รหัสโครงการ SUT3-305-43-12-51

รายงานการวิจัย

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเอ็กซ์ทรูชั่นของข้าวกล้อง

Factors Affecting Brown Rice Extrusion

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ผู้ร่วมวิจัย

ดร. มาโนชญ์ สุธีรวัฒนานนท์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ2543

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มกราคม 2546

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้งบประมาณทุนอุดหนุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2543 ทำให้ผลงานวิจัยตามโครงการนี้เกิดขึ้นได้ และขอขอบคุณบริษัท ปทุมไรซมิล แอนด์ แกรนารี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้าวหอมมะลิเพื่อใช้ในงานวิจัย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จได้หากขาดกำลังสำคัญของผู้ช่วยวิจัย นางสาว ปทุมพร โสตถิรัตนพันธุ์ จึงใคร่ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

การศึกษาการผลิตขนมขบเคี้ยวจากข้าวกล้องโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะการแปรรูปที่มีความสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวชนิดพองตัวทันที (Direct-Expanded Product) โดยศึกษาความชื้นของวัตถุดิบแป้งข้าวกล้อง (20 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์) ความเร็วรอบของสกรู (250 300 และ 350 รอบต่อนาที) และอุณหภูมิของบาเรล (160 170 และ 180 องศาเซลเซียส) ตรวจสอบตัวแปรตามที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ทางด้านแรงทอร์ค (%Torque) ค่าพลังงานกลจำเพาะ (Specific Mechanical Energy) ความดันที่หัวแบบ (Die Pressure) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (Product Temperature) และตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ด้านอัตราการขยายตัว (Expansion Ratio) แรงกดแตก (Compression Force) และความหนาแน่น (Piece Density) แล้วนำผลตอบสนองเหล่านี้มาสร้างความสัมพันธ์โดยใช้วิธี Response Surface Methodology ซึ่งพบว่า แรงทอร์ค ค่าพลังงานกลจำเพาะ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ และความดันที่หัวแบบ ได้รับผลกระทบมาจากผลร่วม (Interaction) ระหว่างความชื้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) ในส่วนของผลทางด้านคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ด้านอัตราการขยายตัว แรงกดแตก และความหนาแน่นต่างก็ได้รับผลมาจากผลร่วมระหว่างความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบาเรลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยสภาวะที่ให้ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวมีการขยายตัวมากที่สุดคือที่ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 300 รอบต่อนาที และอุณหภูมิของบาเรลที่ 170 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 3.17 และค่าแรงกดที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกเท่ากับ 3848.32 กรัม ส่วนสภาวะที่ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวกล้องมีความหนาแน่นต่ำคือที่ระดับความชื้นของวัตถุดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 350 รอบต่อนาที และอุณหภูมิของบาเรลที่ 170 องศาเซลเซียส โดยให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.0438 กรัมต่อลูกบาก์ศเซ็นติเมตร

Abstract

The objectives of the production of brown rice snack using Twin Screw Extruder were to determine the important processing parameters affecting the physical characteristics of direct-expanded product. Three independent variables, feed moisture content (20, 22 and 24 %), screw speed (250, 300 and 350 rpm), and barrel temperature (160, 170 and 180°C) were studied. The percentages of torque, specific mechanical energy, die pressure and product temperatures were monitored from the extruder. The physical characteristics of extrudates, expansion ratio, compression force and piece density, were measured. These response variables were modeled using response surface methodology. It was found that the interaction between feed moisture content and screw speed was significantly affected the percentage of torque, specific mechanical energy, die pressure and product temperature ($p<0.01$). However, the interaction between feed moisture content and barrel temperature showed a significant effect on expansion ratio, compression force and piece density ($p<0.05$). The processing condition at 20% feed moisture content with the screw speed of 300 rpm and the barrel temperature of 170°C provided the maximum expansion of extrudate, which was 3.17, and the compression force of 3848.32 g. The lowest piece density was 0.0438 g/cm^3 resulted from 20% feed moisture content, 350 rpm screw speed, and 170°C barrel temperature.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ทำ	3
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	
วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ	5
การวางแผนการทดลอง	6
การตรวจวัดคุณภาพทางกายภาพ	7
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	
ผลและวิจารณ์	10
บทที่ 4 บทสรุป	
สรุปผลการวิจัย	25
ข้อเสนอแนะ	26
บรรณานุกรม	27
ประวัติผู้วิจัย	30

สารบัญตาราง

หน้า

Table I. Experimental design. 6

Table II. Composition of rice flour and brown rice flour. 10

Table III. Processing conditions and operating parameters in the extrusion processing of brown rice flour. 11

Table IV. Regression Equation Coefficients of Product Temperature, Die Pressure, Percent of Torque, and Specific Energy. 12

Table V. Processing conditions and product properties in the extrusion processing of brown rice flour. 19

Table VI. Regression Equation Coefficients of Piece Density, Expansion Ratio, and Compression Force. 20

สารบัญภาพ

หน้า

Figure 1 Effects of moisture and screw speed on extruder torque. 14

Figure 2 Effects of screw speed and barrel temperature on extruder torque. 14

Figure 3 Effects of moisture and screw speed on specific mechanical energy (SME). 16

Figure 4 Effects of screw speed and barrel temperature on specific mechanical energy (SME). 16

Figure 5 Effects of moisture and barrel temperature on product temperature. 17

Figure 6 Effects of moisture and screw speed on product temperature. 18

Figure 7 Effects of moisture and barrel temperature on expansion ratio. 21

Figure 8 Effects of moisture and barrel temperature on compression force. 22

Figure 9 Effects of moisture and screw speed on piece density. 24

Figure 10 Effects of moisture and barrel temperature on piece density. 24

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ขนมขบเคี้ยวนับว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมอย่างสูงจากผู้บริโภค ปัจจุบันสามารถพบผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวได้ตามร้านและซุปเปอร์มาเก็ตทั่วไป มีทั้งชนิดที่รับประทานได้ทันทีและชนิดที่ต้องนำไปอบหรือทอดก่อนจึงจะรับประทานได้ กลุ่มผู้บริโภคส่วนใหญ่ที่นิยมบริโภคขนมขบเคี้ยวคือเด็กในวัยเรียนซึ่งมักรับประทานเป็นอาหารว่างระหว่างมื้อ แต่โดยทั่วไปขนมขบเคี้ยวส่วนมากมีคุณค่าทางอาหารต่ำ ส่วนใหญ่มีคาร์โบไฮเดรตและไขมันเป็นองค์ประกอบหลัก เพราะวัตถุดิบที่นำมาใช้ทำขนมขบเคี้ยวส่วนใหญ่เป็นพวกแป้งชนิดต่างๆ ซึ่งได้มาจากธัญชาติและพืชหัว เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง เป็นต้น โดยกระบวนการผลิตขนมขบเคี้ยวที่เป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัยและมีความเหมาะสมคือกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น เพราะเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง ระยะเวลาสั้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี มีความพองตัวที่ดี กรอบ มีรูปร่างและขนาดหลากหลายตามความต้องการ มีอัตราการผลิตสูง ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงน้อย

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศไทย ในปี 2541 ไทยสามารถส่งออกข้าวได้สูงสุดเป็นประวัติการณ์จำนวน 6.41 ล้านตัน มูลค่าประมาณ 85,676 ล้านบาท แต่ในอนาคตคาดว่าการค้าข้าวจะมีการแข่งขันมากขึ้น และประเทศผู้นำเข้าข้าวจากไทยจะผลิตข้าวได้เองมากขึ้น ทำให้ความต้องการข้าวจากไทยลดลง (ข่าวธุรกิจในประเทศ, 2542) ดังนั้นการแปรรูปอาหารจากข้าวเพื่อส่งขายภายในและต่างประเทศจึงเป็นทางออกอีกทางหนึ่ง อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าแก่ข้าวให้สูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งข้าวเป็นวัตถุดิบที่นิยมนำมาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์อาหารเช้า เนื่องจากแป้งข้าวมีการพองตัวที่ดีมาก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีขาวและไม่มีรสชาติ เหมาะแก่การปรุงแต่งรสชาติ สี และกลิ่น (Matz, 1991) จึงมีการวิจัยค่อนข้างมากเกี่ยวกับการใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น ดังมีการศึกษาถึงการนำข้าวมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเช้าชนิดแผ่น (จิราภา เมืองคล้าย, 2539) การศึกษาถึงปัจจัยทางด้านวัตถุดิบ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และ ประชา บุญญสิริกูล, 2538; Han และคณะ, 1988) และปัจจัยในกระบวนการแปรรูป (Tomas และคณะ, 1994; Choudhury และ Gautam, 1999) ที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งมีการศึกษาถึงการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้แก่ผลิตภัณฑ์โดยการเติมโปรตีนจากแหล่งอื่น (ประชา บุญญสิริกูล และคณะ, 2539) จะเห็นได้ว่างานวิจัยส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบเป็นข้าวหรือแป้งจากข้าวสารที่ผ่านการขัดสีแล้ว อีกทั้งการนำเอาวัตถุดิบจากแหล่งอื่นมาผสมยังเป็นเรื่องที่ยุ่งยาก มีความจำกัดในกระบวนการผลิต รวมทั้งแหล่งของโปรตีนนั้นมักมีราคาแพง ข้าวกล้องจึงเป็นวัตถุดิบอีกรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อผลิตเป็นขนมขบเคี้ยว เพราะข้าวกล้องมีสารอาหารทุกชนิดสูงกว่าข้าวขัดขาวโดยเฉพาะวิตามินต่างๆ และ

ธาตุเหล็ก ยกเว้นคาร์โบไฮเดรต อีกทั้งในกระบวนการผลิตข้าวกล้องยังช่วยลดพลังงานในขั้นการขัดสีลงได้ และปริมาณผลผลิตข้าวกล้องจะมีปริมาณสูงกว่าข้าวขัดขาวเพราะลดการสูญเสียรำละเอียดลงได้ ทำให้ข้าวกล้องมีราคาถูกกว่า และถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมโปรตีนจากแหล่งอื่น แต่คุณภาพโปรตีนจากข้าวนั้นเป็นโปรตีนคุณภาพดีเมื่อเทียบกับโปรตีนจากธัญญชาติชนิดอื่น เพราะมีกรดอะมิโนที่มีความจำเป็นต่อร่างกายสูง (สายสนม ประดิษฐดวง, 2541) อีกทั้งเมื่อมองในแง่ของต้นทุนวัตถุดิบที่ต่ำกว่า ข้าวกล้องจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ควรหันมาให้ความสำคัญมากขึ้น

