

สภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันสำหรับอาหารขบเคี้ยว
จากข้าวโพดเสริมกากถั่วเหลืองโดยฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้าน

OPTIMAL EXTRUSION VARIABLES FOR THE PRODUCTION OF CORN
SNACK ENRICHED WITH SOYBEAN RESIDUE USING MULTI-RESPONSE
DESIRABLE FUNCTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-270-071

สภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันสำหรับอาหารขบเคี้ยว
จากข้าวโพดเสริมกากถั่วเหลืองโดยฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้าน

OPTIMAL EXTRUSION VARIABLES FOR THE PRODUCTION OF CORN
SNACK ENRICHED WITH SOYBEAN RESIDUE USING MULTI-RESPONSE
DESIRABLE FUNCTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-270-071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTIMAL EXTRUSION VARIABLES FOR THE PRODUCTION OF CORN
SNACK ENRICHED WITH SOYBEAN RESIDUE USING MULTI-RESPONSE
DESIRABLE FUNCTION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-M-270-071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันสำหรับ
อาหารขบเคี้ยวจากข้าวโพดเสริมกากถั่วเหลืองโดยฟังก์ชันความพึง
พอใจหลายด้าน

นักศึกษา

นายกวัชร อุ่นแสง

รหัสประจำตัว

59601240

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมอาหาร

พ.ศ.

2562

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร. มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์

บทคัดย่อ

กากถั่วเหลืองเป็นของเหลือทิ้งจากระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองหรือเต้าหู้ กากถั่วเหลือง
อุดมไปด้วยโปรตีนและใยอาหาร จึงสามารถนำกากถั่วเหลืองมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่
มีคุณค่าทางโภชนาการและเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพเพิ่มขึ้นได้ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษา
การผลิตอาหารขบเคี้ยวที่เพิ่มคุณค่าโภชนาการจากกากถั่วเหลืองด้วยกรรมวิธีการผลิตแบบเอ็กซ์ทรู
ชัน และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโดยวิเคราะห์จากฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้าน
ข้าวโพดบดและกากถั่วเหลืองถูกนำมาผสมกันที่อัตราส่วนต่าง ๆ และผ่านการผลิตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรู
เดอร์แบบสกรูเดี่ยว การออกแบบการทดลองใช้วิธีการแบบ Box-Behnken และใช้วิธีการหาพื้นผิว
ตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) ในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรการผลิตใน
กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ประกอบด้วย ปริมาณกากถั่วเหลือง (20-40%) ความชื้นวัตถุดิบ (14-18%)
และความเร็วรอบสกรู (370-430 rpm) ปริมาณความชื้น ค่าแอกติวิตีของน้ำ อัตราการพอง ความ
หนาแน่น ความต่างสีรวม ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ ความแข็ง
และความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทถูกนำมาวิเคราะห์ ผลที่ได้พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการ
ผลิตเพื่อให้ได้ความพึงพอใจหลายด้านสูงสุด เมื่อใช้ปริมาณกากถั่วเหลือง 27% ความชื้นวัตถุดิบ18%
และความเร็วรอบสกรู 428 rpm และเมื่อนำผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่อยู่ในช่วงการผลิตที่สภาวะที่
เหมาะสมจำนวน 3 ตัวอย่างไปทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส กับผู้ทดสอบจำนวน 10 คน
พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบรวมจากตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดทที่ผลิตจากสภาวะที่มีความเร็วรอบ
400 rpm ปริมาณกากถั่วเหลือง 20% และความชื้น 18% เป็นลำดับสูงสุดเท่ากับ 7 คะแนน

Thesis	Optimal extrusion variables for the production of corn snack enriched with soybean residue using multi-response desirable function
Student	Mr. Konlawat Unsaeng
Student ID	59601240
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Maradee Phongpipatpong

ABSTRACT

Soybean residue is a by-product of soya milk or tofu process. It consists of rich protein and fiber. In order to develop more nutritious and healthier snack, soybean residue can be added to the feed materials. This research aims to study extrusion process of corn-based snack enriched with protein from soybean residue and to optimize extrusion variables by multi-response desirability function. The mixture of corn grit and soybean residue flour was extruded by single-screw extruder. Experiment was conducted based on Box-Behnken design and Response surface methodology (RSM) was used to assess the effects on extrusion variables, including soybean residue content (20-40%) and feed moisture (14-18%) and screw speed (370-430 rpm). Multi-response desirability function was carried out to determine the optimum extrusion condition. Moisture content (MC), Water activity (a_w), Expansion ratio (ER), Density (D), Total color difference (ΔE), Water absorption index (WAI), Water solubility index (WSI) Hardness (H) and Crispness (C) were evaluated. The result indicated that the most desirability of product characteristics occurred at 27% soybean residue content with 18% of feed moisture and screw speed 428 rpm. Three extrudate samples at optimum condition were then selected and investigated for sensory evaluation with 10 test panels. It was found that the sample from 400 rpm of screw speed, 20% of soybean residue with 18% of feed moisture got the highest score (7) of sensory evaluations.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะไม่สำเร็จไม่ได้ หากขาดความช่วยเหลือจากอาจารย์ทุกท่านในภาควิชา วิศวกรรมอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ ที่คอยให้ คำปรึกษาอย่างดีมาโดยตลอด ไม่ว่าจะเป็นเรื่องการศึกษา การทำงาน และการใช้ชีวิต ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิศวกรรมอาหาร ที่คอยช่วยเหลือ ดูแลเรื่องอุปสรรคในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ คำปรึกษา และการสนับสนุนมาโดยตลอด

กลวัชร อุ๋นแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความสำคัญ และส่วนประกอบของถั่วเหลือง และกากถั่วเหลือง.....	3
2.1.1 ความสำคัญของพืชตระกูลถั่ว.....	3
2.1.2 ถั่วเหลือง.....	4
2.1.3 กากถั่วเหลือง หรือโอคารา.....	7
2.2 ขนหมขบเคี้ยว.....	7
2.2.1 ประเภทของอาหารขบเคี้ยว.....	7
2.2.2 ชนิดของอาหารขบเคี้ยว.....	8
2.3 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน.....	9
2.3.1 นิยามของส่วนประกอบต่างๆในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์.....	10
2.3.2 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์.....	11
2.3.3 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในกระบวนการผลิตอาหาร.....	12
2.3.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์.....	13
2.3.5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ.....	14
2.3.6 ประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับอาหาร.....	14
2.3.7 การเปลี่ยนแปลงของสารอาหารในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน.....	14
2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE).....	18
2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	18
2.4.2 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken (Box-Behnken Design, BBD).....	19
2.4.3 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM).	20
2.5 การหาสถานะที่เหมาะสม (Optimization).....	20

	หน้า
2.5.1 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function).....	20
2.5.2 ขั้นตอนการคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีการใช้ฟังก์ชันความ พึงพอใจหลายด้าน.....	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปกากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์อาหาร.....	22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันในอาหาร.....	23
บทที่ 3 อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	28
3.1 วัตถุดิบ เครื่องมือและอุปกรณ์.....	28
3.1.1 วัตถุดิบ.....	28
3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	28
3.2 การเตรียมวัตถุดิบ.....	28
3.3 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน.....	29
3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี และทางกายภาพของวัตถุดิบ.....	29
3.4.1 ปริมาณความชื้น.....	29
3.4.2 ปริมาณโปรตีน.....	29
3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเอ็กซ์ทรูเดท.....	30
3.5.1 ปริมาณความชื้น.....	30
3.5.2 ค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity, A_w).....	30
3.5.3 อัตราการพองตัว (Expansion ratio, ER).....	31
3.5.4 ความหนาแน่น (Density).....	31
3.5.5 ค่าความต่างสี (Total color different, ΔE).....	31
3.5.6 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption index, WAI) และความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility index, WSI)....	32
3.5.7 ความแข็ง และความกรอบ (Hardness and Crispness).....	32
3.5.8 ปริมาณโปรตีน (Crude protein).....	32
3.6 การวางแผนการทดลอง.....	32
3.7 การวิเคราะห์ทางสถิติและการหาสภาวะที่เหมาะสม.....	33
3.8 การทดสอบทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	36
4.1 คุณสมบัติของวัตถุดิบ.....	36
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.2.1 ปริมาณความชื้น.....	40
4.2.2 ค่าแอกติวิตีของน้ำ.....	43
4.2.3 อัตราการพองตัว.....	46
4.2.4 ความหนาแน่น.....	49

	หน้า
4.2.5 ค่าความต่างสีรวม.....	52
4.2.6 ความสามารถในการดูดซับน้ำ.....	55
4.2.7 ความสามารถในการละลายน้ำ.....	58
4.2.8 ความแข็ง.....	61
4.2.9 ความกรอบ.....	64
4.3 สภาวะที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคตจากข้าวโพดเสริมด้วยกากถั่วเหลือง	67
4.4 ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส.....	68
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	70
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
บรรณานุกรม.....	71
ภาคผนวก ก.....	75
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	103

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดถั่ว (g/100 g).....	4
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดถั่วเหลือง และกากถั่วเหลือง (g/100 g).....	6
2.3 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ที่ 3 ปัจจัย 3 ระดับ.....	19
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	33
4.1 การออกแบบการทดลอง และผลการทดลอง.....	38
4.2 ผลวิเคราะห์ทางสถิติ.....	39
4.3 เกณฑ์ในการเลือกคุณสมบัติของเอ็กซ์ทราคต.....	67
4.4 ตัวอย่างเอ็กซ์ทราคตจากสภาวะการผลิตที่คัดเลือกมาทดสอบ.....	68
4.5 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสต่อผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคตจากผู้ชิมจำนวน 10 คน.....	69



สารบัญรูปร่าง

รูปที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของเมล็ดถั่ว.....	4
2.2 กากถั่วเหลือง หรือโอคารา.....	5
2.3 ส่วนประกอบของสกรู.....	10
2.4 สกรูคูรูปร่างต่าง ๆ.....	13
3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ.....	28
3.2 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน.....	29
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	35
4.1 เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ.....	36
4.2 การเปรียบเทียบอัตราการพองที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.1.....	40
4.3 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทรู เดท.....	42
4.4 การเปรียบเทียบค่าแอสทิวิตีของน้ำที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.2.....	43
4.5 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อค่าแอสทิวิตีของน้ำของเอ็กซ์ทรู เดท.....	45
4.6 การเปรียบเทียบอัตราการพองที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.3.....	46
4.7 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่ออัตราการพองของเอ็กซ์ทรูเดท.....	48
4.8 การเปรียบเทียบความหนาแน่นที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.4.....	49
4.9 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดท.....	51
4.10 การเปรียบเทียบความต่างสีรวมที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.5.....	52
4.11 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความต่างสีของเอ็กซ์ทรูเดท.....	54
4.12 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับน้ำที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนาย ด้วยสมการ 4.6.....	55
4.13 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) ของเอ็กซ์ทรูเดท.....	57
4.14 การเปรียบเทียบความสามารถในการละลายน้ำที่ได้จากการทดลอง และจากการ ทำนายด้วยสมการ 4.7.....	58
4.15 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) ของเอ็กซ์ทรูเดท.....	60

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

	หน้า
4.16 การเปรียบเทียบความแข็งที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.8.....	61
4.17 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดท.....	63
4.18 การเปรียบเทียบความกรอบที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.9.....	64
4.19 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความกรอบของเอ็กซ์ทรูเดท.....	66
4.20 ค่าสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่ศึกษาจากการหาพื้นผิวดตอบสนองด้วยทางตัวเลข.....	68



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กากถั่วเหลืองหรือโอคารา เป็นของเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองหรือเต้าหู้ โดยทั่วไปเมล็ดถั่วเหลืองแห้ง 1 kg ทำให้เกิดกากถั่วเหลืองประมาณ 2.5 kg และความชื้น 80% (Li et al., 2012) กากถั่วเหลืองมักมีมูลค่าต่ำและถูกนำไปทิ้งหรือใช้เป็นอาหารสัตว์ทั้งที่กากถั่วเหลืองยังคงอุดมไปด้วยสารอาหารต่าง ๆ เช่น โปรตีน 15.2-33.4% โยอาหาร 42.4-58.1% ไขมัน 8.3-10.9% คาร์โบไฮเดรต 3.5-5.3% และเถ้า 3.0-4.5% (Lu et al., 2013) ดังนั้นควรมีการนำกากถั่วเหลืองกลับมาใช้ผลิตเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ อย่างไรก็ตามถั่วเหลืองมีลักษณะกลิ่นเฉพาะรวมทั้งสารยับยั้งเอนไซม์ที่มีในกากถั่วเหลืองทำให้เป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้ผลิตเป็นอาหาร มีการศึกษาเพื่อปรับสภาพกากถั่วเหลืองด้วยความร้อนก่อนนำมาใช้เป็นส่วนผสมวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์อาหารชนิดต่าง ๆ เพื่อเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Vong and Liu, 2016) เช่น เส้นบะหมี่ และข้าว (Lu et al., 2013) เส้นก๋วยเตี๋ยว (Kang et al., 2018) และเค้ก (กนกอร, 2555) เป็นต้น

การผลิตอาหารด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นเทคโนโลยีที่ประหยัด และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตอาหาร ในระหว่างการผลิต ส่วนผสมของวัตถุดิบถูกผสมเข้าด้วยกัน เกิดการทำให้สุกและขึ้นรูป ภายในระยะเวลาสั้นๆ ที่อุณหภูมิสูง ข้อดีของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันคือต้นทุนผลิตต่ำ ผลิตได้ปริมาณสูง เป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ใช้ระยะเวลาสั้น ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปแบบเฉพาะและหลากหลาย (Jing and Chi, 2013) ในการผลิตขนมขบเคี้ยวด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมักใช้วัตถุดิบจากแป้ง เช่น ข้าวโพด ข้าว ข้าวสาลี และมันฝรั่ง (Maskan and Altan, 2012 ; Promsakha na Sakon Nakhon et al., 2018) ซึ่งเป็นกลุ่มคาร์โบไฮเดรตเป็นหลัก การเติมสารอาหารจากแหล่งธัญพืช ผักหรือผลไม้ สามารถช่วยเพิ่มคุณค่าทางอาหารให้กับผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นอาหารขนมขบเคี้ยวให้สูงขึ้นได้ มีรายงานวิจัยที่พยายามเพิ่มผักและผลไม้ที่เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตลงไป ขนมขบเคี้ยวจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เช่น ของเหลือจากกระบวนการผลิตเบียร์ (Stojceska et al., 2008) โยอาหารจากเปลือกมะม่วง (Korkerd et al., 2016) กากผลไม้ (Yagci and Gogus, 2009) เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าแป้ง โปรตีน และเซลลูโลสเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Jing and Chi, 2013 ; Promsakha na Sakon Nakhon et al., 2018) รวมทั้งกากถั่วเหลืองได้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโดยการทำลายตัวยับยั้งเอนไซม์และสารก่อภูมิแพ้ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มปริมาณโยอาหารละลายน้ำด้วยการทำลายพันธะกลูโคซิติก (Maskan and Altan, 2012 ; Jing and Chi, 2013) เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย

การหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตด้วยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) และการหาค่าตอบด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้าน (multi-response desirability) ถูกนำมาใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในกระบวนการผลิตและวิเคราะห์ค่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต วิธีการหาพื้นที่ผิวตอบสนองยังเป็นวิธีที่ช่วยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทั้งในรูปแบบใหม่และแบบที่มีอยู่แล้ว นอกจากนี้การหาค่าตอบด้วยฟังก์ชันความพึงพอใจใน

หลายด้าน เป็นอีกหนึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมมากในการนำมาใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิต อาศัยการพิจารณาแต่ละฟังก์ชันของความพึงพอใจซึ่งกำหนดไว้เป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจในแต่ละด้าน ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปความพึงพอใจรวมทุกด้านทั้งหมด (Overall desirability) ให้ได้เป็นค่าสูงสุด จึงหมายถึงความพึงพอใจที่ได้จากการรวมเกณฑ์ตัดสินทั้งหมดเข้าด้วยกันได้มากที่สุดด้วย (สันติ, 2552 ; Natabirwa et al., 2018) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงเพื่อศึกษาการผลิตอาหารขบเคี้ยวจากข้าวโพดเสริมด้วยกากถั่วเหลืองด้วยกรรมวิธีการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน และหาสภาวะที่เหมาะสมการผลิตด้วยวิธีวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้าน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาการผลิตอาหารขบเคี้ยวที่เพิ่มคุณค่าโภชนาการจากกากถั่วเหลืองด้วยกรรมวิธีการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน
- 1.2.2 ศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน
- 1.2.3 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตโดยวิเคราะห์จากฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้าน (multi-response desirability function)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.5.1 กากถั่วเหลืองที่ใช้เป็นของเหลือทิ้งจากการผลิตนมถั่วเหลือง
- 1.5.2 เครื่องเอ็กซ์ทรูชันที่ใช้เป็นแบบสกรูเดี่ยวของภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังปัจจัยที่ศึกษา ประกอบด้วย อัตราส่วนระหว่างแป้งกากถั่วเหลืองกับแป้งข้าวโพดค่าความชื้นของวัตถุดิบเริ่มต้นและความเร็วรอบสกรู
- 1.5.3 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าแอสคิวติวิตีของน้ำ อัตราการพองตัว ค่าความหนาแน่น ค่าความต่างสีรวม ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ ความแข็ง ความกรอบ และปริมาณโปรตีน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 กระบวนการผลิตขนมขบเคี้ยวด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน
- 1.4.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันที่มีผลต่อเอ็กซ์ทรูเดที่ได้
- 1.4.3 แนวทาง และต้นแบบการผลิตขนมขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพแบบเอ็กซ์ทรูชัน

บทที่ 2

ทฤษฎี และความสำคัญ

ในการวิจัยครั้งนี้ เรื่องสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันสำหรับอาหารขบเคี้ยวเสริมคุณค่าโภชนาการจากกากถั่วเหลืองด้วยวิธีการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้านผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูล ดังนี้

- 1) ความสำคัญ และส่วนประกอบของถั่วเหลือง และกากถั่วเหลือง
- 2) ขนมอบเคี้ยว
- 3) กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน
- 4) การออกแบบการทดลอง
- 5) การหาสภาวะที่เหมาะสม
- 6) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปกากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์อาหาร
- 7) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันสำหรับอาหาร

2.1 ความสำคัญ และส่วนประกอบของถั่วเหลือง และกากถั่วเหลือง

2.1.1 ความสำคัญของพืชตระกูลถั่ว

พืชตระกูลถั่วถือเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง แสดงในตารางที่ 2.1 โดยเฉพาะ “ถั่วเมล็ดแห้ง” หรือเมล็ดแก่ของถั่วที่อยู่ภายในฝักตากแห้ง เมล็ดถั่วเหล่านี้มีสารสำคัญหลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งโปรตีนซึ่งคุณภาพใกล้เคียงกับโปรตีนจากเนื้อสัตว์ อีกทั้งยังประกอบด้วยกรดไขมันไขมันไม่อิ่มตัว และใยอาหารซึ่งเป็นประโยชน์ต่อร่างกาย (กนกอร, 2555)

พืชตระกูลถั่วนั้นมีประมาณ 600 สกุล และ 13,000 พันธุ์ แต่ละชนิดที่มีการปลูกจะขึ้นอยู่กับความต้องการ และสภาพภูมิประเทศของประเทศนั้น ๆ แต่ในประเทศไทยมีถั่ว 3 ชนิดหลักๆที่เป็นที่นิยม ได้แก่ ถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วลิสง ถั่วเหล่านี้มักนิยมนำเมล็ดแก่มารับประทาน (grain legume) และยังมีถั่วชนิดอื่น ๆ ที่เหมาะที่จะนำไปทานกับผัก เช่น ถั่วลันเตา และถั่วฝักยาว (กนกอร, 2555)

เนื่องจากเมล็ดถั่วถือเป็นแหล่งสะสมอาหารของพืชตระกูลถั่ว ดังนั้นเมล็ดถั่วจึงมีคุณค่าทางอาหารสูง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น องค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดถั่วก็ขึ้นอยู่กับชนิด และสายพันธุ์ของถั่วด้วย สามารถแบ่งชนิดของเมล็ดถั่วตามองค์ประกอบทางเคมีได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มปกติ กลุ่มที่มีโปรตีนสูง และกลุ่มที่มีไขมันสูง

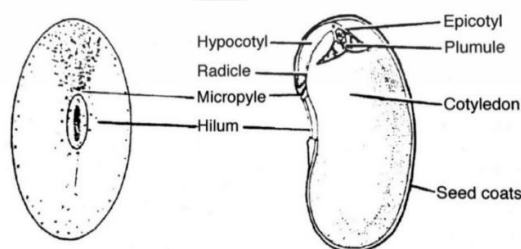
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดถั่ว (g/100 g)

เมล็ดถั่ว	แคลอรี	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	แร่ธาตุ	คาร์โบไฮเดรต
ถั่วเหลือง (<i>Glycine max</i>)	335.8	8	38.0	18.0	4.7	31.3
ถั่วลิสง (<i>Arachis hypogaea</i>)	343.5	5	25.6	43.4	2.5	23.4
ถั่วเขียว (<i>Phaseolus aureus</i>)	340	11	23.9	1.3	3.4	60.4
ถั่ว Pigeon (<i>Cajanus cajan</i>)	343	11	20.9	1.7	3.5	62.9
ถั่ว Chick (<i>Cicer arietinum</i>)	358	11	20.1	4.5	2.9	61.5
ถั่ว Lentil (<i>Lens esculenta</i>)	346	11	24.2	1.8	2.2	60.5
ถั่ว Kidney (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	341	11	22.1	1.7	3.8	61.4
ถั่ว Broad (<i>Vicia faba</i>)	343	11	23.4	2.8	3.4	60.4
ถั่ว Cowpea (<i>Vigna unguiculata</i>)	342	11	23.4	1.8	4.3	60.3

ที่มา : กนกอร(2555)

2.1.2 ถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีการปลูกใช้เป็นอาหารในประเทศจีนมายาวนานมาก มีการค้นพบถั่วเหลืองเมื่อมากกว่า 5,000 ปีแล้ว เมื่อมีการเปิดเส้นทางการค้าทางทะเล และทางบก ถั่วเหลืองจึงแพร่เข้าสู่คาบสมุทรเกาหลี และญี่ปุ่น เมื่อประมาณ 1,700-2,300 ปีที่ผ่านมา ในญี่ปุ่นพบว่ามีคนนำถั่วเหลืองมาใช้เป็นอาหารคน และอาหารสัตว์ในปี พ.ศ. 2347 (กนกอร, 2555) และในที่สุดถั่วเหลืองก็แพร่เข้าสู่ยุโรปโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดน Engelbert Kaempfer ผู้ซึ่งตั้งชื่อถั่วเหลืองทางวิทยาศาสตร์ว่า *Glycine max* (Glycine แปลว่า หวาน และ max หมายถึง ปมใหญ่ๆที่ต้นถั่ว) โดยทั่วไปเมล็ดถั่วเหลืองจะประกอบด้วยเปลือก (Hull) 8% ลำต้นใบเลี้ยง (Hypocotyl) 2% เนื้อถั่ว (Cotyledons) 90% (Liu, 1999) ส่วนประกอบของเมล็ดถั่วเหลืองแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเมล็ดถั่ว

ที่มา : Liu, 1999

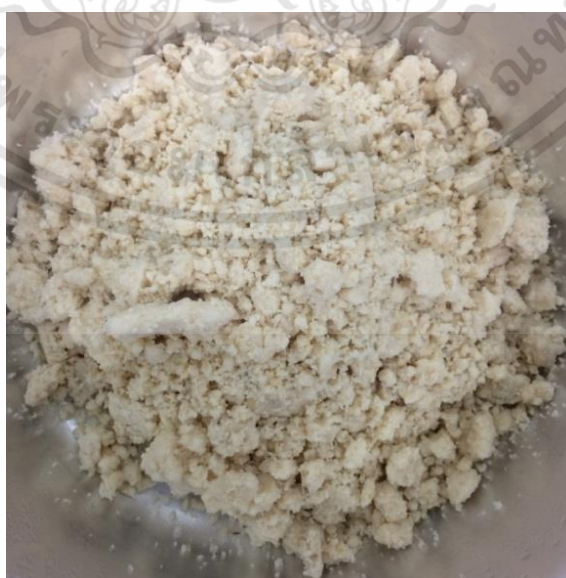
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี ทำให้ปัจจุบันสหรัฐอเมริกากลายเป็นผู้นำด้านการผลิตถั่วเหลือง พบว่าระหว่างปี ค.ศ. 1992-2000 สหรัฐอเมริกาสามารถถั่วเหลืองได้มากถึง 78 ล้านเมตริกตัน หรือเท่ากับผลผลิตครึ่งหนึ่งของปริมาณผลผลิตทั่วโลก นอกจากนี้ในประเทศบราซิล จีน และอาร์เจนตินา ก็มีการผลิตถั่วเหลืองจำนวนมากเช่นกัน (บริษัท เต็ดตรา แพ้ค (ประเทศไทย) จำกัด, 2557)

ถั่วเหลืองเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของโลก และประเทศไทย เนื่องจากเมล็ดถั่วเหลืองประกอบไปด้วยคุณค่าทางอาหารที่หลากหลาย และเป็นประโยชน์ต่อร่างกาย แสดงในตารางที่ 2.4 สถานะของถั่วเหลืองปัจจุบันในประเทศไทยยังถือว่าขาดความมั่นคง และยั่งยืน (พ.ศ. 2545-2556) ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2552-2556 ประเทศไทยสามารถผลิตถั่วเหลืองได้เฉลี่ย 265 kg/ไร่ แต่ด้วยพื้นที่เพาะปลูกที่ลดลง จึงทำให้ผลผลิตมีแนวโน้มลดลงไปด้วย พบว่าในปี 2556 มีการนำเข้าถั่วเหลืองกว่า 90% ของปริมาณถั่วเหลืองที่ต้องการใช้ทั้งหมด ด้านการนำไปใช้ประโยชน์ ประเทศไทยมีการใช้ถั่วเหลืองทั้งในระดับครัวเรือน และระดับอุตสาหกรรมซึ่งต้องใช้ถั่วเหลืองปีละประมาณ 2.33 ล้านตัน (ไม่รวมการนำเข้าจากถั่วเหลือง) เช่น อุตสาหกรรมสกัดน้ำมัน (81.23%) อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ (14.81%) และอุตสาหกรรมอาหารมนุษย์ (3.95%) (เกรียงศักดิ์, 2559) กากถั่วเหลืองที่ได้จากอุตสาหกรรมดังกล่าวยังสามารถนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ได้อีกด้วย เพราะยังคงมีโปรตีนคงเหลืออยู่ในกากถั่วเหลือง

2.1.3 กากถั่วเหลือง หรือโอคารา

ในกระบวนการผลิตน้ำนมถั่วเหลือง (soya milk) และเต้าหู้ นั้นจะได้ของเหลือจากการผลิตคือกากถั่วเหลือง หรือโอคารา โดยถั่วเหลืองแห้ง 1 kg ให้โอคาราที่มีความชื้นมากกว่า 80 g/100 g ปริมาณ 2.5 kg โดยประมาณ (Li et al., 2012) กากถั่วเหลืองมีลักษณะคล้ายขี้เลื่อยเปียกสีขาว หรือขาวอมเหลือง ไม่ละลายน้ำ แสดงในรูปที่ 2.2 มีความชื้นสูงถึง 70-80% ง่ายต่อการเน่าเสีย แต่เนื่องจากกากถั่วเหลืองยังคงเต็มไปด้วยสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายอีกมากมาย แสดงในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กากถั่วเหลือง หรือโอคารา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการผลิตเต้าหู้ พบว่าโปรตีน และน้ำมันส่วนใหญ่อยู่ในเต้าหู้ ในขณะที่โยอาหารทั้งหมดพบในกากถั่วเหลือง ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้อย่างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) และโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) ละลายอยู่ในเวย์ (whey) ที่ได้จากการผลิตเต้าหู้ กากถั่วเหลืองคิดเป็น 34% ของถั่วเหลืองแห้ง และโปรตีนในกากถั่วเหลืองคิดเป็น 23% ของถั่วเหลือง น้ำมันในกากถั่วเหลืองคิดเป็น 16% ของถั่วเหลืองโดยเฉลี่ย

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดถั่วเหลือง และกากถั่วเหลือง (g/100 g)

สารอาหาร	ถั่วเหลือง	กากถั่วเหลือง
ความชื้น	11.1	70-80
โปรตีน	34.0	15.2-33.4
ไขมัน	18.7	8.3-10.9
คาร์โบไฮเดรต	26.7	3.8-5.3
โยอาหาร	4.7	42.4-58.1
เถ้า	4.8	3.0-4.5
แร่ธาตุ (mg/100 g)		
แคลเซียม	245.0	260-428
เหล็ก	4.8	0.6-11
วิตามิน (mg/100 g)		
ไทอามิน	0.7	0.48-0.59
ไรโบฟลาวิน	0.2	0.03-0.04
ไนอาซีน	1.5	0.82-1.04

ที่มา : กนกอร (2555) ; Vong and Liu (2016)

กากถั่วเหลืองไม่เพียงแต่เป็นแหล่งโยอาหารที่ดี แต่ยังประกอบด้วยกรดแอมิโนจำเป็นทุกตัว (Vong and Liu, 2016) และเป็นแหล่งของโปรตีนคุณภาพอีกด้วย เนื่องจากค่า Protein efficiency ratio (PER) ของโปรตีนในกากถั่วเหลืองมีค่าสูงถึง 2.71 เมื่อเทียบกับโปรตีนที่ได้จากเต้าหู้ที่มีค่า PER 2.20, นมถั่วเหลือง 2.11 และเวย์จากถั่วเหลืองมีเพียง 1.93 ด้วยเหตุผลนี้เองที่ทำให้กากถั่วเหลืองถูกนำมาใช้ทั้งในอาหารมนุษย์ และอาหารสัตว์มาเป็นเวลายาวนาน แต่เนื่องจากในกากถั่วเหลืองยังมีตัวยับยั้งเอนไซม์ (enzyme inhibitor) ได้แก่ trypsin inhibitor และ urease inhibitor (Mian, 2007) ซึ่งทำให้การย่อยเกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นกากถั่วเหลืองจึงควรผ่านการปรับสภาพก่อนนำมาผลิตเป็นอาหารเพื่อหยุดการทำงานของตัวยับยั้งเอนไซม์ (Vong and Liu, 2016) วิธีการปรับสภาพกากถั่วเหลือง สามารถแบ่งได้ 2 วิธี ได้แก่ การนำกากถั่วเหลืองไปหมักกับจุลินทรีย์ และการนำกากถั่วเหลืองไปปรับสภาพด้วยความร้อน ทั้ง 2 วิธีเป็นลดปริมาณตัวยับยั้งเอนไซม์ และทำให้โปรตีนถูกย่อย และดูดซึมโดยร่างกายง่ายขึ้น (Vong and Liu, 2016)

สถาบันวิจัยอาหารสัตว์น้ำชายฝั่ง (2556) นำโอคาราไปแทนที่ปลาป่นในอาหารปูม้า พบว่าอัตราการเพิ่มน้ำหนักตัวของปู และประสิทธิภาพในการใช้โปรตีนลดลง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณโอคารา และลดปริมาณปลาป่น นอกจากนี้ Siti et al. (2016) แสดงผลการทดลองว่ากากถั่วเหลืองนั้นไม่เหมาะที่จะใช้เป็นอาหารสัตว์ โดยเฉพาะสัตว์ปีก เนื่องจากข้อจำกัดที่ว่าปริมาณโยอาหารหยابมาก กากถั่วเหลืองจึงเหมาะที่จะนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารชนิดอื่น มากกว่าที่จะนำไปเป็นอาหารสัตว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในประเทศจีนมีการนำเอากากถั่วเหลืองมาดองเค็ม และใส่เครื่องเทศ นำมารับประทานกับผักดอง หรืออาจนำไปปรุงอาหารกับเนื้อ หรือผัก ในบางพื้นที่ของประเทศจีน กากถั่วเหลืองถูกนำมาอัดเป็นก้อน และนำไปต้มประมาณ 10-15 วัน จนกระทั่งมีเส้นใยของรา *Rhizopus* ขึ้นปกคลุม จากนั้นนำไปตากแห้ง และนำไปทอดรับประทาน การต้มกากถั่วเหลืองกับเชื้อจุลินทรีย์แบบนี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกับที่ประเทศอินโดนีเซีย ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า เทมเป้ (tempeh) สำหรับในอาหารญี่ปุ่น มีการนำกากถั่วเหลืองไปใช้เป็นส่วนผสมในหลากหลายเมนู ไม่ว่าจะเป็นซูชิ สลัด ขนมอบ และขนมหวาน ในอเมริกาเหนือมีการนำกากถั่วเหลืองไปใช้เป็นส่วนผสมของไส้กรอก และเบอร์เกอร์ อย่างไรก็ตามการบริโภคกากถั่วเหลืองปริมาณมากอาจก่อให้เกิดอาการท้องร่วงได้ เนื่องจากกากถั่วเหลืองมีปริมาณใยอาหารสูง (Liu, 1999)

2.2 ขนมขบเคี้ยว

ขนมขบเคี้ยว หรืออาหารที่กินในระหว่างอาหารมื้อหลัก มีปริมาณพลังงานสูง คุณค่าทางโภชนาการต่ำ เช่น เค้ก ขนมปังปัง รวมทั้งของหวานที่ได้จากการปรุงด้วยน้ำตาล เพื่อช่วยให้รู้สึกอิ่มท้องเวลาหิว และรักษาระดับพลังงานในร่างกายให้คงที่ แต่ขนมขบเคี้ยวส่วนมากมักมีปริมาณ น้ำตาล ไขมัน และโซเดียมสูง การรับประทานขนมขบเคี้ยวประเภทนี้จะส่งผลเสียต่อปริมาณพลังงานที่ได้รับ และคุณค่าทางโภชนาการที่ได้จากอาหาร (Green et al., 2016) ปัจจุบันมีเด็กบริโภคขนมขบเคี้ยวที่มีเกลือ และเป็นลูกกวาดมีจำนวนเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งโดยเฉลี่ย 3 ครั้งต่อวัน หรือประมาณ 25% ของพลังงานที่ได้รับ ในขณะที่มีรายงานว่าบางส่วนของเด็กรับประทานลูกกวาดประมาณ 31% ต่อวัน เป็นเหตุให้เด็กได้รับพลังงานสูง แต่คุณค่าทางอาหารต่ำจากขนมขบเคี้ยว (Adams and Savage 2017) การที่ร่างกายได้รับปริมาณพลังงานสูงเกินจำเป็นเช่นนี้จึงนำไปสู่สภาวะโรคอ้วน และพบว่าคนที่บริโภคขนมขบเคี้ยวเป็นประจำจะทำให้ร่างกายมีน้ำหนักเกิน แต่คนที่น้ำหนักปกติที่รับประทานขนมขบเคี้ยวในปริมาณที่พอเหมาะ (Baum et al., 2017) Green et al. (2016) ทำการศึกษาความแตกต่างของขนมขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพ และขนมขบเคี้ยวที่ส่งผลเสียต่อสุขภาพ พบว่า ปริมาณพลังงานในขนมอยู่ระหว่าง 76-214 แคลอรีต่อชิ้น (U.S. Department of Agriculture snacks, USDA snacks) และ 60-526 แคลอรีต่อชิ้น (MyPlate snacks) มีขนมขบเคี้ยวเพียง 28% ที่มีปริมาณสารอาหารที่ร่างกายต้องการสูง และปริมาณสารที่ร่างกายต้องการอย่างจำกัดต่ำ และขนมขบเคี้ยวที่เหลืออีก 72% ที่มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำต่อร่างกาย ซึ่ง 21% จากขนมที่มีคุณภาพต่ำนั้นมีปัญหาเรื่องปริมาณสารที่ร่างกายไม่ควรได้รับเกินปริมาณที่กำหนดการทดแทนส่วนประกอบที่เป็นประโยชน์หรือคุณค่าทางโภชนาการในการผลิตอาหารขบเคี้ยวจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวข้างต้น

2.2.1 ประเภทของอาหารขบเคี้ยว (วนิดา, 2548 ; มาฤดี, 2551)

อาหารขบเคี้ยวแบ่งเป็น 3 ประเภท ตามชนิด และช่วงเวลาการผลิต

1) อาหารขบเคี้ยวยุคแรก (First generation snacks) เป็นอาหารขบเคี้ยวที่ผลิตด้วยวิธีง่าย ๆ แบบดั้งเดิม เช่น การทอด หรือการอบ ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวชนิดนี้ เช่น มันฝรั่งทอด แครกเกอร์ชนิดต่าง ๆ

2) อาหารขบเคี้ยวยุคที่สอง (Second generation snacks) เป็นผลิตภัณฑ์อาหารประเภทสุกพองทันที ส่วนมากใช้ธัญพืชเป็นวัตถุดิบ เช่น ข้าวโพด ข้าว มักมีการนำเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แรงเฉือนสูง (high-shear cooking extrusion) มาใช้ในการผลิต เมื่อทำการผสมแป้งโด และใส่เข้าไปใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ แบ่งโดจะผ่านความร้อนสูงกว่า 100°C ความดันภายในเครื่องสูงกว่าความดันบรรยากาศภายนอก เมื่อโดนเครื่องออกจากตัวเครื่องผ่านหน้าแปลน (die) จะเกิดการระเหยของไอน้ำ และเกิดการลดความดันอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดฟองตัว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ ลักษณะฟองกรอบ และมีความชื้นต่ำกว่า 15% เมื่อนำไปอบ ความชื้นจะลดต่ำกว่า 4% จากนั้นนำไปเคลือบน้ำมัน และกลั่นรสตามต้องการ

3) อาหารขบเคี้ยวยุคที่สาม (Third generation snacks) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีหลายรูปแบบ ใช้วัตถุดิบที่เกิดจากการผสมของธัญพืช และ/หรือสตาร์ชที่ผ่านการตัดแปลง น้ำมันพืช และตัวทำอิมัลชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสที่ต่างจากผลิตภัณฑ์จาก เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แรงเฉือนสูง (high-shear cooking extrusion) เนื่องจากมีลักษณะไม่ฟองตัว เรียกว่า อาหารขบเคี้ยวประเภทสุกแต่ไม่ฟองทันที (Indirect-expanded product) หรือบางครั้งเรียกว่า อาหารขบเคี้ยวกึ่งสำเร็จรูป (half product, semi-product หรือ intermediate product) ผลิตได้โดยการใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 2 ตัว เอ็กซ์ทรูเดอร์ตัวแรกทำให้เกิดการสุก หรือการสุกบางส่วน จากนั้นผลิตภัณฑ์ถูกนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ตัวที่ 2 ที่อุณหภูมิต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นค่อนข้างสูง จึงต้องผ่านการอบไล่ความชื้นให้เหลือประมาณ 8-12% รูปแบบแตกต่างกันออกไปตามหน้าแปลน เนื้อแข็งแน่น โปร่งแสง เรียกว่า เพลเลต (pellet) ซึ่งสามารถเก็บไว้ได้นานในที่แห้ง อาจเก็บได้ถึง 1 ปี สะดวกในการขนส่ง และสามารถทำให้สุกฟองกรอบได้ด้วยการทอดในน้ำมัน (deep fat frying) หรืออบที่อุณหภูมิสูง

