิ 45°C และเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมร่ำสดมีค่าแรงกดแตกมากกว่าเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมร่ำคืบ (ภาพที่ 32) ค่าแรงกดแตกของผลิตภัณฑ์เมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้น สัมพันธ์กับความชื้นที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ ประชา บุญญศิริกุล (2539) ที่รายงานว่ เมื่อเก็บรักษาผลิตภัณฑ์นานขึ้น ผลิตภัณฑ์จะมีความชื้นเกิดขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบลดลง เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์นุ่มลง ดังนั้นค่าแรงกดแตกจึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องใช้แรงกดมากในการทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกหัก การเปลี่ยนแปลงค่า TBA (ภาพที่ 33) TBA เป็นดัชนีบ่งบอกความหืนของผลิตภัณฑ์ โดย TBA เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาต่อเนื่องชุดที่ 2 ของลิปิดออกซิเดชัน (lipid oxidation) ได้แก่ malonaldehyde และ aldehyde ซึ่งสารเหล่านี้จะคงที่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่ต้องการให้กับผลิตภัณฑ์ (นิริยา รัตนาปนนท์, 2545) จากการศึกษา พบว่า TBA ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อระยะเวลาการเก็บเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้านความหืน (ภาพที่ 34) พบว่า ผู้บริโภคสามารถตรวจสอบกลิ่นหืนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตที่อุณหภูมิ 45°C เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ สำหรับการเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 สัปดาห์ และอุณหภูมิ 45°C เป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า ผลิตภัณฑ์มีความหืนไม่แตกต่างผลิตภัณฑ์เริ่มต้น และพบว่าชนิดของร่ำไม่มีผลต่อการเกิดกลิ่นหืนในผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้อาจเนื่องจากในผลิตภัณฑ์มีปริมาณไขมันต่ำมาก โดยเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมร่ำคืบมีปริมาณไขมัน 2.20% และเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมร่ำสดมีปริมาณไขมันเพียง 0.46% ดังนั้นปริมาณไขมันอาจน้อยเกินไปที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้ ร่ำข้าวยังอุดมไปด้วยสารออไรซานอล (oryanol) ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นแอนติออกซิเดนต์ (antioxidant) ที่สามารถยับยั้งการเกิดออกซิเดชันได้ (Cho et al., 1999) เมื่อพิจารณาทางด้านความกรอบและกลิ่นอับ พบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้นผลิตภัณฑ์มี



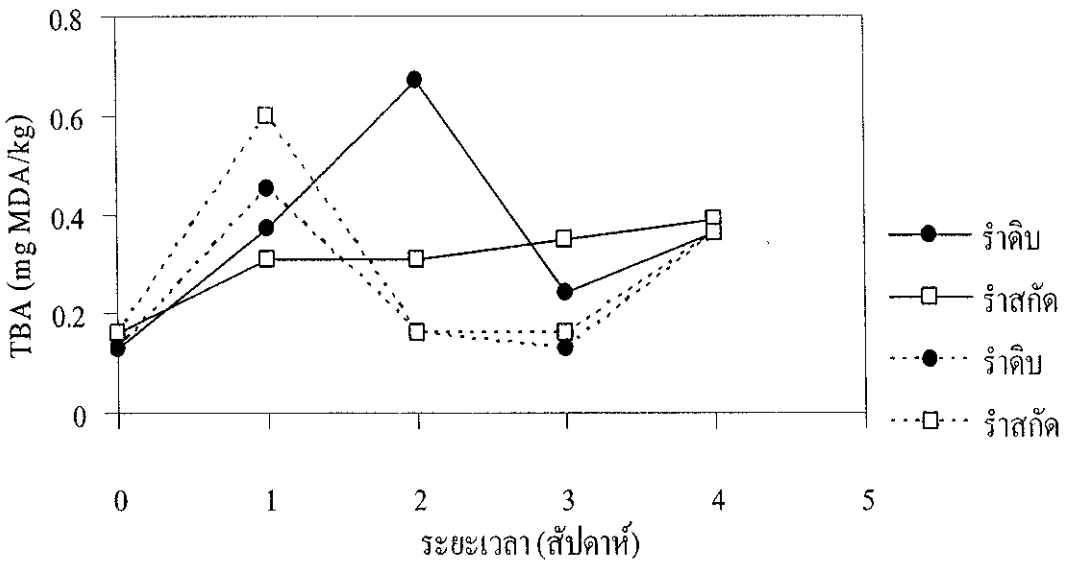
ภาพที่ 30 การเปลี่ยนแปลงความชื้นตามระยะเวลาการเก็บรักษาเอกซ์ทราคตจากส่วนผสมรำข้าวที่อุณหภูมิห้อง (—) และ 45°C (···)



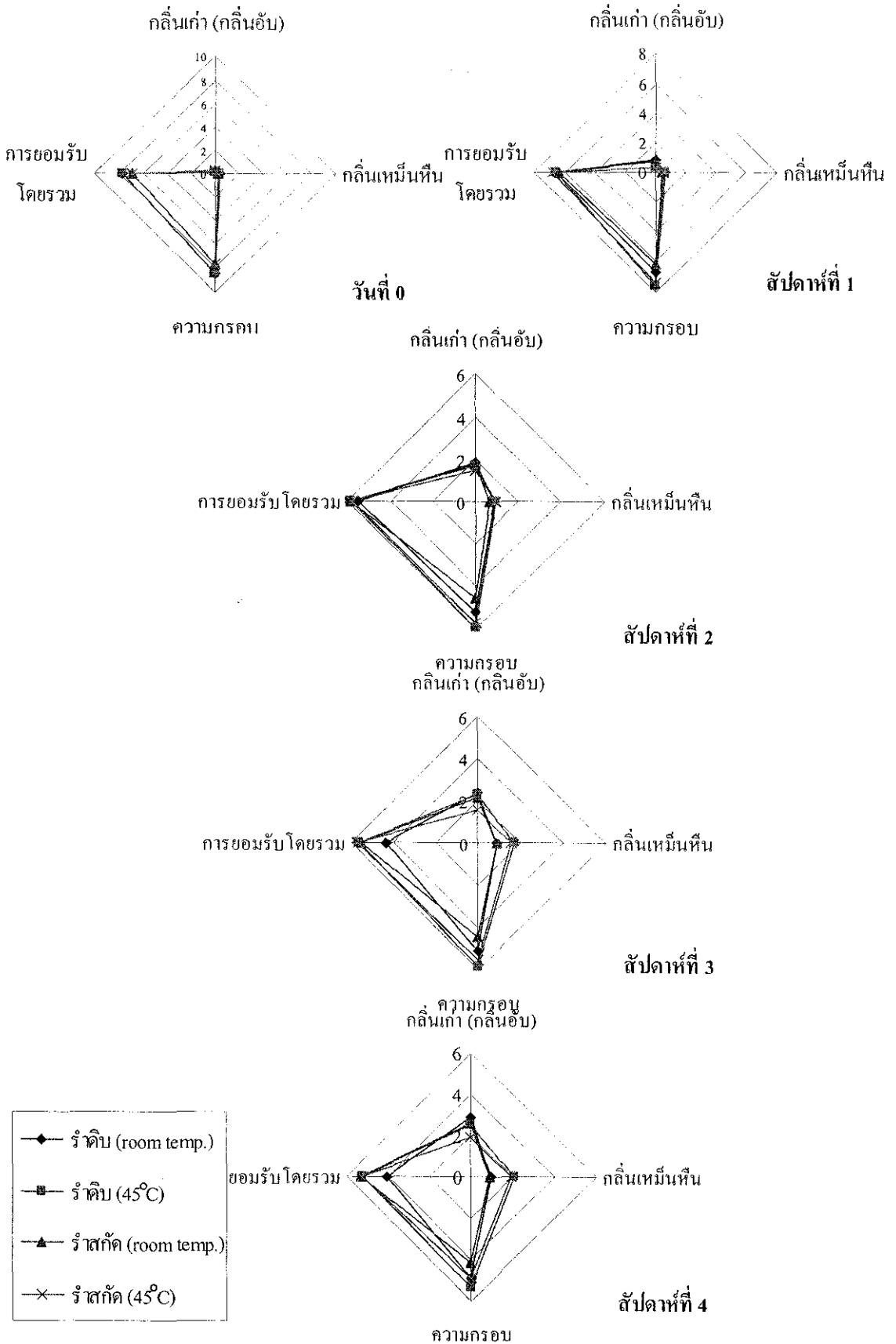
ภาพที่ 31 การเปลี่ยนแปลง Aw ตามระยะเวลาการเก็บรักษาเอกซ์ทราคตจากส่วนผสมรำข้าวที่อุณหภูมิห้อง (—) และ 45°C (···)



ภาพที่ 32 การเปลี่ยนแปลงแรงกดแตกตามระยะเวลาการเก็บรักษาเอกซ์ทราคตจากส่วนผสมรำข้าวที่อุณหภูมิห้อง (—) และ 45°C (···)



