

สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากข้าวเสริมใยอาหาร

OPTIMAL CONDITIONS FOR THE PRODUCTION OF RICE EXTRUDATES
ENRICHED WITH FIBER



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-270-072

สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากข้าวเสริมใยอาหาร

OPTIMAL CONDITIONS FOR THE PRODUCTION OF RICE EXTRUDATES
ENRICHED WITH FIBER



กนิษฐา ดุมชัยภูมิ

KANITTHA DUMCHAIYAPOOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-270-072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTIMAL CONDITIONS FOR THE PRODUCTION OF RICE EXTRUDATES
ENRICHED WITH FIBER



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-270-072

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

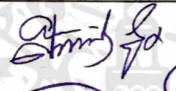


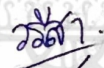

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

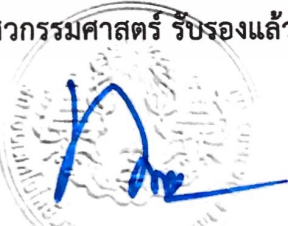
หัวข้อวิทยานิพนธ์ สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากข้าวเสริมใยอาหาร
Thesis Title Optimal Conditions for the Production of Rice Extrudates Enriched with Fiber
นักศึกษา นางสาวชนิษฐา ดุมชัยภูมิ
รหัสประจำตัว 59601241
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2019-EN-M-270-072

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ศิวลักษณ์	ปฐวีรัตน์	
ผศ.ดร.เอกพงษ์	ชีวิตโสภณ	
ผศ.ดร.เอกสิทธิ์	ศรีธรรม	
ผศ.ดร.วีรสา	ชิวฒนกุล	
ผศ.ดร.มาฤดี	ผ่องพิพัฒน์พงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 เวลา 11.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้องประชุม 4 ชั้น 5 อาคาร A

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมเอกสารนี้เสร็จเรียบร้อยแล้วควรคืนเอกสารคืน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเอ็กซ์ทราคต์จากข้าวเสริมใยอาหาร
นักศึกษา	นางสาวชนิษฐา ดุมชัยภูมิ
รหัสประจำตัว	59601241
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์

บทคัดย่อ

กากมะพร้าวเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันมะพร้าวและกระบวนการผลิตกะทิ ซึ่งอุดมไปด้วยใยอาหารที่มีบทบาทสำคัญต่อสุขภาพในการป้องกันความเสี่ยงจากโรคเรื้อรังต่าง ๆ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการนำกากมะพร้าวที่เป็นผลพลอยได้ที่มียูทิลิตี้ต่ำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และการหาสภาวะที่เหมาะสมในการแปรรูปผลิตภัณฑ์โดยใช้กระบวนการเอ็กซ์ทราคชันซึ่งเป็นที่รู้จักกันอย่างกว้างขวาง ปัจจัยของกระบวนการเอ็กซ์ทราคชันที่ศึกษาประกอบด้วย ปริมาณกากมะพร้าว (0, 6 และ 12 %) ปริมาณข้าวเหนียว (5, 10 และ 15 %) และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์ (380, 400 และ 420 rpm) ที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเอ็กซ์ทราคต์ คือ ความชื้น ค่า water activity (a_w) อัตราการพองตัว ความหนาแน่น ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) ดัชนีการละลายน้ำ (water solubility index, WSI) และลักษณะเนื้อสัมผัส วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM) ถูกนำมาใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิต เอ็กซ์ทราคต์ที่ได้มีปริมาณใยอาหารอยู่ในช่วง 0.34-2.84 % ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าความชื้นคือ 6.76-8.27 % ค่า a_w คือ 0.22-0.36 อัตราการพองตัวคือ 2.30-2.78 ความหนาแน่นคือ 0.55-0.76 g/cm³ ดัชนีการดูดซับน้ำคือ 4.24-5.50 g/g ดัชนีการละลายน้ำคือ 21.51-33.37 % ความกรอบคือ 16.87-27.73 kg.sec และความแข็งคือ 12.38-22.07 N สมการถดถอยแสดงให้เห็นว่าอัตราการพองตัว ความหนาแน่น ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายน้ำ และความกรอบ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ช่วงของสภาวะการผลิตที่เหมาะสมคือ เมื่อใช้ปริมาณกากมะพร้าว 2.99-11.82 % ปริมาณข้าวเหนียว 5-6.78 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์ 412.09-420 rpm และเมื่อนำผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคต์ที่อยู่ในช่วงสภาวะการผลิตที่เหมาะสมจำนวน 3 ตัวอย่าง ไปทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสกับผู้ทดสอบจำนวน 10 คน พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบรวมจากตัวอย่างเอ็กซ์ทราคต์ที่ผลิตจากสภาวะที่มีปริมาณกากมะพร้าว 0 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์ 400 rpm เป็นลำดับสูงสุดเท่ากับ 6.80 คะแนน

Thesis	Optimal Conditions for the Production of Rice Extrudates Enriched with Fiber
Student	Miss.Kanittha Dumchaiyapoom
Student ID.	59601241
Degree	Master of Engineering
Program	Food Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Maradee Phongpipatpong

ABSTRACT

Coconut meal is a by-product of coconut oil and coconut milk production. It is a rich source of dietary fiber which shows to have an important role in lowering the risk of various chronic diseases. Therefore, it is interesting to convert the coconut meal, previously recognized as a low value by-product, into a nutritious food product. The aim of this work is to investigate the possibility of such conversion and optimization using a widely known extrusion method. The effect of extrusion variables, including the coconut meal content (0, 6, and 12 %), glutinous rice content (5, 10 and 15 %) and screw speed of the extruder (380, 400 and 420 rpm) were investigated on the properties of extruded products. Chemical and physical properties of the extrudates such as moisture content, water activity (a_w), expansion ratio, density, water absorption index (WAI), water solubility index (WSI) and texture were evaluated. Response surface methodology (RSM) was implemented to determine the optimum process conditions. Fiber content of extrudates were in the range of 0.34-2.84 %. Our study showed that the extrudates had moisture content of 6.76-8.27 %, a_w of 0.22-0.36, expansion ratio of 2.30-2.78, density of 0.55-0.76 g/cm³, WAI of 4.24-5.50 g/g, WSI of 21.51-33.37 %, crispness of 16.87-27.73 kg.sec and hardness of 12.38-22.07 N. The regression models for expansion ratio, density, WAI, WSI and crispness were derived and statistically significant ($p < 0.05$). Base on the snack in the market criterion, the optimum process conditions of fiber-rich extrudates were obtained when extrusion with 2.99-11.82 % of coconut meal content, 5-6.78 % of glutinous rice content and 412.09-420 rpm of screw speed. Three extrudate samples at optimum conditions were then selected and investigated for sensory evaluation with 10 test panels. It was found that the sample from 0 % of coconut

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 II
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

meal content, 5 % of glutinous rice content and 400 rpm of screw speed got the highest score (= 6.80) of sensory evaluations.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยการให้คำปรึกษาและการสนับสนุนจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำ รับฟังปัญหา และคอยสนับสนุนช่วยเหลือในหลายๆ เรื่อง ทั้งเรื่องการศึกษาและการให้ทัศนคติที่ดีในเรื่องต่างๆ

นอกจากนี้ ขอขอบคุณการให้ความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่วิจัยและเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชา วิศวกรรมอาหาร สำหรับความช่วยเหลือและสนับสนุนดูแลเรื่องการใช้อุปกรณ์และสถานที่ที่มีความสะดวกในการศึกษา

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และครอบครัวสำหรับการให้คำปรึกษา การสนับสนุน และการให้กำลังใจ

ชนิษฐา ดุมชัยภูมิ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ขนมอบเคี้ยว	4
2.2 มะพร้าว	5
2.2.1 คุณค่าทางโภชนาการ	5
2.2.2 ประโยชน์	6
2.2.3 กากมะพร้าว	7
2.2.4 ใยอาหาร	7
2.3 ข้าว	8
2.3.1 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว	9
2.3.2 คุณค่าทางโภชนาการ	10
2.3.3 ปลายข้าว	10
2.3.4 ประเภทของข้าว	11
2.4 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion)	12
2.4.1 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	13
2.4.2 การคำนวณเกี่ยวกับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน	13
2.4.3 ประเภทของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	15
2.4.4 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	17

2.4.5 ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์โดยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	18
2.4.6 บทบาทของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในอุตสาหกรรมอาหาร	19
2.4.7 ขนมอบเคี้ยวกับการผลิตในระบบเอ็กซ์ทรูชัน	20
2.5 วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1 การเตรียมวัตถุดิบ	28
3.2 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน	28
3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ	29
3.3.1 ความชื้น (Moisture content)	29
3.3.2 ค่า Water activity (a_w)	29
3.3.3 อัตราการพองตัว (Expansion ratio)	30
3.3.4 ความหนาแน่น (Density)	30
3.3.5 ดัชนีการดูดซับน้ำ (Water absorption index, WAI) และ ดัชนีการละลาย	
น้ำ (Water solubility index, WSI)	30
3.3.6 ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture)	31
3.3.7 ไขมัน (Fat)	31
3.3.8 เยื่อใยหยาบ (Crude fiber)	31
3.4 แผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	32
3.5 การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท	33
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	35
4.1 คุณสมบัติของวัตถุดิบ	35
4.2 ผลกระทบของตัวแปรที่ศึกษาต่อคุณสมบัติของเอ็กซ์ทรูเดท	38
4.2.1 ความชื้น	38
4.2.2 ค่า Water activity (a_w)	42
4.2.3 อัตราการพองตัว	44
4.2.4 ความหนาแน่น	47
4.2.5 ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI)	50
4.2.6 ดัชนีการละลายน้ำ (WSI)	53
4.2.7 ลักษณะเนื้อสัมผัส	56
4.3 สภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต	61

4.4 การยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดท	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	65
5.1 สรุปผลการวิจัย	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	67
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	73
ภาคผนวก ข	82
ภาคผนวก ค	91
ประวัติผู้เขียน	97



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แหล่งเพาะปลูกที่สำคัญในประเทศไทย ปี 2559	5
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเจ้าและข้าวเหนียว	12
3.1 ระดับของปัจจัยในการทดลอง	32
3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken	33
4.1 ผลการทดลองของคุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคตจากแต่ละสภาวะการทดลอง	37
4.2 ช่วงผลการทดลองของแต่ละคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคต	38
4.3 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยกำลังสอง	39
4.4 เกณฑ์การคัดเลือกผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคตในการหาสภาวะที่เหมาะสม	61
4.5 ตัวอย่างเอ็กซ์ทราคตจากสภาวะการผลิตที่คัดเลือกมาทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส	63
4.6 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสต่อผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคตจากผู้ชิมจำนวน 10 คน	63

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว	9
2.2 เมล็ดข้าวเจ้าและข้าวเหนียว	11
2.3 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว	16
2.4 ลักษณะการหมุนของสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (ก.) หมุนไปในทิศทางเดียวกัน และ (ข.) หมุนในทิศทางตรงข้ามกัน	17
2.5 ส่วนประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	18
2.6 เอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทต่าง ๆ	21
2.7 พื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนอง	22
2.8 พื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงสร้างสำหรับ (ก.) พื้นผิวตอบสนองที่มากที่สุด (ข.) พื้นผิวตอบสนองที่น้อยที่สุด และ (ค.) จุดแบบอานม้า	23
3.1 ขั้นตอนการทดลอง	29
4.1 ผลลัพธ์เอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ได้จากแต่ละสภาวะการทดลอง เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	35
4.2 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองของความชื้นที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %	41
4.3 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองของค่า a_w ที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %	43
4.4 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองของอัตราการพองตัวที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %	46
4.5 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %	49
4.6 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองของดัชนีการดูดซับน้ำที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %	52
4.7 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองของดัชนีการละลายน้ำที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %	55
4.8 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองของความกรอบที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %	57
4.9 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงสร้างของพื้นผิวตอบสนองของความแข็งที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %	60

4.10 ช่วงของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากข้าวเสริมใยอาหารจากกากมะพร้าว



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ขนมขบเคี้ยวส่วนใหญ่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก อีกทั้งยังมีไขมันและน้ำตาลในปริมาณมาก เป็นผลให้มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำ (เนตรนภิส, 2550) มีรายงานว่า การรับประทานขนมขบเคี้ยวมีส่วนเกี่ยวข้องกับภาวะน้ำหนักเกินและโรคอ้วน (Green et al., 2017) ผลสำรวจในปี 2015 พบว่าประชากรประมาณ 42 พันล้านคนทั่วโลก มีภาวะน้ำหนักเกินอันเนื่องมาจากการรับประทานขนมขบเคี้ยวเป็นประจำ (Adams and Savage, 2017) เนื่องจากขนมขบเคี้ยวเป็นอาหารประเภทที่บริโภคได้ง่าย สะดวกต่อการพกพาไปตามที่ต่าง ๆ และเก็บรักษาได้ง่ายเป็นระยะเวลานาน จึงได้รับการยอมรับและความนิยมจากผู้บริโภคเป็นอย่างมาก ในปัจจุบันผู้บริโภคหันมาใส่ใจสุขภาพมากขึ้น ทำให้มีความต้องการผลิตภัณฑ์อาหารที่คำนึงถึงการควบคุมน้ำหนักและการมีสุขภาพที่ดี รวมทั้งมีคุณค่าทางโภชนาการตามหลักมาตรฐานสากลนอกเหนือไปจากรสชาติ เนื้อสัมผัส และรูปลักษณะของอาหาร ซึ่งการเสริมใยอาหารจะช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับขนมขบเคี้ยวให้มากขึ้นได้ (Philipp et al., 2017; Arivalagan et al., 2018) มีผลสำรวจพบว่ามีการพัฒนาขนมขบเคี้ยวที่มีการเสริมคุณค่าทางโภชนาการซึ่งทำให้ผู้บริโภคมีสุขภาพที่ดีขึ้น (Okafor and Ugwu, 2014)