2.2.2 ชนิดของอาหารขบเคี้ยว (Guy, 2001)

ชนิดของอาหารขบเคี้ยวอาจแบ่งตามวัตถุดิบ เช่น ผักผลไม้หั่นชิ้น (Raw cut vegetable snacks) โดยทั่วไปมันฝรั่งทอดเป็นผลิตภัณฑ์ที่นิยมที่สุดในอาหารขบเคี้ยวชนิดนี้ มันฝรั่งสดถูกหั่นเป็นชิ้นบาง แล้วนำไปทอดในน้ำมันให้มีลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ทอง กรอบ และมีการฟองตัวเล็กน้อย นอกจากนั้นอาจมีการใช้แครรอต หรือแอปเปิ้ล เป็นต้น

1) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปแป้งมันฝรั่ง (Formed dough products from potato derivatives) เป็นอาหารขบเคี้ยวที่ทำขึ้นด้วยวิธีง่าย ๆ โดยนำแป้งมันฝรั่งผสมกับน้ำ ผสมให้เป็นแป้งโด แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ หรือทำเป็นแผ่น เป็นเส้น หรือรูปร่างที่ต้องการ จากนั้นนำไปทอดเพื่อลดความชื้น และทำให้กรอบ

2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการขึ้นรูปแป้งข้าวโพด (Formed dough products from maize derivatives) เป็นขนมขบเคี้ยวที่ทำจากแป้งโดข้าวโพด จากนั้นนำไปตัดเป็นชิ้นตามรูปแบบที่ต้องการ หรือนำเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เมื่อได้เป็นชิ้นตามต้องการ อาจทำให้กรอบด้วยวิธีการอบ หรือทอดก็ได้

3) อาหารขบเคี้ยวกึ่งสำเร็จรูป (Half-product or pellet snacks) ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้สามารถใช้วัตถุดิบได้ 2 ชนิดหลัก ๆ คือ แป้งกึ่งสุก และ แป้งผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะคล้ายแป้งโด แต่จะมีการนำมอลดความชื้นให้เหลือเพียง 10-12% มีลักษณะแข็ง สามารถเก็บไว้ได้เป็นปีโดยไม่มีการเสื่อมคุณภาพ ทำให้ฟองกรอบด้วยการนำไปอบ หรือทอด

4) อาหารขบเคี้ยวจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Directly expanded extruded snacks) กระบวนการนี้เริ่มแรกโดยมีแป้งข้าวโพดเป็นวัตถุดิบ ใส่แป้งข้าวโพดความชื้นต่ำลงไปในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่อุณหภูมิบาร์เรลประมาณ 140-180°C แป้งข้าวโพดเกิดการละลายเป็นของเหลวภายใน

เครื่อง จากนั้นจะถูกอัดผ่านรูหน้าแปลนเล็ก ๆ ความชื้นภายในวัตถุดิบจะระเหยตัวเป็นไอน้ำอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการพองตัวของผลิตภัณฑ์

5) ข้าวพอง (Popcorn and puffed wheat) ข้าวโพดถูกทำให้พองโดยการให้ความร้อนบนกระทะ ลักษณะการพองเช่นนี้จะเกิดจากการขยายตัวที่ดีกว่าขนมขบเคี้ยวชนิดอื่น ๆ ได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า ป๊อปคอร์น นอกจากข้าวโพดแล้ว ธัญพืชชนิดอื่น เช่น ข้าว ก็สามารถนำมาทำให้พองด้วยกระบวนการนี้ได้

6) ผลิตภัณฑ์ขบเคี้ยวจากกระบวนการอื่น ๆ (Related processes) เช่น ขนมปังปิสกิต แครกเกอร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีกระบวนการ หรือลักษณะคล้ายผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมาข้างต้น มีการทำแป้งโด และระเหยน้ำออกเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบ

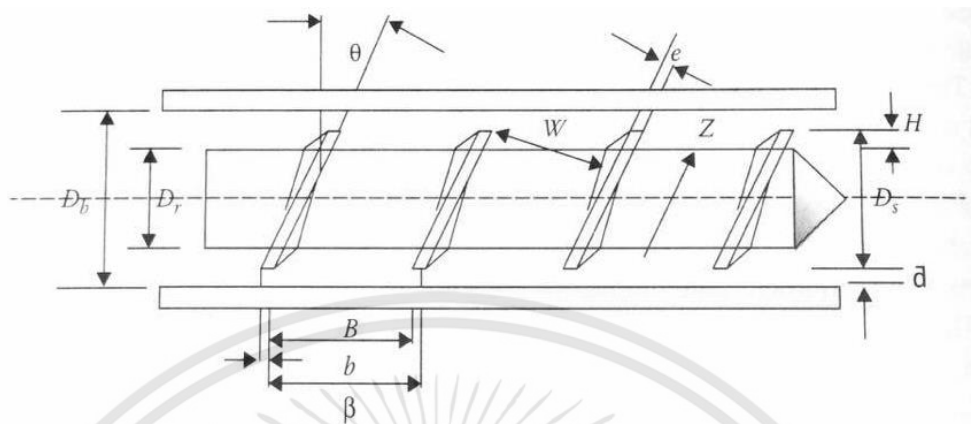
2.3 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่มีการทำงานต่อเนื่อง มีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ประหยัด ซึ่งกระบวนการนี้เกิดแรงเฉือน ความร้อน และความดันสูงกับวัตถุดิบภายในระยะเวลาสั้นๆ (Jing and Chi 2013) และสภาวะการทำงานมีความชื้นต่ำ (วนิดา, 2548) โดยวัตถุดิบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ทำให้อาหารสุก และได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ภายในขั้นตอนเดียว ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถเก็บรักษาไว้เป็นเวลานาน กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันช่วยเพิ่มเวลาในการเก็บรักษาจากการผลิตแบบดั้งเดิมจาก 2-3 อาทิตย์ เป็น 9-12 เดือน นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเอ็กซ์ทรูชันยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่พร้อมบริโภค ปัจจุบันอาหารที่เป็นที่นิยม และเป็นที่ต้องการของตลาดจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันประกอบไปด้วย ซีเรียล แป้ง น้ำตาล น้ำมัน โปรตีนจากสัตว์ และธัญพืช (Maskan and Altan, 2012) กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันช่วยให้ปริมาณตัวยับยั้งเอนไซม์ (enzyme inhibitor) ในถั่วเหลืองลดลง โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรดแอมิโน และคุณค่าโปรตีน (Vagadia et al., 2017) ซึ่งถือเป็นหนึ่งในวิธีการปรับสภาพถั่วเหลืองด้วยความร้อน และเป็นประโยชน์ต่อการนำไปบริโภค (Vong and Liu, 2016)

คำว่า “เอ็กซ์ทรูชัน” (Extrusion) หมายถึง กระบวนการที่ของเหลว หรือของกึ่งเหลวถูกบีบอัดผ่านรูหน้าแปลน (die) ตามขนาดที่ต้องการ ปัจจุบันกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับการผลิตอาหารได้มีการนำสิ่งใหม่ ๆ มาประยุกต์ มีการเพิ่มคุณภาพ และทำให้การผลิตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง เครื่องเอ็กซ์ทรูชันเครื่องแรก เกิดขึ้นโดยนักคณิตศาสตร์ และนักฟิสิกส์ชาวกรีก ในช่วง 287-212 ก่อนคริสตกาล เครื่องถูกออกแบบอย่างง่าย มีเพียงแค่บาร์เรล และสกรูที่ทำจากไม้เป็นส่วนประกอบเท่านั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการส่งน้ำจากที่ต่ำ ไปยังที่สูง ต่อมาหลักการนี้ได้ถูกนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานผลิตวัสดุต่าง ๆ ทางวิทยาศาสตร์ เช่น วัสดุสังเคราะห์ เซรามิก คอนกรีต พลาสติก และพอลิเมอร์ และเมื่อไม่ได้เวลานานมานี้ ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับอาหารคน และอาหารสัตว์ (Maskan and Altan 2012)

2.3.1 นิยามของส่วนประกอบต่างๆ ในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Maskan and Altan 2012)

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของสกรู

ที่มา : Maskan and Altan 2012

Barrel opening (D_b) เป็นขนาดที่บอกถึงความกว้างของบาร์เรลซึ่งมีสกรูหมุนอยู่ภายใน เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (D_s) คำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$D_s = D_b - 2d \quad (2.1)$$

โดยที่ d คือระยะห่างระหว่างสกรูและบาร์เรล

Flight height (H) คือระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวสกรู และเส้นผ่านศูนย์กลางของร่องสกรู

Root diameter (D_r) คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนที่เป็นฐานของเกลียวสกรู และเป็นบริเวณที่เคลื่อนให้สกรูหมุน คำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$D_r = D_b - 2H \quad (2.2)$$

Screw clearance ($2b$) เป็นระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู และช่องเปิดบาร์เรล (barrel opening) (สมการ 2.3)

$$2d = D_b - D_r \quad (2.3)$$

Lead (β) หรือ pitch คือระยะห่างระหว่างร่องเกลียวสกรู 2 เกลียวตามแนวแกน Helix angle (θ) คือมุมระหว่างเกลียวสกรูและแนวแกนที่ตั้งฉากกับสกรู (สมการ 2.4)

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\beta}{\pi D_s} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Channel ช่องระหว่างเกลียวสกรูจากส่วนที่ป้อนวัตถุดิบไปยังปลายอีกด้านของสกรู
Axial channel width (W) ความกว้างของช่องว่างจากเกลียวสกรูฝั่งหนึ่ง ไปยังเกลียวสกรูที่
อยู่ถัดไป โดยวัดเป็นแนวตั้งฉากกับสกรู (สมการ 2.5)

$$W = B \cos \theta \quad (2.5)$$

โดยที่ B คือระยะห่างระหว่างเกลียวในแนวแกน

Axial flight width (b) คือ ความกว้างของเกลียวในแนวแกน (สมการ 2.6)

$$b = \beta - B \quad (2.6)$$

Flight width (e) คือ ความกว้างของเกลียวในแนวตั้งฉากกับผิวเกลียว

Tip velocity of screw (V) คือความเร็วที่ปลายสกรู ซึ่งขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู
และความเร็วในการหมุน ($V = \pi D_s N \approx \pi D_b N$)

Number of flight turns (p) จำนวนเกลียวในแนวแกน (Maskan and Altan 2012)

2.3.2 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Maskan and Altan 2012)

ส่วนของการขับเคลื่อนสกรูเป็นส่วนที่มีแรงหมุนซึ่งเกิดจากพลังงานไฟฟ้า หรือไฮดรอลิก แรง
นี้จะเป็นตัวหมุนสกรูให้เคลื่อน เป็นส่วนที่กำหนดคุณสมบัติในการใช้งานของเครื่อง จึงถือเป็นส่วนที่
สำคัญส่วนนี้ประกอบไปด้วย gear box ที่สามารถควบคุม และปรับเปลี่ยนความเร็วของสกรูได้ gear
box ควรรับแรงได้อย่างน้อย 3 เท่าของแรงที่สูงที่สุดที่เกิดขึ้นกับเครื่องในระหว่างการทำงานพลังงาน
กลทั้งหมดที่ใช้ในเครื่อง ต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ สามารถคำนวณได้จากค่า Specific mechanical
energy หรือ SME ในสมการที่ 2.7

$$SME = \frac{2\pi \frac{n}{60} \tau}{MFR} \quad (2.7)$$

โดยที่ n คือ ความเร็วรอบสกรู (rpm) τ คือ แรงบิด (Nm) และ MFR คือ อัตราการป้อนวัตถุดิบ
(kg/h) (Chen et al., 2014)

-ส่วนการป้อนวัตถุดิบ วัตถุดิบจะถูกผสมกับของเหลว หรือสารที่ทำให้วัตถุดิบมีลักษณะคล้าย
แป้งโด ก่อนที่จะถูกป้อนเข้าเครื่องด้วยอัตราการป้อนคงที่ และได้รับแรงเฉือน ความร้อน เกิดความ
ดันสูงภายในเครื่อง อัตราการป้อนเป็นตัวแปรสำคัญต่อกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ซึ่งควรทำให้การ
เคลื่อนตัวของวัตถุดิบภายในเครื่องต่อเนื่องสม่ำเสมอ และไม่เกิดช่องว่างระหว่างวัตถุดิบภายใน
เพื่อให้วัตถุดิบมีลักษณะที่คงที่

-ส่วนที่เกิดการบีบอัดภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เป็นส่วนที่ต่อจากส่วนป้อนวัตถุดิบ ในส่วนนี้
ระยะพิทช์ (pitch) ของสกรูจะสั้นลง ในส่วนนี้สามารถปรับเปลี่ยนเพื่อให้เหมาะสมกับชนิดของ
วัตถุดิบ ช่องว่างภายในวัตถุดิบจะลดลง หลังจากนั้นวัตถุดิบจะเริ่มหลอมเหลวเปลี่ยนเป็นของหนืดที่มี
ลักษณะคล้ายแป้งโดเป็นเนื้อเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-ส่วนที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เริ่มรูปร่าง และขนาดต่าง ๆ เป็นส่วนที่อยู่ก่อนถึงหน้าแปลน บริเวณนี้อาจมีอุณหภูมิสูงถึง 250°C และความดัน $6.9 \times 10^3 - 17.2 \times 10^3$ kPa ทำให้วัตถุดิบมีการพองตัวใหม่ วัตถุดิบจะอยู่ในบริเวณนี้เพียง 10-30 วินาทีเท่านั้น

-หน้าแปลน เป็นส่วนสุดท้ายของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่วัตถุดิบผ่านอาจมีการออกแบบง่าย ๆ ให้วัตถุดิบออกเพียงแค่ช่องเดียว หรือออกแบบให้ซับซ้อนขึ้นโดยมีการแยกวัตถุดิบไปตามช่องทางต่าง ๆ เพื่อผ่านกระบวนการที่แตกต่างออกไป

2.3.3 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในกระบวนการผลิตอาหาร

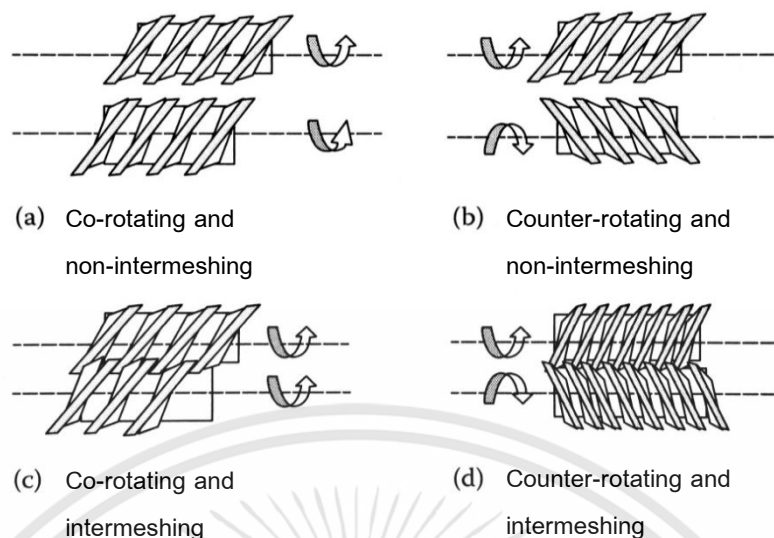
สามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) Forming extruders เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่มีความดันต่ำ และไม่ใช้ความร้อนในการทำงานถูกออกแบบมาเพื่อให้ขึ้นรูปแป้งโดโดยการบีบอัดผ่านรูหน้าแปลน (die) เช่น pasta extruders, pretzel formers และเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์อีกหลายชนิดที่ใช้กับวัตถุดิบที่มีลักษณะคล้ายแป้งโด อัดให้ผ่านรูหน้าแปลน(die) ตามลักษณะรูปร่างที่ต้องการ และนำไปทำให้สุกหลังเสร็จกระบวนการ

2) Cooking and high-pressure extruders ออกแบบมาเพื่อให้มีการเกิดความร้อนขึ้นกับวัตถุดิบในระหว่างการผลิต ภายใต้ความดัน $3.4 \times 10^3 - 13.8 \times 10^3$ kPa ก่อนที่จะออกจากรูหน้าแปลน (die) (Maskan and Altan, 2012) ซึ่ง High-pressure extruders ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ตามลักษณะการออกแบบของสกรู ได้แก่ เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูเดี่ยว และเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่

-เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) โดยทั่วไปแล้ว เป็นที่เข้าใจกันว่าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวใช้ได้กับวัตถุดิบที่เป็นพอลิเมอร์ กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเริ่มจากวัตถุดิบไหลเข้าไปในเครื่อง ผ่านสกรู เกิดการหลอมละลายของวัตถุดิบกลายเป็นของหนืด จากนั้นของหนืดจะไหลผ่านรูหน้าแปลน และกลายเป็นผลิตภัณฑ์

-เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ (Twin-screw extruder) แบ่งออกเป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูหมุนไปทางเดียวกัน (co-rotating screws extruder) และเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่สกรูหมุนสวนทางกัน (counter-rotating screws extruder) ทั้งนี้การออกแบบสกรูให้หลากหลายก็เพื่อให้ตอบสนองต่องานที่แตกต่างกันไป และรูปแบบตำแหน่งสกรูมีทั้งแบบขบกันสนิท (intermeshing) และไม่ขบกัน (non-intermeshing) แสดงในรูปที่ 2.4 ในอุตสาหกรรมอาหารมักนิยมใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ เนื่องจากเกิดการผสม และการนวดของวัตถุดิบ และยังใช้ได้กับวัตถุดิบหลายชนิด วัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันสูง และวัตถุดิบที่มีปริมาณความชื้นต่าง ๆ (วนิดา, 2548)



รูปที่ 2.4 สกรูคู่รูปแบบต่าง ๆ

ที่มา : Maskan and Altan, 2012

-co-rotating, non-intermeshing screws เหมาะกับการนำมาใช้ขึ้นรูปแปงโดผ่านรูหน้าแปลนโดยไม่ทำให้เกิดการสึก เนื่องจากสกรูถูกออกแบบมาให้ขับเคลื่อนวัสดุที่มีความหนืดต่ำอย่างช้า ๆ และไม่รุนแรง แรงเฉือนต่ำ

-counter-rotating, non-intermeshing screws เกิดแรงเฉือนต่ำในระหว่างการทำงาน มีประสิทธิภาพกับการอัดแปงโด

-co-rotating, intermeshing screws เป็นแบบที่นิยมใช้ในโรงงานอาหารมากที่สุด เมื่อเทียบกับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูคู่ชนิดอื่น เนื่องจากสามารถใช้กับอาหารที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้หลากหลายที่สุด ไม่ว่าจะเป็นวัตถุดิบที่มีน้ำตาล แป้ง ไขมัน หรือโปรตีนสูง วัตถุดิบที่มีความหนืดต่ำ รวมถึงวัตถุดิบที่มีความหนืดสูง บางครั้งมีการออกแบบให้สกรูมีการส่งวัตถุดิบไหลย้อนกลับ และมีส่วนที่นำวัตถุดิบด้วย

-counter-rotating, intermeshing screws เหมาะกับอุตสาหกรรมยาง และพลาสติก หรือผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูง อีกทั้งยังทำให้เกิดความดันสูงระหว่างสกรูกับสกรู และทำให้เกิดการผสมกันอย่างดีของวัตถุดิบด้วย โดยส่วนใหญ่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้มีความยาวของบาร์เรลสั้น (L/D ต่ำ) (Maskan and Altan, 2012)

2.3.4 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (วนิดา, 2548)

1) ความเร็วรอบสกรู เป็นส่วนที่เกิดการนวดผสมของวัตถุดิบ และพาวัตถุดิบเข้าไปในเครื่อง ทำให้เกิดความร้อนที่ได้จากแรงเฉือน และแรงอัด รวมกับความร้อนจากเครื่อง ทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ของแป้ง

2) อุณหภูมิภายในเครื่อง อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้ง ซึ่งปริมาณแป้งที่เกิดการเจลาติไนซ์ส่งผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) อัตราส่วนการอัดของสกรู การที่เครื่องมีแรงอัดสูง ส่งผลให้วัตถุดิบเกิดการสุกง่าย และเร็ว ในขณะที่เดียวกัน หากเครื่องมีแรงอัดต่ำ ก็ทำให้วัตถุดิบสุกยาก แต่หากมีการเพิ่มแรงอัดสูง เครื่องก็ต้องใช้พลังงานมากเช่นกัน

4) ขนาดรูหน้าแปลน (die) เป็นส่วนสุดท้ายของเครื่อง ก่อนที่วัตถุดิบจะไหลออกมา ส่วนนี้มีหน้าที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีรูปร่างต่าง ๆ ตามที่ต้องการ

2.3.5 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบ (วนิดา, 2548)

1) ส่วนประกอบของวัตถุดิบ องค์ประกอบของวัตถุดิบ ได้แก่ แป้ง โปรตีน ไขมัน และ ความชื้นส่งผลให้คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้แตกต่างกันออกไป พบว่าแป้งส่งผลต่อการพองตัวมากที่สุด

2) ความชื้นของวัตถุดิบ ความชื้นส่งผลต่อการพองตัว และความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ความชื้นช่วยให้วัตถุดิบไหลในเครื่องง่ายขึ้น เนื่องจากไปช่วยลดแรงเสียดทาน ปริมาณความชื้นที่ต่ำ และอุณหภูมิสูง จะช่วยให้มีการพองตัวเพิ่มขึ้น (Gimenez et al., 2012)

3) ขนาดของอนุภาควัตถุดิบ วัตถุดิบที่ป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีหลายขนาด ขนาดของวัตถุดิบยังส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เช่นกัน เนื่องจากวัตถุดิบที่มีขนาดเล็กกว่าจะสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่า ทำให้อนุภาคสามารถเปลี่ยนเป็นของไหลได้ง่ายกว่า

2.3.6 ประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันสำหรับอาหาร (วนิดา, 2548)

1) Thermoplastic หมายถึงวัตถุดิบที่ถูกทำให้เกิดความร้อน ละลาย และเป็นของแข็งเมื่อเย็นตัวลง กระบวนการนี้อาจเกิดการทำซ้ำได้หลาย ๆ ครั้ง เช่น แป้ง และน้ำตาล

2) Thermosetting หมายถึง วัตถุดิบที่ได้รับความร้อนแล้วจะกลายเป็นวัตถุที่มีลักษณะคล้ายแก้ว และแข็ง หลังจากทำวัตถุดิบนี้แห้งดีแล้ว โมเลกุลของวัตถุดิบจะแข็งตัวขึ้น และเมื่อนำวัตถุดิบนี้ไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบเดิมอีก วัตถุดิบชนิดนี้จะไม่สามารถหลอมละลายได้ในแบบกระบวนการแรก เช่น โปรตีน

3) nonfunctional คือ วัตถุดิบที่ไม่มีการพองตัวเป็นลักษณะคล้ายแก้วในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน และไม่มีการพองตัวของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ถ้ามีการให้ความร้อนที่สูงพอ จะเกิดการพองตัวที่ไม่เป็นรูปเป็นร่าง และสลายตัวไป เช่น แร่ธาตุ ไฟเบอร์ และเซลลูโลส

2.3.7 การเปลี่ยนแปลงของสารอาหารในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Maskan and Altan, 2012)

1) คาร์โบไฮเดรต

การเปลี่ยนแปลงหลักของกลุ่มคาร์โบไฮเดรตพวกแป้ง และน้ำตาล เกิดจากปฏิกิริยาเจลลาคิไนเซชัน (Gelatinization) การย่อยสลาย (Hydrolysis) ปฏิกิริยาเมลลาร์ด(Maillard reactions) และคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) การเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันส่งผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส และคุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์

แป้งที่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันอาจเกิดการแตกหักของกิ่งอะไมโลเพกทิน แต่จะมีน้ำหนักรวมของโมเลกุลที่ลดลงทั้งในอะไมโลส และอะไมโลเพกทิน เป็นผลให้เกิดกระบวนการแตกสลายแป้ง (Starch degradation) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบของสกรู นอกจากนี้การสลายตัวของสายพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Depolymerization) ในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันยังเพิ่มความสามารถในการย่อยแบ่งด้วย (Starch digestibility) ส่งผลต่อปริมาณพลังงานที่ร่างกายได้รับจากอาหาร แบ่งผ่านการเจลาติไนซ์แล้วจะง่ายต่อการย่อย ทำให้ได้รับพลังงานปริมาณสูง จึงเหมาะกับสัตว์กระเพาะเดี่ยว และมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทารกแรกเกิด สำหรับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน การเจลาติไนซ์เกิดขึ้นในแป้งที่ปริมาณความชื้นระหว่าง 12-22% และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ แรงเฉือน และความดันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น ลิพิด น้ำตาลซูโครส โยอาหาร และเกลือก็ส่งผลต่อการเจลาติไนซ์เช่นกัน

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันได้ถูกนำมาพัฒนาให้เกิดผลิตภัณฑ์จำพวกแป้งที่ทนทานต่อการย่อย (digestion-resistant starch, RS) RS กลายเป็นที่น่าสนใจในเหล่านักพัฒนาผลิตภัณฑ์ นอกจากช่วยลดปริมาณแคลอรีที่ร่างกายได้รับแล้ว ยังมีประโยชน์ด้านอื่น ๆ ต่อร่างกายอีกด้วย แป้งสาลีที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูชันจะเกิดปฏิกิริยา transglycosidation ที่เกิดพันธะเชื่อมระหว่างสายอะไมโลเพกทินอิสระกับโมเลกุลอื่น การเพิ่มปริมาณอะไมโลสเป็นอีกตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณ RS ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ความเร็วสกรูที่ต่ำ (30 rpm) ยังเป็นตัวช่วยให้เกิดปริมาณ RS ที่สูงขึ้นในแป้งข้าวโพด มะม่วง และกล้วย

2) โยอาหาร (Dietary fiber)

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันถูกนำมาใช้ปรับเปลี่ยนคุณค่าทางอาหาร และส่วนประกอบของวัตถุดิบที่มีปริมาณโยอาหารสูง เช่น กากสัมนที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำส้มมีปริมาณเพกทิน และสารสำคัญอื่น ๆ ที่สามารถเปลี่ยนเป็นโยอาหารละลายน้ำได้ (Soluble dietary fiber, SDF) โยอาหารมีส่วนช่วยให้อุจจาระอุ่มน้ำได้ดีขึ้น ทำให้อุจจาระไม่แข็ง และขับถ่ายได้ดีขึ้น ลดการเกิดโรคถุงผนังลำไส้ใหญ่อักเสบ (diverticular disease) ริดสีดวงทวารหนัก และโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบทางเดินอาหารส่วนล่าง (Snyder and Kwon, 1987)

Jing and Chi (2012) ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันกากถั่วเหลืองเพื่อให้ได้ปริมาณโยอาหารละลายน้ำสูงที่สุด โดยการปรับเปลี่ยน อุณหภูมิ (90-130°C) ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้น (23-30%) และความเร็วสกรู (160-200 rpm) ใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูคู่ ผลการทดลองพบว่าที่ 115°C, ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้น 31% และความเร็วสกรู 180 rpm เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งให้ปริมาณโยอาหารละลายน้ำเพิ่มขึ้นจาก 10.60% เป็น 12.65% หลังการเอ็กซ์ทรูชัน นอกจากนี้ยังพบว่า การอุ่มน้ำ การอุ่มน้ำมัน และการบวมตัวของผลิตภัณฑ์หลังการเอ็กซ์ทรูชันมีค่าเพิ่มขึ้น

3) ลิพิด

ลิพิด คือ พลังงานรูปแบบหนึ่ง ซึ่งให้ค่าพลังงาน 9 kcal/g การบริโภคลิพิดที่มากเกินไปเกินความจำเป็นของร่างกายส่งผลต่อปัญหาสุขภาพ เช่น โรคหัวใจ มะเร็ง และโรคอ้วน สำหรับการเอ็กซ์ทรูชันที่ใช้วัตถุดิบซึ่งมีปริมาณลิพิดมากกว่า 10% นับว่าเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ยาก เนื่องจากปริมาณลิพิดที่มีมากส่งผลให้แรงเฉือนในบาร์เรลดลง อีกทั้งการทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณลิพิดสูง การพองตัวจึงเกิดขึ้นได้ยากเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ได้จากการเอ็กซ์ทรูชันอาจนำไปผ่านการทอด เพื่อลดปริมาณความชื้น และเพิ่มความกรอบ และรสชาติ

ลิพิดบางชนิดเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากมีประโยชน์ต่อร่างกาย เช่น โอเมกา-3 (omega-3) decosahexaenoic acid (DHA) และ eicosapentaenoic acid (EPA) จึงมีการศึกษาเพื่อหาวิธีให้

กรดไขมันเหล่านี้ยังคงอยู่ในผลิตภัณฑ์หลังผ่านการเอ็กซ์ทรูชันแล้ว ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวชนิดหนึ่งที่ทำจากเนื้อปลาแซลมอน ผ่านการเอ็กซ์ทรูชัน และพบว่าไม่มีการสูญเสียไปของ DHA และ EPA โดยการเติมใยอาหารจากข้าวโอ๊ตเพื่อช่วยในการรักษาลิพิดไว้ในผลิตภัณฑ์ ลิพิดอีกชนิดหนึ่งที่ไม่ควรมีหรือมีให้น้อยที่สุดในผลิตภัณฑ์อาหารคือ กรดไขมันประเภททรานส์ (trans) ซึ่งพบว่าข้าวโพด และถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูชันมีกรดไขมันประเภททรานส์เพียง 1.5% เท่านั้น

ผลิตภัณฑ์อาหารสามารถเกิดการเสื่อมคุณค่าทางอาหาร และเกิดกลิ่นรสที่ไม่ดีจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด ซึ่งเป็นผลมาจากหลายปัจจัย พบว่าในข้าวที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูชันจะมีปริมาณของธาตุเหล็ก และเปอร์ออกไซด์มากกว่าในข้าวที่ไม่ผ่านการเอ็กซ์ทรูชัน รูปแบบของผลิตภัณฑ์หลังการเอ็กซ์ทรูชันก็มีผลการปฏิกิริยาออกซิเดชันเช่นกัน เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่มีการพองตัวสูงเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสออกซิเจน และลิพิดภายในผลิตภัณฑ์ แต่ในขณะเดียวกัน กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันส่งผลให้เอนไซม์ที่กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเสื่อมเสียด้วยเช่นกัน และสารประกอบแปง-ลิพิดที่ได้จากการเอ็กซ์ทรูชันยังทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วย การบรรจุผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ที่บดแสงที่เติมด้วยแก๊สไนโตรเจน หรือสุญญากาศยังช่วยป้องกันผลิตภัณฑ์ได้เช่นกัน

4) โปรตีน

โปรตีนที่ผ่านแรงเฉือน และอุณหภูมิสูงจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันจะเกิดการเสียสภาพ (denaturation) ส่งผลให้เอนไซม์ ตัวยับยั้งเอนไซม์ (enzyme inhibitor) และสารก่อภูมิแพ้ (allergens) เกิดการเสียสภาพ ปริมาณโปรตีนที่เกิดการเสียสภาพสามารถประมาณได้จากความสามารถในการละลายน้ำ หรือในสารละลายของโปรตีน หากยังมีการละลายของโปรตีนมาก นั้นหมายความว่ายังมีคุณค่าทางอาหารเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความสามารถในการย่อยของโปรตีนมีค่าเพิ่มขึ้น (Singh et al., 2017)

โปรตีนเป็นสารอาหารประเภทสารอาหารหลัก ชนิดเดียวที่ยังมีความสามารถในการย่อยสูงยิ่งดีต่อร่างกาย เนื่องจากโปรตีนมีส่วนช่วยในการเจริญของร่างกาย และเสริมสร้างกล้ามเนื้อ ดังนั้นโปรตีนในอาหารสำหรับเด็กจึงมีความสามารถในการย่อยสูง ข้าวโพดผสมกับข้าวฟ่าง นำไปหมัก และเข้ากระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน พบว่าความสามารถในการย่อยของโปรตีนทั้งที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่ในขณะที่การผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันโดยไม่หมักตัวอย่างทำให้ความสามารถในการย่อยของโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว และมีค่ามากกว่าตัวอย่างที่ไม่ผ่านการหมัก

ความสามารถในการย่อยของโปรตีนขึ้นอยู่กับตัวยับยั้งทริปซิน (trypsin inhibitors) ที่มีอยู่ กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันช่วยลดการทำงานของตัวยับยั้งทริปซิน (trypsin inhibitor activity, TIA) 88-91% ในสากที่ผสมกับข้าวโพด และถั่วเหลือง สำหรับถั่วเหลืองไขมันเต็มี่ผ่านการเอ็กซ์ทรูชันที่อุณหภูมิ 160°C พบว่าปริมาณ TIA ลดลงจาก 28.4 mg/g เหลือ 1.9 mg/g โดยน้ำหนักแห้ง ในขณะที่ขนมขบเคี้ยวบางชนิดมีการเพิ่มแป้งถั่วเข้าไป เพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีน แต่นั่นกลับเป็นการเพิ่มปริมาณ TIA ด้วยเช่นกัน แต่พบว่าหากวัตถุดิบผ่านการเอ็กซ์ทรูชัน ปริมาณ TIA จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันก็ไม่ได้ทำให้ปริมาณคอเลสเตอรอลที่มีอยู่น้อยในถั่วเหลืองเปลี่ยนแปลงไป

Fallahi et al. (2016) รายงานว่าการเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดียวกับกากถั่วเหลือง ปลาป่น และธัญพืชที่อุณหภูมิ 80, 110 และ 140°C ความเร็วสกรู 80, 150 และ 220 rpm ความชื้น 150, 225 และ 300 g/kg พบว่าอุณหภูมิ และความชื้นวัตถุดิบเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการละลายน้ำของไนโตรเจน (nitrogen solubility in water, NSI) และกาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมีค่าความสามารถในการย่อยโปรตีน (relative protein digestibility, RPD) สูงที่สุด และมีปริมาณไลซีนที่ร่างกายสามารถนำไปใช้ (available lysine, AL) ลดลงน้อยที่สุด

5) วิตามิน

วิตามินเป็นสารที่ร่างกายไม่สามารถสร้างขึ้นเองได้ ทำหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์ในเอนไซม์ (enzyme cofactors) จึงเป็นสารที่จำเป็นต่อร่างกาย วิตามินแบ่งเป็นชนิดที่ละลายน้ำ และชนิดที่ละลายในไขมัน ตามโครงสร้างทางเคมี ซึ่งองค์ประกอบของวิตามินส่งผลต่อความเสถียรในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

6) วิตามินเอ และคาโรทีนอยด์

วิตามินเอมีส่วนสำคัญในการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน การขาดวิตามินเอส่งผลให้เกิดการตาบอด วิตามินเอ และคาโรทีนอยด์ไม่เสถียรเมื่อโดนออกซิเจน และความร้อน ดังนั้นวิตามินเอจึงเป็นสารอาหารที่เป็นที่ต้องการอย่างมากหลังกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เบตาแคโรทีนเป็นสารสี นิยมใส่ในอาหาร ให้อาหารเป็นสีส้ม มีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ เนื่องจากวิตามินเอเป็นสารที่ไม่เสถียรในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน จึงมีการผสมสารต้านอนุมูลอิสระที่ละลายน้ำ และไม่ละลายน้ำเข้าสารคิเลต (chelating agent) และวิตามินเอ ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทจะมีการสลายตัวของวิตามินเอมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการเก็บรักษาสูงขึ้น

7) วิตามินชนิดอื่นที่ละลายในไขมัน

วิตามินดี และวิตามินเค มีความคงตัวในระหว่างกระบวนการทางอาหาร โดยปกติแล้วมักพบวิตามินอี และโทโคฟีรอลในอาหารหลากหลายชนิด แต่ในบางครั้งก็มีการเติมวิตามินอี และโทโคฟีรอลในอาหารเพื่อให้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ในการเก็บรักษารำข้าว พบว่าปริมาณของโทโคฟีรอลลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิสูงในการเอ็กซ์ทรูชัน

8) วิตามินบี

ธัญพืชที่ผ่านการขัดสี (Refined grains) มักอุดมไปด้วย ไทอามิน ไรโบฟลาวิน ไนอาซิน และกรดโฟลิก เพื่อป้องกันการขาดวิตามิน ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันจึงมีการเติมวิตามินดังกล่าวเสริมเข้าไป ไทอามิน หรือวิตามินบี 1 เป็นสารอาหารที่ไม่ทนความร้อน การสลายตัวของไทอามินในระหว่างการเอ็กซ์ทรูชันข้าวสาลีเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นลำดับแรก และส่งผลต่อปริมาณไทอามินที่อาจสูญเสียไปตั้งแต่ 5% ถึง 100% การทำให้ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทพองตัวโดยใช้ความร้อนอาจส่งผลเสียต่อปริมาณไทอามิน จึงอาจเปลี่ยนวิธีการทำให้ผลิตภัณฑ์พองตัว โดยใช้อุณหภูมิต่ำ และเติมคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้เกิดการพองตัว วิธีนี้จะช่วยรักษาปริมาณไทอามินได้ในสภาวะที่ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้น และอุณหภูมิบาร์เรลสูง จะส่งผลให้ปริมาณไทอามินลดลง แต่สามารถลดการสูญเสียไทอามินได้ โดยการลดระยะเวลาที่วัตถุดิบต้องอยู่ในกระบวนการโดยการเพิ่มความเร็วสกรูจากการทดลองพบว่าไรโบฟลาวิน และไนอาซินมีความเสถียรมากกว่าไทอามิน และไพริดอกซิน (pyridoxine) ในสภาวะกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเดียวกัน

9) แร่ธาตุ

แร่ธาตุส่วนใหญ่ไม่ทนต่อความร้อน ดังนั้นในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันจึงมีการเติมแร่ธาตุเข้าไป เพื่อไม่ให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณแร่ธาตุน้อยเกินไป ในบางครั้ง แร่ธาตุอาจไม่ถูกทำลายด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน แต่แร่ธาตุอาจเกิดการสูญเสียความสามารถในการดูดซึม (bioavailability)

เนื่องจากแร่ธาตุเกิดการรวมตัวกับสารโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecules) โดยเฉพาะ โยอาหาร และไฟเทต (phytate) ความเร็วของสกรูที่แตกต่างกันส่งผลทำให้ปริมาณโยอาหารไม่ละลายน้ำในข้าว และข้าวโอ๊ตเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน แต่สำหรับไฟเทต หลายงานวิจัยพบว่า กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันไม่ส่งผลต่อปริมาณไฟเทตในผลิตภัณฑ์

หลายงานวิจัยศึกษาความสามารถในการทำงานของวิตามินทั้งภายใน และภายนอกสิ่งมีชีวิต ทำการประเมินความสามารถในการดูดซึมจากความสามารถในการละลายของธาตุเหล็กในสภาวะที่ คล้ายคลึงกับการย่อย และความสามารถในการซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันช่วยเพิ่ม ความสามารถในการทำงานของธาตุเหล็กในขนมขบเคี้ยวจากข้าวโพดเพียงเล็กน้อย ในถั่วที่ผ่านการ เอ็กซ์ทรูชันที่มีแรงเฉือนสูงมีปริมาณธาตุเหล็กที่สามารถซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้น้อยกว่าในถั่วที่ไม่ผ่าน กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันที่มีแรงเฉือนต่ำกว่า