ภาพที่ 33 การเปลี่ยนแปลงค่า TBA ตามระยะเวลาการเก็บรักษาเอกซ์ทราคตจากส่วนผสมรำข้าวที่อุณหภูมิห้อง (—) และ 45°C (···)



ภาพที่ 34 แผนภาพแสดงลักษณะทางประสาทสัมผัสของเอกซ์ทราเดคตาจากส่วนผสมรำข้าวที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องและ 45°C เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์

ความกรอบลดลง โดยผลสอดคล้องกับแรงกดตัดที่มีค่ามากขึ้น และผลิตภัณฑ์มีกลิ่นเก่า (กลิ่นอับ) เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิการเก็บพบว่า การเก็บที่อุณหภูมิ 45°C ทำให้ผลิตภัณฑ์คงความกรอบมากกว่าการเก็บที่อุณหภูมิต่ำ โดยผลสอดคล้องกับความชื้นในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ ยังพบว่า เอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำดิบมีความกรอบมากกว่าเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำสกัดในทุกระยะเวลาการเก็บรักษา สำหรับกลิ่นเก่าที่ระยะเวลาการเก็บมากขึ้น พบว่า เอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำดิบและรำสกัดมีผลทางด้านกลิ่นเก่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากกลิ่นเก่าเกิดจากการออกซิเดชันของไขมัน ดังนั้น เมื่อผลิตภัณฑ์ทั้งสองความปริมาณไขมันค่อนข้างต่ำทำให้ไม่สามารถแยกความแตกต่างของกลิ่นจากผลิตภัณฑ์ทั้งสองได้ สำหรับการยอมรับโดยรวม พบว่า เมื่อระยะเวลาการเก็บเพิ่มขึ้นระดับการยอมรับโดยรวมลดลง เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีความกรอบลดลง มีกลิ่นหืนและกลิ่นเก่าเล็กน้อย โดยพบว่าที่ระยะเวลาการเก็บ 4 สัปดาห์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการยอมรับโดยรวมสูงสุดคือ เอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำสกัดซึ่งเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยแม้ว่าผลิตภัณฑ์จะมีความกรอบน้อยกว่า แต่พบกลิ่นหืนและกลิ่นเก่าน้อยกว่าเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำดิบเช่นเดียวกัน เอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำดิบและรำสกัดที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45°C มีระดับการยอมรับใกล้เคียงกับเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำสกัดซึ่งเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม การเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 45°C เร่งการเกิดออกซิเดชัน ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนและกลิ่นเก่าเมื่อระยะเวลาการเก็บเพิ่มขึ้น สำหรับเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำดิบที่การเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ พบว่า ได้รับการยอมรับโดยรวมต่ำสุด ดังนั้น การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมพองกรอบจากแป้งข้าวที่มีการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการโดยการเติมรำข้าวให้มีคุณภาพคงที่ในการเก็บรักษา ควรผลิตโดยใช้ส่วนผสมรำข้าวจากรำสกัดไขมันและผสมแคลเซียมคาร์บอเนต 2% เพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ที่อุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยมีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพเพียงเล็กน้อยและผู้บริโภคให้การยอมรับ

บทที่ 4

บทสรุป

กระบวนการแปรรูปวัตถุบีบแข็งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ด้วยวิธีเอกซ์ทรูชันในครั้งนี้ สภาวะการแปรรูปที่ความชื้นวัตถุบีบต่ำ 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรูต่ำ 250 รอบต่อนาที และอุณหภูมิใบารลดต่ำ 160 องศาเซลเซียส ให้ลักษณะของเอกซ์ทรูเดตที่มีอัตราการขยายตัวสูงสุด เนื่องจากลักษณะโพรงอากาศภายในโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ค่าแรงที่ใช้ในการกดให้เอกซ์ทรูเดตเกิดการแตกมีค่าต่ำ ลักษณะทางกายภาพดังกล่าวนี้เกิดขึ้นเมื่อเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ดำเนินการแปรรูปด้วยค่าแรงทอร์คและความดันที่หัวแบบสูงๆ อีกทั้งความหนืดขณะเย็นของเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากสภาวะการแปรรูปนี้มีค่าต่ำ เมื่อวัตถุบีบที่มีความชื้นต่ำได้รับการแปรรูปด้วยพลังงานกลจำเพาะสูง ทำให้ได้เอกซ์ทรูเดตที่มีความหนาแน่นต่ำเพราะมีโครงสร้างรูพรุนเกิดขึ้นมาก ในด้านของการสุกของสตาร์ชพบว่าระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการศึกษาถึงผลของตัวแปรการแปรรูปและค่าต่างๆ ที่วัดได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สามารถใช้ทำนายและบ่งชี้ถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ ความสัมพันธ์ที่พบนี้จึงอาจใช้เป็นแนวทางที่จะช่วยให้การดำเนินการแปรรูปเป็นไปได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และยังช่วยให้เกิดความเข้าใจในการแปรรูปมากขึ้น อีกทั้งลักษณะความหนืดของผลิตภัณฑ์ และระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ชยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้อีกทางหนึ่งด้วย ในส่วนของผลจากการเติมรำข้าวดิบที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งตัวแปรตามจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ และลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อมีการเติมรำข้าวดิบในระดับที่สูงขึ้นคือ 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดการลดลงของค่าแรงทอร์คและพลังงานกลจำเพาะ และส่งผลไปสู่การลดลงของอัตราการขยายตัว การเพิ่มขึ้นของแรงกดแตก และความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดต

การใช้ต่างกับรำข้าวมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทั้งทางองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพ การใช้ความร้อนเป็นการเร่งปฏิกิริยาระหว่างต่างกับรำข้าวได้ดีว่าการเพิ่มระยะเวลาของปฏิกิริยา นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีด้านโปรตีน ไขมัน และเส้นใยมีปริมาณลดลง ในขณะที่ปริมาณใยอาหารสูงขึ้นมา โครงสร้างของรำข้าวเกิดลักษณะที่เป็นรูพรุนมากขึ้นและมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น จากการเอกซ์ทรูดวัตถุบีบผสมระหว่างแป้งข้าวกับรำข้าวดิบ และแป้งข้าวกับรำข้าวที่ผ่านการใช้ต่าง พบว่าการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวที่ใช้ต่าง การลดลงของปริมาณไขมันและโปรตีนส่งผลที่สำคัญต่อทั้งค่าตัวแปรตามการแปรรูปและลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต โดยการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างแทนแป้งข้าว 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เอกซ์ทรูเดตที่ได้มี

อัตราการขยายตัวสูงกว่าเอกซ์ทรูเดตจากวัตถุดิบที่ถูกแทนที่ด้วยรำข้าวดิบ นอกจากนี้ยังพบว่าความดันที่หัวแบบที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แรงทอร์คและพลังงานกลจำเพาะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีความหนาแน่นและมีความแข็งลดลง จากการทดลองครั้งนี้จะเห็นได้ว่าการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างทดแทนรำข้าวดิบส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตยังคงมีลักษณะทางกายภาพที่ดี ซึ่งการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างจะมีสัดส่วนของใยอาหารมากกว่าเอกซ์ทรูเดตที่เติมรำข้าวดิบ และยังพบว่าการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เอกซ์ทรูเดตมีลักษณะทางกายภาพที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบที่ทำการผลิตภายใต้สภาวะการแปรรูปเดียวกัน ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มที่จะสามารถเติมรำข้าวที่ใช้ต่างในการผลิตผลิตภัณฑ์พองตัวได้ในปริมาณที่สูงขึ้น

การปรับปรุงคุณภาพของเอกซ์ทรูเดตโดยใช้รำสกัดไขมันเปรียบเทียบกับรำดิบและการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต การใช้รำสกัดไขมันมีผลให้ผลิตภัณฑ์มีอัตราการขยายตัวต่ำกว่ารำดิบและส่งผลให้แรงกดแตกมากกว่าการใช้รำดิบ สำหรับการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นสามารถปรับปรุงอัตราการขยายตัวให้เพิ่มขึ้นทั้งในรำดิบและรำสกัด แต่ต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งส่งผลให้ค่าความกรอบมากขึ้นและความแน่นเนื้อลดลง และจากการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าสูตรของเอกซ์ทรูเดตที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 2% ทั้งในส่วนผสมรำดิบและรำสกัดไขมันนั้นมีความชอบของผู้บริโภคมากที่สุด โดยเมื่อหาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้องและ 45°C การเก็บที่อุณหภูมิ 45°C จะเร่งการเกิดออกซิเดชันของไขมันทำให้เกิดความหืนขึ้นในระยะเวลา 3 สัปดาห์ ขณะที่การเก็บที่อุณหภูมิห้อง ความชื้นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ความกรอบลดลง แต่ไม่เกิดกลิ่นหืน และเนื่องจากความหืนเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับของผู้บริโภค ผู้บริโภคจึงให้การยอมรับสูตรของเอกซ์ทรูเดตจากส่วนผสมรำสกัดที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต 2% มากที่สุด ดังนั้น การเติมรำข้าวสกัดไขมันและแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยสูตรนี้จึงเหมาะสมในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมพองกรอบจากแป้งข้าวที่มีการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้มีคุณภาพคงที่และเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคในระหว่างการเก็บรักษา