เนื่องจากข้าวกล้องมีปริมาณโปรตีน ไขมัน และเยื่อใยสูง ซึ่งมีความแตกต่างไปจากข้าวขัดขาว ข้อมูลจากผลการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นของข้าวจึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ทันทีสำหรับการผลิตขนมขบเคี้ยวจากข้าวกล้องได้ อีกทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นของข้าวกล้องนั้นยังมีอยู่น้อยมาก ดังนั้นในการที่จะนำข้าวกล้องไปใช้ประโยชน์ในการผลิตขนมขบเคี้ยวจึงควรทำการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ทั้งปัจจัยทางด้านวัตถุดิบและปัจจัยทางด้านกระบวนการแปรรูปที่มีผลต่อคุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเลือกขอบเขตสภาวะการแปรรูปผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวแบบพองตัวทันที (direct-expanded product) ที่ทำจากข้าวกล้องด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่
2. เพื่อศึกษาผลของความชื้นของวัตถุดิบที่มีต่อการดำเนินการแปรรูปเอ็กซ์ทรูชั่น ต่อลักษณะคุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวแบบพองตัวทันที
3. เพื่อศึกษาผลของสภาวะการแปรรูปที่มีต่อการดำเนินการแปรรูปจากข้าวกล้องต่อลักษณะคุณภาพที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวแบบพองตัวทันที

ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาปัจจัยทางด้านวัตถุดิบ และปัจจัยในการแปรรูปด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นที่สำคัญในการผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองตัวทันที (direct expanded product) จากข้าวกล้อง ที่มีผลกระทบต่อคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่อไป

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำข้าวกล้องมาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวแบบพองตัวทันที

2. ทำให้ทราบถึงผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญในการผลิตอาหารขบเคี้ยวโดยใช้ข้าวกล้องเป็นวัตถุดิบหลัก เพื่อเป็นแนวทางในการใช้หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต และเป็นประโยชน์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวกล้องต่อไป

การวิจัยที่เกี่ยวข้อง และคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ทำ

ข้าวกล้องเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจเพื่อนำมาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น ในการเลือกพันธุ์ข้าวที่มีความเหมาะสมเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบนั้น พบว่าอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินมีอิทธิพลต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ โดยพบว่าข้าวเหนียวซึ่งมีปริมาณ อะมิโลสต่ำมากจะให้เอ็กซ์ทรูเดตที่มีความเหนียวสูง และมีการขยายตัวต่ำกว่าเอ็กซ์ทรูเดตจากข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำในช่วงประมาณ 12.8-16.7 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อข้าวมีปริมาณอะมิโลสสูงขึ้นจะส่งผลให้มีการขยายตัวลดลง (Pan และคณะ, 1991; Yoshii และ Arisaka, 1994) ดังนั้นในผลิตภัณฑ์พองตัวจึงควรเลือกใช้พันธุ์ข้าวเจ้าที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ โดยข้าวไทยที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำและมีการเพาะปลูกกันมากคือพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 และเมื่อมีการศึกษาถึงผลของขนาดอนุภาคและปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ พบว่าขนาดอนุภาคของแป้งข้าวในช่วง 50-100 เมช จะให้เอ็กซ์ทรูเดตที่มีความพองตัวที่ดีกว่าและความหนาแน่นต่ำกว่าเอ็กซ์ทรูเดตที่เตรียมจากอนุภาคในช่วง 30-50 เมช และแป้งข้าวที่มีความชื้น 15 เปอร์เซ็นต์ จะให้ลักษณะทางกายภาพของเอ็กซ์ทรูเดตที่ดีกว่าแป้งข้าวความชื้น 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์ (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และ ประชา บุญญสิริกูล, 2538; Ryu และ Lee, 1988; Han และคณะ, 1988)

ข้าวกล้องเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณสารอาหารสูงกว่าข้าวขัดขาว เช่น โปรตีน ไขมัน และใยอาหาร และพบว่าการใช้วัตถุดิบที่มีสารอาหารประเภทดังกล่าวสูงทำให้มีความยากในการควบคุมการแปรรูปด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น และส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ต่ำลง คือ เมื่อมีปริมาณโปรตีนสูงขึ้นจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการขยายตัวต่ำลง และความชอบทางด้านเนื้อสัมผัสต่ำลง (ประชา บุญญสิริกูล และคณะ, 2539; Pan และคณะ, 1991; Kumagai และคณะ, 1987) ดังมีการทดลองเติมรำข้าวสาลีซึ่งมีปริมาณโปรตีนและใยอาหารสูงผสมในแป้งข้าว เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น พบว่าอัตราการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณรำข้าวสาลี ส่วนความหนาแน่นจะพบว่ามีค่าต่ำที่สุดเมื่อมีการเติมรำ 15 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มปริมาณรำสูงขึ้นจะส่งผลให้มีความหนาแน่นสูงขึ้นตามด้วย (Singh และคณะ, 2000) ส่วนปริมาณไขมันและใยอาหารที่สูงขึ้นก็จะส่งผลให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น และการขยายตัวก็ต่ำลงเช่นเดียวกัน (Grenus และคณะ, 1993; Jin และคณะ, 1994; Berglund และคณะ, 1994) สารอาหารเหล่านี้จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะที่ไม่ต้องการจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงผลของวัตถุดิบ และกระบวนการแปรรูปที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังมีการศึกษาถึงผลของขนาด

อนุภาคและปริมาณความชื้นของแป้งข้าว พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคและปริมาณความชื้นลดลง จะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นมีการพองตัวที่ดี ความหนาแน่นต่ำ และแรงที่ใช้ในการตัดต่ำ รวมทั้งขนาดของโพรงอากาศมีความสม่ำเสมอมากขึ้น (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และประชา บุญญสิริกูล , 2538; Ryu และ Lee, 1988; Han และคณะ, 1988) และได้มีการศึกษาถึงผลของความเร็วรอบของสกรูต่อเอ็กซ์ทรูเดตของแป้งข้าวเปรียบเทียบกับผลของสารเติมแต่งจำพวกเกลือและน้ำตาลด้วยเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ พบว่าความเร็วรอบของสกรูเป็นปัจจัยกำหนดที่สำคัญต่อแรงทอร์ค ความดันที่หัวแบบ และพลังงานกลจำเพาะมากกว่าผลของเกลือและน้ำตาล (Hsieh และคณะ, 1993) Grenus และคณะ (1993) พบว่าความเร็วรอบของสกรูมีบทบาทสำคัญต่อค่าพลังงานกลจำเพาะ โดยเมื่อความเร็วของสกรูเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะสูงขึ้น แต่จะส่งผลให้การขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดตต่ำลงเนื่องจากเวลาเฉลี่ยที่โดอยู่ในบาเรลต่ำลงจึงทำให้การเกิดเจลลาติไนซ์เซชั่นอยู่ในระดับที่ต่ำลง และการเติมรำข้าวลงในแป้งข้าวจะส่งผลให้ค่าตัวแปรตามจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เช่น แรงทอร์ค ความดันที่หัวแบบ ค่าพลังงานกลจำเพาะ และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไป รวมทั้งการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อเติมรำข้าวในระดับที่สูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ จึงแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของบาเรลเป็นปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับระดับการเติมรำข้าว ถึงแม้ว่าจะมีการศึกษากันอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับผลของปัจจัยทางด้านวัตถุดิบและการแปรรูปข้าวไปเป็นผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว แต่ก็เป็นการศึกษาข้าวหรือแป้งที่มาจากข้าวขัดขาวแทบทั้งสิ้น ส่วนข้าวกล้องที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีแตกต่างออกไปนั้นยังมีผู้ทำการศึกษาอยู่น้อยมาก

ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้จึงใช้ข้าวกล้องเป็นวัตถุดิบโดยทำการศึกษาถึงผลของปัจจัยทางด้านกระบวนการแปรรูปคือ ความชื้นของวัตถุดิบแป้งข้าวกล้อง ความเร็วรอบของสกรู และอุณหภูมิของบาเรล เพื่อให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำข้าวกล้องมาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยว และได้ผลการทดลองที่เป็นข้อมูลในการนำไปพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวต่อไป

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

1. วัตถุดิบ

ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ105 จากบริษัทปทุมไรซ์มิลล์แอนด์แกรนูรี จำกัด (มหาชน) นำข้าวกล้องมาบดด้วยเครื่องบดเมล็ดพันธุ์แบบฆ้อน (Hammer miller) (Retsch, SK100, standard rostfrei, Germany) ผ่านตระแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร เก็บแป้งข้าวกล้องในห้องเย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ในระหว่างรอการผลิต นำแป้งข้าวกล้องมาวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน และเถ้า ด้วยวิธี AOAC Method (1997) และวิเคราะห์ปริมาณอะมิโลสตามวิธีของ Juliano (1971)

2. การผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น

นำส่วนผสมของวัตถุดิบมาป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ ชนิดที่สกรูซ้อนกันแบบหมุนตามกัน (APV Baker MPF 19:25, corotating and intermeshing twin screw extruder, APV Baker, Inc., England) อัตราส่วนความยาวเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสกรู (L/D Ratio) เท่ากับ 330 : 19 มิลลิเมตร ประกอบด้วยบาเรล 4 ท่อนเรียงต่อกันและปิดด้วยหัวแบบ (Die plate) ที่มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0 มิลลิเมตร นำแป้งข้าวกล้องป้อนเข้าเครื่องโดยใช้อัตราการป้อนวัตถุดิบแป้งข้าวกล้องที่ 9.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ด้วยถังป้อนที่มีสกรูคู่อยู่ที่ก้นถัง ทำหน้าที่ป้อนวัตถุดิบแบบปริมาตร (K-Tron Corp. Pitman, NJ) มีปั๊มน้ำชนิด Peristaltic Pump ปั๊มน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบภายในบาเรลหน้าหัวแบบมีใบมีดสำหรับตัดเอ็กซ์ทรูเดตควบคุมที่ความเร็วรอบ 400 รอบต่อนาที การเก็บข้อมูลจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เช่น อุณหภูมิของบาเรล (barrel temperature) อุณหภูมิของเอ็กซ์ทรูเดต (product temperature) ความดันที่หัวแบบ (die pressure) แรงทอร์ค (% torque) ทำการเก็บทุกๆ 5 นาทีหลังจากที่มีการเปลี่ยนสภาวะและค่าแรงทอร์คคงที่ เก็บตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดต นำเข้าอบในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณภาพทางกายภาพ

การคำนวณพลังงานกลจำเพาะ (Specific Mechanical Energy, SME)

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

การวางแผนการทดลอง

นำส่วนวัตถุดิบแป้งข้าวกล้องมาศึกษาด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น โดยวางแผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design ศึกษาตัวแปรของสภาวะการผลิต 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปรแบ่งออกเป็น 3 ระดับดังนี้

- ความชื้นของวัตถุดิบแป้งข้าวกล้องที่ระดับ 20, 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์
- ความเร็วรอบของสกรู ที่ระดับ 250, 300 และ 350 รอบต่อนาที
- อุณหภูมิของบาเรล 4 ที่ระดับ 160, 170 และ 180 องศาเซลเซียส

สภาวะในการผลิตทั้งหมดประกอบด้วย 15 การทดลองดังตารางที่ 1

Table I. Experimental design

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

นำเอ็กซ์ทรูเดตที่แต่ละสภาวะการผลิตมาวิเคราะห์ผลตอบสนอง (Response) ที่มีความสัมพันธ์กับคุณภาพทางกายภาพที่เลือกศึกษาดังนี้คือ อัตราการขยายตัว แรงกดแตก และความหนาแน่น

การตรวจวัดคุณภาพทางกายภาพ

แรงกดแตก (Compression Force)

การเตรียมตัวอย่าง

โดยการตัดชิ้นของเอ็กซ์ทรูเดตให้มีความยาว 6 ± 0.2 เซ็นติเมตร อบในตู้อบลมร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที บรรจุลงถุงพลาสติกปิดผนึก แล้วทิ้งไว้ข้ามคืน (ประมาณ 18 ชั่วโมง) ในกล่องโฟมปิดฝา และควบคุมความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ประมาณ 6-7 เปอร์เซ็นต์ ก่อนทำการวัดค่าแรงกดแตก โดยใช้เครื่อง TA-XT2i Texture Analyzer

การวัด

ใช้หัววัดแบบ P35 (35 mm. Dia. Cylinder Aluminum) เพื่อวัดแรงที่กดลงบนเอ็กซ์ทรูเดตแล้วทำให้แตก โดยค่าแรงกดแตกนี้สัมพันธ์กับความแข็ง (hardness) ของเอ็กซ์ทรูเดต โดยมีสภาวะในการวัดดังนี้

- วัดแรงกดแตก (measure force in compression)
- ความเร็วของหัววัดที่เคลื่อนที่ลงก่อนสัมผัสเอ็กซ์ทรูเดตมีอัตราเร็ว 5.0 มิลลิเมตรต่อวินาที (pre – test speed)
- ความเร็วของหัววัดขณะเคลื่อนที่ลงในเนื้อของเอ็กซ์ทรูเดต 5.0 มิลลิเมตรต่อวินาที (test – speed)
- ความเร็วของหัววัดขณะเคลื่อนที่ขึ้นออกจากเอ็กซ์ทรูเดต 10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที (post – test speed)
- ระยะทางที่หัววัดเคลื่อนที่ลงในเนื้อของเอ็กซ์ทรูเดต คือ 50% strian
- trigger force 5 กรัม
- การวัดในแต่ละตัวอย่างทำ 10 ซ้ำ
- หาค่าแรงเฉลี่ยของแรงสูงสุดที่กดลงบนเอ็กซ์ทรูเดต แล้วทำให้แตก (average maximum peak force)

การวัดอัตราการขยายตัว (expansion ratio)

คำนวณจากอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของเอ็กซ์ทรูเดตที่วัดด้วย Vernier caliper เทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเปิดหน้าแปลนที่ใช้ (3.0 มิลลิเมตร) คำนวณค่าเฉลี่ยของการวัด 10 ตัวอย่าง (ชิ้น)

ความหนาแน่น (Piece Density)

ตามวิธีการแทนที่ด้วยทราย (Sand Displacement Method) โดยการใช้ภาชนะที่ทราบปริมาตรมาชั่งน้ำหนัก เติมทรายลงในภาชนะประมาณ 70 กรัม สุ่มชิ้นตัวอย่างที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอนประมาณ 5 กรัมใส่ลงในภาชนะเติมทรายให้ล้นภาชนะ แล้วใช้ไม้บรรทัดเหล็กกวาดทรายออกตามแนวขอบปากภาชนะโดยไม่ต้องมีการเคาะหรือกระแทกภาชนะ บันทึกน้ำหนักรวมของภาชนะทำซ้ำ 5 ครั้ง

การคำนวณ

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

เมื่อ PD = ความหนาแน่น (Piece Density, กรัมต่อลูกบาก์ศเซ็นติเมตร)

Wp = น้ำหนักของเอ็กซ์ทรูเดต (กรัม)

Vv = ปริมาตรภาชนะ (279 ลูกบาก์ศเซ็นติเมตร)

Ws = น้ำหนักทราย (กรัม)

Ds = ความหนาแน่นของทราย (1.54 กรัมต่อลูกบาก์ศเซ็นติเมตร)

นำค่าตอบสนองที่ได้มาสร้างความสัมพันธ์กับตัวแปรในสภาวะการผลิตที่เลือกศึกษาโดยวิธี Multiple Regression สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการโพลิโนเมียลกำลังสองซึ่งแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อ X_1 = ความชื้นของวัตถุดิบ (เปอร์เซ็นต์)

X_2 = ความเร็วรอบสกรู (รอบ/นาที)

X_3 = อุณหภูมิของบาเรล (องศาเซลเซียส)

Y = ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (แรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ ความดันที่หัวแบบ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ อัตราการขยายตัว แรงกดแตก และความหนาแน่น)

$b_0 \ldots b_n$ = ค่าสัมประสิทธิ์รีเกรชชั่น

โดยทำการพิจารณาค่า R^2 เมื่อมีค่าสูงจึงจะนำสมการมาใช้ ซึ่งสมการที่ได้จะนำมาสร้างกราฟ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STATISTICA (version 5.0) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของสภาวะการผลิตที่เลือกศึกษากับผลตอบสนอง

บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของวัตถุดิบตามวิธี AOAC Method (1997) แสดงดังตารางที่ 2

Table II. Composition of rice flour and brown rice flour.

Component	Rice flour (%)	Brown rice flour (%)
Moisture	11.05	7.65
Protein	6.39	7.72
Fat	0.31	2.93
Ash	0.30	1.39
Amylose	16.95	16.95

ผลการศึกษาปัจจัยต่างๆ ของการผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น

ผลการศึกษาเบื้องต้น (Preliminary experiment)

จากการทดลองเพื่อศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมวัตถุดิบ ความชื้นของวัตถุดิบ อัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ความเร็วรอบของสกรู และอุณหภูมิของบาเรลที่มีความเหมาะสมในกระบวนการผลิต โดยการบดข้าวกล้องพันธุ์ขาวมะลิ105 ผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตรจะได้แป้งข้าวกล้องบดหยาบสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทำผลิตภัณฑ์ โดยแป้งข้าวกล้องจะถูกปรับความชื้นเมื่ออยู่ในบาเรลให้อยู่ในระดับความชื้น 20 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นระดับความชื้นที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นยาวต่อเนื่องและสามารถใช้ใบมีดที่อยู่ติดกับหน้าแปลนของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ตัดได้ โดยลักษณะของผลิตภัณฑ์เมื่อออกจากหน้าแปลนจะมีความพองตัว และมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ไม่แข็งจนเกินไปอยู่ในช่วงที่สามารถใช้เครื่อง Texture Analyzer ในการวัดเนื้อสัมผัสได้ อัตราการป้อนวัตถุดิบอยู่ในอัตราคงที่ที่ 9.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เนื่องจากเป็นอัตราการป้อนที่มีความเหมาะสมทำให้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สามารถดำเนินการผลิตได้ที่ช่วงความเร็วรอบของสกรู 250-350 รอบต่อนาที อุณหภูมิของบาเรลท่อนที่ 4 ที่อุณหภูมิ 160 170 และ 180 องศาเซลเซียส เนื่องจากการให้ความแตกต่างของอุณหภูมิทั้ง 3 ระดับนี้จะให้ลักษณะของผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างกันในช่วงลักษณะที่ยอมรับได้ โดยการใช้อุณหภูมิที่ทางออกของเครื่องมากกว่า 100 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความพองตัวทันทีหลังออกจากเครื่อง (กมลวรรณ แจ้งชัด, 2541) ส่วนการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป (มากกว่า 180 องศาเซลเซียส) พบว่าผลิตภัณฑ์มีการขยายตัวที่ลดลง เนื่องจากการเพิ่มระดับของอุณหภูมิทำให้ระดับการสุกของผลิตภัณฑ์มากขึ้นจนโมเลกุล

ของ สตาร์ชเกิด degradation เป็นสาเหตุให้การขยายตัวลดลง (Davidson, 1984) ดังนั้นผลการศึกษาเบื้องต้นในการหาสภาวะในการผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นคือ อัตราการป้อนวัตถุดิบที่ 9.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความชื้นของวัตถุดิบ 3 ระดับ คือ 20 22 และ 24 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบของสกรู 3 ระดับ คือ 250 300 และ 350 รอบต่อนาที และอุณหภูมิของบาเรลท่อนที่ 4 เป็น 3 ระดับ คือ 160 170 และ 180 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาปัจจัยการผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น