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)

การออกแบบการทดลอง (Design and Analysis of Experiment, DOE) คือเทคนิคขั้นสูง ทางสถิติเพื่อให้ได้ผลตอบสนองเป็นไปตามที่ต้องการ จากการใช้วิธีการปรับค่าสภาวะของ กระบวนการ ความแตกต่างระหว่างวิธีการออกแบบการทดลอง กับวิธีทั่วไป คือ วิธีทั่วไปเป็นการทำ การทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือมีการปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-factor-at-a-time, OFAT) ซึ่งให้ผลคำตอบที่ช้า และสิ้นเปลืองทรัพยากร (สันติ, 2552)

2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

1) การนิยามปัญหา (Statement of the Problem) เป็นการระบุถึงความต้องการ หรือการ รับรู้อะไรบ้างจากการผลิต กระบวนการนี้จะเชื่อมโยงกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2) การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of Factors, Levels, and Ranges) ขั้นตอนนี้จะใช้หลักการทางทฤษฎี และข้อมูลจากงานวิจัยต่าง ๆ ก่อนหน้า เพื่อพิจารณาว่าปัจจัยใดที่ น่าจะมีผลต่อการทดลอง และควรกำหนดช่วงในการทดลอง (Range) ของแต่ละปัจจัยอย่างไร การ กำหนดช่วงในการทดลองของปัจจัยสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบดังนี้

- แบบกำหนด (Fixed Effect) คือ ระดับของปัจจัยที่ถูกกำหนดเองโดยผู้ทดลอง
- แบบสุ่ม (Random Effect) คือ ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าได้อย่างแน่นอน
- แบบผสม (Mixed Effect) คือ การผสมกันระหว่างปัจจัยที่เป็นแบบกำหนด และแบบสุ่ม

รวมกัน

3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of Response Variable) ผู้วิจัยต้องเลือกตัวแปรที่ สามารถวัดค่าได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง และตัวแปรนั้นต้องเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์สำหรับการศึกษา

4) การเลือกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) หลังจากกำหนดทรีท เมนต์ (Treatment) และตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) ผู้วิจัยต้องทำการตัดสินใจเรื่อง จำนวนซ้ำของการทดลอง (Replication) ลำดับในการทดลองในการสุ่ม (Randomization) และการ บล็อก (Blocking) ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงต้นทุน และความเสี่ยงในการทำการทดลองด้วย

5) การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment) ในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยต้องปฏิบัติการ ทดลองตามแผนที่ออกแบบไว้ ซึ่งต้องดูแลอย่างใกล้ชิด และควรระวังในเรื่องความถูกต้องของ เครื่องมือ และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในระหว่างการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data) จะมีการนำความรู้ทางสถิติมาใช้วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และตรวจสอบความถูกต้อง เหมาะสมของข้อมูล วิธีทางสถิติเป็นเพียงเครื่องมือที่ให้แนวทางการวิเคราะห์อยู่ภายใต้ช่วงความเชื่อมั่นในการสรุปผล จึงไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยใดมีผลเท่าใดได้อย่างแน่นอน

7) การสรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and recommendations) ข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์แล้วอาจแสดงในรูป กราฟ ตาราง หรือแผนภูมิ ควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองที่ได้อีกครั้ง

2.4.2 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design,)

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เป็นหนึ่งในแนวทางการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรเชิงปริมาณ เป็นการออกแบบการทดลองที่มีนิยม และมีประสิทธิภาพในการศึกษาปัจจัยที่มี 3 ระดับ และหาพื้นผิวตอบสนองที่ได้จากสมการอันดับสอง (second-order equation) โดยเฉพาะเมื่อต้องการสร้างสมการความสัมพันธ์กับปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factor) เช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น ซึ่งถูกพัฒนาโดยนายบ็อกซ์ และนายเบห์นเคน หลักการของวิธีนี้เป็น การผสมผสานระหว่างหลักของ 2^2 การแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ กับจุดกึ่งกลาง (Central Points) ข้อดีของวิธีนี้คือ ทำให้สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear Effects) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง และผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ศึกษาได้ และมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ 3^k การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ โดย k คือ จำนวนของปัจจัย แต่ข้อเสียคือ ไม่สามารถลดจำนวนครั้งในการทดลองได้ และวิธีนี้ไม่เหมาะกับการทดลองที่มีมากกว่า 4 ปัจจัย ตัวอย่างการทดลองแบบ 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับแสดงในตารางที่ 2.3 (ประไพศรี และพงศ์ชนัน, 2551 ; สถาพร, 2557)

ตารางที่ 2.3 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ที่ 3 ปัจจัย 3 ระดับ

Run	A	B	C
1	-	-	0
2	-	+	0
3	+	-	0
4	+	+	0
5	-	0	0
6	-	0	+
7	+	0	-
8	+	0	+
9	0	-	-
10	0	+	+
11	0	-	-
12	0	+	+
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ และสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวแปรอิสระที่เหมาะสม ตัวแปรอิสระที่ศึกษาจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณที่มีค่าต่อเนื่อง หากตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ การหาค่าที่เหมาะสมจะไม่มีจุดหมายประสงค์ของวิธีการนี้เพื่อให้ผู้วิจัยสามารถปรับปรุงการทดลองให้ไปสู่บริเวณที่ใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ หลังจากนั้นจึงสามารถหาสมการที่ดีกว่าในการอธิบาย และหาจุดสูงสุดหรือต่ำสุดได้ ในระดับอุตสาหกรรมมีการนำวิทยาการนี้ไปใช้วิเคราะห์หาระดับของปัจจัยการผลิตที่เหมาะสม

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และตัวแปรตามอาจใช้สมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 1 หรือโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 ก็ได้ สำหรับสมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 1 จะใช้ในการหาค่าขอบเขตของตัวแปรอิสระ เมื่อตัวแปรตาม หรือค่าตอบมีค่าเข้าใกล้จุดที่ดีที่สุด จึงเปลี่ยนมาใช้สมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 (จิราวัลย์, 2552) โดยคำตอบที่ได้ขึ้นอยู่กับแปรอิสระหลายตัว ความสัมพันธ์ระหว่างคำตอบ และเซตของตัวแปรอิสระแสดงในสมการที่ 2.8

$$y = f(x_1, x_2) + \epsilon \quad (2.8)$$

โดยที่ x คือปัจจัยที่ทำการศึกษา และ ϵ คือความผิดพลาดของผลคำตอบ y ที่ได้จากการทดลอง

พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) ส่วนใหญ่มักแสดงผลในรูปกราฟิก บางครั้งอยู่ในรูปพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) เพื่อให้ง่ายต่อการอ่านผล (สถาพร, 2557) โดยสามารถทราบค่าความสัมพันธ์ระหว่างคำตอบ Y และตัวแปรอิสระ X ได้จากสมการที่ 2.9

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (2.9)$$

โดยที่ Y คือ คำตอบ β_0 , β_{ii} และ β_{ij} คือ ค่าคงที่สมการ และ X_1 X_2 และ X_3 คือ ตัวแปรที่ทำการศึกษา (Jing and Chi, 2013)

2.5 การหาสถานะที่เหมาะสม (Optimization)

การหาสถานะที่เหมาะสม (Optimization) เป็นศิลปะ วิทยาศาสตร์ และคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาเซตของตัวเลือกทั้งแบบจำกัด และไม่จำกัด ที่เป็นไปได้มากที่สุด โดยมีพื้นฐานมาจากเป้าหมายในการหาค่าตอบ (objective function) ซึ่งอาจเป็น กำไร เวลา พลังงาน หรือปริมาณอะไรก็ตามที่สามารถแสดงเป็นตัวเลขได้ ซึ่งเป้าหมายจะขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบที่ต้องการหาค่าตอบ (Nocedal and Wright, 1999 ; Nazareth, 2004)

2.5.1 ฟังก์ชันความพึงพอใจ (desirability function) (สันติ, 2552 ; Natabirwa et al., 2018)

ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability function) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการหาสถานะที่เหมาะสมของ multi-response surface มากที่สุดวิธีหนึ่ง โดยวิธีนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ของ

กระบวนการต่าง ๆ และผลของคำตอบ ซึ่งคิดจากค่าความพึงพอใจรวม D ที่เป็นค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต สำหรับ multiple-response problem:

$$D = (d_1(y_1)d_2(y_2)\dots d_p(y_p))^{1/p} \quad (2.10)$$

โดยที่ D มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1, $d_i(y_i) = 0$ สำหรับค่าที่ไม่ต้องการมากที่สุดของ y_i , $d_i(y_i) = 1$ สำหรับค่าที่ต้องการมากที่สุดของ y_i และ p เป็นจำนวนคำตอบ (response) ที่ใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสม

นियามการให้ค่าฟังก์ชันความพึงพอใจแต่ละฟังก์ชัน $d_i(y_i)$ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ซึ่งจะขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ในการพิจารณาค่าคำตอบ y_i ดังนี้

1) ยิ่งมากยิ่งขึ้นดี (The larger, the better) สำหรับกรณีที่ต้องการทำให้ค่า y_i มีค่ามากที่สุด (Maximization) $d_i(y_i)$ ถูกกำหนดค่าดังนี้

$$\begin{aligned} d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \leq L_i \\ d_i(y_i) &= \left(\frac{y_i - L_i}{U_i - L_i}\right)^{x_i} && ; L_i \leq y_i \leq U_i \\ d_i(y_i) &= 1 && ; y_i \geq U_i \end{aligned}$$

โดยที่ L_i คือขอบเขตล่างของคำตอบ y_i , U_i คือขอบเขตบนของคำตอบ y_i และ x_i คือค่าระดับความสำคัญ

2) ยิ่งน้อยยิ่งดี (The smaller, the better) สำหรับกรณีที่ต้องการทำให้ค่า y_i มีค่าน้อยที่สุด (Minimization) $d_i(y_i)$ ถูกกำหนดค่าดังนี้

$$\begin{aligned} d_i(y_i) &= 1 && ; y_i \leq L_i \\ d_i(y_i) &= \left(\frac{U_i - y_i}{U_i - L_i}\right)^{x_i} && ; L_i \leq y_i \leq U_i \\ d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \geq U_i \end{aligned}$$

โดยที่ L_i คือขอบเขตล่างของคำตอบ y_i , U_i คือขอบเขตบนของคำตอบ y_i และ x_i คือค่าระดับความสำคัญ

3) ค่ากลางคือค่าที่ดีที่สุด (Nominal-the-best) สมมติให้ค่าเป้าหมาย T_i สำหรับคำตอบ y_i ผลลัพธ์ที่ต้องการมากที่สุดคือ $y_i = T_i$ ดังนั้น $d_i(y_i)$ จึงถูกกำหนดค่าดังนี้

$$\begin{aligned} d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \leq L_i \\ d_i(y_i) &= \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^{x_i} && ; L_i \leq y_i \leq T_i \\ d_i(y_i) &= \left(\frac{y_i - U_i}{T_i - L_i}\right)^{x_i} && ; T_i \leq y_i \leq U_i \\ d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \geq U_i \end{aligned}$$

โดยที่ L_i คือขอบเขตล่างของคำตอบ y_i , U_i คือขอบเขตบนของคำตอบ y_i และ x_i คือค่าระดับความสำคัญ

4) แบบมีข้อจำกัด (Constraint) สำหรับกรณีนี้ เมื่อไหร่ก็ตามที่คำตอบ y_i อยู่ในขอบเขต หรือ Constraint $L_i \leq y_i \leq U_i$ จะถือว่า $d_i(y_i)$ เป็นที่พอใจ

$$\begin{aligned} d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \leq L_i \\ d_i(y_i) &= 1 && ; L_i \leq y_i \leq U_i \\ d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \geq U_i \end{aligned}$$

โดยที่ L_i คือขอบเขตล่างของคำตอบ y_i , U_i คือขอบเขตบนของคำตอบ y_i และ x_i คือค่าระดับความสำคัญ

2.5.2 ขั้นตอนการคำนวณหาสถานะที่เหมาะสมด้วยวิธีการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้าน

ฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้านเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่ใช้เกณฑ์ในการตัดสินใจมากกว่า 1 เกณฑ์ โดยค่าคำตอบที่ได้แสดงไว้ในรูปของความพึงพอใจรวม (Overall desirability, D) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ยิ่งค่าความพึงพอใจรวมที่ได้เข้าใกล้ 1 มากเท่าไร นั่นหมายความว่าสถานะที่เหมาะสมที่ได้จะให้คำตอบที่มีค่าเข้าใกล้หลักเกณฑ์ที่กำหนดมากที่สุด ซึ่งขั้นตอนในการคำนวณค่าความพึงพอใจรวมมีดังนี้

1) กำหนดค่า x_i แทนลงในสมการที่ใช้ทำนายผลแต่ละคำตอบ โดยค่า x_i ที่ใช้แทนลงในสมการต้องแปลงค่ากลับไปเป็นตัวแปรรหัส (coded variables) ตามแผนการทดลอง ด้วยวิธีการประมาณค่า (interpolation)

2) นำค่า Y ในแต่ละคำตอบมาหาค่า d_i โดยใช้หลักเกณฑ์ในการพิจารณาค่าคำตอบ y_i ทั้ง 4 เงื่อนไขในหัวข้อที่ 2.5.1 ซึ่งการเลือกว่าจะใช้หลักเกณฑ์ใดนั้นขึ้นอยู่กับผู้วิจัยว่าต้องการทำให้คำตอบมีค่าสูงสุด (Maximization) ต่ำสุด (Minimization) เป็นค่ากลาง หรืออยู่ในขอบเขต

3) แทนค่า d_i ของแต่ละคำตอบลงในสมการที่ 2.10 เพื่อหาความพึงพอใจรวม ทำการคำนวณซ้ำตั้งแต่ข้อ 1. โดยการเปลี่ยนค่า x_i แต่ละตัวเพื่อให้ได้ค่าความพึงพอใจรวมที่สูงที่สุด โดยปกติการคำนวณมักใช้ software ในการหาคำตอบ

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปกากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์อาหาร

Lu et al. (2013) นำแป้งกากถั่วเหลืองทดแทนแป้งสาลีในการผลิต เส้นบะหมี่ ขนมปังนึ่ง และขนมปัง ในปริมาณ 25% 15% และ 10% ตามลำดับ เพื่อดูความเป็นไปได้ในการแทนที่แป้งสาลีด้วยแป้งกากถั่วเหลือง และดูคุณสมบัติในการลดระดับน้ำตาลในเลือดและปริมาณใยอาหารของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองพบว่าดัชนีน้ำตาลในเส้นบะหมี่ ขนมปังนึ่ง และขนมปังที่มีการใส่แป้งกากถั่วเหลืองลดลง 32.47% 37.21% และ 26.87% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใส่แป้งกากถั่วเหลือง และพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ใส่แป้งกากถั่วเหลืองมีปริมาณใยอาหารทั้งหมดเพิ่มขึ้น 17.74% 8.12% และ 7.76% ในเส้นบะหมี่ ขนมปังนึ่ง และขนมปังตามลำดับ โดยที่ใยอาหารส่วนใหญ่แล้วเป็นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ จึงสรุปได้ว่าการแทนที่แป้งสาลีด้วยแป้งกากถั่วเหลืองในผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันการเกิดโรคเบาหวานในผู้บริโภคได้ และยังถือเป็นการนำกากถั่วเหลืองมาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้วย

กนกอร (2555) นำแป้งกากถั่วเหลืองสด และแป้งกากถั่วเหลืองสดบดบั้งที่ได้จากการผลิตนมถั่วเหลืองมาแทนที่แป้งสาลีในการผลิตเค้กผลไม้ ในปริมาณ 20% 30% และ 40% เพื่อปรับเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพ ประสาทสัมผัส และคุณค่าทางอาหาร พบว่าแป้งกากถั่วเหลืองสดทำให้ความหนืดของเบตเตอร์ และความแข็งของเนื้อเค้กผลไม้ลดลง และทำให้สีของเค้กมีค่าสีแดงเพิ่มขึ้น แต่ค่าความสว่างน้อยลง จากการทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้ชิมส่วนใหญ่ชื่นชอบเค้กผลไม้ที่ทำจากแป้งกากถั่วเหลืองปริมาณ 30% มากที่สุด ทั้งนี้การเติมแป้งกากถั่วเหลืองยังส่งผลให้เค้กมีปริมาณใยอาหาร และ เถ้าเพิ่มขึ้น แต่กลับเป็นการลดปริมาณคาร์โบไฮเดรต จึงทำให้พลังงานที่ได้รับจากเค้กน้อยลง

Kang et al. (2018) ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ คุณภาพในการปรุงอาหาร และความสามารถในการย่อยในหลอดทดลองของเส้นขนมที่ทำจากข้าว และเสริมด้วยกากถั่วเหลือง เพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำกากถั่วเหลืองมาผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ และป้องกันโรคอ้วน ทำการเตรียมขนมที่ทำจากข้าวที่มีอัตราส่วนของกากถั่วเหลือง 0, 5, 10 และ 20% ตามฐานน้ำหนักข้าว และเปรียบเทียบกับอีกกลุ่มที่ปริมาณกากถั่วเหลืองเดียวกัน แต่มีการเติมแอลจินเต และ 0.2 M CaCl₂ พบว่ากลุ่มที่มีการเติมกากถั่วเหลืองเพียงอย่างเดียว มีค่าการดูดน้ำ (%) ค่า cohesiveness และค่า adhesiveness (g*s) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อปริมาณกากถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น แต่กลับมีค่าความแข็ง (hardness) เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณกากถั่วเหลืองมากขึ้น ที่ปริมาณกากถั่วเหลือง 10% มีค่าดัชนีไกลซีมิกจากการคำนวณ (predicted glycemic index, pGI) ต่ำที่สุด (4.73%) ซึ่งถือว่าดีที่สุด และการเติมแอลจินเต และ 0.2 M CaCl₂ ไม่ส่งผลต่อค่า pGI

Park et al. (2015) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของคุกกี้ที่ทำจากกากถั่วเหลือง และคุกกี้ที่ทำจากกากถั่วเหลืองผสมกับ แป้ง แป้งถั่ว หรือ hydroxylpropyl methylcellulose ในอัตราส่วน 25:1 พบว่าแป้งโดของคุกกี้กากถั่วเหลืองที่ผสมแป้ง และแป้งโดคุกกี้กากถั่วเหลืองมีค่าความแข็ง (hardness) 5.9 g และ 6.5 g และมีค่าปริมาณความชื้น 53.3 g/100 g และ 56.5 g/100 g ตามลำดับ ในขณะที่คุกกี้กากถั่วเหลืองที่ผสมแป้ง และคุกกี้กากถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแล้วให้ปริมาณพลังงาน 1854 kJ/g และ 1753 kJ/g ค่าความแข็ง 3.5 g และ 2.4 g และค่าความกรอบ (crispness) 3.4 และ 2.4 ตามลำดับ การเพิ่มกากถั่วเหลืองลงไปในคุกกี้จึงเป็นการเพิ่มคุณค่าทางอาหารให้กับผลิตภัณฑ์ และเป็นการช่วยลดของเสียให้สิ่งแวดล้อมไปในเวลาเดียวกัน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันสำหรับอาหาร

Li et al.(2012) ทำการคิดค้นเทคนิค blasting extrusion แบบใหม่ โดยใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเอ็กซ์ทรูชันเพื่อให้เกิดปริมาณใยอาหารละลายน้ำสูงที่สุด ก่อนกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน แป้งกากถั่วเหลืองจะผ่านการปรับสภาพโดยเติมกรดซิตริก และปรับปริมาณความชื้นให้อยู่ในช่วง 30 g/100 g กากถั่วเหลือง ถึง 40 g/100 g กากถั่วเหลือง และผสมกับสารที่ก่อให้เกิด CO₂ (NaHCO₃ และ C₆H₈O₇) และทำการหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดปริมาณใยอาหารละลายน้ำสูงที่สุด และมีแป้งกากถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเป็นการทดลองควบคุม โดยมีปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิหน้าแปลน ความเร็วสกรู และปริมาณความชื้น ผลการทดลองพบว่า ทั้งปริมาณสารที่ก่อให้เกิด CO₂ และกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ต่างก็มีผลทำให้ปริมาณใยอาหารละลายน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยทางสถิติ และพบว่าแป้งกากั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพและผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมีปริมาณใยอาหารละลายน้ำ (21.35 g/100 g) สูงกว่าแป้งกากั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ แต่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (2.30 g/100 g) และแป้งกากั่วเหลืองที่ไม่มีการเติม CO₂ แต่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (4.67 g/100 g) อีกทั้งการปรับสภาพยังช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ และน้ำมัน เมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

Yoo et al. (2011) ทำการศึกษาการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสในเปลือกถั่วเหลืองด้วยสารเคมี และกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงที่สุด การใช้สารเคมีในการปรับสภาพแบ่งเป็น 2 วิธี คือ การใช้ H₂SO₄ 1% w/w และการใช้ NaOH 1% w/w เปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการปรับสภาพถั่วสารเคมีจะถูกนำไปย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลส และการปรับสภาพอีกวิธีด้วยผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ อุณหภูมิ 80, 110 และ 140°C ความเร็วรอบสกรู 420 rpm และทำการผสมแป้งข้าวโพด 10 และ 20% เพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินงาน ผลการทดลองพบว่า การปรับสภาพโดยใช้ NaOH 1% w/w ทำให้ปริมาณลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส มีค่ามากที่สุดที่ 11.66, 14.59 และ 66.72%d.b. ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับเปลือกถั่วที่ไม่ผ่านการปรับสภาพพบว่าปริมาณกลูโคสจากเปลือกถั่วที่ผ่านวิธีการปรับสภาพด้วยกรด ต่าง และกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมีค่าเพิ่มขึ้น 69.6, 128.7 และ 132.2% ตามลำดับ

Ai et al. (2016) นำแป้งถั่วทั้งหมด 4 ชนิด (Zorro Black, Medalist Navy, Merlot Small Red และ Fuji Otebo) มาผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ค่า L/D 25:1 ที่สภาวะต่าง ๆ พบว่ากระบวนการเอ็กซ์ทรูชันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแป้ง และโปรตีนไม่มากนัก แต่ส่งผลให้เกิดการเจลาติไนซ์ และการเสียสภาพโปรตีน แต่เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยแป้งของแป้งถั่วที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูชัน และไม่ผ่านการเอ็กซ์ทรูชัน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เป็นผลให้ค่าคุณสมบัติความหนืด (pasting property) และค่าความสามารถในการอุ้มน้ำเปลี่ยนแปลงไป สำหรับน้ำตาลกราฟฟิโนส และสตาซิโอส ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดอาการท้องอืด พบว่าถั่วทั้ง 4 ชนิดที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูชันมีปริมาณกราฟฟิโนสลดลง แต่กลับมีปริมาณสตาซิโอสเพิ่มขึ้น สำหรับซูโครสมีค่าไม่เป็นไปตามแนวโน้ม กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันสามารถใช้ผลิตอาหารที่ทำจากถั่วให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามต้องการ และเพิ่มคุณค่าทางอาหารได้

Hejdysz et al. (2015) นำถั่วปากอ้า (*Vicia faba*) 5 สายพันธุ์มาใช้เป็นอาหารไก่ โดยแบ่งไก่ออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมด้วยถั่วปากอ้า และกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมถั่วปากอ้าที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูชันที่ความชื้นวัตถุดิบ 22% อุณหภูมิ 135±10°C ในอัตราส่วน 60:40 (w/w) จากการทดลองพบว่าหลังการเอ็กซ์ทรูชัน ถั่วปากอ้ามีความแตกต่างของปริมาณโปรตีน แป้ง และกรดแอมิโนอย่างไม่มีนัยสำคัญกับถั่วปากอ้าที่ไม่ผ่านการเอ็กซ์ทรูชัน แต่แป้งที่ทนต่อการย่อย (Resistant starch, RS), กรดไฟติก และตัวยับยั้งทริปซิน (trypsin inhibitor) มีปริมาณลดลงและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ปรากฏ (Apparent metabolizable energy, AME_N) ของถั่วปากอ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงทำให้กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่สามารถพัฒนาคุณค่าทางอาหาร และช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยของถั่วปากอ้าได้

Gimenez et al. (2012) ทำเส้นสปาเก็ตตี้จากแป้งข้าวโพด และแป้งถั่วปากอ้า (*Vicia faba*) ในอัตราส่วน 70:30 ด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ทำการปรับความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้น (28, 31 และ 34%) และอุณหภูมิในระหว่างการผลิต (80, 90 และ 100°C) แต่คงที่ความเร็วรอบสกรู 60 rpm พบว่าเส้นสปาเก็ตตี้จากแป้งข้าวโพดผสมแป้งถั่วปากอ้าไป 30% มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 15% และใยอาหาร 8.5% การเพิ่มอุณหภูมิระหว่างการเอ็กซ์ทรูชันช่วยทำให้การเปลี่ยนของวัตถุดิบ จากของแข็งเป็นของเหลวหนึ่งง่ายขึ้น และการเพิ่มความชื้นช่วยให้วัตถุดิบไหลง่ายขึ้น ลดแรงเสียดทาน สำหรับอัตราการขยายตัว พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ และลดปริมาณความชื้น วัตถุดิบ และการเจลาติไนซ์จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการเอ็กซ์ทรูชัน และความชื้นวัตถุดิบ ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

Zhu et al. (2010) ศึกษาความสัมพันธ์ของคุณลักษณะทางกล และโครงสร้างจุลภาคของ เอ็กซ์ทรูเดทจากโปรตีนถั่วเหลืองผสมกับแป้งข้าวโพด ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ในระหว่างการเอ็กซ์ทรูชัน ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเร็วรอบสกรู (230 และ 330 rpm) และปริมาณ โปรตีนถั่วเหลือง (10%, 20%, 30% และ 50%) จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเร็วยรอบสกรูจาก 230 rpm เป็น 330 rpm ส่งผลให้ค่า SME อัตราการพอง ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และ ความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) เพิ่มขึ้น แต่กลับส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าลดลง สำหรับ ผลกระทบของปริมาณโปรตีนถั่วเหลือง พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองจาก 20% เป็น 30% มีผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และอัตราการพอง และความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) มีค่า ลดลงอย่างมีนัยอย่างใดก็ตาม พบว่าการเพิ่มปริมาณโปรตีนถั่วเหลืองจาก 10% เป็น 20% ไม่ส่งผลต่อ อัตราการพองอย่างมีนัย

Natabirwa et al. (2018) ศึกษาผลกระทบของความชื้นวัตถุดิบ อุณหภูมิ และความเร็วรอบ สกรูในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันที่ส่งผลต่อคุณค่าทางอาหาร อัตราการพองตัว ความหนาแน่น ค่า ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) ค่าความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) และเนื้อสัมผัสด้วย วิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) และการหาความพึงพอใจหลาย ด้าน (multi-response desirability function) ใช้ถั่ว Roba1 เป็นวัตถุดิบในการทดลอง ออกแบบ การทดลองด้วยวิธี Box-Behnken และดำเนินการทดลองด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) ผลการทดลองพบว่าความชื้นวัตถุดิบ อุณหภูมิ และความเร็วรอบสกรูส่งผลอย่างมี นัยสำคัญต่อคุณสมบัติของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้ การเพิ่มความชื้นวัตถุดิบที่อุณหภูมิต่ำส่งผลให้อัตราการ พองตัว และความสามารถในการละลายน้ำมีค่าลดลง และจากการหาสถานะที่เหมาะสมพบว่ามีความ พึงพอใจรวม (Overall desirability) เท่ากับ 0.75

Jozinovic et al. (2016) ศึกษาผลกระทบของแป้งสาลี spelt ต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ เอ็กซ์ทรูเดทที่ทำจากข้าวโพดบด ซึ่งอัตราส่วนข้าวโพดบดต่อแป้งสาลี spelt คือ 95:5, 90:10 และ 80:20 จากผลการทดลอง พบว่า การเพิ่มปริมาณแป้งสาลี spelt ในวัตถุดิบ ทำให้อัตราการพอง ลดลง ในขณะที่ความหนาแน่น และความแข็งเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และ ความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) ของวัตถุดิบ เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังกระบวนการเอ็กซ์ทรู ชัน

Promsakha na Sakon Nakhon et al. (2018) ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำขนมขบเคี้ยวจากฟักทองผสมข้าวกล้องงอกด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ทำการศึกษาผลของปริมาณฟักทอง (10%, 20% และ 30%) และความชื้นวัตถุดิบ (13%, 16% และ 19%) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระ และคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของเอ็กซ์ทรูเดท ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณฟักทอง ทำให้ความหนาแน่น ความแข็ง ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด (Total phenolic content, TPC) และความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระ เพิ่มขึ้น ในขณะที่การลดปริมาณความชื้นวัตถุดิบ ส่งผลให้ ปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด และความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระ เพิ่มขึ้น หาสภาวะที่เหมาะสมด้วยวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง (RSM) และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตได้แก่ ปริมาณฟักทอง 10-13% และความชื้นวัตถุดิบ 13-14%

Alam et al. (2016) หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตขนมขบเคี้ยวพร้อมทานจากถั่วเหลืองที่ผ่านการสกัดไขมัน ข้าว กากแคร้รอต และเศษดอกกะหล่ำ ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิหน้าแปลน (125-175°C) ความเร็วรอบสกรู (300-500 rpm) และปริมาณข้าวในส่วนผสม (65-85 g/100 g) ออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box Behnken และหาค่าตอบด้วยวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง (RSM) พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิหน้าแปลน ส่งผลให้ อัตราการพอง ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ความหนาแน่น และความแข็งมีค่าลดลง สำหรับการเพิ่มความเร็วยรอบสกรู ส่งผลให้ อัตราการพอง มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) ความหนาแน่น และความแข็งมีค่าลดลง ในส่วนของปริมาณข้าวในวัตถุดิบ พบว่าการเพิ่มปริมาณข้าว ส่งผลให้ อัตราการพอง ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความหนาแน่น และความแข็งมีค่าลดลง สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิหน้าแปลน 164°C ความเร็วรอบสกรู 313 rpm และปริมาณข้าว 85 g/100 g โดยมีค่าความพึงพอใจ (desirability) เท่ากับ 76.0%

Yagci and Gogus (2009) หาผลกระทบของปริมาณความชื้นวัตถุดิบ (12-18%) อุณหภูมิบาร์เรล (150-175°C) ความเร็วรอบสกรู (200-280 rpm) และอัตราส่วนของปริมาณข้าวบด (67%) แป้งสาลี (8-20%) แป้งถั่วเฮเซลนัทที่ผ่านการสกัดไขมัน (Partially defatted hazelnut flour, PDHF) (5-15%) และของเหลือทิ้งจากผลไม้ (3-7%) ในวัตถุดิบ ด้วยวิธีการหาพื้นผิวตอบสนอง ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณ PDHF เป็นผลให้ อัตราการพอง และความแข็งมีค่าลดลง สำหรับการเพิ่มปริมาณความชื้นวัตถุดิบ และลดอุณหภูมิบาร์เรล พบว่า อัตราการพองส่วนใหญ่ลดลง ในส่วนของการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูที่ PDHF และของเหลือทิ้งจากผลไม้ปริมาณไม่มากนัก พบว่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น

Kristiawan et al. (2018) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแป้ง และโปรตีนของแป้งถั่วในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแป้งถั่วลันเตาเหลืองไร้เปลือก (dehulled yellow pea flour) (แป้ง 48.2% และโปรตีน 23.4%) ถูกป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ โดยทำการปรับแต่งความชื้นวัตถุดิบ (18-35%) อุณหภูมิหน้าแปลน (115-165°C) และ SME (50-1200 kJ/kg) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิหน้าแปลนจาก 155 ถึง 165°C ทำให้การละลายของโปรตีนในสารละลาย sodium dodecyl sulphate (SDS) ลดลง และการเพิ่ม SME ส่งผลให้ความหนาแน่น และความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) มีค่าลดลง แต่อัตราการพอง และความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) กลับเพิ่มขึ้น

Azzollini et al. (2018) ศึกษาผลกระทบของวัตฤดูติบ และสภาวะในการผลิตขนมขบเคี้ยว จากแป้งข้าวสาลี และหนอนนก (*Tenebrio molitor*) ต่อโครงสร้างจุลภาค เนื้อสัมผัส และความสามารถในการย่อยของเอนไซม์ทรูเทท ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณหนอนนก (0-20%) อุณหภูมิบาร์เรล (100-160°C) และความเร็วรอบสกรู (240-400 rpm) การศึกษาครั้งนี้ พบว่า เมื่อมีปริมาณหนอนนก 10% ในวัตฤดูติบ การเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรล และอุณหภูมิ ส่งผลให้ค่าอัตราการพองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อมีปริมาณหนอนนก 20% ในวัตฤดูติบ อัตราการพองมีค่าลดลง ความสามารถในการย่อยของแป้ง และโปรตีนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเพิ่มความเร็วรอบสกรู เนื่องจากการเพิ่มพลังงานกล ทั้งนี้ ปริมาณหนอนนกเพียง 10% ในวัตฤดูติบ เพียงพอสำหรับการผลิตเป็นอาหารโปรตีนสูง



บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้

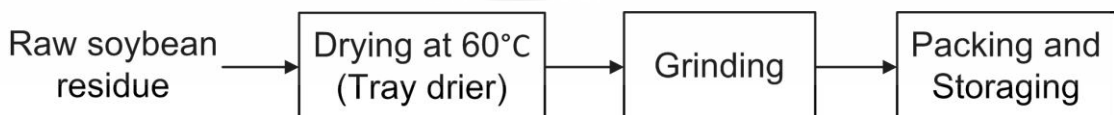
- ข้าวโพดบด
- กากถั่วเหลือง
- น้ำกลั่น

3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray drier)
- ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
- เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill)
- เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สกรูเดี่ยว (Single-screw extruder)
- เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier caliper)
- เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
- เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง
- เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
- เครื่องวัดสี HunterLab
- เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture analyzer TA.XT.plus)
- เครื่องวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ AquaLab

3.2 การเตรียมวัตถุดิบ

กากถั่วเหลืองที่ใช้ได้จากโรงงานทำนมถั่วเหลือง (ถั่วเหลืองไร้ทิพย์™) กากถั่วเหลืองเริ่มต้นมีความชื้น 89.39% นำมาทำแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด (tray drier) ที่ 60°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดค้อนเหวี่ยง (hammer mill) ผ่านตะแกรงเบอร์ 2 หลังผ่านการบด กากถั่วเหลืองมีขนาดอนุภาค 0.8-1.2 mm และนำมาเก็บไว้ในถุงโพลีเอทิลีนที่อุณหภูมิห้องก่อนนำมาใช้ทดลอง ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบแสดงในรูปที่ 3.1 ส่วนข้าวโพดเป็นข้าวโพดบด (Corn grit, No. 3) จากบริษัทไทยเมช โปรดักส์จำกัด



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

3.3 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

กากถั่วเหลืองและข้าวโพดบดถูกนำมาผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ และปรับความชื้นตามแผนการทดลองก่อนนำมาป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) ขนาด L/D = 9:1 ปรับอุณหภูมิ 100°C ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณกากถั่วเหลือง (20 30 และ 40%) ความชื้นวัตถุดิบ (14 16 และ 18%) ความเร็วรอบสกรู (370 400 และ 430 rpm) เอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ได้ถูกนำไปอบในเครื่องอบแห้งแบบถาด (tray drier) ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาที และนำไปใส่ถุงพลาสติกปิดผนึกก่อนนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ขั้นตอนการเอ็กซ์ทรูชันแสดงในรูปที่ 3.2 และวิธีการทดลองในการศึกษานี้แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี และทางกายภาพของวัตถุดิบ

3.4.1 ปริมาณความชื้น

นำถั่วลันเตาที่เตรียมพร้อมฝามาอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำถั่วลันเตาที่เตรียมพร้อมฝามาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง จากนั้นชั่งตัวอย่างวัตถุดิบประมาณ 2 g ลงในถั่วลันเตาที่เตรียมพร้อมฝามาอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 135°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเปิดฝาทิ้งไว้ให้เย็นในตู้อบลมร้อน เมื่อครบเวลา นำถั่วลันเตาที่เตรียมพร้อมฝามาออกจากตู้อบลมร้อน พร้อมปิดฝาทิ้งไว้ให้เย็นในตู้อบลมร้อน จากนั้นนำถั่วลันเตาที่เตรียมพร้อมฝามาใส่ในเตชเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที ชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 3 ตำแหน่ง ทำ 3 ครั้ง คำนวณค่าความชื้นจากสมการ (3.1)

$$\% (W/W) \text{ค่าความชื้น} = \frac{M_1 - M_2}{W_1} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย $M_1 =$ น้ำหนักวัตถุดิบก่อนอบ (g)

$M_2 =$ น้ำหนักวัตถุดิบหลังอบ (g)

3.4.2 ปริมาณโปรตีน (Crude Protein, AOAC, 2005)

วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนในกากถั่วเหลืองด้วยวิธี Kjeldahl และใช้ค่าแฟคเตอร์ถั่วเหลือง 5.71 โดยมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ดังนี้

- 1) ชั่งตัวอย่างวัตถุดิบประมาณ 0.25-1.00 g K_2SO_4 16.7 g $CuSO_4$ 0.01 g TiO_2 0.6 g และ H_2SO_4 20 mL ลงในขวดรูปชมพู่สำหรับการย่อย (digestion flask)
- 2) นำขวดรูปชมพู่ข้างต้นไปให้ความร้อน จนกระทั่งควันสีขาวในขวดรูปชมพู่หายไป จากนั้นคนตัวอย่างในขวดรูปชมพู่เบา ๆ และให้ความร้อนต่ออีก 40 นาที
- 3) เมื่อตัวอย่างในขวดรูปชมพู่เย็นลง ค่อย ๆ เติมน้ำปริมาตร 250 mL และทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) เติมสารละลาย NaOH ที่มากพอลงในขวดรูปชมพู่ที่มีตัวอย่าง ต่อขวดรูปชมพู่เข้ากับคอนเดนเซอร์ในทันที และให้ความร้อน เพื่อทำการกลั่นแยกแก๊สแอมโมเนีย
- 5) ผสมสารละลายมาตรฐาน HCl 0.5 mol/L กับ H₂O ในบีกเกอร์ที่รองรับสารละลายที่ได้จากการกลั่น
- 6) นำสารละลายในบีกเกอร์จากข้อ 5 มาไตเตรตหาปริมาณกรดด้วยสารละลายมาตรฐาน NaOH 0.1 mol/L โดยใช้เมธิลเรด (methyl red) เป็นอินดิเคเตอร์
- 7) ทำตั้งแต่ข้อ 1-6 กับขวดสารละลายเปล่า (blank) ที่ไม่มีการเติมตัวอย่างเอ็กซ์ทราคเตท และคำนวณปริมาณโปรตีนจากสมการ (3.2)

$$\% \text{Crude protein} = \frac{[(M_{\text{HCl}})(\text{mL}_{\text{HCl}}) - (\text{mL}_{\text{bk}})(M_{\text{NaOH}}) - (\text{mL}_{\text{NaOH}})(M_{\text{NaOH}})] \times 1400.67 \times 5.71}{W} \quad (3.2)$$