กากมะพร้าวเป็นแหล่งที่อุดมไปด้วยใยอาหารประมาณ 76 % (Thushari and Babel, 2018) ซึ่งกากมะพร้าวเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการแปรรูปมะพร้าว เช่น การสกัดน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์และการผลิตกะทิ เป็นต้น จากข้อมูลพบว่าการผลิตกะทิ 100 กรัม ได้กากมะพร้าวประมาณ 10 กรัม สำหรับประเทศไทยมีการผลิตกะทิประมาณ 36,000 ตันต่อปี ดังนั้นปริมาณของกากมะพร้าวจากการผลิตกะทิจึงมีมากถึงประมาณ 3,600 ตันต่อปี (Khuwijitjaru et al., 2012) ใยอาหารมีบทบาทสำคัญต่อสุขภาพในการป้องกันความเสี่ยงจากโรคเรื้อรังต่างๆ เช่น โรคเมรัง โรคหัวใจและหลอดเลือด และโรคเบาหวาน (Trinidad et al., 2006) นอกจากนี้ยังช่วยในการควบคุมน้ำหนักอีกด้วย (Yalegama et al., 2013) มีการศึกษาโดยใช้ใยอาหารเป็นส่วนผสมในอาหารต่าง ๆ เช่น บิสกิต ขนมหวานที่ทำจากน้ำตาล เครื่องดื่ม ซอส ของหวาน และโยเกิร์ต เป็นต้น พบว่าใยอาหารทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มปริมาณและยังสามารถช่วยลดปริมาณคอเลสเตอรอล (cholesterol) ได้ด้วย (Raghavendra et al., 2006)

ดังนั้นการนำกากมะพร้าวไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสำหรับการผลิตอาหารเพื่อสุขภาพในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ประเภทขนมขบเคี้ยวจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับขนมขบเคี้ยว ในการผลิตขนมขบเคี้ยวนั้นมักนิยมใช้วิธีการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันซึ่งเป็นหนึ่งใน

กระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นกระบวนการที่สามารถเปลี่ยนวัตถุดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปได้อย่างสะดวกรวดเร็ว มีความอ่อนกประสงค์ และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะตามความต้องการทั้งรูปร่าง ขนาด เนื้อสัมผัส และลักษณะทางประสาทสัมผัส (Khan et al., 2015; Arivalagan et al., 2018) ในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันวัตถุดิบจะอยู่ภายใต้สภาวะแรงการปรับโครงสร้างของส่วนผสมภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูงที่ยังคงกลิ่นรสได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง (Riaz and Rokey, 2013) มีการนำกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารเพื่อผลิตและพัฒนาอาหารที่พร้อมรับประทานหลายชนิด ได้แก่ อาหารเข้าจากธัญพืช อาหารเด็ก ขนมขบเคี้ยว เนื้อเทียมและชีสเทียม และแป้งตัดแปร เป็นต้น (Rajesh et al., 2014)

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นหนึ่งในวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน ในประเทศไทยข้าวเป็นสินค้าทางการเกษตรที่มีความสำคัญที่สุด มีการเพาะปลูกกันอย่างกว้างขวาง และยังเป็นอาหารหลักด้วย (Sombunjitt et al., 2017; Kukusamude and Kongsri, 2018) ปลายข้าวเป็นผลพลอยได้ในระหว่างขั้นตอนการสีข้าว ข้าวบางส่วนเกิดการแตกหักเป็นปลายข้าวที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจต่ำ คุณสมบัติเด่นของปลายข้าวคือ มีรสชาติอ่อน สีส่อน สามารถย่อยได้ง่าย ไม่มีส่วนที่ก่อให้เกิดอาการแพ้สารอาหาร จึงเหมาะแก่การนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี (Nascimento et al., 2017) โดยทั่วไปข้าวแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่ต่างกัน เช่น ข้าวเหนียวมีความแตกต่างจากข้าวเจ้า เนื่องจากข้าวเหนียวส่วนใหญ่มีปริมาณอะไมโลส (amylose) ค่อนข้างต่ำหรือแทบไม่มีเลย (0-2 %) แต่มีปริมาณอะไมโลเพคติน (amylopectin) สูง ซึ่งทำให้ข้าวเหนียวมีคุณสมบัติที่เหนียวหลังจากการปรุงสุก (Kang et al., 2010) Chaiyakul et al. (2009) รายงานว่ามีการศึกษาผลของข้าวเจ้าและข้าวเหนียวในการทำผลิตภัณฑ์ที่คล้ายกับมันฝรั่งทอดจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีข้าวเหนียวเป็นส่วนผสมในวัตถุดิบมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีกว่า ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีข้าวเหนียวเป็นส่วนผสมในวัตถุดิบนั้น มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งเกินไป การนำปลายข้าวมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าย่อมก่อให้เกิดประโยชน์สูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารโดยใช้วัตถุดิบจากปลายข้าวที่ผสมโยอาหารจากกากมะพร้าวเพื่อพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารประเภทขนมขบเคี้ยวที่มีคุณค่าทางโภชนาการด้วยกรรมวิธีการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาผลของปัจจัย (ปริมาณกากมะพร้าวและปริมาณข้าวเหนียวในวัตถุดิบผสม และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์) ที่มีต่อการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารในรูปแบบขนมขบเคี้ยว
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารประเภทขนมขบเคี้ยวด้วยกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้เป็นแบบสกรูเดี่ยว ค่า L/D (length: diameter) เท่ากับ 9:1 เส้นผ่าศูนย์กลางของสกรู 34.6 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูหน้าแปลน เท่ากับ 3.8 มิลลิเมตร
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารในรูปแบบขนมขบเคี้ยว ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ปริมาณกากมะพร้าว ปริมาณข้าวเหนียว และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์
3. คุณลักษณะทางเคมีกายภาพของเอ็กซ์ทรูเดทที่ศึกษา ได้แก่ ความชื้น ค่า water activity (a_w) อัตราการพองตัว ความหนาแน่น ดัชนีการดูดซับน้ำ (water absorption index, WAI) ดัชนีการละลายน้ำ (water solubility index, WSI) และลักษณะเนื้อสัมผัส
4. หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารประเภทขนมขบเคี้ยวด้วยกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงกรรมวิธีการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารในรูปแบบขนมขบเคี้ยวด้วยกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน
2. ทราบถึงผลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท
3. ทราบถึงช่วงของสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากปลายข้าวเสริมใยอาหารจากกากมะพร้าวด้วยกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ขนมขบเคี้ยว

ขนมขบเคี้ยว หมายถึง อาหารหรืออาหารว่างที่รับประทานระหว่างมื้ออาหารหลักและต้องเป็นอาหารที่เหมาะสมสำหรับนำมารับประทานเล่น ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นน้ำดื่มในบ้านหรือร้านอาหาร อาหารเข้าจากธัญพืชที่นำมารับประทานเล่นตอนบ่าย ชูบที่ทำจากวัตถุดิบหลาย ๆ อย่างรวมกัน และขนมคุกกี้ที่รับประทานกับนมสำหรับเด็ก ๆ ที่เพิ่งกลับมาจากโรงเรียนในตอนบ่ายก็ล้วนเรียกว่า ‘ขนมขบเคี้ยว’ ทั้งสิ้น มักนิยมบริโภคเพื่อความเพลิดเพลิน ขนมขบเคี้ยวจัดเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง เนื่องจากมีคาร์โบไฮเดรต น้ำตาล และไขมันเป็นส่วนผสมจำนวนมากจึงช่วยให้อิ่มท้องได้ โดยปกติมีการผลิตเป็นจำนวนมากในเชิงพาณิชย์โดยใช้กระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง มักมีการปรุงรสด้วยเกลือ และมีการเติมกลิ่นรสต่างๆ เข้าไป ลักษณะเด่นของขนมขบเคี้ยวคือ น้ำหนักเบา เก็บรักษาได้ง่ายโดยไม่ต้องแช่เย็น นำติดตัวไปในที่ต่าง ๆ ได้สะดวก บริโภคได้ง่าย และอาจใช้เป็นอาหารที่มีคุณลักษณะเฉพาะ เช่น อาหารเพื่อสุขภาพหรืออาหารว่างในงานสังสรรค์ เป็นต้น นอกเหนือไปจากรสชาติที่อร่อย ขนมขบเคี้ยวควรมีความปลอดภัย ปราศจากอันตรายจากสารเคมีหรือสารพิษอื่น ๆ และเชื่อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคตามข้อกำหนดของกฎหมายจากรัฐบาลหรือหน่วยงานต่างๆ (เนตรนภิส, 2550; Lusas and Rooney, 2001; Grunert et al., 2016)

โดยทั่วไปกรรมวิธีการผลิตขนมขบเคี้ยว สามารถแบ่งได้เป็น 4 วิธีการหลัก ได้แก่

1. Deep fat frying: เป็นการทอดในน้ำมันปริมาณมาก หรือทอดในน้ำมันท่วม ซึ่งระยะเวลาในการทอดจะขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของผลิตภัณฑ์ อาจมีได้ทั้งรูปแบบแผ่น แท่ง วง แหวน หรือรูปทรงอื่น ๆ
2. Quick frying: อุณหภูมิที่ใช้ในการทอดสูงถึง 200°C จึงใช้เวลาในการทอดเพียงไม่นาน ประมาณ 10-15 นาที ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นแผ่นบาง
3. Extrusion cooking: เป็นการผลิตขนมขบเคี้ยวแบบสมัยใหม่ ใช้กระบวนการทำให้สุกภายใต้สภาวะความดันและอุณหภูมิสูงด้วยระยะเวลาสั้น ๆ ประมาณ 200°C นาน 5-10 วินาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะพอง กรอบ และความหนาแน่นต่ำ วัตถุดิบในการผลิตที่เหมาะสม ได้แก่ แป้งจากธัญชาติหรือพืชหัว รวมทั้งแป้งถั่วต่าง ๆ เป็นต้น
4. Roasting หรือ baking: เป็นการใช้อุณหภูมิอบให้ผลิตภัณฑ์สุก ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ถั่วประเภทต่าง ๆ

ขนมขบเคี้ยวส่วนใหญ่มีคุณค่าทางโภชนาการไม่ครบถ้วน เมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบของขนมขบเคี้ยวแล้วพบว่าถ้ารับประทานเป็นประจำจะทำให้มีภาวะน้ำหนักเกินและเป็นโรคอ้วน (เนตรนภิส, 2550; Matz, 1984; Adams and Savage, 2017)

2.2 มะพร้าว

มะพร้าวเป็นพืชยืนต้นที่อยู่ในกลุ่มเดียวกับปาล์ม ถูกจัดอยู่ในวงศ์ Arecaceae (หรือ Palmae) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Cocos nucifera* L. ลักษณะลำต้นตั้งตรง ยาว มีรอยเป็นปล้องตลอดลำต้น ใบเป็นใบประกอบเรียวยาว ออกดอกเป็นช่อสีขาวนวล ผลกลมโต มีเปลือกเป็นเส้นใยหนา (Phoeurk et al., 2018)

มะพร้าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญของประเทศไทย คนไทยรู้จักมะพร้าวและมีการนำมาใช้กันอย่างยาวนาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อการบริโภคทั้งอาหารคาวและอาหารหวาน อีกทั้งยังสามารถนำไปแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ได้หลากหลายรูปแบบ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำตาลมะพร้าว กะทิ แป้งมะพร้าว เป็นต้น มะพร้าวเป็นพืชที่นิยมปลูกกันทั่วโลกโดยเฉพาะประเทศในเขตร้อนและกึ่งร้อน เนื่องจากปลูกได้ง่าย ไม่ต้องดูแลรักษามากนัก ปัจจุบันในประเทศไทยมีแหล่งเพาะปลูกที่สำคัญอยู่ทางภาคใต้ เช่น จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สุราษฎร์ธานี และชุมพร โดยมีปริมาณการผลิตในปี 2559 คือ เนื้อที่เพาะปลูก 1.159 ล้านไร่ และผลผลิต 1.231 ล้านตัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 มะพร้าวที่นิยมปลูกกันมีอยู่หลากหลายสายพันธุ์ แต่พันธุ์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือมะพร้าวน้ำหอม เพราะมีรสชาติหอมหวาน กลมกล่อม เนื้ออ่อนนุ่ม สามารถบริโภคได้ทั้งน้ำและเนื้อ (Rodsamran and Sothornvit, 2018)

ตารางที่ 2.1 แหล่งเพาะปลูกที่สำคัญในประเทศไทย ปี 2559

	เนื้อที่เพาะปลูก (ไร่)	ผลผลิต (ล้านตัน)
จ. ประจวบคีรีขันธ์	454,550	417
จ. สุราษฎร์ธานี	164,350	120
จ. ชุมพร	111,469	39
จ. อื่นๆ	429,039	655

ที่มา : ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมส่งเสริมการเกษตร, 2560

2.2.1 คุณค่าทางโภชนาการ

มะพร้าว 1 ผล ประกอบด้วยส่วนที่เป็นน้ำมะพร้าวประมาณ 25% ของน้ำหนักผลทั้งหมด คุณค่าทางโภชนาการที่พบมากในมะพร้าว ได้แก่ น้ำ น้ำตาล โยอาหาร โปรตีน วิตามินซี โซเดียม

โพแทสเซียม แคลเซียม แร่ธาตุ และวิตามินอื่น ๆ การบริโภคน้ำมันมะพร้าวเป็นทางเลือกที่ดีต่อสุขภาพ เนื่องจากมีคาร์โบไฮเดรตและไขมันในปริมาณต่ำ (Paixão et al., 2019)

2.2.2 ประโยชน์

มะพร้าวถูกขนานนามว่า ‘ต้นไม้แห่งชีวิต’ เพราะทุกส่วนของต้นมะพร้าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น ใช้เป็นอาหาร เครื่องดื่ม ยา สิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นผลมะพร้าวยังมีประโยชน์ต่อร่างกาย บำรุงสุขภาพ และความสวยงาม (Phoeurk et.al. 2018) ประโยชน์ของมะพร้าว มีดังนี้

1. น้ำมันมะพร้าวช่วยแก้กระหายและเพิ่มความสดชื่น เนื่องจากเป็นผลไม้ที่มีฤทธิ์เย็น ทั้งยังมีน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสในปริมาณสูง ร่างกายจึงนำไปใช้เป็นพลังงานได้ง่าย ทำให้หลังจากดื่มน้ำมะพร้าวจึงรู้สึกสดชื่นขึ้นอย่างรวดเร็ว

2. ทดแทนการสูญเสียเหงื่อ เนื่องจากอุดมไปด้วยแคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และวิตามินแร่ธาตุหลากหลายชนิด จึงช่วยคลายความอ่อนล้าจากการออกกำลังกายได้เป็นอย่างดี

3. บำรุงผิวพรรณให้เปล่งปลั่ง เนื่องจากอุดมไปด้วยสารอาหารจากธรรมชาติหลายชนิด เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และวิตามินซี ที่มีส่วนช่วยให้ผิวพรรณเปล่งปลั่งสดใส กระชับ และป้องกันอันตรายจากแสงแดด นอกจากนี้ยังมีสารที่ช่วยชะลอความเสื่อมสภาพของเซลล์ผิว ทำให้ผิวพรรณดูอ่อนเยาว์ ปราศจากริ้วรอย และด้วยฮอร์โมนเอสโตรเจนที่มีอยู่มากในน้ำมันมะพร้าว จึงมีประโยชน์ในการบำรุงสุขภาพของผู้หญิงและดีต่อระบบภายใน

