

ผลของการเติมรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ต่างต่อลักษณะทางกายภาพ
ของเอกซ์ทราคต์ข้าว

นางสาวปทุมพร โสติดิรัตนพันธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2546
ISBN 974-533-268-2

**EFFECTS OF NATIVE RICE BRAN AND ALKALINE-TREATED
RICE BRAN ADDITION ON PHYSICAL CHARACTERISTICS
OF RICE EXTRUDATE**

Miss Patumporn Sottirattanapan

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Food Technology
Suranaree University of Technology
Academic Year 2003
ISBN 974-533-268-2**

ผลของการเติมรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ต่างต่อลักษณะทางกายภาพ
ของเอกซ์ทราคเตดข้าว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. กนกกร อินทรพิเชฐ)
ประธานกรรมการ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

.....
(ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล เหล่าสุวรรณ)
กรรมการ

.....
(อาจารย์ ดร. มาโนชญ์ สุธีรวุฒนันท์)
กรรมการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีข จิตรสมบุญ)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. กนก ผลารักษ์)
คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ปทุมพร โสถิรัตนพันธุ์: ผลของการเติมรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ต่างต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตข้าว (EFFECTS OF NATIVE RICE BRAN AND ALKALINE-TREATED RICE BRAN ADDITION ON PHYSICAL CHARACTERISTICS OF RICE EXTRUDATE.) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. สุนันทา ทองทา, 114 หน้า. ISBN 974-533-268-2

การเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่เพื่อศึกษาผลของสภาวะการแปรรูปพบว่าเมื่อความชื้นวัตถุดิบ (20-24 เปอร์เซ็นต์) ความเร็วรอบสกรู (250-350 รอบต่อนาที) และอุณหภูมิ바เรล (160-180 องศาเซลเซียส) เพิ่มขึ้น มีผลให้อัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตลดลง แต่พบผลในทางตรงข้ามสำหรับค่าแรงที่ใช้กดเอกซ์ทรูเดตให้แตก ในขณะที่การแปรรูปด้วยความชื้นวัตถุดิบต่ำร่วมกับการใช้อุณหภูมิ바เรลสูงส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตมีความหนาแน่นต่ำ เอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวที่มีอัตราการขยายตัวสูงมีค่าความหนืดเริ่มต้นต่ำเมื่อวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว ระดับเจลลาติไนซ์เซชันของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวทั้งหมดอยู่ในช่วง 91-98 เปอร์เซ็นต์ การเติมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์ ในแป้งข้าวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ อัตราการขยายตัว และแรงกดแตกไม่แตกต่างกับการเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว แต่เมื่อเติมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ พบการลดลงของค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ ความดันที่หัวแบบ อัตราการขยายตัว และการเพิ่มขึ้นของแรงกดแตก และความหนาแน่น ($p < 0.05$) การศึกษาผลของการใช้ต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของรำข้าว พบว่ารำข้าวที่ใช้ต่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส โครงสร้างมีการเปิดตัวและเป็นรูพรุนมากขึ้น ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ต่างที่อุณหภูมิห้อง ($p < 0.05$) ในขณะที่โปรตีน ไขมัน เถ้า และสตาρχของรำข้าวที่ใช้ต่างมีปริมาณลดลง ส่วนใยอาหารมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวดิบ ($p < 0.01$) การศึกษาการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างแทนรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความดันที่หัวแบบ และอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีค่าสูงกว่าเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ ($p < 0.05$)

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

PATUMPORN SOTTIRATTANAPAN : EFFECTS OF NATIVE RICE BRAN AND
ALKALINE-TREATED RICE BRAN ADDITION ON PHYSICAL
CHARACTERISTICS OF RICE EXTRUDATE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.
SUNANTA TONGTA, Ph.D. 114 PP. ISBN 974-553-268-2

Rice flour was extruded using a twin-screw extruder. The results showed that expansion ratio decreased with an increase in feed moisture (20-24%), screw speed (250-350 rpm), and barrel temperature (160-170°C). However, the opposite effect on compression force was found. Low density of extrudate appeared as decreasing feed moisture with increasing barrel temperature. From Rapid Visco Analyser results, 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. At 10% native rice bran addition showed a non-significant difference in torque, specific mechanical energy, expansion ratio, and compression force, compared with rice flour extrusion. A decreased in torque, specific mechanical energy, expansion ratio, and an increased in compression force and density were found on the extrudates of 20% native rice bran addition ($p < 0.05$). The effects of alkaline-sodium hydroxide treated on physical characteristics were studied. The microstructure of alkaline-treated rice bran at 90°C exhibited more open structure, porosity and higher water holding capacity ($p < 0.05$) than those of native rice bran and alkaline-treated rice bran at room temperature for 16 hours. Alkaline-treated rice bran showed a decrease in protein, fat, ash, and starch content, but an increase in dietary fiber ($p < 0.01$), compared with native rice bran. The results of extrusion showed that the die pressure and expansion ratio of 20% alkaline-treated rice bran added was higher than that of native rice bran added ($p < 0.05$).

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ ช่วยเหลือในการ ศึกษาวิจัยอย่างดียิ่ง ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จ สมบูรณ์ กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กนกอร อินทราพิเชฐ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล เหล่าสุวรรณ และอาจารย์ ดร. มาโนชญ์ สุธีรพัฒนานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษามาโดยตลอด

ขอขอบคุณ นายวันชัย จอกระโทก และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ 3 มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่เสียสละเวลาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยด้วยดี ตลอดจนการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนๆ ร่วมเรียนระดับปริญญาโทที่ทำให้กำลังใจ และให้คำ ปรึกษาตลอดการเรียนรู้ที่ผ่านมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดู อบรม และส่งเสริมการศึกษา เป็นอย่างดีตลอดมา

ปทุมพร โสติดิรัตนพันธุ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2. ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว.....	6
2.2 เทคโนโลยีเอกซเรย์.....	8
2.3 วัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิต.....	11
2.4 ไร่ชัยพืชและการเปลี่ยนแปลงสมบัติ.....	17
3. ผลของการเติมรำข้าวและสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะทางกายภาพของ เอกซเรย์ข้าว.....	22
3.1 บทนำ.....	25
3.2 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ.....	27
3.3 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	32
3.3.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น.....	32

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อตัวแปรตามการแปรรูป จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	33
3.3.3 ความหนืดของเอกซ์ทรูเดต.....	41
3.3.4 ระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชัน.....	42
3.3.5 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต.....	44
3.3.6 ผลของการเติมรำข้าว.....	53
3.4 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	55
4. ผลของการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตข้าว.....	56
4.1 บทนำ.....	59
4.2 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ.....	60
4.3 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	62
4.3.1 ผลการใช้ต่างต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรำข้าว.....	62
4.3.2 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อตัวแปรตามการแปรรูป จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน.....	66
4.3.3 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต.....	73
4.4 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	79
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	114

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณอะมิโลสในข้าวไทยชนิดต่างๆ.....	7
2.2 คุณค่าทางโภชนาการของข้าวขาว ข้าวกล้อง และรำข้าว.....	8
3.1 รูปแบบการจัดเรียงสกรู.....	28
3.2 การตั้งอุณหภูมิของบารเล.....	28
3.3 แผนการทดลอง.....	29
3.4 ค่าความหนืดจากการวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วของแป้งข้าว และเอกซ์ทรูเดตข้าว 100 เปอร์เซนต์.....	42
3.5 ค่าเฉลี่ยของระดับการเกิดเจลลาคีโนซีเซชันของเอกซ์ทรูเดตจากกระบวนการ เอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซนต์.....	43
3.6 ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างตัวแปรตามการแปรรูปกับลักษณะทางกายภาพของ เอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซนต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซนต์.....	47
3.7 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปกับลักษณะทางกายภาพของ เอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซนต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซนต์....	54
3.8 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวและรำข้าว.....	54
4.1 ผลของการใช้อุณหภูมิและระยะเวลาต่อค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าว.....	65
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ต่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง.....	65
4.3 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปและลักษณะทางกายภาพของ เอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบกับแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซนต์.....	67
1ข ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซนต์.....	97
2ข ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสม รำข้าวดิบ 10 เปอร์เซนต์	98
3ข ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสม รำข้าวดิบ 20 เปอร์เซนต์	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4ข ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสม รำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซนต์.....	100
5ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซนต์.....	101
6ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซนต์.....	102
7ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซนต์.....	103
8ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซนต์.....	104
1ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปสำหรับแป้งข้าว 100 เปอร์เซนต์.....	106
2ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปสำหรับแป้งข้าวผสม รำข้าวดิบ 10 เปอร์เซนต์.....	107
3ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทรูชันสำหรับแป้งข้าว ผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซนต์.....	108
4ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทรูชันสำหรับแป้งข้าว ผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซนต์.....	109
5ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซนต์.....	110
6ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว ผสมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซนต์.....	111
7ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว ผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซนต์.....	112
8ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว ผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซนต์	113

สารบัญภาพ

ภาพที่

หน้า

2.1	โครงสร้างของเซลล์โลส.....	18
2.2	โครงสร้างของอะราบีโนไซด์.....	18
2.3	การรวมตัวกันขององค์ประกอบในผนังเซลล์พืช.....	19
3.1	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงตอร์คที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....	34
3.2	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงตอร์คที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิ바เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....	35
3.3	พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....	37
3.4	พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิ바เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....	38
3.5	พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และอุณหภูมิ바เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....	39
3.6	พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิ바เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....	40
3.7	พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนืดขณะเย็นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และอุณหภูมิ바เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์.....	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8	พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิใบเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....45
3.9	พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และอุณหภูมิใบเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....46
3.10	พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....48
3.11	พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และอุณหภูมิใบเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์.....49
3.12	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และอุณหภูมิใบเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์.....51
3.13	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิใบเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์.....52
4.1	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 (f) รำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 16 ชั่วโมง....63
4.2	พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์คที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์.....67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่

หน้า

- 4.3 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์กในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าว
ที่ใช้ค่า 20 เปอร์เซนต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรู
และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิ바레.....68
- 4.4 พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ
และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20
เปอร์เซนต์.....69
- 4.5 พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว
ผสมรำข้าวที่ใช้ค่า 20 เปอร์เซนต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ
และความเร็วรอบสกรู และเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความชื้นวัตถุดิบและ
อุณหภูมิ바레.....70
- 4.6 พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว
ผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซนต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและ
อุณหภูมิของ바레.....72
- 4.7 กราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นของแป้งข้าวผสมรำข้าว
ที่ใช้ค่า 20 เปอร์เซนต์ กับความดันที่หัวแบบ.....72
- 4.8 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว
ผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซนต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและ
ความเร็วรอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิ바레.....75
- 4.9 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว
ผสมรำข้าวที่ใช้ค่า 20 เปอร์เซนต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ
และความเร็วรอบ สกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและ
อุณหภูมิ바레.....76
- 4.10 พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและ
อุณหภูมิ바레ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซนต์.....77
- 4.11 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสม
รำข้าวที่ใช้ค่า 20 เปอร์เซนต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและ
ความเร็วรอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิ바레.....78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ขนมขบเคี้ยวนับว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างสูงจากผู้บริโภค ปัจจุบันสามารถพบผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวได้ตามร้านค้าและซูเปอร์มาร์เก็ตทั่วไป มีทั้งชนิดที่รับประทานได้ทันที และชนิดที่ต้องนำไปอบหรือทอดก่อนจึงจะรับประทานได้ กลุ่มผู้บริโภคส่วนใหญ่ที่นิยมบริโภคขนมขบเคี้ยวคือเด็กในวัยเรียนซึ่งมักรับประทานเป็นอาหารว่างระหว่างมื้อ โดยทั่วไปขนมขบเคี้ยวส่วนมากมีคุณค่าทางอาหารต่ำ ส่วนใหญ่มีคาร์โบไฮเดรตและไขมันเป็นองค์ประกอบหลัก เพราะวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำขนมขบเคี้ยวเป็นพวกแป้งชนิดต่างๆ ซึ่งได้มาจากธัญชาติและพืชหัว เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง เป็นต้น กระบวนการผลิตขนมขบเคี้ยวที่เป็นเทคโนโลยีทันสมัยและมีความเหมาะสมคือกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เพราะเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง ระยะเวลาสั้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี มีความพองตัวดี กรอบ มีรูปร่างและขนาดหลากหลายตามความต้องการ มีอัตราการผลิตสูง ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงน้อย ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศ แต่ในอนาคตคาดว่าค่าข้าวจะมีการแข่งขันกันสูงขึ้น และประเทศผู้นำเข้าข้าวจากไทยจะผลิตข้าวได้เองมากขึ้น ทำให้ความต้องการข้าวจากไทยลดลง ดังนั้นการแปรรูปอาหารจากข้าวเพื่อส่งขายภายในและต่างประเทศจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าแก่ข้าวให้สูงขึ้นด้วย ข้าวเป็นวัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวและผลิตภัณฑ์อาหารเข้า เนื่องจากแป้งข้าวมีการพองตัวที่ดีมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีขาวและไม่มีรสขาคี จึงเหมาะแก่การปรุงแต่งสี กลิ่น และรส (Matz, 1991) การวิจัยเกี่ยวกับการใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบในกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีอยู่ค่อนข้างมาก ดังมีการศึกษาถึงการนำข้าวมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเข้าชนิดแผ่น (จิราภา เมืองคล้าย, 2539) การศึกษาทางด้านวัตถุดิบ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และ ประชา บุญญศิริกุล, 2538; Han et al., 1988) และกระบวนการแปรรูป (Tomas et al., 1994; Choudhury and Gautam, 1999) ที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งการศึกษการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการแก่ผลิตภัณฑ์ด้วยการเติมโปรตีนจากแหล่งอื่น (ประชา บุญญศิริกุล และคณะ, 2539) ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบเป็นข้าวหรือแป้งจากข้าวสารที่ผ่านการขัดสีแล้ว

ปัจจุบันผู้บริโภคหันมาให้ความสำคัญต่อการบริโภคใยอาหารมากขึ้น เนื่องจากพบว่าผู้บริโภคใยอาหารในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกายจะช่วยป้องกันการเกิดโรคบาง

ชนิดได้ เช่น การบริโภคโยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำจะช่วยป้องกันการเกิดโรคมะเร็งในลำไส้ เพราะโยอาหารมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงทำให้กากอาหารมีความนุ่มและมีน้ำหนักมากขึ้น ลำไส้จึงบีบตัวเพื่อขับถ่ายอุจจาระออกจากร่างกายได้เร็ว และเมื่อกากอาหารอยู่ภายในลำไส้ในระยะเวลาที่สั้นลง การดูดซึมสารอาหารประเภทไขมันและแคลอรีก็ต่ำลงจึงป้องกันการเกิดโรคอ้วนได้ ส่วนโยอาหารชนิดที่ละลายน้ำได้มีรายงานถึงผลการช่วยลดระดับโคเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือดได้ (Cho et al., 1999) ข้าวเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณโยอาหารสูงประมาณ 26-30 เปอร์เซ็นต์ ในขั้นตอนของการกะเทาะเปลือกและการขัดสีจะมีรำหยาบและรำละเอียดเป็นผลพลอยได้ประมาณ 8-10 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณข้าวเปลือก ข้าวมีราคาถูก ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เลี้ยงสัตว์ และบางส่วนนำไปสกัดน้ำมัน แต่การใช้ประโยชน์ในด้านอื่นยังไม่กว้างขวางนัก (สายสนมประดิษฐดวง, 2541; Oakenfull, 1989) นอกจากนี้ข้าวยังมีคุณค่าทางโภชนาการอื่นๆ เช่น โปรตีน วิตามินต่างๆ ธาตุเหล็ก และสารออไรซานอล (oryzanol) จึงเป็นแหล่งวัตถุดิบหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อนำมาใช้เพิ่มในการผลิตขนมขบเคี้ยวจากข้าว การเติมวัตถุดิบที่มีสารอาหารประเภทโปรตีนไขมัน และโยอาหารสูงทำให้เกิดความยากในการควบคุมการแปรรูป และส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ด้อยลง เมื่อปริมาณโปรตีนสูงขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการขยายตัวต่ำลง และความชอบทางด้านเนื้อสัมผัสต่ำลง (ประชา บุญญศิริกุล และคณะ, 2539; Pan et al., 1991) ส่วนปริมาณไขมันและโยอาหารที่สูงก็ส่งผลให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์สูง และการขยายตัวต่ำลง (Grenus et al., 1993; Jin et al., 1994; Berglund et al., 1994) การผลิตขนมขบเคี้ยวจากแป้งข้าวด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันเพื่อให้ได้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ดี เช่น อัตราการขยายตัวสูง ความหนาแน่นต่ำ และมีความกรอบ จึงต้องคัดเลือกตัวแปรการผลิตทั้งทางด้านวัตถุดิบและการแปรรูปที่มีความเหมาะสม ในการคัดเลือกพันธุ์ข้าว พบว่าอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินมีอิทธิพลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยข้าวเหนียวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำมากให้เอกซ์ทรูเดตที่มีความเหนียวสูง และมีการขยายตัวต่ำกว่าเอกซ์ทรูเดตจากข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำในช่วงประมาณ 12.8-16.7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อข้าวมีปริมาณอะมิโลสสูงขึ้นจะส่งผลให้การขยายตัวลดลง (Pan et al., 1991; Yoshii and Arisaka, 1994) ดังนั้นการผลิตผลิตภัณฑ์พองตัวจึงควรเลือกใช้พันธุ์ข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ข้าวไทยที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำและเพาะปลูกกันมากคือพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 การศึกษาผลของขนาดอนุภาคและปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ พบว่าขนาดอนุภาคของแป้งข้าวในช่วง 50-100 ไมครอน ให้เอกซ์ทรูเดตที่มีความพองตัวดีกว่า และความหนาแน่นต่ำกว่าเอกซ์ทรูเดตที่เตรียมจากอนุภาคในช่วง 30-50 ไมครอน ส่วนแป้งข้าวที่มีความชื้น 15 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตดีกว่าเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวความชื้น 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และ ประชา บุญญศิริกุล, 2538; Ryu and Lee, 1988; Han et al., 1988) การเติมโยอาหารร่วมกับสตาร์ชในกระบวนการเอกซ์ทรูชันทำให้สตาร์ชมีความต้องการ

น้ำเพื่อใช้ในการเกิดเจลลาตินในซเซชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากโยอาหามีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงจึงไปแย่งจับน้ำกับสตาร์ช ดังนั้นวัตถุดิบที่มีโยอาหามีความต้องการความชื้นแตกต่างไปจากแป้งธัญชาติปกติ (Lue et al., 1991) Grenus et al. (1993) พบว่าความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอกซ์ทราคเตอร์มีบทบาทสำคัญต่อค่าพลังงานกลจำเพาะ เมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะสูงขึ้น แต่ส่งผลให้การขยายตัวของเอกซ์ทราคเตอร์ลดลง เนื่องจากเวลาเฉลี่ยที่ได้อยู่ภายในบารเรลดทำให้ระดับการเกิดเจลลาตินในซเซชันต่ำลงด้วย การเติมรำข้าวลงในแป้งข้าวมีผลให้ค่าตัวแปรตามจากเครื่องเอกซ์ทราคเตอร์ เช่น แรงทอร์ค ความดันที่หัวแบบ ค่าพลังงานกลจำเพาะ และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป ดังนั้นการใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของรำข้าวจึงเป็นที่น่าสนใจ ดังนั้นงานวิจัยการใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของโยอาหากรำพวงรำธัญพืชต่างๆ โยอาหาที่ผ่านการใช้ด่างมีลักษณะเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่มลง โครงสร้างมีลักษณะเป็ดมากขึ้น จึงดูดน้ำเข้าไปในโครงสร้างได้มากกว่าโยอาหาปกติที่ดูดน้ำได้มากบริเวณส่วนรอบนอกเท่านั้น (Ning et al., 1991) ด้านประโยชน์ของโยอาหาที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงสมบัติแล้ว การศึกษาของ Gould et al. (1989) พบว่าการให้โยอาหาที่ใช้ด่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) แก่สัตว์ทดลองส่งผลให้อัตราและประสิทธิภาพของการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักตัวในสัตว์ทดลอง เนื่องจากความสามารถในการย่อยโยอาหาที่ใช้ด่างของสัตว์ทดลองยังคงต่ำใกล้เคียงกับโยอาหาปกติ Jasberg et al. (1989) ศึกษาการใช้โยอาหาที่ใช้ด่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในผลิตภัณฑ์เค้กเพื่อเพิ่มปริมาณโยอาหาและลดแคลอรี พบว่าการเติมโยอาหาที่ใช้ด่างแทนที่แป้งในส่วนผสม 5-10 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปริมาตรของเค้กเพิ่มขึ้น และเมื่อเติมสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ก็ไม่ทำให้ความสูงของเค้กลดลง อย่างไรก็ตามยังไม่มีงานวิจัยการใช้โยอาหาที่ใช้ด่างเติมร่วมกับแป้งธัญชาติ เพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์พองตัวทันทีด้วยกระบวนการเอกซ์ทราชัน

การพยายามใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบรำข้าวที่มีปริมาณโยอาหาสูงร่วมกับแป้งข้าวเป็นเรื่องที่น่าสนใจ จากผลการวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามีการคาดการณ์ได้ว่าปริมาณสารอาหารต่างๆ ที่มีอยู่สูงในวัตถุดิบจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป ข้อมูลการวิจัยจากกระบวนการเอกซ์ทราชันข้าวหรือแป้งข้าวไม่สามารถนำมาใช้ได้ทันทีโดยเฉพาะกับเครื่องเอกซ์ทราคเตอร์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน ดังนั้นการที่จะนำวัตถุดิบผสมระหว่างแป้งข้าวกับรำข้าวมาใช้ในการผลิตขนมขบเคี้ยวจึงควรศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพที่สำคัญ อีกทั้งการเติมรำข้าวในปริมาณสูงขึ้นอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพด้อยลง จึงเป็นแรงจูงใจเพื่อหาวิธีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของรำข้าว เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ยังคงคุณภาพที่ดี และใช้เป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์พองตัวจากแป้งข้าวและรำข้าวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของความชื้นวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิใบเรลที่มีต่อตัวแปรตามจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตชนิดพองตัวทันที (direct-expanded extrudate) ที่ผลิตด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ (twin-screw extruder) สำหรับวัตถุดิบแป้งข้าว วัตถุดิบผสมระหว่างแป้งข้าวกับรำข้าวดิบ (raw rice bran) และแป้งข้าวกับรำข้าวที่ใช้ด่าง (alkaline-treated rice bran)

1.2.2 เพื่อศึกษาระดับการเติมรำข้าวดิบที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต

1.2.3 เพื่อศึกษาผลการใช้ด่างต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการของรำข้าว

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของการเติมรำข้าวที่ใช้ด่างที่มีต่อการแปรรูปเอกซ์ทรูชัน และเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพกับเอกซ์ทรูเดตที่เติมรำข้าวดิบ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 วัตถุดิบแป้งข้าว แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ และแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ด่าง ได้รับอิทธิพลจากตัวแปรการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่างกัน

1.3.2 การเติมรำข้าวดิบในแป้งข้าวด้วยระดับที่สูงขึ้นจะทำให้ลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตเปลี่ยนไป

1.3.3 การใช้ด่างเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของรำข้าวจะช่วยให้การปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต

1.3.4 ลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตมีความสัมพันธ์กับวัตถุดิบ สภาพที่ใช้ในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน และตัวแปรตามจากการแปรรูปเอกซ์ทรูชัน

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 แป้งที่ใช้ในการทดลองเป็นแป้งข้าวที่ได้จากการบดปลายข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

1.4.2 รำข้าวที่ใช้ในการทดลองเป็นรำข้าวจากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และรำข้าวที่ใช้ด่างได้จากการใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์

1.4.3 เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดสกรูคู่ของบริษัท APV Baker รุ่น MPF 19 : 25 ชนิดที่สกรูทั้งสองหมุนตามกันและซ้อนกัน (corotating and intermeshing twin screw extruder) อัตราส่วนความยาวเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เท่ากับ 25 : 1 มิลลิเมตร

ประกอบด้วยบาร์เรล 4 ท่อนเรียงต่อกันและใช้หัวแบบ (die) รูปวงกลมที่มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวแปรทางด้านวัตถุดิบจากแป้งข้าว แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ และแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง และตัวแปรการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่มีความสำคัญต่อการผลิตเอกซ์ทรูเดตชนิดพองตัวทันที และมีผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทำให้ทราบถึงผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ที่มีความสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์พองตัวทันทีที่ใช้แป้งข้าวเป็นวัตถุดิบหลัก เพื่อเป็นแนวทางในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต และเป็นประโยชน์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากข้าวต่อไป

1.6.2 ทำให้ทราบถึงผลของระดับการเติมรำข้าวต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

1.6.3 ทำให้ทราบถึงผลจากการใช้ต่างต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของรำข้าว และความเป็นไปได้ของการนำรำข้าวที่ใช้ต่างมาเติมในการผลิตผลิตภัณฑ์พองตัวทันทีจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

1.6.4 ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์กับตัวแปรด้านวัตถุดิบ ตัวแปรด้านการแปรรูป และตัวแปรตามจากการแปรรูป เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจของกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากวัตถุดิบไปเป็นผลิตภัณฑ์ด้วยการแปรรูปเอกซ์ทรูชัน

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว (สงกรานต์ จิตรากร, 2526)

ข้าวจัดเป็นพืชล้มลุกวงศ์หญ้า (Family Gramineae) สกุล *Oryza* เจริญเติบโตได้ดีในเขตร้อน (tropical) และเขตอบอุ่น (temperate) ปัจจุบันข้าวที่ปลูกบริโภคมีอยู่ 2 ชนิด คือ ข้าวเอเชีย (*Oryza sativa* L.) และข้าวแอฟริกา (*Oryza glaberrima*) โดย *O. sativa* ปลูกทั่วไปทั้งในเอเชีย แอฟริกา ยุโรป อเมริกา และออสเตรเลีย ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ อินดิกา (indica) จาปอนิกา (japonica) และจาวานิกา (javanica) ส่วน *O. glaberrima* สามารถเพาะปลูกและเติบโตได้ในเขตอบอุ่นเท่านั้น ในประเทศไทยมีการเพาะปลูก *O. sativa* ในกลุ่มอินดิกา และถือเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศ

2.1.1 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว ประกอบด้วย

2.1.1.1 ส่วนที่ห่อหุ้มหรือเกล็ด (hull or husk) มีลักษณะเป็นเยื่อไม้หยาบๆ หุ้มรอบเมล็ดข้าวกล้อง ประกอบด้วยเปลือก 2 ฝา ประกบกันคนละข้างของเมล็ดตามแนวยาว

2.1.1.2 ส่วนที่รับประทานได้ (caryopsis) หรือข้าวกล้อง ประกอบด้วย

1) เยื่อหุ้มผล (pericarp) เป็นส่วนที่ห่อหุ้มส่วนข้าวกล้อง ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น เยื่อหุ้มผลจะมีลักษณะเป็นเส้นใย พผนังเซลล์ประกอบด้วยโปรตีน เซลลูโลส (cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

2) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้าไป ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 2 ชั้น เรียงกันเป็นแถว และมีสารอาหารประเภทไขมันอยู่สูง

3) เยื่อออโรน (aleurone layer) เป็นส่วนห่อหุ้มคัพภะ (embryo) และเอนโดสเปิร์ม (endosperm) เยื่อออโรนมีโปรตีนสูง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วย น้ำมัน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส

4) คัพภะ เป็นส่วนที่จะงอกเป็นต้นอ่อนต่อไป ประกอบด้วย ต้น-อ่อน รากอ่อน ท่อน้ำ ท่ออาหาร และใบเลี้ยง คัพภะเป็นส่วนที่มีโปรตีนและไขมันสูง

5) ส่วนของข้าวสาร (starchy endosperm) ประกอบด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักแห้ง และโปรตีน โดยมีไขมันเพียงเล็กน้อย แป้งข้าวมีลักษณะเป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) มีรูปร่างหลายเหลี่ยม (polygonal) อยู่รวมกันเป็นกลุ่ม

(starch compound) เม็ดสตาร์ชข้าวมีขนาด 2-10 ไมครอน ซึ่งนับว่ามีขนาดเล็กมากเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชจากพืชชนิดอื่น แบ่งได้เป็น 2 ส่วนย่อยคือ

- อะมิโลส (amylose) เป็นพอลิเมอร์ของ ดี-กลูโคส (D-glucose) ที่ต่อกันเป็นเส้นตรง สตาร์ชข้าวข้าวมีอะมิโลสประมาณร้อยละ 7-33 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ส่วนที่เหลือเป็นอะมิโลเพคติน สำหรับข้าวเหนียวมีอะมิโลสน้อยมากหรือไม่มีเลย

- อะมิโลเพคติน (amylopectin) เป็นส่วนประกอบหลักของสตาร์ชข้าว อะมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์ของ ดี-กลูโคส ที่ต่อกันเป็นกิ่งก้านหรือแขนง ข้าวไทยทั่วไปสามารถจัดกลุ่มตามปริมาณอะมิโลสได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณอะมิโลสในข้าวไทยชนิดต่างๆ