โดย M_{HCl} = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน HCl 0.5 mol/L
 mL_{HCl} = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน HCl 0.5 mol/L ที่ใช้ (mL)
 mL_{bk} = ปริมาตรของเบสมาตรฐานที่ใช้ในการไตเตรตกรดมาตรฐาน 1 mL-ปริมาตรของเบสมาตรฐานที่ใช้ในการไตเตรตสารละลายกรดจากขวดสารละลายเปล่า (blank)
 M_{NaOH} = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน NaOH 0.1 mol/L ที่ใช้
 mL_{NaOH} = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน NaOH 0.1 mol/L ที่ใช้ (mL)
 W = น้ำหนักของตัวอย่างเอ็กซ์ทราคเตท

3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเอ็กซ์ทราคเตท

3.5.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content, AOAC, 2005)

นำถั่วยอลูมิเนียมพร้อมฝามาอบไล่ความชื้นในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำถั่วยอลูมิเนียมพร้อมฝามาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ซึ่งตัวอย่างเอ็กซ์ทราคเตทที่ผ่านการบด (ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 30) ประมาณ 2 g ลงในถั่วยอลูมิเนียม และนำถั่วยอลูมิเนียมที่ใส่ตัวอย่างพร้อมฝา อบในตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 135°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเปิดฝาลั่วยอลูมิเนียมวางไว้ในตู้อบลมร้อน เมื่อครบเวลา นำถั่วยอลูมิเนียมออกจากตู้อบลมร้อน พร้อมปิดฝาลั่วยอลูมิเนียมทันที นำถั่วยอลูมิเนียมดังกล่าวใส่ในเคซิเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ทำ 3 ครั้ง คำนวณค่าความชื้นจากสมการ (3.1)

3.5.2 ค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity, a_w)

ซึ่งตัวอย่างเอ็กซ์ทราคเตทที่ผ่านการบด และผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 30 ใส่ลงในภาชนะที่ใช้สำหรับวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ ประมาณ 2 g จากนั้นนำภาชนะพร้อมตัวอย่างไปวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ ด้วยเครื่อง AquaLab series 3TE ทำการวิเคราะห์ 3 ครั้ง

3.5.3 อัตราการพอง (Expansion ration, ER, Alam et al., 2016)

วัดค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้ด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ทำ 10 ครั้ง คำนวณอัตราการพองได้จากสมการ (3.3)

$$ER = \frac{d_E}{d_D} \quad (3.3)$$

โดย d_E = เส้นผ่านศูนย์กลางของเอ็กซ์ทรูเดท (cm)

d_D = เส้นผ่านศูนย์กลางของรูหน้าแปลน (cm)

3.5.4 ความหนาแน่น (Density, Alam et al., 2016)

วัดความยาว และเส้นผ่านศูนย์กลางของเอ็กซ์ทรูเดทด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ และชั่งน้ำหนักเอ็กซ์ทรูเดทด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ทำ 10 ครั้ง คำนวณค่าความหนาแน่นจากสมการ (3.4)

$$\text{Density} = \frac{4m}{\pi d^2 L} \quad (3.4)$$

โดย m = น้ำหนักของเอ็กซ์ทรูเดท (g)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของเอ็กซ์ทรูเดท (cm)

L = ความยาวของเอ็กซ์ทรูเดท (cm)

3.5.5 ความต่างสีรวม (Total Color Difference, ΔE , Jozinovic et al., 2016)

วิเคราะห์ความต่างสีรวมด้วยเครื่อง HunterLab ในระบบสี CIE ค่าสีที่ได้แสดงในค่า L^* (ความสว่าง(-)/ความมืด(+)) a^* (สีแดง(+)/สีเขียว(-)) และ b^* (สีเหลือง(+)/สีฟ้า(-)) ค่าความต่างสี (ΔE) คำนวณได้จากสมการ (3.5)

$$\Delta E = \sqrt{(L-L_0)^2 + (b-b_0)^2 + (a-a_0)^2} \quad (3.5)$$

โดย L = พารามิเตอร์ค่าความสว่างของวัตถุบิเริ่มต้น

a = พารามิเตอร์ค่าความเป็นสีแดงของวัตถุบิเริ่มต้น

b = พารามิเตอร์ค่าความเป็นสีเหลืองของวัตถุบิเริ่มต้น

L_0 = พารามิเตอร์ค่าความสว่างของตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดท

a_0 = พารามิเตอร์ค่าความเป็นสีแดงของตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดท

b_0 = พารามิเตอร์ค่าความเป็นสีเหลืองของตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดท

3.5.6 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption index, WAI) และ ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility index, WSI, Jozinovic et al., 2016)

ซึ่งตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดท (ผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 30) ปริมาณ 2.5 g ลงในหลอดเซนตริฟิว ด้วยเครื่องซิ่ง 4 ตำแหน่ง เติมน้ำกลั่นปริมาตร 30 mL ลงในหลอดเซนตริฟิวพร้อมตัวอย่าง คนให้เข้ากันที่อุณหภูมิห้องทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำหลอดเซนตริฟิวไปปั่นเหวี่ยงที่ 3000 rpm เป็นเวลา 15 นาที แยกตะกอนและส่วนใสออกจากกัน นำส่วนใสที่ได้ไปอบในตู้อบลมร้อนที่ 105°C จนน้ำหนักคงที่ ค่า WAI และ WSI คำนวณจากสมการ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ

$$WAI = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนเปียก (g)}}{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (g)}} \quad (3.6)$$

$$WSI(\%) = \frac{\text{น้ำหนักแห้งของส่วนใส (g)}}{\text{น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง (g)}} \times 100 \quad (3.7)$$

3.5.7 ความแข็ง และความกรอบ (Hardness and Crispness, Jozinovic et al., 2016)

ทำการวิเคราะห์ความแข็ง และความกรอบ ของตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดทด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส TA.XT.plus ที่ติดตั้งหัววัดแบบทรงกระบอก P/2 2 mm จากนั้นเปิดโปรแกรม Texture Exponent ทำการคาริเบรทหัววัด และความสูงของหัววัด จากนั้นตั้งค่าให้หัววัด กดลงบนตัวอย่าง เพียงครั้งเดียว โดยคลิกที่ T.A. → T.A. setting . → Libery เลือก Return to start จากนั้นเลือก Advanced option และตั้งค่า pre-test speed 1.0 mm/s test speed 1.0 mm/s post-test speed 10.0 mm/s ระยะห่าง 12 mm และค่า Acquisition rate 400 PPS. วัดค่าความแข็ง และความกรอบของตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดท 5 ครั้ง และบันทึกผลการทดลอง

3.5.8 ปริมาณโปรตีน (Crude protein)

ทำการคำนวณปริมาณโปรตีนในตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดทได้จากสมการ (3.8)

$$\% \text{โปรตีนในตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดท} = \left(\frac{P_C M_C - P_{SB} M_{SB}}{M_T} \right) \times 100 \quad (3.8)$$

โดย	P_C	=	ร้อยละโปรตีนในข้าวโพดบด
	M_C	=	ปริมาณข้าวโพดบดในวัตถุดิบ (g)
	P_{SB}	=	ร้อยละโปรตีนในกากถั่วเหลือง
	M_{SB}	=	ปริมาณกากถั่วเหลืองในวัตถุดิบ (g)
	M_T	=	ปริมาณวัตถุดิบ (g)

3.6 การวางแผนการทดลอง

ออกแบบการทดลองด้วยวิธี Box-Behnken (BBD) ที่ 3 ระดับ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบไปด้วย ความเร็วรอบสกรู 370-430 rpm (X_1) ปริมาณกากถั่วเหลือง 20-30% (X_2) และ ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้น 14-18% (X_3) ทำการทดลองอย่างสุ่ม ทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 5 ซ้ำ รวมการทดลองทั้งหมด 17 การทดลอง แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลอง

Run	Screw speed (X_1 , rpm)	Soybean residue (X_2 , %)	Moisture content (X_3 , %)
1	430	30	14
2	370	40	16
3	400	30	16
4	400	40	18
5	400	30	16
6	400	30	16
7	400	30	16
8	370	30	14
9	400	40	14
10	400	20	18
11	400	20	14
12	370	20	16
13	430	30	18
14	430	20	16
15	430	40	16
16	370	30	18
17	400	30	16

3.7 การวิเคราะห์ผลทางสถิติและการหาสถานะที่เหมาะสม

ผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์แบบถดถอยเพื่อสร้างเป็นสมการทำนายผลแบบโพลีโนเมียล อันดับที่ 2 (สมการ 3.9) ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรกับคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ (Jing and Chi, 2013)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (3.9)$$

โดยที่ Y คือ ปริมาณความชื้น ค่าแอกติวิตีของน้ำ อัตราการพอง ความหนาแน่น ความต่างสีรวม WAI WSI ความแข็ง และความกรอบ β_0 , β_{ii} และ β_{ij} คือ ค่าคงที่สมการ และ X_1 , X_2 และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรู ปริมาณกากถั่วเหลือง และความชื้นวัตถุดิบ ตามลำดับ ใช้การวิเคราะห์ ANOVA ในการหาความเหมาะสมของสมการ และค่า p -value ของสมการที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95%

การหาสถานะที่เหมาะสมใช้วิธีวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้าน (multi-response desirability function) โดยใช้เกณฑ์พิจารณาจาก อัตราการพอง ความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ ความแข็ง และปริมาณโปรตีนของผลิตภัณฑ์ในการตัดสินใจ โดยในฟังก์ชันความพึงพอใจของแต่ละคุณสมบัติถูกนำมาปรับแต่งเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Natabirwa et al., 2018) และเฉลี่ยเป็นค่าความพึงพอใจรวม (Overall desirability) ซึ่งค่าความพึงพอใจรวมสูงสุดแสดงถึงสถานะที่ดีที่สุด การวิเคราะห์ค่าความพึงพอใจรวมแสดงในสมการ (3.8)

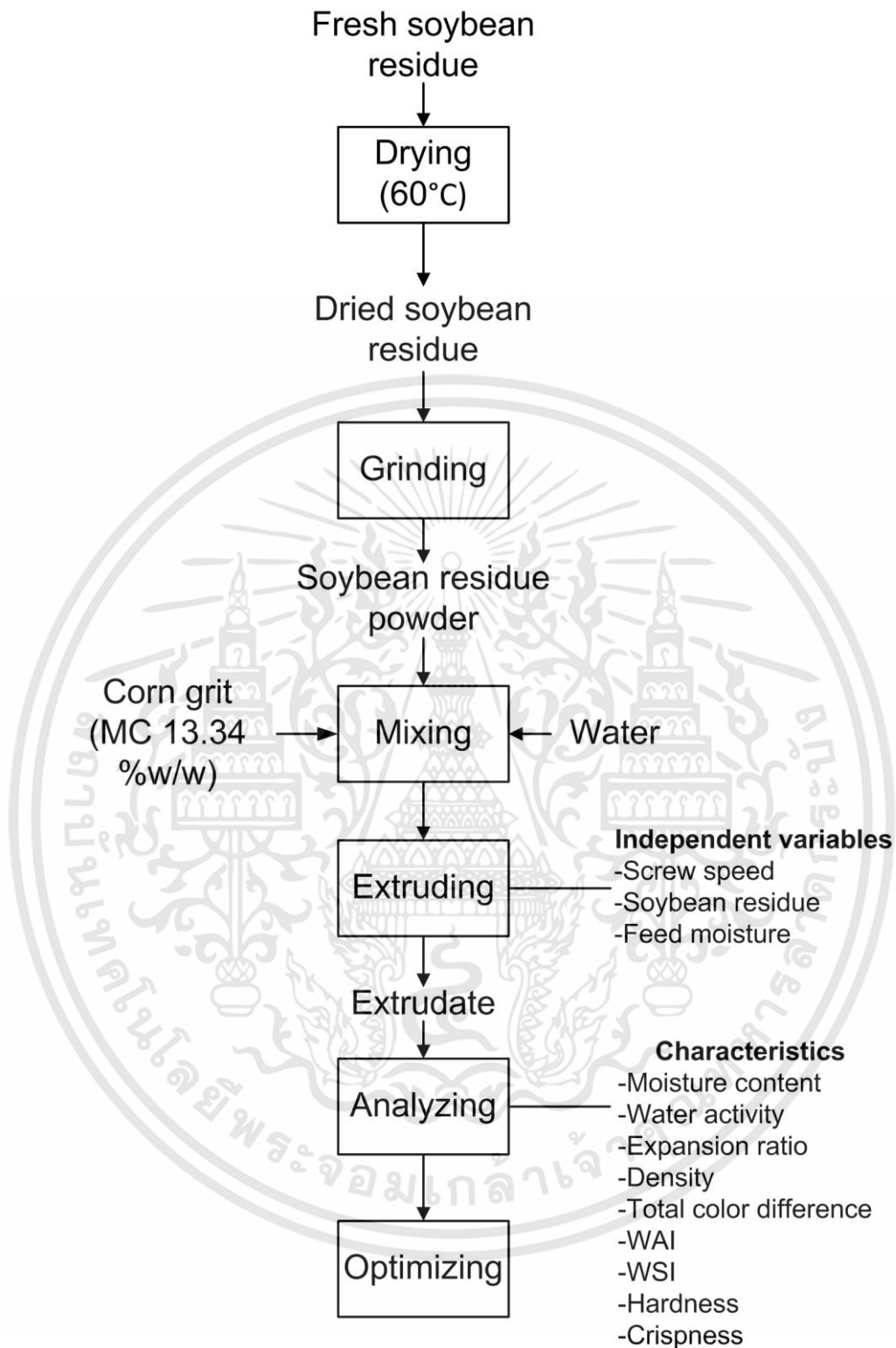
$$D = (d_1(y_1)d_2(y_2)\dots d_p(y_p))^{1/p} \quad (3.10)$$

โดยที่ D คือ ค่าความพึงพอใจรวม $d_p(y_p)$ คือ ฟังก์ชันความพึงพอใจ และ p คือ จำนวนคำตอบที่ใช้พิจารณา สำหรับการพิจารณาค่า $d_p(y_p)$ แต่ละตัวจะขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาคคุณสมบัตินั้น ๆ (สันติ, 2552) สำหรับงานวิจัยนี้กำหนดค่าอัตราการพองในช่วง 2.25-2.95 ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.10-0.25 g/cm³ เนื่องจากเป็นช่วงที่ได้จากการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้ข้าวโพดบดเสริมด้วยโยอาหาร และโปรตีนในวัตถุดิบ (Bisharat et al., 2013) ความสามารถในการดูดซับน้ำ และความแข็งกำหนดให้มีย่านน้อยที่สุด (Natabirwa et al., 2018) ส่วนค่า ความสามารถในการละลายน้ำและปริมาณโปรตีนกำหนดให้มีย่านมากที่สุด (Rathod and Annapure, 2017) และค่าความสำคัญมีค่าเท่ากับ 1 ทุกคุณสมบัติ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Design Expert 11 ในการคำนวณหาคำตอบ

3.8 การทดสอบทางประสาทสัมผัสผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้

ทำการคัดเลือกตัวอย่างผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากการผลิตในช่วงสภาวะที่เหมาะสมจำนวน 3 ตัวอย่างมาทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ชิมทดสอบ 10 คน

ทำการออกแบบแบบสอบถามเพื่อทดสอบการยอมรับในผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้ด้วยแบบทดสอบ Hedonic scaling test ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดลักษณะของผลิตภัณฑ์และการยอมรับผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง โดยให้ระดับของความชอบและไม่ชอบผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ระดับสเกลความชอบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ สเกลความชอบ 9 จุด (Nine-point hedonic scale) ซึ่งคำว่า Hedonic หมายถึง มีความพอใจในการกระทำ ผู้ทดสอบชิมสามารถให้ความพอใจของตนโดยการแสดงออกมาในรูประดับของความชอบและไม่ชอบผลิตภัณฑ์จากสเกลที่กำหนดทำการแปลระดับความรู้สึกของผู้ทดสอบเป็นตัวเลข ดังต่อไปนี้ ชอบมากที่สุด (Like extremely) มีคะแนนเป็น 9, ชอบมาก (Like very much) มีคะแนนเป็น 8, ชอบปานกลาง (Like moderately) มีคะแนนเป็น 7, ชอบเล็กน้อย (Like slightly) มีคะแนนเป็น 6, เฉยๆ (Neither like nor dislike) มีคะแนนเป็น 5, ไม่ชอบเล็กน้อย (Dislike slightly) มีคะแนนเป็น 4, ไม่ชอบปานกลาง (Dislike moderately) มีคะแนนเป็น 3, ไม่ชอบมาก (Dislike very much) มีคะแนนเป็น 2, ไม่ชอบมากที่สุด (Dislike extremely) มีคะแนนเป็น 1 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

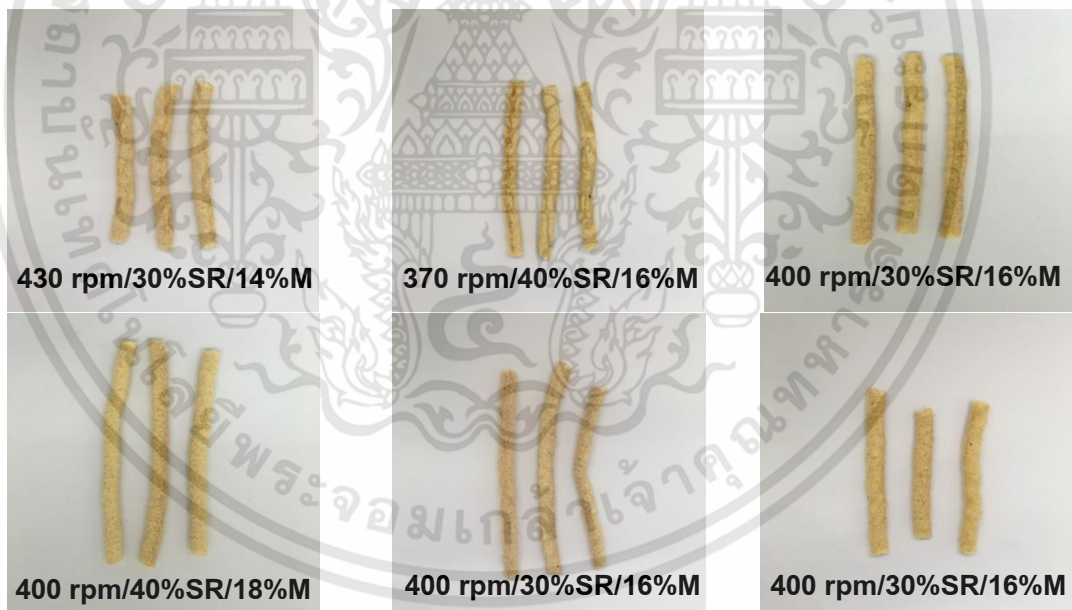
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติของวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ศึกษาประกอบด้วยกากถั่วเหลืองและข้าวโพดบดกากถั่วเหลืองสดเริ่มต้นมีความชื้น 89.39% และเมื่อนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C หลังจากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill) ได้เป็นกากถั่วเหลืองที่ประกอบไปด้วยความชื้น 6.75% และโปรตีน 22.56% ส่วนข้าวโพดบดประกอบไปด้วย ความชื้น 12.68% และโปรตีน 6.45%

ในการทดลองผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันได้นำวัตถุดิบทั้งสอง (กากถั่วเหลือง และข้าวโพดบด) ผสมกันตามอัตราส่วน และความชื้นต่าง ๆ ที่กำหนดในแผนการทดลองที่ 3.1 ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบกสิ (X₁), ปริมาณกากถั่วเหลือง (X₂) และปริมาณความชื้นวัตถุดิบ (X₃) ได้เอ็กซ์ทรูเดททั้ง 17 ตัวอย่าง แสดงในรูปที่ 4.1 เอ็กซ์ทรูเดททั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติ เช่น ปริมาณความชื้น ค่าแอสคิตีวิตีของน้ำ อัตราการพอง ความหนาแน่น ค่าความต่างสีรวม ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ ความแข็ง และความกรอบ ผลการทดลองที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1 และจากการคำนวณพบว่าเอ็กซ์ทรูเดทมีปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วง 9.67% ถึง 12.89%



รูปที่ 4.1 เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ



รูปที่ 4.1 (ต่อ) เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การออกแบบการทดลอง และผลการทดลอง

ความเร็วรอบ สกรู(X_1)	ปริมาณ กากถั่ว (X_2)	ความชื้น วัตถุดิบ (X_3)	ปริมาณ ความชื้น (%w.b.)	ค่าแอกติวิตี ของน้ำ	อัตราการ พอง (mm/mm)	ความ หนาแน่น (g/cm ³)	ค่าความ ต่างสี	WAI (g/g)	WSI (%)	ความแข็ง (N)	ความกรอบ (kg*s)
430	30	14	6.97	0.511	2.20	0.336	5.12	6.24	7.07	33.97	26.60
370	40	16	6.84	0.444	1.80	0.460	4.95	5.46	9.35	24.40	22.12
400	30	16	7.12	0.305	2.19	0.347	9.13	6.04	12.58	23.02	29.35
400	40	18	6.22	0.240	1.95	0.384	9.02	5.46	10.88	30.24	22.29
400	30	16	7.95	0.539	2.09	0.356	5.36	6.46	14.69	28.44	30.72
400	30	16	6.15	0.413	2.13	0.300	5.22	6.44	12.36	26.46	25.04
400	30	16	5.64	0.385	2.26	0.278	5.49	6.03	15.61	24.01	25.76
370	30	14	7.84	0.528	1.86	0.321	11.42	5.97	12.90	28.28	25.70
400	40	14	4.87	0.172	1.75	0.395	7.51	5.66	12.50	29.34	27.94
400	20	18	6.00	0.186	2.73	0.212	7.90	6.62	19.00	15.63	28.40
400	20	14	8.62	0.486	2.35	0.258	6.71	5.96	9.43	24.01	26.63
370	20	16	9.16	0.497	2.45	0.276	5.47	6.31	11.78	30.46	27.36
430	30	18	8.45	0.463	2.22	0.288	7.47	5.95	17.69	30.22	26.63
430	20	16	8.50	0.451	2.61	0.232	4.52	6.18	13.04	23.05	26.70
430	40	16	7.23	0.375	1.90	0.349	8.16	5.80	11.95	35.44	25.79
370	30	18	7.85	0.424	1.93	0.344	9.92	5.70	16.96	19.59	25.13
400	30	16	7.93	0.504	2.08	0.355	7.20	6.32	12.87	28.58	28.41

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ทางสถิติ

ตัวแปร	ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ 3.7								
	ปริมาณความชื้น	ค่าแอกติวิตีของน้ำ	อัตราการพอง	ความหนาแน่น	ความต่างสีรวม	WAI	WSI	ความแข็ง	ความกรอบ
β_0	6.96	0.4291	2.15	0.3271	6.48	6.26	13.62	26.10	27.86
X_1	-0.0675	-0.0114	0.11288*	-0.0246	-0.8126	0.0915	-0.1542	2.49	0.6843
X_2	-0.8903*	-0.0487	-0.3428*	0.0761*	0.6299	-0.3374*	-1.07	3.29*	-1.37
X_3	0.0277	-0.0482	0.0826*	-0.0102	0.4444	-0.0137	2.83*	-2.49	-0.55
X_1X_2	0.2629	-0.0059	-0.0138	-0.0165	1.04	0.1173	0.3351	4.61*	1.08
X_1X_3	0.3699	0.0139	-0.0132	-0.0177	0.9620	-0.0046	1.64	1.24	0.142
X_2X_3	0.9904*	0.0919*	-0.0447	0.0088	0.0795	-0.2150	-2.80*	2.32	-1.84
X_1^2	1.16*	0.1115*	0.0523	0.0063	0.0053	-0.1358	-0.6971	2.73	-1.34
X_2^2	-0.1900	-0.0990*	0.0924	-0.0042	-0.7019	-0.1811	-1.40	-0.4864	-1.02
X_3^2	-0.3428	-0.0592	-0.0451	-0.0108	2.01*	-0.1529	0.7262	-0.8051	-0.51
R^2	0.7658	0.8141	0.9426	0.8901	0.5740	0.8276	0.8405	0.8217	0.6858
p -value	0.1159	0.0601	0.0014*	0.0120*	0.4865	0.0482*	0.0382*	0.0532	0.2489
C.V. %	11.96	18.65	4.68	9.67	27.76	3.58	14.37	11.98	7.09

โดยที่ β_0 , X_1 , X_2 และ X_3 คือ ค่าคงที่ของสมการ ความเร็วรอบสกรู, กากถั่วเหลือง และความชื้นวัตถุดิบ ตามลำดับ และกำหนดให้ * หมายถึงตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)

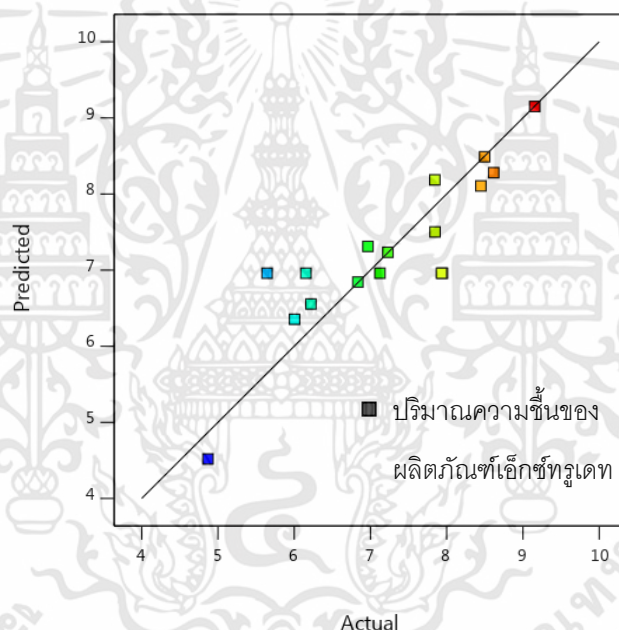
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2.1 ปริมาณความชื้น (Moisture content, MC)

จากการทดลองพบว่า ปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทราคต์ที่มีค่าอยู่ในช่วง 4.87-9.16%w.b. แสดงในตารางที่ 4.1 นำปริมาณความชื้นจากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบสกรู (X_1) ปริมาณกากถั่วเหลือง (X_2) และปริมาณความชื้นวัตถุดิบ (X_3) มาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 แสดงในสมการที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นจากการทดลอง และค่าจากการทำนายด้วยสมการ 4.1

$$MC = 6.96 - 0.068 * X_1 - 0.89 * X_2 + 0.028 * X_3 + 0.263 * X_1 X_2 + 0.37 * X_1 X_3 + 0.99 * X_2 X_3 + 1.16 * X_1^2 - 0.19 * X_2^2 - 0.343 * X_3^2 \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0.7658 \quad C.V. = 11.96\% \quad \text{และ} \quad p\text{-value} = 0.1159$$



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบอัตราการพองที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.1

เมื่อนำสมการที่ 4.1 มาพลอตกราฟ (แสดงในรูปที่ 4.3) พบว่า ค่าความชื้นเอ็กซ์ทราคต์มีค่าต่ำสุด ที่ความเร็วรอบสกรูประมาณ 400 rpm การเพิ่มหรือลดความเร็วรอบสกรูจาก 400 rpm ส่งผลให้ปริมาณความชื้นมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยังส่งผลให้อุณหภูมิภายในวัตถุดิบมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดการสุกไหม้และหดตัวที่บริเวณผนังเซลล์จำกัดการระเหยของน้ำจากเอ็กซ์ทราคต์ ปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทราคต์จึงมีค่าสูงขึ้น (มาฤดี, 2551) ส่วนการลดความเร็วรอบสกรูนั้น อาจทำให้วัตถุดิบมีอุณหภูมิลดลง เมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านออกจากหน้าแปลนการระเหยของไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated water) ลดลง จึงทำให้ยังคงมีความชื้นในผลิตภัณฑ์

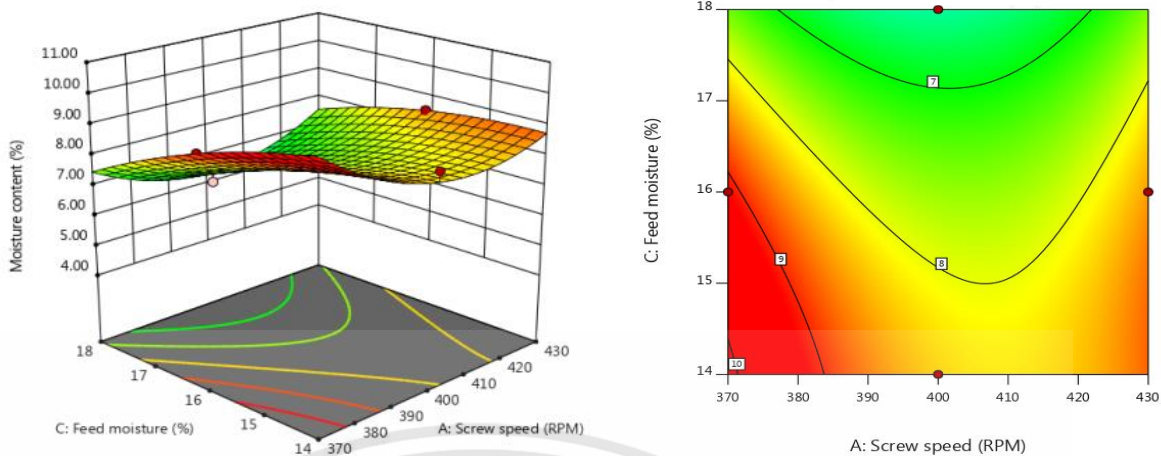
ในขณะที่ การเพิ่มปริมาณกากถั่วเหลือง ส่งผลให้ปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทราคต์มีค่าลดลง เนื่องจากความชื้นวัตถุดิบถูกดูดซับโดยใยอาหารและโปรตีนในกากถั่วเหลือง (Maskan and Altan, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

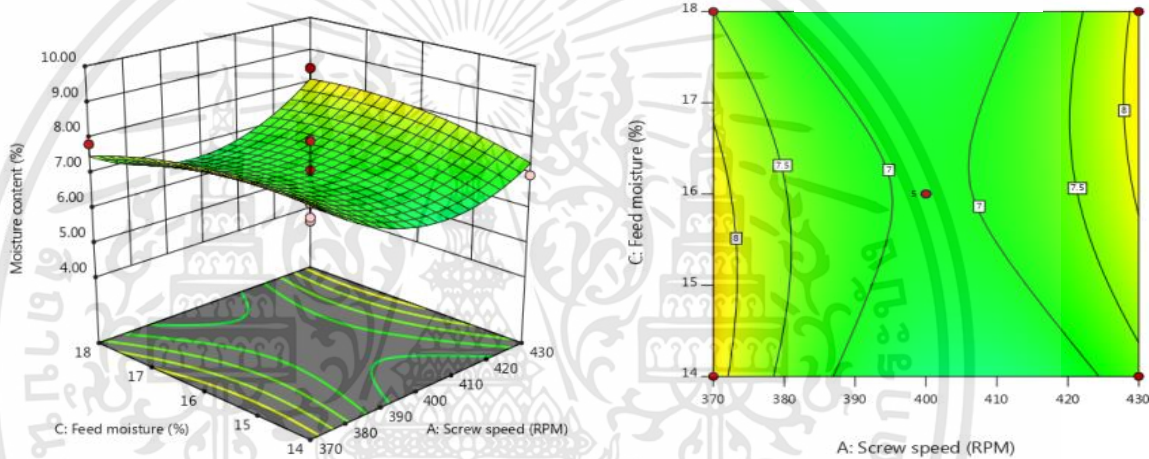
สำหรับการเพิ่มปริมาณความชื้นวัตถุดิบเมื่อผสมปริมาณกากถั่วเหลือง 20% ความชื้นวัตถุดิบที่ลดลง ส่งผลให้ปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทราเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจาก ความชื้นภายในวัตถุดิบมีปริมาณไม่มากพอที่จะทำให้แบ่งภายในวัตถุดิบเกิดการเจลาติไนซ์ที่สมบูรณ์ ความสามารถในการดูดซับน้ำจึงลดลง เป็นสาเหตุให้ความชื้นภายในเอ็กซ์ทราที่มีค่าสูง ในขณะที่เมื่อผสมปริมาณกากถั่วเหลือง 30% ความชื้นวัตถุดิบไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทรามากนัก แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อผสมปริมาณกากถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นเป็น 40% ปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทราที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณความชื้นวัตถุดิบสูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้แรงเสียดทาน และแรงเฉือนภายในวัตถุดิบมีค่าต่ำเกินไป อุณหภูมิภายในวัตถุดิบจึงลดลง เมื่อเอ็กซ์ทราออกจากรูลาน้ำที่ระเหยออกจากเอ็กซ์ทราจึงมีปริมาณไม่มากเท่าที่ควร



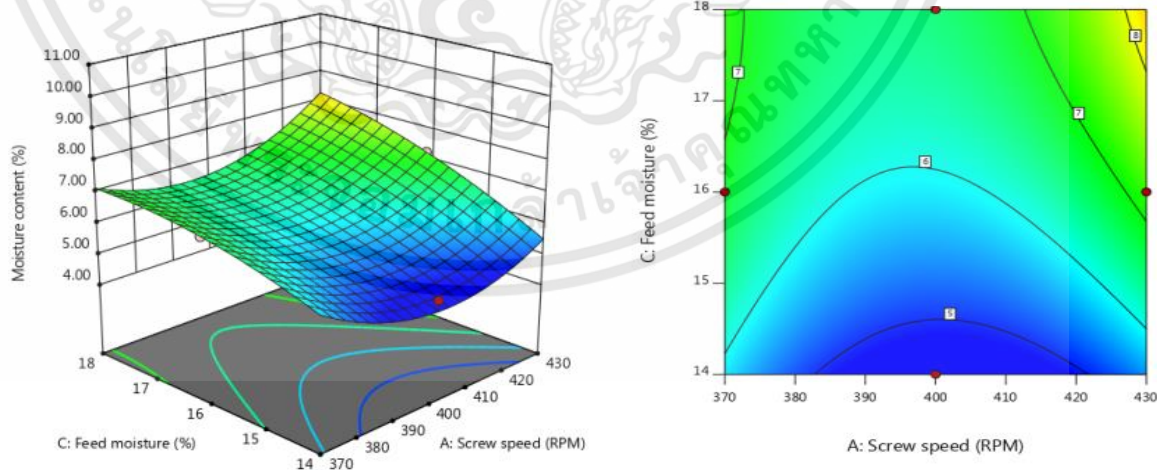
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ที่ระดับปริมาณกากถั่วเหลือง 20%



b) ที่ระดับปริมาณ กากถั่วเหลือง 30%



c) ที่ระดับปริมาณกากถั่วเหลือง 40%

รูปที่ 4.3 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดท

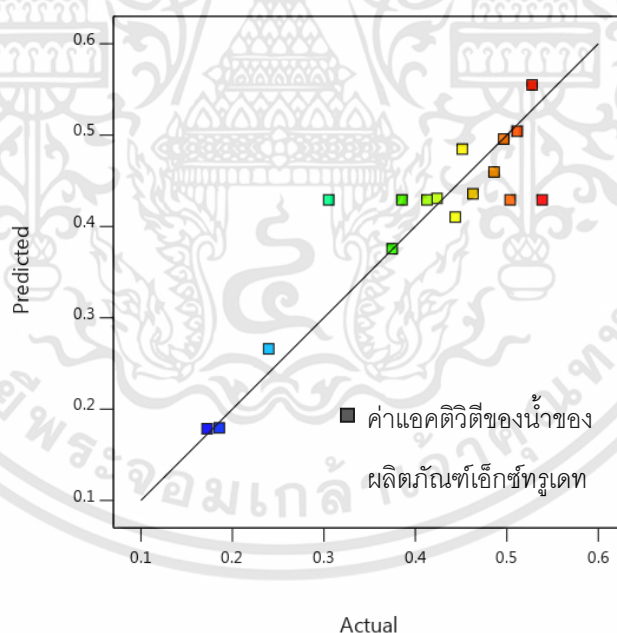
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity, a_w)

ค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity, a_w) คือค่าอัตราส่วนระหว่างความดันไอของน้ำในอาหาร (P) และความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ (P_0) ค่าแอกติวิตีของน้ำแสดงถึงปริมาณน้ำอิสระซึ่งใช้ในการเคลื่อนย้ายสารอาหาร ดำเนินการทำปฏิกิริยาที่ใช้เอ็นไซม์ และปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่าง ๆ จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าแอกติวิตีของน้ำสำหรับการเจริญที่แตกต่างกัน หากค่าแอกติวิตีของน้ำลดลงอย่างกะทันหัน จะส่งผลให้เซลล์สูญเสียระบบการทำงานภายใน ซึ่งเป็นพื้นฐานในการควบคุม และยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหาร (Yamned, 2002) และลดการเกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัส (Sharif et al., 2014) เอ็กซ์ทราคต์ที่ได้จากการทดลองมีค่าแอกติวิตีของน้ำอยู่ที่ 0.172-0.539 ผลการทดลองจากสภาวะต่าง ๆ เมื่อนำค่าตัวแปรความเร็วรอบสกรู (X_1) ปริมาณกากถั่วเหลือง (X_2) และปริมาณความชื้นวัตถุดิบ (X_3) ที่ศึกษา มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 สามารถแสดงได้ในสมการที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าแอกติวิตีของน้ำจากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายด้วยสมการ 4.2

$$A_w = 0.4291 - 0.0114 * X_1 - 0.0487 * X_2 - 0.00482 * X_3 - 0.0059 * X_1 X_2 + 0.0139 * X_1 X_3 + 0.0919 * X_2 X_3 + 0.1115 * X_1^2 - 0.099 * X_2^2 - 0.0592 * X_3^2 \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0.8141 \quad C.V. = 18.65\% \quad \text{และ} \quad p\text{-value} = 0.0601$$



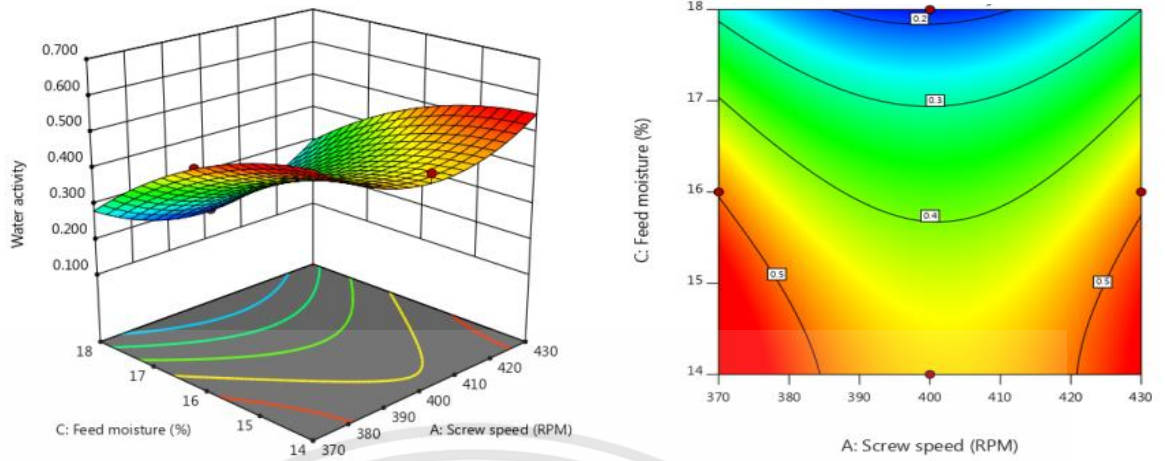
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าแอกติวิตีของน้ำที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.2