จากการดำเนินการผลิตด้วยสภาวะการแปรรูปทั้ง 15 การทดลอง จำนวน 2 ซ้ำ แสดงผลค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ดังตารางที่ 3

Table III. Processing conditions and operating parameters in the extrusion processing of brown rice flour

Feed moisture content (%)	Screw speed (rpm)	Barrel Temperature (^{o}C)	Torque (%)	SME (kJ/kg)	Product temperature (^{o}C)	Die pressure (psi)
20	250	170	87	314.07	119	260
20	300	160	79	344.15	116	235
20	300	180	92	398.73	122	225
20	350	170	78	396.56	120	225
22	250	160	81	286.77	114	260
22	250	180	86	302.75	122	225
22	300	170	82	344.91	118	212
22	350	160	63	309.77	116	195
22	350	180	85	418.87	123	220
24	250	170	73	250.13	115	220
24	300	160	64	265.45	114	185
24	300	180	82	339.4	122	215
24	350	170	68	326	118	205

เมื่อนำผลข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการเชิงเส้น (Regression Analysis) ด้วยโปรแกรม SPSS for Window แบบ Stepwise Method แสดงผลการวิเคราะห์ดังตาราง

ที่ 4 พบว่าแรงทอร์ค (% torque) ค่าพลังงานกลจำเพาะ (Specific Mechanical Energy) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (Product Temperature) และความดันที่หัวแบบ (Die Pressure) เป็นผลมาจากผลร่วม (interaction) ระหว่างความชื้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) แต่ตัวแปรอิสระทั้งความชื้นหรือความเร็วรอบสกรูเพียงตัวเดียวไม่ได้ส่งผลต่อความแตกต่างของตัวแปรจากเครื่องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าทั้งปัจจัยความชื้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูร่วมกันจะส่งผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงในตัวแปรตามจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Table IV. Regression Equation Coefficients of Product Temperature, Die Pressure, Percent of Torque, and Specific Energy.

	Product Temperature (^{o}C)	Die Pressure (psi)	Torque (%)	Specific Energy (kJ/kg)
Intercept	89.126	326.143	65.529	109.906
moisture (mc)	ns	ns	ns	ns
screw speed (ss)	ns	ns	ns	ns
barrel temperature(temp)	ns	ns	ns	ns
mc^2	1.624×10^{-2} **	ns	ns	ns
ss^2	ns	ns	-1.488×10^{-3} **	ns
$temp^2$	1.085×10^{-3} **	ns	-3.261×10^{-3} *	ns
mc X ss	8.141×10^{-4} **	-1.60×10^{-2} **	-1.006×10^{-2} **	-5.442×10^{-2} **
mc X temp	ns	ns	ns	ns
ss X temp	ns	ns	6.073×10^{-3} **	1.142×10^{-2} **
R^2	0.848	0.379	0.85	0.855

*,** = Significant at $P<0.05$, and $P<0.01$, respectively.

ns = Not significant at 5% level.

จากสมการเชิงเส้นในตารางที่ 4 จะเห็นว่าค่า R^2 ของตัวแปรตามมีค่าสูง ($R^2 > 0.8$) ดังนั้นจึงใช้สมการดังกล่าวในการคำนวณค่าตอบสนองซึ่งเป็นตัวแปรตามจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในช่วงสภาวะการผลิตที่ทำการศึกษา ซึ่งคือ แรงทอร์ค ค่าพลังงานกลจำเพาะ และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ส่วนค่าความดันที่หัวแบบให้สมการที่มีค่า R^2 ค่อนข้างต่ำ ($R^2 = 0.379$) จึงไม่เหมาะสมในการนำสม

การไปใช้ทำนายผลค่าตอบสนอง จากนั้นใช้โปรแกรมสำเร็จรูป STATISTICA เพื่อสร้างกราฟแสดงผลของปัจจัยการผลิตต่อตัวแปรตามจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในลักษณะ 3 มิติ (Response Surface Model) ต่อไป

แรงทอร์ค (%Torque)

แรงทอร์คเป็นตัวแปรตามที่สำคัญในการผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น โดยแรงทอร์คเป็นค่าที่ชี้ให้เห็นถึงน้ำหนักหรือแรงต้านทานที่มีต่อการหมุนของมอเตอร์ของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการทำงานอย่างเต็มกำลังของเครื่อง แรงทอร์คจัดเป็นคุณสมบัติที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากสภาวะการแปรรูป และมีแนวโน้มที่จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ที่จะได้ออกมา (Lue และคณะ, 1994) จากการทดลองในครั้งนี้พบว่าแรงทอร์คมีความสัมพันธ์ตรงข้ามกันกับคุณภาพของเอ็กซ์ทรูเดตทางด้านความหนาแน่น โดยมีค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) เท่ากับ –0.604 ($p<0.05$) คือ เมื่อแรงทอร์คที่ปรากฏมีค่าสูงจะส่งผลให้ได้เอ็กซ์ทรูเดตที่มีความหนาแน่นต่ำซึ่งถือว่าเป็นลักษณะที่ต้องการของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวชนิดพองตัวทันที จากการวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 4) พบว่าแรงทอร์คไม่ได้เป็นผลมาจากตัวแปรอิสระเพียงตัวหนึ่งตัวใดในการทดลองครั้งนี้ในเชิงเส้นตรง (Linear Effect) แต่เป็นผลในเชิงกำลังสอง (Quadratic Effect) ของความเร็วรอบสกรู อุณหภูมิของบาเรล ผลร่วมระหว่างความชื้นของวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรู และความเร็วรอบสกรูกับอุณหภูมิของบาเรล โดยรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าแรงทอร์ค ลดลงอันเนื่องมาจากส่วนผสมภายในบาเรล (dough) มีความหนืดลดลงเมื่อมีปริมาณน้ำอยู่ในส่วนผสมมากขึ้น จากรูปชี้ให้เห็นว่าเมื่อดำเนินการแปรรูปด้วยความชื้นสูงร้อยละ 24 และความเร็วรอบสกรู 350 รอบต่อนาที จะส่งผลให้ค่าแรงทอร์คต่ำที่สุด หมายถึงเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ทำงานด้วยการทนต่อการต้านทานของน้ำหนักบนสกรูน้อยที่สุด ในรูปที่ 1 และ 2 แสดงว่าค่าแรงทอร์คได้รับผลมาจากความเร็วรอบสกรูเนื่องจากผลของการเป็นลักษณะคล้ายพลาสติกของโดที่ส่งผลต่อความหนืด (Pseudoplastic Behavior) โดยลักษณะเช่นนี้จะทำให้แรงทอร์คมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มความเร็วรอบสกรูโดยการเพิ่มความเร็วส่งผลให้มีการเพิ่มแรงเฉือนที่กระทำต่อโดที่อยู่ภายในบาเรลจึงทำให้ความหนืดลดลง (Bhattacharya และ Hanna, 1987; Lue และคณะ, 1994) หรือสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่แรงทอร์คลดลงเมื่อมีการเพิ่มความเร็วรอบได้ว่าเมื่อสกรูมีการหมุนเร็วขึ้นจะส่งผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงต่อการเติมเต็มของโดภายในบาเรล (Jin และคณะ, 1994) โดยเมื่ออัตราการป้อนของวัตถุดิบคงที่ การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบจะไปลดการเติมเต็มของโดบนสกรูอันเนื่องมาจากโดที่อยู่ภายในบาเรลถูกอัดผ่านรูเปิดหน้าแปลนของเครื่องออกไปด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่า ปริมาณโดภายในบาเรลจึงเหลืออยู่น้อยกว่า ดังนั้นน้ำหนักที่ต้านทานการหมุนของมอเตอร์อยู่จึงต่ำกว่าด้วย ในรูปที่ 2 แสดงถึงผลร่วมระหว่างอุณหภูมิของบาเรลกับความเร็ว

รอบของสกรูพบว่าที่ความเร็วรอบสกรูที่ 300-350 รอบต่อนาที ส่งผลให้เกิดการลดลงอย่างชัดเจนของค่าแรงทอร์ค ส่วนที่ความเร็วรอบสกรู 250 รอบต่อนาที จะพบการลดลงของค่าทอร์คเพียงเล็กน้อย

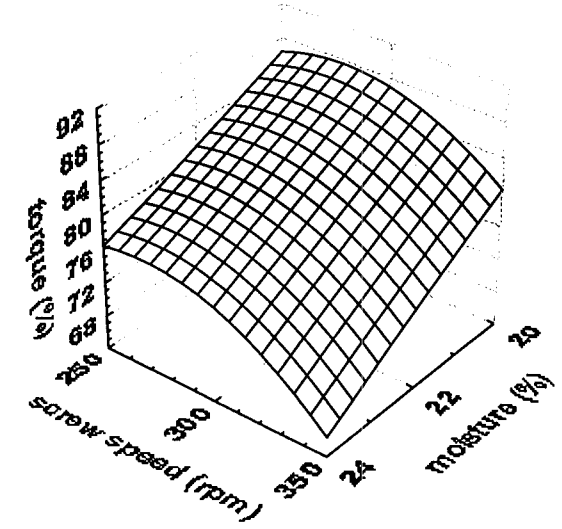

Figure 1 Effects of moisture and screw speed on extruder torque.

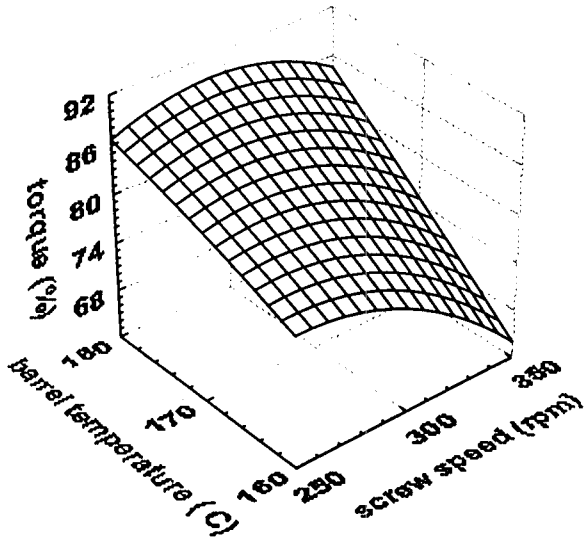

Figure 2 Effects of screw speed and barrel temperature on extruder torque.