บรรณานุกรม

- กมลวรรณ แจ่มชัด. (2541). การแปรรูปอาหารโดยวิธีเอ็กซ์ทรูชัน. *อุตสาหกรรมเกษตร*. 9(2): 4-8.
- ข้าวธุรกิจในประเทศ. 2542. *จารย์พา* 6(46): 3.
- งามชื่น คงเสรี. (2540). คุณภาพข้าวสุก. *จารย์พา*. 38: 41-44.
- จิราภา เมืองคล้าย. (2539). การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเข้าชนิดแผ่นจากแป้งข้าว. *วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์. คณะอุตสาหกรรมเกษตรมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.*
- ประชา บุญญศิริกุล. (2537). บทบาทของเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย. *อาหาร*. 24(1): 1-12.
- ประชา บุญญศิริกุล, จุฬาลักษณ์ จารุบุษ และ มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์. (2539). การผลิตอาหารขบเคี้ยวจากถั่วเขียวโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่. *อาหาร*. 26(1): 14-33.
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และ ประชา บุญญศิริกุล. (2538). การศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมของข้าวเจ้าและข้าวเหนียวในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่. *รายงานผลการวิจัย สำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติ.*
- สายสนม ประดิษฐ์ดวง. (2541). อาหารป้องกันโรคข้าวกล้องและรำข้าว. *อุตสาหกรรมเกษตร*. 9(2): 38-41.
- สุนันทา ทองทา. (2541). เทคโนโลยีของเอกซ์ทรูชัน. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาความก้าวหน้าใหม่ทางด้านเทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. *ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร. คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยขอนแก่น.*
- สงกรานต์ จิตรกร. (2526). ความรู้เรื่องข้าว. *สถาบันวิจัยข้าว กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพมหานคร.*
- Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V.F. and Griffin, E.L. (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. *Cereal Sci. Today*. 14: 4-7.
- AOAC. (1997). *Official Methods of Analysis*. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.
- Artz, W.E., Warren, C. and Villota, R. (1990). Twin screw extrusion modification of a corn fiber and corn starch extruded blend. *J. Food. Sci.* 55(3): 746-750,754.
- Bhattacharya, M., and Hanna, M.A. and Kaufman, R.E. (1986). Textural properties of extruded plant protein blends. *J. Food Sci.* 51(4): 988-993.
- Bhattacharya, M. and Hanna, M.A. (1987). Textural properties of extrusion-cooked corn starch. *Lebensm. Wiss. U_Technol.* 20(4): 195.

- Bhattacharya, S., Chakraborty, P., Chattoraj, D.K. and Mukherjee, S. (1997). Physico-chemical characteristics of extruded snacks prepared from rice (*Oryza sativa L.*) and chickpea (*Cicer arietinum*) by single screw extrusion. *J. Food Sci. Technol.* 34(4): 320-323.
- Biliaderis, C.G., Page, C.M., Maurice, T.J. and Juliano, B.O. (1986). Thermal Characterization of rice starches: A polymeric approach to phase transitions of granular starch. *J. Agric. Food Chem.* 34: 6-14.
- Berglund, P.T., Fastnaught, C.E. and Holm, E.T. (1994). Physicochemical and sensory evaluation of extruded high-fiber barley cereals. *Cereal Chem.* 71(1): 91-95.
- Boonyasirikool, P. and Chulaluk, C. (2000). Development of Corngrit-Broken Rice Based Snack Food by Extrusion Cooking. *Kasetsart J. (Nat. Sci.)* 34 : 279 – 288.
- Burt, D.J., and Russel, P.L. (1983). Gelatinization of low water content wheat starch-water mixtures. *Starch/starke.* 35(10): 354-360.
- Camire, M.E., Camire, A. and Krumhar, K. (1990). Chemical and nutritional changes in food during extrusion. *Food Sci. Nutr.* 29: 35-57.
- Chaing, B.Y. and Johnson, J.A. (1977). Measurement of total and gelatinized starch by glucoamylase and o-toluidine reagent. *Cereal Chem.* 54(3): 429-435.
- Chinnaswamy, R., and Hanna, M.A. (1988). Optimum extrusion cooking conditions for maximum expansion of corn starch. *J. Food Sci.* 53(3): 834-836,840.
- Cho, S.S., Prosky, L. and Dreher, M. (1999). *Complex carbohydrates in foods.* Marcel Dekker, New York.
- Choudhury, G.S. and Gautam, A. (1999). Screw configuration effects on macroscopic characteristics of extrudates produced by twin screw extrusion of rice flour. *J. Food Sci.* 64(3) : 479-487.
- Conway, H.F. and Anderson, R.A. (1973). Protein-fortified extruded food products. *Cereal Sci. Today.* 18(4): 94-97.
- Desrumaux, A., Bouvier, J.M. and Burri, J. (1998). Corn grits particle size and distribution effects on the characteristics of expanded extrudates. *J. Food Sci.* 63(5): 857-863.
- Dziezak, J.D. (1989). Single and twin-screw extruders in processing. *Food Technol.* 43: 164-174.
- Eliasson, A.C. (1996). *Carbohydrates in foods.* Marcel Dekker, New York.
- Feldberg, C. (1969). Extruded starch based snacks. *Cereal Sci. Today.* 4 : 211-215.

- Garber, B.W., Hsieh, F. and Huff, H.E. (1997). Influence of particle size on the twin screw extrusion of corn meal. *Cereal Chem.* 74(5): 656-661.
- Gordon, D.T. (1989). Functional properties vs. physiological action of total dietary fiber. *Cereal Food World.* 34: 517-521.
- Gould, J.M., Jasberg, B.K., Dexter, L.B., Hsu, J.T., Lewis, S.M. and Fahey, G.C. (1989). High-fiber, noncaloric flour substitute for baked foods: properties of alkaline peroxide-treated lignocellulose. *Cereal Chem.* 66(3): 201-205.
- Grenus, K.M., Hsieh, F. and Huff, H.E. (1993). Extrusion and extrudate properties of rice flour. *J. Food Eng.* 18: 229-245.
- Guha, M., Ali, S.Z. and Bhattacharya, S. (1997). Twin-screw extrusion of rice flour without a die: Effect of barrel temperature and screw speed on extrusion and extrudate characteristics. *J. Food Eng.* 32: 251-267.
- Han, O., Lee, S.H., Lee, H.Y., Kim, Y.M. and Min, B.L. (1988). Physicochemical characteristics of rice flour gelatinized by extrusion cooking. *Korean J. Food Sci. Technol.* 20(4) : 470-475.
- Harper, J.M. (1981). *Extrusion of food.* Vol. I. CRC Press, Florida.
- Hon, D.N.S. and Shiraishi, N. (1990). *Wood and cellulosic chemistry.* Marcel Dekker, New York.
- Hsieh, F., Mulvaney, S.J., Huff, H.E., Lue, S. and Brent, J. (1989). Effect of dietary fiber and screw speed on some extrusion processing and product variables. *Lebensm. Wiss. U. Technol.* 22(4): 204-207.
- Hsieh, F., Grenus, K.M., Hu, L. and Huff, H.E. (1993). Twin screw extrusion of rice flour with salt and sugar. *Cereal Chem.* 70(5): 493-498.
- Hu, L., Hsieh, F. and Huff, H.E. (1993). Corn meal extrusion with emulsifier and soybean fiber. *Lebensm. Wiss. U. Technol.* 26: 544-551.
- Ilo, S., Liu, Y. and Berghofer, E. (1999). Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. *Lebensm. Wiss. U. Technol.* 32: 79-88.
- Jasberg, B.K., Gould, J.M., Warner, K. and Navickis, L.L. (1989). High fiber, noncaloric flour substitute for baked food: effects of alkaline treated lignocellulose on dough properties. *Cereal Chem.* 66(3): 205-209.
- Jin, Z., Hsieh, I. and Huff, H.E. (1994). Extrusion cooking of corn meal with soy fiber, salt and sugar. *Cereal Chem.* 71(3): 227-234.