เมื่อนำผลการทดลองมาพลอตในรูปที่ 4.5 จะเห็นว่า ที่ความเร็วรอบสกรูประมาณ 400 rpm ค่าแอกติวิตีของน้ำมีค่าต่ำที่สุด การเพิ่มความเร็วยรอบสกรูจาก 400 rpm ส่งผลให้ค่าแอกติวิตีของน้ำเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจาก อุณหภูมิของวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้น ทำให้ผนังเซลล์เอ็กซ์ทราคต์เกิดการไหม้ การระเหยของน้ำจากเอ็กซ์ทราคต์สู่บรรยากาศหลังผ่านรูลหน้าแปลนจึงลดลง เป็นผลให้ภายในเอ็กซ์ทราคต์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

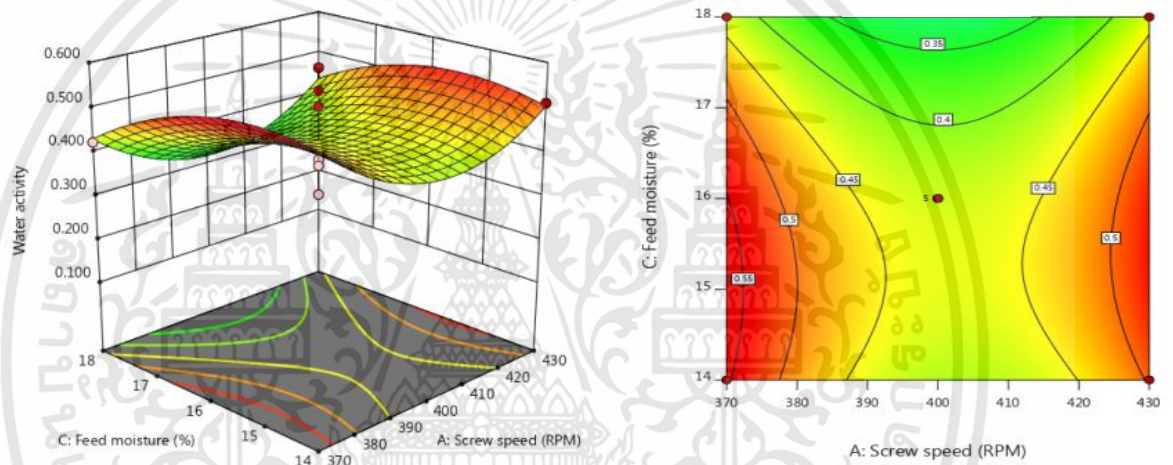
ยังคงมีความดันไอของน้ำสูง ในขณะที่การลดความเร็วรอบสกรู ส่งผลให้ค่าแอกติวิตีของน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจาก ภายในวัตุดิบมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดปริมาณไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated water) ลดลง ความดันไอของน้ำภายในเอ็กซ์ทรูเดทจึงมีค่าสูง

ในขณะที่ ปริมาณกากถั่วเหลืองที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ค่าแอกติวิตีของน้ำลดลง อาจเนื่องมาจาก ปริมาณโปรตีน และใยอาหารในกากถั่วเหลืองดูดซับความชื้นในวัตุดิบ ส่งผลให้ความดันไอของน้ำในเอ็กซ์ทรูเดทมีค่าลดลง ค่าแอกติวิตีของน้ำจึงลดลง

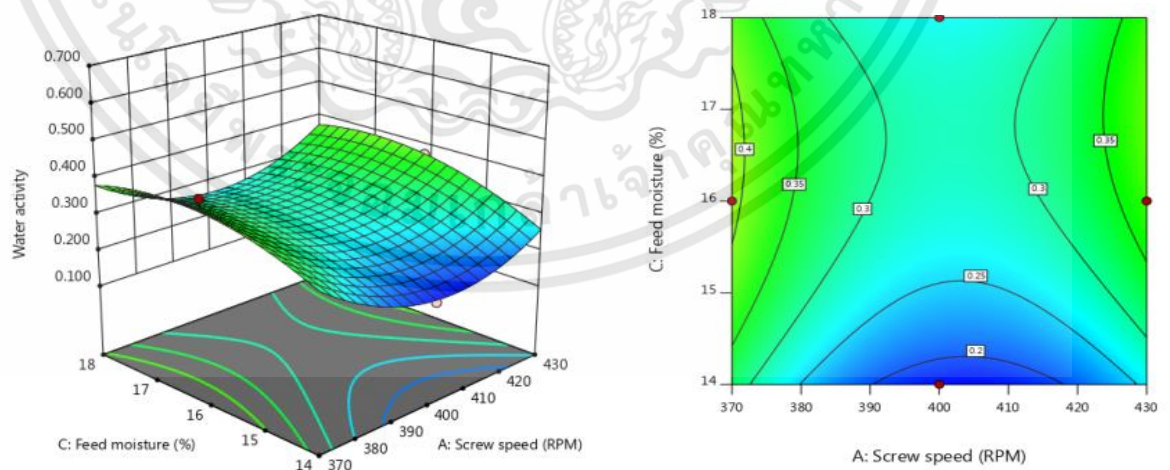
สำหรับผลกระทบของความชื้นวัตุดิบต่อปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดท พบว่า เมื่อผสมปริมาณกากถั่วเหลือง 20% การเพิ่มปริมาณความชื้นวัตุดิบ มีผลให้ค่าแอกติวิตีของน้ำของเอ็กซ์ทรูเดทมีลดลง สาเหตุอาจเกิดจาก น้ำภายในวัตุดิบถูกดูดซับด้วยเม็ดแป้งในระหว่างการเจลาติไนซ์ (Gelatinization) ความดันไอของน้ำภายในเอ็กซ์ทรูเดทจึงมีค่าลดลง ในขณะที่เมื่อผสมปริมาณกากถั่วเหลือง 30% ความชื้นวัตุดิบไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าแอกติวิตีของน้ำมากนัก และในทางตรงกันข้าม เมื่อผสมปริมาณกากถั่วเหลือง 40% การเพิ่มขึ้นของความชื้นวัตุดิบ ส่งผลให้ค่าแอกติวิตีของเอ็กซ์ทรูเดทเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจาก ปริมาณความชื้นวัตุดิบที่สูงขึ้น ส่งผลให้แรงเสียดทาน และแรงเฉือนภายในวัตุดิบลดลง เป็นผลให้อุณหภูมิภายในวัตุดิบมีค่าลดลง ปริมาณไอน้ำที่ออกสู่บรรยากาศหลังเอ็กซ์ทรูเดทออกจากรูหน้าแปลนจึงต่ำลง เป็นสาเหตุให้ ความดันไอของน้ำในเอ็กซ์ทรูเดทมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า ค่าแอกติวิตีของน้ำแปรผันตรงกับปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดท (Coefficient of correlation = 0.75) เนื่องจากความดันไอของน้ำในเอ็กซ์ทรูเดทที่เพิ่มขึ้น



a) ที่ระดับปริมาณกากถั่วเหลือง 20%



b) ที่ระดับปริมาณกากถั่วเหลือง 30%



c) ที่ระดับปริมาณกากถั่วเหลือง 40%

รูปที่ 4.5 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อค่าแอกติวิตีของน้ำของเอ็กซ์ทรูเดท

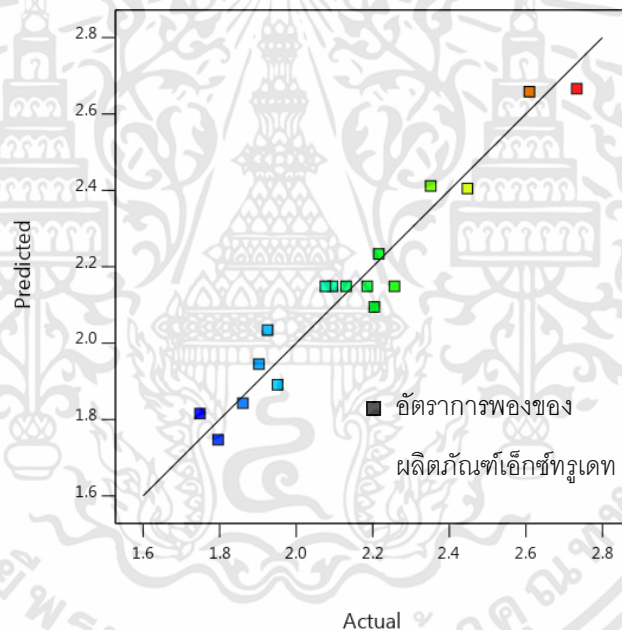
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 อัตราการพอง (Expansion ratio, ER)

อัตราการพองของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่สภาวะต่าง ๆ อยู่ในช่วง 1.75-2.73 mm/mm (แสดงในตารางที่ 4.1) เมื่อนำค่าตัวแปรความเร็วรอบสกรู (X_1) ปริมาณกากถั่วเหลือง (X_2) และปริมาณความชื้นวัตถุดิบ (X_3) ที่ศึกษา มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 เพื่ออธิบายอัตราการพองของเอ็กซ์ทรูเดท ผลที่ได้แสดงในสมการที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 การแสดงเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง และค่าจากการทำนายด้วยสมการ 4.3

$$ER = 2.15 + 0.113 * X_1 - 0.343 * X_2 + 0.083 * X_3 - 0.014 * X_1 X_2 - 0.013 * X_1 X_3 - 0.045 * X_2 X_3 - 0.052 * X_1^2 + 0.092 * X_2^2 - 0.045 * X_3^2 \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0.9426 \text{ ค่า C.V.} = 4.68\% \text{ และ p-value} = 0.0014$$



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบอัตราการพองที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.3

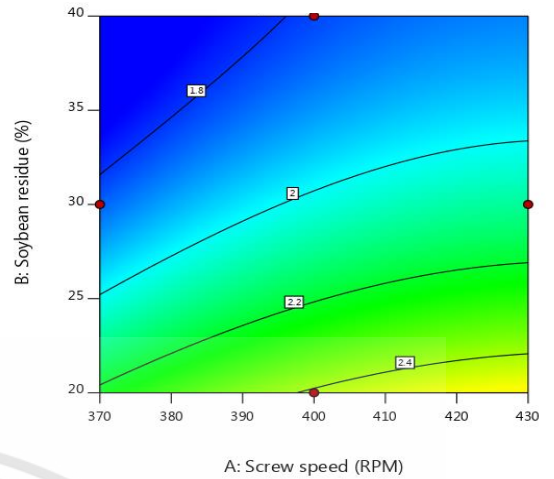
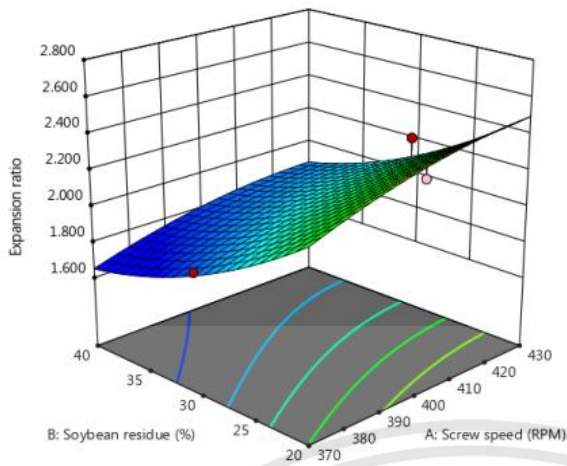
เมื่อนำสมการ 4.3 มาพลอตกราฟแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบสกรู ส่งผลให้อัตราการพองมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะ การเพิ่มความเร็วยรอบสกรูทำให้ความดันภายในวัตถุดิบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อวัตถุดิบถูกอัดผ่านรูหน้าแปลน ความชื้นที่อยู่ภายในวัตถุดิบเกิดการเคลื่อนที่จากวัตถุดิบออกสู่บรรยากาศได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้มีการพองตัวเพิ่มขึ้น (สันติ, 2551)

ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มปริมาณกากถั่วเหลืองทำให้อัตราการพองมีค่าลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jozivonic et al. (2016) ; Promsakha na Sakon Nakhon et al. (2018) เนื่องจากปริมาณความชื้นในวัตถุดิบถูกดูดซับโดยใยอาหารและโปรตีนในกากถั่วเหลือง ปริมาณไอน้ำร้อน

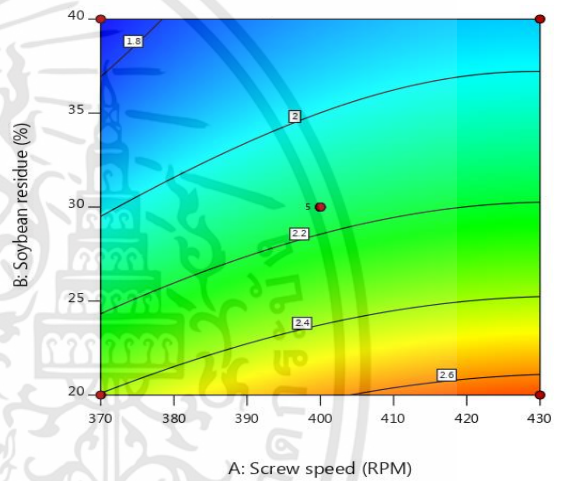
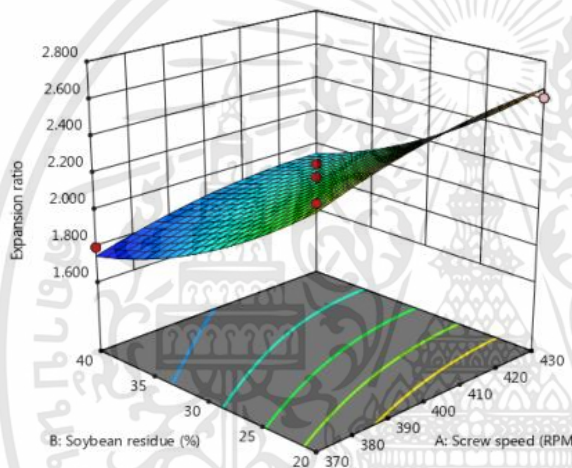
ยิ่งยวด (superheated water) จึงลดลง ส่งผลให้อัตราการพองลดลง และยังอาจเป็นไปได้ว่าแป้งใน วัตถุประสงค์เกิดการเจลาติไนซ์ (Gelatinization) ที่ไม่สมบูรณ์ เป็นเหตุให้อัตราการพองลดลงเช่นกัน (Maskan and Altan, 2012)

สำหรับผลกระทบของความชื้นวัตถุประสงค์ต่อเอ็กซ์ทรูเดท พบว่า การเพิ่มความชื้นในวัตถุประสงค์จาก 14% ถึง 18% ทำให้เอ็กซ์ทรูเดทมีการพองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับผลการทดลองของ Yagci and Gogus (2009) ที่ทำการศึกษาผลกระทบของความชื้นวัตถุประสงค์ อุณหภูมิบาร์เรล ความเร็ว รอบสกรู และองค์ประกอบวัตถุประสงค์ ต่อเอ็กซ์ทรูเดทที่ผลิตจาก ข้าวบด แป้งถั่วเฮเซลนัท แป้งสาลีขัดสี และของเหลือทิ้งจากผลไม้ ทั้งนี้พบว่า เป็นผลมาจากองค์ประกอบของวัตถุประสงค์ด้วยเนื่องจากที่ปริมาณ แป้งถั่วเฮเซลนัท 12.5% การเพิ่มขึ้นของความชื้นวัตถุประสงค์ เป็นผลให้อัตราการพองเพิ่มขึ้น ในขณะที่ การเพิ่มความชื้นวัตถุประสงค์ ไม่ส่งผลต่ออัตราการพอง ที่ปริมาณแป้งถั่วเฮเซลนัท 5%

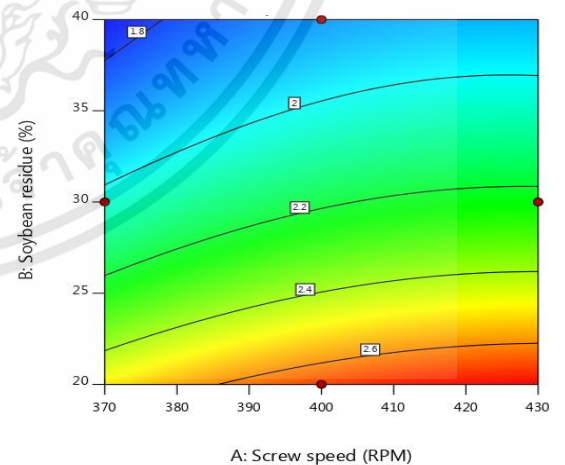
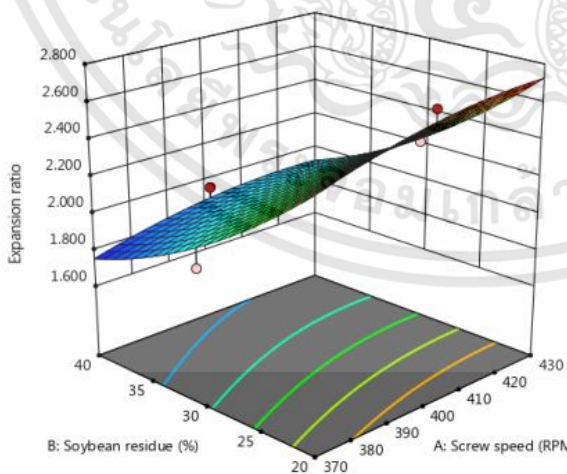




a) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 14%w.b.



b) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 16%w.b.



c) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 18%w.b.

รูปที่ 4.7 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่ออัตราการพองของเอ็กซ์ทรูเดท

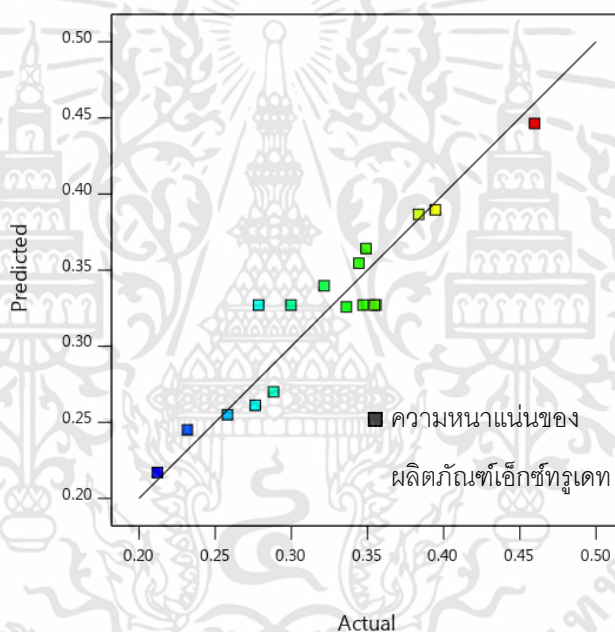
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ความหนาแน่น (Density, D)

จากตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่สภาวะต่าง ๆ อยู่ในช่วง 0.212-0.460 g/cm³ เมื่อนำความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูชันจากสภาวะต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบสกรู (X₁) ปริมาณกากถั่วเหลือง (X₂) และปริมาณความชื้นวัตถุดิบ (X₃) มาสร้างสมการคณิตศาสตร์ด้วยสมการโพลิโนเมียล อันดับที่ 2 ความสัมพันธ์ที่ได้ แสดงในสมการที่ 4.4 และรูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง และค่าจากการทำนายด้วยสมการ 4.4

$$D = 0.327 - 0.025 * X_1 + 0.076 * X_2 - 0.01 * X_3 - 0.017 * X_1 X_2 - 0.018 * X_1 X_3 + 0.009 * X_2 X_3 + 0.006 * X_1^2 - 0.004 * X_2^2 - 0.011 * X_3^2 \quad (4.4)$$

$$R^2 = 0.8901 \text{ ค่า C.V.} = 9.67\% \text{ และค่า p-value} = 0.012$$



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความหนาแน่นที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.4

นำสมการที่ 4.4 มาพลอตกราฟแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าลดลงเล็กน้อย สอดคล้องกับผลการทดลองของ Zhu et al. (2010) ซึ่งอธิบายว่าความเร็วรอบสกรูที่มีค่าสูง เป็นการเพิ่มค่าพลังงานกลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Specific mechanical energy, SME) ทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการพองตัวที่ดีขึ้น และความหนาแน่นต่ำ

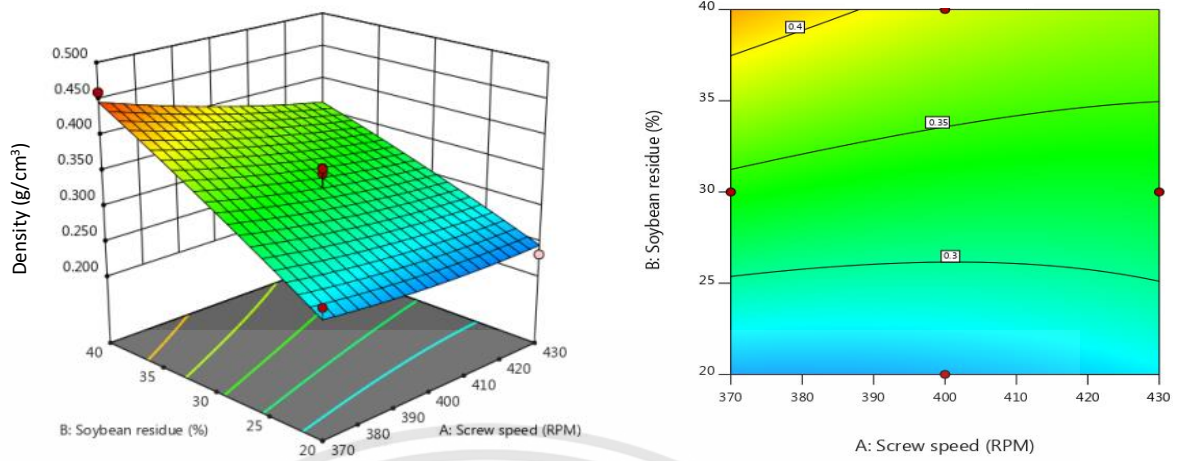
ในขณะที่ ปริมาณกากถั่วเหลืองที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากใยอาหารภายในวัตถุดิบมีแนวโน้มทำให้ผนังเซลล์แตกก่อนเกิดการขยายตัวเต็มที่ของฟองอากาศ เป็นผลให้เอ็กซ์ทรูเดทเกิดการพองตัวได้ไม่มาก ให้ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น (Maskan and Altan, 2012 ; Jozinovic et al., 2016)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

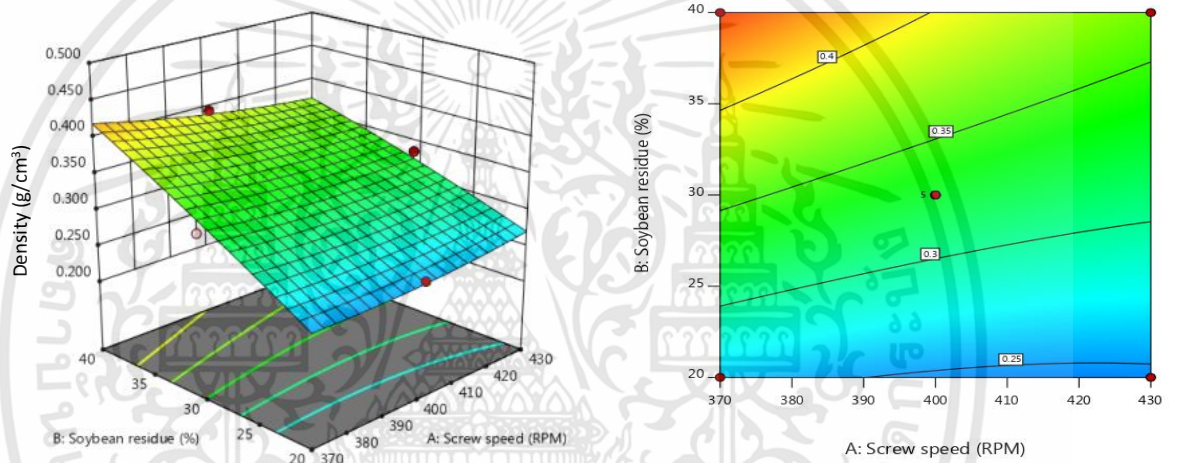
ในส่วนของผลของความชื้นวัดดูดิบต่อความหนาแน่น พบว่า เมื่อปริมาณความชื้นวัดดูดิบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง เนื่องจากการเพิ่มความชื้นวัดดูดิบ ทำให้ความหนืดของวัดดูดิบภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ลดลง การขยายตัวของฟองอากาศเกิดได้ไม่เต็มที่ การฟองตัวจึงลดลง เป็นผลให้ความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้น (Maskan and Altan, 2012) นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าความหนาแน่นแปรผกผันกับอัตราการฟอง (Coefficient of correlation = -0.877) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kristiawan et al. (2018)



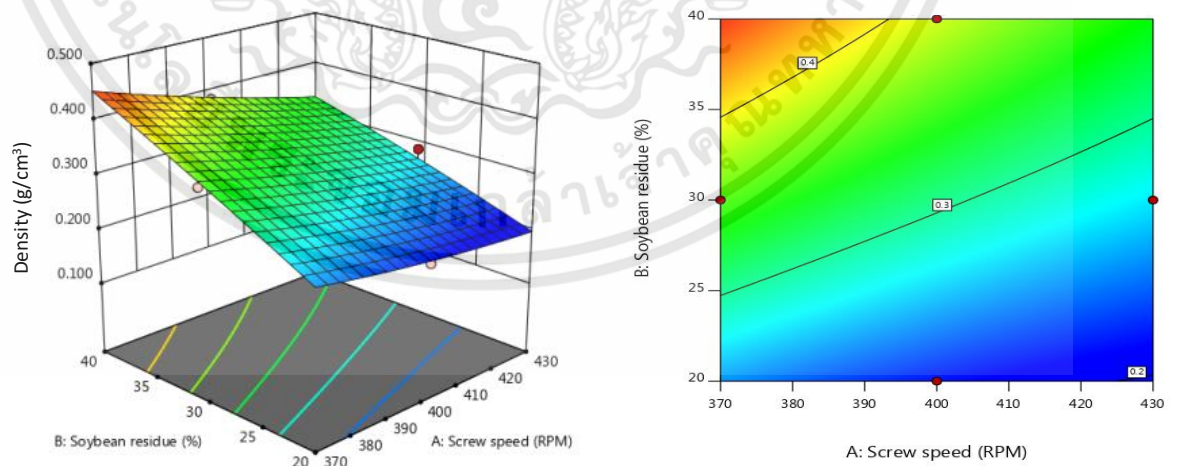
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 14%w.b.



b) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 16%w.b.



c) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 18%w.b.

รูปที่ 4.9 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดท

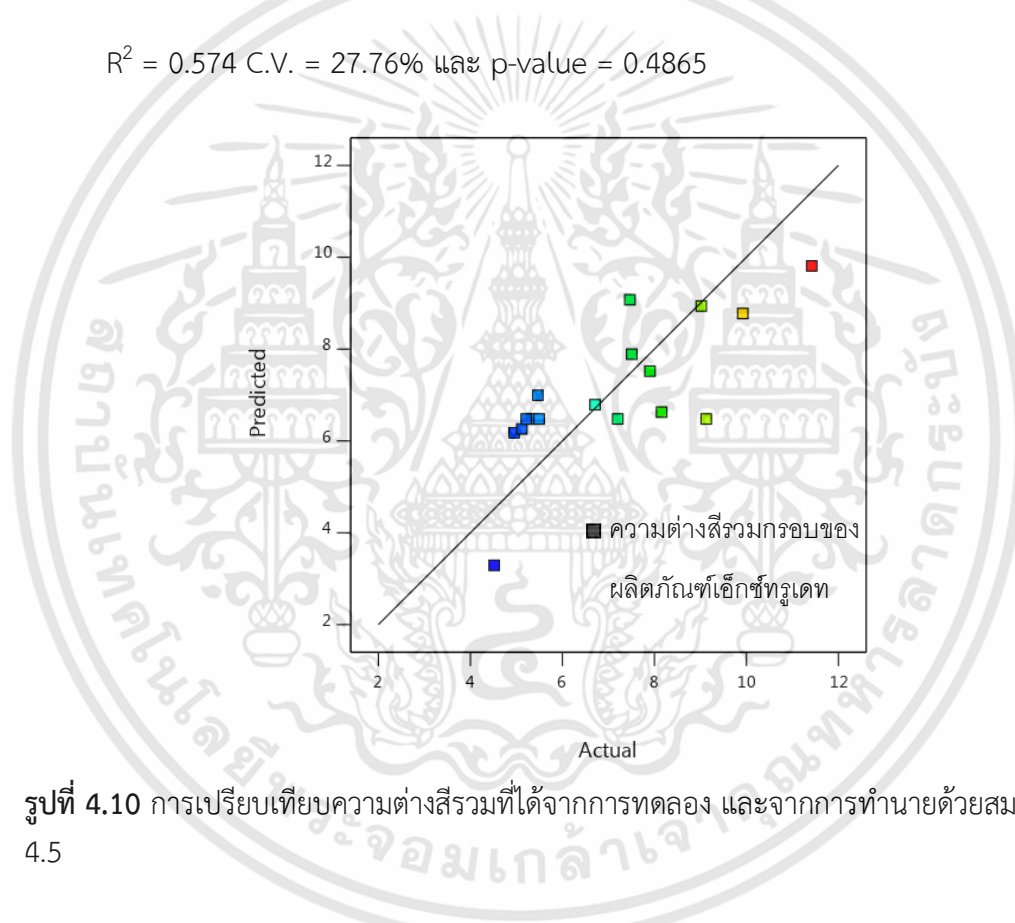
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ความต่างสีรวม (Total Color difference, ΔE)

ความแตกต่างของค่าสีรวมมีค่าอยู่ในช่วง 4.52 - 11.42 (ตารางที่ 4.1) เมื่อนำค่าตัวแปรความเร็วรอบสกรู (X_1) ปริมาณกากถั่วเหลือง (X_2) และปริมาณความชื้นวัตถุดิบ (X_3) ที่ศึกษา มาหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 เพื่ออธิบายความต่างสีของเอ็กซ์ทรูเดท ผลที่ได้แสดงในสมการที่ 4.5 และรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความต่างสีรวมจากการทดลอง และค่าจากการทำนายด้วยสมการ 4.5

$$\Delta E = 6.48 - 0.8126 * X_1 + 0.6299 * X_2 + 0.4444 * X_3 + 1.04 * X_1 X_2 + 0.962 * X_1 X_3 + 0.0053 * X_1^2 - 0.7019 * X_2^2 + 2.01 * X_3^2 \quad (4.5)$$

$$R^2 = 0.574 \text{ C.V.} = 27.76\% \text{ และ } p\text{-value} = 0.4865$$



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบความต่างสีรวมที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.5

จากผลวิเคราะห์ทางสถิติจะเห็นว่า ค่า Coefficient of determination (R^2) มีค่าต่ำ และ p-value มีค่าเท่ากับ 0.48 ซึ่งแสดงว่าค่าตัวแปรที่ศึกษาไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความต่างของสีรวม

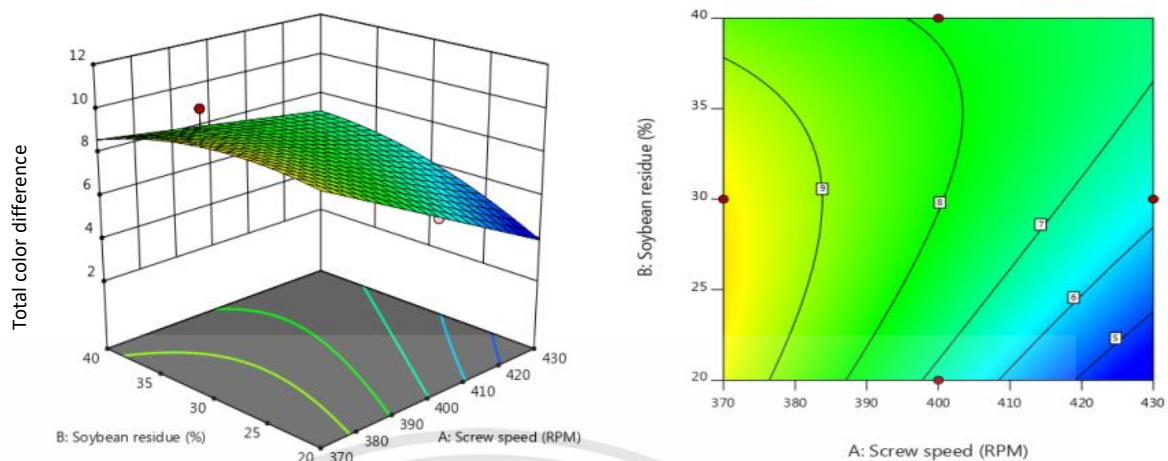
แต่อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อมีปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 14% และ 16% ความต่างสีรวมมีแนวโน้มลดลง เมื่อความเร็วรอบสกรูมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบสกรู ส่งผลให้เวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ลดลง การเกิดการเปลี่ยนสีของเอ็กซ์ทรูเดทจึงมีค่าลดลง แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 18% การเพิ่มความเร็วยรอบสกรู ทำให้ความต่างสีมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากอุณหภูมิ และแรงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการส่งเสริมให้มีการเปลี่ยนสีของวัตถุดิบมากขึ้น (Maskan and Altan, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

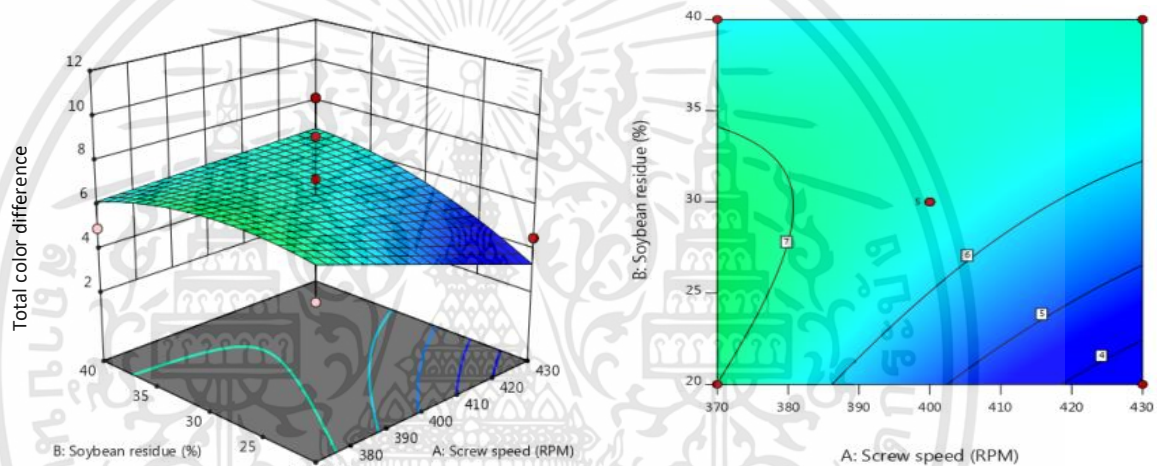
ในขณะที่การเพิ่มปริมาณกากถั่วเหลืองส่งผลให้ความต่างสีรวมของเอ็กซ์ทรูเดทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างน้ำตาลและโปรตีนในกากถั่วเหลือง

ในส่วนของความชื้นวัตถุดิบ พบว่า การเพิ่มความชื้นวัตถุดิบจาก 14% เป็น 16% ส่งผลให้ความต่างสีรวมมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะ ความชื้นวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิวัตถุดิบลดลง การเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์อิสระ และโปรตีนจึงลดลง (Roman et al., 2018) ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มความชื้นวัตถุดิบจาก 16% เป็น 18% มีผลให้ความต่างสีรวมมีค่าเพิ่มขึ้น

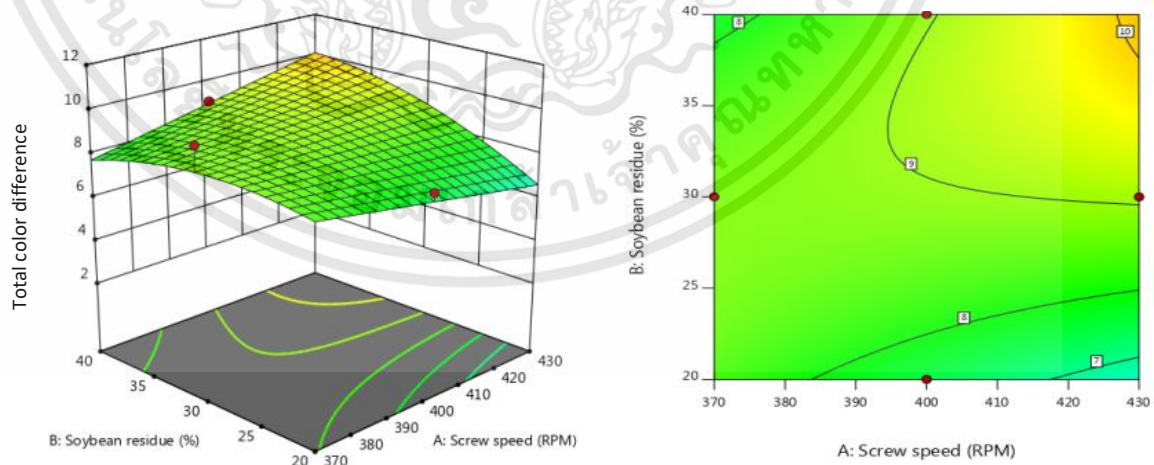




a) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 14%w.b.



b) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 16%w.b.



c) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 18%w.b.