ชนิดข้าว	% อะมิโลส	พันธุ์ข้าว
ข้าวเหนียว	0-3	เหนียวสันป่าตอง นางฉลอง กข 6 กข 8 กข 10
ข้าวนุ่มเหนียว (ข้าวอะมิโลสต่ำ)	12-19	ขาวดอกมะลิ 105 กข 15 กข 21 ข้าวเจ้าพิษณุโลก60-1
ข้าวอ่อน (ข้าวอะมิโลสปานกลาง)	20-25	ขาวปากหม้อ 148 ขาวตาแห้ง17 กข 7 กข 23
ข้าวแข็ง (ข้าวอะมิโลสสูง)	26-34	กข 1 กข 3 กข 5 เหลืองประทิว123 ปิ่นแก้ว 56

แหล่งที่มา : งามชื่น คงเสรี (2540)

2.1.2 กระบวนการสีข้าว ประกอบด้วย

2.1.2.1 การทำความสะอาด เพื่อกำจัดใบข้าว เมล็ดลีบ กรวด หิน ดิน วัชพืช และสิ่งสกปรกอื่นๆ ออกจากข้าวเปลือก

2.1.2.2 การกะเทาะ เพื่อทำให้เปลือกข้าวหลุดออกจากเมล็ด สิ่งที่ได้รับในขั้นนี้คือ แกลบ ข้าวกล้อง และรำหยาบ

2.1.2.3 การขัดขาว เพื่อทำให้รำหลุดออกจากเมล็ดข้าวกล้อง สิ่งที่ได้รับในขั้นนี้คือ รำละเอียดและข้าวสาร

2.1.2.4 การคัดแยก เพื่อแยกข้าวเต็มเมล็ด และข้าวหักขนาดต่างๆ ออกจากกัน

2.1.3 คุณค่าทางโภชนาการ

ตารางที่ 2.2 คุณค่าทางโภชนาการของข้าวขาว ข้าวกล้อง และรำข้าว

สารอาหาร	ข้าวขาว (%)	ข้าวกล้อง (%)	รำข้าว (%)
โปรตีน	5.8	7.2	14.1
ไขมัน	0.3	1.9	20.4
ใยอาหาร	0.3	0.7	25.5
คาร์โบไฮเดรต (starch)	67.0	57.0	24.0

แหล่งที่มา : สายสนม ประดิษฐ์ดวง (2541)

2.2 เทคโนโลยีเอกซ์ทรูชัน

เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (extruder) มีรากฐานมาจากอุตสาหกรรมถลุงแร่ ในปี ค.ศ. 1797 ได้มีการประดิษฐ์เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดลูกสูบมาใช้ในอุตสาหกรรมการทำท่อตะกั่วแบบไร้รอยตะเข็บ จากนั้นได้ถูกพัฒนาไปใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก (Dziezak, 1989) มีการนำเอกซ์ทรูเดอร์มาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเป็นครั้งแรกในการผลิตไส้กรอกและผลิตภัณฑ์เนื้อแปรรูปอื่นๆ ในกลางปี ค.ศ. 1930 ได้มีการนำเอาเอกซ์ทรูเดอร์สกรูเดี่ยวมาใช้ในการผลิตพาสต้า ต่อมาในปี 1960 ได้มีการพัฒนาเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่สามารถผลิตอาหารเข้าพร้อมบริโภคโดยการทำให้สุกและทำรูปร่างอย่างต่อเนื่องภายในเครื่องเดียวกัน (Harper, 1981)

ในประเทศไทยคาดว่ามีการนำเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์มาใช้เมื่อปี พ.ศ. 2512 เรียกว่าคอลเลตเอกซ์ทรูเดอร์ (collet extruder) จัดเป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ขนาดเล็ก ง่ายต่อการเดินเครื่อง ราคาถูก และประหยัด ใช้ทำอาหารที่สุกพองได้ง่าย เช่น อาหารขบเคี้ยวหรือขนมอบกรอบที่ใช้ปลายข้าวหรือท่อนข้าว และข้าวโพดหยาบ (corn grit) เป็นวัตถุดิบหลัก (ประชา บุญญสิริกุล, 2537)

2.2.1 ความหมายของเอกซ์ทรูชัน (สุนันทา ทองทา, 2541)

2.2.1.1 กระบวนการหุงต้มแบบเอกซ์ทรูชันหรือกระบวนการอัดพอง (extrusion cooking) หมายถึง กระบวนการที่ทำให้วัตถุดิบอาหารที่เป็นแป้งหรือโปรตีนถูกทำให้ร้อน สุก และนวด ให้มีลักษณะเป็นโด (dough) ที่มีลักษณะคล้ายพลาสติกหยุ่นเหนียว แล้วอัดผ่านรูเปิดที่ออกแบบเป็นพิเศษของหน้าแปลนเป็นรูปร่างออกมาด้วยการทำงานร่วมกันของความชื้น ความดัน อุณหภูมิ และแรงเฉือน

2.2.1.2 เอกซ์ทรูเดอร์ หมายถึงเครื่องจักรที่ประกอบด้วยตัวสกรูที่มีเกลียวลาดเอียง หมุนภายในเนื้อที่จำกัดของหลักทรงกระบอก (barrel) หรือหมายถึง เครื่องจักรที่ทำให้วัตถุดิบอาหารเป็นรูปร่างออกมาด้วยการอัด ดัน บิด เหนียว ผ่านรูเปิดพิเศษออกมา

2.2.2 ประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

Rossen and Miller (1973) ได้แบ่งประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ตามลักษณะต่างๆ ดังนี้

2.2.2.1 การแบ่งประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์ตามลักษณะหน้าที่ในการทำผลิตภัณฑ์ สามารถแบ่งได้เป็น พาสต้าเอกซ์ทรูเดอร์ (pasta extruder) ซึ่งเป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี เช่น มักกะโรนี โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่ถึงกับสุกพอ จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนอื่นมาช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์สุกต่อไป เอกซ์ทรูเดอร์ประเภทขึ้นรูปด้วยแรงกดดันสูง (high-pressure forming extruder) เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีความดันสูง เนื่องจากตัวสกรูได้รับการออกแบบให้เป็นชนิดที่ทำให้เกิดแรงอัดสูงมาก อุณหภูมิของโถจะสูงมากจนทำให้เกิดการสุกพองเกิดขึ้นที่หน้าแปลน เอกซ์ทรูเดอร์ประเภทแรงเฉือนต่ำ (low-shear cooking extruder) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้จะมีลักษณะเนื้อแน่นมากกว่าการพองตัว เนื่องจากความชื้นหรือไอน้ำที่มีอยู่ภายในชิ้นอาหารนี้จะไม่ระเหยกลายเป็นไอน้ำออกไปทันที จึงต้องนำไปอบแห้งและก่อนรับประทานต้องนำไปทอด คั่ว หรืออบเพื่อทำให้สุกพองเสียก่อน และเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทแรงเฉือนสูง (high-shear cooking extruder) เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ออกแบบสำหรับทำผลิตภัณฑ์ได้หลายลักษณะ เช่น ประเภทสุกเพียงบางส่วนหรือกึ่งสำเร็จรูป และโปรตีนเกษตร (texture vegetable protein)

2.2.2.2 การแบ่งประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์ตามหลักการถ่ายเทความร้อน สามารถแบ่งได้เป็น ออโตจีนัสเอกซ์ทรูเดอร์ (autogenous extruder) ความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้จากการเสียดสี แล้วจะถูกระบายออกไปจากบารเรล อุณหภูมิภายในเครื่องขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปและการจัดรูปแบบของสกรู เช่น คอลเลตเอกซ์ทรูเดอร์ ในขณะที่ไอโซเทอร์มอลเอกซ์ทรูเดอร์ (isothermal extruder) เป็นเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทที่มีระบบการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดความยาวของบารเรล เช่น เอกซ์ทรูเดอร์ประเภทขึ้นรูป และพอลิโทรปิกเอกซ์ทรูเดอร์ (polytropic extruder) ซึ่งโดยทั่วไปเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เกือบทุกชนิดจัดเป็นประเภทพอลิโทรปิก คือจะได้รับความร้อนจากสองทางทั้งจากพลังงานกล และความร้อนที่ได้มาจากแหล่งความร้อนภายนอกที่ส่งผ่านมาจากช่องว่างของบารเรล

2.2.2.3 การแบ่งประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์ตามจำนวนสกรู

1) เอกซ์ทรูเดอร์สกรูเดี่ยว (single-screw extruder) เป็นเครื่องจักรที่ประกอบด้วย 1 สกรูขับเคลื่อนภายในบารเรล โดยลักษณะรูปแบบของสกรูมีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ สกรูมีลักษณะเป็นฟันเกลียวหมุนรอบแกนโลหะที่อยู่ภายในบารเรลทรงกระบอก ทำหน้าที่ในการถ้และให้ความร้อนแก่ส่วนผสมของอาหาร และนวดส่วนผสมนั้น

ให้อยู่ในรูปของก้อนวัตถุที่เป็นเนื้อเดียวกันมีลักษณะยืดหยุ่น

2) เอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ (twin-screw extruder) เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ประกอบด้วย 2 สกรูที่มีความยาวเท่ากันอยู่ในบารเรลเดียวกัน เอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ถูกออกแบบให้มีความแตกต่างกันทั้งในการแปรรูป ลักษณะทางกล และกำลังความสามารถของเครื่องจักร ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ได้ตามตำแหน่งของสกรู คือ ลักษณะที่เกิดผิวของสกรูตัวหนึ่งวางหรือซ้อนอยู่ในร่องของสกรูอีกตัวหนึ่ง (intermeshing twin-screw extruder) การทำงานของเครื่องจะมีลักษณะถูกผลักไปข้างหน้าด้วยการแทนที่ มีการผสมอย่างมีประสิทธิภาพและค่อนข้างจะทำความสะอาดได้ด้วยตัวเอง และลักษณะที่สกรูสองตัววางอยู่ในตำแหน่งที่ห่างกันไม่ซ้อนพอดิกัน (nonintermeshing twin-screw extruder) จึงคล้ายกับมีสกรูเดี่ยวสองตัววางอยู่ข้างๆ กัน เพียงแต่มีช่องว่างเล็กน้อยและมีความสามารถที่สูงกว่า การหมุนของสกรูแต่ละตัวจึงไม่รบกวนซึ่งกันและกัน การทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ขึ้นอยู่กับแรงเสียดสี (friction) ไม่มีโครงสร้างที่ถูกออกแบบให้ผลักวัตถุดิบอาหารไปข้างหน้าจากสกรูตัวหนึ่งไปอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นการผสมของวัตถุดิบอาหารจึงไม่ดี อีกทั้งยังสามารถแบ่งเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ได้ตามทิศทางการหมุน คือ ลักษณะที่สกรูสองตัวหมุนไปในทิศทางเดียวกัน (corotating twin-screw extruder) จัดเป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมอาหาร มีความสามารถผลิตอาหารได้หลากหลายชนิด เช่น อาหารสัตว์ อาหารขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์พร้อมรับประทานจากธัญพืช ข้อดีของเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้คือ มีประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนอาหารไปข้างหน้า การผสมกันของวัตถุดิบได้ดี สามารถควบคุมระยะเวลาการหุงต้มได้ดี มีระบบการทำความสะอาดด้วยตัวเอง และการแปรรูปมีความสม่ำเสมอ และแบบลักษณะที่สกรูสองตัวหมุนในทิศทางตรงกันข้าม (counter-rotating twin-screw extruder) แม้ว่าจะไม่มีการใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร แต่ก็ถือว่าเป็นเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีลักษณะการลำเลียงได้ดีเยี่ยม เหมาะสมในการแปรรูปวัตถุดิบที่ไม่ขึ้นเหนียวด้วยความเร็วรอบต่ำและต้องการเวลาอยู่ภายในบารเรลนานๆ

2.2.3 หลักการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (กมลวรรณ แจ่มชัด, 2541)

วัตถุดิบจะถูกส่งไปที่ส่วนรับวัตถุดิบ (feed hopper) จากนั้นส่งผ่านไปที่ตัวเอกซ์ทรูเดอร์ วัตถุดิบจะหลอมเหลวอยู่ในรูปคล้ายพลาสติก เนื่องจากความดันสูง อุณหภูมิสูง และแรงเฉือน (shear force) ที่เกิดขึ้นในบารเรล จากนั้นวัตถุดิบจะอยู่ในรูปของโค และเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการหมุนของสกรู ช่วงระยะที่ผ่านตัวเอกซ์ทรูเดอร์นี้ โคจะถูกทำให้สุกและทำให้เกิดรูปร่างโดยผ่านหน้าแปลน ซึ่งเป็นรูเปิดหรือช่องอยู่ส่วนสุดท้ายของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เรียกว่า เอกซ์ทรูเดต (extrudate)

2.2.4 บทบาทและหน้าที่ของเครื่องเอกซ์ทราเตอร์ (สุนันทา ทองทา, 2541)

2.2.4.1 ทำผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายโดยใช้อุปกรณ์การทำงานชุดเดียวกัน ด้วยการเลือกใช้วัตถุดิบ ส่วนผสม และสภาวะในการแปรรูปต่างๆ กัน

2.2.4.2 อัตราการผลิตสูงเนื่องจากเครื่องเอกซ์ทราเตอร์เป็นเครื่องจักรที่สร้างระบบการผลิตที่ต่อเนื่องและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอ

2.2.4.3 ต้นทุนในการทำงานต่ำเพราะใช้แรงงานและพื้นที่ในการผลิตน้อย

2.2.4.4 ผลิตรูปแบบของผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย

2.2.4.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพสูงเนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทราชันเป็นแบบใช้อุณหภูมิสูง และระยะเวลาสั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว โดยแบคทีเรียที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพรวมทั้งซาลโมเนลลา (*Salmonella*) จะถูกทำลายในระหว่างกระบวนการผลิต

2.2.4.6 ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องเป็นการแปรรูปที่มีความชื้นต่ำ ทำให้ความต้องการความร้อนเพื่อทำให้สุกและแห้งต่ำ

2.2.4.7 ผลิตอาหารใหม่ๆ จากโปรตีนพืช แป้ง และวัตถุดิบต่างๆ

2.2.4.8 ไม่ทิ้งน้ำโสโครกจากกระบวนการผลิต

หน้าที่ของเครื่องเอกซ์ทราเตอร์ในกระบวนการผลิตอาหาร คือ การผสมผสานและปรับเปลี่ยนโครงสร้างของส่วนประกอบที่ไม่น่าดึงดูดความสนใจให้เป็นสารประกอบหรือผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสและรูปร่างที่ดีและมีการยอมรับมากขึ้น การให้ความร้อนทำให้ส่วนประกอบของวัตถุดิบผสมที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ร้อนขึ้น หรือสุกมากเพียงพอที่จะทำให้แป้งย่อยสลายได้ดีขึ้น ทำลายหรือยับยั้งสารที่เป็นพิษต่อร่างกาย ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทราชันค่อนข้างสูง (200 องศาเซลเซียส) โดยใช้เวลานานมาก (5-10 วินาที) อีกทั้งสามารถทำผลิตภัณฑ์ให้มีเนื้อสัมผัสแปลกใหม่ เช่น เป็นเส้นใย และฉีกได้คล้ายเนื้อสัตว์ ได้แก่ โปรตีนเกษตร และอาหารสัตว์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสนุ่มและชุ่มชื้น โดยจะมีความสามารถทำผลิตภัณฑ์ให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วตัดแยกได้เป็นชิ้นๆ และควบคุมความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ได้

2.3 วัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิต

2.3.1 การเกิดโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ฟองตัว

โครงสร้างที่เป็นรูพรุนของผลิตภัณฑ์เริ่มต้นจากสตาร์ชดิบถูกป้อนเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทราเตอร์ที่ส่วนรับวัตถุดิบ และถูกกลิ้งเข้าไปในส่วนของการกลิ้ง แล้วผสมกับน้ำที่ถูกป้อนเข้าสู่บารเรลจากการกระทำด้วยการหมุนของของสกรูในพื้นที่จำกัดภายในบารเรล โดยมีทิศทางไปสู่หัวแบบที่มีรูเปิดขนาดเล็ก สกรูในช่วงท้ายจะถูกเติมเต็มด้วยโคทำให้ความดันในช่วงนี้มีค่าสูงมาก ด้วยการทำงานร่วมกันของอุณหภูมิและความดันที่สูงในบารเรลส่วนท้ายนี้ จึงส่งผลให้สตาร์ช

กลายเป็นเจล เมื่อโคที่สุกเคลื่อนพ้นออกจากหน้าแปลน ความดันที่ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดความแตกต่างระหว่างความดันในระบบและความดันภายนอก ทำให้อินน้ำที่อยู่ในรูปไอน้ำร้อนยิ่งยวดระเหยออกมากระทันหัน จึงทำให้เกิดสภาวะการพองตัว มีลักษณะเป็นรูพรุน และมีความคงตัว เนื่องจากมีโพรงอากาศภายใน โครงสร้างขึ้นผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น (Harper, 1981)

2.3.2 องค์ประกอบของวัตถุดิบที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์พองตัวจากธัญพืช

2.3.2.1 สตาร์ช (starch)

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

2.3.2.2 อะมิโลสและอะมิโลเพคติน (amylose และ amylopectin)

Yoshii and Arisaka (1994) รายงานว่าปริมาณอะมิโลสของแป้งข้าวสาลีส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยมีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับอัตราการพองตัว เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Feldbegr (1969) ที่พบว่าอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินในแป้งข้าวโพดมีอิทธิพลต่อคุณภาพของเนื้อสัมผัสผลิตภัณฑ์ กล่าวคืออะมิโลเพคตินช่วยในการพองตัว ทำให้น้ำหนักเบา ส่วนอะมิโลสถ้ามีมากทำให้การพองตัวลดลงหรือทำให้ค่าปริมาตรจำเพาะต่ำลง อีกทั้งผลการทดลองของ Bhattacharya and Hanna (1987) รายงานถึงการขยายตัวของเอกซ์ทรูเกตแป้งข้าวโพดสูงขึ้นเมื่อปริมาณอะมิโลสต่ำลง และความหนาแน่นก็มีแนวโน้มลดลงด้วย อย่างไรก็ตามพบว่าข้าวเหนียวมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเหนียวสูง และการขยายตัวต่ำกว่าข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ การเพิ่มขึ้นของปริมาณอะมิโลเพคตินในวัตถุดิบส่งผลต่อการเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ (water solubility index) และลดค่าความสามารถในการดูดน้ำ (water absorption index) ของเอกซ์ทรูเกต (Pan et al., 1991)

2.3.2.3 โปรตีน (protein)

โปรตีนเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีผลต่อการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ โดย Conway and Anderson (1973) พบว่าการเพิ่มปริมาณโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (soy protein isolate) มีผลไปลดการขยายตัวของเอกซ์ทรูเกตแป้งข้าวโพด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Mohamed (1990) อาจเนื่องจากสาเหตุที่โปรตีนมีความสามารถในการพองตัวต่ำกว่าสตาร์ช จากการทดลองของ Bhattacharya et al. (1986) แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มแรงเหนียวด้วยการเพิ่มความเร็วรอบสกรูให้กับวัตถุดิบผสมระหว่างกลูเตนจากข้าวโพด (corn gluten meal) กับโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง จะมีส่วนช่วยปรับปรุงค่าการขยายตัว เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ ลดความหนาแน่น และลดแรงที่ใช้

ในการเฉือน (shear strength) ของผลิตภัณฑ์ Bhattacharya et al. (1997) ได้ทำการทดลองถึงผลจากการเติมถั่ว (chickpea) ลงในกระบวนการเอกซ์ทรูชันของแป้งข้าวด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูเดี่ยว พบว่าเอกซ์ทรูเดอร์จากแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการขยายตัวสูงสุดและความหนาแน่นต่ำสุด ซึ่งจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope) จะพบโพรงอากาศจำนวนมาก และเมื่อเพิ่มปริมาณถั่วทำให้องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ด้านปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลง ในขณะที่ปริมาณโปรตีนสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของอัตราการขยายตัว ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น พบโครงสร้างของโพรงอากาศที่ไม่สมบูรณ์ และจำนวนโพรงอากาศลดลง Onwulata et al. (1998) ศึกษาผลของการเติมเวย์โปรตีน (whey protein concentrate) ลงในสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชมันฝรั่ง แล้วผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันทั้งแบบแรงเฉือนต่ำ และแรงเฉือนสูง ผลพบว่าการเติมเวย์โปรตีนมากกว่าร้อยละ 25 ส่งผลไปลดค่าพลังงานกลจำเพาะ (specific mechanical energy) ของกระบวนการแปรรูป และส่งผลให้การขยายตัว และค่าดัชนีการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ (water absorption indices) ลดลง รวมทั้งลักษณะเนื้อสัมผัสจะแข็งและกระด้างมากขึ้น

2.3.2.4 ไขมัน (fat)

ปริมาณไขมันในวัตถุดิบมีผลต่อตัวแปรตามการแปรรูปด้วยเอกซ์ทรูชัน (system parameters) และลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดอร์แป้งข้าว (Grenus et al., 1993; Ilo et al., 1999) เมื่อวัตถุดิบมีปริมาณไขมันสูงขึ้นหรือมีน้ำมันส่วนที่เป็นอิสระไหลออกจากส่วนของสกรูจะส่งผลให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ทำงานด้วยค่าทอร์คและค่าพลังงานกลจำเพาะที่ต่ำลง เนื่องจากไขมันจะไปทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น และไปลดความหนืดของโคที่อยู่ภายในบาร์เรล ส่งผลให้อัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง ความหนาแน่นและแรงที่ใช้ในการตัดมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Mohamed (1990) พบว่าวัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันไม่เกินร้อยละ 4 จะมีอัตราการขยายตัวสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณไขมันสูงขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากไขมันมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

2.3.2.5 ใยอาหาร (fiber)

Lue et al. (1991) ได้ทำการศึกษาผลของใยอาหารโดยใช้ใยอาหารจากต้นบีต (sugar beet fiber) ต่อกระบวนการเอกซ์ทรูชันของแป้งข้าวโพด ผลพบว่าการเพิ่มปริมาณใยอาหารมีแนวโน้มทำให้การขยายตัวในแนวรัศมีของเอกซ์ทรูเดอร์ต่ำลง ในขณะที่การขยายตัวทางยาวสูงขึ้น เมื่อศึกษาโครงสร้างภายในของเอกซ์ทรูเดอร์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าการเติมใยอาหารร้อยละ 30 ทำให้ลักษณะโพรงอากาศมีขนาดเล็กลง และมีความสม่ำเสมอลดลงเมื่อเทียบกับการเติมใยอาหารที่ร้อยละ 10 และ 20 ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกันเมื่อดำเนินการแปรรูปทั้งที่ความเร็วรอบสกรู 200 และ 300 รอบต่อนาที อีกทั้งยังมีการศึกษาผลของการเติมรำข้าวสาลีสูง

ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และรำข้าวโอ๊ต 20 เปอร์เซ็นต์ ที่มีต่อตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทราคชันของ Hsieh et al. (1989) พบการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยในค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบ แต่พบการลดลงของการขยายตัวในแนวรัศมี และการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่น และแรงที่ใช้ในการตัดเอกซ์ทราคต Onwulata et al. (2001) พบว่าการเติมใยอาหารด้วยรำข้าวสาลีปริมาณ 12.5 เปอร์เซ็นต์ ในการเอกซ์ทราคตแป้งข้าวโพดมีผลให้พลังงานกลจำเพาะและอัตรา การขยายตัวมีค่าลดลง รวมทั้งค่าแรงที่ใช้ในการกดแตก (breaking strength) มีค่ามากขึ้น แต่ไม่พบ การเปลี่ยนแปลงในส่วนของความหนาแน่น อีกทั้งมีผลให้ค่าความสามารถในการเก็บกักน้ำ (water retention) ในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น Berglund et al. (1994) ทำการเอกซ์ทราคตแป้งข้าวบาเลย์พันธุ์ต่างๆ ที่มีปริมาณใยอาหารสูงในช่วง 12-18 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเอกซ์ทราคตที่ได้มีการขยายตัวที่จำกัดและมีความหนาแน่นสูง แต่เมื่อผสมแป้งข้าวปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ลงไปทำให้ความหนาแน่นของ เอกซ์ทราคตลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ และมีลักษณะปรากฏคล้ายกับเอกซ์ทราคตจากแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และจากการศึกษาทางด้านประสาทสัมผัสพบว่า เอกซ์ทราคตจากวัตถุดิบผสมแป้งข้าว บาเลย์ 50 เปอร์เซ็นต์ มีคะแนนความกรอบและสีสูงกว่าเอกซ์ทราคตจากแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ Vasanathan et al. (2002) ได้ศึกษาผลจากกระบวนการเอกซ์ทราคตต่อการเปลี่ยนแปลง ปริมาณใยอาหารของแป้งข้าวบาเลย์ พบว่าปริมาณใยอาหารที่ละลายได้และปริมาณใยอาหารทั้งหมดเพิ่มขึ้นภายหลังการเอกซ์ทราคตในช่วงอุณหภูมิ 90-140 องศาเซลเซียส และความชื้นระหว่าง 20-50 เปอร์เซ็นต์ และกล่าวว่าการเพิ่มขึ้นของใยอาหารที่ละลายได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของใยอาหารส่วนที่ไม่ละลายในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทราคต

2.3.2.6 ความชื้น (moisture)

น้ำมีผลอย่างมากต่อการสุกของผลิตภัณฑ์ทั้งในระบบที่มีปริมาณน้ำมาก เกินพอ (Burt and Russell, 1983; Camire et al., 1990) และระบบที่มีน้ำน้อยหรือจำกัดในกระบวนการเอกซ์ทราคต น้ำทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทความร้อนและเป็นสารหล่อลื่น ช่วยในการควบคุมความดันและแรงเฉือนภายในเอกซ์ทราคเตอร์ (Anderson et al., 1969; Bhattacharya and Hanna, 1987) Biliaderis et al. (1986) พบว่าปริมาณน้ำมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ทำให้สตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการสุก โดยเมื่อระดับของน้ำลดลงจะส่งผลให้อุณหภูมิที่ต้องการเพื่อให้สตาร์ชสุกสูงขึ้น Garber et al. (1997) พบว่าแรงทอร์คมีค่าลดลงเมื่อปริมาณความชื้นของแป้งข้าวโพดบด หยิบสูงขึ้นเนื่องจากความหนืดของโคลดลง Zasykin and Lee (1998) ได้ศึกษาผลของความชื้นของวัตถุดิบผสมระหว่างแป้งถั่วเหลืองกับแป้งสาลีที่มีต่อลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่าในทุกๆ อัตรา ส่วนของวัตถุดิบผสม การให้ความชื้นวัตถุดิบในระดับต่ำสุดที่ 16 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เอกซ์ทราคต มีการขยายตัวสูงสุด มีความกรอบ และมีเนื้อสัมผัสที่เป็นที่ต้องการและมีการยอมรับสูงสุด และเมื่อความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบมีค่าสูงขึ้นจะทำให้อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง ที่ปริมาณ

ความชื้นต่ำส่งผลให้แรงเฉือนเนื่องจากการหมุนของสกรูภายในบารเรลสูงขึ้น ทำให้การเกิดเจลลาคติในเซชันของสตาร์สูงขึ้น (Chinnaswamy and Hanna, 1988) และยังส่งผลถึงความหนืดของโดภายในบารเรลให้สูงขึ้น ทำให้แรงดันสูง ดังนั้นอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์จึงสูงขึ้นตามด้วย (Mohamed, 1990) อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณความชื้นของวัตถุดิบต่ำเกินไปส่งผลให้สตาร์แตกตัว (dextrinization) จากแรงเฉือนเนื่องจากการหมุนของสกรู ทำให้อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง (Chinnaswamy and Hanna, 1988)

2.3.2.7 ขนาดอนุภาค (particle size)

Garber et al. (1997) พบว่าการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ ส่งผลต่ออัตราการขยายตัวต่างกัน โดยแป้งข้าวโพดขนาดอนุภาค 50.2-94.2 ไมโครเมตร ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการพองตัวสูงสุด เมื่อขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นทำให้การพองตัวลดลง อีกทั้งการใช้ข้าวโพดบดหยาบที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 1,400 ไมโครเมตร ให้การพองตัวที่ต่ำมากอันเนื่องมาจากการเกิดเจลลาคติในเซชันที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Desrumaux et al. (1998) ที่กล่าวว่าเมื่ออนุภาคของแป้งข้าวโพดใหญ่ขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคลดลง ทำให้มีแรงเสียดทานต่อกันต่ำลง อุณหภูมิของโดจึงลดลง และส่งผลไปลดการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดต โดยโพรงอากาศภายในโครงสร้างจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยในขณะที่จำนวนของโพรงอากาศลดลง อีกทั้งยังพบว่าการผสมโยฮาทที่มีขนาดอนุภาคเล็กลงในแป้งข้าวโพด มีผลในการปรับปรุงการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ทั้งด้านยาวและแนวรัศมี (Lue et al., 1991)

2.3.3 ตัวแปรด้านการแปรรูปที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2.3.3.1 อัตราการป้อนวัตถุดิบ (feed rate)

อัตราการป้อนวัตถุดิบเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบสู่เครื่องจะทำให้เกิดการเพิ่มความดันที่ทางออกของผลิตภัณฑ์ ลดพลังงานกลที่ป้อนเข้า และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่อง (residence time) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ เช่น เมื่ออัตราการป้อนวัตถุดิบสูงขึ้น หรือมีระดับการเติมของวัตถุดิบภายในบารเรล (degree of fill) มาก ส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าความสามารถในการละลายน้ำและการขยายตัวในแนวรัศมีมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่การป้อนวัตถุดิบในอัตราลดลงโดยที่ความเร็วรอบของสกรูมีค่าคงที่ ทำให้ระดับการเติมเต็มภายในบารเรลลดลง ส่งผลให้เกิดการลื่นไหลของโดภายในบารเรลและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีการขยายตัวลดลง (Pan et al., 1991) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Kirby et al. (1988) ที่พบว่าอัตราการป้อนวัตถุดิบเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเติมเต็มของวัตถุดิบภายในบารเรล ลักษณะของการควบคุมกระบวนการแปรรูป และคุณภาพของเอกซ์ทรูเดต โดยที่ Yeh and Jaw (1999) พบว่าการเพิ่มอัตราการป้อนจะมีผลให้ค่าแรงทอร์คเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราการป้อนลดลงโดยให้ความเร็วรอบ

ของสกรูเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะและระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

2.3.3.2 ความเร็วรอบสกรู (screw speed)

ระดับความเร็วรอบสกรูส่งผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ต่างกัน โดยผลจากงานวิจัยของ Chinnaswamy and Hanna (1988) พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบจาก 80 เป็น 150 รอบต่อนาที ส่งผลให้อัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วยรอบขึ้นไปอีกจะทำให้การขยายตัวลดลง เนื่องจากที่ความเร็วรอบสกรูสูงๆ ทำให้ได้มีเวลาอยู่ในบารเรลสั้นลง การเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ชต่ำลงเนื่องมาจากการสุกที่ไม่สมบูรณ์ Lue et al. (1991) พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูในช่วง 200-300 รอบต่อนาที ทำให้การขยายตัวทางยาวเพิ่มขึ้น โดยที่การขยายตัวในแนวรัศมีจะลดลง และขนาดโพรงอากาศจะเล็กลงด้วย อีกทั้งยังพบลักษณะผิวรอบๆ เอกซ์ทราเดที่มีลักษณะเป็นปากฉลาม (sharkskin) แต่ไม่พบลักษณะดังกล่าวนี้ที่การใช้ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตาม Taranto et al. (1975) พบว่าการขยายตัวในแนวรัศมีของแป้งข้าวโพดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วยรอบสกรูสำหรับเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูเดี่ยว Grenus et al. (1993) Guha et al. (1997) และ Garber et al. (1997) พบผลที่สอดคล้องกันโดยเมื่อความเร็วรอบสกรูสูงขึ้นทำให้เกิดการลดลงของแรงทอร์คและความดันที่หัวแบบ และการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานกลจำเพาะ

2.3.3.3 อุณหภูมิของบารเรล (barrel temperature)

อุณหภูมิที่ตั้งไว้ตลอดความยาวของเครื่องเอกซ์ทราเดอร์มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ถ้าอุณหภูมิทางออกของเครื่องมากกว่า 100 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่พองตัวทันที เนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะไม่พองทันทีหลังออกจากเครื่อง เกิดเนื่องจากการลดอุณหภูมิช่วงใกล้ทางออกต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส (กมลวรรณ แจ้งชัด, 2541) โดยอุณหภูมิในกระบวนการเอกซ์ทราชันมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสำหรับการเกิดเป็นโครงสร้างใหม่ของผลิตภัณฑ์ อัตราการขยายตัว และปริมาณในการละลายน้ำของคาร์โบไฮเดรต (Mercier and Feillet, 1975) โดยเมื่ออุณหภูมิของบารเรลสูงขึ้นในช่วง 50-247 องศาเซลเซียส ในการเอกซ์ทราดข้าวโพดบดหยาบ ส่งผลให้คาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ในเอทานอลมีปริมาณลดลง พบว่าน้ำตาลจำพวกฟรักโตส กลูโคส ซูโครส และราฟฟิโนสลดลง แต่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตจำพวกที่ละลายในน้ำมากขึ้น ซึ่งเป็นสารจำพวกโพลีแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แสดงให้เห็นถึงการบวมของเม็ดสตาร์ช Guha et al. (1997) พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิบารเรลจาก 80-100 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าแรงทอร์คลดลง Chinnaswamy and Hanna (1988) รายงานว่าอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราเดอร์ข้าวโพดเพิ่มจาก 11.5 เป็น 13.2 เมื่ออุณหภูมิบารเรลเพิ่มจาก 110 เป็น 140 องศาเซลเซียส จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงเมื่อยังคงเพิ่มอุณหภูมิ อีกทั้ง Pan et al. (1991) รายงานถึงการขยายตัวของเอกซ์ทราเดอร์แป้งข้าวสาลีที่อุณหภูมิ

บารเล 158 องศาเซลเซียส และการขยายตัวจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิขณะเอกซทรีชันมีผลต่อการขยายตัวของสตาร์ช และสตาร์ชต่างชนิดกันจะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการขยายตัวที่ดีที่สุดแตกต่างกันด้วย

2.3.3.4 รูปแบบของสกรู (screw configuration)

ชิ้นส่วนของสกรูที่ใช้และตำแหน่งชิ้นส่วนของสกรูมีผลต่อรูปแบบของสกรู โดยเฉพาะกับเครื่องเอกซทรีเดอร์สกรูคู่ ซึ่งมีผลต่อการผสมของวัตถุดิบ เวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่อง แรงเหวี่ยง พลังงานกลที่ให้กับวัตถุดิบ และอุณหภูมิของโดภายในเครื่อง การจัดแบบสกรูที่เป็นการเพิ่มแรงเหวี่ยงใกล้ทางออกของเครื่อง จะเพิ่มการสูญเสียโครงสร้างของโมเลกุลแป้ง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่พอง มีลักษณะรูพรุนเล็ก และความคงทนต่อแรงกดลดลง (กมลวรรณ แจ่มชัด, 2541)

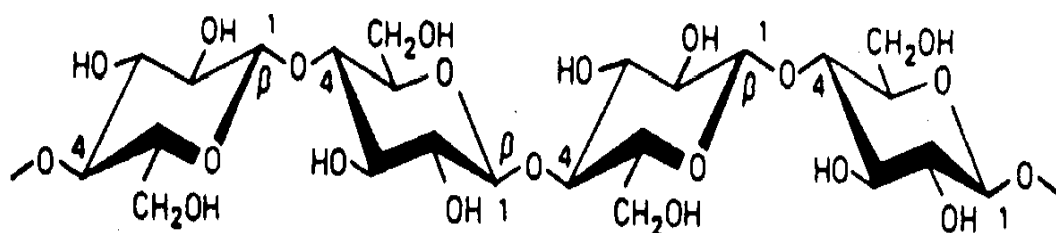
2.4 รำัญพืชและการเปลี่ยนแปลงสมบัติ

2.4.1 องค์ประกอบหลักของรำัญพืช

รำัญพืชเป็นแหล่งที่สำคัญของใยอาหาร โดยเฉพาะในส่วนเชื้อหุ้มเมล็ดของรำและรำัญพืชทั้งเมล็ด องค์ประกอบหลักของใยอาหารคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

2.4.1.1 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นสารคาร์โบไฮเดรตประเภทที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยที่เหมือนกันทั้งหมด (Homo-polysaccharide) คือ β -D-glucopyranose unit ถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(1 $\rightarrow$ 4)-glycosidic bond แสดงดังภาพที่ 2.1 โมเลกุลของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีแนวโน้มที่แต่ละสายของโมเลกุลจะรวมตัวเข้าหากันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ก่อตัวเป็นชั้นของสายโมเลกุลต่อกันมีลักษณะคล้ายร่างแหที่มีความเป็นระเบียบสูง (crystalline region) ดังนั้นเมื่อโครงสร้างของเส้นใยนี้ถูกยึดกันแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจน และเหลือตำแหน่งที่ว่างของไฮดรอกซิล (OH group) เพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยากับน้ำลดน้อยลง จึงส่งผลให้เกิดเป็นโมเลกุลที่มีแรงยึดเหนี่ยวสูง และไม่สามารถละลายได้ในน้ำ (Sjostrom, 1993)

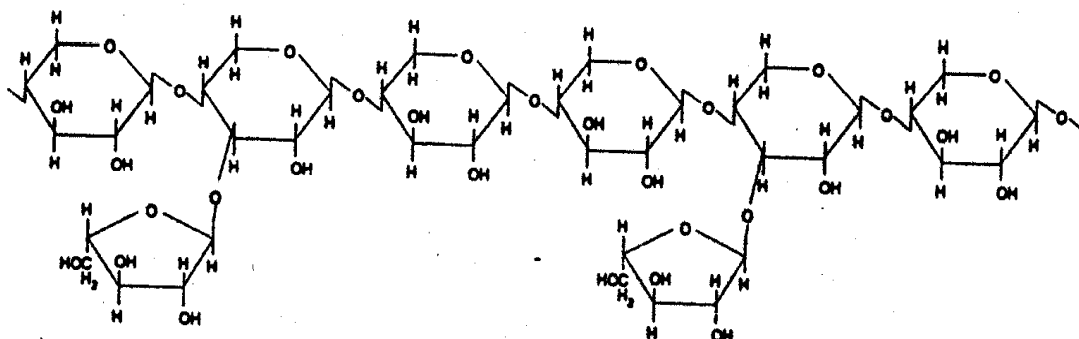


ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเซลลูโลส

แหล่งที่มา : Johnson and Southgate (1994)

2.4.1.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารคาร์โบไฮเดรตประเภทที่ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยต่างๆ กัน (Hetero-polysaccharide) หน่วยย่อยที่เป็นองค์ประกอบหลักของโมเลกุลคือ น้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 ตัว (hexose) น้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 ตัว (pentose) และกรดยูโรนิก (uronic acid) จำนวนเล็กน้อย โครงสร้างหลักของโมเลกุลประกอบไปด้วยสายยาวที่เชื่อมต่อกันของไซโลส (xylan polymer) กลูโคสและแมนโนส (glucomannan polymer) และกาแลคโทส (galactose polymer) สายยาวของโครงสร้างหลักนี้จะมีกิ่งของกลูโคส อะราบินโนส และกรดกลูโคโรนิก (glucuronic acid) มาเกาะอยู่ด้วย ส่วนมากโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะไม่ละลายน้ำ แต่บางส่วนก็สามารถละลายน้ำได้ เฮมิเซลลูโลสหลักที่พบในผนังเซลล์ของพืชคือ อะราบินโนไซแลนซึ่งประกอบด้วยสายหลักของไซโลสต่อกันด้วยพันธะ β -(1 $\rightarrow$ 4)-glycosidic bond และมีหน่วยย่อยของอะราบินโนสเกาะอยู่เป็นกิ่งที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 หรือ 3 ของบางโมเลกุลของไซโลสดังภาพที่ 2.2 ความสามารถในการละลายน้ำของเฮมิเซลลูโลสนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนหน่วยของอะราบินโนสที่มาเกาะอยู่กับสายหลักของโมเลกุล ถ้ามีจำนวนอะราบินโนสสูงจะทำให้การละลายน้ำสูงขึ้น (Johnson and Southgate, 1994)

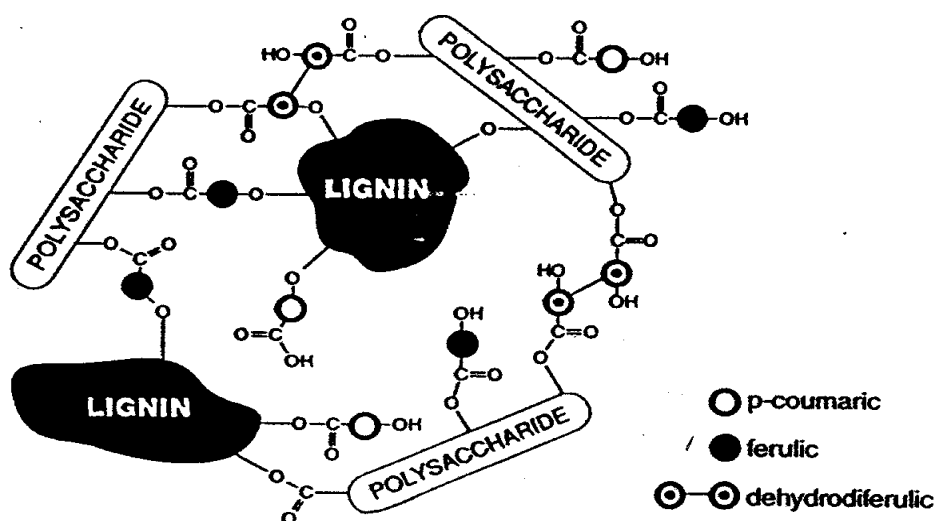


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอะราบินโนไซแลน (arabinoxylan)

แหล่งที่มา : Eliasson (1996)

2.4.1.3 ลิกนิน

ลิกนินประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของฟีนิลโพรเพน (phenylpropane unit) ไม่ใช่สารประเภทคาร์โบไฮเดรต แต่เป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่ละหน่วยถูกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะคาร์บอน และอีเทอร์ ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลที่ยึดกันแน่นยากต่อการทำลายให้มีลักษณะเล็กลง ไม่สามารถละลายน้ำได้ และมีความสามารถในการละลายในสารเคมีต่างๆ ค่อนข้างต่ำ (Hon and Shiraishi, 1990) ลิกนินจะเชื่อมต่ออยู่กับสายคาร์โบไฮเดรต เช่น สายของแมนโนส (mannan polymer) การรวมกลุ่มกันระหว่างคาร์โบไฮเดรตและลิกนินในผนังเซลล์ของพืชแสดงได้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การรวมตัวกันขององค์ประกอบในผนังเซลล์พืช

แหล่งที่มา : Eliasson (1996)

2.4.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของใยอาหาร

2.4.2.1 การใช้กระบวนการทางกล (mechanical treatment)

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

2.4.2.2 การใช้ด่าง (alkaline treatment)

Ning et al. (1991) ศึกษาผลของการใช้ด่างต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของใยอาหาร โดยแหล่งของใยอาหารที่ใช้ในการทดลองคือ รำข้าวโพด พบว่าโครงสร้างของใยอาหารเดิมมีลักษณะที่เรียบ และแน่น ในขณะที่ใยอาหารหลังผ่านการใช้ด่างมีลักษณะโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น มีลักษณะของการถูกทำลาย และโครงสร้างเปิดตัวออกมากขึ้น ในด้านสมบัติของการอุ้มน้ำ พบใยอาหารที่ใช้ด่างมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่าใยอาหารดิบ ($p < 0.05$) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างใยอาหารคือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอ่อนลง และโครงสร้างเป็นรูพรุนมากขึ้น ทำให้น้ำสามารถส่งผ่านเข้าไปในโครงสร้างของใยอาหารและถูกดูดซับไว้ได้ดีขึ้น ดังนั้นค่าความสามารถในการอุ้มน้ำจึงสูงขึ้น

ความเป็นระเบียบของโครงสร้างใยอาหารดิบสูง ซึ่งโครงสร้างตามธรรมชาติจะประกอบไปด้วยส่วนที่มีความเป็นระเบียบสูงของเซลลูโลส ภายหลังผ่านการใช้ด่างพบว่าความเป็นระเบียบภายในโครงสร้างลดลงเมื่อเทียบกับใยอาหารดิบ เป็นผลมาจากการที่ด่างสามารถเข้าไปทำลายส่วนที่มีความเป็นระเบียบสูงของเซลลูโลส ในด้านองค์ประกอบทางเคมีของใยอาหาร พบว่าปริมาณของใยอาหารที่ละลายน้ำได้มีสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย ส่วนปริมาณของใยอาหารที่ละลายน้ำไม่ได้มีค่าต่ำลงหลังผ่านการใช้ด่าง Larrea et al. (1997) ทำการศึกษาผลของการใช้ด่างในการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแกลบ (rice hull) แกลบเป็นวัสดุที่มีปริมาณใยอาหารสูง ส่วนปริมาณแป้ง โปรตีน และไขมันมีอยู่ต่ำมากเมื่อเทียบกับวัสดุใยอาหารประเภทรำ แล้วนำมาผ่านกระบวนการใช้ด่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ pH ประมาณ 11.5 ภายหลังผ่านการใช้ด่างพบว่าใยอาหารที่ได้มีค่าการดูดน้ำ (water absorption) และปริมาตรหลังดูดน้ำ (swollen volume) เพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) เนื่องจากลิกนินถูกกำจัดออกไป แต่เดิมโครงสร้างของแกลบมีปริมาณลิกนินอยู่สูง มีหน้าที่ทำให้โครงสร้างของแกลบมีความแข็งแรงมาก ในระหว่างกระบวนการใช้ด่างพบว่าด่างมีความสามารถไปทำลายพันธะที่ยึดเกาะกันของลิกนินกับส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่มักยึดกันอยู่ด้วยพันธะอีเทอร์ และเอสเทอร์ (Sjostrom, 1993) ต่อมาในขั้นตอนของการล้างส่วนของลิกนินจึงถูกกำจัดออกไป ทำให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นช่องว่างมากขึ้น การที่พันธะเดิมถูกทำลายให้ส่วนปลายของพันธะเป็นอิสระมากขึ้น ทำให้น้ำสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างได้สะดวก และไปจับอยู่กับตำแหน่งพันธะที่ว่างอยู่ ดังนั้นใยอาหารที่ใช้ด่างจึงมีความสามารถในการดูดน้ำ บวม และให้ปริมาตรของใยอาหารสูงขึ้น

2.4.2.3 การใช้กรด (acid treatment)

Ning et al. (1991) ใช้กรดเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของรำข้าวโพด พบว่าโครงสร้างของใยอาหารมีระดับความเป็นรูพรุนสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับรำข้าวโพดดิบ และพบค่าความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้น ($p < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบหลักของใยอาหารถูก

ละลายออกไปด้วยกระบวนการไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ไปเป็นน้ำตาลเพนโทส และเฮกโซส เช่น กลูโคส แรมโนส อะราบิโนส ไซโลส แมนโนส และกาแลคโทส ทำให้เกิดโครงสร้างที่หลวมไม่เป็นระเบียบ และเกิดความไม่เสถียรของพันธะไกลโคซิดิกระหว่างน้ำตาลเพนโทสและเฮกโซส ผิวหน้าของใยอาหารจึงเกิดเป็นรูพรุนสูงขึ้น และน้ำผ่านเข้าไปภายในใยอาหารได้ง่ายขึ้น โดยที่อัตราของการไฮโดรไลซิสจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในกระบวนการใช้กรด และความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น

บทที่ 3

ผลของสภาวะการแปรรูปและการเติมรำข้าวดิบต่อลักษณะทางกายภาพ
ของเอกซ์ทรูเดตข้าว

**EFFECTS OF EXTRUSION CONDITIONS AND NATIVE RICE BRAN
ADDITION ON PHYSICAL CHARACTERISTICS
OF RICE EXTRUDATE**

บทคัดย่อ

การเอกซ்தูคเป้งข้าวด้วยเครื่องเอกซ்தูคเอร์สกรู มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสภาวะการแปรรูปด้านความชื้นของวัตถุดิบ 20 ถึง 24 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 250 ถึง 350 รอบต่อนาที และอุณหภูมิของบารเล 160 ถึง 180 องศาเซลเซียส และศึกษาผลของการเติมรำข้าวคิบที่ระดับ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่มีต่อตัวแปรตามการแปรรูป และลักษณะทางกายภาพของเอกซ்தูคเต ผลการทดลองพบว่าอัตราการขยายตัวของเอกซ்தูคเตมากขึ้นเมื่อความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิของบารเลลดลง ซึ่งตัวแปรตามการแปรรูปทางด้านแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบมีค่าสูงขึ้น ($p<0.01$) แต่พบผลในทางตรงกันข้ามสำหรับค่าแรงที่ใช้ในการกดเอกซ்தูคเตให้แตก ($p<0.01$) ส่วนเอกซ்தูคเตที่มีความหนาแน่นต่ำเกิดจากสภาวะการแปรรูปที่มีความชื้นของวัตถุดิบต่ำแต่อุณหภูมิของบารเลสูง โดยมีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับแรงทอร์คและพลังงานกลจำเพาะ ($p<0.01$) ผลการวัดสมบัติการไหลจากเครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วพบว่า เอกซ்தูคเตเป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ ที่มีการขยายตัวสูงกว่ามีค่าความหนืดเริ่มต้นต่ำ ($p<0.01$) ในขณะที่ระดับเจลลาติไนซ์เซชันของเอกซ்தูคเตเป้งข้าวทั้งหมดอยู่ในช่วง 91-98 เปอร์เซ็นต์ ในด้านผลการเติมรำข้าวคิบเมื่อเปรียบเทียบกับการเอกซ்தูคเตเป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการเติมรำข้าวคิบในระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ อัตราการขยายตัว และแรงกดแตกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อเติมรำข้าวคิบในระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ พบการลดลงของค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ ความดันที่หัวแบบ อัตราการขยายตัว และการเพิ่มขึ้นของแรงกดแตก และความหนาแน่น ($p<0.05$)

Abstract

Rice flour was extruded using a twin-screw extruder. The objectives of this investigation were to study the effects of feed moisture content from 20-24%, screw speed from 250-350 rpm, and barrel temperature from 160-180^oC as well as the effects of 10 and 20% native rice bran additions which affected extrusion parameters and physical characteristics of extrudates. The results showed that expansion ratio increased with a decrease in feed moisture content, screw speed, and barrel temperature, showing the extrusion parameters with higher torque, higher specific mechanical energy, and higher die pressure ($p<0.01$). However, the opposite effect on compression force was found. Low density of extrudate appeared as decreasing feed moisture content but increasing barrel temperature. Density decreased with an increase in torque and specific mechanical energy ($p<0.01$). From Rapid Visco Analyser results, the lower cold viscosity occurred in the higher expanded 100% rice extrudates ($p<0.01$). The degree of starch gelatinization of rice extrudate showed 91-98% in all extrusion conditions. The effects of native rice bran additions was compared with 100% rice flour on extrusion processing. At 10% native rice bran addition showed a non-significant difference in torque, specific mechanical energy, expansion ratio, and compression force. A decreased in torque, specific mechanical energy, expansion ratio, and an increased in compression force and density were found on the 20% native rice bran added extrudates ($p<0.05$).

3.1 บทนำ

ข้าวเป็นวัตถุดิบที่นิยมใช้ผลิตขนมขบเคี้ยวและผลิตภัณฑ์อาหารเข้า กระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นการแปรรูปที่เกิดแรงเฉือนและแรงเสียดสีแล้วเปลี่ยนเป็นความร้อนซึ่งทำให้อุณหภูมิเกิดการสุก ตัวแปรด้านวัตถุดิบมีความสำคัญในการกำหนดลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น เมื่อปริมาณความชื้นลดลงจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีการพองตัวที่ดี ความหนาแน่นต่ำ และแรงที่ใช้ในการตัดต่ำ รวมทั้งขนาดของโพรงอากาศมีความสม่ำเสมอมากขึ้น (รุ่งนภาพงศ์สวัสดิ์มานิต และ ประชา บุญญสิทธิกุล, 2538; Ryu and Lee, 1988) ส่วนของสภาวะการแปรรูปก็มีความสำคัญเช่นกัน เช่น ความเร็วรอบสกรูเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อแรงทอร์ค ความดันที่หัวแบบ และพลังงานกลจำเพาะมากกว่าผลจากการเติมเกลือและน้ำตาลในการเอกซ์ทรูดแป้งข้าว (Hsieh et al., 1993) Grenus et al. (1993) พบว่าเมื่อความเร็วสกรูเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะสูงขึ้น แต่กลับส่งผลให้การขยายตัวของเอกซ์ทรูเดต่ำลงเนื่องจากเวลาที่โคอยู่ในบาริลต่ำลงจึงทำให้การเกิดเจลลาติในเซชันอยู่ในระดับที่ต่ำลง และ Lue et al. (1991) พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูแม้จะมีผลให้การขยายตัวของเอกซ์ทรูเดจากแป้งข้าวโพดในแนวรัศมีลดลง และขนาดของโพรงอากาศเล็กลง แต่ให้การขยายตัวในแนวยาวมากขึ้นจึงทำให้ปริมาตรของการขยายตัวสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิบาริลเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดย Guha et al. (1997) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิบาริลส่งผลให้ค่าแรงทอร์คลดลง ในขณะที่เอกซ์ทรูเดของแป้งข้าวมีความหนาแน่นลดลงเมื่ออุณหภูมิของบาริลสูงถึง 100 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอีกจะส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

การบริโภคโยอาหารในปริมาณที่เพิ่มขึ้นได้รับการวิจัยและเชื่อว่าเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่างๆ เช่น ท้องผูก มะเร็งลำไส้ โรคอ้วน เบาหวาน และความดันโลหิตสูง เป็นต้น (Gordon, 1989) ปัจจุบันผู้บริโภคมีความห่วงใยและเอาใจใส่สุขภาพมากขึ้น จึงถือว่าเป็นโอกาสดีที่ผลิตภัณฑ์อาหารที่มีโยอาหารสูงจะวางจำหน่ายในท้องตลาดได้มากขึ้น แหล่งของโยอาหารที่ได้รับความนิยมเพื่อเติมลงในผลิตภัณฑ์อาหารคือ รำข้าวสาลี และรำข้าวโอ๊ต ในขณะที่รำข้าวซึ่งเป็นอีกแหล่งหนึ่งของโยอาหารยังขาดการสนใจในการนำไปเสริมในผลิตภัณฑ์อาหาร จากงานวิจัยรายงานว่ารำข้าวมีส่วนช่วยในการลดปริมาณคอเลสเตอรอลในเส้นเลือดได้ (Saunders, 1990; Kahlon et al., 1990) โดยสารออไรซานอลที่มีอยู่ในปริมาณ 1.2-1.8 เปอร์เซ็นต์ของน้ำมันจากรำข้าวมีสมบัติช่วยลดคอเลสเตอรอล และเป็นสารต่อต้านการเกิดออกซิเดชัน (สายสนม ประดิษฐ์ดวง, 2541) ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงได้สนใจเพื่อนำรำข้าวมาใช้เติมในการผลิตผลิตภัณฑ์พองตัวจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยทั่วไปขนมขบเคี้ยวมักมีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลักทำให้สารอาหารส่วนมากเป็นพวกคาร์โบไฮเดรต ส่วนสารอาหารชนิดอื่นจำพวกโปรตีนและโยอาหารยังมีอยู่ในปริมาณต่ำ อย่างไรก็ตามการศึกษาผลของการเติมโยอาหารจาก

แหล่งต่างๆ ในการผลิตขนมขบเคี้ยวด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันยังคงมีอยู่น้อย และยังมีความต้องการการศึกษาเพิ่มขึ้น การศึกษาของ Hsieh et al. (1989) พบว่าการเพิ่มปริมาณใยอาหารจากข้าวโอ๊ตและข้าวสาลีส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตมีความหนาแน่นสูงขึ้น อัตราการขยายตัวต่ำลง โพร่งอากาศมีขนาดเล็กลง และเกิดลักษณะที่มีเนื้อแน่น และการวิจัยของ Lue et al. (1991) พบการลดลงของการขยายตัวในแนวรัศมี แต่มีการขยายตัวทางยาวเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมใยอาหารจากหัวบีท (sugar beet fiber) สูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singh et al. (2000) ที่พบการลดลงของอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตข้าวเจ้าเมื่อมีการเติมใยอาหารจากรำข้าวสาลีในช่วง 0-100 เปอร์เซ็นต์ แต่พบความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดตต่ำสุดเมื่อเติมรำข้าวสาลี 15 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของคะแนนความกรอบพบว่าการเติมรำข้าวสาลีสูงถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ไม่ทำให้คะแนนความกรอบลดลงอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งจากผลการวิจัยของ Berglund et al. (1994) พบว่าการเติมแป้งข้าวบาเลย์ที่มีปริมาณใยอาหารสูงลงในแป้งข้าวถึง 65 เปอร์เซ็นต์ ไม่ทำให้ความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดตแตกต่างจากการเติมแป้งข้าวบาเลย์ที่ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งมีคะแนนความชอบด้านความกรอบและสีสูงกว่าเอกซ์ทรูเดตจากแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าผลของการเติมใยอาหารในกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ยังคงไม่ชัดเจน จึงยังมีความต้องการในการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลและระดับการเติมใยอาหารที่มีต่อตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทรูชัน ซึ่งส่งผลไปยังลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งวัตถุดิบแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน เมื่อได้รับความร้อนและแรงเฉือนภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แล้วจะให้ลักษณะความหนืดของโคที่แตกต่างกัน (Grenus et al., 1993) ดังนั้นการทำนายลักษณะของผลิตภัณฑ์ยังคงมีความยากสำหรับวัตถุดิบที่มีส่วนผสมแตกต่างกันไป

การออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแปรรูปเอกซ์ทรูชันอาจช่วยในการทำนายลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ โดยจะมีความจำเพาะสำหรับวัตถุดิบแต่ละชนิด การศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะช่วยให้เกิดความเข้าใจ และสามารถควบคุมกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์พองตัวจากแป้งข้าวและรำข้าวได้อย่างเหมาะสม การเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของวัตถุดิบอาจทำให้ผลจากตัวแปรการแปรรูปเบี่ยงเบนไป ดังนั้นสมการทางคณิตศาสตร์จึงมีส่วนช่วยในการชี้ให้เห็นถึงผลจากตัวแปรการแปรรูปต่างๆ ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ลักษณะความหนืด (pasting properties) และระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชัน (degree of starch gelatinization) ของเอกซ์ทรูเดตนั้นจะช่วยให้เกิดความเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของลักษณะทางกายภาพ ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความชื้นวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิบาร์ที่มีต่อตัวแปรตามจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันและลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตชนิดพองตัวทันที รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทรูชันกับลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลจากกระบวนการ

เอกซ์ทรูชันของวัตถุดิบแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ วัตถุดิบแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