4. ทำให้กระดูกแข็งแรง น้ำมันมะพร้าวมีประโยชน์ในการช่วยป้องกันการสูญเสียมวลกระดูก ชะลอภาวะกระดูกพรุนทั้งในชายวัยหมดฮอร์โมนและหญิงวัยหมดประจำเดือน

5. ช่วยปรับฮอร์โมนของผู้หญิงวัยหมดประจำเดือนให้สมดุล เนื่องจากมีปริมาณฮอร์โมนเอสโตรเจนสูงจึงช่วยชะลอความแก่ ทำให้ผิวพรรณสดใสอ่อนเยาว์ ป้องกันอาการอัลไซเมอร์ และทำให้มีอารมณ์ดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ร่างกายดูดซึมแคลเซียมได้ดีขึ้นอีกด้วย

6. ป้องกันโรคหัวใจ น้ำมันมะพร้าวช่วยเพิ่มระดับไขมันชนิดดี (high density lipoprotein, HDL) ซึ่งมีส่วนช่วยลดไขมันเลว (low density lipoprotein, LDL) จึงมีผลโดยตรงต่อการช่วยป้องกันการเกิดโรคหัวใจและโรคหลอดเลือด

7. ปรับสมดุลของน้ำตาลในเลือด เนื่่อมะพร้าวมีใยอาหารที่ละลายในน้ำได้ คาร์โบไฮเดรตจึงเปลี่ยนเป็นน้ำตาลได้น้อย ทำให้ระดับน้ำตาลในเลือดไม่สูงเกินไปและดีต่อผู้ป่วยโรคเบาหวาน

8. ช่วยควบคุมน้ำหนัก น้ำมันมะพร้าวมีโมเลกุลขนาดกลางจึงถูกย่อยได้เร็วและไม่เกิดการสะสมในร่างกาย อีกทั้งยังไปกระตุ้นกระบวนการเมตาบอลิซึม ทำให้ร่างกายเผาผลาญแคลอรีจากอาหารที่รับประทานเข้าไป ส่งผลให้เหลือไขมันสะสมในร่างกายน้อยลง

2.2.3 กากมะพร้าว

กากมะพร้าวที่สกัดน้ำมันและคั้นน้ำกะทิออกแล้ว เป็นส่วนเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันมะพร้าวและอุตสาหกรรมการผลิตกะทิ ภายหลังจากการแปรรูปมะพร้าวพบว่าโรงงานมีกากมะพร้าวเหลือเป็นจำนวนมากซึ่งมีมูลค่าต่ำ โดยทั่วไปกากมะพร้าวถูกนำไปใช้ผลิตเป็นปุ๋ยและอาหารสัตว์ในภาคเกษตรกรรม แต่กากมะพร้าวนั้นยังคงมีคุณค่าทางโภชนาการเหลืออยู่มาก หากมีการนำไปใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมอาหารจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับกากมะพร้าวได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากกากมะพร้าวเป็นแหล่งของใยอาหารที่ดี ประกอบด้วยปริมาณใยอาหารประมาณ 76 % ซึ่งแบ่งเป็นใยอาหารชนิดที่ละลายน้ำได้ประมาณ 7 % และใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำประมาณ 93 % (Trinidad et al., 2006; Thushari and Babel, 2018) Mepba and Achinewhu (2003) ได้รายงานว่าในกากมะพร้าวมีกรดอะมิโนต่าง ๆ เช่น ไลซีน ซิสเทอีน ฮิสทิดีน อาร์จินีน เมไทโอนีน และกรดอะมิโนที่จำเป็นอื่น ๆ

แม้ว่ากากมะพร้าวจะเป็นแหล่งของใยอาหารที่ดี แต่การใช้กากมะพร้าวเป็นแหล่งเสริมใยอาหารโดยการเติมลงในอาหารโดยตรงในปริมาณมากนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการเติมกากมะพร้าวจะเป็นการเปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของอาหาร เนื่องจากค่าสมบัติทางน้ำ (hydration properties) ได้แก่ ค่าการอุ้มน้ำ (water holding capacity, WHC) ค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำ (water retention capacity, WRC) และค่าการพองตัว (swelling capacity, SC) มีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับใยอาหารจากแหล่งอื่น การเติมกากมะพร้าวลงในผลิตภัณฑ์อาหารอาจส่งผลต่อคุณลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีการพองตัวค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงอาจสามารถใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการการพองตัวมากได้ (Thongsook and Chaijamrus, 2013; Kee-Ariyo et al., 2014)

จากคุณค่าทางโภชนาการและคุณสมบัติทางกายภาพของกากมะพร้าวดังกล่าว จึงมีการนำกากมะพร้าวไปใช้ทำขนมแปงอบชนิดต่าง ๆ เช่น คุกกี้ มัฟฟิน ขนมปังเค้ก และแพนเค้ก เป็นต้น นอกจากนี้แล้วการบริโภคอาหารหรืออาหารว่างที่มีส่วนประกอบของกากมะพร้าวยังช่วยในการรักษาระดับน้ำหนักที่เหมาะสมของร่างกาย ดังนั้นกลุ่มผู้บริโภคสุขภาพและร้านจำหน่ายอาหารเพื่อสุขภาพจึงหันมาใช้กากมะพร้าวในการประกอบอาหารหรือเป็นส่วนผสมในอาหารต่าง ๆ มากขึ้น

2.2.4 ใยอาหาร (Kee-Ariyo et al., 2014; Zheng et al., 2019)

ไฟเบอร์ หรือ ใยอาหาร ส่วนใหญ่จะได้จากส่วนโครงสร้างของพืช เช่น กิ่ง ก้าน เมล็ด เป็นโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน ซึ่งเป็นส่วนที่ร่างกายไม่สามารถย่อยสลายได้ มีอีกชื่อหนึ่งว่า เซลลูโลส ซึ่งมีโครงสร้างประกอบไปด้วยโมเลกุลน้ำตาลมาต่อกันอย่างซับซ้อน ใยอาหารเป็นสารอาหารประเภทหนึ่งที่ทำให้ประโยชน์ต่อร่างกาย เป็นตัวช่วยในการกระตุ้นระบบขับถ่ายและระบบย่อยอาหารได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่าง ๆ อีกด้วย

ใยอาหารจะไม่โดนย่อยด้วยกรดในกระเพาะอาหารและเอนไซม์ในลำไส้เล็กจึงเข้าไปเติมเต็มพื้นที่ในระบบทางเดินอาหาร เวลารับประทานเข้าไปจึงรู้สึกอึด อีกทั้งยังเป็นสารที่ไม่ให้พลังงาน เมื่อรับประทานเข้าไปจึงไม่ก่อให้เกิดพลังงานส่วนเกิน แต่ในทางตรงข้ามกลับไปช่วยขัดขวางการดูดซึมไขมันและคอเลสเตอรอล นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันหรือลดความเสี่ยงจากโรคมะเร็ง ลดอัตราเสี่ยงจากไขมันอุดตันหลอดเลือด ช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ลดความเสี่ยงในการเกิดโรคกระดูกพรุน โรคอ้วน และช่วยเพิ่มภูมิคุ้มกันให้กับร่างกาย และเนื่องจากใยอาหารสามารถช่วยในเรื่องระบบขับถ่ายให้ดีขึ้นจึงช่วยบรรเทาอาการท้องผูกและริดสีดวงทวารได้

ใยอาหารสามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ตามความสามารถในการละลายน้ำ ความหนืด และการถูกย่อยโดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ คือ

1. ใยอาหารชนิดที่ละลายน้ำได้: เมื่อละลายน้ำจะมีลักษณะเป็นเมือก ๆ ถูกย่อยได้ดีโดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่และมีความหนืด ซึ่งความหนืดของใยอาหารชนิดที่ละลายน้ำได้นั้นจะทำให้อาหารสามารถอยู่ในกระเพาะอาหารได้นานขึ้นจึงทำให้รู้สึกอึดได้นานและไม่รู้สึกหิวบ่อย นอกจากนี้ยังช่วยในเรื่องของการควบคุมน้ำหนักตัวได้เพราะช่วยลดอัตราการดูดซึมน้ำตาลและไขมันของลำไส้ นอกจากนี้เมื่อเกิดการย่อยใยอาหารจะก่อให้เกิดกรดไขมันสายสั้น ๆ ขึ้น ซึ่งจะช่วยกระตุ้นเซลล์เยื่อภายในผนังลำไส้ให้กระตุ้นการสร้างภูมิคุ้มกัน ทั้งยังช่วยปรับสมดุลของแบคทีเรียชนิดดีและปรับกระบวนการเมตาบอลิซึมของน้ำตาลและไขมัน ทำให้การควบคุมระดับน้ำตาลและไขมันในเลือดดีขึ้น นอกจากนี้กรดไขมันสายสั้นที่เกิดขึ้นนั้นยังทำให้สภาพภายในลำไส้ใหญ่มีความเป็นกรดมากขึ้นซึ่งอาจช่วยลดการเกิดติ่งเนื้อหรือมะเร็งในลำไส้ใหญ่ได้ ใยอาหารชนิดนี้พบมากในธัญพืช เมล็ดถั่ว ข้าวโอ๊ต ข้าวไรน์ ข้าวบาร์เลย์ ข้าวฟ่าง และผลไม้ เช่น แอปเปิ้ล น้อยหน่า กล้วยน้ำว้า สตรอว์เบอร์รี บลูเบอร์รี เป็นต้น

2. ใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำ : จะไม่ถูกย่อยโดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่หรือถูกย่อยได้น้อยมากและไม่มีความหนืด ช่วยในการทำมาความสะอาดทางเดินอาหาร ใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำจะช่วยให้ปริมาณของเนื้ออุจจาระ ทำให้อุจจาระอ่อนนุ่มและลดระยะเวลาการค้างตัวของอุจจาระในลำไส้ใหญ่จึงช่วยลดปัญหาการเกิดท้องผูกและช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งลำไส้ใหญ่ได้อีกด้วย ใยอาหารชนิดนี้พบมากในข้าวซ้อมมือ ไร่ข้าว ข้าวสาลี มะขาม ถั่วเปลือกแข็ง ผักต่างๆ และเปลือกของผลไม้ต่าง ๆ เป็นต้น

2.3 ข้าว

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นพืชล้มลุกตระกูลเดียวกับหญ้า ถูกจัดอยู่ในสกุล *Oryza* ของวงศ์ Gramineae สามารถเจริญเติบโตได้ดีทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ซึ่งข้าวจัดเป็นธัญพืชชนิดหนึ่งที่เป็นหนึ่งในอาหารหลักสำหรับประชากรส่วนใหญ่ของโลกรองลงมาจากข้าวสาลีและข้าวโพด โดยเฉพาะประชากรในทวีปเอเชีย และคาดว่าจะมีความต้องการข้าวเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยมีแหล่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพาะปลูกที่สำคัญอยู่ในทวีปเอเชียและแอฟริกา (Setyawati et al., 2016) จากผลการสำรวจในปี พ.ศ. 2544 พบว่าทั่วโลกมีพื้นที่เก็บเกี่ยวข้าวประมาณ 947 ล้านไร่ โดยพื้นที่ปลูกข้าวมากกว่า 90 % อยู่ในทวีปเอเชีย ซึ่งประเทศอินเดียเป็นประเทศที่มีพื้นที่เก็บเกี่ยวข้าวมากที่สุดในโลก รองลงมาคือ สาธารณรัฐประชาชนจีน สำหรับประเทศไทยข้าวเป็นอาหารหลักของคนไทยมานานกว่า 5,000 ปี เป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่สร้างรายได้ให้กับประเทศ (บุญหงส์, 2553; ประพาส, 2555) เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะ เช่น สี รสชาติ กลิ่นรส และไม่มีสารที่ก่อให้เกิดอาการแพ้ จึงมีการนำข้าว ไปใช้ในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารประเภทต่าง ๆ เพื่อการถนอมอาหารและเพิ่มมูลค่าที่ นอกเหนือจากการรับประทานแบบหุงสุก เช่น ขนมขบเคี้ยว อาหารเข้าจากธัญพืช แป้งข้าว ข้าว กระจ่าง แป้งตัดแปร ข้าวหนึ่ง อาหารประเภทเส้นต่าง ๆ เช่น เส้นขนมจีน เส้นหมี่ ก๋วยจั๊บ อาหารเพื่อ สุขภาพ อาหารสัตว์ รวมถึงเครื่องดื่มด้วย เช่น เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เป็นต้น (Dalbhagat et al., 2019)

2.3.1 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว (บุญหงส์, 2553; Zhang et al., 2019)

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเมล็ดข้าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทุกส่วน เช่น เมล็ดข้าว นำไปใช้ในรูปของข้าวสาร ปลายข้าว ข้าวกล้อง หรือนำไปแปรรูปเป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารอื่น ๆ แกลบสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรืออาหารสัตว์ ส่วนรำข้าวและจมูกข้าวสามารถนำไปสกัดน้ำมัน ได้ เป็นต้น เมล็ดข้าวมีส่วนประกอบหลัก ๆ คือ แกลบ จมูกข้าว รำข้าว และเมล็ดข้าว ดังแสดงใน รูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเมล็ดข้าว

ที่มา : <https://www.thairath.co.th/>

1. แกลบ (rice husk) ทำหน้าที่หุ้มเมล็ดไว้ภายในเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดแก่ เมล็ดข้าว ประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เมื่อสีเอาชั้นแกลบออกจะได้เป็นข้าวกล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จมูกข้าว หรือ คัพพะ (rice germ หรือ embryo) เป็นตำแหน่งของส่วนที่จะงอกเป็นต้นใหม่ ซึ่งเป็นส่วนเล็ก ๆ ที่สามารถหลุดออกมาได้อย่างง่ายดายเมื่อผ่านการสีหรือการขัดสี และยังเป็นส่วนที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น โปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ และวิตามินต่าง ๆ

3. รำข้าว (rice barn) เป็นแหล่งของสารอาหารมากมาย เช่น วิตามิน เกลือแร่ ไขมัน ซีลีเนียม สารต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งที่ให้พลังงานสูงเนื่องจากมีปริมาณโปรตีนและใยอาหารในปริมาณมาก ในขณะที่มีปริมาณโซเดียมและน้ำตาลต่ำ ไม่มีคลอเรสเตอรอลและส่วนที่ก่อให้เกิดอาการแพ้