รูปที่ 4.11 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความต่างสีของเอ็กซ์ทรูเตท

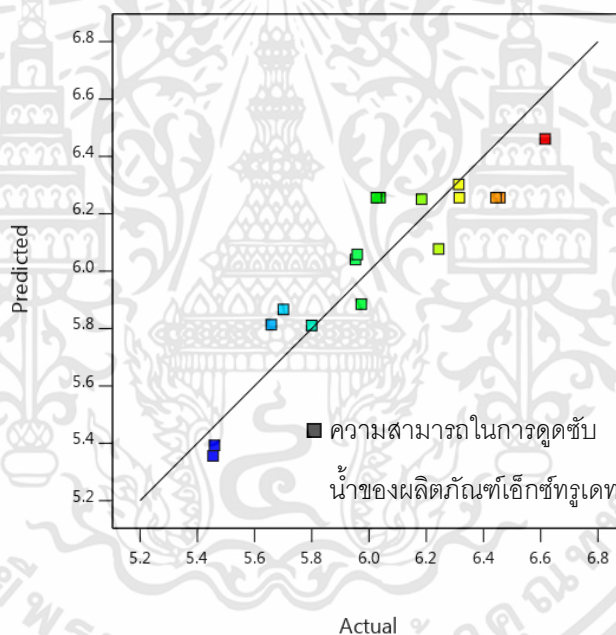
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption index, WAI)

ความสามารถในการดูดซับน้ำ เป็นการวัดปริมาณของแป้งที่พองตัวในน้ำ คุณสมบัตินี้เป็นตัวชี้วัดการเจลาติไนซ์ของแป้งในวัตถุดิบ (Maskan and Altan, 2012) ความสามารถในการดูดซับน้ำของเอ็กซ์ทราคต์ที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วง 5.46-6.62 g/g (แสดงในตารางที่ 4.1) เมื่อนำค่าตัวแปรความเร็วรอบสกรู (X_1) ปริมาณกากถั่วเหลือง (X_2) และปริมาณความชื้นวัตถุดิบ (X_3) ที่ศึกษา มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 เพื่ออธิบายความสามารถในการดูดซับน้ำ ผลที่ได้แสดงในสมการที่ 4.6 และรูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง และค่าจากการทำนายด้วยสมการ 4.6

$$\text{WAI} = 6.26 + 0.092 * X_1 - 0.337 * X_2 - 0.014 * X_3 + 0.117 * X_1 X_2 - 0.005 * X_1 X_3 - 0.215 * X_2 X_3 - 0.136 * X_1^2 - 0.181 * X_2^2 - 0.153 * X_3^2 \quad (4.6)$$

$$R^2 = 0.8276 \text{ C.V.} = 3.58\% \text{ และ } p\text{-value} = 0.0482$$



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับน้ำที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.6

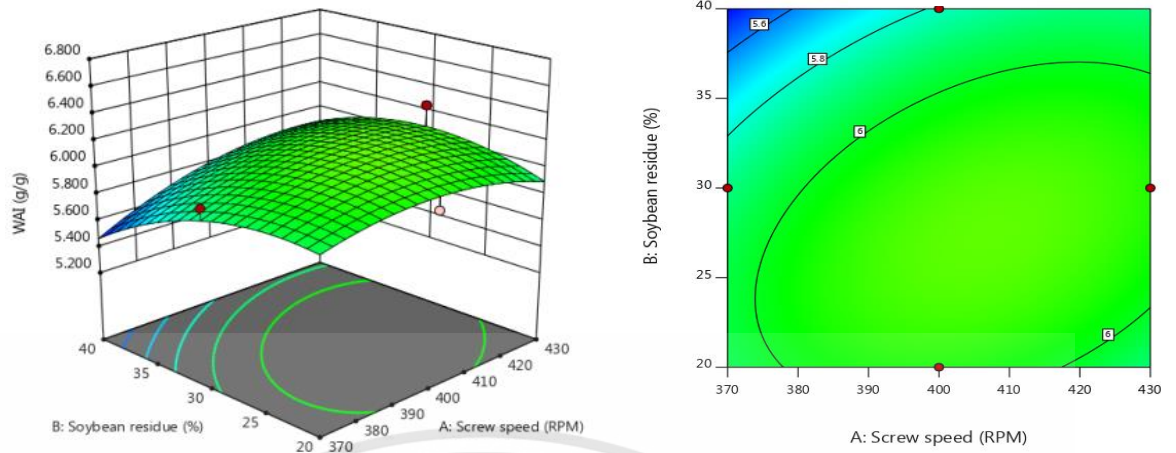
จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าสูงสุด เมื่อความเร็วรอบสกรูมีค่า 400 rpm การเพิ่ม หรือลดความเร็วรอบสกรูจากค่าดังกล่าว ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วรอบสกรูที่ระยะหนึ่งมีผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนในวัตถุดิบ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งจึงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบสกรูเกินสูงกว่าค่าดังกล่าว ความสามารถในการดูดซับน้ำกลับมีค่าลดลง ทั้งนี้ เพราะ ความเร็วรอบสกรูที่มากขึ้น ทำให้เวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์น้อยลง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวัตถุดิบจึงเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ (Maskan and Altan, 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

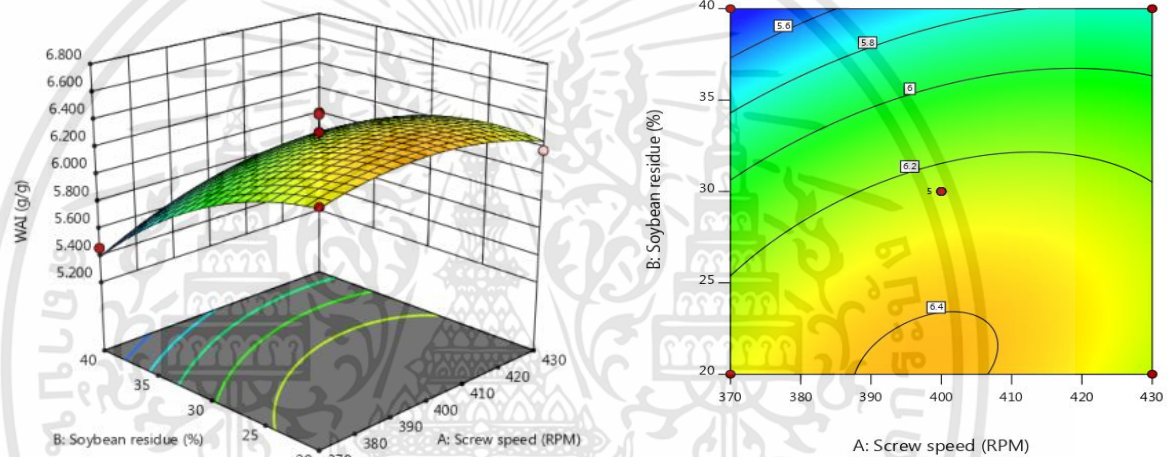
ในส่วนองปริมาณกากั่วเหลือง พบว่า ความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณกากั่วเหลือง ผลที่ได้ไปในสอดคล้องกับ Zhu et al., 2010 ; Alam et al., 2016 ; Jozinovic et al., 2016 เนื่องจากพอลิเมอร์ในวัตถุดิบที่ถูกทำลายระหว่างการเจลาตีไนซ์ มีปริมาณน้อย ส่งผลให้ปริมาณพอลิเมอร์เส้นยาวมีจำนวนมาก การดูดซับน้ำจึงลดลง (Stojceska et al., 2008) ทั้งนี้การลดปริมาณของแป้งในวัตถุดิบเริ่มต้นยังทำให้มีปริมาณแป้งที่ผ่านการเจลาตีไนซ์ลดลงเช่นกัน เป็นผลให้แป้งอุ้มน้ำได้น้อยลง ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำจึงลดลง (Maskan and Altan, 2012)

สำหรับผลกระทบของปริมาณความชื้นวัตถุดิบ ต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ พบว่า ความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่ามากที่สุด เมื่อมีปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 16% ในขณะที่การเพิ่มหรือลดความชื้นวัตถุดิบจากค่าดังกล่าว ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากความชื้นวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้น เป็นผลให้เกิดการเจลาตีไนซ์ดียิ่งขึ้น (Kumar et al., 2010) แต่ในขณะเดียวกัน หากมีปริมาณความชื้นวัตถุดิบเกินจากค่าดังกล่าว อาจส่งผลให้แรงเสียดทาน และอุณหภูมิภายในวัตถุดิบมีค่าลดลง การเจลาตีไนซ์ของแป้งจึงเกิดขึ้นได้ไม่ดีเท่าที่ควร ความสามารถในการดูดซับน้ำจึงมีค่าลดลง

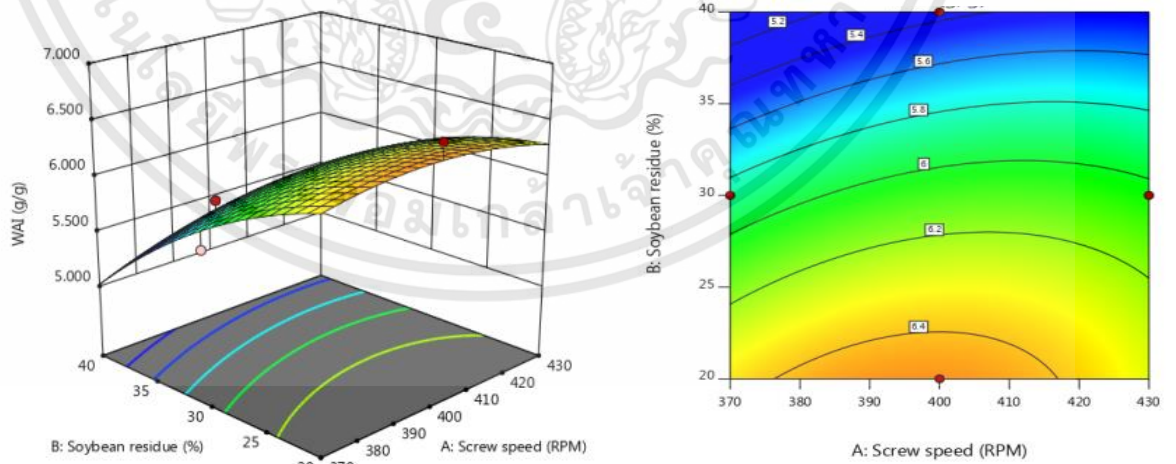




a) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 14%w.b.



b) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 16%w.b.



c) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 18%w.b.

รูปที่ 4.13 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) ของเอ็กซ์ทรูเตท

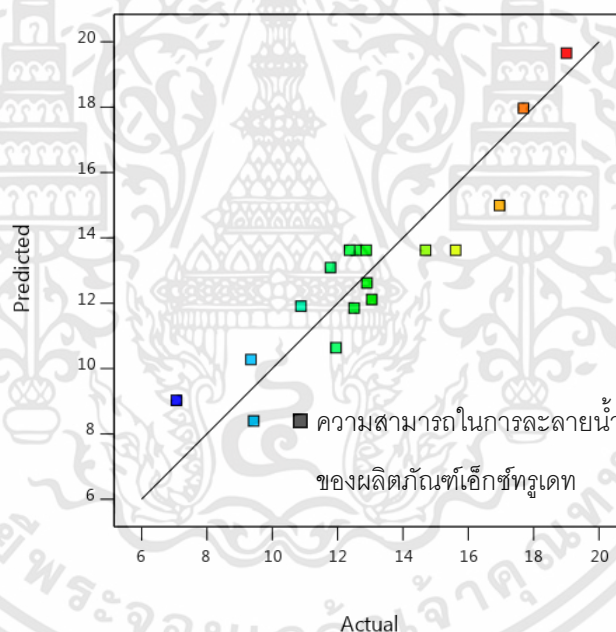
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility index, WSI)

ความสามารถในการละลายน้ำ เป็นตัวชี้วัดโมเลกุลที่ละลายน้ำได้ภายในเอ็กซ์ทราคต์ เนื่องจากเอ็กซ์ทราคต์ชันเป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดการสลายตัวของโมเลกุลวัตถุติด (Maskan and Altan, 2012) จากตารางที่ 4.1 ความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทราคต์ที่สภาวะต่าง ๆ อยู่ในช่วง 7.07-19.00% WSI เมื่อนำค่าตัวแปรความเร็วรอบสกรู (X_1) ปริมาณกากถั่วเหลือง (X_2) และปริมาณความชื้นวัตถุติด (X_3) ที่ศึกษา มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการโพลีโนเมียลลำดับที่ 2 เพื่ออธิบายความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทราคต์ ผลที่ได้แสดงใน สมการที่ 4.7 และรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลอง และค่าจากการทำนายด้วยสมการ 4.7

$$\text{WSI} = 13.62 - 0.154 * X_1 - 1.07 * X_2 + 2.83 * X_3 + 0.335 * X_1 X_2 + 1.64 * X_1 X_3 - 2.80 * X_2 X_3 - 0.697 * X_1^2 - 1.40 * X_2^2 + 0.726 * X_3^2 \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0.8405 \text{ C.V.} = 14.37\% \text{ และ } p\text{-value} = 0.0382$$



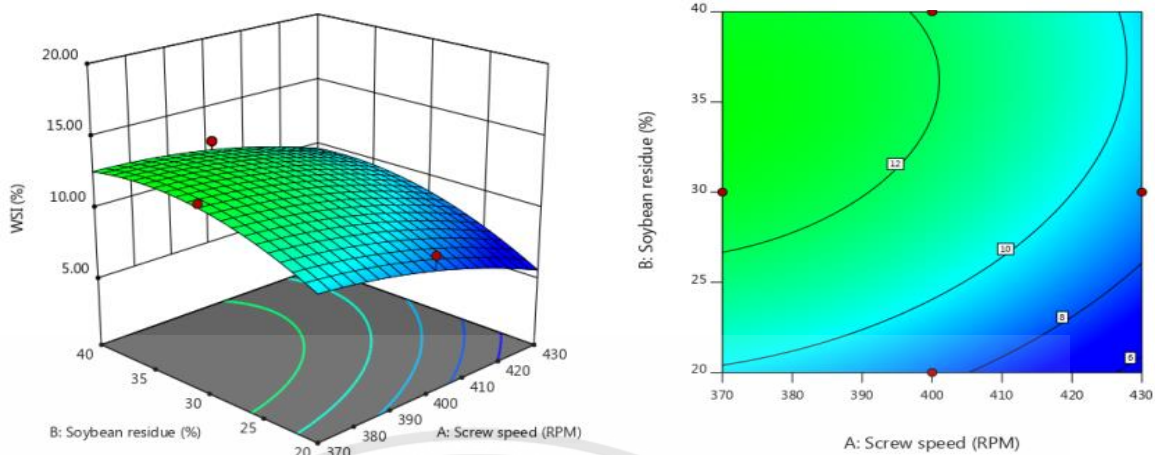
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสามารถในการละลายน้ำที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.7

เมื่อนำสมการที่ 4.7 มาพลอตกราฟแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่อมีความชื้นวัตถุติด 14% การเพิ่มความเร็วยรอบสกรู ส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Alam et al. (2016) ทั้งนี้ อาจเป็นผลมาจากเวลาของวัตถุติดภายในเครื่องมีค่าลดลง เมื่อมีการเพิ่มความเร็วยรอบสกรู เป็นผลให้โมเลกุลของวัตถุติดเกิดการสลายตัวได้ไม่เต็มที่ ความสามารถในการละลายน้ำจึงมีค่าลดลง และที่ความชื้นวัตถุติด 16% การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบสกรู ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายน้ำ ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีปริมาณความชื้นวัตถุติด 18% การเพิ่มความเร็วยรอบสกรู ส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเร็วยรอบสกรูที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

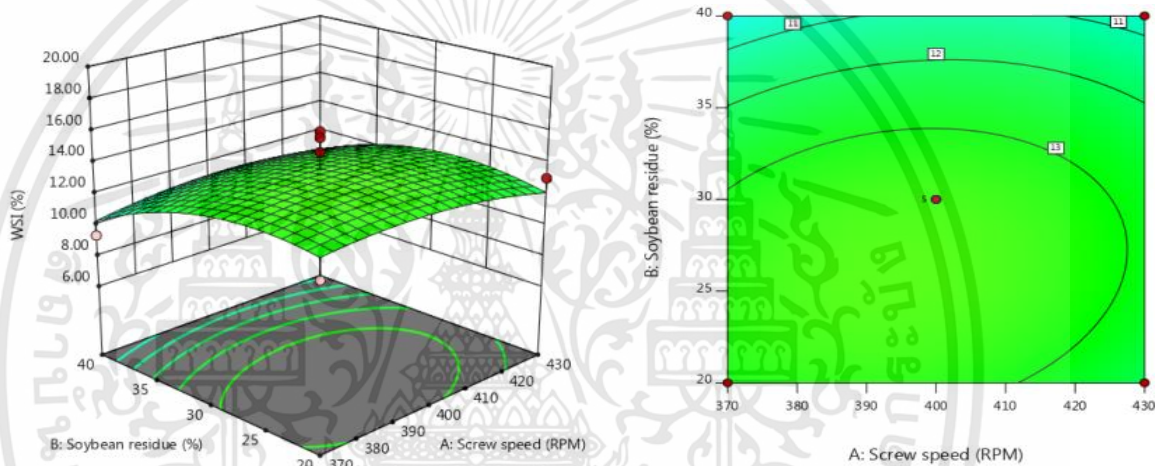
เพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดแรงเฉือนที่กระทำต่อวัตถุดิบมากขึ้น และส่งผลให้อุณหภูมิวัตถุดิบสูงขึ้น โมเลกุลวัตถุดิบเกิดการสลายตัว เป็นผลให้ความสามารถในการละลายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น (Maskan and Altan, 2012)

ส่วนผลของปริมาณกากถั่วเหลืองต่อความสามารถในการละลายน้ำ พบว่าเมื่อความชื้นวัตถุดิบมีค่าต่ำ (14%) การเพิ่มปริมาณกากถั่วเหลือง เป็นผลให้ความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทราคต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเอ็กซ์ทราคต์ในสถานะที่มีความชื้นวัตถุดิบต่ำ ส่งเสริมให้มีการสลายตัวของโมเลกุลวัตถุดิบ ให้กลายเป็นสารโมเลกุลขนาดเล็กได้ดียิ่งขึ้น ความสามารถในการละลายน้ำจึงมีค่าสูงขึ้น (Maskan and Altan, 2012 ; Alam et al., 2016) นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีน และใยอาหารในวัตถุดิบ อาจเป็นสาเหตุให้ปริมาณสารโมเลกุลขนาดเล็กภายในเอ็กซ์ทราคต์เพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มความชื้นวัตถุดิบจาก 16% ถึง 18% และเพิ่มปริมาณกากถั่วเหลือง เป็นผลให้ความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทราคต์ลดลง เนื่องจากการที่วัตถุดิบมีปริมาณความชื้นสูง ส่งผลให้แรงเฉือนมีค่าลดลง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัตถุดิบอาจเกิดขึ้นลดลง (Natabirwa et al., 2018)

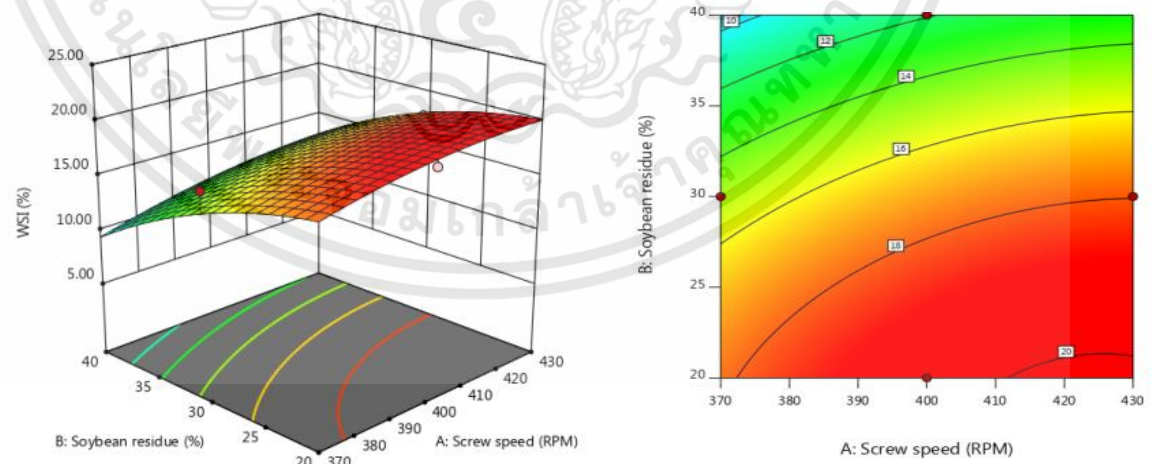
สำหรับผลกระทบของความชื้นวัตถุดิบต่อความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทราคต์ พบว่า ความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อความชื้นวัตถุดิบเพิ่มขึ้นเนื่องจาก การเพิ่มปริมาณความชื้นวัตถุดิบ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัตถุดิบอย่างสมบูรณ์ จากการเจลาติไนซ์ของแป้ง และการเสียสภาพของโปรตีน (Protein denaturation) (Natabirwa et al., 2018)



a) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 14%w.b.



b) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 16%w.b.



c) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 18%w.b.

รูปที่ 4.15 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) ของเอ็กซ์ทรูเดท

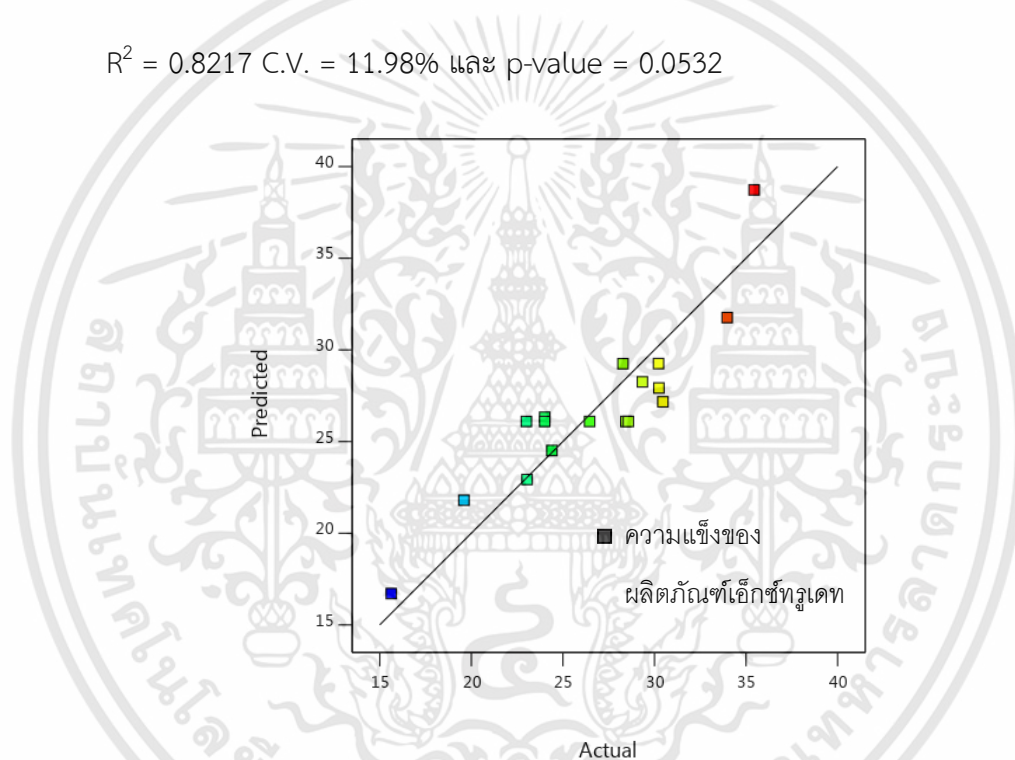
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.8 ความแข็ง (Hardness, H)

ความแข็ง หมายถึง ค่าแรงที่สูงที่สุดที่ทำให้เอ็กซ์ทรูเดทเกิดการแตกหัก (Maskan and Altan, 2012) จากการทดลองพบว่า ความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดทมีค่าอยู่ในช่วง 15.63-35.44 N (ตารางที่ 4.1) นำความแข็งจากการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ ที่ความเร็วรอบสกรู (X_1) ปริมาณกากถั่วเหลือง (X_2) และปริมาณความชื้นวัตถุดิบ (X_3) มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 แสดงในสมการที่ 4.8 และรูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความแข็งจากการทดลอง และค่าจากการทำนายด้วยสมการ 4.8

$$H = 26.1 + 2.49 * X_1 + 3.29 * X_2 - 2.49 * X_3 + 4.61 * X_1 X_2 + 1.24 * X_1 X_3 + 2.32 * X_2 X_3 + 2.73 * X_1^2 - 0.4864 * X_2^2 - 0.8051 * X_3^2 \quad (4.8)$$

$$R^2 = 0.8217 \text{ C.V.} = 11.98\% \text{ และ } p\text{-value} = 0.0532$$



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบความแข็งที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.8

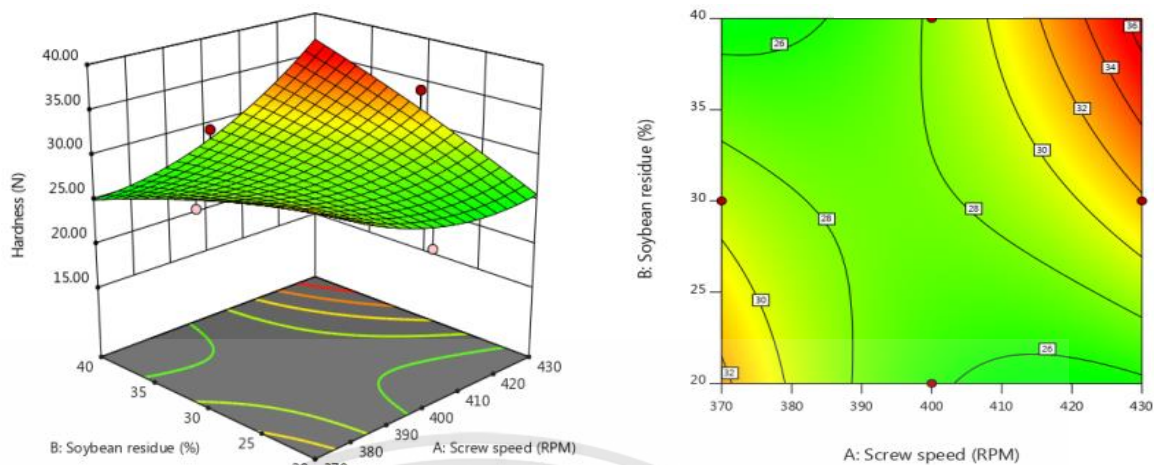
เมื่อนำสมการที่ 4.8 มาพลอตกราฟแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่าที่ความเร็วรอบสกรู 430 rpm ปริมาณกากถั่วเหลือง 40% และความชื้นวัตถุดิบ 18% ส่งผลให้ความแข็งมีค่าสูงสุด ผลของความแข็งที่เพิ่มขึ้น จากการเพิ่มความเร็วรอบสกรู สอดคล้องกับการทดลองของ Yagci and Gogus (2009) ซึ่งให้เหตุผลว่า การเพิ่มความเร็วรอบสกรู มีผลให้เวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่องสั้นลง ระดับของไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated water) จึงเกิดขึ้นได้น้อย เอ็กซ์ทรูเดทจึงเกิดการพองตัว และมีรูพรุนน้อยลง ความแข็งจึงมีค่าสูงขึ้น

ในส่วนของผลกระทบจากปริมาณกากถั่วเหลือง จะเห็นว่า เมื่อมีปริมาณกากถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น มีผลให้ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ Jozinovic et al. (2016) ; Azzollini et al. (2018) ซึ่งอธิบายว่า ปริมาณใยอาหาร และโปรตีนในวัตถุดิบมีแนวโน้มทำให้ความแข็งมีค่า

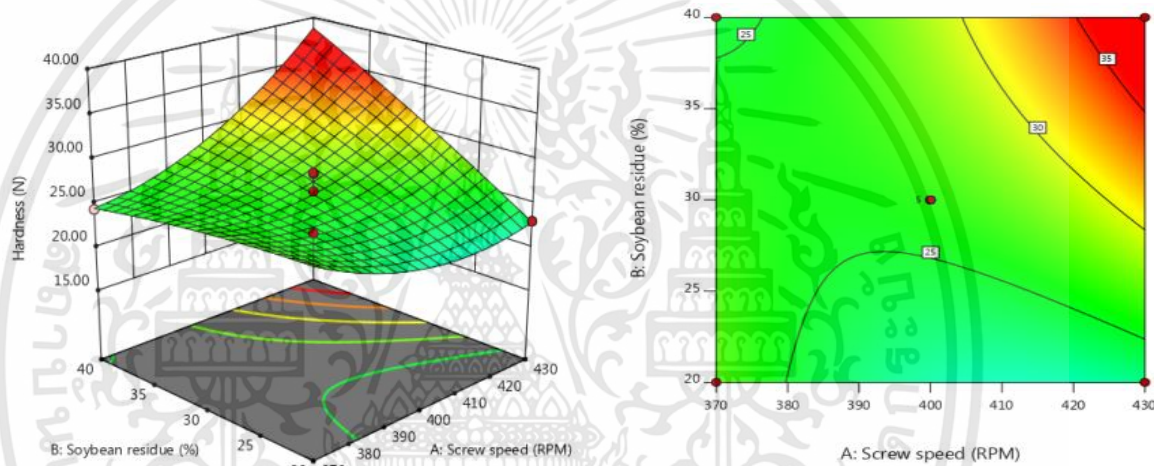
สูงขึ้น เนื่องจากใยอาหารมีส่วนยับยั้งการขยายตัวของแบ่ง อีกทั้งยังทำให้ผนังเซลล์ของเอ็กซ์ทราเซลล์มีความแข็งแรงขึ้น การเกิดรูพรุนจึงยากขึ้น (Promsakha na Sakon Nakhon et al., 2018)

สำหรับผลกระทบของปริมาณความชื้นวัตถุดิบต่อความแข็ง พบว่า ความชื้นวัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแข็งแรงของเอ็กซ์ทราเซลล์มีค่าลดลง เนื่องจาก ระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทราเซลล์ โปรตีนเกิดการฟอร์มตัวเป็นโครงสร้างใหม่ ซึ่งทำให้เกิดความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น (Maskan and Altan, 2012) จึงอาจส่งผลให้เกิดการพองตัวของเอ็กซ์ทราเซลล์ที่ดีขึ้น ความแข็งแรงของเอ็กซ์ทราเซลล์จึงมีค่าลดลง

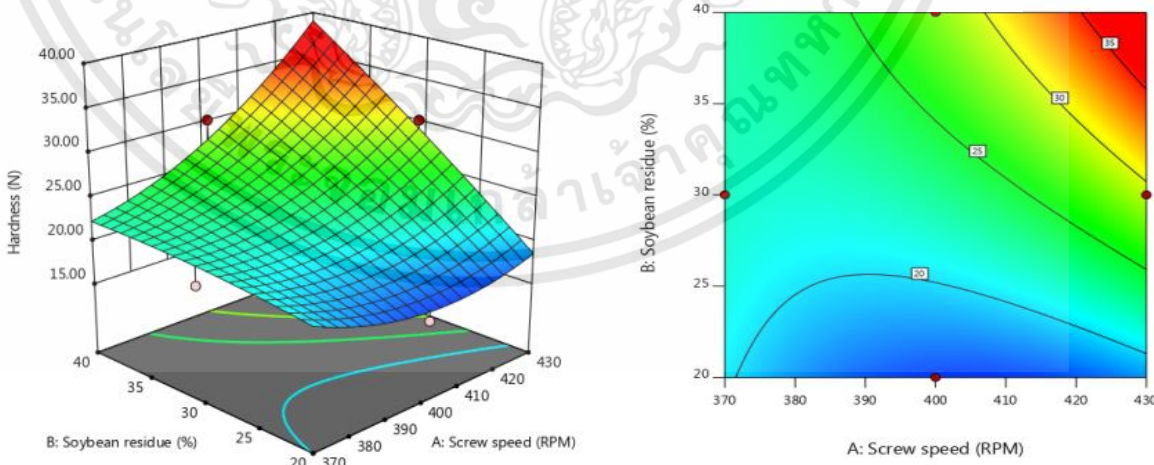




a) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 14%w.b.



b) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 16%w.b.



c) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 18%w.b.

รูปที่ 4.17 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดท

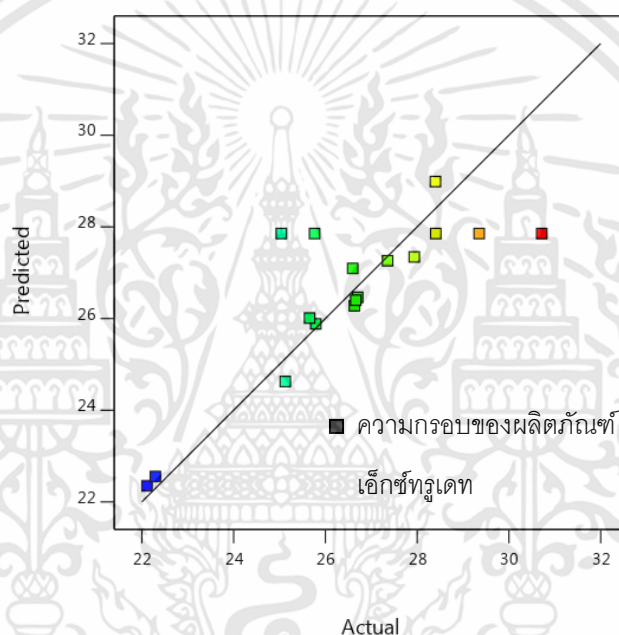
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.9 ความกรอบ (Crispness)

ความกรอบของเอ็กซ์ทราเดทอยู่ในช่วง 22.12-30.71 kg*s แสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อนำค่าตัวแปรความเร็วรอบสกรู (X_1) ปริมาณกากถั่วเหลือง (X_2) และความชื้นวัตถุดิบ (X_3) ที่ศึกษา มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 แสดงได้ในสมการที่ 4.9 และรูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างความกรอบที่ได้จากการทดลอง และการทำนายด้วยสมการที่ 4.9

$$C = 27.86 + 0.6843 * X_1 - 1.37 * X_2 - 0.55 * X_3 + 1.08 * X_1 X_2 + 0.142 * X_1 X_3 - 1.84 * X_2 X_3 - 1.34 * X_1^2 - 1.02 * X_2^2 - 0.51 * X_3^2 \quad (4.9)$$

$$R^2 = 0.6858 \text{ C.V.} = 7.09\% \text{ และ } p\text{-value} = 0.2489$$



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบความกรอบที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนายด้วยสมการ 4.9

จากความสัมพันธ์ระหว่างความกรอบจากการทดลอง และค่าจากการทำนายโดยการใช้อยู่ สมการ 4.9 ในรูปที่ 4.18 พบว่าค่า Coefficient of determination (R^2) มีค่าต่ำ และค่า $p = 0.25$ ซึ่งแสดงว่าค่าตัวแปรที่ศึกษาไม่ส่งผลกระทบต่อความกรอบ

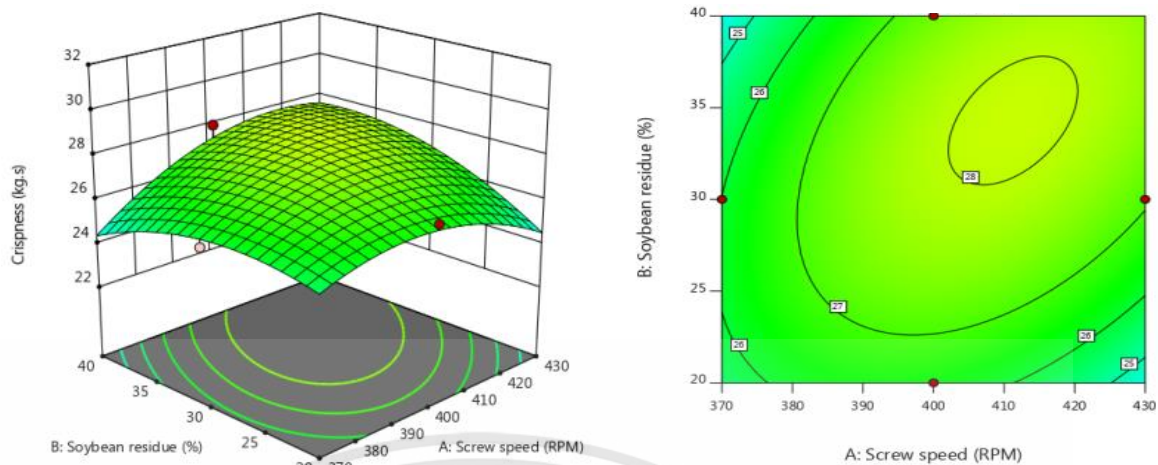
จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่า ที่ความเร็วรอบสกรู 400 rpm มีผลทำให้ความกรอบมีค่าสูงสุด การลด หรือเพิ่มความเร็วยรอบสกรูจากตำแหน่งดังกล่าว มีผลให้ความกรอบมีค่าลดลง สันนิษฐานว่า ที่ความเร็วรอบสกรู 400 rpm เกิดการเจลาติไนซ์ของแป้งที่สมบูรณ์ ทำให้เอ็กซ์ทราเดทเกิดการพองตัวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความกรอบมีค่าสูงสุด

สำหรับผลกระทบของความกรอบจากปริมาณกากถั่วเหลือง พบว่าการเพิ่มกากถั่วเหลือง มีผลให้ความกรอบมีค่าลดลง ผลการทดลองสอดคล้องกับ Sharif et al. (2014) ซึ่งอธิบายว่า การเพิ่มกากถั่วเหลือง ส่งผลให้ขนาดของฟองอากาศในเอ็กซ์ทราเดท และอัตราการพองมีค่าลดลง ความกรอบจึงลดลง

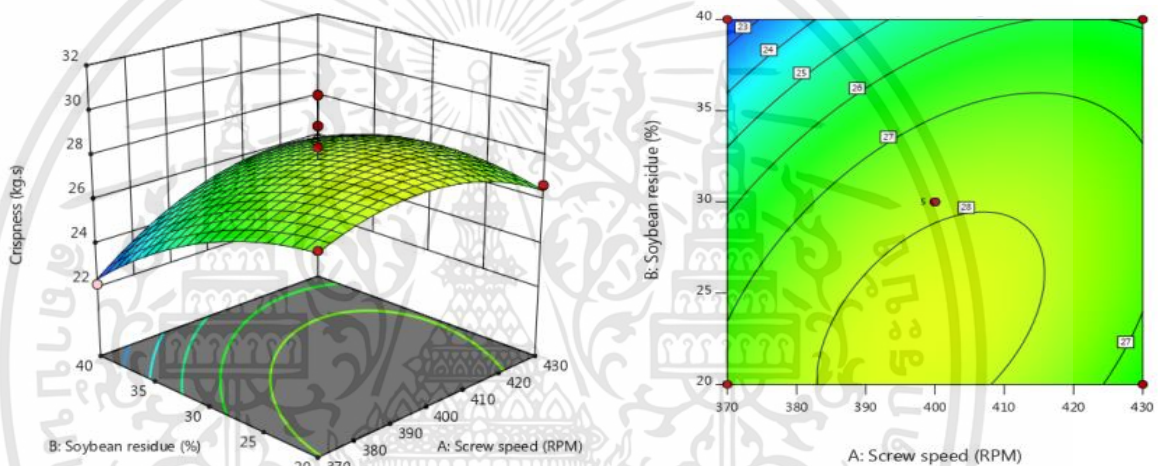
ในขณะที่ การเพิ่มความชื้นวัตถุดิบ ทำให้ความกรอบมีค่าลดลง เนื่องจาก แรงเสียดทาน และ อุณหภูมิของวัตถุดิบลดลง การเจลาติไนซ์ (Gelatinization) เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ การขยายตัวของเซลล์ ในเอ็กซ์ทรูเดทหลังจากออกจากรูหน้าแปลนจึงเกิดขึ้นได้ไม่มากเท่าที่ควร เป็นเหตุให้ความกรอบมีค่าลดลง (Maskan and Altan, 2012)



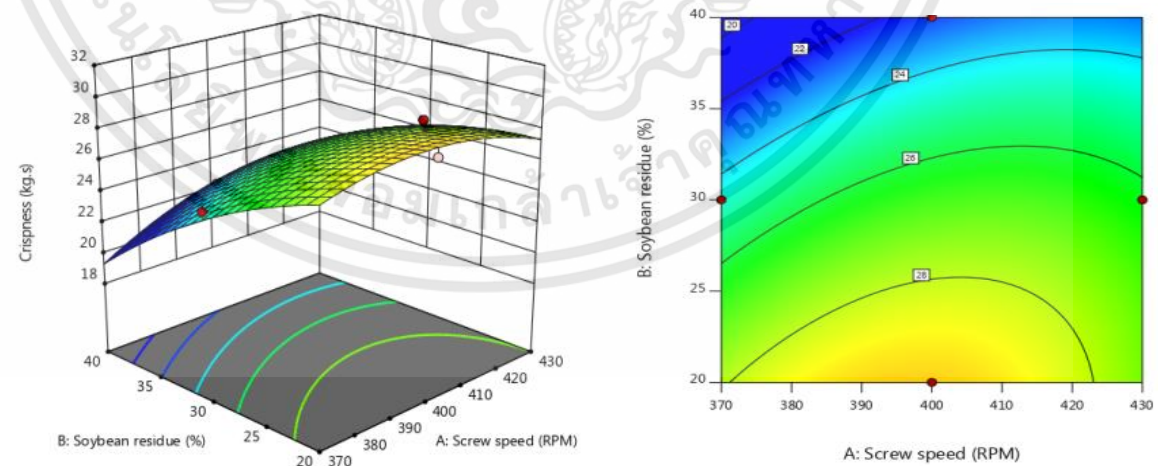
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 14%w.b.



b) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 16%w.b.



c) ที่ระดับปริมาณความชื้นวัตถุดิบ 18%w.b.