3.2 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ปลายข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และรำข้าวขาวดอกมะลิ105 จากบริษัทปทุมไรซ์ มิลลแอนด์แกรนูลรี จำกัด (มหาชน) บดปลายข้าวด้วยเครื่องบดเมล็ดพันธุ์แบบหมอน (hammer miller) (Retsch, SK100, standard rostfrei, Germany) ผ่านตระแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร รำข้าว ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช (0.85 มิลลิเมตร) ผสมรำข้าวลงในแป้งข้าว 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ (w/w) เก็บแป้งข้าว และวัตถุดิบผสมในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการผลิต

3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าว และรำข้าว

3.2.2.1 ปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี AOAC (1997)

3.2.2.2 ปริมาณไขมัน ด้วยวิธี AOAC (1997)

3.2.2.3 ปริมาณเถ้า ด้วยวิธี AOAC (1997)

3.2.2.4 ปริมาณสตาร์ช ด้วยวิธี anthrone method (Roe, 1955)

3.2.2.5 ปริมาณอะมิโลส สำหรับแป้งข้าว ตามวิธีของ Juliano (1971)

3.2.3 การศึกษาเบื้องต้น

หาช่วงระดับของสภาวะการแปรรูป คือ อัตราการป้อนวัตถุดิบ อุณหภูมิบาร์เรล ความเร็วรอบสกรู และความชื้นของวัตถุดิบที่ทำให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สามารถดำเนินไปได้ด้วยสภาวะคงที่ และตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตด้านอัตราการขยายตัว

3.2.4 การผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นำวัตถุดิบมาป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ 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 ประกอบด้วยบาร์เรล 4 ท่อนเรียงต่อกันและปิดด้วยหัวแบบ (die plate) ที่มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร โดยรูปแบบการจัดเรียงสกรู (screw configuration) เป็นแบบสำหรับผลิตกัณฑ์ชนิดพองตัวตามที่ดังตารางที่ 3.1 นำแป้งข้าวป้อนเข้าเครื่องโดยใช้อัตราการป้อนคงที่ 9.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ด้วยถังป้อนที่มีสกรูอยู่ก้นถัง ทำหน้าที่ป้อนวัตถุดิบแบบปริมาตร (K-Tron Corp. Pitman, NJ) มีปั้มน้ำชนิดที่มีการบีบตัวส่งน้ำเป็นระยะๆ (peristaltic pump) ปั้มน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบภายในบาร์เรล หัวหัวแบบมีใบมีดสำหรับตัดเอกซ์ทรูเดตที่ควบคุมความเร็ว

รอบ 400 รอบต่อนาที อุณหภูมิใบเรลท่อนต่างๆ ตั้งไว้ดังตารางที่ 3.2 การเก็บข้อมูลจากเครื่องเอกซัทรูเตอร์ เช่น อุณหภูมิของเอกซัทรูเตอร์ (product temperature) ความดันที่หัวแบบ (die pressure) และแรงทอร์ก (% torque) ถูกเก็บทุกๆ 5 นาทีหลังจากที่มีการเปลี่ยนสถานะและเมื่อค่าแรงทอร์กคงที่ เก็บตัวอย่างเอกซัทรูเตอร์ นำเข้าอบในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

ตารางที่ 3.1 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	5	23.75
single lead screw	1D	19.00
total lengths (mm)		475.00

ตารางที่ 3.2 การตั้งอุณหภูมิของใบเรล

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)

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

3.2.5 การวางแผนการทดลอง

ใช้แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design ในการศึกษาการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยศึกษาตัวแปรของสภาวะการแปรรูป 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปรแบ่งออกเป็น 3 ระดับดังนี้คือ ความชื้นวัตถุดิบที่ระดับ 20, 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรูที่ระดับ 250, 300 และ 350 รอบต่อนาที และอุณหภูมิบาเรลตอนที่ 4 ที่ระดับ 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส สภาวะการแปรรูปทั้งหมดประกอบด้วย 15 การทดลองดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 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

3.2.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต

3.2.6.1 การวัดอัตราการขยายตัว (expansion ratio)

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

3.2.6.2 ความหนาแน่น (piece density)

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

การคำนวณ

$$PD (g/cm^3) = \frac{W_p (g)}{V_v (cm^3) - \frac{W_s (g)}{D_s (g/cm^3)}}$$

เมื่อ PD = ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

W_p = น้ำหนักของเอกซ์ทรูเดต (กรัม)

V_v = ปริมาตรภาชนะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

W_s = น้ำหนักทราย (กรัม)

D_s = ความหนาแน่นของทราย (1.54 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

3.2.6.3 แรงกดแตก (compression force)

1) การเตรียมตัวอย่าง ตัดชิ้นของเอกซ์ทรูเดตให้มีความยาว 6 ± 0.2 เซนติเมตร อบในตู้อบลมร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที บรรจุลงถุงพลาสติกปิดผนึก แล้วทิ้งไว้ข้ามคืน (ประมาณ 18 ชั่วโมง) ในกล่องโฟมปิดฝา และควบคุมความชื้นของเอกซ์ทรูเดตที่ประมาณ 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 แล้วคำนวณหาค่าแรงเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่ตกลงบนเอกซ์ทรูเดตแล้วทำให้แตก (average maximum peak force)

3.2.6.4 การวิเคราะห์ความหนืดของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวดิบ

ใช้เครื่องวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็ว Rapid Visco Analyzer (RVA, Newport Scientific, Australia) โดยมีลักษณะของอุณหภูมิและเวลาเป็นดังนี้คือ เริ่มต้นการทำงานและควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส ตั้งแต่เวลา 0-6 นาที (idle and hold) ด้วยความเร็วในการกววน 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)

3.2.6.5 การวิเคราะห์ระดับเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ช (degree of starch gelatinization) ทำการวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ชสำหรับเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ ตามวิธีของ Chaing and Johnson method (1977)

นำค่าที่วัดได้มาสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรในสภาวะการแปรรูปที่เลือกศึกษา โดยการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุ (multiple regression) โดยใช้โปรแกรม SPSS (version 9.0) สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการโพลิโนเมียลกำลังสองซึ่งแสดงได้ดังนี้

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

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

3.3 ผลการทดลองและการวิจารณ์

3.3.1 ผลการศึกษาเบื้องต้น

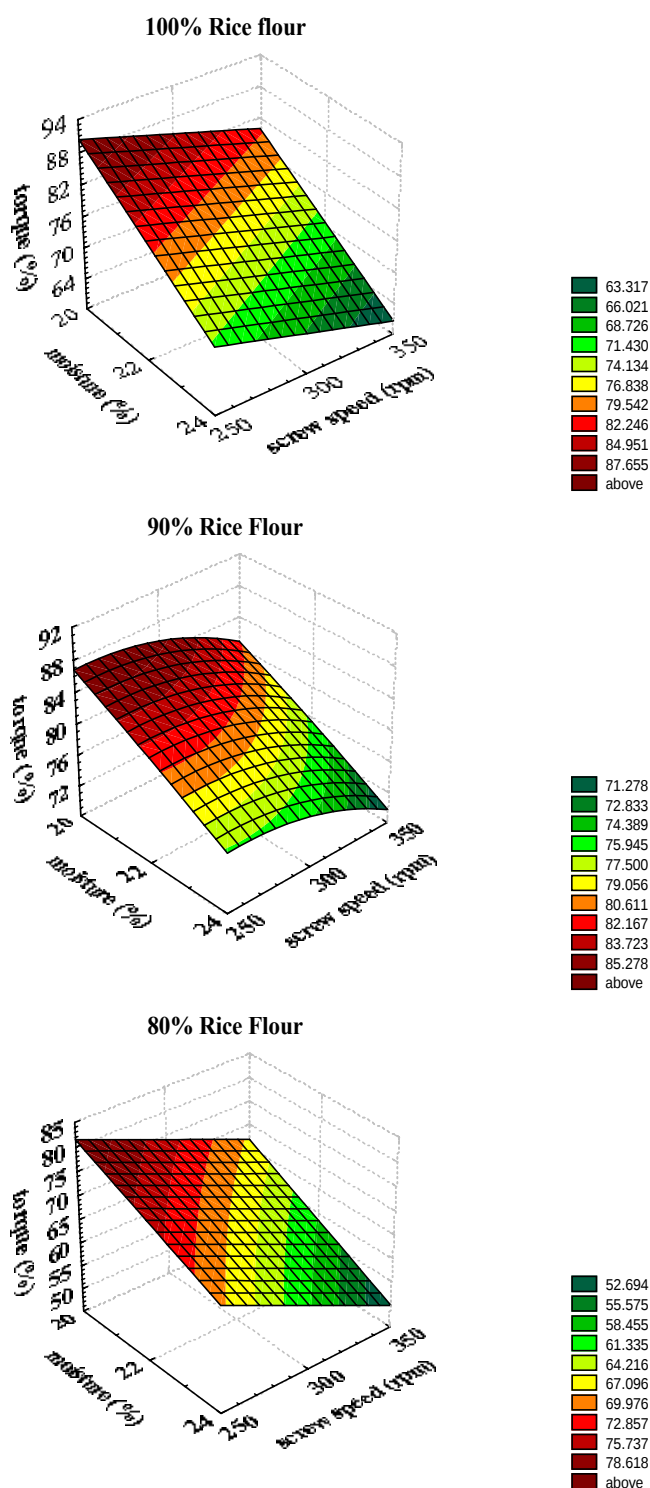
จากการศึกษาเบื้องต้นเพื่อเตรียมวัตถุดิบ พบว่าการบดข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร จะได้แป้งข้าวบดหยาบสำหรับป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ความชื้นของแป้งข้าวถูกปรับเป็น 20, 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นระดับความชื้นที่ทำให้เอกซ์ทรูเดอร์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่อง และสามารถใช้ใบมีดที่อยู่ติดกับหน้าแปลนของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ตัดได้ ลักษณะของเอกซ์ทรูเดอร์มีความพองตัวเมื่อออกจากหน้าแปลน และมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ไม่แข็งจนเกินไปอยู่ในช่วงที่สามารถวัดได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส ตั้งอัตราการป้อนวัตถุดิบในอัตราคงที่ 9.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เนื่องจากเป็นอัตราการป้อนที่มีความเหมาะสมให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ดำเนินการแปรรูปได้ที่ช่วงความเร็วรอบ สกรู 250-350 รอบต่อนาที ตั้งอุณหภูมิบารเรลตอนที่ 4 ไว้ที่ 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับนี้จะให้ลักษณะของเอกซ์ทรูเดอร์มีความแตกต่างกันในช่วงลักษณะที่ยอมรับได้ การใช้อุณหภูมิที่ทางออกของเครื่องมากกว่า 100 องศาเซลเซียส จะได้เอกซ์ทรูเดอร์ที่มีความพองตัวทันทีหลังจากออกจากเครื่อง (กมลวรรณ แจ้งชัด, 2541) ส่วนการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป (มากกว่า 180 องศาเซลเซียส) พบว่าเอกซ์ทรูเดอร์มีการขยายตัวลดลง ดังนั้นผลการศึกษาเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันคือ อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 9.0 กิโลกรัมต่อ

ชั่วโมง ความชื้นวัตถุดิบ 3 ระดับ คือ 20, 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 3 ระดับ คือ 250, 300 และ 350 รอบต่อนาที และอุณหภูมิใบารเลท่อนที่ 4 เป็น 3 ระดับ คือ 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส

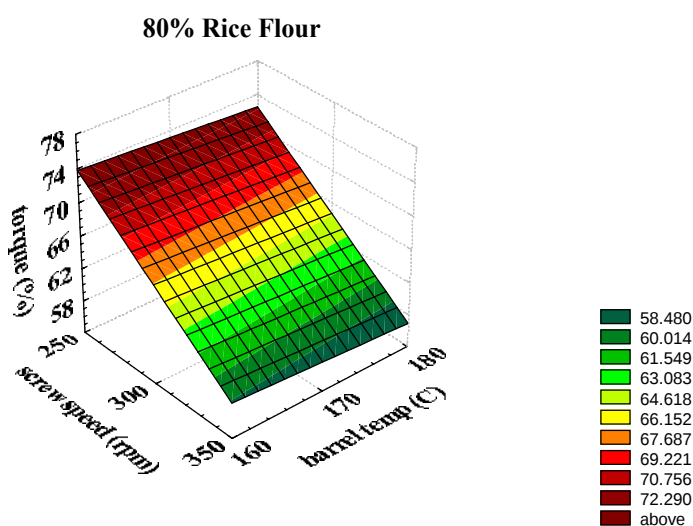
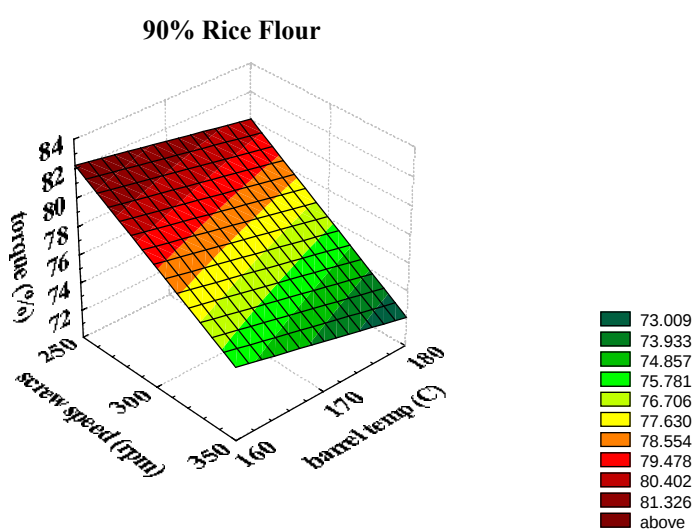
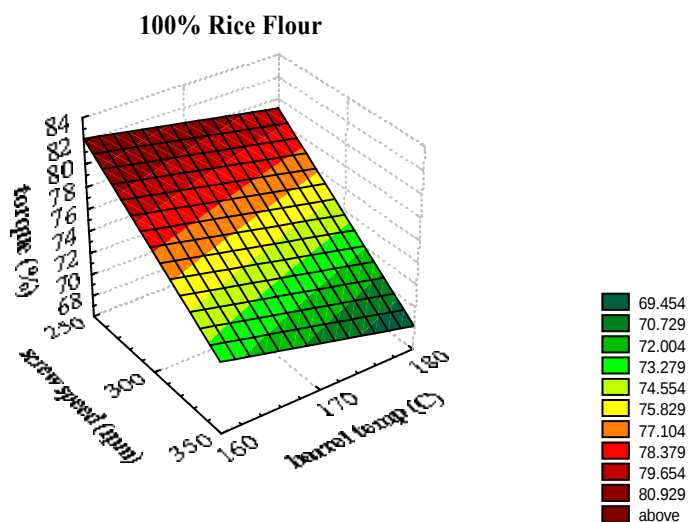
3.3.2 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

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 พบว่าลักษณะแนวโน้มจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรการแปรรูปที่มีต่อผลตอบสนองทั้งทางด้านแรงทอร์ก พลังงานกลจำเพาะ ความดันที่หัวแบบ อัตราการขยายตัว ความหนาแน่น และแรงกดแตก ในแต่ละวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิด มีทิศทางของผลตอบสนองคล้ายกัน แต่มีความแตกต่างในความมากน้อยของค่าตอบสนอง

แรงทอร์กเป็นตัวแปรตามที่สำคัญในการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ค่าแรงทอร์กชี้ให้เห็นถึงน้ำหนักหรือแรงต้านทานต่อการหมุนของมอเตอร์เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ แรงทอร์กได้รับผลโดยตรงจากสภาวะการแปรรูป เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับลักษณะความหนืดของโด และมีแนวโน้มที่จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะปรากฏของเอกซ์ทรูเดตที่จะได้ออกมา (Lue et al., 1994) จากการทดลองในครั้งนี้พบว่าความชื้นและผลรวมของความเร็รรอบสกรูกับอุณหภูมิใบารเลท่อนเป็นตัวแปรที่ส่งผลสำคัญต่อค่าแรงทอร์กซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 3.1 เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงทอร์ก ลดลง เนื่องจากโดภายในใบารเลท่อนมีความหนืดลดลงเมื่อมีน้ำอยู่ในส่วนผสมมากขึ้น ดังนั้นเมื่อแรงต้านทานต่อการหมุนของมอเตอร์เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ต่ำ ค่าแรงทอร์กจึงต่ำด้วย และเมื่อความเร็รรอบสกรูเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงทอร์กลดลง เนื่องจากผลของการมีลักษณะคล้ายพลาสติกของโด (pseudoplastic behavior) ที่ส่งผลต่อการลดลงของความหนืดทำให้แรงทอร์กมีค่าลดลง อีกทั้งการที่สกรูหมุนเร็วขึ้นเป็นการเพิ่มแรงเฉือนที่กระทำต่อโดภายในใบารเลท่อนจึงทำให้ความหนืดลดลง (Bhattacharya and Hanna, 1987; Lue et al., 1994) อีกทั้งยังสามารถอธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของความเร็รรอบจะปลดการเค้นเค็มของโดบนสกรูทำให้น้ำหนักของโดบนสกรูต่ำลง (Jin et al., 1994) สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิใบารเลท่อนว่าส่งผลต่อการลดลงของแรงทอร์กเพียงเล็กน้อยดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.1 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์คที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซทราชน้ำแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

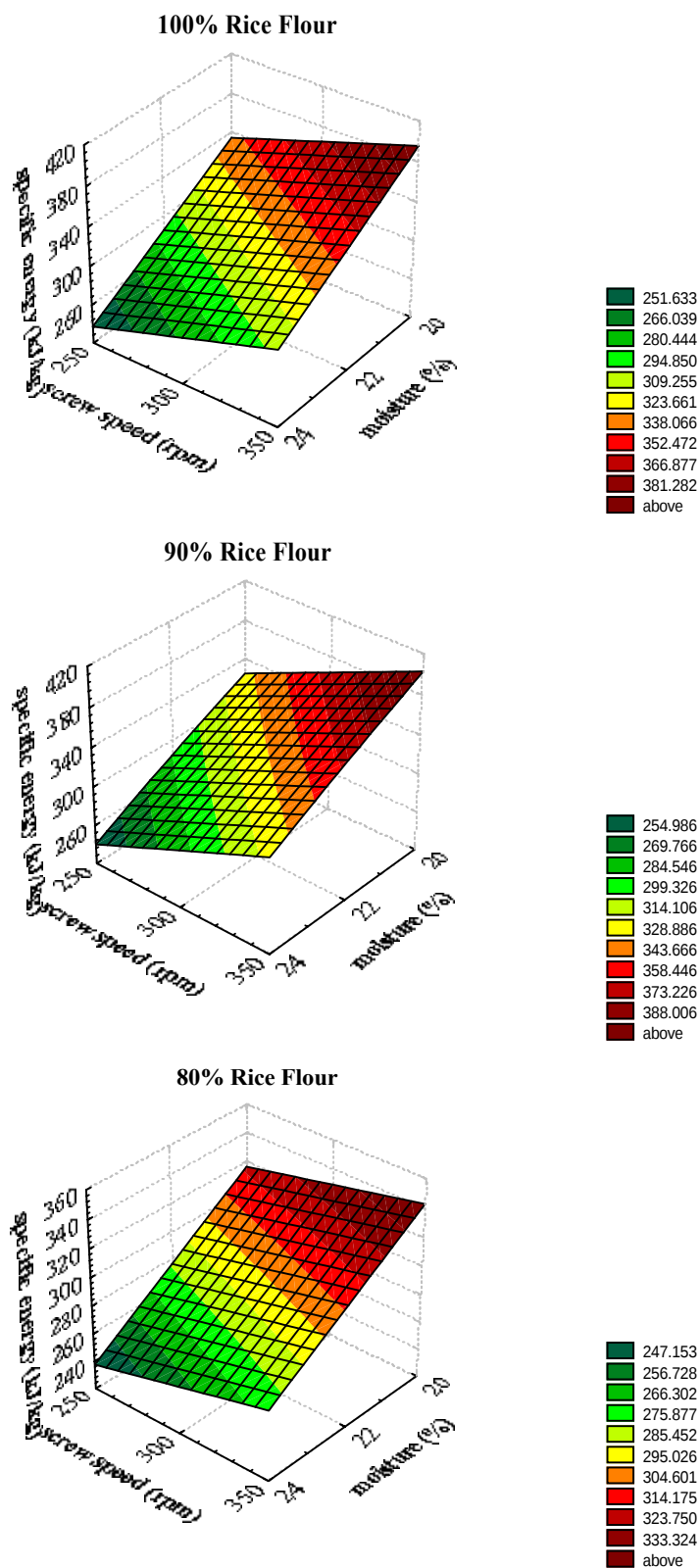


ภาพที่ 3.2 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์กที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิ
 บาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ
 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

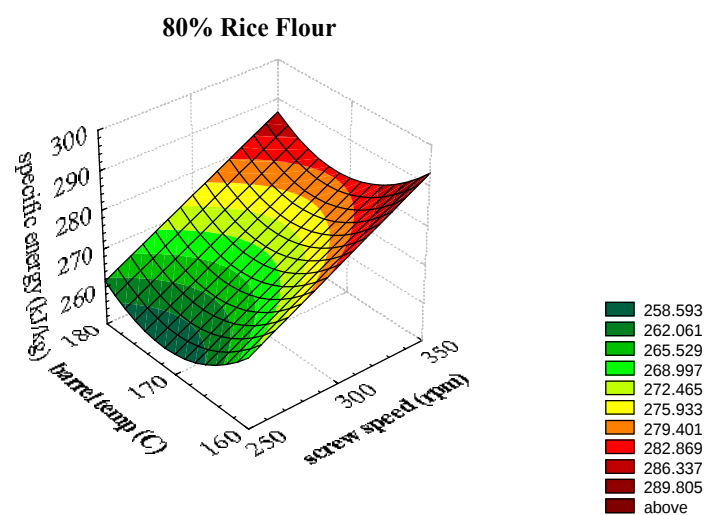
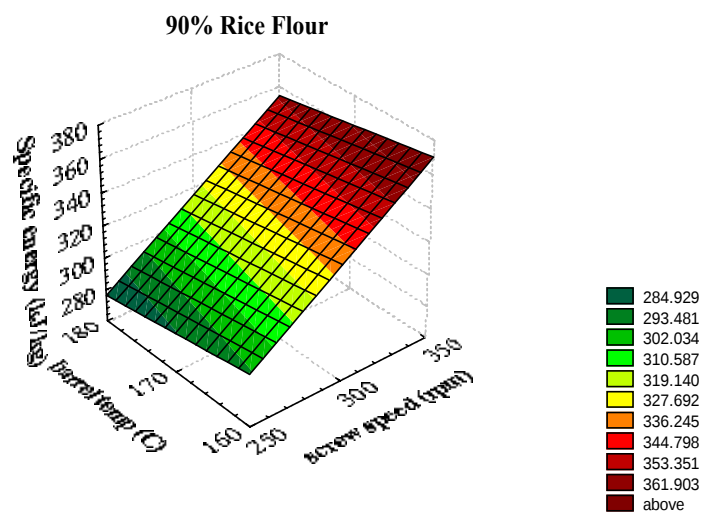
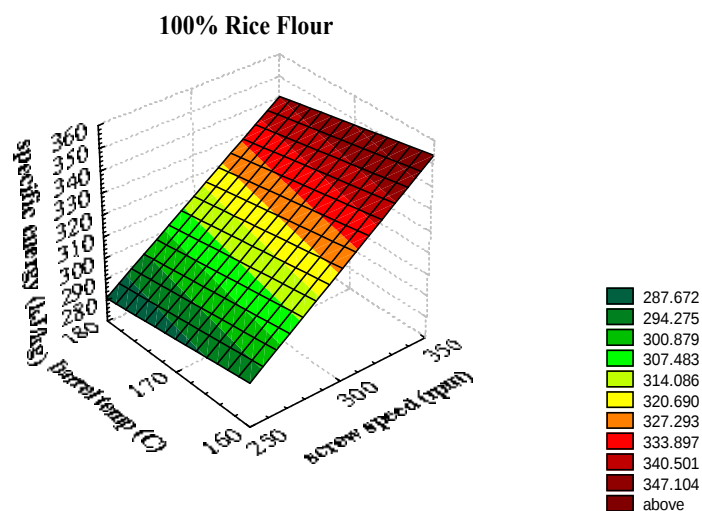
พลังงานกลจำเพาะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานกลที่ป้อนเข้าสู่วัตถุภายในบารเรล เนื่องจากการหมุนของสกรูในขณะที่ดำเนินการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน วัตถุได้รับพลังงานส่วนใหญ่จากทางกล จากการเสียดสีกันระหว่างวัตถุทำให้เกิดความร้อน ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์สุก (Lue et al., 1994) โดยสามารถคำนวณพลังงานกลจำเพาะได้จากสมการที่ 1 จากการทดลองพบแนวโน้มของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อค่าพลังงานกลจำเพาะแสดงในภาพที่ 3.3 และ 3.4 พบว่าเมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Grenus et al. (1993) และ Hsieh et al. (1989) สำหรับผลเนื่องจากความชื้นของวัตถุพบว่าความชื้นมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงกับค่าพลังงานกลจำเพาะ ($p < 0.01$) โดยจากกราฟในภาพที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อความชื้นของวัตถุสูงจะส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะลดลงมาก อันเนื่องมาจากการลดลงของความหนืดเมื่อมีปริมาณน้ำในวัตถุสูงขึ้น และน้ำเป็นตัวช่วยในการนำความร้อนระหว่างวัตถุได้ดีทำให้ความต้องการพลังงานกลในการทำให้อุณหภูมิมีการสุกต่ำลง ผลการทดลองในครั้งนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Ilo et al. (1999)

ความดันที่หัวแบบได้รับอิทธิพลจากผลรวมของตัวแปรการแปรรูปดังตารางที่ 1-3 ในภาคผนวก ค. จากภาพที่ 3.5 และ 3.6 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มความเร็วรอบสกรูมีผลทำให้ความดันที่หัวแบบลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิบารเรลสูงๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Hsieh et al. (1993) และ Garber et al. (1997) การลดลงของความดันที่หัวแบบเป็นผลมาจากความหนืดของโคมิค่าต่ำ อีกทั้งในสภาวะการแปรรูปที่ความเร็วรอบสกรูสูงๆ การเติมเต็มของโคมินสกรูน้อยลง และแรงเฉือนที่กระทำมากขึ้นร่วมกับอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการสะสมของโคมิบริเวณทางออกของเครื่องต่ำลง ทำให้ความดันที่หัวแบบต่ำลงด้วย (Hu et al., 1993) นอกจากนี้เมื่อความชื้นของวัตถุสูงขึ้นจะมีผลให้แรงเสียดสีของวัตถุกับบารเรล และวัตถุกับสกรู รวมทั้งแรงเสียดสีที่เกิดขึ้นบริเวณหน้าแปลนลดลง ส่งผลให้แรงทอร์คและความดันที่หัวแบบมีค่าต่ำลง

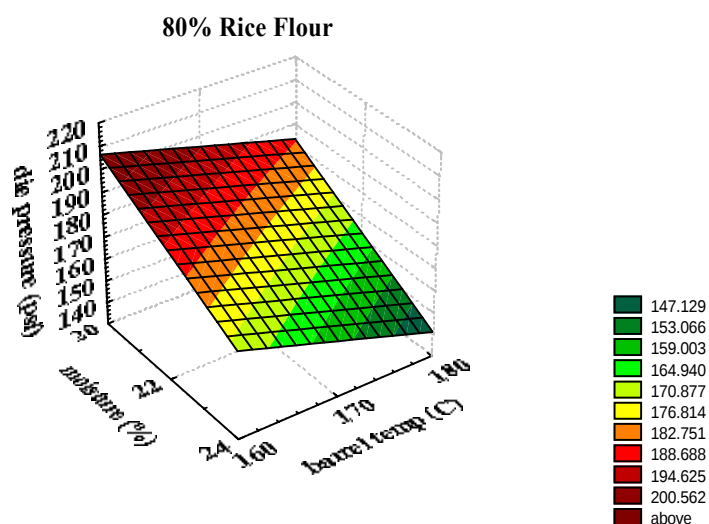
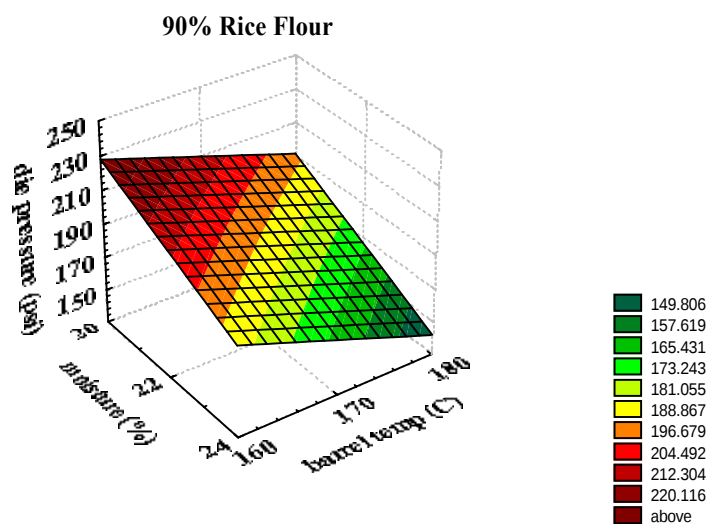
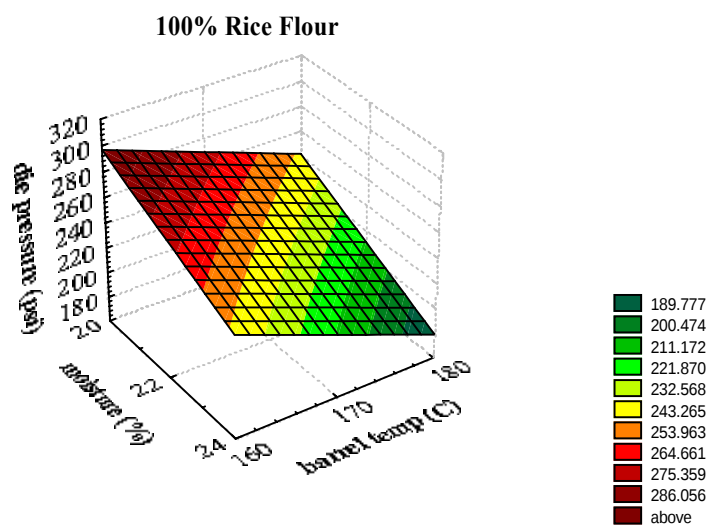
ในส่วนอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์นั้นพบว่าได้รับผลกระทบโดยตรงจากอุณหภูมิของบารเรลในทิศทางเดียวกัน ($p < 0.01$) แสดงดังตารางที่ 1-3 ในภาคผนวก ค. ในขณะที่ความชื้นวัตถุดิบและความเร็วรอบสกรูในช่วงสภาวะการแปรรูปที่ทำการศึกษานี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์น้อยมาก