4. เมล็ดข้าว (rice grain) หรือ เอนโดสเปิร์ม (endosperm) คือส่วนของข้าวสารที่นำมารับประทาน คิดเป็นประมาณ 90 % ของเมล็ดข้าวทั้งหมด มีองค์ประกอบหลักคือ สตาร์ช (starch) ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin)

2.3.2 คุณค่าทางโภชนาการ (บุญหงส์, 2553)

ข้าวประกอบด้วยแป้งหรือคาร์โบไฮเดรตประมาณ 70 % นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการอื่น ๆ ได้แก่

1. โปรตีน มีอยู่หนาแน่นที่บริเวณผิวนอกของเมล็ดข้าวกล้องและบริเวณจมูกข้าวมากกว่าที่ส่วนอื่น ๆ ของเมล็ด อย่างไรก็ตามปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวจะมีมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวและสภาพแวดล้อมที่เพาะปลูก

2. ไขมัน พบเฉพาะที่ชั้นในสุดของเยื่อหุ้มเมล็ดและบริเวณจมูกข้าว การขัดสีข้าวกล้องให้เป็นข้าวขาวเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการสูญเสียไขมันเป็นปริมาณมากถึง 80 % ซึ่งจะอยู่ในรูปของรำข้าว

3. แร่ธาตุ พบอยู่ที่บริเวณผิวนอกของเมล็ดเป็นส่วนใหญ่ แร่ธาตุจะมีปริมาณมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ในดินและที่ได้จากปุ๋ย และยังคงขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมที่เพาะปลูกด้วย แร่ธาตุที่มีปริมาณมาก ได้แก่ ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และโพแทสเซียม

4. วิตามิน พบอยู่ที่บริเวณเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นในสุดและบริเวณจมูกข้าวเป็นส่วนใหญ่ วิตามินที่มีปริมาณมาก ได้แก่ กรดนิโคตินิกหรือไนอะซิน (niacin) วิตามินในเมล็ดข้าวอาจเกิดการสูญเสียไปได้ง่ายหากมีการเก็บข้าวไว้ในรูปข้าวสารในโรงเก็บที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงควรเก็บข้าวไว้ในรูปข้าวเปลือกในโรงเก็บที่มีอากาศถ่ายเทได้ดีหรือมีอุณหภูมิต่ำ

2.3.3 ปลายข้าว

ในระหว่างขั้นตอนการสีข้าวเพื่อให้ได้ข้าวสารขาว มีข้าวบางส่วน (ประมาณ 14 %) เกิดการแตกหักซึ่งทำให้เกิดผลพลอยได้ที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ปลายข้าว ซึ่งมีมูลค่าทางเศรษฐกิจต่ำ เนื่องจากทั่วโลกมีความต้องการข้าวขาวขัดสีเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้มีปริมาณปลายข้าวจากกระบวนการแปรรูป

มากขึ้นเช่นกัน โดยทั่วไปปลายข้าวมักถูกนำไปผสมกับรำข้าวและแกลบเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ เนื่องจากมีราคาสูงกว่าข้าวขาวธรรมดา (Setyawati et al., 2016; Nascimento et al., 2017)

2.3.4 ประเภทของข้าว

หากแบ่งตามองค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวสาร จะสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ข้าวเจ้า และข้าวเหนียว ซึ่งมีลำต้นและลักษณะอย่างอื่นเหมือนกันทุกอย่าง แตกต่างกันที่องค์ประกอบภายใน เมล็ดข้าวสาร เมล็ดข้าวประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน สัดส่วนขององค์ประกอบดังกล่าวมีผลต่อคุณลักษณะหลังการปรุงสุกของข้าว (Kang et al., 2010; Setyawati et al., 2016; Wang et al., 2019)



รูปที่ 2.2 เมล็ดข้าวเจ้าและข้าวเหนียว

ที่มา : <https://pantip.com/>

1. ข้าวเจ้า มีลักษณะเนื้อเมล็ดเป็นสีขาวขุ่นและร่วนเมื่อหุงสุกแล้ว ประกอบด้วยอะไมโลสประมาณ 12-28.6 % ของปริมาณสตาร์ช โดยพันธุ์ที่นิยมปลูก คือ ขาวดอกมะลิ 105, ปทุมธานี 60, กข7, เหลืองประทิว 123, ขาวตาแห้ง 17, พัทลุง 60, สุพรรณบุรี 1, สุรินทร์, กข.61 (2558), กข.63 (2558), หอมกระดังงา 59 (2558) พันธุ์ข้าวเจ้ามี 6 สี คือ สีขาว สีเหลือง (ข้าวหอมมะลิ) สีแดง (ข้าวมันปู ข้าวประดู่แดง ข้าวสังข์หยด ข้าวจีบ ข้าวดอกมะขาม ข้าวหอมมะลิแดง) สีน้ำตาลอ่อน (ข้าวกล้อง) สีดำ (ข้าวสีนิล) และสีม่วงเข้ม (ข้าวไรซ์เบอร์รี่)

2. ข้าวเหนียว ข้าวชนิดนี้มีส่วนประกอบของอะไมโลสน้อยมาก (1.0-2.3 % ของปริมาณสตาร์ช) เมื่อเทียบกับข้าวเจ้า แต่มีอะไมโลเพคตินเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ (ประมาณ 98 % ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณสตาร์ช) ซึ่งจะให้เนื้อสัมผัสที่มีความเหนียวและอ่อนนุ่มหลังจากผ่านการปรุงสุก แป้งข้าวเหนียวถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายประเภทโดยเฉพาะอาหารหวานของประเทศในแถบเอเชีย พื้นที่ปลูกข้าวเหนียวพันธุ์ดีส่วนใหญ่ของประเทศไทยอยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยพันธุ์ข้าวเหนียวที่นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลาย คือ พันธุ์ กข.6 นอกจากนี้แล้วยังมีพันธุ์ กข.4, พันธุ์ กข.10, พันธุ์สันป่าตอง แต่ราคาขายจะต่ำกว่าพันธุ์ กข.6 เพราะมีความสวย ความหอม และความอร่อยที่ต่างกัน พันธุ์ข้าวเหนียวมี 2 สี คือ สีขาวและสีดำ ข้าวเหนียวดำจะมีรงควัตถุคือ แอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) โดยสารโอพีซี (Oligomeric Proanthocyanidine, OPC) ที่พบในข้าวเหนียวดำเป็นสารชนิดเดียวกับสารสกัดที่ได้จากองุ่นดำ องุ่นแดง และเปลือกสน

องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเจ้าและข้าวเหนียว แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้าวเจ้าและข้าวเหนียว

องค์ประกอบ	ข้าวเจ้า	ข้าวเหนียว
ความชื้น (%)	12.10	7.21
โปรตีน (%)	6.10	6.78
ไขมัน (%)	0.17	0.71
เถ้า (%)	0.39	0.45
เยื่อใย (%)	0.29	1.26
คาร์โบไฮเดรต (%)	81.18	83.59

ที่มา : Khan et al. (2015); Qin et al. (2016)

2.4 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion)

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน หมายถึง กระบวนการที่ซึ่งวัตถุดิบถูกบังคับให้ไหลหรือเคลื่อนที่ไปภายใต้สภาวะหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งอย่าง เช่น การผสมคลุกเคล้า การนวด การทำให้ร้อนและสุก การขึ้นรูป และการทำให้เกิดรูปร่าง โดยบังคับให้ส่วนผสมของวัตถุดิบที่อ่อนตัวหรือหลอมเหลวเคลื่อนที่ไปตามพื้นที่อันจำกัดภายใต้สภาวะต่าง ๆ ที่มีการควบคุม แล้วไหลผ่านรูเปิดของหน้าแปลนหรือที่เรียกว่า ได (die) ซึ่งถูกออกแบบไว้เพื่อทำให้วัตถุดิบที่ออกมา มีรูปร่างหรือเป็นผลิตภัณฑ์ที่สุกพอง กล่าวอีกอย่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่รวมเอาหน่วยปฏิบัติการหลายหน่วยเข้าด้วยกัน ซึ่งประกอบด้วย การผสม การทำให้สุก การนวด การเคี้ยว การตัดเคี้ยว และการขึ้นรูป เรียกเครื่องมือที่ใช้สำหรับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันว่า เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (extruder) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและลักษณะของวัตถุดิบภายใต้อิทธิพลของแรงเคี้ยวได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดท (extruded) การที่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เข้ามามีบทบาทต่อ

กระบวนการผลิตอาหารสมัยใหม่เป็นการช่วยทำให้เกิดการขยายงานด้านอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างขวางยิ่งขึ้น ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ มีอัตราการผลิตสูง และใช้ต้นทุนต่ำ (Rossen and Miller, 1973; Riaz, 2003; Riaz, 2007; Ravindran et al., 2011)

2.4.1 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

วัตถุดิบที่นำมาใช้ เช่น ธัญชาติ สตาร์ช หรือโปรตีน ต้องถูกบดผสมรวมให้เข้ากันดีก่อนที่จะป้อนเข้าไปยังเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมอื่น ๆ ที่เป็นวัตถุดิบรอง ได้แก่ ไขมัน น้ำตาล เกลือ กรดหรือด่าง สารอิมัลซิไฟเออร์ สี และกลีเซอรอล มีการเติมน้ำเข้าไปเพื่อปรับให้วัตถุดิบผสมมีความชื้นอยู่ในช่วง 10-40 % บางครั้งอาจจะมีการทำให้วัตถุดิบสุกเป็นบางส่วนก่อนโดยเติมน้ำหรือไอน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบในถังปรับสภาพ (preconditioner) จากนั้นเกลียวบนสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์จะทำหน้าที่ผลักดันวัตถุดิบให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าในขณะที่สกรูหมุน ดังนั้นวัตถุดิบจะถูกบีบ อัด ผสม และนวด ทำให้เปลี่ยนสภาพจากลักษณะที่เป็นเม็ดเล็ก ๆ เป็นผง กลายเป็นโดที่เหนียวคล้ายพลาสติก พลังงานต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ตันจะทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่อยู่ในเครื่อง การเพิ่มพลังงานทางกลโดยการหมุนของสกรูมีส่วนสำคัญมากกว่าพลังงานที่ถ่ายเทมาจากผนังของบาร์เรลหรือพลังงานที่เกิดจากการปล่อยไอน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบโดยตรง นอกจากนี้ความร้อนยังเกิดจากแรงเสียดสีระหว่างโมเลกุลของวัตถุดิบเอง หรือระหว่างวัตถุดิบกับผนังของบาร์เรล ความร้อนจะทำให้แป้งโดสุกแล้วกลายเป็นเจล และในขณะเดียวกันความดันภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์จะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากมีรูเปิดจำกัด การเกิดความดันสูงในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ทำให้เกิดสถานะแวดล้อมที่คล้ายกับหม้อต้มความดัน (pressure cooking) ซึ่งเป็นการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิกระจายจนกว่าความดันจะถูกปล่อยออกมา เมื่อวัตถุดิบไหลผ่านรูเปิดที่หน้าแปลน ความดันจะลดลงอย่างรวดเร็วเป็นความดันบรรยากาศ เกิดความแตกต่างของความดัน ทำให้อุณหภูมิที่อยู่ในเนื้อเยื่ออาหารพยายามจะระเหยออกไปและดันเนื้อเยื่ออาหารให้โป่งพองขึ้น จึงได้ผลิตภัณฑ์ที่มีการพองตัว (puffing) และมีรูปร่างออกมาตามรูปแบบของหน้าแปลน โครงสร้างเซลล์ของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จะเปิดและแต่ละเซลล์จะถูกล้อมรอบด้วยเมมเบรนของแป้งหรือโปรตีน ขนาดของเซลล์เหล่านี้เป็นตัวควบคุมลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ เช่น ลักษณะเนื้อสัมผัสและความหนาแน่น ใบมีดที่หมุนรอบและราบขนานไปกับผิวหน้าของหน้าแปลนจะทำหน้าที่ตัดผลิตภัณฑ์เป็นชิ้น ๆ และเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังมีความชื้นอยู่บ้างจึงต้องนำไปอบต่อเพื่อให้มีความชื้นที่เหมาะสมตามชนิดของแต่ละผลิตภัณฑ์ การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการและอุณหภูมิที่จุดออกจากเครื่อง (เนตรนภิส, 2550; Riaz, 2007; Lazou and Krokida, 2010; Leszek, 2011; Morales et al., 2015)

2.4.2 การคำนวณเกี่ยวกับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Maskan and Altan, 2012; Wolz et al., 2016; Koch et al., 2017)

2.4.2.1 อัตราการไหลของของแข็ง (Solid flow rate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของของแข็งเป็นการประเมินแรงที่กระทำต่อองค์ประกอบของของแข็งภายในช่องว่างระหว่างสกรูและบาร์เรล ซึ่งแรงเหล่านี้คือแรงเสียดทานที่เกิดจากการไถ่ระดับความดันภายในของแข็ง สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1

$$M_s = \rho HWnV_b \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)} \quad (2.1)$$

เมื่อ M_s คือ อัตราการไหลของของแข็ง ρ คือ ความหนาแน่นของของแข็ง H คือ ความสูงของช่องว่างระหว่างสกรูและบาร์เรล W คือ ความกว้างของช่องสกรู n คือ จำนวนเกลียวสกรู V_b คือ ความเร็วของบาร์เรล และ φ คือ มุมของเกลียวสกรู

2.4.2.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของวัตถุดิบหลอมละลาย (Volumetric melt flow rate)

บริเวณการลำเลียงวัตถุดิบหลอมละลายเริ่มจากจุดที่เกิดการละลายไปจนถึงจุดที่ผลิตภัณฑ์วัตถุดิบหลอมละลายไปที่หน้าแปลน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.2

$$Q = \frac{1}{2} nWHV_{bz} - \frac{nWH^3}{12\mu} \frac{dP}{dz} \quad (2.2)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของวัตถุดิบหลอมละลาย n คือ จำนวนเกลียวสกรู H คือ ความสูงของช่องว่างระหว่างสกรูและบาร์เรล W คือ ความกว้างของช่องสกรู V_{bz} คือ ความเร็วของวัตถุดิบหลอมละลายที่บาร์เรล และ μ คือ ความหนืดของวัตถุดิบหลอมละลาย

2.4.2.3 อัตราการเฉือน (Shear rate)

อัตราการเฉือน คือ อัตราการให้แรงเฉือนที่ไปกระทำต่อของไหลแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปหรือการไหลขึ้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.3

$$\gamma = \frac{Q}{\pi r^3} \quad (2.3)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรภายในหน้าแปลน และ r คือ รัศมีของรูเปิดหน้าแปลน

2.4.2.4 ค่าพลังงานกลจำเพาะ (Specific mechanical energy, SME)