รูปที่ 4.19 ผลกระทบของตัวแปรในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อความกรอบของเอ็กซ์ทรูเดท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 สภาวะที่เหมาะสมของเอ็กซ์ทรูเดทจากข้าวโพดเสริมด้วยกากถั่วเหลือง

ในการหาค่าความพึงพอใจรวมด้วยวิธีการคำนวณความพึงพอใจหลายด้าน กำหนดเกณฑ์พิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสม แสดงในตารางที่

ตารางที่ 4.3 เกณฑ์ในการเลือกคุณสมบัติของเอ็กซ์ทรูเดท

คุณลักษณะ	ผลการทดลอง	ค่า desirability (d _i)	
		d _i = 0	d _i = 1
อัตราการพอง(mm/mm)	1.75-2.73	(0, 1.75) ∪ (2.73, ∞)	2.55-2.95
ความหนาแน่น (g/cm ³)	0.21-0.46	(0, 0.21) ∪ (0.46, ∞)	0.1-0.25
ความสามารถในการดูดซับน้ำ (g/g)	5.46-6.62	6.62	5.46
ความสามารถในการละลายน้ำ (%)	7.07-19.00	7.07	19.00
ความแข็ง (N)	15.63-35.44	35.44	15.63
ปริมาณโปรตีน (%)	9.67-12.89	9.67	12.89

นำมาหาค่าความพึงพอใจรวม (Overall desirability) จาก

$$D = (d_1(y_1)d_2(y_2)d_3(y_3)\dots d_i(y_i))^{1/p}$$

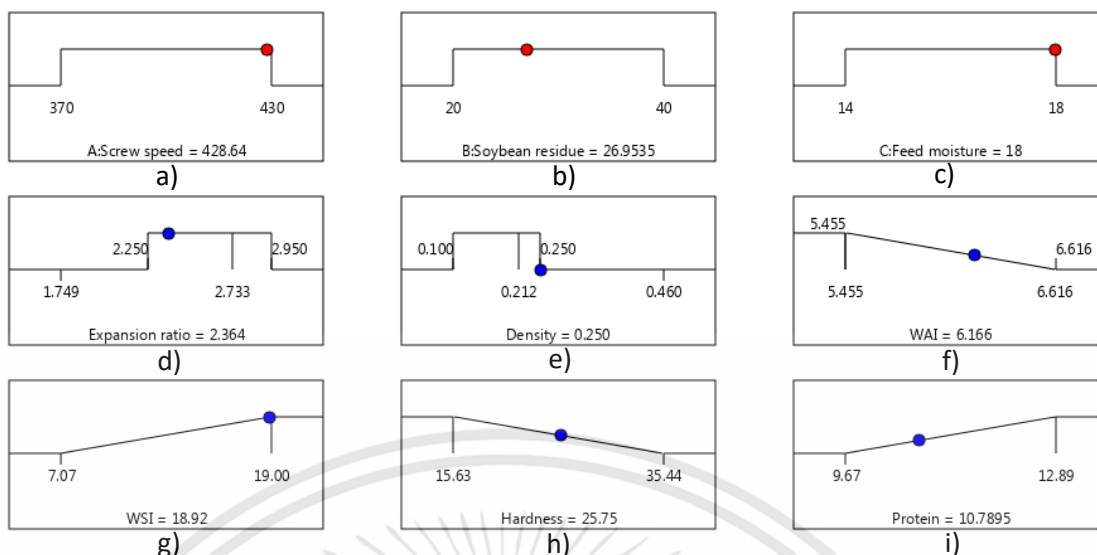
โดย ค่า p คือ จำนวนคุณสมบัติที่ใช้หาค่าความพึงพอใจรวม (D) ซึ่งค่า d_i ใด ๆ ที่อยู่ในช่วงของการกำหนดข้อจำกัด จะไม่ถูกนำมาใช้ในการคิดค่า p

$$D = [d_{ER}(y_{ER})d_D(y_D)d_{WAI}(y_{WAI})d_{WSI}(y_{WSI})d_H(y_H)d_P(y_P)]^{1/4}$$

$$D = [1 \times 1 \times 0.384 \times 0.992 \times 0.488 \times 0.348]^{1/4}$$

$$D = 0.505$$

รูปที่ 4.20a 4.20b และ 4.20c แสดงช่วงของค่าตัวแปรที่ทำการศึกษา และจุดสีแดงแสดงค่าสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษา ในขณะที่รูปที่ 4.20d-4.20i แสดงหลักเกณฑ์ และช่วงที่ใช้ในการตัดสินใจ จุดสีน้ำเงินแสดงถึงค่าคุณสมบัติที่ได้จากการทำนายผลสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากข้าวโพดเสริมด้วยกากถั่วเหลือง คือ ความเร็วรอบสกรู 428 rpm กากถั่วเหลือง 27% และความชื้นวัตถุดิบ 18% ซึ่งให้ค่าความพึงพอใจรวม (Overall desirability) เป็น 0.506



Desirability = 0.506

รูปที่ 4.20 ค่าสถานะที่เหมาะสมของตัวแปรที่ศึกษาจากการหาพื้นผิวตอบสนองด้วยทางตัวเลข

4.4 ผลทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส

การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสต่อผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดทที่ผลิตในช่วงสภาวะที่เหมาะสมจำนวน 3 ตัวอย่างที่สภาวะต่าง ๆ (แสดงในตารางที่ 4.4) ถูกนำมาเปรียบเทียบโดยใช้วิธีแบบ Hedonic scaling test ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดลักษณะของผลิตภัณฑ์และการยอมรับผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง โดยให้ระดับของความชอบและไม่ชอบผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ระดับสเกลความชอบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ สเกลความชอบ 9 จุด (Nine-point hedonic scale) ซึ่งคำว่า Hedonic หมายถึง มีความพอใจในการกระทำ ผู้ทดสอบชิมสามารถให้ความพอใจของตนโดยการแสดงออกมาในรูประดับของความชอบและไม่ชอบผลิตภัณฑ์จากสเกลที่กำหนดทำการแปลระดับความรู้สึกของผู้ทดสอบเป็นตัวเลข ดังต่อไปนี้ ชอบมากที่สุด (Like extremely) มีคะแนนเป็น 9, ชอบมาก (Like very much) มีคะแนนเป็น 8, ชอบปานกลาง (Like moderately) มีคะแนนเป็น 7, ชอบเล็กน้อย (Like slightly) มีคะแนนเป็น 6, เฉยๆ (Neither like nor dislike) มีคะแนนเป็น 5, ไม่ชอบเล็กน้อย (Dislike slightly) มีคะแนนเป็น 4, ไม่ชอบปานกลาง (Dislike moderately) มีคะแนนเป็น 3, ไม่ชอบมาก (Dislike very much) มีคะแนนเป็น 2, ไม่ชอบมากที่สุด (Dislike extremely) มีคะแนนเป็น 1 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างเอ็กซ์ทราเดทจากสภาวะการผลิตที่คัดเลือกมาทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส

ตัวอย่างที่	สภาวะที่	ความเร็วรอบ(rpm)	ปริมาณกากถั่วเหลือง(%)	ปริมาณความชื้น(%)
1	4	400	40	18
2	10	400	20	18
3	13	430	30	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสต่อผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดทจากผู้ชิมจำนวน 10 คน

ค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน)	ลักษณะ ปรากฏ	สี	รสชาติ	กลิ่นรส	เนื้อสัมผัส	ความชอบ รวม
ตัวอย่างที่ 1	5.10 ^b (1.10)	5.20 ^b (1.62)	4.10 ^b (1.52)	3.70 ^b (1.57)	3.90 ^b (1.60)	4.50 ^c (1.08)
ตัวอย่างที่ 2	7.50 ^a (0.71)	7.40 ^a (0.70)	6.00 ^a (0.82)	5.60 ^a (0.84)	6.90 ^a (0.99)	7.00 ^a (0.82)
ตัวอย่างที่ 3	5.40 ^b (1.71)	5.60 ^b (1.65)	5.30 ^a (0.95)	5.20 ^a (1.03)	4.70 ^b (1.70)	5.80 ^b (1.03)

จากการทดสอบพบว่า ผู้ทดสอบชอบเอ็กซ์ทราเดทตัวอย่างที่ 2 มากที่สุด ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 3 ทั้งในด้านลักษณะปรากฏ สี เนื้อสัมผัส และความชอบรวม อย่างไรก็ตาม ในด้านรสชาติ และกลิ่นรส พบว่า เอ็กซ์ทราเดทตัวอย่างที่ 2 มีความแตกต่างกับเอ็กซ์ทราเดทตัวอย่างที่ 3 อย่างไม่มีนัยสำคัญ สำหรับความชอบรวม พบว่า เอ็กซ์ทราเดทตัวอย่างที่ 2 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 7 ซึ่งแตกต่างกับเอ็กซ์ทราเดทตัวอย่างที่ 1 ซึ่งมีความชอบรวมน้อยที่สุดเท่ากับ 4.50 และเอ็กซ์ทราเดทตัวอย่างที่ 3 อย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษากระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันจากกากถั่วเหลืองผสมข้าวโพดบด ด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูชันแบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) ตัวแปรที่ศึกษาประกอบไปด้วย ความเร็วรอบสกรู 370-430 rpm กากถั่วเหลือง 20-40% และความชื้นวัตถุดิบ 14-18% คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ทำการศึกษา ได้แก่ ปริมาณความชื้น ค่าแอกติวิตีของน้ำ อัตราการพอง ความหนาแน่น ความต่างสีรวม ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ ความแข็ง และความกรอบ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) กากถั่วเหลือง เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท ในขณะที่ความชื้นวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรูส่งผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเพียงเล็กน้อย

2) การเพิ่มขึ้นของกากถั่วเหลืองส่งผลให้ ความหนาแน่น และความแข็งเพิ่มขึ้น แต่กลับส่งผลให้ ปริมาณความชื้น อัตราการพอง ความสามารถในการดูดซับน้ำ และความสามารถในการละลายน้ำ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

3) การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นวัตถุดิบส่งผลให้ อัตราการพอง และความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

4) การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบสกรูมีผลให้ อัตราการพองเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

5) สมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 ของ ปริมาณความชื้น ค่าแอกติวิตีของน้ำ อัตราการพอง ความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ และความแข็งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ และทำนายผลได้ เนื่องจากมีค่า Coefficient of determination (R^2) อยู่ในเกณฑ์ที่ดี ในทางตรงกันข้าม ค่า Coefficient of determination (R^2) ของความต่างสีรวม และความกรอบอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ

6) การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองสามารถนำมาใช้กำหนดแนวทางของคุณลักษณะผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทได้ สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ คือ ความเร็วรอบสกรู 428 rpm กากถั่วเหลือง 27% และความชื้นวัตถุดิบ 18% ซึ่งให้ความพึงพอใจโดยรวมเป็น 0.506

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการผลิตขนมขบเคี้ยวด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) พบว่าเครื่องมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนสภาวะที่ค่อนข้างจำกัด ทำให้ผลการทดลองที่ได้อยู่ในช่วงที่ค่อนข้างจำกัดเช่นกัน ควรมีการทดลองในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) เนื่องจากมีความสามารถในการปรับแต่งสภาวะที่กว้างกว่า สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ควรทำการวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย (Protein solubility) หรือความสามารถในการย่อยของโปรตีน (Protein dispersibility index, PDI) เพื่อดูปริมาณโปรตีนที่ร่างกายสามารถดูดซึมได้

บรรณานุกรม

- กนกอร นันตะธนะ. 2555. “การใช้กากถั่วเหลืองเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการในเค้กผลไม้” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เกรียงศักดิ์ สุวรรณธราดล. 2559. **ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ถั่วเหลือง ถั่วเขียว และถั่วลิสง ทิศทางพืชเศรษฐกิจไทยในอาเซียน**. สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน). กรุงเทพฯ : บริษัท พรทรัพย์การพิมพ์ จำกัด.
- จิราวัลย์ จิตรถเวช. 2552. **การวางแผนและการวิเคราะห์การตลาด**. กรุงเทพฯ : โครงการส่งเสริมและพัฒนาเอกสารวิชาการ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
- บริษัท เต็ดตรา แพ้ค (ประเทศไทย) จำกัด แปลโดย จันทร์นวล รัตสาร, ประจักษ์ นาคประเสริฐ และ สุรพงศ์ กอบประดิษฐ์กุล. 2557. **คู่มือการผลิตนมถั่วเหลือง**. กรุงเทพฯ : บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน).
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. 2551. **กากออกแบบและวิเคราะห์การตลาด**. กรุงเทพฯ : บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์. 2551. “การผลิตอาหารขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพจากลูกเต๋อด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน : รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์” ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- วนิดา มาศยะ. 2548. “อายุการเก็บขนมอบกรอบจากข้าวโพดบดที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูด” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา สุขาภิบาลอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สถาบันวิจัยอาหารสัตว์น้ำชายฝั่ง สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง กรมประมง. 2556. **เอกสารวิชาการ. 6**. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง กรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
- สถาพร หมั่นสิน. 2557. “การเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบแผ่นความร้อนเครื่องอบชิ้นงานพรมในรถยนต์” ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและจัดการ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สันติ พุ่มกระจ่าง. 2552. “การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการติดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สันติ หิริญอร. 2551 “ผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากข้าวโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว” วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- Adams, E.L. and Savage, J.S. 2017. “From the children’s perspective: What are candy, snacks, and meals?” *Appetite* 116 : 215-222.
- Ai, Y. Cichy, K.A. Harte, J.B. Kelly, J.D. and Ng P.K.W. 2016. “Effects of extrusion cooking on the chemical composition and functional properties of dry common bean powders” *Food Chemistry* 211 : 538-545.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Alam, M.S. Pathania, S. and Sharma, A. 2016. "Optimization of the extrusion process for development of high fibre soybean-rice ready-to-eat snacks using carrot pomace and cauliflower trimmings." *LWT-Food Science and Technology*. 74 : 135-144.
- AOAC. 2005. **Official Methods of Analysis of the AOAC International**. Gaithersburg : AOAC INTERNATIONAL.
- Azzollini, D. Derossi, A. Fogliano, V. Lakemond, C.M.M. and Severini, C. 2018. "Effects of formulation and process conditions on microstructure, texture and digestibility of extruded insect-riched snacks" *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 45 : 344-353.
- Baum, J.I. Gaines, B.L. Kubas, G.C Mitchell, C.F and Russell, S.L. 2017. "Educational nutrition messaging at breakfast reduces snack intake and influences snack preferences in adult men and women." *Appetite* 117 : 67-73.
- Bisharat, G.I. Oilkonomopoulou, V.P. Panagiotou, N.M. Krokida, M.K. and Maroulis, Z.B. 2013. "Effect of extrusion conditions on the structural properties of corn extrudates enriched with dehydrated vegetables" *Food Research International*. 53 : 1-14.
- Chen, Y. Ye, R. Yin, L. and Zhang, N. 2014. "Novel blasting extrusion processing improved the physicochemical properties of soluble dietary fiber from soybean residue and in vivo evaluation." *Journal of Food Engineering*. 120 : 1-8.
- Gimenez, M.A. Gonzalez, R.J. Wagner, J., Torres, R. Lobo, M.O. and Samman, N.C. 2012. "Effect of extrusion conditions on physicochemical and sensorial properties of corn-broad beans (*Vicia faba*) spaghetti type pasta" *Food Chemistry* 136 : 538-545.
- Green, H. Siwajek, P. and Roulin, A. 2017. "Use of nutrient profiling to identify healthy versus unhealthy snack foods and whether they can be part of a healthy menu plan." *Journal of Nutrition & Intermediary Metabolism*. 9 : 1-5.
- Guy, R. 2001. **Extrusion cooking Technologies and applications**. Abington : Woodhead Publishing Limited.
- Hejdysz, M. Kaczmarek, S.A. and Rutkowski, A. 2016. "Extrusion cooking improves the metabolisable energy of faba beans and the amino acid digestibility in broilers" *Animal Feed Science and Technology* 212 : 100-111.
- Jing, Y. and Chi, Y.J. 2013. "Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue." *Food Chemistry* 138 : 884-889.
- Jozinovic, A. Subaric, D. Ackar, D. Babic, J. and Milicevic, B. 2016. "Influence of spelt flour addition on properties of extruded products based on corn grits" *Journal of Food Engineering*. 172 : 31-37.

- Kang, M.J. Bae, I.Y. and Lee, H.G. 2018. "Rice noodle enriched with okara: Cooking property, texture, and in vitro starch digestibility" *Food Bioscience* 22 : 178-183.
- Korkerd, S., Wanlapa, S., Puttanlek, C., Uttapap, D. and Rungsardthong, V. 2016. "Expansion and functional properties of extruded snacks enriched with nutrition sources from food processing by-products." *Journal of Food Science and Technology* 53 : 561-570.
- Kumar, N. Sarkar, B.C. and Sharma, H.K. 2010. "Development and characterization of extruded product of carrot pomace, rice flour and pulse powder" *African Journal of Food Science* 4 : 703-717.
- Li, H. Long, D. Peng, J. Ming, J. and Zhao, G. 2012. "A novel in-situ enhanced blasting extrusion technique – Extrusion analysis and optimization of processing conditions with okara." *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 16 : 80-88.
- Liu, K. 1999. **SOYBEANS Chemistry, Technology and Utilization**. Maryland : Aspen Publishers, Inc.
- Lu, F. Liu, Y. and Li, B. 2013. "Okara dietary fiber and hypoglycemic effect of okara foods." *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fiber* 2 : 126-132.
- Maskan, M and Altan, A. 2012. **Advances in Food Extrusion Technology**. New York : Taylor & Francis Group.
- Mian N. Riaz. 2007. **Extruders and Expanders in Pet Food, Aquatic and Livestock Feeds**. Clenze : Agrimedia GmbH.
- Natabirwa, H., Nakimbugwe, D., Lung'aho, M. and Muyonga, J.H. 2018. "Optimization of Roba1 extrusion conditions and bean extrudate properties using response surface methodology and multi-response desirability function." *LWT - Food Science and Technology* 96 : 411-418.
- Nazareth, J.L. 2004. **An Optimization Primer**. New York : Springer-Verlag.
- Nocedal, J. and Wright, S.J. 1999. **Numerical Optimization**. New York : Springer-Verlag.
- Park, J. Choi, I. and Kim, Y. 2015. "Cookies formulated from fresh okara using starch, soy flour and hydroxylpropyl methylcellulose have high quality and nutritional value." *LWT-Food Science and Technology* 63 : 660-666.
- Promsakha na Sakon Nakhon, P., Jangchud, K., Jangchud, A. and Charunuch, C. 2018. "Optimization of pumpkin and feed moisture content to produce healthy pumpkin-germinated brown rice extruded snacks." *Agriculture and Natural Resources* 52 : 550-556.
- Rathod, R.P. and Annapure, U.S. 2017. "Physicochemical properties, protein and starch digestibility of lentil based noodle prepared by using extrusion processing." *LWT – Food Science and Technology* 80 : 121-130.

- Roman, L. Pico, J Antolin, B. Martinez, M.M. and Gomez, M. 2018. "Extruded flour improves batter pick-up, coating crispness and aroma profile." *Food Chemistry* 260 : 106-144.
- Sharif, M.K. Rizvi, S.S.H. and Paraman, I. 2014. "Characterization of supercritical fluid extrusion processed rice-soy crisps fortified with micronutrients and soy protein." *LWT – Food Science and Technology* 56 : 414-420.
- Singh, A. Sharma, S. and Singh, B. 2017. "Effect of germination time and temperature on functionality and protein solubility of sorghum flour" *Journal of Cereal Science* 76 : 131-139.
- Siti, N.W. Bidura, I. and Utami, I.A.P. 2016. "The Effect of Supplementation Culture Cellulolytic Bacteria Isolated from the Rumen of Buffalo in the Tofu-Based Rations on the Performance and N-Nh₃ Concentration in Excreta of Duck." *Journal of Biological and Chemical Research*. 33(1) : 214-225.
- Snyder, H.E. and Kwon, T.W. 1987. **SOYBEAN UTILIZATION** New York : Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Stojceska, V., Ainsworth, P., Plunkett, A. and Ibanoglu, S. 2008. "The recycling of brewer's processing by-product into ready-to-eat snacks using extrusion technology." *Journal of Cereal Science* 47 : 469-479.
- Vagadia, B.H. Vanga, S.K. and Raghavan, V. 2017. "Inactivation methods of soybean trypsin inhibitor – A review." *Trends in Food Science & Technology* 64 : 115-125.
- Vong, W.C. and Liu, S.Q. 2016. "Biovalorisation of okara (soybean residue) for food and nutrition." *Trends in Food & Technology* 52 : 139-147.
- Yagci, S. and Gogus, F. 2009. "Development of extruded snack from food by-products: a response surface analysis." *Journal of Food Processing Engineering* 32 : 565-586.
- Yamned, J. 2002. "Effect of Water Activity on Salmonella Senftenberg Inactivation by UV Irradiation." Degree of Master of Engineering (Food Engineering) Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Yoo, J. Alavi, S. Vadlani, P. and Amanor-Boadu, V. 2011. "Thermo-mechanical extrusion pretreatment for conversion of soybean to fermentable sugars" *Bioresource Technology* 102 : 7583-7590.
- Zhu, L.J. Shukri, R. Jhoe de Mesa-Stonestreet, N. Alavi, S. Dogan H. and Shi, Y.C. 2010. "Mechanical and microstructural properties of soy protein – high amylose corn starch extrudates in relation to physiochemical changes of starch during extrusion" *Journal of Food Engineering*, 100 : 232-238.



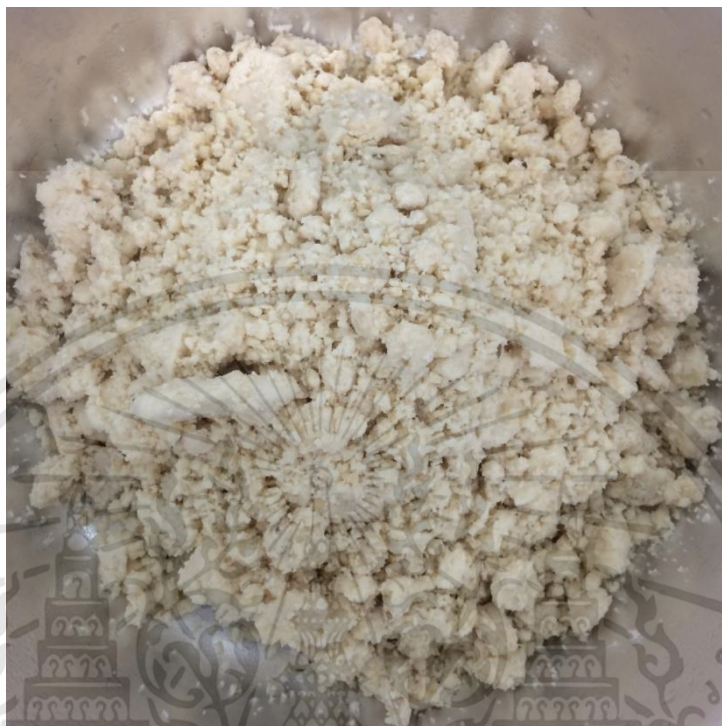
ภาคผนวก ก.

(วัตถุประสงค์ที่ใช้ดำเนินการทดลอง และแบบประเมินทางประสาทสัมผัส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

1. กากถั่วเหลืองสด



2. กากถั่วเหลืองแห้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ข้าวโพดบด



4. องค์ประกอบทางเคมีของข้าวโพดบด และกากถั่วเหลือง

องค์ประกอบทางเคมี	ข้าวโพดบด	กากถั่วเหลือง
โปรตีน	6.45	22.56
ใยอาหาร	0.54	51.53
ลิพิด	3.42	7.79
ความชื้น	12.68	6.75
คาร์โบไฮเดรต	76.41	7.87
เถ้า	0.5	3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray drier)



6. เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (Hammer mill)

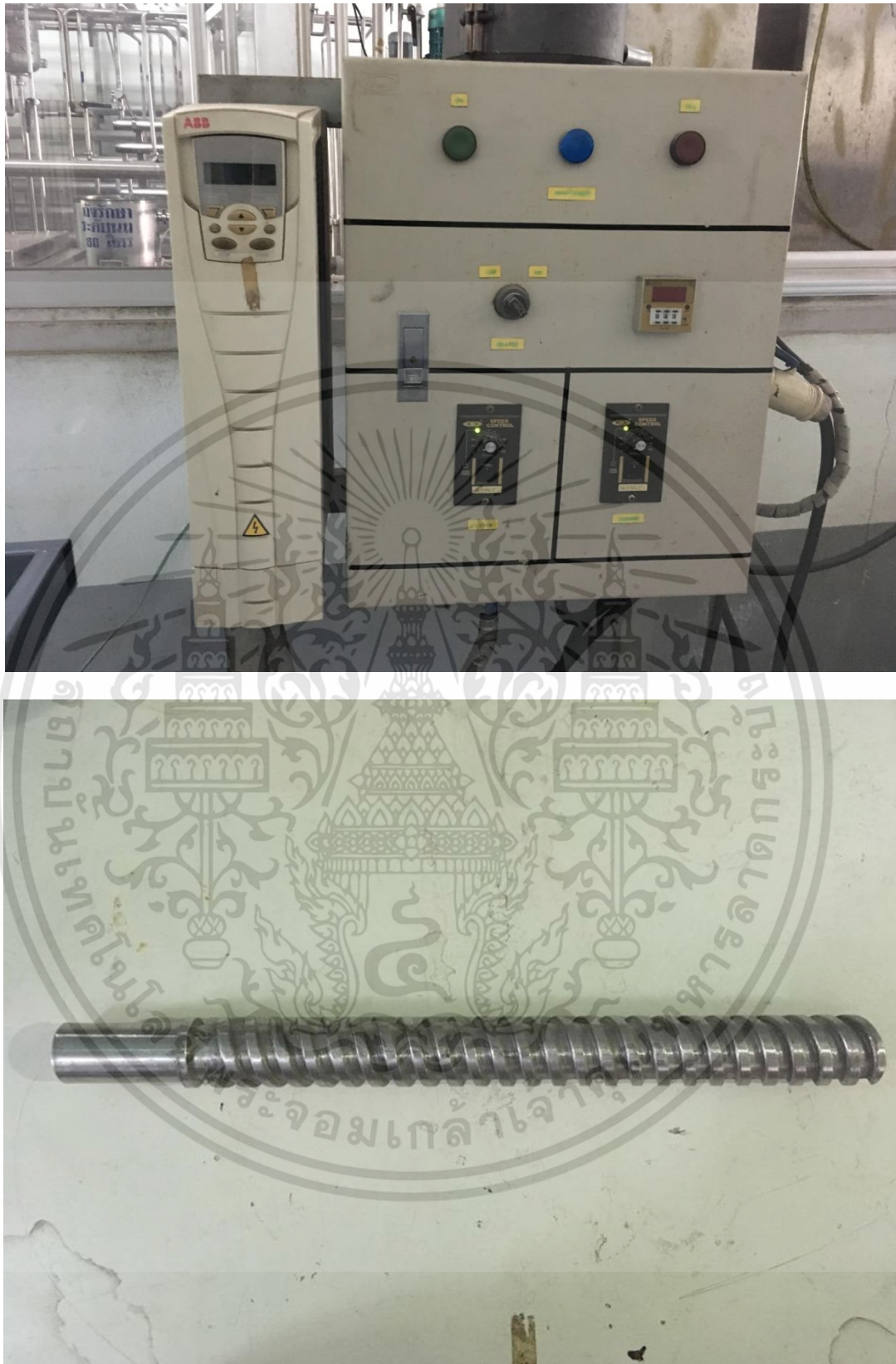


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เครื่องเอ็กซ์เทอร์เตอร์ และสกรู

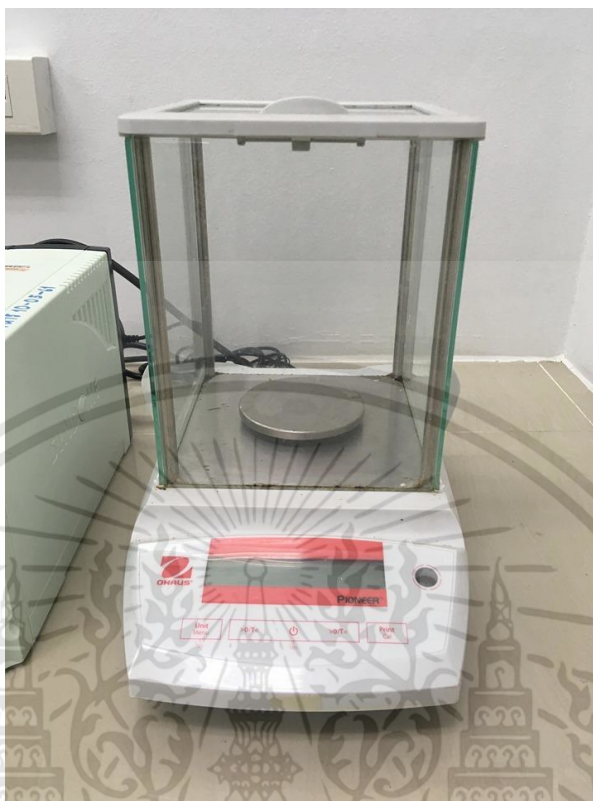


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

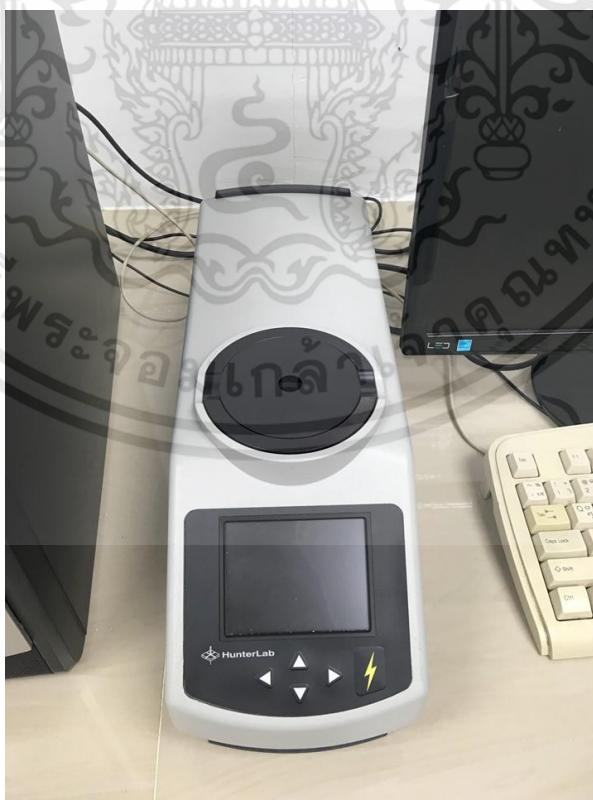


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง

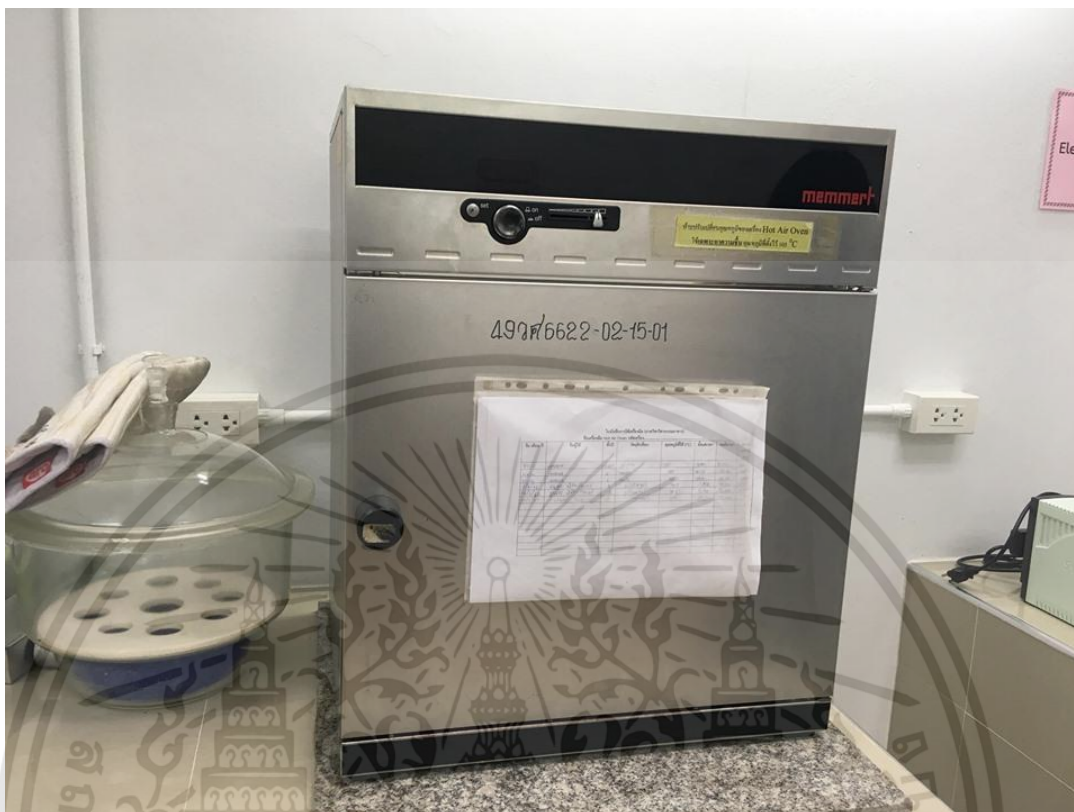


9. เครื่องวัดสี HunterLab



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)



11. เครื่องทดสอบเนื้อสัมผัส (Texture analyzer)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) ข้อมูลทางสถิติของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทุเรท

Source	p-values								
	Moisture content (%)	Water activity	ER (mm/mm)	Density (g/cm ³)	Color difference	WAI (g/g)	WSI (%)	Hardness (N)	Crispness (kg*s)
X ₁	0.83	0.68	0.02	0.06	0.28	0.27	0.82	0.06	0.34
X ₂	0.02	0.11	0.00	0.00	0.40	0.00	0.15	0.02	0.08
X ₃	0.93	0.12	0.05	0.38	0.54	0.86	0.00	0.07	0.44
X ₁ ²	0.03	0.01	0.32	0.69	0.10	0.24	0.47	0.12	0.19
X ₂ ²	0.67	0.03	0.10	0.79	0.49	0.13	0.17	0.76	0.30
X ₃ ²	0.44	0.15	0.34	0.50	0.07	0.19	0.45	0.62	0.60
X ₁ X ₂	0.56	0.88	0.79	0.33	0.33	0.31	0.73	0.02	0.29
X ₁ X ₃	0.42	0.72	0.80	0.30	0.36	0.97	0.12	0.47	0.88
X ₂ X ₃	0.05	0.05	0.40	0.59	0.94	0.08	0.02	0.19	0.09
model	0.12	0.06	0.00	0.00	0.48	0.05	0.04	0.05	0.25
R ²	0.77	0.81	0.94	0.89	0.57	0.83	0.84	0.82	0.69

โดยที่ X₁, X₂ และ X₃ คือ ความเร็วรอบสกรู, กากถั่วเหลือง และความชื้นเริ่มต้น ตามลำดับ

2) ตาราง ANOVA

Moisture content

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	17.22	9	1.91	2.54	0.1159	not significant
A-Screw speed	0.0364	1	0.0364	0.0484	0.8321	
B-Soybean residue	6.34	1	6.34	8.43	0.0229	
C-Feed moisture	0.0062	1	0.0062	0.0082	0.9305	
AB	0.2766	1	0.2766	0.3676	0.5634	
AC	0.5472	1	0.5472	0.7273	0.4220	
BC	3.92	1	3.92	5.22	0.0563	
A ²	5.66	1	5.66	7.53	0.0288	
B ²	0.1519	1	0.1519	0.2020	0.6667	
C ²	0.4948	1	0.4948	0.6577	0.4441	
Residual	5.27	7	0.7523			
Lack of Fit	0.9425	3	0.3142	0.2906	0.8310	not significant
Pure Error	4.32	4	1.08			
Cor Total	22.48	16				

Fit statistics

Std. Dev.	0.8674	R²	0.7658
Mean	7.25	Adjusted R²	0.4646
C.V. %	11.96	Predicted R²	0.0288
		Adeq Precision	6.9622

Coefficient in term of coded factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	6.96	1	0.3879	6.04	7.88	
A-Screw speed	-0.0675	1	0.3067	-0.7926	0.6577	1.0000
B-Soybean residue	-0.8903	1	0.3067	-1.62	-0.1651	1.0000
C-Feed moisture	0.0277	1	0.3067	-0.6974	0.7529	1.0000
AB	0.2629	1	0.4337	-0.7625	1.29	1.0000
AC	0.3699	1	0.4337	-0.6556	1.40	1.0000
BC	0.9904	1	0.4337	-0.0351	2.02	1.0000
A ²	1.16	1	0.4227	0.1601	2.16	1.01
B ²	-0.1900	1	0.4227	-1.19	0.8096	1.01
C ²	-0.3428	1	0.4227	-1.34	0.6567	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Water activity