ค่าพลังงานกลจำเพาะ (Specific Mechanical Energy, SME)

ค่าพลังงานกลจำเพาะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงพลังงานกลที่ถูกป้อนเข้าสู่วัตถุดิบภายในบาเรลในขณะที่ดำเนินการผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น และเป็นตัวที่ชี้บอกถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัตถุดิบ (Lue และคณะ, 1994) จากการทดลองพบความสัมพันธ์ตรงข้ามระหว่างค่าพลังงานกลจำเพาะกับความหนาแน่นที่ระดับค่อนข้างสูงโดยมีค่าสหสัมพันธ์ –0.794 ($p<0.01$) คือเมื่อมีการให้พลังงานแก่วัตถุดิบภายในบาเรลมากก็จะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นต่ำ จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานกลจำเพาะได้รับผลมาจากผลร่วมระหว่างความชื้นของวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรู และความเร็วรอบสกรูกับอุณหภูมิของบาเรลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.01$) จากรูปที่ 3 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานกลจำเพาะอย่างชัดเจนเมื่อมีการเปลี่ยนความเร็วรอบของสกรูในช่วง 250-350 รอบต่อนาที โดยเมื่อเพิ่มความเร็วรอบสกรูจะส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ความชื้นของวัตถุดิบมากจะส่งผลให้ความต้องการพลังงานกลจำเพาะของเครื่องลดน้อยลง ผลจากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ดังสมการที่ 1 โดยทั้งค่าความเร็วรอบสกรูและแรงทอร์คต่างเป็นฟังก์ชั่นกับค่าพลังงานกลจำเพาะ ผลจากการทดลองเมื่อเราหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ของค่าพลังงานกลจำเพาะกับความเร็วรอบสกรูและแรงทอร์คพบว่า ความเร็วรอบสกรูมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานกลจำเพาะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ในขณะที่ความสัมพันธ์ของแรงทอร์คกับค่าพลังงานกลจำเพาะมีต่ำกว่า ($p>0.05$) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้นทำให้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีความต้องการพลังงานกลที่ป้อนเข้าสู่วัตถุดิบสูงขึ้น ถึงแม้ว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบสกรูจะไปส่งผลให้ค่าแรงทอร์คหรือค่าความต้านทานต่อการหมุนของมอเตอร์ลดลงก็ตาม และเมื่อศึกษาผลของความชื้นของวัตถุดิบที่มีต่อค่าพลังงานกลจำเพาะพบว่าเมื่อความชื้นของวัตถุดิบต่ำลงส่งผลให้ค่าความต้องการพลังงานจำเพาะสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการมีค่าสหสัมพันธ์ที่ระดับ 0.506 ($p>0.05$) จากตารางที่ 4 พบว่าผลร่วมระหว่างความเร็วรอบสกรูกับอุณหภูมิของบาเรลส่งผลต่อค่าพลังงานกลจำเพาะ ($p<0.01$) โดยเมื่อความเร็วรอบของสกรูเพิ่มขึ้นจาก 250-350 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิของบาเรลต่างๆ จะส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะมีค่าสูงขึ้นด้วย (รูปที่ 4) ผลของการเพิ่มขึ้นของพลังงานกลจำเพาะอันเนื่องมาจากการเพิ่มของความเร็วรอบสกรูดังที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง(Hsieh, 1989; Garber และคณะ, 1997)

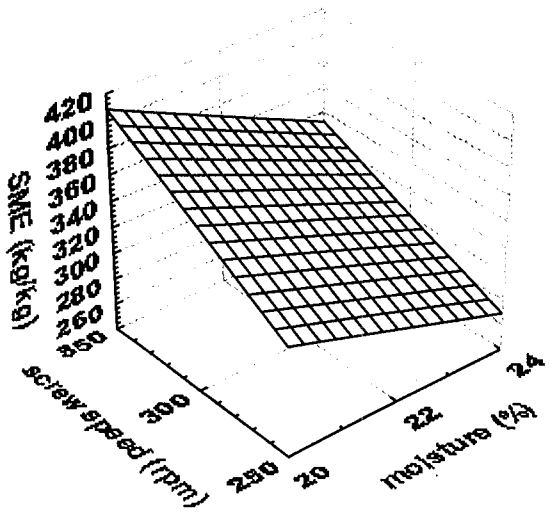

Figure 3 Effects of moisture and screw speed on specific mechanical energy (SME).

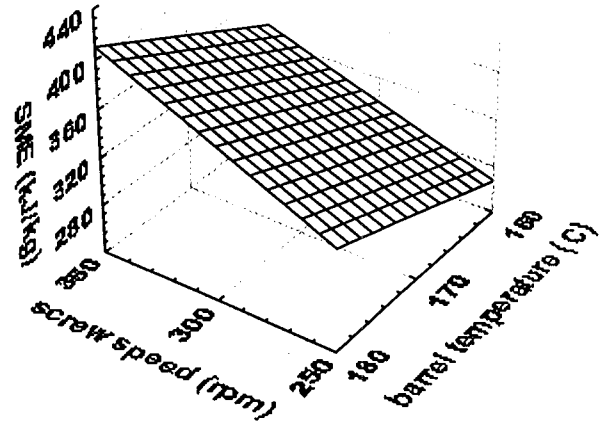

Figure 4 Effects of screw speed and barrel temperature on specific mechanical energy (SME).

ความดันที่หัวแบบ (Die Pressure)

จากตารางที่ 4 พบว่ามีเพียงผลร่วมระหว่างความชื้นของวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรูที่ส่งผลต่อค่าความดันที่หัวแบบ ($p<0.01$) แต่สมการเชิงเส้นที่ได้มีค่า R^2 ค่อนข้างต่ำ (0.379) ซึ่งเป็นสมการที่ไม่เหมาะสมในการนำมาแสดงผลตอบสนองแบบกราฟ 3 มิติ แต่ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Bhattacharya และ Hanna (1987), Hsieh และคณะ (1993), และ Garber และคณะ (1997) พบว่าความ

ดันที่หัวแบบมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบสกรูซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในครั้งนี้ (ตารางที่ 3) เนื่องจากผลของการเติมเต็มของโดบนสกรูโดยเมื่อสกรูหมุนเร็วขึ้นจะทำให้ปริมาณโดที่สะสมอยู่ใกล้ทางออกหน้าแปลนมีน้อยลงจึงส่งผลให้ความดันที่หัวแบบลดลง ในส่วนผลของความชื้นพบว่าเมื่อวัตถุดิบมีความชื้นสูงขึ้นทำให้ความหนืดของโดที่อยู่ภายในบาเรลมีค่าต่ำลง โดจึงถูกดันออกจากหน้าแปลนได้ง่ายขึ้นดังนั้นค่าความดันที่หัวแบบจึงต่ำลง ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Grenus และคณะ (1993) ที่พบว่าความดันที่หัวแบบมีความสัมพันธ์กับความหนืดของโด สาเหตุที่ทำให้ค่า R^2 ของปัจจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษากับผลของความดันที่หัวแบบมีค่าต่ำ เนื่องจากยังมีอีกหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความดันที่หัวแบบเช่น อุณหภูมิของโดซึ่งได้รับผลมาจากอุณหภูมิของบาเรลและองค์ประกอบของวัตถุดิบ จึงทำให้เห็นผลของปัจจัยที่ศึกษาไม่ชัดเจน และผลจากการทดสอบความสัมพันธ์กับคุณภาพทางกายภาพของเอ็กซ์ทรูเดตที่ทำการศึกษา ไม่พบความสัมพันธ์กับลักษณะใดๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ (Product Temperature)

จากตารางที่ 4 พบว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ได้รับผลกระทบจากปัจจัยความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบาเรลในลักษณะแนวโน้มเชิงกำลังสอง (Quadratic effect) และเป็นผลมาจากผลร่วมระหว่างความชื้นวัตถุดิบกับความเร็วรอบสกรู ($p<0.01$) รูปที่ 5 แสดงผลของความชื้นและอุณหภูมิของบาเรลที่มีต่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากอุณหภูมิที่ตั้งไว้ตลอดความยาวของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ดังที่กล่าวมาแล้วว่าถ้าอุณหภูมิทางออกของเครื่องมากกว่า 100 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่พองตัวทันทีหลังออกจากเครื่อง จากกราฟจะ

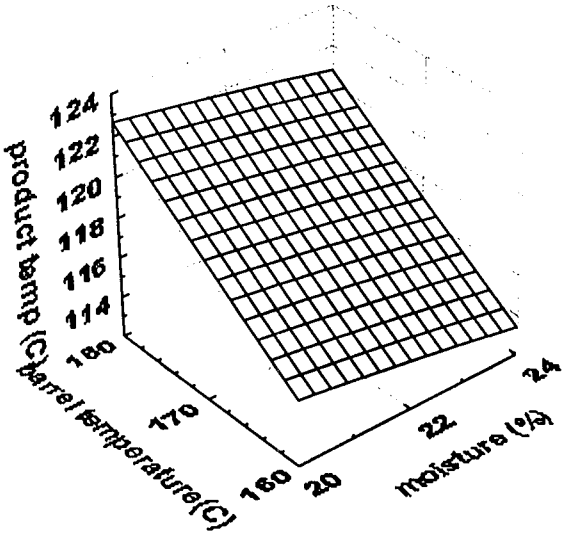

Figure 5 Effects of moisture and barrel temperature on product temperature.