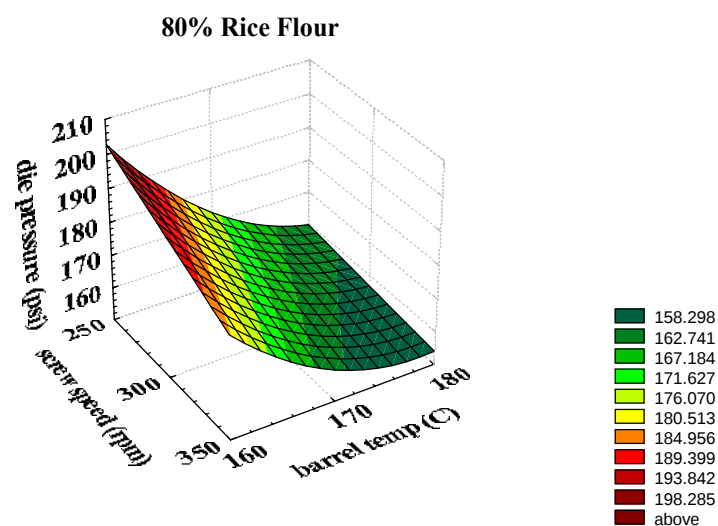
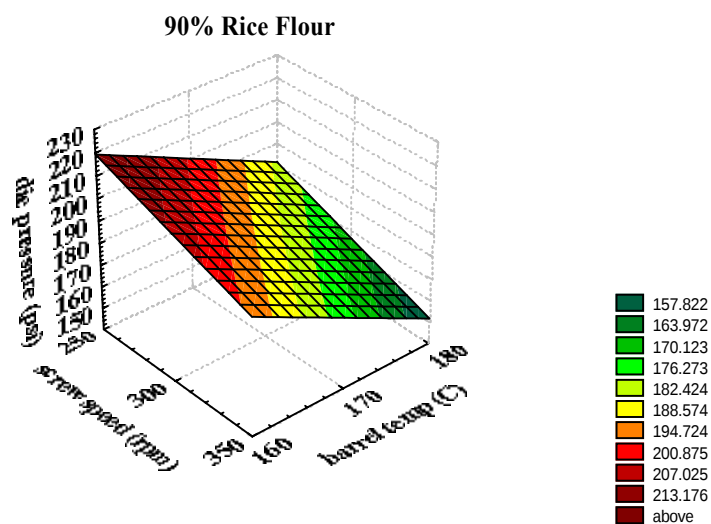
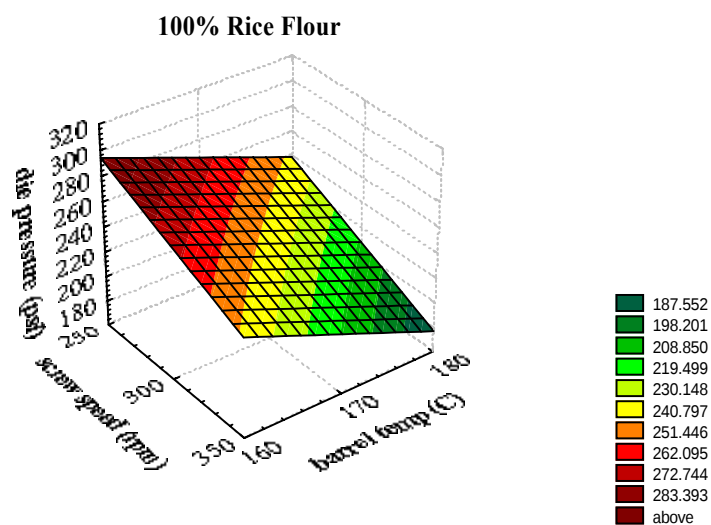
ภาพที่ 3.3 พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 3.4 พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และ อุณหภูมิบาร์เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวคืบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



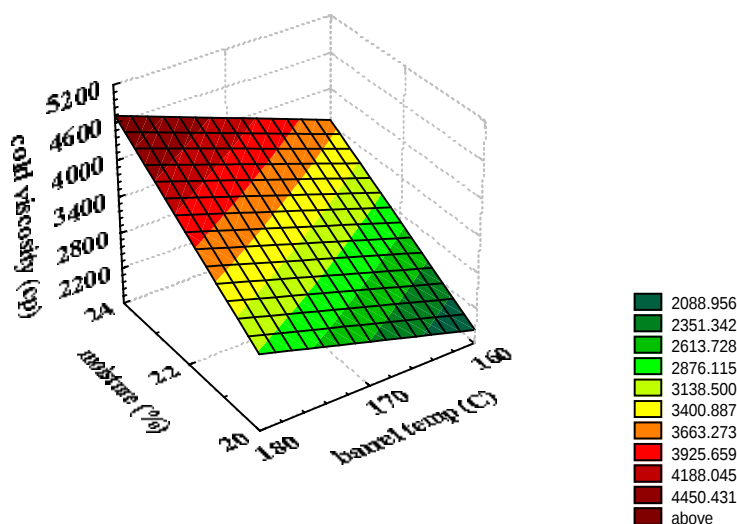
ภาพที่ 3.5 พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และ อุณหภูมิบาร์เรลในกระบวนการเอกซทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำ ข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 3.6 พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และ อุณหภูมิบาร์เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำ ข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

3.3.3 ความหนืดของเอกซ์ทรูเดต

ผลค่าความหนืดจากตารางที่ 3.4 พบว่าความหนืดขณะเย็นของเอกซ์ทรูเดตสูงกว่าแป้งข้าวดิบ 20-50 เท่า แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนจากลักษณะของแป้งดิบไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีระดับการสุกสูงอันเนื่องมาจากความร้อน และแรงกลของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าผลรวมของความชื้นกับอุณหภูมิบาเรลมีผลต่อค่าความหนืดขณะเย็น ($p < 0.01$) และให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.823 จึงนำสมการถดถอยมาสร้างกราฟแสดงผลตอบสนองแบบสามมิติได้ดังภาพที่ 3.7 พบว่าเมื่อความชื้นวัตถุดิบสูงขึ้นจาก 20-24 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ค่าความหนืดขณะเย็นของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบาเรลส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดขณะเย็นค่อนข้างน้อย เนื่องจากเมื่อความชื้นวัตถุดิบต่ำความหนืดของโดมากขึ้นดังผลจากค่าทอร์คที่สูงขึ้น อีกทั้งโดได้รับพลังงานกลสูง ดังนั้นจึงน่าจะเกิดการแตกตัวของสตาร์ช (degradation) มากกว่าวัตถุดิบที่มีความชื้นสูงกว่า จึงส่งผลให้ค่าความหนืดของเอกซ์ทรูเดตมีค่าต่ำลง สำหรับค่าสหสัมพันธ์ (correlation) ของความหนืดขณะเย็นกับตัวแปรตามต่างๆ ที่วัดได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ พบว่ามีความสัมพันธ์กันในเชิงตรงข้ามอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) กับแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบ ในส่วนของค่าความหนืดสูงสุดพบว่ามีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับแรงทอร์ค และพลังงานกลจำเพาะ ($p < 0.01$) ค่าความหนืดของเจลร้อนมีความสัมพันธ์ในเชิงตรงข้ามกับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์และพลังงานกลจำเพาะ ($p < 0.05$) และค่าความหนืดสุดท้ายมีความสัมพันธ์กับพลังงานกลจำเพาะในเชิงตรงข้ามเช่นกัน ($p < 0.01$)



ภาพที่ 3.7 พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนืดขณะเย็นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและอุณหภูมิบาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3.4 ค่าความหนืดจากการวิเคราะห์ความหนืดอย่างรวดเร็วของแป้งข้าวและเอกซ์ทรูเกตข้าว 100 เปอร์เซนต์

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

3.3.4 ระดับการเกิดเจลลาคีโนซ์เซชัน

ระดับการเกิดเจลลาคีโนซ์เซชันของเอกซ์ทรูเกตแป้งข้าว 100 เปอร์เซนต์ จากช่วงสภาวะการทดลองในครั้งนี้อยู่ในช่วง 91-98 เปอร์เซนต์ แสดงดังตารางที่ 3.5 พบว่าระดับการเกิดเจลลาคีโนซ์เซชันเฉลี่ยสูงสุดคือ 98.03 เปอร์เซนต์ ที่สภาวะการแปรรูปความชื้น 24 เปอร์เซนต์ ความเร็วรอบสกรู 300 รอบต่อนาที และอุณหภูมิบารเรล 180 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเป็นสภาวะการแปรรูปเดียวกันกับที่ทำให้เอกซ์ทรูเกตมีความหนืดขณะเย็นสูงที่สุด อย่างไรก็ตามไม่พบความสัมพันธ์กันระหว่างค่าความหนืดขณะเย็นกับระดับการเกิดเจลลาคีโนซ์เซชัน ($p>0.05$) ส่วนระดับการเกิดเจลลาคีโนซ์เซชันที่ต่ำสุดคือ 91.10 เปอร์เซนต์ ได้จากการแปรรูปที่สภาวะความชื้น 24

เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 300 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองนี้สามารถสังเกตได้ว่าในสภาวะการแปรรูปที่ให้อุณหภูมิ바เรลสูงสุดจะทำให้เอกซ์ทรูเดตเกิดการเจลลาคีไนซ์เซชันในระดับที่สูงด้วย โดยผลจากการวิเคราะห์พบว่าระดับการเกิดเจลลาคีไนซ์เซชันมีความสัมพันธ์ในเชิงบวก ($p < 0.05$) กับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ได้รับผลกระทบโดยตรงจากอุณหภูมิของ바เรลดังที่ได้กล่าวมา อีกทั้งยังพบว่าที่สภาวะการแปรรูปด้วยอุณหภูมิ바เรลต่ำที่ 160 องศาเซลเซียส การเกิดเจลลาคีไนซ์เซชันอยู่ในระดับที่ต่ำประมาณ 91-95 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามข้อมูลของระดับการเกิดเจลลาคีไนซ์เซชันในช่วงการแปรรูปในการทดลองครั้งนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปสร้างสมการในการทำนายผลได้ เนื่องจากค่า R^2 ของข้อมูลมีค่าค่อนข้างต่ำ

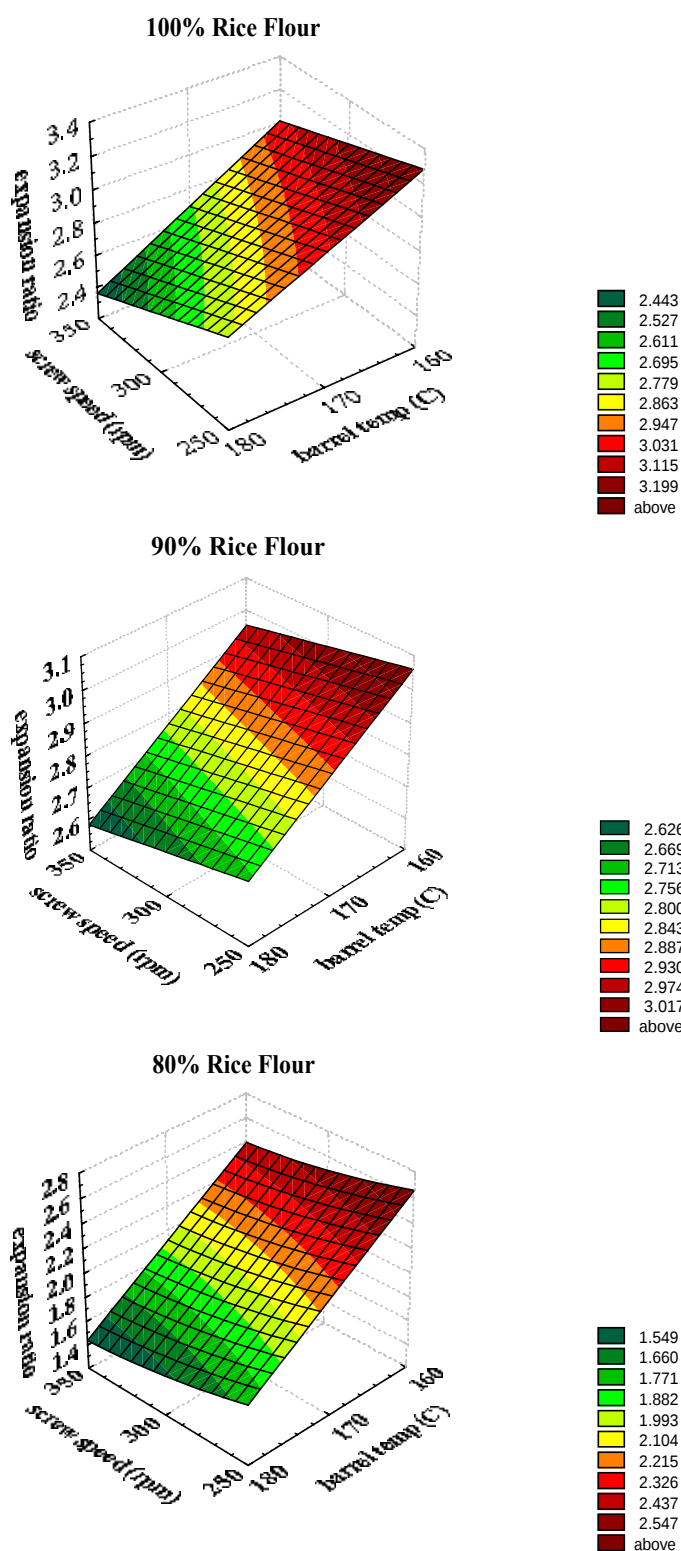
ตารางที่ 3.5 ค่าเฉลี่ยของระดับการเกิดเจลลาคีไนซ์เซชันของเอกซ์ทรูเดตจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป่งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์

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

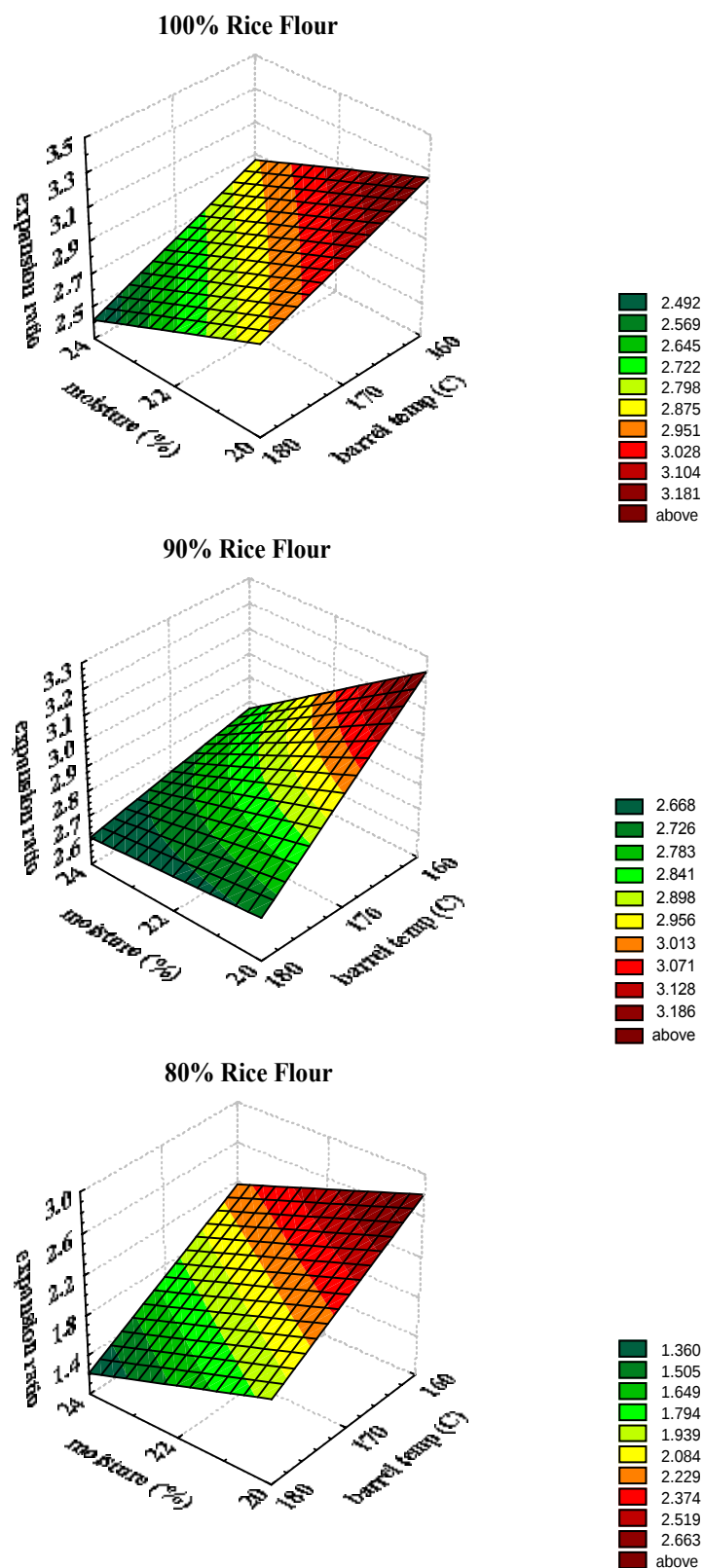
⁽¹⁾ ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวตั้งหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3.3.5 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต

การวิจัยครั้งนี้เลือกใช้แป้งข้าวพันธุข้าวดอกมะลิ 105 จัดเป็นข้าวประเภทข้าวอะมิโลสต่ำซึ่งมีปริมาณอะมิโลส 16.95 เปอร์เซ็นต์ จากผลการวิจัยของ Feldberg (1969) พบว่าวัตถุดิบที่มีปริมาณอะมิโลสมากจะทำให้การพองตัวและปริมาตรจำเพาะลดลง ในขณะที่อะมิโลเพคตินจะช่วยในการพองตัวและมีน้ำหนักเบา จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบตัวแปรการแปรรูปที่ส่งผลต่ออัตราการขยายตัวดังตารางที่ 5-7 ในภาคผนวก ก. สามารถนำไปสร้างกราฟแสดงผลตอบสนองได้ดังภาพที่ 3.8 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิบาเรลร่วมกับการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูส่งผลให้อัตราการขยายตัวลดลง เนื่องจากเมื่อลักษณะความยืดหยุ่นของโด (elasticity) มีค่าต่ำ และความหนืดของโดลดลง ทำให้เอกซ์ทรูเดตหลั่งออกจากเครื่องมีแนวโน้มของการขยายตัวต่ำลง ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Chinnaswamy and Hanna (1988) ที่พบว่าแป้งข้าวเจ้ามีการขยายตัวต่ำลงเมื่ออุณหภูมิของบาเรลสูงกว่า 158 องศาเซลเซียส ผลจากสภาวะการแปรรูปต่ออัตราการขยายตัวในภาพที่ 3.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความชื้นของวัตถุดิบลดลงในขณะที่อุณหภูมิของบาเรลต่ำส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตมีการขยายตัวสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะความหนืดของโดที่สูงขึ้นภายในบาเรลดังกล่าวจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์กับลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตดังตารางที่ 3.6 พบว่าอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตทั้งจากแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบ แสดงให้เห็นว่าเมื่อเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ดำเนินการแปรรูปด้วยสภาวะที่ให้ค่าตัวแปรตามดังกล่าวสูง จะส่งผลให้อัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับ Grenus et al. (1993) ที่พบว่าเมื่อความเร็วยรอบสกรูต่ำจะทำให้ค่าแรงทอร์คและความดันที่หัวแบบเพิ่มขึ้น และเมื่อมีความแตกต่างระหว่างความดันที่หัวแบบกับความดันบรรยากาศมากขึ้นจึงส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตที่ได้มีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของโดขึ้นกับอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตพบว่ามีความสัมพันธ์ในทางตรงข้าม ($p < 0.01$) ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้ขัดแย้งกับการทดลองของ Whalen et al. (1997) ที่พบว่าเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวสาลีที่มีอัตราการขยายตัวสูงจะมีค่าความหนืดของโดสูงด้วย



ภาพที่ 3.8 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และอุณหภูมิบาร์เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 3.9 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และอุณหภูมิบาร์ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3.6 ค่าสหสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่างตัวแปรตามการแปรรูปกับลักษณะทางกายภาพของ
เอกซ์ทราคเตดแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

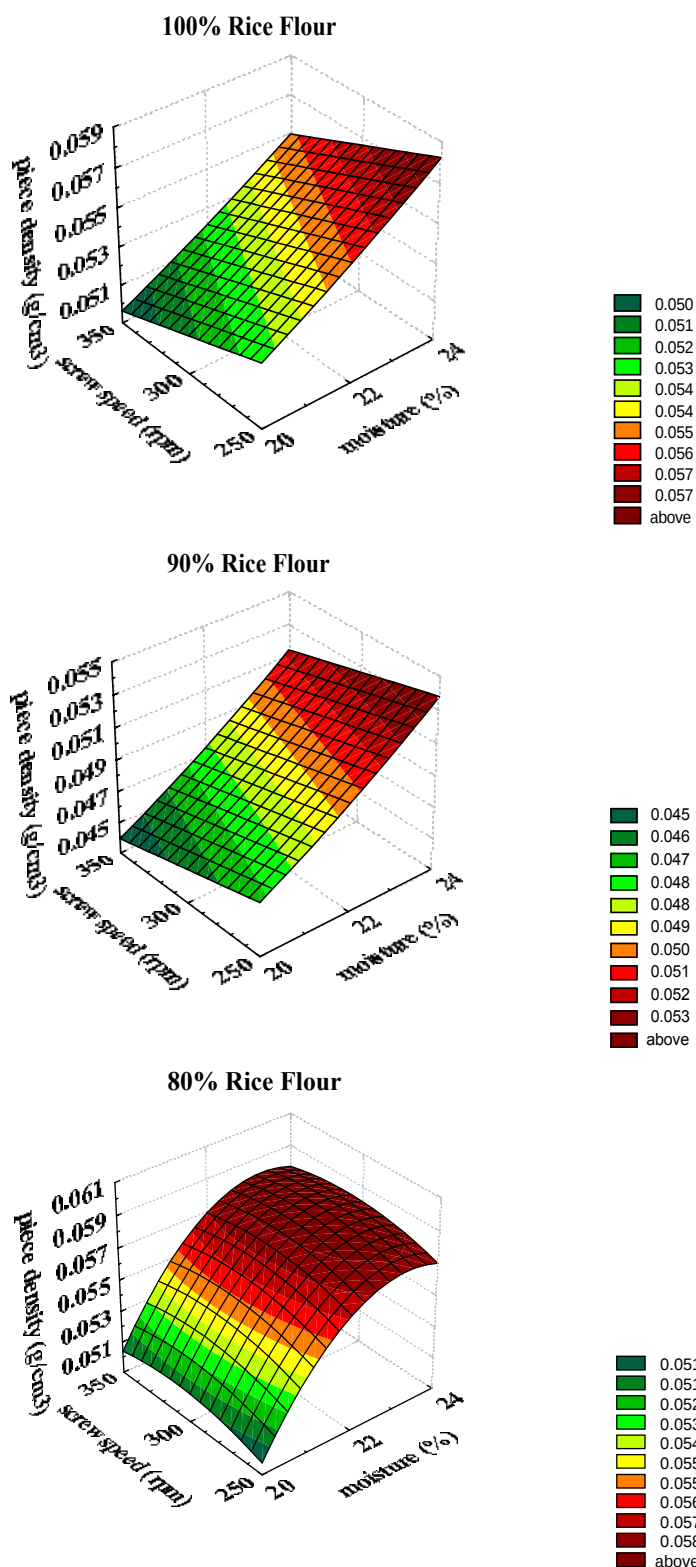
system	product characteristics		
parameters	expansion ratio	piece density	compression force
torque (%)	0.704**	-0.564**	-0.775**
SME (kJ/kg)	0.504**	-0.652**	-0.633**
die pressure (psi)	0.661**	-0.058 ^{ns}	-0.643**
product temperature (°C)	-0.171 ^{ns}	0.314 ^{ns}	0.124 ^{ns}

** p<0.01

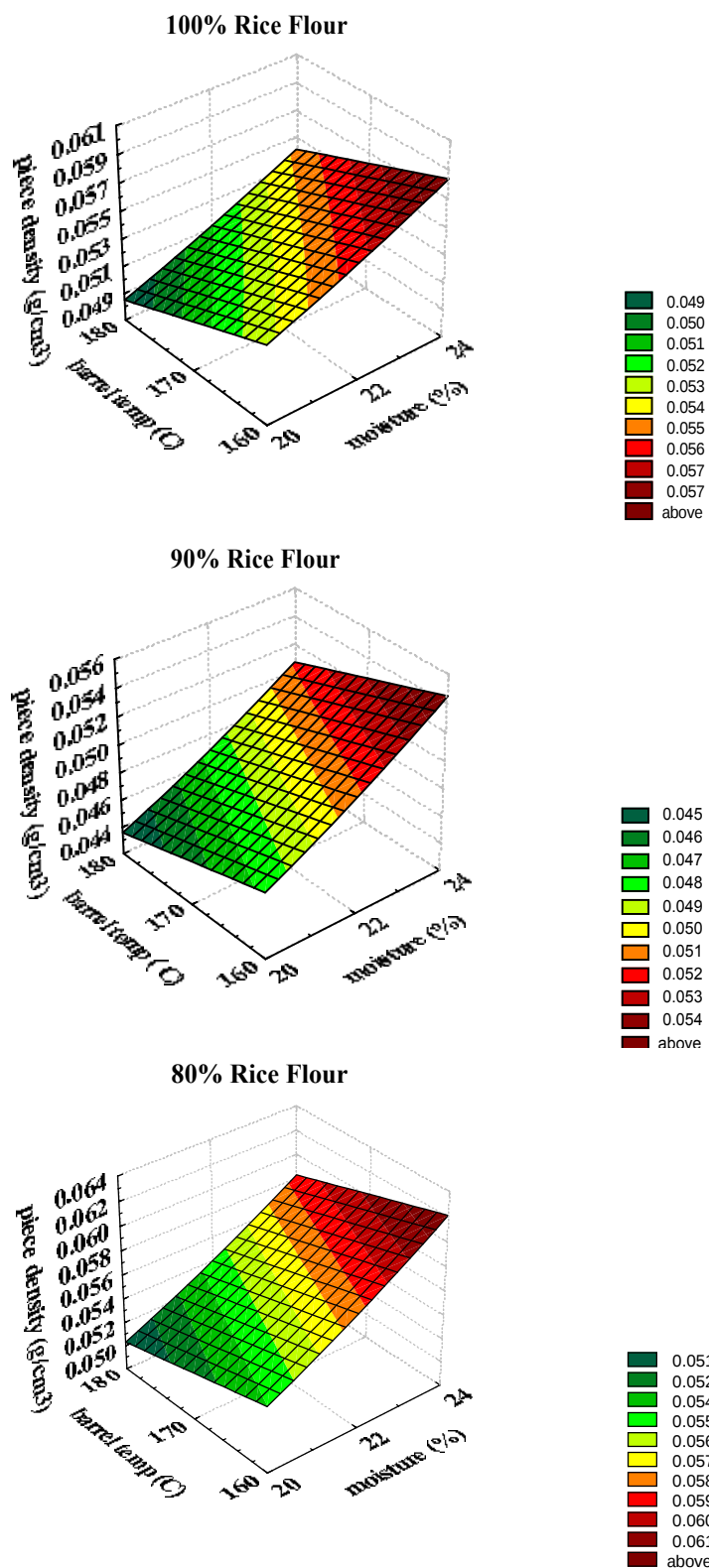
^{ns} ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ผลของสภาวะการแปรรูปที่มีต่อความหนาแน่นของเอกซ์ทราคเตดแสดงได้ดังภาพที่ 3.10 พบว่าเมื่อดำเนินการแปรรูปด้วยสภาวะที่ความชื้นต่ำและความเร็วรอบสกรูสูงๆ ส่งผลให้เอกซ์ทราคเตดที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ จากภาพจะเห็นได้ว่าความชื้นของวัตถุดิบส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นชัดเจนกว่าผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบสกรู ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Tomas et al. (1994) เนื่องจากปริมาณน้ำที่ต่ำลงจะไปทำให้ค่าความหนืดของโดภายในบารเรลเพิ่มขึ้น ทำให้เอกซ์ทราคเตดที่ได้มีน้ำหนักเบา และมีโพรงอากาศขนาดใหญ่ทำให้ค่าความหนาแน่นต่ำ จากภาพที่ 3.11 แสดงถึงสภาวะการแปรรูปที่ความชื้นวัตถุดิบต่ำและอุณหภูมิบารเรลสูงๆ ผลทำให้เอกซ์ทราคเตดที่มีความหนาแน่นต่ำ อย่างไรก็ตามสภาวะแปรรูปดังกล่าวนี้ไม่ได้ผลิตให้เอกซ์ทราคเตดที่มีอัตราการขยายตัวสูงสุด ดังที่ไม่พบความสัมพันธ์กันในเชิงสถิติระหว่างอัตราการขยายตัวกับความหนาแน่น เนื่องจากค่าอัตราการขยายตัวที่ทำการวัดในการศึกษาครั้งนี้เป็นการวัดอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเอกซ์ทราคเตดเอง แต่ค่าความหนาแน่นเป็นการวัดอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดทั้งในทิศทางตั้งฉากและทิศทางเดียวกันกับการไหล ผลการศึกษาความสัมพันธ์กับตัวแปรตามการแปรรูปในตารางที่ 3.6 พบว่าความหนาแน่นมีความสัมพันธ์ในเชิงตรงข้ามกับแรงทอร์ค (p<0.01)