ค่าพลังงานกลจำเพาะ คือ ค่าลักษณะที่อธิบายถึงปริมาณงานที่ให้กับวัตถุดิบต่อหน่วยมวลซึ่งถ่ายโอนมาจากมอเตอร์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SME = \frac{n_{act}}{n_{max}} \times \frac{\tau}{m} \times P_{max} \quad (2.4)$$

เมื่อ n_{act} และ n_{max} คือ ความเร็วจริงและความเร็วสูงสุดของสกรู (min^{-1}) τ คือ แรงบิด (%) m คือ อัตราการไหลของมวลทั้งหมด (kg/h) และ P_{max} คือ กำลังสูงสุด

2.4.3 ประเภทของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Guy, 2001; Riaz, 2007)

สามารถแบ่งประเภทของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ตามเกณฑ์ต่างๆ ได้ดังนี้

2.4.3.1 แบ่งตามปริมาณความชื้นของวัตถุดิบที่ป้อน (Moisture characteristics)

1) ความชื้นต่ำ (low moisture): เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นไม่เกิน 20 % พลังงานส่วนใหญ่เกิดจากแรงเสียดสีของวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความแห้งและพองมาก ทำให้กำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ได้ยาก

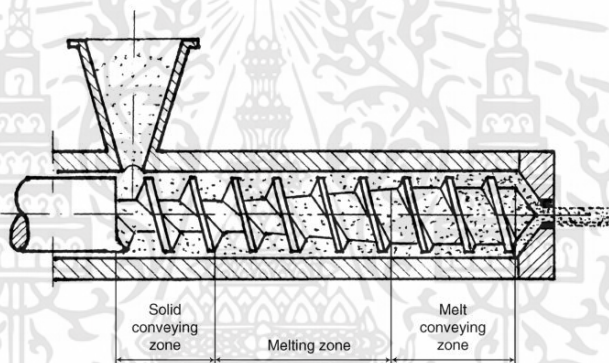
2) ความชื้นปานกลาง (intermediate moisture): เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นในช่วง 20-28 % พลังงานความร้อนครึ่งหนึ่งได้จากแรงเสียดสีของวัตถุดิบที่เหลือได้จากแหล่งให้ความร้อนจากภายนอก เช่น การพ่นไอน้ำเข้าไปในช่องว่างระหว่างผนังสองชั้นของบาร์เรลหรือจากการพ่นไอน้ำเข้าไปผสมกับวัตถุดิบโดยตรง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะพองเพียงเล็กน้อย เนื้อค่อนข้างแน่น ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปร่าง แต่จะมีความชื้นอยู่พอสมควรจึงต้องนำไปผ่านการอบแห้งต่อเพื่อให้ได้ความชื้นตามที่ต้องการ

3) ความชื้นสูง (high moisture): เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นมากกว่า 28 % ขึ้นไป พลังงานความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดสีของวัตถุดิบจะน้อยมาก ส่วนใหญ่ได้รับความร้อนจากแหล่งภายนอก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะไม่ค่อยพองทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายและหลากหลายรูปแบบ แต่จะมีความชื้นเหลืออยู่มาก ต้องนำไปผ่านการอบแห้งก่อนที่จะไปยังกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป

2.4.3.2 แบ่งตามโครงสร้างของเครื่อง (Structure characteristic)

1) เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder): ประกอบด้วยสกรู 1 อัน วางตามความยาวของเครื่อง เมื่อสกรูหมุนจะเกิดการผสมของวัตถุดิบและพาว์วัตถุดิบเคลื่อนที่ไปตามความยาวของเครื่อง ความร้อนที่ถูกส่งไปยังวัตถุดิบเกิดจากอุณหภูมิที่ตั้งไว้ภายในเครื่องและแรงเฉือนระหว่างสกรูกับวัตถุดิบ ความดันภายในเครื่องจะเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะบริเวณใกล้รูเปิดหน้าแปลน ซึ่งเป็นทางออกสู่สภาพบรรยากาศปกติ สกรูที่ทอดยาวภายในตัวเครื่องประกอบด้วยส่วนที่ส่งวัตถุดิบเข้าไปเพื่ออัดวัตถุดิบให้เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนที่ทำหน้าที่ในการนวดเพื่อบีบอัดส่วนผสมและเนียนเนื้ออาหารที่มีคุณสมบัติคล้ายพลาสติก และมีส่วนของการให้ความร้อนในเครื่องที่ใช้แรงเฉือนสูงด้วย การส่งวัตถุดิบผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวนี้ทำได้โดยอาศัยความฝืดที่ผนังของบาร์เรล วัตถุดิบจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยการทำงานของเกลียวสกรู และมีบางส่วนที่มีการ

เคลื่อนที่แบบไหลย้อนกลับ (pressure flow หรือ leakage flow) ซึ่งเป็นการไหลเนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้นด้านหลังรูเปิดหน้าแปลนและการเคลื่อนที่ของวัตถุดิบระหว่างสกรูและบาร์เรล การใช้ผ้าแบบพิเศษหุ้มภายในบาร์เรลจะช่วยลดการลื่นไหลได้ เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวใช้เงินลงทุนค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่องและความชำนาญในการควบคุมดูแลเครื่องน้อยกว่าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ปัญหาที่มักเกิดขึ้นในการใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวคือปัญหาการลื่นไหล (slippage) และเกิดการสะดือ (surging) ปัญหาการลื่นไหลมักจะเกิดขึ้นในสภาวะที่ความดันภายในบาร์เรลสูง ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการลื่นไหลระหว่างสกรูและผนังบาร์เรล ทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ได้รับความร้อนเพียงพอหรือผ่านกระบวนการผลิตไม่สมบูรณ์ ส่วนปัญหาการสะดือ (ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นช่วงๆ ไม่ต่อเนื่อง) มักจะเกิดขึ้นเนื่องจากอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ที่ไม่สม่ำเสมอ ความดันจะเพิ่มขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์พุ่งออกมาเป็นฝอยหรือชิ้นเล็ก ๆ เมื่อผ่านพื้นรูเปิดหน้าแปลนออกมาโดยที่ไม่สามารถควบคุมได้

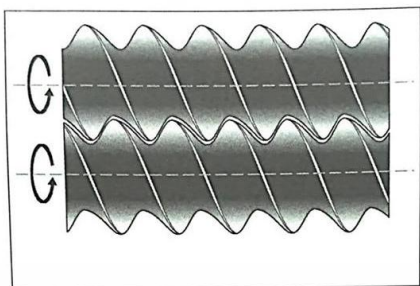


รูปที่ 2.3 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

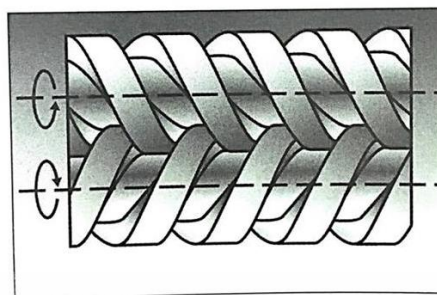
ที่มา : Leszek (2011)

2) เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (twin screw extruder): มีสกรูที่มีความยาวเท่ากัน 2 อัน วางข้างกันภายในบาร์เรลเดียวกัน โดยสกรูจะหมุนเป็นรูปเลข 8 อยู่ในบาร์เรล เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้แบ่งได้อีกตามทิศทางการหมุนของสกรูและลักษณะที่สกรูจะหมุนเข้าหากัน สกรูแบบที่หมุนไปในทิศทางเดียวกันเป็นประเภทที่นิยมใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร การหมุนของสกรูทำให้วัตถุดิบเคลื่อนที่ไปตามความยาวเครื่อง การที่สกรูหมุนเข้าหากันช่วยในการผสมและป้องกันการหมุนของวัตถุดิบในบาร์เรล เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่มีความซับซ้อนมากกว่าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว แต่มีความยืดหยุ่นมากกว่าและสามารถควบคุมการทำงานได้ดีกว่า ส่วนหลักการทำงานและองค์ประกอบของเครื่องนั้นเหมือนกันกับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

(ก.)



(ข.)



รูปที่ 2.4 ลักษณะการหมุนของสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่

(ก.) หมุนไปในทิศทางเดียวกัน และ (ข.) หมุนในทิศทางตรงข้ามกัน

ที่มา : Riaz (2007)

2.4.4 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ มีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน (รูปที่ 3.5) (Riaz, 2007) ดังต่อไปนี้

1. ระบบการป้อน (delivery systems)

ส่วนประกอบพื้นฐานอย่างแรกของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์คือระบบการป้อน หน้าที่ของส่วนนี้คือการป้อนวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอไปยังส่วนประกอบถัดไป การป้อนวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เนื่องจากทำให้เครื่องทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

2. ส่วนการปรับสภาพ (preconditioner)

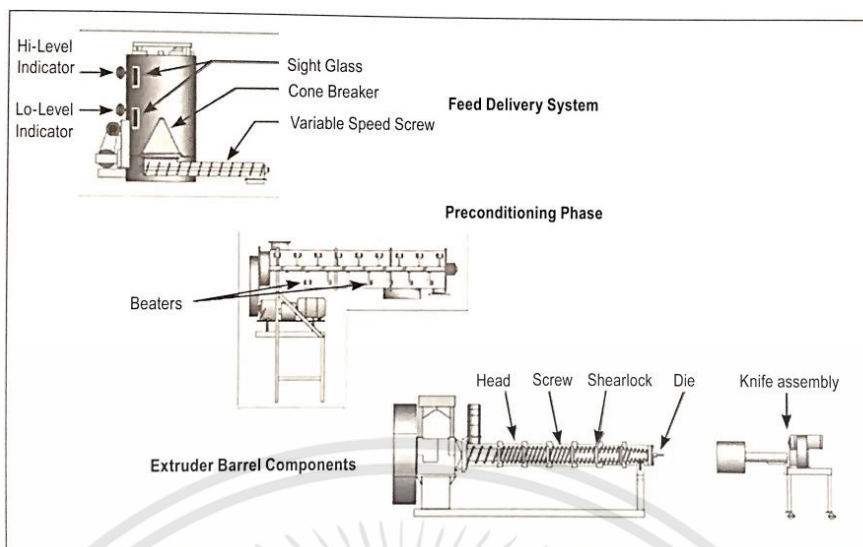
วัตถุดิบจากระบบการป้อนถูกส่งไปยังส่วนถัดไปที่เรียกว่า ส่วนการปรับสภาพ ซึ่งไม่จำเป็นที่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ทุกเครื่องจะต้องมีส่วนนี้ เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบแห้งและเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบโดยส่วนใหญ่จะไม่มีส่วนนี้ แต่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ผลิตอาหารสัตว์นั้นจำเป็นต้องมีส่วนการปรับสภาพ

3. บาร์เรล (extruder barrel)

บาร์เรลเป็นหัวใจหลักของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เนื่องจากกระบวนการทำงานเกือบทั้งหมดเกิดขึ้นที่ส่วนนี้ ในส่วนนี้ประกอบด้วยสกรู ส่วนห่อหุ้ม (jacket) และหน้าแปลน ส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำให้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวและสกรูคู่แตกต่างกัน ถ้ามีสกรูอันเดียวจะเป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว แต่ถ้ามีสกรูสองอันจะเป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่

4. ชุดใบมีด (knife assembly)

ส่วนนี้เป็นส่วนประกอบสุดท้ายของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน หน้าที่หลักของส่วนนี้คือตัดผลิตภัณฑ์เป็นชิ้นให้มีความยาวและรูปร่างตามที่ต้องการ ชุดใบมีดมีการออกแบบให้แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับผู้ผลิต ซึ่งอาจจะมี 2 4 หรือ 6 ใบมีดก็ได้



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

ที่มา : Riaz (2007)

2.4.5 ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์โดยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ตัวแปรแรกเป็นส่วนประกอบของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ได้แก่ แบบของตัวเครื่อง แบบของสกรู และแบบของรูเปิดหน้าแปลน อีกตัวแปรคือกระบวนการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิของเครื่อง ความเร็วรอบของสกรู รูปแบบการจัดวางสกรู และอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่อง เป็นต้น ส่วนตัวแปรสุดท้ายเป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ได้แก่ ความชื้น โปรตีน แป้ง ไขมัน ใยอาหาร น้ำ น้ำตาล และเกลือ เป็นต้น ตัวแปรทั้งหมดและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบ ซึ่งส่งผลไปถึงสถานะในกระบวนการผลิต เช่น ความร้อน ความดัน และแรงเฉือนที่เกิดจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลในอาหาร (แป้ง โปรตีน ไขมัน) ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และทางโภชนาการของอาหาร ตัวแปรของกระบวนการผลิตโดยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สามารถปรับให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ ซึ่งจะมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Guy, 2001; Lazou and Krokida, 2010) ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิ (temperature): อุณหภูมิที่ตั้งไว้ตลอดความยาวของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ถ้าอุณหภูมิที่ทางออกของเครื่องมากกว่า 100°C จะได้ผลิตภัณฑ์ที่พองทันทีหลังออกจากเครื่องเนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำและการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะไม่พองทันทีหลังออกมาจากเครื่องเกิดจากการลดอุณหภูมิช่วงใกล้ทางออกต่ำกว่า 100°C เพื่อป้องกันการพองตัวของผลิตภัณฑ์ แต่จะพองหลังจากให้ความร้อน เช่น นำไปผ่านกระบวนการทอดหรืออบ

2. ความเร็วรอบของสกรู (screw speed): ความเร็วรอบของสกรูมีผลต่อการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่อง ช่วงเวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่อง (residence time) และแรงเฉือน การเพิ่มแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณใกล้ทางออกของเครื่องจะเพิ่มการปรับเปลี่ยนโมเลกุลของแป้งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่พองและมีรูพรุนเล็ก ๆ

3. รูปแบบของสกรู (screw configuration): ชิ้นส่วนของสกรูที่ใช้และตำแหน่งชิ้นส่วนของสกรูมีผลต่อรูปแบบของสกรูโดยเฉพาะกับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ซึ่งมีผลต่อการผสมของวัตถุดิบ เวลาที่วัตถุดิบอยู่ในเครื่อง แรงเฉือน พลังงานกลที่ให้กับวัตถุดิบ และอุณหภูมิของโตภายในเครื่อง

4. อัตราการป้อนวัตถุดิบ (feed rate): การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องเป็นการเพิ่มความดันที่รูเปิดหน้าแปลน ลดพลังงานกลที่ป้อนเข้า และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายในเครื่อง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.4.6 บทบาทของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในอุตสาหกรรมอาหาร

เป็นที่ทราบกันดีว่าการผลิตขนมขบเคี้ยวในระดับอุตสาหกรรมนั้นนิยมใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันกันแพร่หลายทั่วโลก ด้วยความสามารถของระบบที่เป็นระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง มีอัตราการผลิตสูง ต้นทุนการผลิตต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพดี มีเนื้อสัมผัสกรอบเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว อีกทั้งยังปรับเปลี่ยนรูปแบบ รสชาติ และเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้วัตถุดิบและสภาวะการผลิตที่เหมาะสม (เนตรนภิส, 2550; Mans, 1982; Riaz, 2007) ซึ่งบทบาทที่เด่นชัดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในอุตสาหกรรมอาหาร มีดังนี้

1. อเนกประสงค์ สามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลาย (versatility) และผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเฉพาะได้หลายอย่าง มีความหลากหลายในด้านลักษณะเนื้อสัมผัส สี และลักษณะปรากฏต่าง ๆ กัน โดยการเลือกใช้วัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบหรือเปลี่ยนส่วนผสมที่เป็นส่วนผสมรอง (minor ingredient) และปรับสภาวะในการผลิต (operating condition) ให้เหมาะสม

2. อัตราการผลิตสูง (high productivity) เนื่องจากเป็นเครื่องจักรแบบต่อเนื่อง และการผลิตเป็นระบบอัตโนมัติ เช่น อัตราการผลิตขนมขบเคี้ยวสูงถึง 315 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

3. ต้นทุนในการผลิตต่ำ (low cost) เพราะประหยัดทั้งวัตถุดิบ พลังงาน และแรงงาน ทั้งยังลดพื้นที่และขั้นตอนการผลิตลง เนื่องจากต้องการแรงงานและพื้นที่ในการแปรรูปต่อหนึ่งหน่วยการผลิตน้อยกว่า จึงมีต้นทุนของการแปรรูปต่ำกว่า และมีประสิทธิภาพการผลิตสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น

4. รูปร่างของผลิตภัณฑ์ (product shapes) ทำได้มากมายหลายแบบ โดยการเปลี่ยนแบบรูปทรงของรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลน

5. คุณภาพของผลิตภัณฑ์สูง (high product quality) เนื่องจากเป็นระบบ high temperature short time (HTST) และสามารถควบคุมสภาวะด้านความร้อนหรือทางกลได้

6. ประหยัดพลังงาน (energy efficient) กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันสามารถทำงานได้ด้วยความชื้นของวัตถุดิบต่ำ ๆ ทำให้ลดปริมาณความร้อนที่ใช้ในการหุงต้มและการอบแห้งผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ผลิตผลิตภัณฑ์อาหารชนิดใหม่ ๆ (production of new foods) กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันสามารถแปรสภาพแป้ง โปรีติน และอาหารประเภทอื่นเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ได้หลากหลายชนิด
8. มีของเสียน้อยมาก (no effluents) ทำให้ลดค่า BOD ของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

2.4.7 ขนมอบเคี้ยวเกี่ยวกับการผลิตในระบบเอ็กซ์ทรูชัน (เนตรนภิส, 2550; Lazou and Krokida, 2010; Morales et al., 2015)

2.4.7.1 ขนมอบเคี้ยวประเภทขึ้นรูป (Extruded snacks)

โดยทั่วไปหากกล่าวถึงชนิดหรือประเภทของขนมอบเคี้ยวตามยุคสมัย เป็นที่ทราบกันดีว่าขนมอบเคี้ยวรุ่นแรก (first generation snack) มักหมายถึงขนมอบเคี้ยวที่มีกระบวนการผลิตน้อยที่สุดในการแปรรูปวัตถุดิบให้เป็นอาหารที่รับประทานได้ เช่น ถั่วทอด (roasted nuts) ข้าวโพดคั่ว (popcorn) และมันฝรั่ง (conventional potato chips) เป็นต้น ส่วนขนมอบเคี้ยวรุ่นที่สอง (second generation snack) หมายถึงขนมอบเคี้ยวที่มีขั้นตอนในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้นในการทำให้วัตถุดิบสุกพองและมีรูปร่างภายในขั้นตอนเดียวออกมาแล้วทำให้แห้งและปรุงแต่งกลิ่นรส และขนมอบเคี้ยวรุ่นที่สาม (third generation snack) เป็นกระบวนการผลิตที่มีการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมของแป้งให้สุกแต่ยังไม่พอง อยู่ในลักษณะที่เป็นเจลใสแข็งเนื้อแน่น (pellet หรือ half-finished) ซึ่งต้องการกระบวนการผลิตที่ทำให้สุกต่อเพื่อให้ได้เนื้อสัมผัสที่ดีแล้วปรุงแต่งกลิ่นรส ซึ่งขนมอบเคี้ยวทั้งรุ่นที่สองและรุ่นที่สามนี้ผลิตโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ และเป็นที่ยอมรับในอุตสาหกรรมขนมอบเคี้ยวอย่างแพร่หลายทั่วโลก

2.4.7.2 ขนมอบเคี้ยวชนิดพองกรอบ (Expanded snack / Puffed snack / Second generation snack)

เป็นขนมอบเคี้ยวที่สุกแล้วพองออกมาทันทีที่ไพล์พันรูลหน้าแปลนของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ความพองของผลิตภัณฑ์เกิดจากโครงสร้างของแป้งในวัตถุดิบที่ผ่านเข้าไปในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ แล้วได้รับความชื้น ความร้อน และความดันที่เหมาะสม ทำให้สุกและหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีความดันสูง เมื่อวัตถุดิบถูกอัดผ่านหน้าแปลนที่มีรูเปิดจำกัดไพล์พันรูลออกมา ความดันจะลดต่ำอย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารระเหยตัวออกอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์จึงเกิดการพองตัวขึ้น

2.4.7.3 ขนมอบเคี้ยวชนิด 3G หรือ เพลเลท (Third generation snack / Pellets / Semi or half-products)

เป็นผลิตภัณฑ์ขนมอบเคี้ยวที่ใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในการผลิต มีการทำให้สุก (cooking) และขึ้นรูป (forming) เป็นเพลเลทที่มีลักษณะเป็นเจลใสแข็ง เนื้อแน่น สามารถเก็บรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้นาน ความหนาแน่นสูง เป็นผลิตภัณฑ์ที่อาจอยู่ในรูปแบบที่ผลิตภัณฑ์สุดท้ายพร้อมรับประทาน (ready-to-eat snack) หรือผลิตภัณฑ์ half-finished ที่ต้องผ่านกระบวนการต่อ เช่น การทอดในน้ำมันที่ร้อนจัดเพื่อให้ได้เนื้อสัมผัสที่เหมาะสม ผลิตภัณฑ์นี้มีประโยชน์ในแง่ของการขนส่งเนื่องจากไม่เปื่อยเน่า ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง และเก็บรักษาได้นานก่อนที่จะนำมาผ่านกระบวนการต่อไป

ในขั้นตอนการผลิตประกอบด้วยขั้นตอนของการทำให้สุกและการขึ้นรูป โดยอุณหภูมิในช่วงของการทำให้สุกจะอยู่ระหว่าง 80-100°C และเมื่อวัตถุดิบผ่านช่วงการทำให้สุกแล้ว มักจะมีการปล่อยอากาศออกบ้าง (venting) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการพองตัว จากนั้นเข้าสู่ช่วงการขึ้นรูป ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวลงและเนื้อแน่นขึ้น โดยอุณหภูมิในช่วงการขึ้นรูปจะอยู่ระหว่าง 65-90°C และขั้นตอนการขึ้นรูปนี้จะใช้สกรูที่มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่ทำให้เกิดแรงเฉือนหรืออุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์เพลเลทที่สุก เนื้อแน่น และมีรูปร่างตามที่กำหนดไว้จะไหลผ่านหน้าแปลน โดยมีความชื้นอยู่ระหว่าง 20-28 % ต้องนำไปอบต่อเพื่อลดความชื้นของเพลเลทให้เหลือประมาณ 6-8 % ซึ่งขั้นตอนในการอบนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวชนิด 3G

2.4.7.4 ขนมขบเคี้ยวชนิดสอดไส้ (Co-Extruded Snacks)

เป็นขนมขบเคี้ยวที่มีลักษณะพิเศษคือ มีลักษณะเป็นผลิตภัณฑ์พองกรอบที่มีไส้อยู่ตรงกลาง โดยส่วนใหญ่เปลือกด้านนอกของขนมขบเคี้ยวมักทำจากธัญพืช แล้วสอดไส้ด้วยช็อกโกแลต สตรอเบอร์รี่ ครีม หรือชีส อยู่ตรงกลางด้านใน ใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในการขึ้นรูปเปลือกด้านนอกที่ทำจากธัญพืช หน้าแปลนถูกออกแบบมาพิเศษให้มีท่อฉีดไส้ (filling) อยู่ตรงกลาง ทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ได้มีรูปลักษณ์ที่โดดเด่นและน่ารับประทาน เพราะมีสองสี สองรสชาติ และสองเนื้อสัมผัสภายในขนมขบเคี้ยวชิ้นเดียว



รูปที่ 2.6 เอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทต่าง ๆ

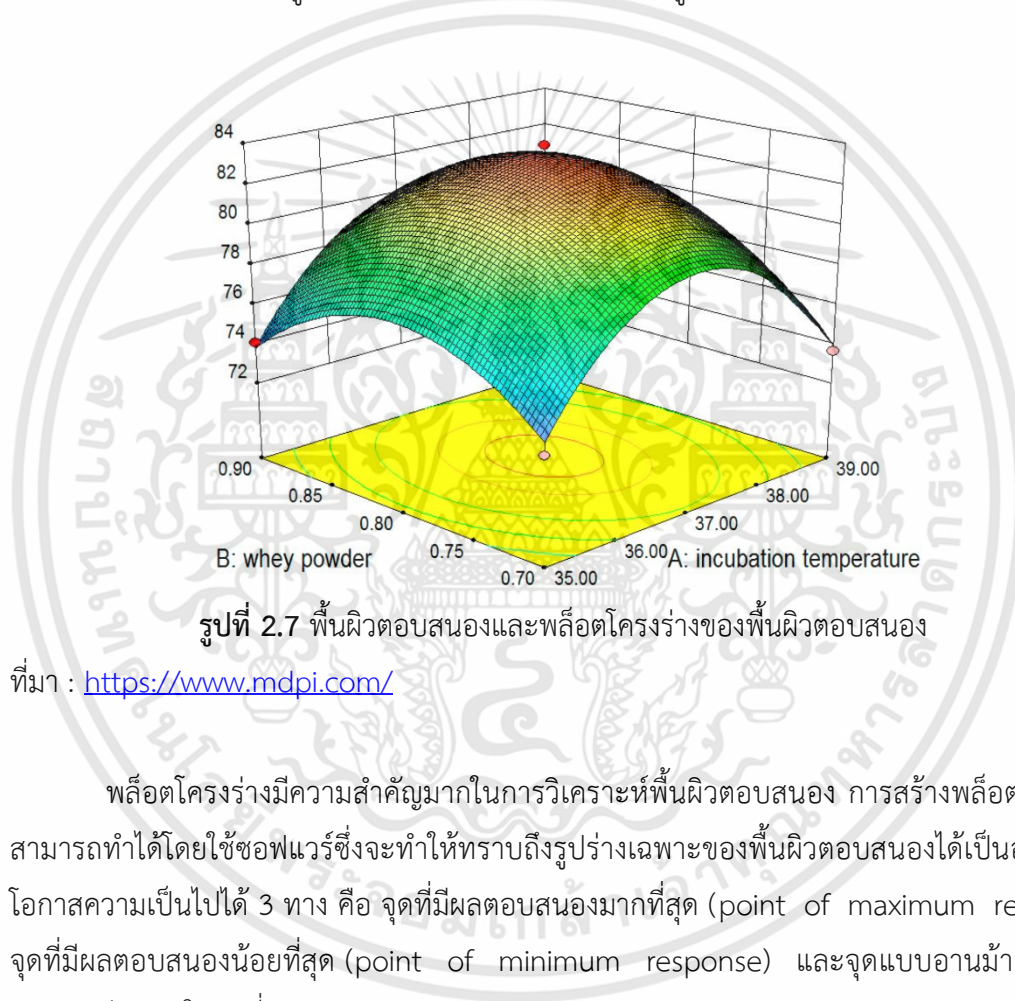
ที่มา : Leszek (2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology, RSM)

วิธีพื้นผิวตอบสนองเป็นการรวบรวมวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติมาใช้ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งผลตอบสนอง (response) ที่เราสนใจได้รับอิทธิพลจากตัวแปรอิสระหลายตัว และมีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาผลตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด

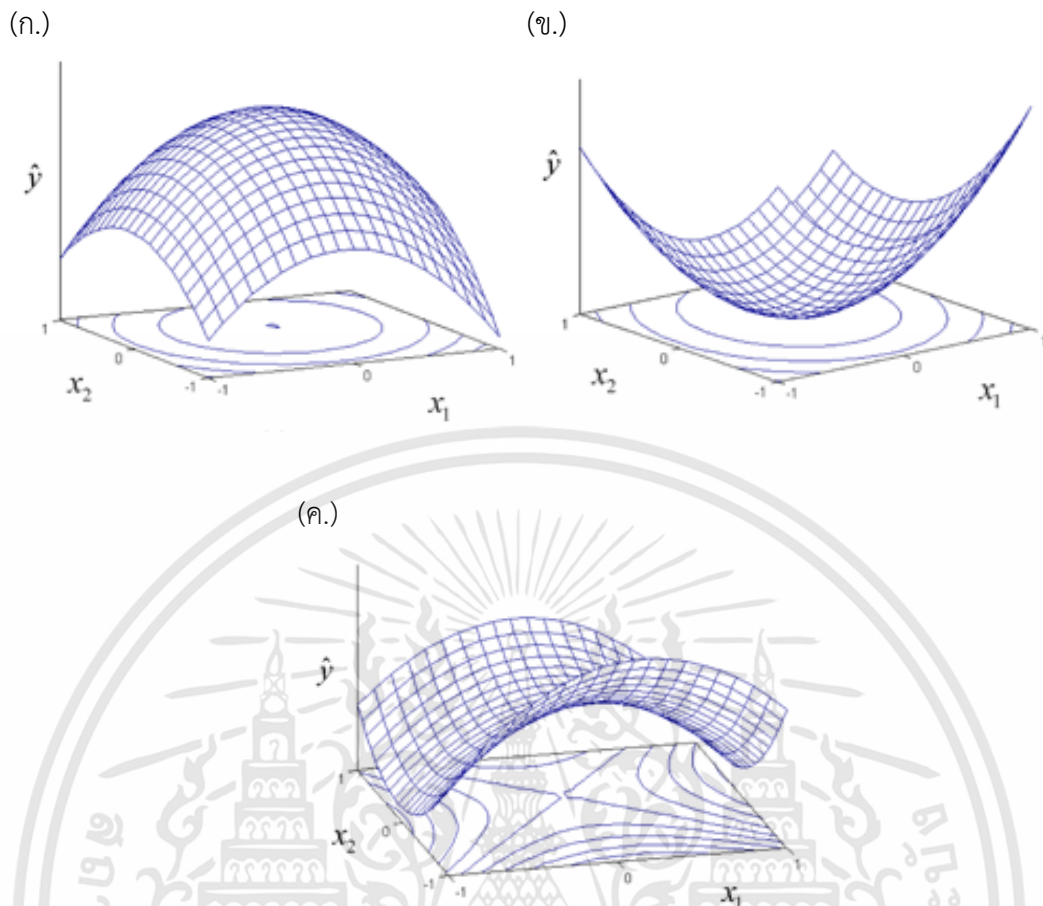
โดยทั่วไปจะแสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบกราฟฟิกเพื่อช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และมักมีการใช้พล็อตโครงร่าง (contour plot) ร่วมด้วย ในแต่ละเส้นโครงร่างจะสอดคล้องกับความสูงของพื้นผิวตอบสนอง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 พื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง

ที่มา : <https://www.mdpi.com/>

พล็อตโครงร่างมีความสำคัญมากในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง การสร้างพล็อตโครงร่างสามารถทำได้โดยใช้ซอฟต์แวร์ซึ่งจะทำให้ทราบถึงรูปร่างเฉพาะของพื้นผิวตอบสนองได้เป็นอย่างดี มีโอกาสความเป็นไปได้ 3 ทาง คือ จุดที่มีผลตอบสนองมากที่สุด (point of maximum response) จุดที่มีผลตอบสนองน้อยที่สุด (point of minimum response) และจุดแบบอานม้า (saddle point) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 พื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงร่างสำหรับ (ก.) พื้นผิวตอบสนองที่มากที่สุด (ข.) พื้นผิวตอบสนองที่น้อยที่สุด และ (ค.) จุดแบบอานม้า
ที่มา : <http://reliawiki.org/>

ปัญหาของวิธีพื้นผิวตอบสนองที่สำคัญที่สุดคือไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง (y) และตัวแปรอิสระ (x) ดังนั้นขั้นตอนแรกคือต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมสำหรับใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง y และชุดของตัวแปรอิสระ โดยทั่วไปมักใช้ฟังก์ชันพหุนามกำลังต่ำๆ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นตรงกับตัวแปรอิสระ จะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่ง (first-order model) ดังสมการที่ 2.5 ในการประมาณความสัมพันธ์

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad 2.5$$

แต่ถ้ามีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นโค้ง ต้องใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง (second-order model) ดังสมการที่ 2.6

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad 2.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองคือ การหาเงื่อนไขในกระบวนการทำงานที่เหมาะสมที่สุดหรือเพื่อหาขอบเขตของปัจจัยที่ก่อให้เกิดความพึงพอใจ (ปารเมศ, 2545; สายชล, 2558; Mikko Mäkelä, 2017)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Trinidad et al. (2006) นำโยอาหารจากแป้งมะพร้าวมาใช้เป็นอาหารเพื่อสุขภาพ โดยศึกษาองค์ประกอบของโยอาหารและการหมักแป้งมะพร้าว ผลของคุณค่าทางโภชนาการในผลิตภัณฑ์อาหารที่เสริมแป้งมะพร้าว ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index) ของผลิตภัณฑ์อาหารเสริมแป้งมะพร้าวในคนทั่วไปและผู้ป่วยโรคเบาหวาน และผลของการใช้ Coconut Flakes ในการลดระดับโคเลสเตอรอลในมนุษย์ พบว่าในแป้งมะพร้าวมีปริมาณโยอาหาร 60.0 ± 1.0 กรัม/100 กรัมตัวอย่าง เป็นโยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ 56 % และละลายน้ำ 4 % การหมักแป้งมะพร้าวทำให้เกิดกรดไขมันสายสั้นคือ บิวไทเรต (butyrate) อะซิเตต (acetate) และโพรพิโอเนต (propionate) 1.73 ± 0.07 1.40 ± 0.12 และ 0.47 ± 0.01 มิลลิโมล/กรัมของโยอาหารที่แยกได้ ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณแป้งมะพร้าวไม่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการในผลิตภัณฑ์อาหารทั้งหมดที่นำมาทดสอบ ดัชนีน้ำตาลและปริมาณโยอาหารมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกัน ผลจากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพจากแป้งมะพร้าวได้

Khan et al. (2015) พิจารณาผลของกากมะพร้าวต่อกระบวนการผลิตขนมขบเคี้ยวพร้อมรับประทานที่ทำจากข้าวโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ โดยผสมวัตถุดิบที่มีปริมาณกากมะพร้าวคือ 5 10 15 และ 20 % และปรับความชื้นของวัตถุดิบผสม 16 % ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการทำการทดลองเบื้องต้น ความเร็วรอบของสกรูป้อนคือ 50 rpm และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์คือ 150 rpm ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเอ็กซ์ทรูเดท ได้แก่ สี สมบัติด้านความหนืดทั้งก่อนและหลังกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ปริมาณโปรตีน และปริมาณโยอาหาร พบว่าเมื่อปริมาณกากมะพร้าวเพิ่มขึ้นค่าความสว่างสี (L) ลดลง ซึ่งทำให้ค่าสีแดง (a) และสีเหลือง (b) เพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์น้อยกว่าวัตถุดิบก่อนผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันซึ่งตรงตามที่ประเมินไว้ ปริมาณโยอาหารและปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้น 0.29-1.34 % และ 6.10-7.20 % ตามลำดับ ทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยเอ็กซ์ทรูเดทที่มีปริมาณกากมะพร้าว 10 % พบว่าผู้เข้าร่วมทดสอบรู้สึกชอบเป็นอย่างมาก และทำคะแนนได้ 8.5 คะแนน ด้วยการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสแบบ 9 จุด

Selani et al. (2014) ศึกษาลักษณะของกากสับประรดผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเพื่อเพิ่มปริมาณโยอาหารให้กับผลิตภัณฑ์ กากสับประรดมีไขมันต่ำ (0.61 %) และมีโยอาหารสูง (45.22 %) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการเสริมโยอาหารให้กับผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำอย่างเช่นขนมขบเคี้ยว ทำการศึกษาปริมาณกากสับประรด (0 10.5 และ 21 %) ปริมาณความชื้น (14 15 และ 16 %)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอุณหภูมิ (140 และ 160°C) ในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ผลการทดลองพบว่าปริมาณจุลินทรีย์ ค่า water activity และค่า pH ต่ำ ซึ่งบ่งชี้ถึงคุณภาพที่ดีและมีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพต่ำ การเติมกากสับประดามีผลทำให้การพองตัวและความสว่างลดลง ในขณะที่มีค่าสีแดงเพิ่มขึ้น เมื่อเติมกากสับประรด 10.5 % พบว่าความแข็ง ค่าสีเหลือง การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นรวม ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p=0.05$) ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการเติมกากสับประรดที่ระดับนี้ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

Arivalagan et al. (2018) รายงานว่าข้าวและข้าวโพดมักถูกนำมาใช้สำหรับการผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน และเมื่อนำไปผสมกับวัตถุดิบอื่นที่มีคุณค่าทางโภชนาการจะทำให้เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้มีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงขึ้น จาวมะพร้าวเป็นเนื้อเยื่อที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตเตปโตของมะพร้าวซึ่งอุดมไปด้วยสารอาหาร ทำการผสมจาวมะพร้าวกับแป้งข้าวและข้าวโพดที่ถูกผสมกันไว้แล้วด้วยอัตราส่วน 1:1 โดยการแทนที่แป้งข้าวโพดที่ระดับ 0 10 20 และ 30 % (w/w) และผลิตโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ศึกษาผลของการเติมปริมาณจาวมะพร้าวต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเอ็กซ์ทรูเดท ได้แก่ ความหนาแน่นรวม อัตราการพองตัว ดัชนีการดูดซึมน้ำ ดัชนีการละลายน้ำ ความแข็ง และสี ลักษณะทางประสาทสัมผัส และคุณสมบัติทางชีวเคมี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณจาวมะพร้าวมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้อัตราการพองตัวและความยาวลดลง สีเข้มขึ้น และความแข็งเพิ่มขึ้น มีโปรตีนและแร่ธาตุเพิ่มมากขึ้น และพบว่าวัตถุดิบที่มีอัตราส่วนของข้าว 50 % ข้าวโพด 30 % และจาวมะพร้าว 20 % มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทเพื่อสุขภาพและมีคุณค่าทางโภชนาการที่ดี อีกทั้งยังได้รับการยอมรับจากการทดสอบทางประสาทสัมผัสอีกด้วย

Rajesh et al. (2014) ผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากปลากระพงและข้าวโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ค่าพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบที่ป้อน (10 15 20 และ 30 %) ปริมาณปลากระพงในวัตถุดิบผสม (10 15 20 และ 30 %) และอุณหภูมิของบาร์เรล (100 และ 110°C) คุณสมบัติทางกายภาพของเอ็กซ์ทรูเดทที่พิจารณา ได้แก่ ความหนาแน่นรวม อัตราการพองตัว ปริมาณความชื้น ดัชนีการดูดซึมน้ำ ดัชนีการละลายน้ำ และลักษณะเนื้อสัมผัส พบว่าอัตราการพองตัวและความหนาแน่นรวมของเอ็กซ์ทรูเดทอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2.85-4.10 % และ 130-225 kg/m³ ตามลำดับ ดัชนีการดูดซึมน้ำและดัชนีการละลายน้ำ คือ 5.2-6.7 g·g⁻¹ และ 17-30 % ตามลำดับ ค่าความแข็งสูงสุดอยู่ที่สภาวะปริมาณความชื้นของวัตถุดิบที่ป้อน 30 % ปริมาณปลากระพงสับละเอียดในวัตถุดิบผสม 30 % และอุณหภูมิของบาร์เรล 110°C จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าพารามิเตอร์ทั้งหมดมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของเอ็กซ์ทรูเดท ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากปลากระพงและข้าวคือที่สภาวะปริมาณความชื้นของวัตถุดิบที่ป้อน 10 % ปริมาณปลากระพงในวัตถุดิบผสม 10 % และอุณหภูมิของบาร์เรล 110°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nascimento et al. (2017) รายงานว่าผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคต์ได้รับความนิยมน้อยมากในประเทศบราซิลและพบว่าข้าวและกากมอลต์ที่ใช้แล้ว (brewer's spent grain, BSG) จากอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ยังมีคุณค่าทางโภชนาการเหลืออยู่มาก จึงได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิของกระบวนการเอ็กซ์ทราคชัน (100-160°C) และปริมาณของ BSG (0-30 % ฐานแห้ง) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของขนมขบเคี้ยวชนิดพองตัวโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์แบบสกรูคู่ ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยมี 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและปริมาณของ BSG ทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง 3 ซ้ำ เพื่อวิเคราะห์ผลของตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ค่าพลังงานกลจำเพาะ (specific mechanical energy, SME) ผลผลิต ความถี่ในการแตกหักของโครงสร้าง (frequency of structural ruptures, N_{sr}) ค่าเฉลี่ยแรงจำเพาะการแตกหักของโครงสร้าง (average specific force of ruptures, F_{sr}) แรงเฉือนเฉื่อย และความกรอบ พบว่า SME ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเพิ่มปริมาณ BSG ผลผลิตไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิ ความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม BSG การขยายตัวเชิงปริมาตร (volumetric expansion index, VEI) ได้รับผลเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญจาก BSG อุณหภูมิส่งผลเชิงบวกต่อ N_{sr} และอาจช่วยเพิ่มพองอากาศซึ่งสามารถแปลงเป็นความกรอบได้ สรุปคือวัตถุดิบผสมระหว่างแป้งข้าวและ BSG มีศักยภาพที่ดีในการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตขนมขบเคี้ยวและยังช่วยลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ได้อีกด้วย

Wani and Kumar (2016) พัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพจากส่วนผสมของข้าวโอ๊ต ถั่วเขียว ผงจากใบและแป้งจากเมล็ดลูกชืด โดยกระบวนการเอ็กซ์ทราคชัน ศึกษาผลของความชื้นในวัตถุดิบที่ป้อน (12-16 % ฐานเปียก) อุณหภูมิของบาร์เรล (90-110°C) และความเร็วของสกรู (100-200 rpm) ต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่น การขยายตัวด้านข้าง (lateral expansion, LE) ความหนาแน่นรวม ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายน้ำ และความแข็ง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากการเปลี่ยนแปลงความชื้น อุณหภูมิ และความเร็วของสกรู สมการถดถอยแสดงให้เห็นว่าการขยายตัวด้านข้าง ความหนาแน่นรวม และความแข็ง แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ($p \leq 0.0001$) ในขณะที่ดัชนีการดูดซับน้ำและดัชนีการละลายน้ำก็แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.001$) ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุดได้มาจากการใช้ความชื้น 12 % อุณหภูมิ 110°C และความเร็วของสกรู 200 rpm จึงสรุปได้ว่าเมล็ดลูกชืด ข้าวโอ๊ต และถั่วเขียวสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่มีคุณลักษณะและคุณภาพที่พึงประสงค์ได้

Pardhi et al. (2019) ศึกษาการใช้ปลายข้าวกล้องในกระบวนการเอ็กซ์ทราคชันโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์แบบสกรูคู่ ตัวแปรที่ศึกษา คือ ความชื้นเริ่มต้น (14 และ 18 %) อุณหภูมิบาร์เรล (130-170°C) และความเร็วรอบสกรู (400-550 rpm) พบว่าคุณลักษณะของเอ็กซ์ทราคต์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังนี้ ดัชนีการละลายน้ำอยู่ในช่วง 5.43-14.32 % ดัชนีการดูดซับน้ำอยู่ในช่วง 4.72-7.81 g/g และความหนาแน่นรวมอยู่ในช่วง 0.065-0.188 g/ml เมื่อเพิ่มความชื้นทำให้ความหนาแน่นรวม ดัชนีการดูดซับน้ำ และความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ดัชนีการละลายน้ำและค่าพลังงานกลจำเพาะลดลง การเพิ่มความเร็วยรอบสกรูทำให้ความหนาแน่นรวม ดัชนีการดูดซับน้ำ และดัชนีการ