เห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของบาเรลเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นด้วย โดยที่ความชื้นของวัตถุดิบในช่วง 20-24 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์น้อยมาก

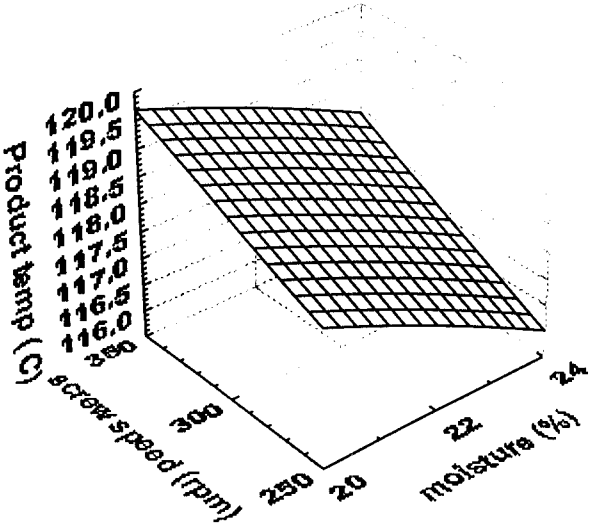

Figure 6 Effects of moisture and screw speed on product temperature.

รูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เนื่องจากผลของผลร่วมระหว่างความชื้นของวัตถุดิบกับความเร็วรอบของสกรู เมื่อปริมาณความชื้นของวัตถุดิบคงที่พบว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบสกรู (250-350 รอบต่อนาที) เนื่องจากเมื่อสกรูหมุนเร็วขึ้นจะส่งผลให้แรงเฉือน (shear) ที่เกิดขึ้นกับโดภายในบาเรลมีมากขึ้นทำให้เกิดความร้อนอันเนื่องมาจากแรงเสียดสี (friction heat) มากขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของบาเรลและความเร็วรอบสกรูจะส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียโครงสร้างของโมเลกุลแป้ง (starch gelatinization) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความพองตัวมีลักษณะรูพรุนเล็ก และมีความต้านทานต่อแรงกดลดลง (กมลวรรณ, 2541) ดังผลการทดลองในครั้งนี้พบว่าความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดตมีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ มีค่าสหสัมพันธ์ที่ระดับ –0.649 ($p<0.05$) คือเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงจะให้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นต่ำโดยจะมีลักษณะโครงสร้างความเป็นรูพรุนมากและมีน้ำหนักเบา จากงานวิจัยของ Grenus และคณะ (1993) พบว่าการขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดตมีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ โดยเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ต่ำจะส่งผลให้การขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดตต่ำลงด้วย โดยที่ Chinnaswamy และ Hanna (1988) พบว่าการที่เอ็กซ์ทรูเดตมีการขยายตัวที่ต่ำเนื่องจากมีการเกิด gelatinization ของสตาร์ชในระดับที่ต่ำกว่า แต่ทั้งนี้การเพิ่มอุณหภูมิของบาเรลและอัตราการเฉือนที่สูงเกินไปจะเป็นสาเหตุให้เกิด starch degradation (Colonna และคณะ, 1984) และ dextrinization (Gomaz และ Aguilera, 1984) ซึ่งส่งผลให้การขยายตัวของผลิตภัณฑ์ลดลงได้ จากผล

การทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีการขยายตัวต่ำลง โดยมีค่าสหสัมพันธ์ -0.525 (p=0.06)

การศึกษาปัจจัยคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

จากการดำเนินการผลิตด้วยสภาวะการแปรรูปทั้ง 15 การทดลอง จำนวน 2 ซ้ำ แสดงผลค่าเฉลี่ยของปัจจัยคุณภาพทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ทำการตรวจวัดดังตารางที่ 5

Table V. Processing conditions and product properties in the extrusion processing of brown rice flour.

Feed moisture Content (%)	screw speed (rpm)	barrel temperature ($^{\circ}$C)	expansion ratio	compression force (g)	piece density (g/cm^3)
20	250	170	2.95	5493.87	0.0485
20	300	160	3.17	3848.32	0.0456
20	300	180	2.73	5771.8	0.0436
20	350	170	2.83	5034.2	0.0435
22	250	160	3.04	5144.52	0.0506
22	250	180	2.65	6713.82	0.0459
22	300	170	2.76	6914.93	0.0493
22	350	160	3.07	4954.21	0.0483
22	350	180	2.44	6895.84	0.0467
24	250	170	2.68	6841.76	0.0549
24	300	160	2.7	6483.74	0.055
24	300	180	2.68	8547.62	0.0495
24	350	170	2.54	7619.44	0.0515

เมื่อนำผลข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์สมการเชิงเส้น (Regression Analysis) ด้วยโปรแกรม SPSS for Window แบบ Stepwise Method แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 6 จากผลการวิเคราะห์พบว่า ผลร่วมระหว่างความชื้นของวัตถุดิบกับอุณหภูมิของบาเรลส่งผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อคุณภาพทางกายภาพของเอ็กซ์ทรูเดตทางด้านอัตราการขยายตัว

ความหนาแน่น และแรงกดแตก โดยให้ค่า R^2 ระหว่างสภาวะที่ทำการแปรรูปกับลักษณะทางกายภาพของเอ็กซ์ทรูเดตค่อนข้างสูง (R^2>0.70) จึงนำสมการของแต่ละลักษณะทางกายภาพมาแสดงผลให้อยู่ในรูป 3 มิติต่อไป

Table VI. Regression Equation Coefficients of Piece Density, Expansion Ratio, and Compression Force.

	Expansion Ratio	Compression Force (g)	Piece Density (g/cm^3)
Intercept	26.563	-7507.361	5.057×10^{-2}
Moisture (mc)	-0.938 *	ns	ns
screw speed (ss)	ns	ns	-2.462×10^{-5} **
barrel temperature(temp)	-0.131 *	ns	ns
mc^2	ns	ns	7.318×10^{-5} **
ss^2	ns	ns	ns
$temp^2$	ns	ns	ns
mc X ss	ns	ns	ns
mc X temp	5.125×10^{-3}*	3.677 **	7.318×10^{-5} **
ss X temp	ns	ns	ns
R^2	0.709	0.724	0.793

*,** = Significant at P<0.05, and P<0.01, respectively.

ns = Not significant at 5% level.

อัตราการขยายตัว (Expansion Ratio)

จากผลงานวิจัยของ Feldberg (1969) พบว่าอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินมีอิทธิพลต่อลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ โดยถ้ามีปริมาณอะมิโลสมากจะทำให้การพองตัวและปริมาตรจำเพาะลดลง ในขณะที่อะมิโลเพคตินจะช่วยในการพองตัวและมีน้ำหนักเบา ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้แป้งข้าวกล้องจากข้าวพันธุ์ขาวมะลิ105 ที่เป็นข้าวชนิดอะมิโลสต่ำโดยมีปริมาณอะมิโลส 16.95 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 2) เพื่อให้การผลิตในครั้งนี้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการพองตัวที่ดี และเมื่อทำการศึกษาถึงปัจจัยทางด้านสภาวะในการแปรรูปได้ผลการทดลองดังตารางที่ 5 และผลการวิเคราะห์ทางสถิติดังตารางที่ 6 โดยพบว่าการขยายตัวได้รับผลมาจากปริมาณความชื้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบาเรลในลักษณะเชิงเส้นตรง ($p<0.05$) และมีผลร่วมระหว่างความชื้นกับอุณหภูมิ

ของบาเรลด้วย โดยจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิของบาเรลและปริมาณความชื้นมีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้การขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดตลดลง Pan และคณะ (1991) รายงานว่าการขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดตแป้งข้าวจะสูงที่สุดเมื่ออุณหภูมิของบาเรลที่ 158 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมินี้จะเกิดการ gelatinization ของ สตาร์ชจึงทำให้เกิดการขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดต และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของบาเรลสูงกว่า 160 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้การขยายตัวลดลงเนื่องจากการเกิด starch degradation ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Chinnaswamy และ Hanna (1988) ที่ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการขยายตัว ซึ่งพบว่าแป้งข้าวโพดให้การขยายตัวที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิบาเรล 140 องศาเซลเซียส และการขยายตัวมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับการทดลองในครั้งนี้ที่พบว่าสภาวะที่ให้การขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดตที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิบาเรล 160 องศาเซลเซียส และความชื้นของวัตถุดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 7) และสามารถกล่าวได้ว่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ทำให้เอ็กซ์ทรูเดตมีการขยายตัวที่ดีคือที่อุณหภูมิ 114-115 องศาเซลเซียส (รูปที่ 5) จากผลการทดลองทางด้านปริมาณความชื้นของวัตถุดิบในรูปที่ 7 พบว่าเมื่อความชื้นของวัตถุดิบมีปริมาณสูงขึ้นจาก 20-24 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าผลของการขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดตจะต่ำลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิของบาเรลต่ำที่ 160 องศาเซลเซียส

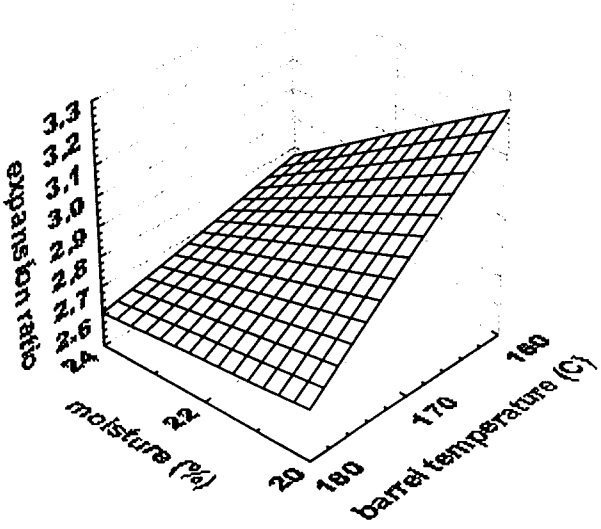

Figure 7 Effects of moisture and barrel temperature on expansion ratio.