อย่างไรก็ตามเอกซ์ทราคเตดที่มีอัตราการขยายตัวสูงไม่ได้แสดงถึงลักษณะที่ดีของผลิตภัณฑ์เสมอไป เพราะเอกซ์ทราคเตดที่มีอัตราการขยายตัวต่ำอันเนื่องจากการแปรรูปด้วยอุณหภูมิบารเรลสูง และมีระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันสูง อาจเป็นเอกซ์ทราคเตดที่ผู้บริโภคให้การยอมรับสูงกว่าเพราะมีความหนาแน่นต่ำกว่า การแปรรูปด้วยอุณหภูมิบารเรลสูงทำให้ความหนาแน่นของเอกซ์ทราคเตดต่ำลงได้เนื่องจาก เอกซ์ทราคเตดที่แม้ว่าจะมีการขยายตัวในแนวรัศมีต่ำลง แต่มีการขยายตัวในทางยาวมากขึ้น จึงมีผลต่อการเพิ่มปริมาตรของเอกซ์ทราคเตด นอกจากนี้เอกซ์ทราคเตดที่ได้ยังมี



ภาพที่ 3.10 พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

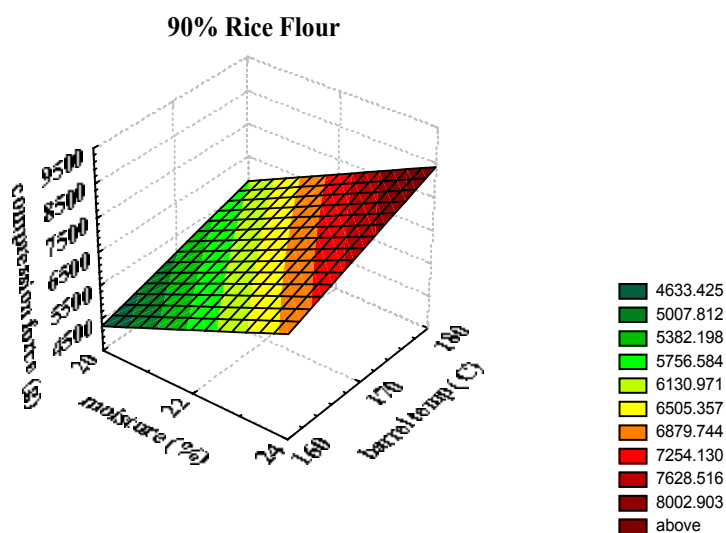
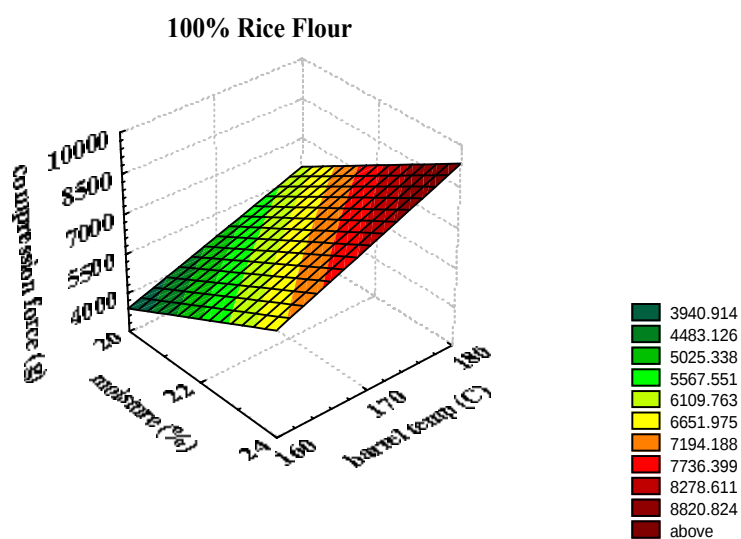


ภาพที่ 3.11 พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และ อุณหภูมิบาเรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำ ข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์

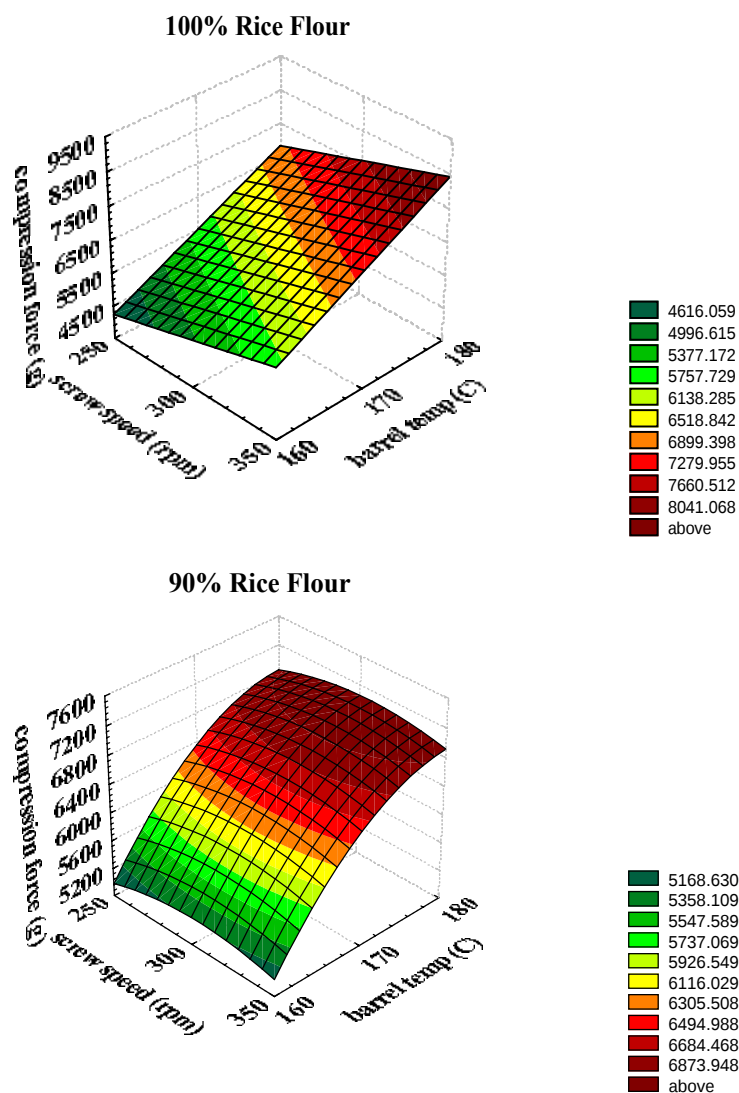
ลักษณะโครงสร้างเป็นรูปทรงแปดเหลี่ยม และมีผนังเซลล์บางทำให้ค่าความหนาแน่นต่ำลง จากลักษณะของเอกซทรีเดตดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงเป็นเหตุผลของการที่ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายตัวกับความหนาแน่นทางสถิติ

สำหรับผลของสภาวะการแปรรูปที่มีต่อค่าแรงกดแตก พบว่าแรงกดแตกได้รับอิทธิพลจากผลรวมของตัวแปรการแปรรูปเดียวกับตัวแปรที่ส่งผลต่ออัตราการขยายตัวดังตารางที่ 5-7 ในภาคผนวก ก. อีกทั้งพบว่าค่าแรงกดแตกมีความสัมพันธ์เชิงตรงกันข้ามกับแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 3.6 จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อเอกซทรีเดตมีอัตราการขยายตัวสูงหรือให้ลักษณะที่มีโพรงอากาศภายในโครงสร้างมากขึ้น ทำให้ค่าแรงที่ต้องการใช้กดให้เอกซทรีเดตแตกมีค่าต่ำ จากกราฟแสดงผลตอบสนองแบบสามมิติในภาพที่ 3.12 พบว่าการเพิ่มปริมาณความชื้นวัตถุดิบร่วมกับการให้อุณหภูมิอบสูงๆ มีแนวโน้มทำให้เอกซทรีเดตมีความแข็งมากขึ้นดังแสดงได้จากความต้องการแรงที่ใช้ในการกดแตกมากขึ้น จากภาพที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิอบสูงๆ ส่งผลให้ค่าแรงกดที่ทำให้เอกซทรีเดตเกิดการแตกหักมีค่ามากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Grenus et al. (1993)

จากการที่อุณหภูมิของบาเรลสูงขึ้นแล้วทำให้อัตราการขยายตัวต่ำลง แต่ความหนาแน่นของเอกซทรีเดตลดลงนั้นเป็นผลมาจาก เอกซทรีเดตมีลักษณะโพรงอากาศที่เล็กและสม่ำเสมอมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเกิดความแน่นของชิ้นเอกซทรีเดตในแนวรัศมี ผนังเซลล์อยู่กันอย่างใกล้ชิดขึ้น จึงทำให้แรงที่ใช้ในการกดแตกมากขึ้นด้วย การศึกษานี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Lue et al. (1991) ที่พบเอกซทรีเดตเป็งข้าวโพดที่มีอัตราการขยายตัวในแนวรัศมีลดลงมีความสัมพันธ์กับขนาดของโพรงอากาศที่เล็กลง จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบความสัมพันธ์ตรงข้ามระหว่างอัตราการขยายตัวกับแรงกดแตก ($p < 0.01$) แต่ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับแรงกดแตก



ภาพที่ 3.12 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบ และอุณหภูมิ
 บาเรลในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ
 10 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 3.13 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกที่สร้างระหว่างตัวแปรความเร็วรอบสกรู และ อุณหภูมิบาร์เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ และแป้งข้าวผสม ข้าวขาวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์

3.3.6 ผลของการเติมรำข้าว

จากตารางที่ 3.7 พบว่าการเติมรำข้าวในระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ อัตราการขยายตัว และแรงกดแตกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่พบการเปลี่ยนแปลงในทุกๆ ลักษณะที่ตรวจวัดเมื่อมีการเติมรำข้าวที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ ($p<0.05$) โดยมีการลดลงของแรงทอร์คและพลังงานกลจำเพาะอย่างชัดเจนที่การเติมรำข้าว 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอาจเกิดจากผลของปริมาณไขมันที่มีอยู่สูงในวัตถุดิบแป้งข้าวผสมรำข้าว 20 เปอร์เซ็นต์ ดังผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบในตารางที่ 3.8 โดยไขมันทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้ความหนืดของโดลดลง และไขมันอาจมีผลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน จึงทำให้ความต้องการพลังงานกลลดลง นอกจากนี้ปริมาณสตาร์ชที่ลดลงมีผลไปลดความหนืดของโดภายในบารเรลจึงส่งผลให้ค่าแรงที่ต้องการในการขับเคลื่อนสกรูของมอเตอร์ลดลง ในส่วนของปริมาณโปรตีนที่สูงขึ้นในแป้งข้าวผสมรำข้าว 20 เปอร์เซ็นต์ อนุภาคของโปรตีนอาจกระจายอยู่ในส่วนที่ต่อเนื่องของสตาร์ช ส่งผลไปรบกวนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชภายในบารเรล (Yuryev et al., 1995) ทำให้โดที่เกิดลักษณะคล้ายพลาสติกมีความหนืดลดลง แรงทอร์คจึงลดลงด้วย ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Mohamed (1990) ที่พบการลดลงของค่าแรงทอร์คเมื่อเติมโปรตีนถั่วเหลืองลงในแป้งข้าวโพด 0-25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับค่าความดันที่หัวแบบพบว่าการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีการเติมรำข้าว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของปริมาณไขมันส่งผลไปหล่อลื่นบารเรลทำให้โดเกิดการลื่นไหลและเคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้น ทำให้การสะสมของโดบริเวณทางออกของเครื่องต่ำลง ดังนั้นค่าความดันที่หัวแบบจึงลดลงมากเมื่อเริ่มมีการเติมรำข้าว

ผลการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของเอกซ்தูเคตพบว่า อัตราการขยายตัวของลดลง และแรงกดแตกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) เมื่อมีการเติมรำข้าวที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับการลดลงของอัตราการขยายตัวของเอกซ்தูเคตเมื่อมีการเติมใยอาหารจากข้าวโอ๊ตและข้าวสาลีสูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ (Hsieh et al., 1989) ซึ่งอาจเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉพาะในส่วนของปริมาณโปรตีนและไขมันซึ่งมีอยู่สูงในรำข้าว ซึ่งการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการพองตัวต่ำลง เพราะโปรตีนมีความสามารถในการพองตัวได้ไม่เหมือนกับสตาร์ช ดังมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Bhattacharya et al. (1997) ที่มีการเติมถั่ว (chick pea) ซึ่งมีปริมาณโปรตีนและไขมันสูงในการผลิตขนมขบเคี้ยวจากแป้งข้าวเจ้า ส่งผลให้การขยายตัวลดลงและแรงกดแตกสูงขึ้น และจากงานวิจัยในครั้งนี้นำพบว่าการเติมรำข้าวที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูงที่สุด อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าเอกซ்தูเคตที่เติมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ซึ่งผลของค่าความหนาแน่นนี้ไม่สอดคล้องกับอัตราการขยายตัว แต่สามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นนี้ได้

จากการที่อัตราการขยายตัวของเอกซัทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซนต์ กับเอกซัทรูเดตจากแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 เปอร์เซนต์ มีค่าใกล้เคียงกันแต่ค่าความหนาแน่นแตกต่างกัน เนื่องจากการเติมรำข้าวอาจทำให้มีการขยายตัวในทางยาวมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lue et al. (1991) ที่มีการขยายตัวทางยาวของเอกซัทรูเดตแป้งข้าวโพดมากขึ้นเมื่อมีการเติมใยอาหารจากหัวบีท จึงมีผลให้ค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าได้

ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปกับลักษณะทางกายภาพของเอกซัทรูเดตแป้งข้าว 100 เปอร์เซนต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซนต์

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⁾ ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวดังหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 3.8 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	-

3.4 รูปและข้อเสนอแนะ

กระบวนการแปรรูปวัตถุดิบแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ด้วยวิธีเอกซ์ทรูชันในครั้งนี้ สภาพการแปรรูปที่ความชื้นวัตถุดิบต่ำ 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรูต่ำ 250 รอบต่อนาที และอุณหภูมิใบเรลดต่ำ 160 องศาเซลเซียส ให้ลักษณะของเอกซ์ทรูเดตที่มีอัตราการขยายตัวสูงสุด เนื่องจากลักษณะโพรงอากาศภายในโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ค่าแรงที่ใช้ในการกดให้เอกซ์ทรูเดตเกิดการแตกมีค่าต่ำ ลักษณะทางกายภาพดังกล่าวนี้เกิดขึ้นเมื่อเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ดำเนินการแปรรูปด้วยค่าแรงทอร์คและความดันที่หัวแบบสูงๆ อีกทั้งความหนืดขณะเย็นของเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากสภาพการแปรรูปนี้มีค่าต่ำ เมื่อวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำได้รับการแปรรูปด้วยพลังงานกลจำเพาะสูง ทำให้ได้เอกซ์ทรูเดตที่มีความหนาแน่นต่ำ เพราะมีโครงสร้างรูพรุนเกิดขึ้นมาก ในด้านการสุกของสตาร์ชพบว่าระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการศึกษาถึงผลของตัวแปรการแปรรูปและค่าต่างๆ ที่วัดได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สามารถใช้ทำนายและบ่งชี้ถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ ความสัมพันธ์ที่พบนี้จึงอาจใช้เป็นแนวทางที่จะช่วยให้การดำเนินการแปรรูปเป็นไปได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และยังช่วยให้เกิดความเข้าใจในการแปรรูปมากขึ้น อีกทั้งลักษณะความหนืดของผลิตภัณฑ์ และระดับการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ชยังสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ได้อีกทางหนึ่งด้วย ในส่วนของผลจากการเติมรำข้าวดิบที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งตัวแปรตามจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ และลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อมีการเติมรำข้าวดิบในระดับที่สูงขึ้นคือ 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดการลดลงของค่าแรงทอร์คและพลังงานกลจำเพาะ และส่งผลไปสู่การลดลงของอัตราการขยายตัว การเพิ่มขึ้นของแรงกดแตก และความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดต

บทที่ 4

ผลของการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตข้าว

**EFFECTS OF ALKALINE-TREATED RICE BRAN ADDITION
ON PHYSICAL CHARACTERISTICS OF
RICE EXTRUDATE**

บทคัดย่อ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางด้านเคมีและกายภาพบางประการของรำข้าวเมื่อผ่านการใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH 9.0-11.0 มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการให้ความร้อนและระยะเวลาของการใช้ด่างที่มีต่อโครงสร้างของรำข้าว และค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ และเลือกใช้รำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างเพื่อเติมในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับรำข้าวดิบที่มีผลต่อตัวแปรตามการแปรรูป และลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตภายใต้สภาวะการแปรรูปเดียวกัน ผลการศึกษาโครงสร้างของรำข้าวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าการใช้ด่างกับรำข้าวที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตั้งแต่ 1-16 ชั่วโมง มีผลให้โครงสร้างของรำข้าวมีการเปิดตัวและเป็นรูพรุนมากกว่าการใช้ด่างที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง และรำข้าวดิบ โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาการให้อุณหภูมิสูงในกระบวนการใช้ด่างจะทำให้ชิ้นส่วนของรำข้าวเกิดการแตกหักมากขึ้น ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างสูงกว่ารำข้าวดิบ ($p < 0.05$) และการให้อุณหภูมิสูงทำให้รำข้าวมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่ารำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิห้อง ($p < 0.05$) องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่สภาวะการให้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ทางด้านปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และสสารขดลงเมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวดิบ ($p < 0.01$) ในขณะที่ใยอาหารมีปริมาณมากขึ้น ($p < 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบผลจากการเอกซ์ทรูชันพบว่าค่าความดันที่หัวแบบของการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ด่างสูงกว่าแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ ($p < 0.05$) และการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ด่างมีค่าสูงกว่าการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ ($p < 0.05$)

Abstract

The alteration of rice bran on physical characteristics was studied after treating with alkaline-sodium hydroxide pH 9.0-11.0. The objectives of this investigation were to study the effects of temperature and time on structure and water holding capacity of rice bran. The 20% alkaline-treated rice bran was added in rice flour extrusion cooking. Extrusion parameters and physical characteristics of extrudates between native rice bran addition and alkaline-treated rice bran addition were compared on the same extrusion conditions. The scanning electron microscope result showed that alkaline-treated rice bran at 90°C for 1-16 hours exhibited more open structure and porosity than those of alkaline-treated rice bran at room temperature for 16 hours. An increased heating time caused more fragmentation in rice bran. The water holding capacity of alkaline-treated rice bran was higher than that of native rice bran ($p<0.05$). Heating process in alkaline treatment yielded higher water holding capacity than those at room temperature ($p<0.05$). Alkaline-treated rice bran with 90°C for 1 hour showed a decrease in protein, fat, ash, and starch content, but an increase in dietary fiber ($p<0.01$), compared with native rice bran. The results of extrusion showed that the die pressure of alkaline-treated rice bran addition was higher than that of native rice bran addition ($p<0.05$). The expansion ratio of alkaline-treated rice bran added extrudate was higher than that of native rice bran added extrudate ($p<0.05$).

4.1 บทนำ

การเติมใยอาหารเสริมในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ขนมอบและผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวได้รับความนิยมมากขึ้น แหล่งของใยอาหารที่นิยมใช้ในการเติมในอาหารคือ รำของธัญพืชชนิดต่างๆ เช่น รำข้าว รำข้าวโพด และรำข้าวสาลี เป็นต้น ซึ่งรำเป็นส่วนผนังเซลล์ของเมล็ดธัญพืชได้มาในระหว่างกระบวนการขัดสี รำประกอบด้วยใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในปริมาณสูง และใยอาหารที่ละลายน้ำได้จำพวกเพกตินในปริมาณเล็กน้อย จากการเพิ่มปริมาณใยอาหารลงในการผลิตขนมปังพบว่า เมื่อปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้นในสูตรถึง 15 เปอร์เซ็นต์จะส่งผลให้ปริมาตรของขนมปังลดลง ความนุ่มของเนื้อสัมผัสลดลง มีความแข็งและหยาบมากขึ้น (Jasberg et al., 1989) การผลิตขนมขบเคี้ยวจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันได้มีการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวบาเลย์ที่มีปริมาณใยอาหารสูง พบว่าผลิตภัณฑ์ได้มีการขยายตัวลดลง มีความหนาแน่นสูง และมีสีเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับเอกซ์ทรูดจากแป้งข้าวและแป้งข้าวสาลีที่มีปริมาณใยอาหารต่ำกว่า (Berglund et al., 1994) เช่นเดียวกับผลการวิจัยของ Hsieh et al. (1989) พบว่าการเติมรำข้าวสาลีและรำข้าวโอ๊ตในแป้งข้าวโพด ส่งผลให้การขยายตัวในแนวรัศมีลดลง ความหนาแน่นสูงขึ้น มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แน่นและแข็ง ซึ่งเป็นลักษณะอันไม่เป็นที่ต้องการของผู้บริโภค นอกจากชนิดและปริมาณของใยอาหารที่เติมลงในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแล้ว ยังพบว่าสภาวะการแปรรูปมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดย Lue et al. (1991) และ Ilo et al. (1999) พบว่าการเอกซ์ทรูดวัตถุดิบจากแป้งธัญพืชที่ผสมใยอาหาร ด้วยความเร็วรอบสกรู อัตราการป้อนวัตถุดิบ และอุณหภูมิของบาร์เรลที่แตกต่างกัน ส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันด้วย ดังนั้นสภาวะในการแปรรูปจึงยังคงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการผลิตขนมขบเคี้ยวเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะทางกายภาพดี อีกทั้งงานวิจัยต่างๆ ได้พยายามที่จะทำการเปลี่ยนแปลงสมบัติของใยอาหารโดยวิธีการต่างๆ เพื่อวัตถุประสงค์ในการช่วยปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีการเติมใยอาหาร และอาจเพิ่มปริมาณใยอาหารลงในส่วนผสมได้มากขึ้นอีกด้วย งานวิจัยของ Artz et al. (1990) ทำการเปลี่ยนแปลงสมบัติของใยอาหารจากรำข้าวโพดด้วยวิธีการทางกลคือกระบวนการเอกซ์ทรูชัน พบว่าใยอาหารที่ผ่านการเอกซ์ทรูดด้วยสภาวะรุนแรงที่สุดของการทดลองที่ 150 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ใยอาหารถูกทำลายและเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนมากกว่าใยอาหารที่ผ่านสภาวะต่ำกว่าและใยอาหารดิบ แต่ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำและลักษณะโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก จากการใช้วิธีทางกลที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของใยอาหารค่อนข้างน้อย ดังนั้นการใช้วิธีการทางเคมีจึงได้รับการศึกษาต่อมา โดยงานวิจัยของ Ning et al. (1991) พบว่าการใช้กรดกับใยอาหารจากข้าวโพดทำให้เกิดการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้ใยอาหารหลังผ่านการใช้กรดมีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ ปริมาณน้ำตาล

เพนโตสและน้ำตาลเฮกโซสสูงขึ้น ส่วนการใช้ด่างส่งผลให้ใยอาหารมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่มีการเปิดตัวและมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น อีกทั้งยังพบลักษณะที่เป็นระเบียบของโครงสร้างเซลลูโลสลดลงอีกด้วย (Larrea et al., 1997; Ning et al., 1991) Jasberg et al. (1989) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ใยอาหารที่ผ่านการใช้ด่างในการเปลี่ยนแปลงสมบัติเดิมในการผลิตขนมปังปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแป้งสาลี พบว่าโดที่มีส่วนผสมของใยอาหารที่ใช้ด่างจะมีความแข็งแรง และทนต่อแรงดึงสูงกว่าโดที่มีส่วนผสมจากใยอาหารชนิดอื่นๆ และหลังจากการอบพบว่าขนมปังที่มีส่วนผสมของใยอาหารที่ใช้ด่างมีปริมาตรสูงกว่าขนมปังที่ผลิตจากส่วนผสมที่มีใยอาหารดิบ

อย่างไรก็ตามยังไม่พบการศึกษาการเติมใยอาหารที่ผ่านการเปลี่ยนแปลงสมบัติแล้วในการผลิตขนมขบเคี้ยวจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้รำข้าวเป็นแหล่งของใยอาหาร เพื่อนำไปผ่านกระบวนการใช้ด่างเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติบางประการ เนื่องจากรำข้าวเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวและมีราคาถูก แล้วทำการศึกษาสมบัติของรำข้าวที่เปลี่ยนแปลงไปทั้งทางเคมีและโครงสร้างภายใน และเปรียบเทียบผลจากการเติมรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ด่างในแป้งข้าวที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ (w/w) ที่มีต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต หลังผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่สภาวะต่างๆ

4.2 วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

4.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ปลายข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และรำข้าวขาวดอกมะลิ105 จากบริษัทปทุมไรซ์ มิลล์ แอนด์ แกรนูรี จำกัด (มหาชน) นำปลายข้าวมาบดด้วยเครื่องบดเมล็ดพันธุ์แบบพอน (hammer miller) (Retsch, SK100, standard rostfrei, Germany) ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร รำข้าวนำมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช ผสมรำข้าวลงในแป้งข้าว 20 เปอร์เซ็นต์ (w/w) เก็บวัตถุดิบในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการผลิต

4.2.2 การเตรียมรำข้าวโดยการใช้ด่าง ตามวิธีของ Ning et al. (1991) ดังนี้

ผสมรำข้าวและน้ำในอัตราส่วน 1 ต่อ 5 แล้วปรับ pH เป็น 9-11 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6.0 นอร์มัล นำไปให้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส หรือทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องพร้อมกันเป็นระยะๆ ตามระยะเวลาในสภาวะข้อ 2.3 เมื่อครบระยะเวลานำส่วนผสมที่ได้ไปทำให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริกจนได้ pH ประมาณ 6-7 แล้วทำการกรองสลักกับการล้างด้วยน้ำสะอาด 3 ครั้ง ทำให้แห้งด้วยลมร้อนที่ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำรำข้าวที่แห้งแล้วไปบดด้วยเครื่องบดเมล็ดพันธุ์ แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช

4.2.3 สภาพการใช้ต่างเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของรำข้าว

- 4.2.3.1 ให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 4.2.3.2 ให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- 4.2.3.3 ให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- 4.2.3.4 ให้ความร้อน 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
- 4.2.3.5 ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

4.2.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

- 4.2.4.1 ปริมาณความชื้น ด้วยวิธี AOAC (1997)
- 4.2.4.2 ปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี AOAC (1997)
- 4.2.4.3 ปริมาณไขมัน ด้วยวิธี AOAC (1997)
- 4.2.4.4 ปริมาณใยอาหาร ด้วยวิธี AOAC (1997)
 - ใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (soluble dietary fiber)
 - ใยอาหารที่ละลายน้ำไม่ได้ (insoluble dietary fiber)
- 4.2.4.5 ปริมาณเถ้า ด้วยวิธี AOAC (1997)
- 4.2.4.6 ปริมาณสตาร์ช ด้วยวิธี anthrone method (Roe, 1955)

4.2.5 การวิเคราะห์ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ต่าง 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) ที่ถูกกักไว้ในส่วนของแข็งที่ไม่ละลายต่อน้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

4.2.6 การศึกษาโครงสร้างภายในของรำข้าวและรำข้าวที่ใช้ต่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

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

4.2.7 การผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นำส่วนผสมวัตถุดิบระหว่างแป้งข้าวกับรำข้าวดิบ และแป้งข้าวกับรำข้าวที่ใช้ต่างที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ (w/w) มาป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ตามการทดลองข้อ 3.2.4 ในบทที่ 3 จากนั้นนำเอกซ์ทรูเดตที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

4.2.8 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดต

4.2.8.1 อัตราการขยายตัว ตามวิธีการในบทที่ 3

4.2.8.2 ความหนาแน่น ตามวิธีการในบทที่ 3

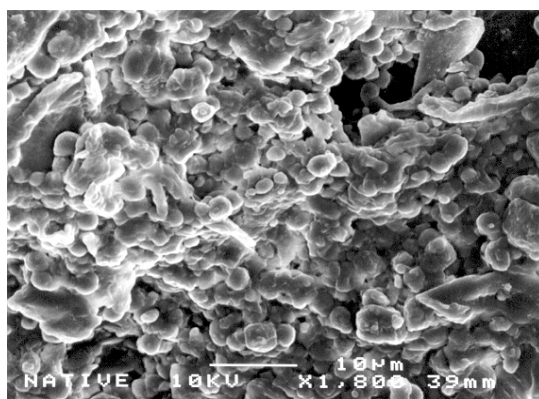
4.2.8.3 แรกกดแตก ตามวิธีการในบทที่ 3

นำค่าตอบสนองที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรในสถานะการผลิตที่เลือกศึกษาโดยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบพหุ สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการโพลิโนเมียลกำลังสองตามสมการที่ 2 แล้วพิจารณาสมการที่ให้ค่า R^2 สูง แล้วนำสมการมาสร้างกราฟแสดงผลตอบสนองแบบสามมิติ เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของสถานะการแปรรูปที่ศึกษากับผลตอบสนอง