- Johnson, I.T. and Southgate, D.A.T. (1994). Dietary fiber and related substances. Chapman & Hall, London.
- Juliano, B.O. (1971). A amplified assay for milled-rice amylose. *Cereal Sci. Today*. 16 : 334-340.
- Kahlon, T.S., Saunders, R.M., Chow, F.I., Chieu, M.M. and Betschart, A.A. (1990). Influence of rice bran, oat bran, and wheat bran on cholesterol and triglyceride in hamsters. *Cereal Chem.* 67: 439-443.
- Kirby, A.R., Ollett, A.L., Parker, R. and Smith, A.C. (1988). An experimental study of screw configuration effects in the twin-screw extrusion cooking of maize grits. *J. Food Eng.* 8: 247-272.
- Lai, C.S., Guetzlaff, J. and Hosenev, R.C. 1989. Role of sodium bicarbonate and trapped air in extrusion. *Cereal Chem.* 66(2) : 69-73.
- Lajoie, M.S. Goldstein, P.K. and Geeding-Schild, D. 1996. Use of bicarbonates in extrusion processing of ready-to eat cereals. *Cereal Foods Worlds*, 41(6):448-451.
- Larrea, M.A., Grossmann, M.V., Beleia, A.P. and Tavares, D.Q. (1997). Changes in water absorption and swollen volume in extruded alkaline peroxide pretreated rice hulls. *Cereal Chem.* 74(2): 98-101.
- Lue, S., Hsieh, F. and Huff, H.E. (1991). Extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber: Effects on expansion properties, starch gelatinization, and dietary fiber content. *Cereal Chem.* 68(3): 227-234.
- Lue, S., Hsieh, F. and Huff, H.E. (1994). Modeling of twin screw extrusion cooking of corn meal and sugar beet fiber mixtures. *J. Food Eng.* 21: 263-289.
- Matz, S.A. (1991). *The chemistry and technology of cereals as food and feed*, 2nd ed. AVI Publishing company, New York.
- Mercier, C. and Feillet, P. (1975). Modification of carbohydrate components by extrusion cooking of cereal products. *Cereal Chem.* 52(3): 283-297.
- Mohamed, S. (1990). Factors affecting extrusion characteristics of expanded starch-based products. *J. Food Proc. Preserv.* 14: 437-452.
- Ning, L., Villota, R., and Artz, W.E. (1991). Modification of corn fiber through chemical treatments in combination with twin-screw extrusion. *Cereal Chem.* 68(6): 632-636.
- Oakenfull, D.G. (1989). Rice bran. *Food Reseach Quarterly*. 49: 60-65.

- 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.
- Onwulata, C.I., Konstance, R.P., Smith, P.W., and Holsinger, V.H. (2001). Co-extrusion of dietary fiber and milk protein in extruded corn products. *Lebensm. Wiss. U. Technol.* 34(7): 424-429.
- Orosa, M.E., Laner, D.A. and Chang, D.S.J. (2001) Fried snack, fried snack dough and process for making the same. US patent 6,277,423.
- Pan, B.S., Kong, M.S. and Chen, H.H. (1991). Twin screw extrusion for expanded rice product : Processing parameter and formulation of extruded properties. Ch. 42 in food extrusion science and technology. Kokini, J.L., Ho, C.T. and Karwe, M.V., p. 693-709. Marcel Dekker, New York.
- Roe, J.H. (1955). *J. Biol. Chem.* 212: 335-343. Quoted in D.A.T. Southgate. (1991). Determination of food carbohydrates. 2nd ed. Elsevier Science. New York.
- Rossen, J.L. and Miller, R.C. (1973). Food extrusion. *Food Technol.* 27(8): 46-53.
- Ryu, G.H. and Lee, C.H. (1988). Effects of moisture content and particle size of rice flour on physical properties of the extrudate. *Korean J. Food Sci. Technol.* 20(4): 463-469.
- Saunders, R.M. (1990). The properties of rice bran as a foodstuff. *Cereal Foods World.* 35: 632-636.
- Singh, D., Chauhan, G.S., Tyagi, S.M., and Suresh, I. (2000). Extruded snacks from composite of rice brokens and wheat bran. *J. Food Sci. Technol.* 37(1) : 1-5.
- Sjostrom, E. (1993). *Wood chemistry: fundamentals and applications*, 2nd ed. Academic Press, New York.
- Sunderland, R. (1996). Production of third-generation snacks. *Cereal Foods World.* 41(1): 12-14.
- Taranto, M.V., Meinke, W.W., Cater, C.M. and Mattil, K.F. (1975). Parameters affecting production and character of extrusion texturized defatted glandless cottonseed meal. *J. Food Sci.* 40: 1264-1269.
- Tomas, R.L., Oliveira, J.C., Akdogan, H. and McCarthy, K.L. (1994). Effect of operating conditions on physical characteristics of extruded rice starch. *Int. J. Food Sci. Technol.* 29(5) : 503-514.

- Vasanthan, T., Gaosong, J., Yeung, J. and Li, J. (2002). Dietary fiber profile of barley flour as affected by extrusion cooking. *Food Chem.* 77: 35-40.
- Villagran, M.D., Toman, L.J., Byars, K.D., Dawes, N.C. and Zimmernan S.P. (1995). Process for making reduced-fat fried snacks with lighter, more expanded snack structures. US Patent 5,464,642.
- Whalen, P.J., Bason, M.L., Booth, R.I., Walker, C.E. and Williams, P.J. (1997). Measurement of extrusion effects by viscosity profile using the rapid viscoanalyser. *Cereal Foods World.* 42(6): 469-475.
- Yeh, A.I. and Jaw, Y.M. (1999). Effects of feed rate and screw speed on operating characteristics and extrudate properties during single-screw extrusion cooking of rice flour. *Cereal Chem.* 76(2): 236-242.
- Yoshii, Y. and Arisaka, M. (1994). Relationships between physicochemical properties of nonglutinous rice and degree of expansion of rice cracker. *J. Japanese Soc. Food Sci. Technol.* 41(11) : 747-754.
- Yuryev, V.P., Zasytkin, D.V., Alexeev, V.V., and Bogatyryev, A.N. (1995). Expansion ratio of extrudates prepared from potato starch-soybean protein mixtures. *Carbohydrate Polymers.* 26: 251-218.
- Zasytkin, D.V., and Lee, T.C. (1998). Extrusion of soybean and wheat flour as affected by moisture content. *J. Food Sci.* 63(6): 1058-1061.

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์

1. การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. อบภาชนะอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้นในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบใส่ไว้ในโถดูดความชื้น จนกระทั่งอุณหภูมิของภาชนะถึงที่อุณหภูมิห้อง แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างให้ได้น้ำหนักที่แน่นอน 1-3 กรัม ใส่ลงในภาชนะหาความชื้นซึ่งทราบน้ำหนักแล้ว
3. อบตัวอย่างในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 5-6 ชั่วโมง
4. นำออกจากตู้อบใส่ในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก
5. คำนวณปริมาณความชื้นจากสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณความชื้นคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก} = \frac{\text{ผลต่างของน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

2. การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า (AOAC, 1997)

วิธีการ

1. เผาด้วยกระบี่อบเคลือบในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งน้ำหนักให้ได้ตัวอย่างแน่นอนประมาณ 2 กรัม ใส่ในด้วยกระบี่อบเคลือบซึ่งทราบน้ำหนัก แล้วเผาตัวอย่างในตู้จนหมดควัน แล้วจึงนำเข้าเตาเผาอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส
3. คำนวณปริมาณเถ้าจากสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณเถ้าคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

3. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (AOAC, 1997)

อุปกรณ์

1. เครื่องย่อยโปรตีน Kjeldatherm (Gerhardt)
2. เครื่องกลั่นไนโตรเจน Vapodest 30 (Gerhardt)

วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองให้ได้น้ำหนักแน่นอนประมาณ 0.5-1.0 กรัม ห่อให้มิดชิดใส่ลงในขวดย่อยโปรตีน พร้อมกับลูกแก้ว 4-5 ลูก
2. เติมสารเร่งปฏิกิริยา (สารผสมระหว่างคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) และโพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) ในอัตราส่วน 1 : 10) จำนวน 5.0 กรัม
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) ปริมาตร 15-20 มิลลิลิตร และสารป้องกันการเกิดฟอง (anti-foaming agent) 4-5 หยด
4. ย่อยตัวอย่างโดยใช้เครื่องย่อยโปรตีนที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
5. เติมน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 32 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตรอย่างละ 100 มิลลิลิตร ในสารละลายที่ได้จากการย่อยตัวอย่างด้วยเครื่องกลั่นไนโตรเจน
6. กลั่นจนได้ปริมาตรของเหลวในขวดรูปชมพู่ 150 มิลลิลิตร ซึ่งเติมอินดิเคเตอร์ (สารผสมระหว่างเมทิลีนบลู เมทิลเรด และโบรโมคลีซอลกรีน) เรียบร้อยแล้ว โดยใช้สารละลายกรดบอริก 4 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ในการดักจับแก๊สไนโตรเจน
7. ไตเตรทสารละลายที่กลั่นได้ และสารละลายที่ไรตัวอย่างกับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
8. คำนวณปริมาณโปรตีนจากสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณโปรตีนคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก} = \frac{(A-B) N \times 1.4 \times F}{W}$$

- เมื่อ
- A = ปริมาณกรดที่ใช้ไตเตรทกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 - B = ปริมาณกรดที่ใช้ไตเตรทกับสารละลายที่ไรตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 - N = ความเข้มข้นของกรด (นอร์มัล)
 - F = ค่าคงที่สำหรับแป้งข้าวเจ้าคือ 6.25
 - W = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

4. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 1997)

อุปกรณ์

ชุดสกัดไขมัน Soxtherm (S306 AK, Gerhardt)

วิธีการ

1. อบบีกเกอร์สำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมันในตู้อบไฟฟ้า ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 1-2 กรัม ห่อให้มิดชิด
3. ใส่ตัวอย่างใน thimble คลุมด้วยสำลีเพื่อให้สารละลายมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ
4. นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในชอคเลต
5. เติมสารตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ ในบีกเกอร์หาไขมันประมาณ 200 มิลลิลิตร
6. ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควบแน่น และเปิดสวิทช์ให้ความร้อน
7. ใช้เวลาในการสกัดไขมัน 3-4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส จนแห้งใช้เวลาประมาณ 30 นาที ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
8. ชั่งน้ำหนัก และคำนวณปริมาณไขมันจากสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาณไขมันคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก} = \frac{\text{น้ำหนักไขมันหลังอบ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

5. การวิเคราะห์ปริมาณใยอาหาร (AOAC, 1997)

อุปกรณ์

ชุดวิเคราะห์ปริมาณใยอาหาร Fibertec System E

- shaking water bath

- Filtration Module

เอนไซม์

1. Heat-stable α -amylase (Sigma No. A0164)
2. Protease (Sigma No. P3910)
3. Amyloglucosidase (Sigma No. A9913)

วิธีการ

1. เตาถ้วยกระเบื้องเคลือบ (Fritted crucible) 6 ใบ (4 ใบสำหรับตัวอย่าง และ 2 ใบสำหรับแบลจก์) ในเตาเผา ทำให้เย็น เติม celite 0.5 กรัม อบให้แห้งจนได้น้ำหนักคงที่ เก็บในตู้ดูดความชื้น

2. ถ้าตัวอย่างมีไขมันมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ให้สกัดไขมันออกก่อน อบตัวอย่างให้แห้งในตู้อบ 105 องศาเซลเซียส บดตัวอย่างให้ละเอียด แล้วเก็บในตู้ดูดความชื้น
 3. ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ทรงสูง เติมฟอสเฟสบัฟเฟอร์ 50 มิลลิลิตร
 4. เติม α -amylase 0.2 มิลลิลิตร ลงในแต่ละบีกเกอร์ ผสมให้เข้ากัน ปิดบีกเกอร์ด้วย aluminium foil ต้มให้เดือด 30 นาที โดยจับเวลาเมื่อของเหลวภายในมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึง 95 องศาเซลเซียส เขย่าบีกเกอร์ทุกๆ 5 นาที ทำให้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง
 5. ปรับสารละลายให้มี pH 7.5 ด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.17 โมลาร์ (ใช้ H_3PO_4 ช่วยในการปรับ pH ถ้าจำเป็น)
 6. เติม Protease 5 มิลลิกรัม โดยเตรียมเป็นสารละลาย 5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในฟอสเฟสบัฟเฟอร์ โดยละลาย protease 0.035 กรัม ในบัฟเฟอร์ 7 มิลลิลิตร และใช้สารละลาย protease 1 มิลลิลิตร ต่อตัวอย่าง
 7. ปิดบีกเกอร์ด้วย aluminium foil แล้วบ่มใน shaking water bath อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที แล้วทำให้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง
 8. ปรับสารละลายให้เป็น pH 4.5 ด้วยกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) 0.205 โมลาร์
 9. เติม amyloglucosidase 0.3 มิลลิลิตร ปิดบีกเกอร์ด้วย aluminium foil แล้วบ่มใน shaking water bath อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
- Total Dietary Fiber
10. เติม 95 % ethanol อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 280 มิลลิลิตร หรือเติมปริมาตร 4 เท่า
 11. ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้เกิดตะกอนอย่างน้อย 60 นาที
 12. ทำให้ celite เปียกและกระจายให้ทั่วใน crucible ด้วยเอทานอล 78 เปอร์เซ็นต์ และใช้ suction ดูดให้ celite เรียงบน crucible อย่างสม่ำเสมอ ทำการ suction อย่างต่อเนื่อง ถ่ายตะกอนและสารละลายจากบีกเกอร์ของตัวอย่างลงใน crucible กรองและล้างด้วยเอทานอล 78 เปอร์เซ็นต์ 3 ครั้งๆ ละ 20 มล. แล้วล้างด้วยเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ 2 ครั้งๆ ละ 10 มิลลิลิตร และล้างครั้งสุดท้ายด้วยอะซีโตน 2 ครั้งๆ ละ 10 มิลลิลิตร
 13. อบ crucible ที่มีกากตัวอย่างค้างคืนในตู้อบ 105 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นในตู้ดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักเป็น residue + celite + crucible
 14. วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนจากกากที่ได้หนึ่งในสองของตัวอย่าง และหนึ่งในสองของแบลنگก์ ตามวิธีการวิเคราะห์โปรตีนในข้อ 3. และใช้ 6.25 เป็นค่าคงที่
 15. วิเคราะห์ปริมาณเถ้าจากกากใน crucible ที่เหลือ ตามวิธีข้อ 2. ชั่งน้ำหนักเป็น ash + celite + crucible Insoluble Dietary Fiber

16. ทำให้ celite เปียกและกระจายให้ทั่วใน crucible ด้วยเอทานอล 78 เปอร์เซ็นต์ และใช้ suction ดูดให้ celite เรียงบน crucible อย่างสม่ำเสมอ แล้วกรองของผสมจากการย่อยด้วย เอนไซม์ข้อ 9 ผ่าน crucible

17. ล้างภาควัสดุน้ำอุ่น 70 องศาเซลเซียส 2 ครั้งๆ ละ 10 มิลลิลิตร ใช้น้ำอุ่นสำหรับล้าง crucible เก็บส่วนที่กรองได้ และน้ำล้างไว้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารที่ละลายได้ โดยถ่าย สารละลายลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร และปฏิบัติตามต่อไปในข้อ 20

18. ล้างภาควัสดุน้ำร้อนบน crucible ด้วยเอทานอล 78 เปอร์เซ็นต์ 3 ครั้งๆ ละ 20 มิลลิลิตร แล้วล้างด้วยเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ 2 ครั้งๆ ละ 10 มิลลิลิตร และล้างครั้งสุดท้ายด้วยอะ ซีโตน 2 ครั้งๆ ละ 10 มิลลิลิตร

19. ปฏิบัติต่อตามข้อ 13-15

Soluble Dietary Fiber

20. ชั่งสารละลายจากข้อ 17 แล้วคำนวณเป็นปริมาตรของน้ำที่มีในสารละลาย

21. เติมเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ อุ่นที่ 60 องศาเซลเซียส ปริมาตร 3.2 เท่า ตั้งทิ้งไว้ให้ ตกตะกอนที่อุณหภูมิห้องนาน 60 นาที แล้วปฏิบัติตามขั้นตอนข้อ 12-15

การคำนวณ

$$1. \text{ Residue weight} = (\text{Residue} + \text{celite} + \text{crucible}) - (\text{celite} + \text{crucible})$$

$$2. \text{ Ash weight} = (\text{Ash} + \text{celite} + \text{crucible}) - (\text{celite} + \text{crucible})$$

$$3. \% \text{ Protein in blank residue} = \frac{(\text{mg protein in blank}) \times 100}{(\text{blank residue weight in mg.})} = \text{Pb}$$

$$4. \% \text{ Ash in blank residue} = \frac{(\text{mg ash in blank}) \times 100}{(\text{blank residue weight in mg.})} = \text{Ab}$$

$$5. \% \text{ Protein in sample residue} = \frac{(\text{mg protein in sample}) \times 100}{(\text{sample residue weight in mg.})} = \text{Ps}$$

$$6. \% \text{ Ash in sample residue} = \frac{(\text{mg ash in sample}) \times 100}{(\text{sample residue weight in mg.})} = \text{As}$$

$$7. \text{ Blank} = \text{Wb} - \{[(\text{Pb} + \text{Ab})/100] \times \text{Wb}\}$$

เมื่อ Wb = น้ำหนักเฉลี่ยของ blank residue in mg.

$$8. \% \text{ Total dietary fiber} = \frac{\text{Ws} - [(\text{Ps} + \text{As})/100 \times \text{Ws}] - \text{blank}}{(\text{average weight of samples in mg.})} \times 100$$

เมื่อ Ws = average weight of sample residues in mg.

6. การวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส (Juliano, 1971)

อุปกรณ์

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

สารเคมี

1. เอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล
3. กรดอะซิติก (acetic acid) 1 นอร์มัล
4. สารละลายไอโอดีน (ซึ่งไอโอดีน 0.2 กรัม และโปแทสเซียมไอโอไดด์ 2.0 กรัม

ละลายในน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร)

5. อะมิโลสบริสุทธิ์

วิธีการ

1. ชั่งแป้ง 0.1000 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ เพื่อให้แป้งกระจายตัว
2. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 9 มิลลิลิตร
3. นำไปต้มในน้ำเดือดนาน 10 นาที ทิ้งให้เย็น ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ค้างคืน
4. ใช้ปิเปตดูดสารละลายแป้งที่เตรียมไว้มา 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร กรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน จำนวน 2 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที
5. นำไปวัดค่าความเข้มสีของสารละลายโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic 21) ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร อ่านค่าการดูดกลืนสี (absorbance) เปรียบเทียบกับเบลนก์ (blank)
6. นำอะมิโลสบริสุทธิ์ 0.0400 กรัม เตรียมให้เป็นสารละลายแป้งเช่นเดียวกับตัวอย่าง ทิ้งไว้ค้างคืน เขย่าให้เข้ากัน ดูดสารละลายแป้งมาตรฐานมา 1, 2, 3, 4, และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร กรดอะซิติกความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ตามลำดับ และสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที อ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร เขียนกราฟระหว่างความเข้มข้นของอะมิโลสกับค่าการดูดกลืนแสง
7. กำหนดปริมาณอะมิโลสจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐาน แล้วแสดงค่าเป็นร้อยละของน้ำหนัก

7. การวิเคราะห์ปริมาณสตาร์ช (Roe, 1955)

อุปกรณ์

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

Reflux condenser

สารเคมี

1. Standard glycogen solution 50 $\mu\text{g/ml}$

2. 2% Anthrone (in ethyl acetate)

วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างแห้งประมาณ 2 กรัม ใส่ใน ground joint, flat bottom flask ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ 200 มิลลิลิตร คัมให้เดือดบน hot plate โดยใช้ reflux condenser นาน 20 นาที

2. ทำให้เย็น เทส่วนใสออก แล้วล้างกากอีกครั้งด้วยเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนเล็กน้อย แล้วเทส่วนใสทิ้ง

3. เติมเอทานอล 200 มิลลิลิตร และ กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร ลงในกากที่เหลือ ทำการ reflux 15 นาที กรองขณะร้อนด้วยสุญญากาศ ล้างกากด้วยเอทานอล 100 มิลลิลิตรทิ้ง ส่วนของเหลวที่กรองได้

4. ถ่ายกากที่ได้ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร เติมน้ำ 100 มิลลิลิตร คัมให้เดือด 35 นาที กรองขณะร้อนจนกระทั่งกากที่เหลือแห้ง ล้างกากด้วยน้ำร้อน 30 มิลลิลิตร ทิ้งกาก

5. ของเหลวที่ได้จากการกรอง เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดปรับปริมาตร

6. ปิเปตสารละลายที่เตรียมได้ (ถ้าจำเป็นให้เจือจางตัวอย่าง) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลองหลอดที่ 1 น้ำ 2 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลองที่ 2 (blank) และสารละลายมาตรฐาน glycogen 2 มิลลิลิตร ใส่หลอดที่ 3

7. ในแต่ละหลอดทดลองเติม anthrone เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 0.5 มิลลิลิตร เติม conc. H_2SO_4 5 มิลลิลิตร ค่อยๆ เติมให้ H_2SO_4 เป็นชั้นอยู่ส่วนล่างของหลอดทดลอง เขย่าหลอดทดลองเบาๆ ให้ ethyl acetate ถูกไฮโดรไลซ์ โดยจะสังเกตจากกลุ่มตะกอนของ anthrone ที่เกิดขึ้น แล้วเขย่าอย่างรวดเร็วให้สีที่เกิดขึ้นผสมกัน

8. ตั้งทิ้งไว้ 20 นาทีในที่มืด แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร โดยใช้ตัวอย่างน้ำเป็นแบล็ก

9. กำหนดปริมาณสตาร์ชของตัวอย่างโดย Beer and Lambert's Law

$$\text{Conc. Sample} = \frac{\text{Abs. Sample} \times \text{Conc. Std} \times \text{DF}}{\text{Abs. Std}}$$

8. การวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลาตินในซีเซชันของสตาร์ช (Chiang and Johnson, 1977)

อุปกรณ์

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)

สารเคมี

1. O-Toluidine Reagent โดยละลาย thiourea 1.5 กรัม ในกรดอะซีติกเข้มข้น 940 มิลลิลิตร และเติม o-toluidine 60 มิลลิลิตร เก็บในขวดสีชา
2. Sodium Acetate Buffer ละลาย anhydrous sodium acetate 4.1 กรัม ในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร และปรับให้เป็น pH 4.5 ด้วยกรดอะซีติก
3. Glucoamylase solution ละลาย Rhizopus glucoamylase (Sigma No. A7255) ใน Sodium Acetate Buffer 250 มิลลิลิตร กรองและใช้ภายใน 2 ชั่วโมง
4. 25% trichloroacetic acid

วิธีการ

1. เตรียมตัวอย่างที่สตาร์ชถูกเจลาตินในซีไปทั้งหมด โดยเตรียมเอกซ์ทราคตในน้ำให้มีความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ นำเข้าหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาผสมเมทานอลปริมาตร 3 เท่า ปั่นด้วยความเร็วสูง แล้วล้างด้วยเมทานอล 2 ครั้ง กรอง และทำให้แห้ง แล้วบดตัวอย่างที่ได้ผ่านตระแกรงขนาด 80 เมช นำตัวอย่างที่ได้ 20 มิลลิกรัม กับน้ำกลั่น 3 มิลลิลิตร ในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 นอร์มัล 1 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 5 นาที แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล 1 มิลลิลิตร เติมสารละลายเอนไซม์ glucoamylase 25 มิลลิลิตร ในแต่ละหลอด บ่มที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
2. เตรียมตัวอย่างที่สตาร์ชถูกเจลาตินในซีไปบางส่วน โดยผสมตัวอย่างเอกซ์ทราคต 20 มิลลิกรัม กับน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาด 50 มิลลิลิตร
3. เติม 25% Trichloroacetic acid (TCA) 2 มิลลิลิตร เพื่อยับยั้งและตกตะกอนเอนไซม์
4. ปั่นเหวี่ยงที่ 16,000 x g เป็นเวลา 5 นาที
5. เปิดส่วนใส 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง เติม o-toluidine reagent 4.5 มิลลิลิตร
6. วางหลอดทดลองในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วทำให้เย็นลงด้วยน้ำเย็น
7. เติมกรดอะซีติกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 630 นาโนเมตร

การคำนวณ

$$Y = \frac{100(B - k)}{A - k}$$

$$\text{เมื่อ } k = \frac{A(C - B)}{A - 2B + C}$$

- A = ค่าการดูดกลืนแสงของสตาร์ชที่ถูกเจลาตินไนซ์ไปทั้งหมด
- B = ค่าการดูดกลืนแสงของสตาร์ชที่ถูกเจลาตินไนซ์ไปบางส่วนหลังการบ่มด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 30 นาที
- C = ค่าการดูดกลืนแสงของสตาร์ชที่ถูกเจลาตินไนซ์ไปบางส่วนหลังการบ่มด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 60 นาที
- k = ค่าคงที่สำหรับแต่ละพันธุ์ของสตาร์ช
- Y = เปอร์เซ็นต์เจลาตินไนซ์สตาร์ช

ภาคผนวก ข

คำตอบสนองเจตีย์ของตัวแปรตามการแปรรูปและสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 1ข ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์

feed moisture content (%)	screw speed (rpm)	barrel temperature (°C)	torque (%)	SME (kJ/kg)	product temperature (°C)	die pressure (psi)
20	250	170	93.0	334.54	164.5	300
20	350	170	80.5	405.40	165.0	215
24	250	170	69.5	237.41	161.5	230
24	350	170	62.0	296.65	163.0	185
20	300	160	87.5	377.70	154.0	320
20	300	180	81.0	349.64	173.0	205
24	300	160	66.5	272.73	152.5	230
24	300	180	66.5	272.73	170.5	190
22	250	160	82.5	289.38	155.5	310
22	250	180	80.5	282.36	170.5	230
22	350	160	71.0	348.65	154.5	255
22	350	180	69.0	338.83	171.0	200
22	300	170	75.0	315.68	163.5	245
22	300	170	74.0	311.47	164.0	235
22	300	170	74.0	311.47	163.5	245

ตารางที่ 2ข ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ
10 เปอร์เซ็นต์

feed moisture content (%)	screw speed (rpm)	barrel temperature (°C)	torque (%)	SME (kJ/kg)	product temperature (°C)	die pressure (psi)
20	250	170	87.5	313.43	140.0	225
20	350	170	79.5	398.69	140.5	175
24	250	170	70.0	238.19	139.0	160
24	350	170	63.5	302.50	137.5	155
20	300	160	89.0	382.57	137.0	245
20	300	180	82.0	352.48	145.5	200
24	300	160	71.5	291.95	133.0	195
24	300	180	68.0	277.66	144.0	175
22	250	160	84.5	295.05	133.5	250
22	250	180	81.0	282.83	144.0	160
22	350	160	76.5	373.97	134.5	205
22	350	180	75.0	366.63	148.0	160
22	300	170	76.0	318.45	139.5	165
22	300	170	76.5	320.54	139.5	160
22	300	170	77.0	322.64	139.5	165