แรงกดแตก (Compression Force)

จากผลการวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่าค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในการกดเอ็กซ์ทรูเดตให้เกิดการแตก (compression force) ได้รับผลมาจากผลร่วมระหว่างความชื้นของวัตถุดิบกับอุณหภูมิของบาเรล ($p<0.01$) ดังตารางที่ 6 จากสมการเชิงเส้นสามารถนำมาสร้างกราฟแสดงผลแบบ 3 มิติได้ดังรูปที่ 8

ซึ่งพบว่าสภาวะการผลิตที่ทำให้ได้เอ็กซ์ทรูเดตที่มีความต้องการแรงกดแตกต่ำที่สุดคือสภาวะที่ความชื้นของวัตถุดิบอยู่ในระดับต่ำ (20 เปอร์เซ็นต์) และอุณหภูมิของบาเรล 160 องศาเซลเซียส โดยการเพิ่มปริมาณความชื้นให้แก่วัตถุดิบจะมีแนวโน้มทำให้เอ็กซ์ทรูเดตมีความแข็งมากขึ้นดังแสดงได้จากความต้องการแรงที่ใช้ในการกดแตกมาขึ้นดังรูป จากรูปที่ 8 และ 9 พบว่าเอ็กซ์ทรูเดตที่มีการขยายตัวมากที่สุดจะมีความต้องการแรงกดแตกต่ำที่สุดด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเอ็กซ์ทรูเดตมีลักษณะที่มีโพรงอากาศขนาดใหญ่จึงมีช่องว่างอยู่ภายในโครงสร้างมาก และเมื่อทำการทดสอบความสัมพันธ์ของค่าอัตราการขยายตัวกับแรงกดแตกพบว่ามีความสัมพันธ์กันในเชิงตรงกันข้ามคือเมื่อเอ็กซ์ทรูเดตมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นแรงที่ต้องการใช้ในการกดให้เอ็กซ์ทรูเดตแตกหักจะมีค่าลดลง และมีค่าสหสัมพันธ์สูงถึง –0.818 ($p<0.01$) ส่วนในกรณีที่เอ็กซ์ทรูเดตที่มีอัตราการขยายตัวต่ำและมีค่าแรงที่ใช้กดแตกสูงกว่าอันเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำจะได้เอ็กซ์ทรูเดตที่ลักษณะโพรงอากาศที่เล็กและมีความสม่ำเสมอดังนั้นความต้องการแรงที่กดแตกจึงมากกว่าด้วย

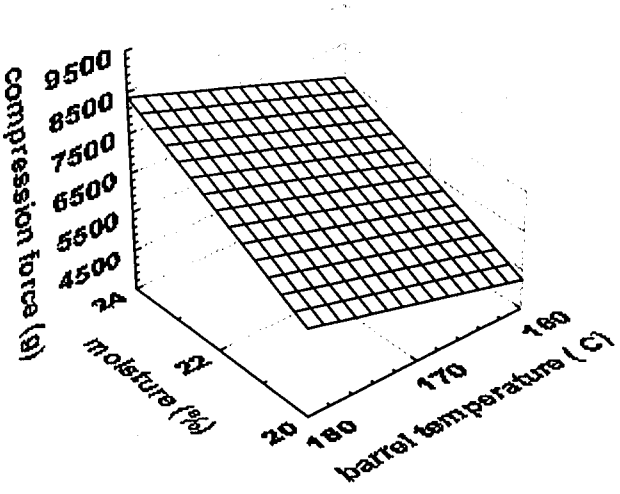

Figure 8 Effects of moisture and barrel temperature on compression force.

ความหนาแน่น (Piece Density)

ความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดตได้รับผลมาจากความเร็วรอบสกรูในเชิงเส้นตรง และความชื้นของวัตถุดิบในเชิงกำลังสอง (Quadratic effect) ($p<0.01$) โดยเมื่อความเร็วรอบสกรูลดลงจะทำให้เอ็กซ์ทรูเดตมีความหนาแน่นมากขึ้น (ตารางที่ 6) เนื่องจากที่ความเร็วรอบสกรูต่ำแรงเฉือนเกิดขึ้นน้อยกว่าทำให้โมเลกุลของสตาร์ชเกิด gelatinization ในระดับต่ำทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนภายในชิ้นของเอ็กซ์ทรูเดตน้อยส่งผลให้ความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดตมีค่ามาก จากผลการแสดงผลแบบ 3 มิติตามรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบสกรูส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของ

ความหนาแน่นค่อนข้างต่ำทั้ง 3 ระดับความชื้นของวัตถุดิบ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Tomas และคณะ (1994) เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่าปริมาณความชื้นของวัตถุดิบส่งผลต่อความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดตได้อย่างชัดเจนกว่าผลจากความเร็วรอบสกรู โดยสภาวะการแปรรูปที่ให้เอ็กซ์ทรูเดตที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุดคือที่ปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วรอบสกรู 350 รอบต่อนาที ซึ่งสภาวะการแปรรูปดังกล่าวมีผลทำให้เกิด gelatinization ของสตาร์ชในระดับที่สูงที่สุดในสภาวะที่ทำการศึกษา อีกทั้งผลร่วมระหว่างความชื้นของวัตถุดิบกับอุณหภูมิของบาเรล ก็ส่งผลต่อความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดตอย่างมีนัยสำคัญ($p<0.01$) ดังตารางที่ 6 และเมื่อพิจารณากราฟ 3 มิติดังรูปที่ 10 จะพบว่าสภาวะที่ให้เอ็กซ์ทรูเดตที่มีความหนาแน่นต่ำคือที่ความชื้นของวัตถุดิบต่ำและอุณหภูมิของบาเรลสูง ซึ่งผลของความหนาแน่นที่ต่ำนี้ก็มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าด้วยอันเนื่องมาจากสภาวะการแปรรูปเดียวกันตามรูปที่ 5 แต่อย่างไรก็ตามผลของความหนาแน่นก็ไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราการขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดต ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดการพองตัวสูงที่สุดที่อุณหภูมิบาเรล 160 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างเกิดการกลายเป็นไอ (flash evaporation) ในปริมาณที่ต่ำกว่า ดังนั้นเมื่อเอ็กซ์ทรูเดตถูกดันผ่านรูเปิดหน้าแปลนออกมาโพรงอากาศภายในโครงสร้างจึงเกิดในลักษณะที่มีขนาดใหญ่กว่า และมีจำนวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการให้อุณหภูมิของบาเรลสูงกว่า ดังนั้นการพองตัวของเอ็กซ์ทรูเดตจึงสูงเนื่องจากโพรงอากาศมีมีขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงกว่าอาจทำให้ความหนืดของโดลดลง จึงทำให้น้ำแทรกกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้างโดได้ทั่วถึงกว่า ดังนั้นเมื่อไอน้ำเกิดการระเหยตัวอย่างรวดเร็วจึงทำให้ได้เอ็กซ์ทรูเดตที่มีลักษณะโพรงอากาศที่เล็กและสม่ำเสมอมากกว่าและยังส่งผลให้เอ็กซ์ทรูเดตมีความหนาแน่นต่ำกว่าด้วย ผลทางด้านความหนาแน่นจากการทดลองในครั้งนี้พบว่ามีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับตัวแปรตามจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ คือ ค่าแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ โดยจะพบว่าเมื่อตัวแปรตามจากเครื่องดังกล่าวมีค่าสูงจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นต่ำ

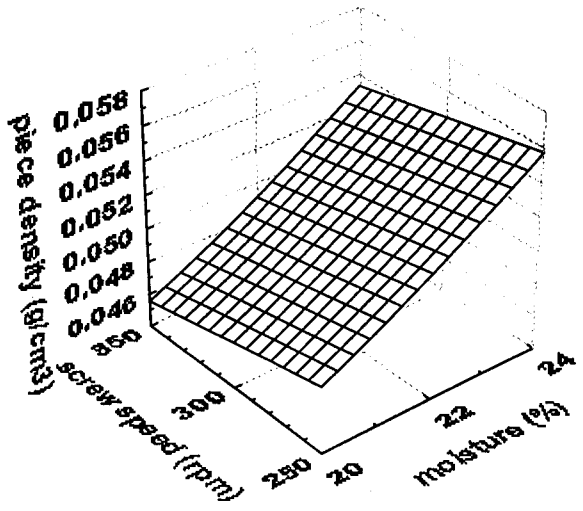

Figure 9 Effects of moisture and screw speed on piece density.

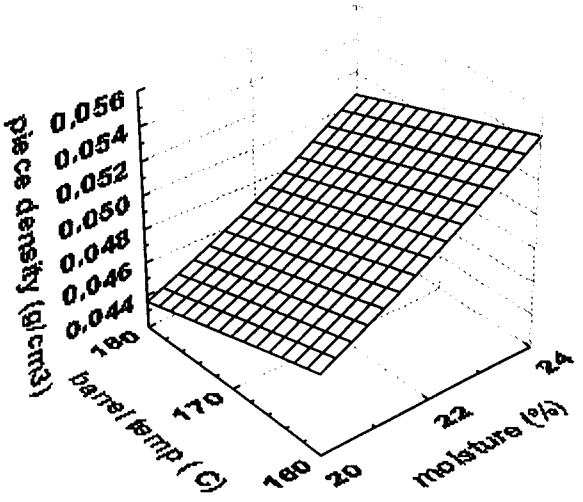

Figure 10 Effects of moisture and barrel temperature on piece density.