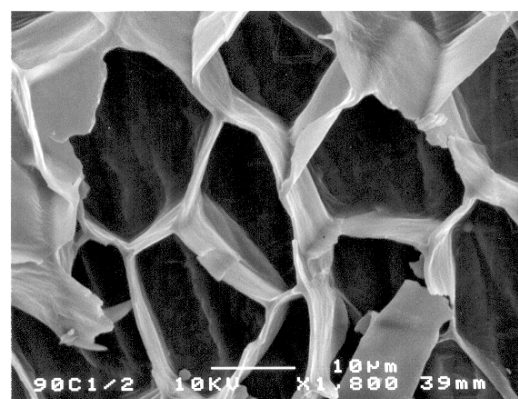
4.3 ผลการทดลองและการวิจารณ์

4.3.1 ผลการใช้ต่างต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรำข้าว

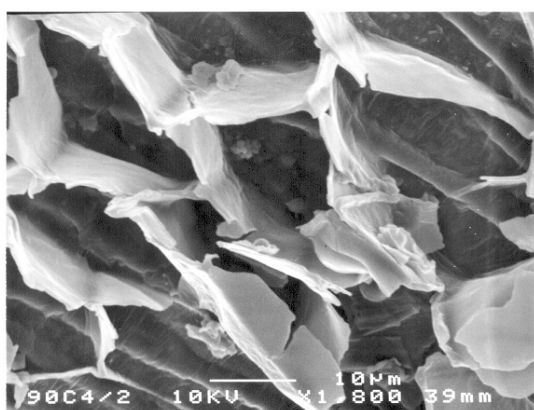
ผลการศึกษาโครงสร้างภายในของรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ต่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงดังภาพที่ 4.1 พบว่าโครงสร้างของรำข้าวดิบในภาพที่ 4.1 (a) มีลักษณะแน่นและตัน โดยมีสารประกอบต่างๆ เคลือบที่ผิวหน้าของชั้นรำ ในขณะที่โครงสร้างของรำข้าวที่ใช้ต่างในภาพที่ 4.1 (b-f) เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าของโครงสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวดิบ โดยรำข้าวที่ใช้ต่างมีลักษณะโครงสร้างที่เปิดตัวมาก เนื่องจากสารประกอบต่างๆ ที่เคลือบอยู่ถูกกำจัดออกไป จึงทำให้เป็นรูพรุนสูงขึ้น การใช้ต่างกับรำข้าวเป็นเวลานานขึ้นตั้งแต่ 1-16 ชั่วโมง ร่วมกับการใช้ความร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส ทำให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างรำข้าวเกิดการแตกหักมากขึ้น ส่วนรำข้าวที่ผ่านการใช้ต่างด้วยอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 16 ชั่วโมงในภาพที่ 4.1 (f) นั้นพบว่าลักษณะโครงสร้างของใยอาหารเปลี่ยนแปลงไปจากรำข้าวดิบบางส่วน โดยยังคงมีลักษณะผิวหน้าที่ปิดตัวคล้ายกับรำข้าวดิบ มีผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอ และแน่นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวที่ใช้ต่างร่วมกับการใช้ความร้อน



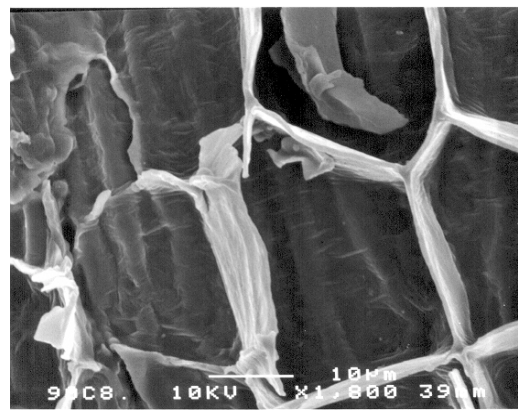
(a)



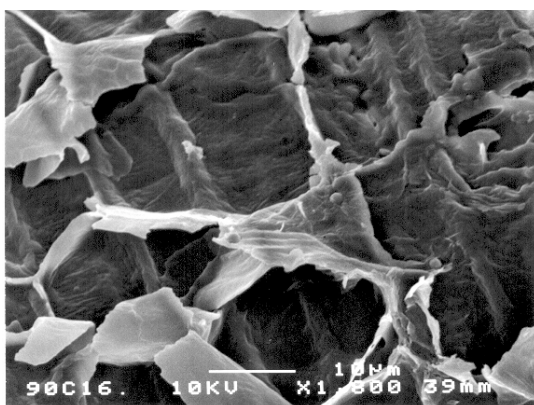
(b)



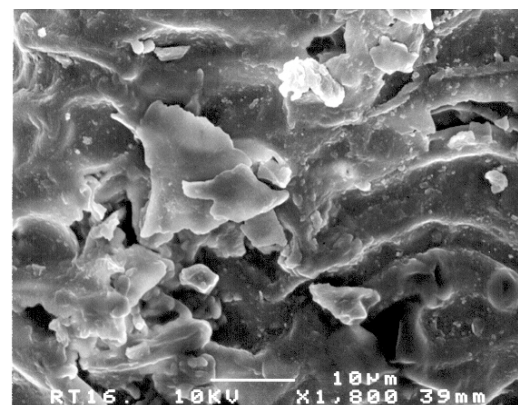
(c)



(d)



(e)



(f)

ภาพที่ 4.1 ภาพโครงสร้างลำข้าวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กําลังขยาย 1800 เท่า : (a) ลำข้าวดิบ, (b) ลำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง, (c) ลำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง, (d) ลำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 8 ชั่วโมง, (e) ลำข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง และ (f) ข้าวที่ผ่านการใช้ด่างที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 16 ชั่วโมง

จากการศึกษาผลของการให้ความร้อน และระยะเวลาของกระบวนการใช้ต่างกับรำข้าวที่มีต่อความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าว (water-holding capacity) แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวที่ใช้ต่างสูงขึ้นในทุกสภาวะการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับรำข้าวดิบ ($p < 0.05$) สภาวะการใช้ต่างร่วมกับการใช้อุณหภูมิสูง 90 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้ต่างที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ระยะเวลาในการใช้ต่างที่ 90 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ 1-16 ชั่วโมง ส่งผลต่อค่าความสามารถในการอุ้มน้ำค่อนข้างต่ำ ($p > 0.05$) ผลค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวมีความสอดคล้องกับระดับความเป็นรูปพรุนของโครงสร้างรำข้าว โดยรำข้าวดิบที่มีลักษณะของความแน่นและไม่มีโครงสร้างเปิดในภาพที่ 4.1 (a) มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ เมื่อโครงสร้างมีการเปิดตัวและเป็นรูปพรุนสูงขึ้นหลังจากการใช้ต่างในภาพที่ 4.1 (b-e) ทำให้น้ำผ่านเข้าไปในโครงร่างของใยอาหารได้ง่ายและสะดวก ดังนั้นรำข้าวที่ใช้ต่างจึงมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น Ning et al. (1991) กล่าวว่าต่างมีผลทำให้โครงสร้างเซลล์ของใยอาหารเกิดการบวม และมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น อีกทั้งองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส เช่น แมนแนน สามารถละลายตัวออกจากโครงสร้างโดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงๆ ผลงานวิจัยของ Larrea et al. (1997) พบว่าต่างมีความสามารถที่จะละลายเอาส่วนของเฮมิเซลลูโลสออกจากเกลบได้ โดยพบว่าเกลบมีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสลดลงหลังจากการใช้ต่าง ส่วนลิกนินและซิลิกาซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ให้ความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ก็ลดลงด้วย นอกจากนี้ผลจากการศึกษาความเป็นผลึกด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray crystallography) แสดงให้เห็นถึงลักษณะความเป็นระเบียบของบริเวณผลึก (crystallinity) ของเซลลูโลสลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับใยอาหารก่อนใช้ต่าง ดังนั้นเมื่อร่างแหที่มีความเป็นระเบียบสูงของเซลลูโลสถูกทำลาย จึงทำให้ความเป็นออสันฐานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กลูโคสบริเวณนี้อุ้มน้ำได้มากขึ้น ใยอาหารที่ผ่านการใช้ต่างจึงมีการดูดน้ำและเกิดการบวมของโครงสร้างมากขึ้น

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

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวดิบและรำข้าวที่ผ่านการใช้ต่างที่สภาวะการให้ความร้อนอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่ารำข้าวหลังผ่านการใช้ต่างมีองค์ประกอบทางเคมีทั้งปริมาณโปรตีน ไขมัน เถ้า และสารสกัด

ลง ($p<0.01$) Larrea et al. (1997) กล่าวว่าองค์ประกอบทางเคมีดังกล่าวมีปริมาณลดลงเนื่องจากกระบวนการล้าง โดยโปรตีนและสตาarchบางส่วนถูกกำจัดออกไปในรูปของส่วนที่ละลายน้ำได้ ส่วนของไขมันที่ทำปฏิกิริยากับด่าง (saponified fatty acid) จะถูกกำจัดออกในขั้นตอนของการล้าง ส่วนปริมาณใยอาหารที่พบว่ามีปริมาณสูงขึ้นหลังการใช้ด่างมีผลมาจากการลดลงขององค์ประกอบอื่นๆ ในรำข้าว สัดส่วนของใยอาหารที่ละลายได้ของรำข้าวคิดเป็น 8.18 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณใยอาหารทั้งหมด ภายหลังการใช้ด่างพบว่าใยอาหารที่ละลายได้มีปริมาณลดลงโดยคิดเป็นปริมาณ 7.42 เปอร์เซ็นต์ ของใยอาหารทั้งหมด

ตารางที่ 4.1 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⁾ ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวดังหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ด่างที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 ชั่วโมง

components	rice bran	
	raw	alkaline-treated
protein ⁽¹⁾ (%)	16.00 a ⁽²⁾	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

⁽¹⁾ N x 5.95

⁽²⁾ ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.01$).

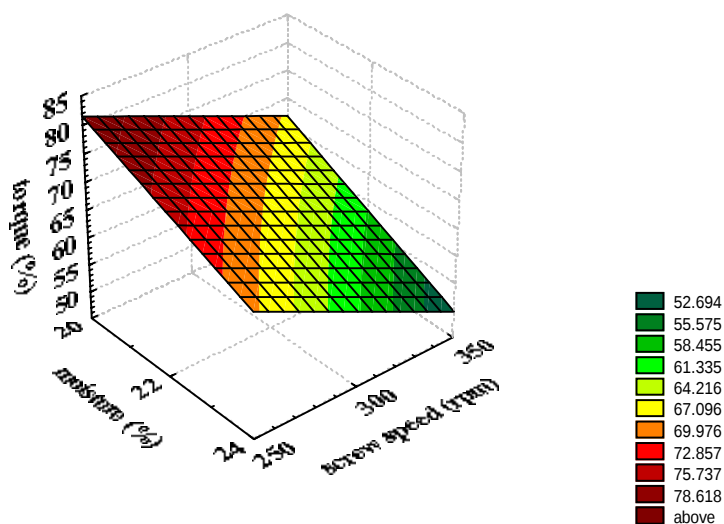
4.3.2 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์-ทรูชัน

เมื่อนำค่า coefficients จากตารางที่ 3 ในภาคผนวก ค. มาสร้างกราฟแสดงผลตอบสนองด้านแรงทอร์กแบบสามมิติซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าความชื้นของวัตถุดิบผสมระหว่างแป้งข้าวกับรำข้าวดิบ และความเร็วรอบสกรูส่งผลสำคัญต่อแรงทอร์ก สภาวะการแปรรูปที่ความชื้นวัตถุดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที ทำให้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ทำงานด้วยกำลังขับเคลื่อนสูงสุดเช่นเดียวกับวัตถุดิบผสมระหว่างแป้งข้าวกับรำข้าวที่ใช้ต่างแสดงดังภาพที่ 4.3 (a) และในภาพที่ 4.3 (b) พบว่าอุณหภูมิของบาเรลเข้ามามีบทบาทต่อแรงทอร์ก โดยเมื่ออุณหภูมิบาเรลดาลงทำให้แรงทอร์กมีค่าสูงสุด จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแม้รำข้าวจะมีสมบัติด้านองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างเปลี่ยนไป ก็ไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแนวโน้มของผลตอบสนองด้านแรงทอร์กอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการแปรรูป Harper (1981) และ Garber et al. (1997) รายงานว่าความหนืดของโคที่อยู่ในร่องเกลียวสกรูบริเวณหัวแบบมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแรงทอร์ก จากผลการทดลองในครั้งนี้พบว่าแรงทอร์กเฉลี่ยของวัตถุดิบผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีค่าสูงกว่าวัตถุดิบผสมรำข้าวดิบเพียงเล็กน้อย โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงได้ดังตารางที่ 4.3 ผลดังกล่าวนี้อาจเนื่องมาจากการใช้ต่างกับรำข้าวทำให้ปริมาณไขมันลดลง ($p < 0.01$) ทำให้โคของแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีความหนืดสูงขึ้น และผลการเป็นสารหล่อลื่นของไขมันมีปริมาณลดลง ส่งผลให้ค่าแรงทอร์กสูงขึ้น อีกเหตุผลหนึ่งน่าจะมาจากการที่แป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่าแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ ดังนั้นเมื่อรำข้าวที่ใช้ต่างดูดน้ำเข้าไปในโครงสร้างได้มากกว่า จึงเหลือน้ำอิสระที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับสตาร์ชน้อยกว่า จึงทำให้ความหนืดของโคมีค่าสูง ดังนั้นจึงทำให้การเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างต้องการแรงที่ใช้ขับเคลื่อนมากกว่า อย่างไรก็ตามพบว่าแรงทอร์กของการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีค่าต่ำกว่าการเอกซ์ทรูดแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) โดยมีสาเหตุมาจากการที่แป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์ มีสัดส่วนของสตาร์ชสูงกว่าวัตถุดิบที่มีปริมาณแป้งข้าว 80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นโคที่เกิดขึ้นภายในบาเรลระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันจึงมีความหนืดสูงกว่าด้วย

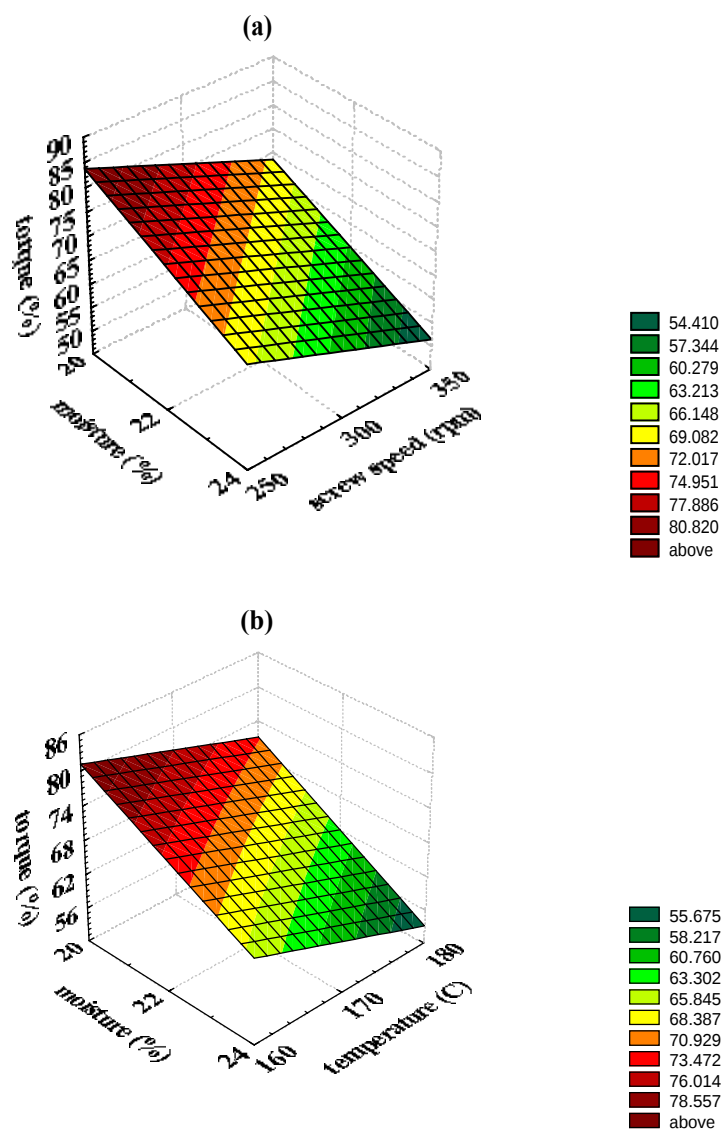
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปและลักษณะทางกายภาพของ
เอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบกับแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์

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⁾ ตัวอักษรที่ต่างกันตามแนวนอนหมายถึงมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$).

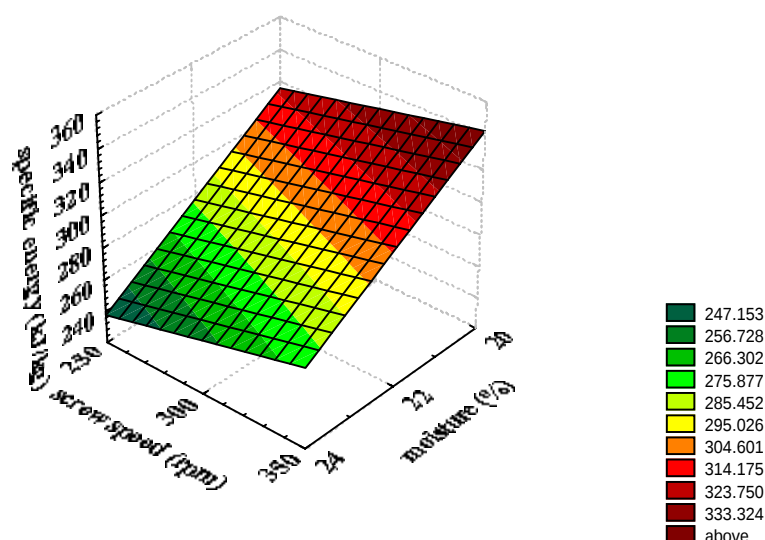


ภาพที่ 4.2 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์คที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็ว
รอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทราคชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์

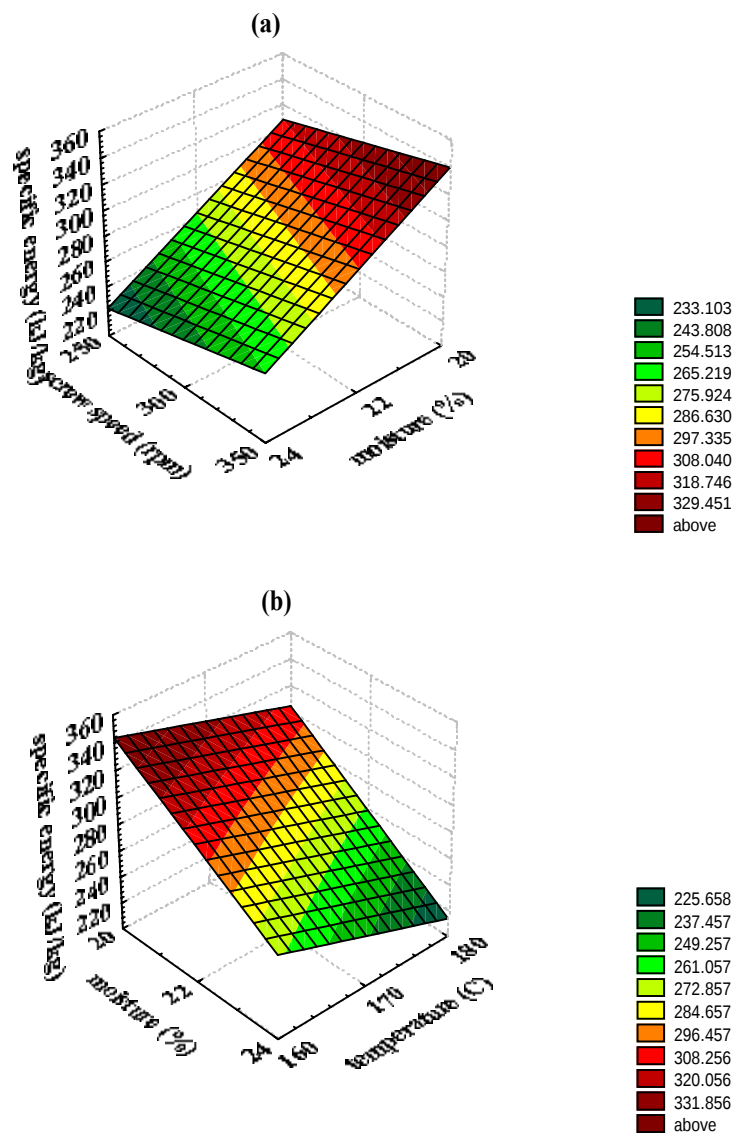


ภาพที่ 4.3 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงทอร์คในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิบารเรล

เมื่อศึกษาผลจากสภาวะการแปรรูปต่อพลังงานกลจำเพาะ พบว่าตัวแปรความชื้นวัตถุดิบและความเร็วรอบสกรูส่งผลสำคัญต่อค่าพลังงานกลจำเพาะสำหรับวัตถุดิบแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบดังภาพที่ 4.4 เมื่อวัตถุดิบมีความชื้นต่ำร่วมกับการแปรรูปด้วยความเร็วรอบสกรูสูงๆ ทำให้ค่าพลังงานกลจำเพาะสูงขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลจากการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างแสดงดังภาพที่ 4.5 (a) ผลจากการวิเคราะห์สมการถดถอยในตารางที่ 4 ในภาคผนวกค. พบว่าเมื่อรำข้าวมีสมบัติเปลี่ยนไปทำให้ตัวแปรด้านอุณหภูมิบาเรลเข้ามามีบทบาทต่อพลังงานกลจำเพาะ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันต่อค่าแรงทอร์ค เมื่ออุณหภูมิบาเรลดต่ำลงในขณะที่ความชื้นของวัตถุดิบต่ำๆ ส่งผลให้มีความต้องการพลังงานกลจำเพาะสูงขึ้นดังภาพที่ 4.5 (b) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Guha et al. (1997) จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าพลังงานกลจำเพาะในตารางที่ 4.3 พบว่าการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างส่งผลให้พลังงานกลจำเพาะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีรำข้าวคิบโดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือเมื่อรำข้าวผ่านการใช้ต่างทำให้ปริมาณไขมันและโปรตีนลดลง ทำให้ได้มีความหนืดสูงขึ้น อีกทั้งเมื่อวัตถุดิบมีปริมาณใยอาหารสูงขึ้นทำให้พลังงานกลจำเพาะที่ต้องป้อนให้แก่วัตถุดิบมีค่าสูงขึ้นเพื่อทำให้เกิดการสุก

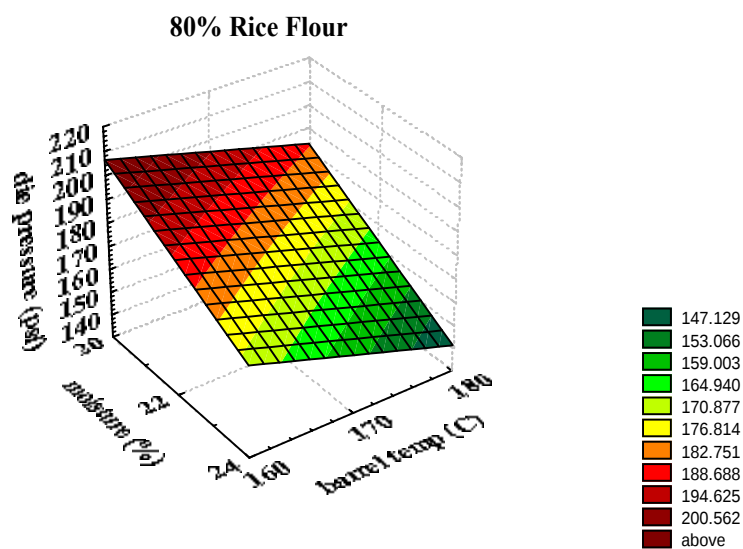


ภาพที่ 4.4 พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรูในกระบวนการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ 20 เปอร์เซ็นต์

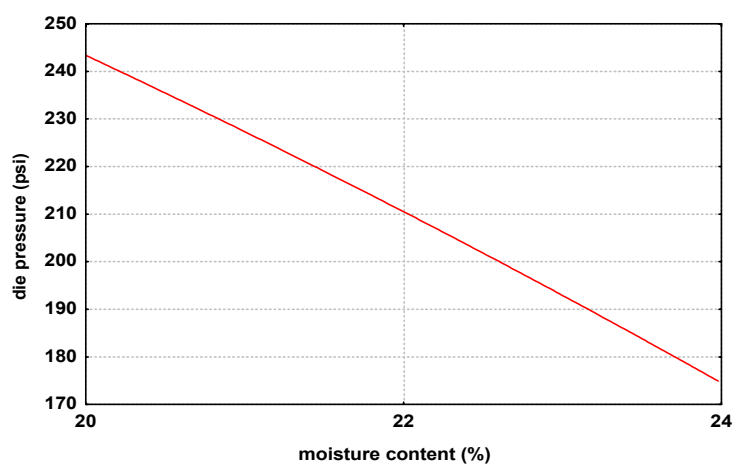


ภาพที่ 4.5 พื้นที่ผิวตอบสนองของพลังงานกลจำเพาะในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิบาร์

ในส่วนของการแปรรูปที่มีผลต่อความดันที่หัวแบบ พบว่าผลร่วมระหว่างความชื้นวัตถุดิบแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบกับอุณหภูมิบารเรลส่งผลต่อค่าความดันที่หัวแบบ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 3 ในภาคผนวก ค. และสามารถแสดงกราฟผลตอบแทนแบบสามมิติได้ดังภาพที่ 4.6 พบว่าเมื่อดำเนินการแปรรูปด้วยสถานะความชื้นวัตถุดิบต่ำร่วมกับอุณหภูมิบารเรลต่ำ ส่งผลให้ความดันที่หัวแบบมีค่าสูงสุด แต่สำหรับการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างพบว่าตัวแปรการแปรรูปที่ส่งผลสำคัญมากต่อการเปลี่ยนแปลงความดันที่หัวแบบคือ ปริมาณความชื้นวัตถุดิบในเชิงกำลังสอง ($p < 0.01$) จากกราฟแสดงผลความชื้นวัตถุดิบที่มีต่อความดันที่หัวแบบในภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อวัตถุดิบมีปริมาณความชื้นสูงขึ้นทำให้ค่าความดันที่หัวแบบลดลง ซึ่งผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hsieh et al. (1993) และ Garber et al. (1997) จากการทดลองในครั้งนี้สังเกตได้ว่ารำข้าวหลังผ่านการใช้ต่างแล้วมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น มีผลทำให้สถานะการแปรรูปด้านปริมาณความชื้นและอุณหภูมิบารเรลเข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และความดันที่หัวแบบ อาจเนื่องมาจากผลการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการอุ้มน้ำไปส่งผลที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงความหนืดของโดภายในบารเรล โดยอาจทำให้ความหนืดมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างจึงทำให้ตัวแปรตามการแปรรูปเหล่านี้มีค่าสูงขึ้น การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของความดันที่หัวแบบแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างแทนรำข้าวดิบทำให้ความดันที่หัวแบบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ($p < 0.05$) ผลที่เกิดขึ้นอาจมาจากองค์ประกอบทางเคมีของรำข้าวแตกต่างกัน ในส่วนของปริมาณไขมันที่ลดลงในรำข้าวที่ใช้ต่าง ($p < 0.01$) ทำให้สารหล่อลื่นภายในบารเรลมีปริมาณลดลง และคาดว่าช่วยลดลดความถี่ไหลของโดภายในบารเรล โดจึงเกิดการสะสมบริเวณทางออกของเครื่องเป็นสาเหตุที่ทำให้ความดันที่หัวแบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลการเป็นสารหล่อลื่นของไขมันมีความสอดคล้องกับการวิจัยของ Ilo et al. (1999) นอกจากนี้ผลจากการที่โปรตีนไปรบกวนการเกิดปฏิกิริยาของสตราซ์ในระหว่างการเกิดลักษณะที่คล้ายพลาสติกของโด (Mohamed, 1990) ทำให้การเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบที่มีปริมาณโปรตีนสูงกว่ามีค่าความดันที่หัวแบบต่ำกว่าการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง



ภาพที่ 4.6 พื้นที่ผิวตอบสนองของความดันที่หัวแบบในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิของบาเรล



ภาพที่ 4.7 กราฟเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ กับความดันที่หัวแบบ