ตารางที่ 3ข ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ
20 เปอร์เซ็นต์

feed moisture content (%)	screw speed (rpm)	barrel temperature (°C)	torque (%)	SME (kJ/kg)	product temperature (°C)	die pressure (psi)
20	250	170	84.0	302.48	155.5	185
20	350	170	67.0	317.50	154.0	200
24	250	170	66.5	230.76	151.0	170
24	350	170	52.0	248.95	152.5	160
20	300	160	78.0	337.16	147.5	220
20	300	180	74.0	324.01	161.5	190
24	300	160	57.5	235.97	142.5	170
24	300	180	60.5	252.66	159.5	160
22	250	160	75.0	266.89	144.5	220
22	250	180	70.0	250.92	159.5	160
22	350	160	60.0	299.57	146.5	180
22	350	180	58.0	285.00	161.0	140
22	300	170	63.5	267.54	153.5	160
22	300	170	64.5	271.76	153.5	170
22	300	170	64.0	269.64	153.5	165

ตารางที่ 4ข ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้
 ค้าง 20 เปอร์เซ็นต์

feed moisture content (%)	screw speed (rpm)	barrel temperature (°C)	torque (%)	SME (kJ/kg)	product temperature (°C)	die pressure (psi)
20	250	170	87.0	312.89	163	245
20	350	170	67.0	337.34	166	220
24	250	170	65.5	223.72	161	185
24	350	170	52.5	251.04	164	180
20	300	160	83.0	358.20	159	260
20	300	180	73.0	315.04	171	245
24	300	160	69.0	282.81	156	150
24	300	180	54.0	221.33	166	180
22	250	160	81.5	285.69	164	225
22	250	180	69.0	241.87	167	205
22	350	160	63.5	311.63	156	230
22	350	180	59.0	289.54	171	195
22	300	170	64.5	271.31	163	215
22	300	170	63.5	267.11	162	205
22	300	170	64.5	271.31	164	205

ตารางที่ 5x ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์

feed moisture content (%)	screw speed (rpm)	barrel temperature (°C)	expansion ratio	compression force (g)	piece density (g/cm ³)
20	250	170	3.26	4071.46	0.0527
20	350	170	2.97	5844.01	0.0492
24	250	170	2.76	7228.62	0.0589
24	350	170	2.66	8995.66	0.0548
20	300	160	3.16	4214.79	0.0560
20	300	180	2.63	5968.35	0.0471
24	300	160	2.96	6800.45	0.0584
24	300	180	2.37	10560.27	0.0554
22	250	160	3.13	4704.87	0.0577
22	250	180	2.95	6005.38	0.0528
22	350	160	3.01	5054.59	0.0532
22	350	180	2.08	8299.84	0.0530
22	300	170	2.95	5664.24	0.0518
22	300	170	2.96	5426.23	0.0517
22	300	170	2.97	5422.29	0.0535

ตารางที่ 6 ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์

feed moisture content (%)	screw speed (rpm)	barrel temperature (°C)	expansion ratio	compression force (g)	piece density (g/cm ³)
20	250	170	2.95	5493.87	0.0485
20	350	170	2.83	5034.20	0.0435
24	250	170	2.68	6841.76	0.0549
24	350	170	2.54	7619.44	0.0515
20	300	160	3.17	3848.32	0.0456
20	300	180	2.73	5771.80	0.0436
24	300	160	2.7	6483.74	0.0550
24	300	180	2.68	8547.62	0.0495
22	250	160	3.04	5144.52	0.0506
22	250	180	2.65	6713.82	0.0459
22	350	160	3.07	4954.21	0.0483
22	350	180	2.44	6895.84	0.0467
22	300	170	2.66	6649.19	0.0497
22	300	170	2.72	7193.22	0.0497
22	300	170	2.92	6452.40	0.0485

ตารางที่ 7ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์

feed moisture content (%)	screw speed (rpm)	barrel temperature (°C)	expansion ratio	compression force (g)	piece density (g/cm ³)
20	250	170	2.50	7265.38	0.0502
20	350	170	2.32	8866.04	0.0489
24	250	170	1.69	11814.50	0.0576
24	350	170	1.52	13892.75	0.0581
20	300	160	2.88	5768.02	0.0511
20	300	180	1.72	6868.95	0.0552
24	300	160	2.22	9614.68	0.0571
24	300	180	1.39	13158.81	0.0617
22	250	160	2.98	7594.40	0.0554
22	250	180	1.58	10157.24	0.0597
22	350	160	2.23	11231.30	0.0560
22	350	180	1.61	7730.46	0.0623
22	300	170	1.87	12184.00	0.0557
22	300	170	1.86	12220.76	0.0579
22	300	170	1.82	12281.31	0.0585

ตารางที่ 8 ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์

feed moisture content (%)	screw speed (rpm)	barrel temperature (°C)	expansion ratio	compression force (g)	piece density (g/cm ³)
20	250	170	2.67	8359.71	0.0554
20	350	170	2.55	7081.60	0.0521
24	250	170	2.30	12637.01	0.0604
24	350	170	2.26	10410.09	0.0571
20	300	160	2.67	6821.44	0.0550
20	300	180	2.58	6977.54	0.0537
24	300	160	2.01	12526.14	0.0562
24	300	180	2.25	10564.18	0.0542
22	250	160	2.46	9369.48	0.0566
22	250	180	2.44	8657.03	0.0565
22	350	160	2.54	7513.48	0.0570
22	350	180	2.41	8006.84	0.0553
22	300	170	2.62	8052.51	0.0556
22	300	170	2.60	7921.61	0.0561
22	300	170	2.69	7804.67	0.0567

ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางที่ 1๑ สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปสำหรับแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์

	torque (%)	specific energy (kJ/kg)	die pressure (psi)	product temperature (°C)
intercept	213.164	665.09	738.53	17.538
moisture (mc)	-4.844 **	-24.235 **	ns	ns
screw speed (ss)	ns	0.932 **	ns	ns
barrel temperature (temp)	ns	ns	ns	0.856 **
mc ²	ns	ns	ns	ns
ss ²	ns	ns	ns	ns
temp ²	ns	ns	ns	ns
mc × ss	ns	ns	ns	ns
mc × temp	ns	ns	- 8.674 X 10 ⁻² **	ns
ss × temp	- 6.098 X 10 ⁻⁴ **	1.864 X 10 ⁻³ **	- 3.421 X 10 ⁻² **	ns
R ²	0.93	0.959	0.769	0.806

* P<0.05, ** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 2ก สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปสำหรับแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์

	torque (%)	specific energy (kJ/kg)	die pressure (psi)
intercept	144.749	109.906	524.120
moisture (mc)	ns	ns	ns
screw speed (ss)	ns	ns	ns
barrel temperature(temp)	ns	ns	ns
mc ²	-9.26 X 10 ⁻² **	ns	ns
ss ²	ns	ns	ns
temp ²	ns	ns	ns
mc × ss	ns	- 5.442 X 10 ⁻² **	ns
mc × temp	ns	ns	- 6.79 X 10 ⁻² **
ss × temp	-4.42 X 10 ⁻⁴ **	1.142 X 10 ⁻² **	- 1.64 X 10 ⁻³ **
R ²	0.922	0.855	0.598

* P<0.05, ** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 3ก สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทรูชันสำหรับแป้งข้าวผสมรำ
ข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์

	torque (%)	specific energy (kJ/kg)	die pressure (psi)	product temperature (°C)
intercept	150.963	707.499	393.091	24.504
moisture (mc)	- 1.620 **	- 22.955 **	ns	ns
screw speed (ss)	ns	ns	ns	ns
barrel temperature(temp)	ns	ns	ns	0.756 **
mc ²	ns	ns	ns	ns
ss ²	ns	ns	ns	ns
temp ²	ns	ns	ns	ns
mc × ss	-7.413 X 10 ⁻³ **	1.135 X 10 ⁻² **	ns	ns
mc × temp	ns	ns	- 5.831 X 10 ⁻² **	ns
ss × temp	ns	ns	ns	ns
R ²	0.871	0.853	0.620	0.496

* P<0.05, ** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 4ล สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทรูชันสำหรับแป้งข้าว
ผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์

	torque (%)	specific energy (kJ/kg)	die pressure (psi)
intercept	206.903	656.282	399.766
moisture (mc)	ns	ns	ns
screw speed (ss)	- 0.153 **	ns	ns
barrel temperature(temp)	ns	ns	ns
mc ²	ns	ns	- 0.391 **
ss ²	ns	ns	ns
temp ²	ns	ns	ns
mc × ss	ns	ns	ns
mc × temp	- 2.497 X 10 ⁻² **	- 0.126 **	ns
ss × temp	ns	1.887 X 10 ⁻³ **	ns
R ²	0.918	0.927	0.689