บทที่ 4
บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการใช้แป้งข้าวกล้องเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตขนมขบเคี้ยวแบบพองตัวทันทีด้วยการบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น สภาวะการแปรรูปที่ส่งผลต่อการขยายตัวของผลิตภัณฑ์คือ ปริมาณความชื้นของแป้งข้าวกล้อง และอุณหภูมิของบาเรล โดยสภาวะที่ให้ผลิตภัณฑ์มีการขยายตัวดีที่สุดคือ ที่ความชื้น 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบของสกรู 300 รอบต่อนาที และใช้อุณหภูมิของบาเรลที่ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งมีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 3.17 ในขณะที่แรงที่ใช้ในการกดให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกซึ่งหมายถึงว่าถ้าค่าแรงกดแตกสูงจะหมายถึงว่าผลิตภัณฑ์มีความแข็งมาก มีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับค่าการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ โดยในผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจำพวกนี้มีความต้องการให้มีความแข็งน้อยหรือมีความกรอบสูงนั่นเอง จึงมีความต้องการสภาวะในการผลิตเดียวกันกับสภาวะที่ให้ผลิตภัณฑ์มีการขยายตัวที่ดีดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยมีค่าแรงที่ใช้ในการกดให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกคือ 3848.32 กรัม ในส่วนของความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะบ่งบอกถึงความเป็นรูพรุนในโครงสร้างของชิ้นผลิตภัณฑ์ได้รับผลมาจากทั้งความชื้นของวัตถุดิบ อุณหภูมิของบาเรล และความเร็วรอบของสกรู โดยผลิตภัณฑ์มีความต้องการลักษณะที่มีความหนาแน่นต่ำ และสภาวะการผลิตที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุดคือ ที่ความชื้นของวัตถุดิบ 20 เปอร์เซ็นต์ ความเร็วรอบสกรู 350 รอบต่อนาที และใช้อุณหภูมิของบาเรลที่ 170 องศาเซลเซียส โดยให้ผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.0435 กรัมต่อลูกบาก์ศเซ็นติเมตร อีกทั้งความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์สามารถทำนายได้จากค่าตัวแปรตามที่ทราบจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เนื่องจากมีความสัมพันธ์ตรงข้ามกับแรงทอร์ค พลังงานกลจำเพาะ และอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ทั้งนี้การผลิตขนมขบเคี้ยวจากแป้งข้าวกล้องดังกล่าวนับว่ามีประโยชน์ และมีคุณค่าทางอาหารเหมาะต่อผู้บริโภคช่วยแก้ปัญหาทางทุพโภชนาการ และใช้แทนขนมขบเคี้ยวทั่วไปที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ นอกจากนี้เป็นการใช้เทคโนโลยีให้เป็นประโยชน์ต่อการแปรรูปในอุตสาหกรรมอาหาร และช่วยเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับข้าวไทยได้อีกด้วย โดยสภาวะที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้จะช่วยในการพัฒนากระบวนการแปรรูปของผลิตภัณฑ์ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้นต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ในการที่จะสรุปว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตขนมขบเคี้ยวเป็นอย่างไรนั้น เราจำเป็นที่จะต้องทราบถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ถือว่าดีที่สุด ซึ่งอาจหาได้จากการทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสกับผู้บริโภค แล้วกำหนดเป็นค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผู้บริโภคมีความชอบมากที่สุด เพราะในบางครั้งผลิตภัณฑ์ที่มีการขยายตัวสูงที่สุดหรือต้องการแรงในการกดให้เกิดการแตกหักต่ำที่สุดอาจไม่ใช่ลักษณะที่ผู้บริโภคให้การยอมรับมากที่สุดก็ได้ ดังนั้นในการทดลองที่ผ่านมาจึงจัดเป็นการศึกษาแนวทางในการดำเนินการแปรรูปซึ่งทำให้เราทราบถึงผลของปัจจัยการผลิตด้านต่างๆ และแนวโน้มของคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้เท่านั้น ยังไม่สามารถบอกถึงสภาวะการผลิตที่เหมาะสมที่สุดได้ จึงอาจต้องมีการทำการศึกษาทางด้านประสาทสัมผัสต่อไป อีกทั้งควรมีการศึกษาเพิ่มเติมทางด้านอายุการเก็บรักษา และภาชนะที่มีความเหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ให้ได้นานและรักษาคุณภาพไว้ได้ดี เพราะผลิตภัณฑ์จากแป้งข้าวกล้องนี้จะมีปริมาณไขมันสูงกว่าผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวโดยทั่วไปเล็กน้อย

บรรณานุกรม

กมลวรรณ แจ้งชัด. (2541). การแปรรูปอาหารโดยวิธีเอ็กซทรูชั่น. อุตสาหกรรมเกษตร. ปีที่ 9. ฉบับที่ 2. หน้า 4-8.

ข่าวธุรกิจในประเทศ. (2542). จาร์พา. ปีที่ 6. ฉบับที่ 46. หน้า 3.

จิราภา เมืองคล้าย. (2539). การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเช้าชนิดแผ่นจากแป้งข้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประชา บุญญสิริกูล, จุฬาลักษณ์ จารุนุช และ มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์. (2539). การผลิตอาหารขบเคี้ยวจากถั่วเขียวโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่. อาหาร. ปีที่ 26. ฉบับที่ 1. หน้า 14-33.

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และ ประชา บุญญสิริกูล. 2538. การศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมของข้าวเจ้าและข้าวเหนียวในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่. รายงานผลการวิจัย สำนักงานคณะกรรมการแห่งชาติ.

สายสนม ประดิษฐดวง. 2541. อาหารป้องกันโรค:ข้าวกล้องและรำข้าว. อุตสาหกรรมเกษตร. ปีที่ 9. ฉบับที่ 2. หน้า 38-41.

AOAC. (1997). *Official Methods of Analysis*. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.

Bhattacharya, M., and Hanna, M.A. (1988). Kinetic of starch gelatinization during extrusion cooking. J. Food Sci. 52(3) : 764-766.

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.

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.

Colonna, P., Doublier, J.L., Meloion, J.P., Monredon, F., and Mercier, C. (1984). Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. I. Physical and macromolecular modifications. Cereal Chem. 61 : 538-543.

Davidson, V.J., Paton, D., Diosady, L.L., and Rubin, L.J. (1984). A model for mechanical degradation of wheat starch in a single screw extruder. J. Food Sci. 49 : 1154.

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.

Grenus, K.M., Hsieh, F., and Huff, H.E. (1993). Extrusion and extrudate properties of rice flour. J. Food Eng. 18 : 229-245.

Gomez, M.H., and Agulera, J.M. (1984). A physicochemical model for extrusion of corn starch. J. Food Sci. 49 : 40-43.

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.

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.

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.

Juliano, B.O. (1971). A amplified assay for milled-rice amylose. Cereal Sci. Today. 16 : 334-340.

Kumagai, H., Lee, B.H. and Yano, T. (1987). Flour treatment to improve the quality of extrusion cooked rice flour products. Agric. Biol Chem. 51(8) : 2067-2071.

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.

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, Inc. New York.

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.

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.

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.

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.

ประวัติผู้วิจัย

นางสุนันทา ทองทา

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

นางสุนันทา ทองทาได้มีผลงานทางวิชาการดังต่อไปนี้

1. สุนันทา ทองทา และ วีระ สุวรรณศร. 2543. ผลของตัวแปรของกระบวนการอัดพองที่มีต่อผลิตภัณฑ์พองตัวโดยใช้เครื่องอัดพองแบบสกรูเดี่ยว. รายงานผลการวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
2. Wiriyapirom,S., Wei, L.S. and Padua, G.W. 1996. Effect of soy protein isolates on physical characteristics of extruded expanded half-products. A poster presentation at Annual IFT Meeting. June 26,1996. New Orleans.
3. Wiriyapirom,S., Padua, G.W. and Wei, L.S. 1996. Effect of extrusion parameters on physical properties of half-products fortified with soy protein. An oral presentation at Annual IFT Meeting. June 15,1997.

สถานที่ติดต่อ: สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ (044) 22-4265 โทรสาร (044) 22-4150

นายมาโนชญ์ สุธีรวัฒนานนท์

นายมาโนชญ์ สุธีรวัฒนานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 7 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2508 จบการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิตด้านวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมจากคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล เมื่อปี พ.ศ. 2532 แล้วเข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยผู้จัดการโรงงานของบริษัท สหฟาร์ม จำกัดเป็นเวลาหนึ่งปี หลังจากนั้นจึงเดินทางไปประเทศสหรัฐอเมริกาเพื่อศึกษาปริญญาตรีที่สองด้านวิทยาศาสตร์อาหาร ณ Oregon State University จบการศึกษาปี พ.ศ. 2534 และออกไปทำงานกับบริษัทผู้ผลิตอาหารแช่แข็งแห่งหนึ่งในรัฐ Oregon เป็นเวลาหนึ่งปี แล้วเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทและเอกในสาขาวิทยาศาสตร์อาหาร ณ University of Minnesota สำเร็จการศึกษาในปี

2541 แล้วทำงานเป็น Post-doc research associate ที่ University of Minnesota ต่อเป็นเวลาหนึ่งปี เดินทางกลับประเทศไทย และเข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์สาขาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จนถึงปัจจุบัน งานวิจัยที่กำลังทำการศึกษาอยู่ขณะนี้มี 4 โครงการดังนี้ คือ

1. คุณลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างภายในของพาสต้าข้าวเจ้าที่ได้จากการอัดพอง ได้รับเงินสนับสนุนงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นจำนวนเงิน 50,000 บาท โครงการใกล้สิ้นสุดและอยู่ในระหว่างดำเนินการขอจดสิทธิบัตร
2. ผลกระทบของสภาวะการทำเอ็กทรูชั่นต่อคุณสมบัติของเนื้อสัมผัสและโครงสร้างภายในของผลิตภัณฑ์ข้าวเจ้าที่พองตัวและไม่พองตัว ได้รับเงินสนับสนุนจากสภาวิจัยแห่งชาติผ่านมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นเงิน 182,390 บาท โครงการอยู่ในขั้นตอนการศึกษาโครงสร้างภายในและ Sorption isotherms ของผลิตภัณฑ์
3. การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติ องค์ประกอบทางเคมี และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเนื้อไก่พื้นเมือง ไก่ลูกผสมพื้นเมือง และไก่กระทง ทุนสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยเป็นจำนวนเงิน 890,000 บาท ขณะนี้อยู่ในระหว่างการดำเนินงานช่วง 6 เดือนสุดท้าย
4. คุณภาพและปริมาณของ CLA (conjugated linoleic acids) ในน้ำนมหลังผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบพาสเจอร์ไรด์เซชั่นและแบบ UHT ทุนทบวงมหาวิทยาลัยโดยผ่านมหาวิทยาลัยเป็นเงินประมาณ 900,000 บาท โครงการนี้อยู่ในระหว่างเริ่มดำเนินการ

ความสนใจพิเศษด้านงานวิจัยจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างภายในของอาหารที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของเนยแข็งและผลิตภัณฑ์นม และคุณภาพของน้ำนมดิบทางด้านกายภาพ ความปลอดภัยจากสารตกค้าง และการยืดอายุน้ำนมดิบโดยใช้ระบบป้องกันตามธรรมชาติ