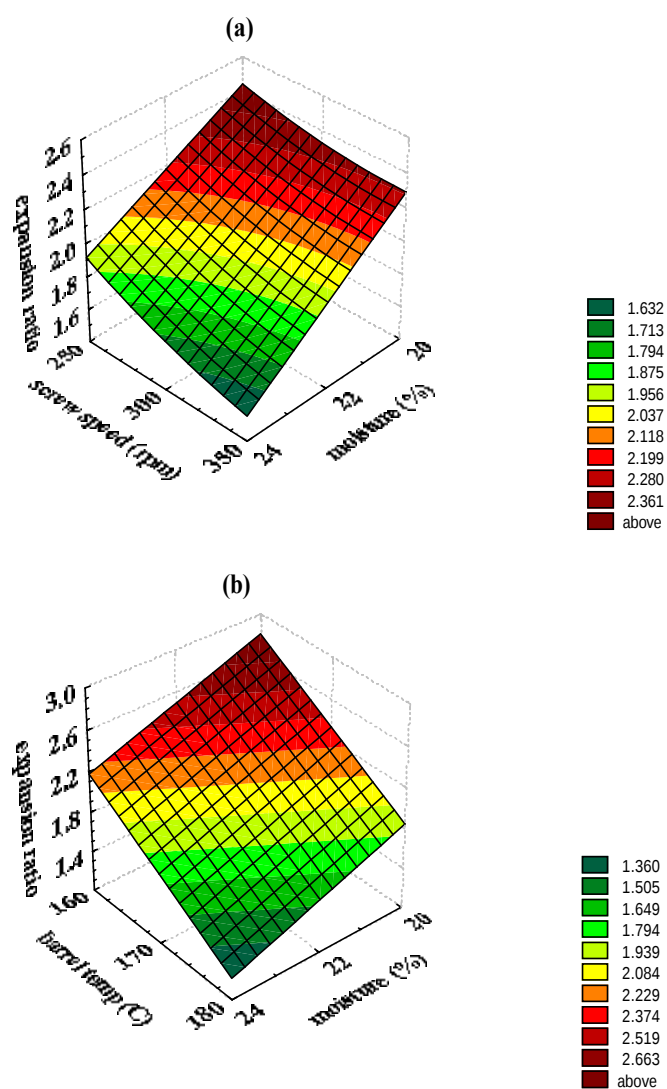
4.3.3 ผลการศึกษาสภาวะการแปรรูปต่อลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคเตด

ผลของสภาวะการแปรรูปที่มีต่ออัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบแสดงดังตารางที่ 7 ในภาคผนวก ก. โดยสามารถแสดงกราฟผลตอบแทนแบบสามมิติได้ดังภาพที่ 4.8 จากภาพที่ 4.8 (a) พบว่าเมื่อดำเนินการแปรรูปด้วยความชื้นวัตถุดิบต่ำ 20 เปอร์เซ็นต์และความเร็วรอบสกรูต่ำ 250 รอบต่อนาที ส่งผลให้อัตราการขยายตัวมีค่าสูงสุด และในภาพที่ 4.8 (b) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเอกซ์ทราคเตดด้วยสภาวะอุณหภูมิ바เรลดลงกับวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำๆ ส่งผลให้เอกซ์ทราคเตดมีการขยายตัวสูงขึ้น โดยจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบสกรูส่งผลต่ออัตราการขยายตัวค่อนข้างน้อย สำหรับอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างได้รับอิทธิพลหลักจากปริมาณความชื้นทั้งในเชิงเส้นตรงและเชิงกำลังสองแสดงดังตารางที่ 8 ในภาคผนวก ก. โดยเมื่อความชื้นวัตถุดิบสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการขยายตัวลดลงดังภาพที่ 4.9 และจะเห็นได้ว่าทั้งความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิ바เรลมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการขยายตัวน้อยมาก แต่การเปลี่ยนแปลงหลักที่เกิดขึ้นต่ออัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดจากวัตถุดิบผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมาจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะการแปรรูปต่ออัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดระหว่างการเติมรำข้าวดิบกับการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างยังคงมีรูปแบบแนวโน้มที่คล้ายกัน

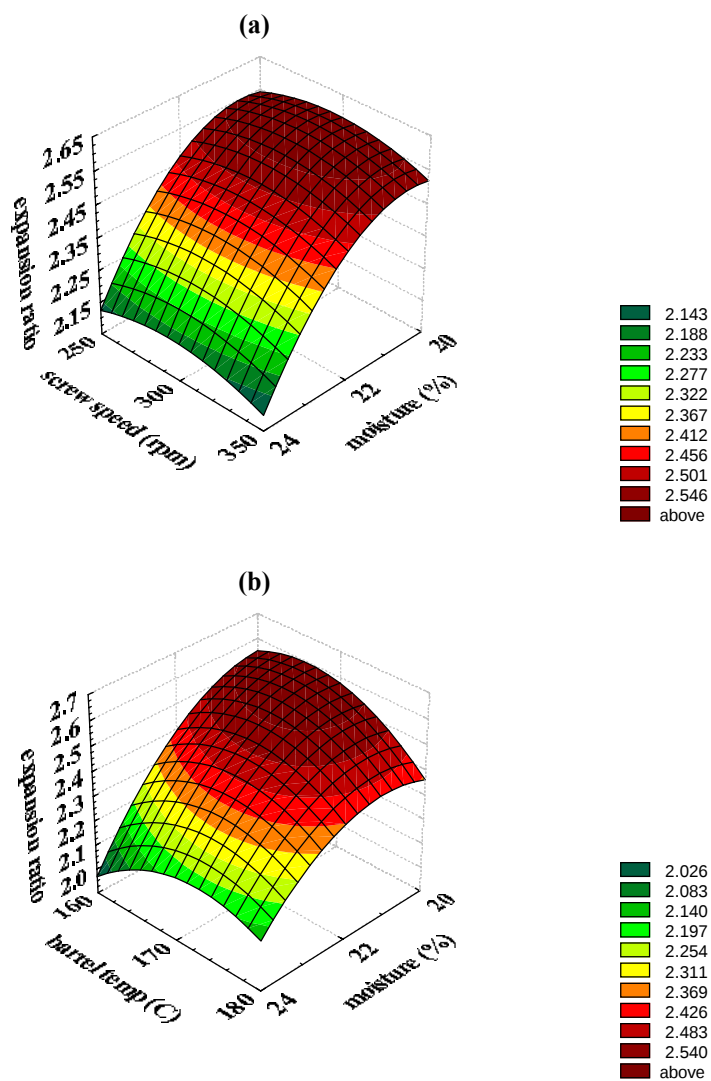
ในด้านความหนาแน่นเอกซ์ทราคเตดพบว่าได้รับอิทธิพลมาจากผลรวมของปริมาณความชื้นกับอุณหภูมิของ바เรล ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 7 ในภาคผนวก ก. สามารถแสดงผลตอบแทนในรูปกราฟสามมิติได้ดังภาพที่ 4.10 พบว่าที่ความชื้นวัตถุดิบต่ำๆ ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิของ바เรลดต่ำ 160 องศาเซลเซียส ส่งผลให้เอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบมีความหนาแน่นต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสภาวะเดียวกับที่ทำให้ได้เอกซ์ทราคเตดที่มีอัตราการขยายตัวสูงที่สุดดังภาพที่ 4.8 (b) ในขณะที่การเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างพบตัวแปรที่มีความสำคัญต่อความหนาแน่นของเอกซ์ทราคเตดคือปริมาณความชื้น ซึ่งจากค่า coefficient แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นด้วยซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกับการใช้รำข้าวดิบ อีกทั้งผลร่วมระหว่างความเร็วรอบสกรูกับอุณหภูมิ바เรลก็ส่งผลต่อความหนาแน่นเช่นกันแต่ถือว่าน้อยมาก แต่จากค่า R^2 ที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่เหมาะที่จะนำสมมติถอยมาสร้างกราฟสามมิติ

จากตารางที่ 4.3 พบว่าอัตราการขยายตัวของเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าเอกซ์ทราคเตดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ ($p < 0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรำข้าวภายหลังการใช้ต่าง โครงสร้างรำข้าวหลังการใช้ต่างมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น ความเป็นออสันฐานที่ส่วนของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ทำให้โครงสร้างใยอาหารเกิดการเปิดตัวออกมีส่วนของไฮโดรเจนที่เป็น

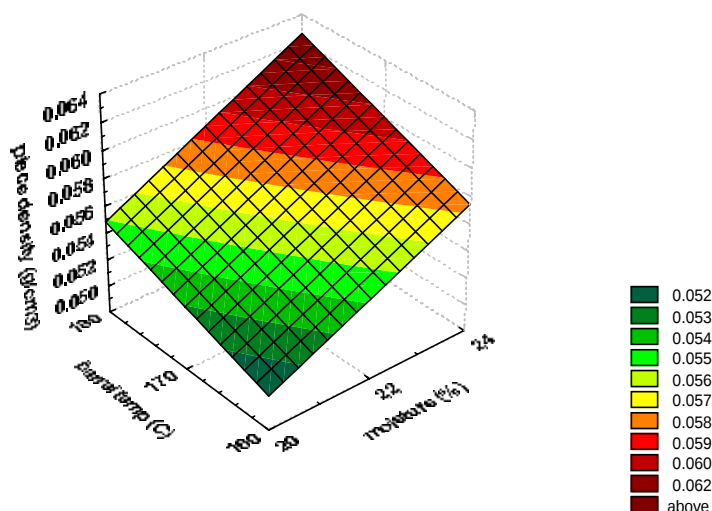
อิสระมากขึ้น ดังนั้นเมื่อน้ำจึงสามารถเข้าไปรวมตัวกับรำข้าวที่ผ่านการใช้ต่างได้มาก คงเหลือปริมาณน้ำน้อยลงในส่วนของสตาร์ช วัตถุประสงค์แป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างจึงมีความหนืดของโคสูง ดังแสดงจากค่าทอร์คและค่าความดันที่หัวแบบที่สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพบการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ของความดันที่หัวแบบ Mohamed (1990) และ Yuryev et al. (1995) กล่าวว่า การขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความดันที่หัวแบบและความดันบรรยากาศ ดังนั้นเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างที่มีความดันที่หัวแบบสูงกว่าจึงมีอัตราการขยายตัวสูงกว่าด้วย ส่วนปริมาณโปรตีนที่มีในรำข้าวดิบมากกว่าในรำข้าวที่ใช้ต่างนั้น ($p < 0.05$) คาดว่ามีผลขัดขวางการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดต ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Mohamed (1990), Bhattacharya et al. (1997) และ Onwulata et al. (1998) ที่พบว่า การผสมโปรตีนลงในสตาร์ชด้วยสัดส่วนที่สูงขึ้นส่งผลให้การขยายตัวของผลิตภัณฑ์ต่ำลง จากการเปรียบเทียบความหนาแน่นในตารางที่ 4.3 พบว่าค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างต่ำกว่าเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบเล็กน้อยโดยไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้เอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบมีอัตราการขยายตัวต่ำ และมีลักษณะเนื้อแน่นเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างภายในของรำข้าวดิบที่มีความแน่นและตันกว่ารำข้าวที่ใช้ต่างดังภาพถ่ายโครงสร้างรำข้าวในภาพที่ 4.1 และจากผลงานวิจัยของ Artz et al. (1990) พบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านโครงสร้างและความสามารถในการอุ้มน้ำของใยอาหารค่อนข้างน้อย แสดงให้เห็นถึงความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของใยอาหารต่อแรงกล ดังนั้นทั้งรำข้าวดิบและรำข้าวที่ใช้ต่างหลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันน่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างน้อยมาก ส่งผลให้เอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบที่ได้มีความหนาแน่นสูงกว่าเนื่องจากโครงสร้างรำข้าวดิบแต่เดิมที่มีความแน่นมากกว่ารำข้าวที่ใช้ต่าง



ภาพที่ 4.8 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราการขยายตัวในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิบาร์เรล

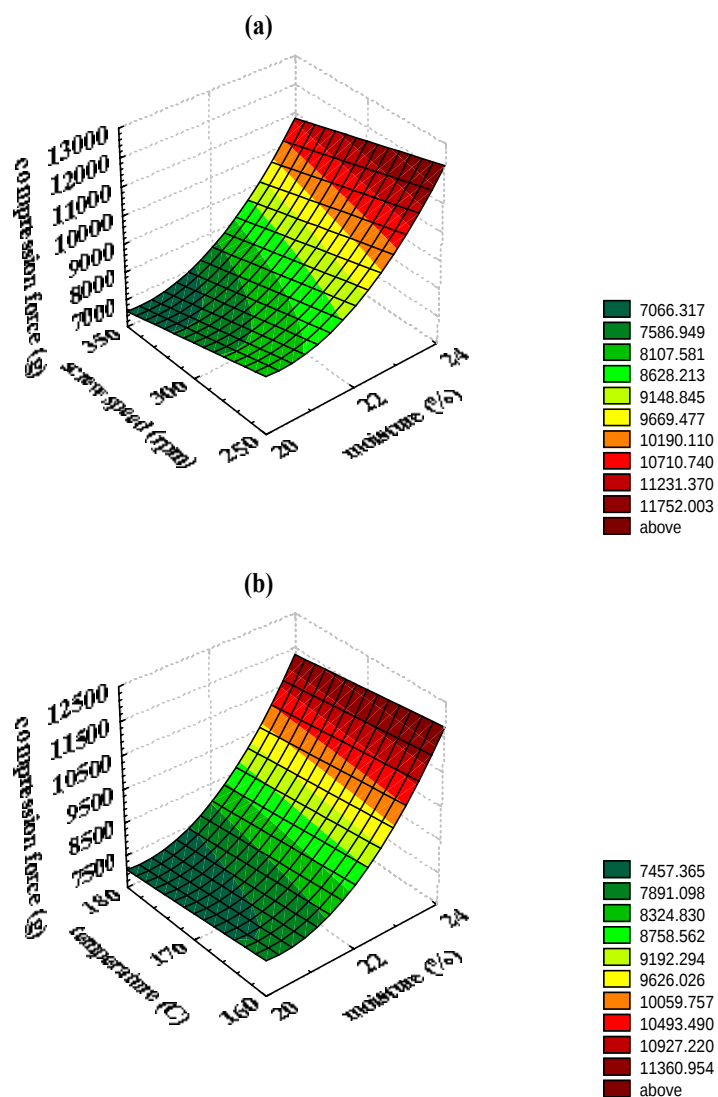


ภาพที่ 4.9 พื้นที่ผิวตอบสนองของอัตราขยายตัวในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรู และที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิบาร์เรล



ภาพที่ 4.10 พื้นที่ผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิ바เรลในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซ็นต์

ด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของเอกซ์ทรูเดผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความชื้นเพียงตัวแปรเดียวที่มีผลต่อค่าแรงที่ใช้กดให้เอกซ์ทรูเดเกิดการแตกหักสำหรับแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ ($p < 0.01$) ดังตารางที่ 7 ในภาคผนวก ก. โดยความชื้นที่สูงขึ้นทำให้แรงที่ใช้กดเอกซ์ทรูเดให้แตกสูงขึ้นด้วย แต่จากค่า R^2 ที่ค่อนข้างต่ำจึงไม่สามารถนำมาสร้างกราฟสามมิติได้ สำหรับการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างพบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าแรงกดแตกแสดงดังตารางที่ 8 ในภาคผนวก ก. โดยแสดงกราฟสามมิติได้ดังภาพที่ 4.11 พบว่าการเพิ่มขึ้นของความชื้นส่งผลสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของค่าแรงที่ใช้ในการกดแตก เช่นเดียวกับที่พบในการเอกซ์ทรูดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ โดยผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบสกรูและอุณหภูมิ바เรลส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงแรงกดแตกค่อนข้างต่ำ จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของแรงกดแตกในตารางที่ 4.3 พบว่าเอกซ์ทรูเดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างต้องการแรงกดแตกต่ำกว่าเอกซ์ทรูเดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบแต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ซึ่งผลของค่าแรงกดแตกนี้มีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับอัตราการขยายตัว แต่ความสัมพันธ์เชิงบวกกับความหนาแน่น ($p < 0.01$) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การที่เอกซ์ทรูเดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีค่าแรงกดแตกต่ำอาจมีผลมาจากการที่โครงสร้างของใยอาหารมีความอ่อนนุ่ม จากลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนสูงทำให้น้ำสามารถเข้าไปจับกับรำข้าวได้ดี เมื่อเกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วหลังจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ทำให้เกิดโพรงอากาศค่อนข้างมาก มีช่องว่างภายในชิ้นเอกซ์ทรูเดมากและสม่ำเสมอ ดังนั้นความต้องการแรงที่ใช้ในการกดแตกจึงต่ำลง



ภาพที่ 4.11 พื้นที่ผิวตอบสนองของแรงกดแตกในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้
 ต่าง 20 เปอร์เซ็นต์ ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรู และ
 ที่สร้างระหว่างตัวแปรความชื้นวัตถุดิบกับอุณหภูมิบาร์

4.4 สรุปและข้อเสนอแนะ

การใช้ต่างกับรำข้าวมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทั้งทางองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพ การใช้ความร้อนเป็นการเร่งปฏิกิริยาระหว่างต่างกับรำข้าวได้ดีกว่าการเพิ่มระยะเวลาของปฏิกิริยา นอกจากนี้องค์ประกอบทางเคมีด้านโปรตีน ไขมัน และเส้นใยมีปริมาณลดลง ในขณะที่ปริมาณใยอาหารสูงขึ้นมาก โครงสร้างของรำข้าวเกิดลักษณะที่เป็นรูพรุนมากขึ้นและมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น จากการเอกซ์ทรู๊ดวัตถุดิบผสมระหว่างแป้งข้าวกับรำข้าวดิบ และแป้งข้าวกับรำข้าวที่ผ่านการใช้ต่าง พบว่าการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวที่ใช้ต่าง การลดลงของปริมาณไขมันและโปรตีนส่งผลที่สำคัญต่อทั้งค่าตัวแปรตามการแปรรูปและลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรู๊ด โดยการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างแทนแป้งข้าว 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เอกซ์ทรู๊ดที่ได้มีอัตราการขยายตัวสูงกว่าเอกซ์ทรู๊ดจากวัตถุดิบที่ถูกแทนที่ด้วยรำข้าวดิบ นอกจากนี้ยังพบว่าความดันที่หัวแบบที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แรงทอร์คและพลังงานกลจำเพาะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ส่งผลให้เอกซ์ทรู๊ดแป้งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่างมีความหนาแน่นและมีความแข็งลดลงจากการทดลองครั้งนี้จะเห็นได้ว่าการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างทดแทนรำข้าวดิบส่งผลให้เอกซ์ทรู๊ดยังคงมีลักษณะทางกายภาพที่ดี ซึ่งการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างจะมีสัดส่วนของใยอาหารมากกว่าเอกซ์ทรู๊ดที่เติมรำข้าวดิบ และยังพบว่าการเติมรำข้าวที่ใช้ต่างปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เอกซ์ทรู๊ดมีลักษณะทางกายภาพที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเอกซ์ทรู๊ดแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบที่ทำการผลิตภายใต้สภาวะการแปรรูปเดียวกัน ซึ่งเป็นการชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มที่จะสามารถเติมรำข้าวที่ใช้ต่างในการผลิตผลิตภัณฑ์พองตัวได้ในปริมาณที่สูงขึ้น

รายการอ้างอิง

- กมลวรรณ แจ่มชัด. (2541). การแปรรูปอาหารโดยวิธีเอ็กสทรูชัน. *อุตสาหกรรมเกษตร*. 9(2): 4-8.
- งามชื่น คงเสรี. (2540). คุณภาพข้าวสุก. *จารย์พา*. 38: 41-44.
- จิราภา เมืองคล้าย. (2539). การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเข้าชนิดแผ่นจากแป้งข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประชา บุญญศิริกุล. (2537). บทบาทของเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีต่ออุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย. *อาหาร*. 24(1): 1-12.
- ประชา บุญญศิริกุล, จุฬาลักษณ์ จารุณ 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. คณะเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สงกรานต์ จิตรากร. (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.
- 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.
- 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 Research 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.
- 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.
- 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 non-glutinous rice and degree of expansion of rice cracker. **J. Japanese Soc. Food Sci. Technol.** 41(11) : 747-754.
- Yuryev, V.P., Zasyrkin, 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.
- Zasyrkin, 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

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุโบราณและผลิตภัณฑ์

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. เผาถ้วยกระเบื้องเคลือบในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่งและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งน้ำหนักให้ได้ตัวอย่างแน่นอนประมาณ 2 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องเคลือบซึ่งทราบน้ำหนัก แล้วเผาตัวอย่างในตู้จันทมนควัน 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 (สารผสมระหว่างเมทิลินบลู เมทิลเรด และโบรโมคลีโซลกรีน) เรียบร้อยแล้ว โดยใช้สารละลายกรดบอริก 4 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ในการดักจับแก๊สไนโตรเจน
7. ไตรเตรทสารละลายที่กลั่นได้ และสารละลายที่ไร้ตัวอย่างกับกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
8. คำนวณปริมาณโปรตีนจากสูตรดังนี้

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

เมื่อ

A = ปริมาณกรดที่ใช้ไตรเตรทกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาณกรดที่ใช้ไตรเตรทกับสารละลายที่ไร้ตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นของกรด (นอร์มัล)

F = ค่าคงที่สำหรับแป้งข้าวเจ้าคือ 6.25

W = น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)

4. การวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (AOAC, 1997)

อุปกรณ์

ชุดสกัดไขมัน Soxtherm (S306 AK, Gerhardt)

วิธีการ

1. อบปีกเกอร์สำหรับวิเคราะห์ปริมาณไขมันในตู้อบไฟฟ้า ที่ตั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
2. ชั่งตัวอย่างบนกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนัก 1-2 กรัม ห่อให้มิดชิด
3. ใส่ตัวอย่างใน thimble คลุมด้วยสำลีเพื่อให้สารละลายมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ
4. นำหลอดตัวอย่างใส่ลงในชอกเลต
5. เติมสารตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ ในปีกเกอร์หาไขมันประมาณ 200 มิลลิลิตร
6. ประกอบอุปกรณ์ชุดสกัดไขมัน พร้อมทั้งเปิดน้ำหล่ออุปกรณ์ควบแน่น และเปิดสวิตช์ให้ความร้อน
7. ใช้เวลาในการสกัดไขมัน 3-4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส จนแห้งใช้เวลาประมาณ 30 นาที ที่ตั้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
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. เเผาด้วยกระบือเบืองเคลือบ (Fritted crucible) 6 ใบ (4 ใบสำหรับตัวอย่าง และ 2 ใบสำหรับเบลนจ์) 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 และล้างครั้งสุดท้ายด้วยอะซิโตน 2 ครั้งๆ ละ 10 มิลลิลิตร

13. อบ crucible ที่มีภาควัอย่างค้างคืนในตู้อบ 105 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นในตู้ดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักเป็น residue + celite + crucible

14. วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนจากกากที่ได้หนึ่งในสองของตัวอย่าง และหนึ่งในสองของแบลнк 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 แล้วกรองของผสมจากการย่อยด้วยเอนไซม์ข้อ 9 ผ่าน crucible

17. ล้างกากด้วยน้ำอุ่น 70 องศาเซลเซียส 2 ครั้งๆ ละ 10 มิลลิลิตร ใช้น้ำอุ่นสำหรับล้าง crucible เก็บส่วนที่กรองได้ และน้ำล้างไว้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารที่ละลายได้ โดยถ่ายสารละลายลงในบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร และปฏิบัติตามข้อ 20

18. ล้างกากใยที่เหลือบน crucible ด้วยเอทานอล 78 เปอร์เซ็นต์ 3 ครั้งๆ ละ 20 มิลลิลิตร แล้วล้างด้วยเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ 2 ครั้งๆ ละ 10 มิลลิลิตร และล้างครั้งสุดท้ายด้วยอะซิโตน 2 ครั้งๆ ละ 10 มิลลิลิตร

19. ปฏิบัติตามข้อ 13-15

Soluble Dietary Fiber

20. ชั่งสารละลายจากข้อ 17 แล้วคำนวณเป็นปริมาตรของน้ำที่มีในสารละลาย

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

การคำนวณ

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

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

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

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

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

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

$$7. \quad \text{Blank} = W_b - \{ [(P_b + A_b)/100] \times W_b \}$$

เมื่อ W_b = น้ำหนักเฉลี่ยของ blank residue in mg.

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

เมื่อ W_s = 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. นำไปวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic 21) ที่ความยาวคลื่น 62 นาโนเมตร อ่านค่าการดูดกลืนสี (absorbance) เปรียบเทียบกับ แบลงก์ (blank)

6. นำอะมิโลสบริสุทธิ์ 0.0400 กรัม เตรียมให้เป็นสารละลายเป้งเช่นเดียวกับตัวอย่าง ทิ้งไว้ค้างคืน เขย่าให้เข้ากัน คูดสารละลายเป้งมาตรฐานมา 1, 2, 3, 4, และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวด ปริมาตรขนาด 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. คำนวณปริมาณอะมิโลสจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับกราฟมาตรฐาน 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 เติมหทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ 200 มิลลิลิตร ต้มให้เดือดบน hot plate โดยใช้ reflux condenser นาน 20 นาที

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

3. เติมหทานอล 200 มิลลิลิตร และ กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร ลงในกากที่เหลือ ทำการ reflux 15 นาที กรองขณะร้อนด้วยสุญญากาศ ล้างกากด้วยเอทานอล 100 มิลลิลิตร ทิ้งส่วนของเหลวที่กรองได้

4. ถ่ายกากที่ได้ลงในปิกรอร์ขนาด 400 มิลลิลิตร เติมน้ำ 100 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด 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. คำนวณปริมาณสตาร์ชของตัวอย่างโดย Beer and Lambert' s Law

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

8. การวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลแลตินในซ้แซชันของสตาร์ช (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. เตรียมตัวอย่างที่สตาร์ชถูกเจลแลตินซ้ไปทั้งหมด โดยเตรียมเอกซ์ทราคแตในน้ำให้มีความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ นำเข้าหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาผสมเมทานอลปริมาตร 3 เท่า ปั่นด้วยความเร็วสูง แล้วล้าง

ด้วยเมทานอล 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. เตรียมตัวอย่างที่สตาโรซูกเจลลาตินโซไปบางส่วน 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. ปิเปตส่วนใส 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 = ค่าการดูดกลืนแสงของสตาโรซูกเจลลาตินโซไปทั้งหมด

B = ค่าการดูดกลืนแสงของสตาโรซูกเจลลาตินโซไปบางส่วนหลังการบ่มด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 30 นาที

C = ค่าการดูดกลืนแสงของสตาโรซูกเจลลาตินโซไปบางส่วนหลังการบ่มด้วยเอนไซม์เป็นเวลา 60 นาที

k = ค่าคงที่สำหรับแต่ละพันธุ์ของสตาโรซูก

Y = เปอร์เซ็นต์เจลลาตินโซไปสตาโรซูก

ภาคผนวก ข

ค่าตอบสนองเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปและสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 1ข ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซทราชันแป้งข้าว 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 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามการแปรรูปจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวผสมรำข้าวคิบ
20 เปอร์เซนต์

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 ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคตแป้งข้าว 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 6x ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทรูเดตแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 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 ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคเตเป็งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซนต์

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 8ข ค่าเฉลี่ยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคเตเป็งข้าวผสมรำข้าวที่ใช้ต่าง
20 เปอร์เซนต์

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 1ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปสำหรับแป้งข้าว 100 เปอร์เซ็นต์

	torque	specific energy	die pressure	product temperature
	(%)	(kJ/kg)	(psi)	(°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 X ss	ns	ns	ns	ns
mc X temp	ns	ns	- 8.674 X 10 ⁻² **	ns
ss X 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 2ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปสำหรับแป้งข้าวผสมรำข้าวคืบ
10 เปอร์เซนต์

	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 X ss	ns	- 5.442 X 10 ⁻² **	ns
mc X temp	ns	ns	- 6.79 X 10 ⁻² **
ss X 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 3ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทราซันสำหรับแป้งข้าวผสมรำข้าวดิบ 20 เปอร์เซนต์

	torque	specific energy	die pressure	product temperature
	(%)	(kJ/kg)	(psi)	(°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 X ss	-7.413 X 10 ⁻³ **	1.135 X 10 ⁻² **	ns	ns
mc X temp	ns	ns	- 5.831 X 10 ⁻² **	ns
ss X temp	ns	ns	ns	ns
R ²	0.871	0.853	0.620	0.496

** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 4ค สัมประสิทธิ์สมการถดถอยของตัวแปรตามการแปรรูปเอกซ์ทราซันสำหรับแป้งข้าวผสมรำ
ข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซนต์

	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 X ss	ns	ns	ns
mc X temp	- 2.497 X 10 ⁻² **	- 0.126 **	ns
ss X temp	ns	1.887 X 10 ⁻³ **	ns
R ²	0.918	0.927	0.689

** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 5ค สัมประสิทธิ์สัมพรรคถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคเตดเป็งข้าว
100 เปอร์เซนต์

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

* P<0.05, ** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 6ค สัมประสิทธิ์สัมพรรคการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคเตดเป็งข้าวผสมรำค
ข้าวดิบ 10 เปอร์เซนต์

	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 สัมประสิทธิ์สัมพรรคการถดถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคเตดเป็งข้าวผสมรำ
ข้าวดิบ 20 เปอร์เซนต์

	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 X ss	-5.267 X 10 ⁻⁴ **	ns	ns
mc X temp	ns	1.080 X 10 ⁻⁵ **	ns
ss X temp	ns	ns	ns
R ²	0.926	0.682	0.494

** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ตารางที่ 8ค สัมประสิทธิ์สัมพรรคถอยของลักษณะทางกายภาพของเอกซ์ทราคเตดเป้งข้าวผสมรำ
ข้าวที่ใช้ต่าง 20 เปอร์เซนต์

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

** P<0.01.

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ (p>0.05)

ประวัติผู้เขียน

นางสาวปทุมพร โสติดิรัตนพันธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2520 เข้าศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2541 ภายหลังสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2542