* P<0.05, ** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 5ค สัมประสิทธิ์สัมพรรคผลของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์

	expansion ratio	piece density (g/cm ³)	compression force (g)
intercept	5.542	7.806 X 10 ⁻²	-16397.138
moisture (mc)	ns	ns	ns
screw speed (ss)	7.563 X 10 ⁻³ **	ns	ns
barrel temperature (temp)	ns	-2.113 X 10 ⁻⁴ **	ns
mc ²	ns	4.129 X 10 ⁻⁵ **	ns
ss ²	ns	ns	ns
temp ²	ns	ns	ns
mc × ss	ns	-1.370 X 10 ⁻⁶ **	ns
mc × temp	-4.46 X 10 ⁻⁴ **	ns	4.847 **
ss × temp	-6.45 X 10 ⁻⁵ **	ns	8.928 X 10 ⁻² **
R ²	0.790	0.659	0.869

* P<0.05, ** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 6 คัมประสิทธิภาพการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าว
ดิบ 10 เปอร์เซ็นต์

	expansion ratio	piece density (g/cm ³)	compression force (g)
intercept	26.563	5.057 X 10 ⁻²	-142290
moisture (mc)	-0.938 *	ns	ns
screw speed (ss)	ns	-2.462 X 10 ⁻⁵ **	ns
barrel temperature(temp)	-0.129 **	ns	1579.44 **
mc ²	ns	7.318 X 10 ⁻⁵ **	ns
ss ²	ns	ns	-7.17 X 10 ⁻² **
temp ²	ns	ns	-4.37 *
mc X ss	ns	ns	1.984 **
mc X temp	5.125 X 10 ⁻³ *	7.318 X 10 ⁻⁵ **	ns
ss X temp	-6.66 X 10 ⁻⁶ *	ns	ns
R ²	0.749	0.793	0.788

* P<0.05, ** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 7ค สัมประสิทธิ์สัมพรรคอดของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำ
ข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์

	expansion ratio	piece density (g/cm ³)	compression force (g)
intercept	12.308	1.595 X 10 ⁻²	-17061.241
moisture (mc)	ns	ns	1232.022 **
screw speed (ss)	ns	ns	ns
barrel temperature(temp)	-4.806 X 10 ⁻² **	ns	ns
mc ²	ns	ns	ns
ss ²	-1.500 X 10 ⁻⁵ **	ns	ns
temp ²	ns	ns	ns
mc × ss	-5.267 X 10 ⁻⁴ **	ns	ns
mc × temp	ns	1.080 X 10 ⁻⁵ **	ns
ss × temp	ns	ns	ns
R ²	0.926	0.682	0.494

* P<0.05, ** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 8ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเกตแป้งข้าวผสมรำ ข้าว
ที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์

	expansion ratio	piece density (g/cm ³)	compression force (g)
intercept	-10.081	4.596 X 10 ⁻²	138560.98
moisture (mc)	1.250 **	7.313 X 10 ⁻⁴ **	-12505.167 **
screw speed (ss)	ns	ns	308.210 **
barrel temperature(temp)	ns	ns	ns
mc ²	-3.074 X 10 ⁻² **	ns	ns
ss ²	ns	ns	ns
temp ²	ns	ns	ns
mc × ss	ns	ns	ns
mc × temp	ns	ns	ns
ss × temp	ns	-1.218 X 10 ⁻⁷ **	-8.689 X 10 ⁻² **
R ²	0.72	0.479	0.739

ประวัติผู้วิจัย

นางสุนันทา ทองทา

นางสุนันทา ทองทา เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2506 ณ จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วท.บ. (พัฒนาผลิตภัณฑ์) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2529 จบการศึกษาระดับปริญญาโท วท.ม. (วิทยาศาสตร์การอาหาร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2533 จากนั้นเข้ารับราชการบรรจุตำแหน่งอาจารย์ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีเดียวกัน ต่อมาในปี พ.ศ. 2536 ได้รับทุน Fulbright จากมูลนิธิการศึกษาไทย-อเมริกัน ไปศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ที่ University Of Illinois at Urbana-Champaign สหรัฐอเมริกา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2541

นางสุนันทา ทองทา ได้มีผลงานทางวิชาการดังต่อไปนี้

- สุนันทา ทองทา และ วรวิทย์ดา เกียรติพงษ์ลาภ. 2549. การผลิตแป้งทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์จากแป้งมันสำปะหลัง. รายงานวิจัยทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (หัวหน้าโครงการ)
- สุนันทา ทองทา และ กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2549. ผลของอุณหภูมิ ปริมาณน้ำ และการเปลี่ยนสมบัติทางกายภาพต่อการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งมันสำปะหลัง. รายงานวิจัยทบวงมหาวิทยาลัย และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. (หัวหน้าโครงการ)
- สุนันทา ทองทา, สุเวทย์ นิงสานนท์, กนกอร อินทราพิเชฐ และจิรวัดณ์ ยงสวัสดิกุล. 2549. การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพจากถั่วเหลือง: เนื้อเหียม, โยเกิร์ตถั่วเหลืองผง. รายงานผลการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. (หัวหน้าโครงการ)
- สุนันทา ทองทา และ มาโนชญ์ สุธีรวัฒนานนท์. 2546. ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการเอ็กซ์ทรักชันของข้าวกล้อง. รายงานผลการวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- สิงหนาท พวงจันทน์แดง, วิเชียร วรพุทธพร, สุนันทา ทองทา, เกษม นันทชัย, และวีระ สุวรรณสร. 2545. คุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากธัญพืชต่างๆ ที่ผลิตด้วยเครื่องอัดพอง. รายงานผลการวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุนันทา ทองทา และ วีระ สุวรรณสร. 2543. ผลของตัวแปรของกระบวนการอัดพองที่มีต่อผลิตภัณฑ์ข้าวเจ้าพองตัวโดยใช้เครื่องอัดพองแบบสกรูเดี่ยว. รายงานผลการวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สุนันทา วิริยาภิรมย์, กฤษดา คำเจริญ, และอนุชา รัตนภิกข. 2536. การพัฒนาแฮมมะขาม. แก่นเกษตร (2):107-114.

Siriboon, B. and Tongta, S.. 2007. Effect of Annealing on Physicochemical Properties of Waxy Rice. Poster presentation The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2006. Bangkok, Thailand.

- Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S.** 2007. Poster presentation The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2006. Bangkok, Thailand.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2007. Effect of soy protein isolate on chemical and Physical Characteristics of Meat Analog. Oral presentation The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2006. Bangkok, Thailand.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and Physical Properties of Debranched Tapioca Starch. Suranaree Journal of Science and Technology, 14(2):195-204.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2007. Effect of full fat soy flour on characteristics of soy protein meat analog. Suranaree Journal of Science and Technology, 14(2):185-193.
- Pakdeechanuan, P., Intarapichet, K. and **Tongta, S.** 2007. Effect of extrusion parameters on conjugated linoleic acids of corn extrudate. J. Agric. Food. Chem., 55: 1463-1468.
- Apirattananusorn, S., Cui, S.W., Wang, Q. and **Tongta, S.** 2006. Extraction and composition of water-unextractable arabinoxylans from Job's tears (*Coix lacryma-jobi* L.) (Abstract. pp. 238 and Poster presentation). 2006 CIFST/AAFC Joint Conference, May 28-30, 2006. Montreal, Canada.
- Kiatponglar, W. and **Tongta, S.** 2006. Effect of debranching on enzyme resistant starch formation in tapioca starch. Poster presentation. The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.**, Ningsanond, S. and Boonna, S. 2006. Influence of hydrocolloids and soy milk solid on physical and textural qualities of soy yoghurt. Poster presentation. The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.**, Kiatponglar, W. and K. Sriroth, K. 2004. Effect of aging temperature on retrogradation of concentrated cassava starch gel. In ' Starch: Progress in Structural studies, Modifications and Applications' Tomasik, P., Yuryev, V.P. and Bertoft, E. (eds.). pp. 357-364. Drukarnia GS, Cracow.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2004. Structure and texture characteristic of soy protein meat analog. Poster presentation. The 6th Agro-Industrial Conference. May28-29, 2004. Bangkok, Thailand.
- Sottirattanapan, P. and **Tongta, S.** 2003. Effect of extrusion parameters on physical characteristics of rice extrudate. Suranaree Journal of Science and Technology. 10(3):220-229.
- Nantachai, K. Srijesdaruk, V., **Wiriyapirom, S.** and Tungwongchai, R. 1997. Sensory perceptions of sugarcane juices. Knon kaen University Research Journal. 2(1):10-17.

- Wiryapirom,S.,** Wei, L.S. and Padua, G.W. 1996. Effect of soy protein isolates on physical characteristics of extruded expanded half-products. A presentation In Annual IFT Meeting. June 26,1996. New Orleans, USA
- Wiryapirom,S.,** Padua, G.W. and Wei, L.S. 1996. Effect of extrusion parameters on physical properties of half-products fortified with soy protein. A presentation In Annual IFT Meeting. June 15,1997. Orlando, USA

สถานที่ติดต่อ: สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 22-4266 โทรสาร (044) 22-4150