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.1767	9	0.0196	3.41	0.0601	not significant
A-Screw speed	0.0010	1	0.0010	0.1809	0.6834	
B-Soybean residue	0.0189	1	0.0189	3.29	0.1127	
C-Feed moisture	0.0186	1	0.0186	3.22	0.1158	
AB	0.0001	1	0.0001	0.0243	0.8805	
AC	0.0008	1	0.0008	0.1344	0.7248	
BC	0.0338	1	0.0338	5.86	0.0460	
A ²	0.0523	1	0.0523	9.08	0.0196	
B ²	0.0413	1	0.0413	7.16	0.0317	
C ²	0.0148	1	0.0148	2.56	0.1537	
Residual	0.0404	7	0.0058			
Lack of Fit	0.0053	3	0.0018	0.2009	0.8909	not significant
Pure Error	0.0351	4	0.0088			
Cor Total	0.2171	16				

Fit statistics

Std. Dev.	0.0759	R²	0.8141
Mean	0.4071	Adjusted R²	0.5751
C.V. %	18.65	Predicted R²	0.3581
		Adeq Precision	6.4641

Coefficient in term of coded factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	0.4291	1	0.0340	-0.3488	0.5094	
A-Screw speed	-0.0114	1	0.0268	-0.0749	0.0521	1.0000
B-Soybean residue	-0.0487	1	0.0268	-0.1121	0.0148	1.0000
C-Feed moisture	-0.0482	1	0.0268	-0.1116	0.0153	1.0000
AB	-0.0059	1	0.0380	-0.0957	0.0839	1.0000
AC	0.0139	1	0.0380	-0.0759	0.1037	1.0000
BC	0.0919	1	0.0380	0.0021	0.1817	1.0000
A ²	0.1115	1	0.0370	0.0240	0.1990	1.01
B ²	-0.0990	1	0.0370	-0.1865	-0.0115	1.01
C ²	-0.0592	1	0.0370	-0.1467	0.0283	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Expansion ratio

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1.16	9	0.1288	12.78	0.0014	significant
A-Screw speed	0.1018	1	0.1018	10.11	0.0155	
B-Soybean residue	0.9399	1	0.9399	93.27	< 0.0001	
C-Feed moisture	0.0545	1	0.0545	5.41	0.0529	
AB	0.0008	1	0.0008	0.0758	0.7911	
AC	0.0007	1	0.0007	0.0687	0.8008	
BC	0.0080	1	0.0080	0.7944	0.4024	
A ²	0.0115	1	0.0115	1.14	0.3205	
B ²	0.0360	1	0.0360	3.57	0.1008	
C ²	0.0086	1	0.0086	0.8486	0.3876	
Residual	0.0705	7	0.0101			
Lack of Fit	0.0491	3	0.0164	3.04	0.1551	not significant
Pure Error	0.0215	4	0.0054			
Cor Total	1.23	16				

Fit statistics

Std. Dev.	0.1004	R²	0.9426
Mean	2.15	Adjusted R²	0.8689
C.V. %	4.68	Predicted R²	0.3343
		Adeq Precision	11.9372

Coefficient in term of coded factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	2.15	1	0.0449	2.04	2.25	
A-Screw speed	0.1128	1	0.0355	0.0289	0.1968	1.0000
B-Soybean residue	-0.3428	1	0.0355	-0.4267	-0.2588	1.0000
C-Feed moisture	0.0826	1	0.0355	-0.0014	0.1665	1.0000
AB	-0.0138	1	0.0502	-0.1325	0.1049	1.0000
AC	-0.0132	1	0.0502	-0.1318	0.1055	1.0000
BC	-0.0447	1	0.0502	-0.1634	0.0740	1.0000
A ²	-0.0523	1	0.0489	-0.1680	0.0634	1.01
B ²	0.0924	1	0.0489	-0.0232	0.2081	1.01
C ²	-0.0451	1	0.0489	-0.1607	0.0706	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Density

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0.0553	9	0.0061	6.30	0.0120	significant
A-Screw speed	0.0048	1	0.0048	4.95	0.0613	
B-Soybean residue	0.0463	1	0.0463	47.44	0.0002	
C-Feed moisture	0.0008	1	0.0008	0.8589	0.3849	
AB	0.0011	1	0.0011	1.12	0.3255	
AC	0.0012	1	0.0012	1.28	0.2953	
BC	0.0003	1	0.0003	0.3140	0.5927	
A ²	0.0002	1	0.0002	0.1707	0.6919	
B ²	0.0001	1	0.0001	0.0758	0.7911	
C ²	0.0005	1	0.0005	0.5059	0.4999	
Residual	0.0068	7	0.0010			
Lack of Fit	0.0018	3	0.0006	0.4614	0.7244	not significant
Pure Error	0.0051	4	0.0013			
Cor Total	0.0621	16				

Fit statistics

Std. Dev.	0.0312	R²	0.8901
Mean	0.3230	Adjusted R²	0.7488
C.V. %	9.67	Predicted R²	0.4203
		Adeq Precision	9.5723

Coefficient in term of coded factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	0.3271	1	0.0140	0.2941	0.3601	
A-Screw speed	-0.0246	1	0.0110	-0.0507	0.0015	1.0000
B-Soybean residue	0.0761	1	0.0110	0.0499	0.1022	1.0000
C-Feed moisture	-0.0102	1	0.0110	-0.0363	0.0159	1.0000
AB	-0.0165	1	0.0156	-0.0534	0.0204	1.0000
AC	-0.0177	1	0.0156	-0.0546	0.0193	1.0000
BC	0.0088	1	0.0156	-0.0282	0.0457	1.0000
A ²	0.0063	1	0.0152	-0.0297	0.0423	1.01
B ²	-0.0042	1	0.0152	-0.0402	0.0318	1.01
C ²	-0.0108	1	0.0152	-0.0468	0.0252	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Total color difference

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	36.56	9	4.06	1.05	0.4865	not significant
A-Screw speed	5.28	1	5.28	1.36	0.2812	
B-Soybean residue	3.17	1	3.17	0.8191	0.3955	
C-Feed moisture	1.58	1	1.58	0.4076	0.5435	
AB	4.32	1	4.32	1.11	0.3263	
AC	3.70	1	3.70	0.9551	0.3610	
BC	0.0253	1	0.0253	0.0065	0.9379	
A ²	0.0001	1	0.0001	0.0000	0.9957	
B ²	2.07	1	2.07	0.5353	0.4882	
C ²	16.96	1	16.96	4.38	0.0748	
Residual	27.13	7	3.88			
Lack of Fit	15.77	3	5.26	1.85	0.2783	not significant
Pure Error	11.36	4	2.84			
Cor Total	63.69	16				

Fit statistics

Std. Dev.	1.97	R²	0.5740
Mean	7.09	Adjusted R²	0.0264
C.V. %	27.76	Predicted R²	-3.2411
		Adeq Precision	4.3185

Coefficient in term of coded factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	6.48	1	0.8804	4.40	8.56	
A-Screw speed	-0.8126	1	0.6960	-2.46	0.8332	1.0000
B-Soybean residue	0.6299	1	0.6960	-1.02	2.28	1.0000
C-Feed moisture	0.4444	1	0.6960	-1.20	2.09	1.0000
AB	1.04	1	0.9843	-1.29	3.37	1.0000
AC	0.9620	1	0.9843	-1.37	3.29	1.0000
BC	0.0795	1	0.9843	-2.25	2.41	1.0000
A ²	-0.0053	1	0.9594	-2.27	2.26	1.01
B ²	-0.7019	1	0.9594	-2.97	1.57	1.01
C ²	2.01	1	0.9594	-0.2616	4.28	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Water absorption index (WAI)

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	1.57	9	0.1744	3.73	0.0482	significant
A-Screw speed	0.0670	1	0.0670	1.43	0.2699	
B-Soybean residue	0.9105	1	0.9105	19.49	0.0031	
C-Feed moisture	0.0015	1	0.0015	0.0322	0.8626	
AB	0.0551	1	0.0551	1.18	0.3136	
AC	0.0001	1	0.0001	0.0018	0.9674	
BC	0.1849	1	0.1849	3.96	0.0870	
A ²	0.0777	1	0.0777	1.66	0.2382	
B ²	0.1381	1	0.1381	2.96	0.1292	
C ²	0.0985	1	0.0985	2.11	0.1898	
Residual	0.3270	7	0.0467			
Lack of Fit	0.1474	3	0.0491	1.09	0.4479	not significant
Pure Error	0.1796	4	0.0449			
Cor Total	1.90	16				

Fit statistics

Std. Dev.	0.2161	R²	0.8276
Mean	6.03	Adjusted R²	-0.6059
C.V. %	3.58	Predicted R²	-0.3918
		Adeq Precision	6.6638

Coefficient in term of coded factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	6.26	1	0.0967	6.03	6.48	
A-Screw speed	0.0915	1	0.0764	-0.0892	0.2722	1.0000
B-Soybean residue	-0.3374	1	0.0764	-0.5181	-0.1567	1.0000
C-Feed moisture	-0.0137	1	0.0764	-0.1944	0.1670	1.0000
AB	0.1173	1	0.1081	-0.1382	0.3729	1.0000
AC	-0.0046	1	0.1081	-0.2601	0.2510	1.0000
BC	-0.2150	1	0.1081	-0.4705	0.0406	1.0000
A ²	-0.1358	1	0.1053	-0.3849	0.1132	1.01
B ²	-0.1811	1	0.1053	-0.4302	0.0679	1.01
C ²	-0.1529	1	0.1053	-0.4020	0.0961	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Water solubility index (WSI)

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	128.30	9	14.26	4.10	0.0382	significant
A-Screw speed	0.1901	1	0.1901	0.0547	0.8218	
B-Soybean residue	9.21	1	9.21	2.65	0.1478	
C-Feed moisture	64.02	1	64.02	18.41	0.0036	
AB	0.4491	1	0.4491	0.1291	0.7299	
AC	10.78	1	10.78	3.10	0.1218	
BC	31.37	1	31.37	9.02	0.0199	
A ²	2.05	1	2.05	0.5883	0.4682	
B ²	8.21	1	8.21	2.36	0.1684	
C ²	2.22	1	2.22	0.6384	0.4506	
Residual	24.35	7	3.48			
Lack of Fit	16.00	3	5.33	2.56	0.1932	not significant
Pure Error	8.34	4	2.09			
Cor Total	152.65	16				

Fit statistics

Std. Dev.	1.87	R²	0.8405
Mean	12.98	Adjusted R²	0.6354
C.V. %	14.37	Predicted R²	-0.7628
		Adeq Precision	7.8707

Coefficient in term of coded factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	13.62	1	0.8341	11.65	15.60	
A-Screw speed	-0.1542	1	0.6594	-1.71	1.41	1.0000
B-Soybean residue	-1.07	1	0.6594	-2.63	0.4864	1.0000
C-Feed moisture	2.83	1	0.6594	1.27	4.39	1.0000
AB	0.3351	1	0.9325	-1.87	2.54	1.0000
AC	1.64	1	0.9325	-0.5636	3.85	1.0000
BC	-2.80	1	0.9325	-5.01	-0.5952	1.0000
A ²	-0.6971	1	0.9089	-2.85	1.45	1.01
B ²	-1.40	1	0.9089	-3.55	0.7530	1.01
C ²	0.7262	1	0.9089	-1.42	2.88	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hardness

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	332.13	9	36.90	3.59	0.0532	not significant
A-Screw speed	49.73	1	49.73	4.83	0.0639	
B-Soybean residue	86.34	1	86.34	8.39	0.0231	
C-Feed moisture	49.54	1	49.54	4.81	0.0643	
AB	85.16	1	85.16	8.27	0.0238	
AC	6.11	1	6.11	0.5933	0.4663	
BC	21.52	1	21.52	2.09	0.1915	
A ²	31.27	1	31.27	3.04	0.1249	
B ²	0.9962	1	0.9962	0.0968	0.7648	
C ²	2.73	1	2.73	0.2652	0.6225	
Residual	72.05	7	10.29			
Lack of Fit	46.37	3	15.46	2.41	0.2077	not significant
Pure Error	25.69	4	6.42			
Cor Total	404.18	16				

Fit statistics

Std. Dev.	3.21	R²	0.8217
Mean	26.77	Adjusted R²	0.5925
C.V. %	11.98	Predicted R²	-0.9348
		Adeq Precision	8.9472

Coefficient in term of coded factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	26.10	1	1.43	22.70	29.49	
A-Screw speed	2.49	1	1.13	-0.1889	5.18	1.0000
B-Soybean residue	3.29	1	1.13	0.6030	5.97	1.0000
C-Feed moisture	-2.49	1	1.13	-5.17	0.1938	1.0000
AB	4.61	1	1.60	0.8208	8.41	1.0000
AC	1.24	1	1.60	-2.56	5.03	1.0000
BC	2.32	1	1.60	-1.47	6.11	1.0000
A ²	2.73	1	1.56	-0.9719	6.42	1.01
B ²	-0.4864	1	1.56	-4.18	3.21	1.01
C ²	-0.8051	1	1.56	-4.50	2.89	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Crispness

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	54.01	9	6.00	1.70	0.2489	not significant
A-Screw speed	3.75	1	3.75	1.06	0.3376	
B-Soybean residue	15.08	1	15.08	4.26	0.0778	
C-Feed moisture	2.42	1	2.42	0.6845	0.4353	
AB	4.70	1	4.70	1.33	0.2869	
AC	0.0807	1	0.0807	0.0228	0.8842	
BC	13.62	1	13.62	3.85	0.0905	
A ²	7.59	1	7.59	2.15	0.1863	
B ²	4.40	1	4.40	1.25	0.3013	
C ²	1.10	1	1.10	0.3098	0.5951	
Residual	24.75	7	3.54			
Lack of Fit	1.72	3	0.5734	0.0996	0.9561	not significant
Pure Error	23.03	4	5.76			
Cor Total	78.76	16				

Fit statistics

Std. Dev.	1.88	R²	0.6858
Mean	26.50	Adjusted R²	0.2818
C.V. %	7.09	Predicted R²	0.1937
		Adeq Precision	4.6050

Coefficient in term of coded factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	27.86	1	0.8409	25.87	29.84	
A-Screw speed	0.6843	1	0.6648	-0.8877	2.26	1.0000
B-Soybean residue	-1.37	1	0.6648	-2.94	0.1992	1.0000
C-Feed moisture	-0.5500	1	0.6648	-2.12	1.02	1.0000
AB	1.08	1	0.9401	-1.14	3.31	1.0000
AC	0.1420	1	0.9401	-2.08	2.37	1.0000
BC	-1.84	1	0.9401	-4.07	0.3780	1.0000
A ²	-1.34	1	0.9163	-3.51	0.8242	1.01
B ²	-1.02	1	0.9163	-3.19	1.14	1.01
C ²	-0.5100	1	0.9163	-2.68	1.66	1.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การคำนวณปริมาณน้ำสำหรับการปรับความชื้นวัตถุดิบ

$$(x+W_T)\left(\frac{100-M_T}{100}\right) = W_A\left(\frac{100-M_A}{100}\right) + W_B\left(\frac{100-M_B}{100}\right)$$

โดย x คือ ปริมาณของน้ำที่ต้องเติมเพื่อให้ได้ความชื้น $M_T\%$ ในส่วนผสมปริมาณ W_T
 W_A และ W_B คือ น้ำหนักของวัตถุดิบ A และ วัตถุดิบ B ในส่วนผสม
 M_A และ M_B คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ A และ วัตถุดิบ B

3) การคำนวณค่าความพึงพอใจรวม (Overall desirability, D)

1. สมมติค่าตัวแปร X_1 , X_2 และ X_3 ที่สถานะที่เหมาะสมคือ 428.664, 26.9563 และ 18 ตามลำดับ ค่าดังกล่าวถูกแปลงกลับไปเป็นรหัสที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ได้แก่ 0.955, -0.34 และ 1 ตามลำดับ

2. นำค่า X_i ที่ผ่านการแปลงกลับไปเป็นรหัสที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง แทนลงในสมการที่ใช้ในการหาคำตอบของแต่ละคุณสมบัติ

3. นำคำตอบที่ได้มากำหนดค่า d_i ตามเงื่อนไขในหัวข้อ 2.5.1 ดังนี้

- Expansion ratio (ER) (กำหนดข้อจำกัดในช่วง 2.550-2.950)

$$\begin{aligned} d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \leq L_i \\ d_i(y_i) &= 1 && ; L_i \leq y_i \leq U_i \\ d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \geq U_i \\ 2.550 \leq y_{ER} \leq 2.950 &&& \therefore d_{ER}(y_{ER}) = 1 \end{aligned}$$

- Density (D) (กำหนดข้อจำกัดในช่วง 0.212-0.250)

$$\begin{aligned} d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \leq L_i \\ d_i(y_i) &= 1 && ; L_i \leq y_i \leq U_i \\ d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \geq U_i \\ 0.212 \leq y_D \leq 0.250 &&& \therefore d_D(y_D) = 1 \end{aligned}$$

-Water absorption index (WAI) (กำหนดให้ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี)

$$\begin{aligned} d_i(y_i) &= 1 && ; y_i \leq L_i \\ d_i(y_i) &= (U_i - y_i / U_i - L_i)^{x_i} && ; L_i \leq y_i \leq U_i \\ d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \geq U_i \\ d_{WAI}(y_{WAI}) &= (6.616 - 6.166 / 6.616 - 5.455)^1 \\ d_{WAI}(y_{WAI}) &= 0.384 \end{aligned}$$

- Water solubility index (WSI) (กำหนดให้ค่ายิ่งมากยิ่งดี)

$$\begin{aligned} d_i(y_i) &= 0 && ; y_i \leq L_i \\ d_i(y_i) &= (y_i - L_i / U_i - L_i)^{x_i} && ; L_i \leq y_i \leq U_i \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_i(y_i) = 1 \quad ; y_i \geq U_i$$

$$d_{WSI}(y_{WSI}) = (18.92 - 7.07 / 19.00 - 7.07)^1$$

$$d_{WSI}(y_{WSI}) = 0.992$$

- Hardness (H) (กำหนดให้ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี)

$$d_i(y_i) = 1 \quad ; y_i \leq L_i$$

$$d_i(y_i) = (U_i - y_i / U_i - L_i)^{x_i} \quad ; L_i \leq y_i \leq U_i$$

$$d_i(y_i) = 0 \quad ; y_i \geq U_i$$

$$d_H(y_H) = (35.44 - 25.76 / 35.44 - 15.63)^1$$

$$d_H(y_H) = 0.488$$

- Protein (P) (กำหนดให้ค่ายิ่งมากยิ่งดี)

$$d_i(y_i) = 0 \quad ; y_i \leq L_i$$

$$d_i(y_i) = (y_i - L_i / U_i - L_i)^{x_i} \quad ; L_i \leq y_i \leq U_i$$

$$d_i(y_i) = 1 \quad ; y_i \geq U_i$$

$$d_P(y_P) = (10.789 - 9.67 / 12.89 - 9.67)^1$$

$$d_P(y_P) = 0.348$$

4. หาค่าความพึงพอใจรวม (Overall desirability) จาก

$$D = (d_1(y_1)d_2(y_2)d_3(y_3)\dots d_i(y_i))^{1/p}$$

โดย ค่า p คือ จำนวนคำตอบที่ใช้หาค่าความพึงพอใจรวม (D) ซึ่งค่า d_i ใด ๆ ที่อยู่ในช่วงของการกำหนดข้อจำกัด จะไม่ถูกนำมาใช้ในการคิดค่า p

$$D = (d_{ER}(y_{ER})d_D(y_D)d_{WAI}(y_{WAI})d_{WSI}(y_{WSI})d_H(y_H)d_P(y_P))^{1/4}$$

$$D = (1 \times 1 \times 0.384 \times 0.992 \times 0.488 \times 0.348)^{1/4}$$

$$D = 0.505$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประชุมวิชาการ
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
 ระดับชาติ ครั้งที่ 20 ระดับนานาชาติ ครั้งที่ 12 ประจำปี 2562

TSAE | 2019

The 20th TSAE National Conference &
 The 12th TSAE International Conference

March 14-15, 2019
Hard Rock Hotel

Pattaya, Chonburi, Thailand
 organized by Department of Agricultural Engineering,
 Faculty of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL) &
 Thai Society Agricultural Engineering (TSAE)

*It is not just a smart farm,
 it is a smarter farm.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



The 12th TS&AE International Conference
14-15 March 2019 at Hard Rock Hotel, Pattaya, Thailand

Effects of Extrusion Variables on Extrudate Characteristics from Corn-based Enriched with Soybean Residue

Konlawat Unsaeng¹, Pimkhuan Hannanta-anan¹, Maradee Phongpipatpong^{1,*}

¹Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

Abstract. Soybean residue is a food processing by-product of soya milk or tofu production process. It consists of rich protein and fiber. As a result, reprocessing soybean residue as human food can be a worthwhile alternative. This research focuses on studying the effects of extrusion process and the extrudate characteristics. The mixture of corn grit and soybean residue flour was extruded by single-screw extruder to produce high protein snack. Experimental design was performed by Box-Behnken design and Response surface methodology (RSM) was used to assess the effects on extrusion variables, including screw speed (370-430 RPM), soybean residue flour content (20-40%) and feed moisture (14-18%) on the properties of the extrudates including, expansion ratio (ER), density (D), water absorption index (WAI), water solubility index (WSI) and hardness (H). Analysis of variance showed that the most significant variables are soybean residue, which has negative effect on ER and positive effect on H, and screw speed, which has positive effect on ER and H, while feed moisture is non-significant in most characteristics.

Keywords: Soybean; Residue; Extrusion; Characteristics

1 Introduction

Soybean residue, also known as okara, is food processing by-product of soya milk or tofu production process. For every 1 kg of dry soybean seed can produce approximately 2.5 kg fresh soybean residue with over 80% moisture content [1]. The amount of soybean residue, was produced annually, lead to significant extermination problem, most of it is dumped and burned as waste [2] although it is a good source of nutrients especially in protein content. Hence using soybean residue as human food is possible. However, raw soybean residue is undesirable due to the presence of enzyme inhibitors and unsavory 'fishy' and 'beany' flavor. Therefore, soybean residue had to be heat-treated before incorporating into various food products [3], such as noodle, bread, rice noodle, cake etc.

Extrusion-cooking technology is an economical and widely prevalent food processing method that involves mixing, cooking and forming process at short time and high temperature. The advantages of extrusion process are its high productivity, low cost, continuous production, short time, unique product and versatility [4]. In order to enhance nutrients in starch-based extrudate snack, vegetable and fruit by-products can be added. Generally, the raw materials used in starch-based product are corn, rice, wheat and potato [5, 6]. Some investigations intended to add vegetable or fruit by-products to improve extruded snacks such as brew's processing by-product [7], defatted soybean meal, mango peel fiber [8] and fruit wastes [9]. Moreover, during extrusion process starch, protein and cellulose polymer transformation can be accomplished [4, 5] and extrusion process can modify the composition of soybean residue [3] by breaking enzyme inhibitor and

allergen, and improving fiber content with accelerating depolymerization of glucosidic bonds [4, 6]. Therefore, the objective of this research is to study the effect of extrusion variables including screw speed, soybean residue and feed moisture on the characteristics of extrudate from corn based enriched with soybean residue including expansion ratio, density, WAI, WSI and hardness.

2 Materials and methods

2.1. Materials

Fresh soybean residue was supplied by soya milk vendor in Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand. The fresh soybean residue (89.39% w/w in MC) was dried at 60°C in tray drier [modified 1], ground with hammer mill and stored at room temperature. Corn grit (mesh no. 3) was obtained from THAI MAIZE PRODUCTS CO., LTD., Bangkok, Thailand.

2.2 Extrusion experiments

Soybean residue (SR) was mixed with corn grit at 20%, 30% and 40% by weight and extruded with single-screw extruder. The screw L/D was 9:1. The screw speed was adjusted to 370, 400 and 430 rpm, while the extrusion temperature was fixed at 100°C. The feed moisture was set at 14%, 16% and 18%. The extrudate was then dried in a tray drier at temperature of 80°C for 10 minutes, then packed in polypropylene (PP) plastic bag and stored at room temperature until analyzed.

2.3 Analytical methods

2.3.1 Expansion ratio (ER)

The expansion ratio was determined by measuring the diameter of extrudate by vernier caliper. 10 samples

*Corresponding author: maradee.ph@kmitl.ac.th

of extrudate were done randomly. Expansion ratio was calculated [10].

2.3.2 Density (D)

Extrudates were cut into specific length of 4 cm and 10 sample of extrudate were randomly weighted, measured their actual geometric diameter and length. Density was calculated [10].

2.3.3 Water absorption index (WAI) and water solubility index (WSI)

2.5 grams of ground sample was dissolved in 30 mL of distilled water, stirred, and then centrifuged at 3000 rpm for 15 minutes. The supernatant was separated and dried on hot plate, then dried at 105°C in hot air oven until constant weight [11]. The WAI and WSI were calculated by the equations:

$$WAI = \frac{\text{mass of wet pellet (g)}}{\text{dry sample (g)}} \quad (1)$$

$$WSI(\%) = \frac{\text{supernatant in dry solid (g)}}{\text{dry sample (g)}} \times 100 \quad (2)$$

The WAI and WSI were done in triplicate.

2.3.4 Hardness (H)

Hardness, defined as a maximum peak force, is examined by TA.XT.plus texture analyzer equipped with P/2 cylindrical probe. The tests were carried out at a pre-test speed: 1.0 mm/s; test speed: 1.0 mm/s; post-test speed: 10.0 mm/s; distance: 12 mm [11].

2.4 Statistical analysis

Experimental design was performed using a three-level, three-factorial Box-Behnken design (BBD) of Response Surface Methodology (RSM) [7] by Design-Expert software version 11. The three independent variables included screw speed (X_1 , rpm), soybean residue (X_2 , %) and feed moisture (X_3 , %). A total number of 17 experiments were run with five replicates of the central point. Regression analysis was performed to generate a response surface model. A second order

polynomial model (equation 3) was examined for its fit to describe the response surface and R^2 were estimated.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (3)$$

where Y are ER, D, WAI, WSI, and H, β_0 , β_{ii} and β_{ij} are constant coefficient and X_1 , X_2 and X_3 are coded independent variables. The fits of all models were determined using ANOVA. F-value at probability ($p < 0.05$) confirming the significance of the models [10].

3 Results and discussion

Fresh soybean residue contains 89.39% moisture. After drying at 60°C with tray drier and grinding, dried soybean residue consists of 12.68% moisture and 22.56% protein, whereas corn grit consists of 6.75% moisture and 6.45% protein. The protein content of extrudates varied from 9.67 to 12.89%. The effects of three different levels of extrusion variables on extrudate characteristics were evaluated.

3.1 Expansion ratio (ER) and Density (D)

Breakfast cereal and second generation snacks were expanded directly from die. The expansion ratio (ER) indicates the quality of puffing of the extrudate. [6, 5] The ER values ranged between 2.73 to 1.75. Table 1 shows that the fitted model was non-linear. The linear effects of SR ($p < 0.00$) negatively affects ER, whilst screw speed ($p = 0.01$) and FM ($p = 0.05$) positively affect ER. Fig. 1a shows that at a given FM of 16%, ER decreased with SR increases as SS changed from 370 to 430 rpm. Because of the presence of fiber in SR in product, the flashing off steam, which leads to expanded product, is prevented [10]. Many results were observed for addition of fiber expansion ratio of extrudates decreased [5, 10, 11]. Besides, the studies had been reported that starch-protein interactions also had a negative effect on ER, while SS had a positive effect on ER [12, 13]. The FM decreased with the decrease of the ER of extruded products. Low moisture in the blend may cause poor superheated water, resulting in a decreased of ER [5].

Table 1. Adequacy of model fitted

Parameter	Fitted models	R ²	p value	C.V. %
ER (cm/cm)	ER=2.15+0.113*X ₁ -0.343*X ₂ +0.083*X ₃ -0.014*X ₁ X ₂ -0.013*X ₁ X ₃ -0.045*X ₂ X ₃ -0.052*X ₁ ² +0.092*X ₂ ² -0.045*X ₃ ²	0.94	<0.00	4.68
D (g/cm ³)	D=0.327-0.025*X ₁ +0.076*X ₂ -0.01*X ₃ -0.017*X ₁ X ₂ -0.018*X ₁ X ₃ +0.009*X ₂ X ₃ +0.006*X ₁ ² -0.004*X ₂ ² -0.011*X ₃ ²	0.89	0.01	9.67
WAI (g/g)	WAI=6.26+0.092*X ₁ -0.337*X ₂ -0.014*X ₃ +0.117*X ₁ X ₂ -0.005*X ₁ X ₃ -0.215*X ₂ X ₃ -0.136*X ₁ ² -0.181*X ₂ ² -0.153*X ₃ ²	0.83	0.05	3.58
WSI (%)	WSI=13.62-0.154*X ₁ -1.07*X ₂ +2.83*X ₃ +0.335*X ₁ X ₂ +1.64*X ₁ X ₃ -2.80*X ₂ X ₃ -0.697*X ₁ ² -1.40*X ₂ ² +0.726*X ₃ ²	0.84	0.04	14.37
H (N)	H=26.10+2.49*X ₁ +3.29*X ₂ -2.49*X ₃ +4.61*X ₁ X ₂ +1.24*X ₁ X ₃ +2.32*X ₂ X ₃ +2.73*X ₁ ² -0.486*X ₂ ² -0.805*X ₃ ²	0.82	0.05	11.98

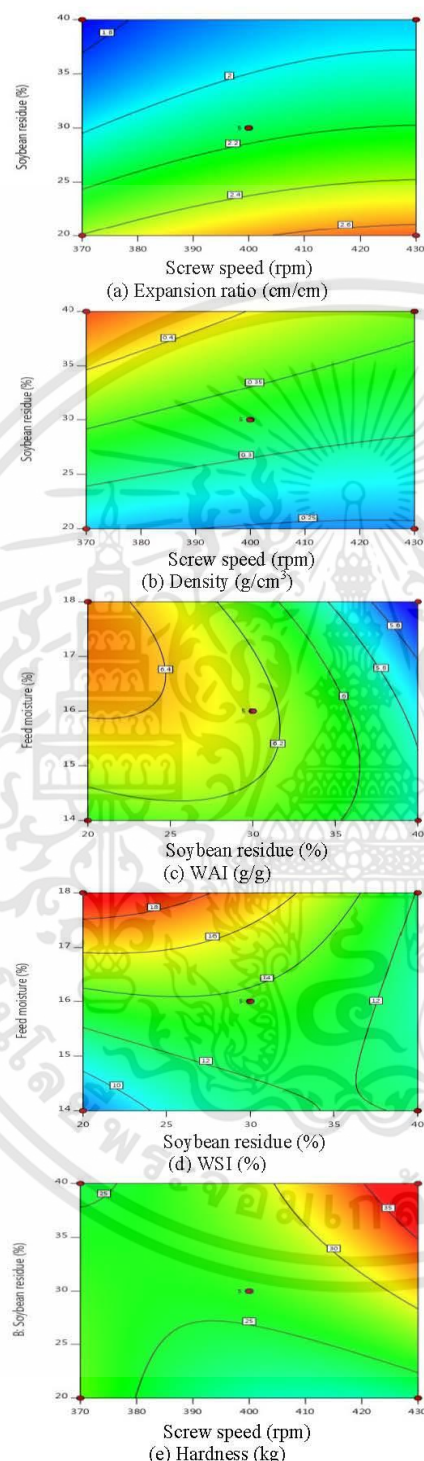


Fig.2. Effect of variables on (a) Expansion ratio (cm/cm), (b) Density (g/cm^3), (c) WAI (g/g), (d) WSI (%), and (e) Hardness (N)

*Corresponding author: maradee.ph@kmitl.ac.th

The density (D) values varied from 0.212 to 0.460 g/cm^3 . Table 1 shows linear term of SR had a positive effect ($p < 0.00$) while SS ($p = 0.06$) had negative effect on D. The increase of SF from 20 to 40% increased D. Moreover, increase of SS decreased D at the same level of SR as represented in Fig. 1b. It can be explained that the fiber tends to rupture cell walls before the air bubbles had expanded, so the product maximum expanding was prevented. [11, 6]. The same results of effect of SS on D were observed [13]. The data indicates that D was negatively correlated with ER. Similar results were observed [14].

3.2 Water absorption index (WAI) and water solubility index (WSI)

WAI and WSI are used to evaluate the functional characteristics of extruded products. WAI reflects the ability of starch to absorb water and serves as indicator of starch gelatinization [6]. Besides, improvement of WAI depends on protein denaturation at high feed moisture [15]. The WAI values of extrudates ranged from 6.62 to 5.46 g/g . The linear term of soybean residue ($p < 0.00$) and interaction term of soybean residue and feed moisture ($p = 0.08$) had negative effects on WAI (Table 1). Fig. 1c suggests that the addition of FM and reduction of SR gives the highest value of WAI. The results indicate that the increase of SR, decreased the WAI values. It is could be due to undamaged long polymer chains in the gelatinized sample [7]. The reduction of starch in blend also reduces gelatinized starch, which lead to less water holding and decreased WAI [6]. The results are in agreement with previous work by [10, 11, 13].

WSI indicates the amount of soluble molecules released from starch and degradation of molecular components, and is also related to dextrinization [6]. The highest value of WSI was 19.00% WSI and the lowest value was 7.07% WSI. Linear term of the FM ($p < 0.00$) and interaction term of SR and FM ($p = 0.02$) were responsible for WSI values (Table 1). The effect of linear terms on WSI values is represented in Fig. 1d. The result clearly shows that WSI increased with FM. In contrary, the studies had been reported that low FM causes an increase of WSI value due to the amount of degraded starch and other components were risen [10,]. In this study, WSI increased with the FM probably due to complete starch gelatinization and protein denaturation from native food components [15]. Furthermore, high FM could also lead to proper gelatinization of starch, resulting in increasing WSI [16]. Additionally, WSI has a negative correlation with WAI [6].

3.3 Hardness (H)

Hardness (H) is the maximum peak obtained from measuring of extruded products [10]. Hardness of

extrudates ranged from 15.63 N to 35.44 N. The content of SR ($p < 0.02$) and interaction effect of SS and SR ($p = 0.02$) positively affected hardness (Table 1). Fig. 2e shows that highest value of hardness was processed at 40% SR and 400 rpm SS at a given 16% FM. This may be explained that the presence of cell wall in the fiber of SR can cause increases in hardness of extrudate [5]. Similar result was observed by [7]. Besides, high protein portion of raw material increases hardness as well [17].

4 Conclusions

The result showed that soybean residue and screw speed significantly affected extrudate characteristics. Soybean residue had importantly effect to expansion ratio, water absorption index, water solubility index and hardness, while screw speed had importantly effect to expansion ration, density and hardness.

References

- H. Li, D. Long, J. Peng, J. Ming & G. Zhao (2012). A novel in-situ enhanced blasting extrusion technique – Extrudate analysis and optimization of processing conditions with okara. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 16, 80-88.
- F. Lu, Y. Liu & B. Li (2013). Okara dietary fiber and hypoglycemic effect of okara foods. *Bioactive carbohydrates and dietary fiber*, 2, 126-132.
- W.C. Vong & S.Q. Liu (2016). Biovalorisation of okara (soybean residue) for food and nutrition. *Trends in Food & Technology*, 52, 139-147.
- Y. Jing & Y.J. Chi (2013). Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physiochemical properties of soybean residue. *Food Chemistry*, 138, 884-889.
- P. Promsakhana Sakon Nakhon, K. Jangchud, A. Jangchud & C. Charunuch (2018). Optimization of pumpkin and feed moisture content to produce healthy pumpkin-germinated brown rice extruded snacks. *Agriculture and Natural Resources*, 52, 550-556.
- M. Maskan & A. Altan (2012). *Advances in Food Extrusion Technology*, Taylor & Francis Group, LLC, New York.
- V. Stojceska, P. Ainsworth, A. Plunkett & S. İbanoğlu (2008a). The recycling of brewer's processing by-product into ready-to-eat snacks using extrusion technology. *Journal of Cereal Science*, 47, 469-479.
- S. Korkerd, S. Wanlapa, C. Puttanlek, D. Uttapap & V. Rungsardthong (2016). Expansion and functional properties of extruded snacks enriched with nutrition sources from food processing by-products. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 561-570.
- S. Yağci & F. Göğüş (2009). Development of extruded snack from food by-products: a response surface analysis. *Journal of Food Processing Engineering*, 32, 565-586.
- M.S. Alam, S. Pathania & A. Sharma (2016). Optimization of the extrusion process for development of high fibre soybean-rice ready-to-eat snacks using carrot pomace and cauliflower trimmings. *LWT - Food Science and Technology*, 74, 135-144.
- Jozinović, A. Šubarić, D. Ačkar, Đ. Babić, J. & Miličević, B. 2016. "Influence of spelt flour addition on properties of extruded products based on corn grits" *Journal of Food Engineering*. 172 : 31-37.
- S.M. Beck, K. Knoerzer, M. Foerster, S. Mayo, C. Philipp & J. Arcot (2018). Low moisture extrusion of pea protein and pea fiber fortified rice starch blends. *Journal of Food Engineering*, 231, 61-71.
- L.J. Zhu, R. Shukri, N. Jhoe de Mesa-Stonestreet, S. Alavi, H. Dogan & Y.C. Shi (2010). Mechanical and microstructural properties of soy protein – high amylose corn starch extrudates in relation to physiochemical changes of starch during extrusion. *Journal of Food Engineering*, 100, 232-238.
- M. Kristiawan, V. Micard, P. Maladira, C. Alchamieh, J.E. Maigret, A.L. Réguerre, M.A. Emin & G. Della Valle (2018). Multi-scale structural changes of starch and proteins during pea flour extrusion. *Food Research International*, 108, 203-215.
- H. Natabirwa, D. Nakimbugwe, M. Lung'aho & J.H. Muyonga (2018). Optimization of Robal extrusion conditions and bean extrudate properties using response surface methodology and multi-response desirability function. *LWT - Food Science and Technology*, 96, 411-418.
- N. Kumar, B.C. Sarkar & H.K. Sharma (2010). Development and characterization of extruded product of carrot pomace, rice flour and pulse powder. *African Journal of Food Science*, 4, 703-717.
- D. Azzollini, A. Derossi, V. Fogliano, C.M.M. Lakemond & C. Severini (2018). Effects of formulation and process conditions on microstructure, texture and digestibility of extruded insect-riched snacks. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45, 344-353.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายกลวัชร อุ่นแสง
 วัน เดือน ปีเกิด 2 สิงหาคม 2636
 ที่อยู่ 49/11-12 ต.บึงคอไห อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150
 ประวัติการศึกษา 2559 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานทางวิชาการ

พ.ศ. 2562

การประชุมวิชาการ The 12th TSAE International Conference ใน
 ระหว่างวันที่ 14-15 มีนาคม 2562 ณ โรงแรม Hard Rock Hotel,
 พัทยา ในหัวข้อเรื่อง “Effects of Extrusion Variables on Extrudate
 Characteristics from Corn-based Enriched with Soybean
 Residue”

การประชุมวิชาการวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ ครั้งที่ 5 ระหว่างวันที่ 28-
 29 มีนาคม 2562 ณ สโมสรธนาคาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด
 นครราชสีมา ในหัวข้อเรื่อง “สภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรการผลิตแบบ
 เอ็กซ์ทรูชันสำหรับอาหารขบเคี้ยวเสริมคุณค่าโภชนาการจากกากถั่วเหลือง
 ด้วยวิธีการใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจหลายด้าน”