ละลายน้ำลดลงในขณะที่ทำให้ค่าพลังงานกลจำเพาะสูงขึ้น และจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าพลังงานกลจำเพาะ ความหนาแน่นรวม ดัชนีการดูดซับน้ำ และความแข็งลดลง ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทมากที่สุดคือ ความชื้นเริ่มต้นและอุณหภูมิบาร์เรล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

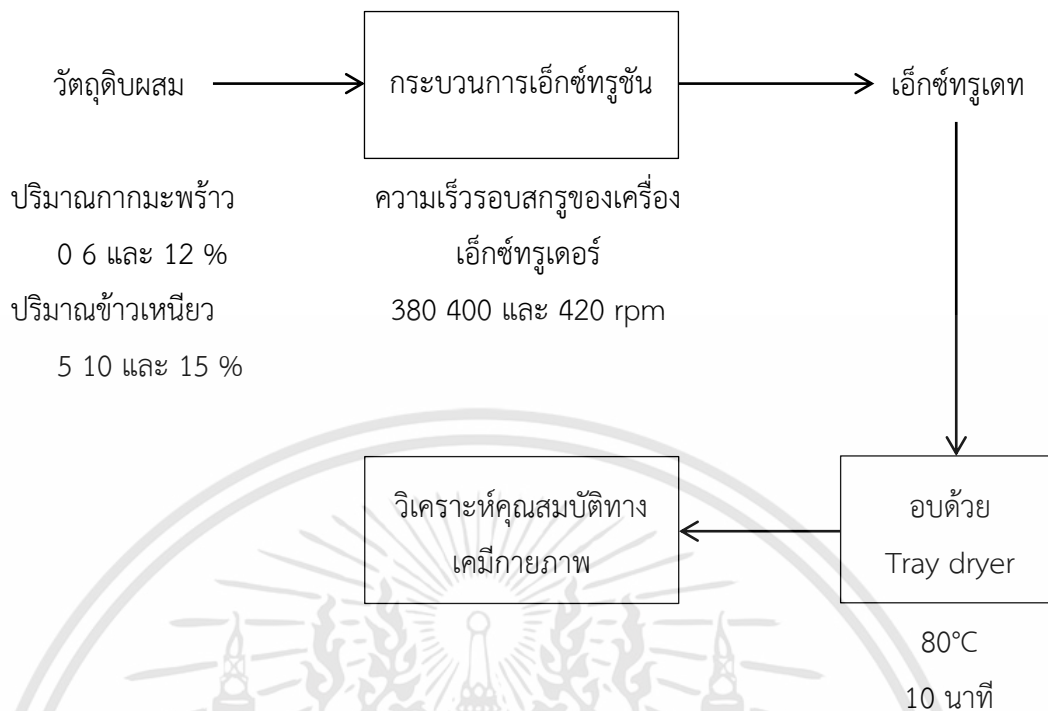
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ศึกษาประกอบด้วย ปลายข้าวหอมมะลิและปลายข้าวเหนียว จากโรงสีตงเม้ง (นครราชสีมา, ประเทศไทย) และกากมะพร้าว จาก บริษัท เอเชียติค อุตสาหกรรมเกษตร (กรุงเทพฯ, ประเทศไทย) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้ ความชื้น 3.54 % ไขมัน 15 % เยื่อใยหยาบ 20.3 % โดยนำปลายข้าวหอมมะลิและปลายข้าวเหนียวมาลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบข้อนเหวี่ยง (hammer mill) ผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 2 จากนั้นนำมาผสมกับกากมะพร้าวตามแผนการทดลอง และปรับค่าความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบผสมให้มีค่าเท่ากับ 16 % โดยการเติมน้ำกรอง จากนั้นผสมให้เข้ากันดีแล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิประมาณ 4°C เป็นเวลา 1 คืน ก่อนนำไปป้อนเข้าสู่กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

3.2 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

ในการทดลองนำวัตถุดิบผสมป้อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ค่า L/D (length: diameter) ของสกรูเท่ากับ 9:1 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสกรูเท่ากับ 34.6 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูหน้าแปลน 3.8 มิลลิเมตร และอุณหภูมิของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์บริเวณหน้าแปลนอยู่ในช่วง 100-105°C ซึ่งอุณหภูมิภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์จะสูงกว่านี้ ปรับความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ 380 400 และ 420 rpm จากนั้นนำเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากแต่ละสภาวะการทดลองไปอบด้วยเครื่องอบแห้งแบบถาด (tray dryer) ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

3.3.1 ความชื้น (Moisture content, MC)

ซึ่งตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดทที่บดละเอียดมาประมาณ 2 กรัม อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำมาคำนวณปริมาณความชื้นที่ระเหยไปเทียบกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ ดังสมการ 3.1 (AOAC, 2005) โดยแสดงเป็นค่าร้อยละ

$$MC (\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ (g) และ W_2 คือ น้ำหนักของตัวอย่างหลังอบ (g)

3.3.2 ค่า Water activity (a_w)

วัดค่า water activity ในเอ็กซ์ทรูเดทที่ถูกลบละเอียด โดยใช้ Decagon Water Activity Meter (AquaLab Series 3, Decagon Devices, Inc. Pullman, WA, USA) ใส่ตัวอย่างประมาณ 2 กรัม เข้าไปในเครื่อง จากนั้นเครื่องจะทำการวัดอัตโนมัติ ทำ 3 ครั้ง โดยค่า water activity คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนของความดันไอของน้ำในอาหาร (p) ต่อความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ (p_0) ที่จุดอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังสมการ 3.2

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (3.2)$$

3.3.3 อัตราการพองตัว (Expansion ratio, ER)

คำนวณอัตราการพองตัวจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเอ็กซ์ทราเดทเทียบกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูหน้าแปลน ดังแสดงในสมการ 3.3 โดยใช้ 10 ตัวอย่าง จากแต่ละสภาวะการทดลอง

$$ER = \frac{D_E}{D_D} \quad (3.3)$$

เมื่อ D_E คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของเอ็กซ์ทราเดท (cm) และ D_D เส้นผ่าศูนย์กลางของรูหน้าแปลน (cm)

3.3.4 ความหนาแน่น (Density, ρ)

นำเอ็กซ์ทราเดทมาบดละเอียด ใส่ลงในภาชนะที่มีปริมาตร 60.84 g/cm^3 แล้วทำการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 4 ตำแหน่ง แต่ละตัวอย่างทำการวัด 3 ครั้ง คำนวณความหนาแน่นจากสมการที่ 3.4

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.4)$$

เมื่อ m คือ มวลของเอ็กซ์ทราเดท (g) และ V คือ ปริมาตรของภาชนะ (cm^3)

3.3.5 ดัชนีการดูดซับน้ำ (Water absorption index, WAI) และดัชนีการละลายน้ำ (Water solubility index, WSI)

บดตัวอย่างให้ละเอียด จากนั้นร่อนผ่านตระแกรงเบอร์ 40 ซึ่งตัวอย่างประมาณ 2.5 กรัม เติมน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากันเป็นเวลา 30 นาที นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 4000 rpm เป็นเวลา 15 นาที แยกตะกอนเปียกและส่วนละลายใสออกจากกัน ซึ่งน้ำหนักตะกอนเปียกเพื่อคำนวณค่า WAI ดังสมการที่ 3.4 นำส่วนละลายใสไปอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ ซึ่งน้ำหนักเพื่อคำนวณค่า WSI ดังสมการที่ 3.5 (Ravindran et al., 2011)

$$\text{WAI (g / g)} = \frac{\text{weight of sediment}}{\text{weight of dry solid}} \quad (3.4)$$

$$\text{WSI (\%)} = \frac{\text{weight of dissolved solids in supernatant}}{\text{weight of dry solid}} \quad (3.5)$$

3.3.6 ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture)

ความกรอบ (crispness) และความแข็ง (hardness) ของเอ็กซ์ทราคตจากเครื่องวิเคราะห์จากจำนวนพีค (peak) ของกราฟและพีคสูงสุดของกราฟ ตามลำดับ ที่อ่านจากเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (texture analyzer) (Serial No.4650, TEE version no.2.64 UK) ขนาด load cell 50 กิโลกรัม โดยใช้หัววัดทรงกระบอก ขนาด 2 มิลลิเมตร ตั้งค้ำระยะห่าง 14 มิลลิเมตร และความเร็วในการกด 3 มิลลิเมตร/วินาที นำ 10 ตัวอย่าง จากแต่ละสภาวะ ความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร วางบนแผ่นวัด ให้หัววัดเจาะทะลุตัวอย่างในแนวตั้งฉากกับความยาวของตัวอย่าง (Rathod and Annapure, 2016)

3.3.7 ไขมัน (Fat)

นำขวดก้นกลมที่ใช้ในการรองรับไขมันไปอบแห้งแล้วชั่งน้ำหนัก บันทึกไว้ (W_1) ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแล้วประมาณ 2 กรัม (W_2) ใส่ในกระดาดกรอง ท่อให้มิดชิดแล้วใส่ลงใน thimble นำ thimble ใส่เข้าเครื่องสกัดแบบ soxhlet เติมปิโตรเลียมอีเทอร์ลงในขวดก้นกลม 150 มิลลิลิตร ให้ความร้อนและทำการสกัดเป็นเวลา 12-14 ชั่วโมง เมื่อครบเวลากลับเอาปิโตรเลียมอีเทอร์ออกจากขวดก้นกลม นำขวดก้นกลมที่มีไขมันไปอบเพื่อระเหยปิโตรเลียมอีเทอร์ที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่ (W_3) คำนวณหาปริมาณไขมันดังสมการที่ 3.6 (AOAC, 2005)

$$\text{Fat (\%)} = \frac{W_3 - W_1}{W_2} \times 100 \quad (3.6)$$

3.3.8 เยื่อใยหยาบ (Crude fiber)

เยื่อใยอย่างหยาบ หมายถึง ส่วนของเซลลูโลสและลิกนินเท่านั้น หากตัวอย่างมีไขมันเกิน 5% ต้องนำไปสกัดไขมันออกก่อน ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแล้วประมาณ 1 กรัม (W_1) ใส่ใน crucible ขนาด 600 มิลลิลิตร เติม 1.25 % H_2SO_4 200 มิลลิลิตร ต้มบนเครื่องสกัดเยื่อใยจนเดือดเป็นเวลา 30 นาที เพื่อสลายคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน กรองสารละลายผ่านเครื่องกรองบุชเนอร์ ล้างตะกอนด้วยน้ำประมาณ 4 ครั้ง ครั้งละ 40-50 มิลลิลิตร เติม 1.25 % $NaOH$ 200 มิลลิลิตร ต้มบนเครื่องสกัดเยื่อใยจนเดือดเป็นเวลา 30 นาที ล้างตะกอนด้วยน้ำและล้างด้วย H_2SO_4 25-30 มิลลิลิตร 1 ครั้ง สุดท้ายล้างด้วยน้ำ 25-30 มิลลิลิตร 2 ครั้ง นำตะกอนไปอบที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (W_2) นำตะกอนไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิ 550°C เป็น

เวลา 2 ชั่วโมง ตั้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (W_3) สามารถคำนวณปริมาณเยื่อใยหยาบดังสมการที่ 3.7 (AOAC, 2005)

$$\text{Crude fiber (\%)} = \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100 \quad (3.7)$$

3.4 แผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้วิธีวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) โดยศึกษาผลของ 3 ปัจจัย ประกอบด้วย ปริมาณกากมะพร้าว (% , X_1) ปริมาณข้าวเหนียว (% , X_2) และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ (rpm, X_3) ที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเอ็กซ์ทราเต แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังตารางที่ 3.1 จำนวนการทดลองได้จากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken (Box-Behnken Design, BBD) รวมจำนวนการทดลองทั้งหมดคือ 17 การทดลอง และทำ 5 ซ้ำ สำหรับจุดกึ่งกลาง แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ระดับของปัจจัยในการทดลอง

ตัวแปรในการทดลอง	สัญลักษณ์	ระดับ		
		-1	0	+1
ปริมาณกากมะพร้าว (%)	X_1	0	6	12
ปริมาณข้าวเหนียว (%)	X_2	5	10	15
ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ (rpm)	X_3	380	400	420

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

ลำดับ	ปริมาณกากมะพร้าว (X_1)	ปริมาณข้าวเหนียว (X_2)	ความเร็วรอบสกรูของเครื่อง เอ็กซ์ทราเตอร์ (X_3)
1	+1	0	-1
2	-1	+1	0
3	0	0	0
4	0	+1	+1
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	-1	0	-1
9	0	+1	-1
10	0	-1	+1
11	0	-1	-1
12	-1	-1	0
13	+1	0	+1
14	+1	-1	0
15	+1	+1	0
16	-1	0	+1
17	0	0	0

ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าปัจจัยการผลิตกับคุณสมบัติของเอ็กซ์ทราเตอร์ ด้วยสมการถดถอยกำลังสอง (second order polynomial model) แสดงดังสมการที่ 3.8

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (3.8)$$

3.5 การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเตอร์

ทำการคัดเลือกตัวอย่างผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเตอร์ที่ได้จากช่วงสภาวะการผลิตที่เหมาะสม จำนวน 3 ตัวอย่าง มาทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส โดยใช้ผู้ชิมทดสอบ 10 คน

ทำการออกแบบแบบสอบถามเพื่อทดสอบการยอมรับในผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเตอร์ที่ได้ด้วยแบบทดสอบ Hedonic scaling test ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดลักษณะของผลิตภัณฑ์และการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยอมรับผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง โดยให้ระดับของความชอบและไม่ชอบผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ระดับสเกลความชอบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ สเกลความชอบ 9 จุด (Nine-point hedonic scale) ผู้ทดสอบสามารถให้ความพอใจของตนโดยการแสดงออกมาในรูประดับของความชอบและไม่ชอบผลิตภัณฑ์จากสเกลที่กำหนด ทำการแปลระดับความรู้สึกของผู้ทดสอบเป็นตัวเลข ดังต่อไปนี้ ชอบมากที่สุด (Like extremely) มีคะแนนเป็น 9, ชอบมาก (Like very much) มีคะแนนเป็น 8, ชอบปานกลาง (Like moderately) มีคะแนนเป็น 7, ชอบเล็กน้อย (Like slightly) มีคะแนนเป็น 6, เฉย ๆ (Neither like nor dislike) มีคะแนนเป็น 5, ไม่ชอบเล็กน้อย (Dislike slightly) มีคะแนนเป็น 4, ไม่ชอบปานกลาง (Dislike moderately) มีคะแนนเป็น 3, ไม่ชอบมาก (Dislike very much) มีคะแนนเป็น 2 และไม่ชอบมากที่สุด (Dislike extremely) มีคะแนนเป็น 1 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ

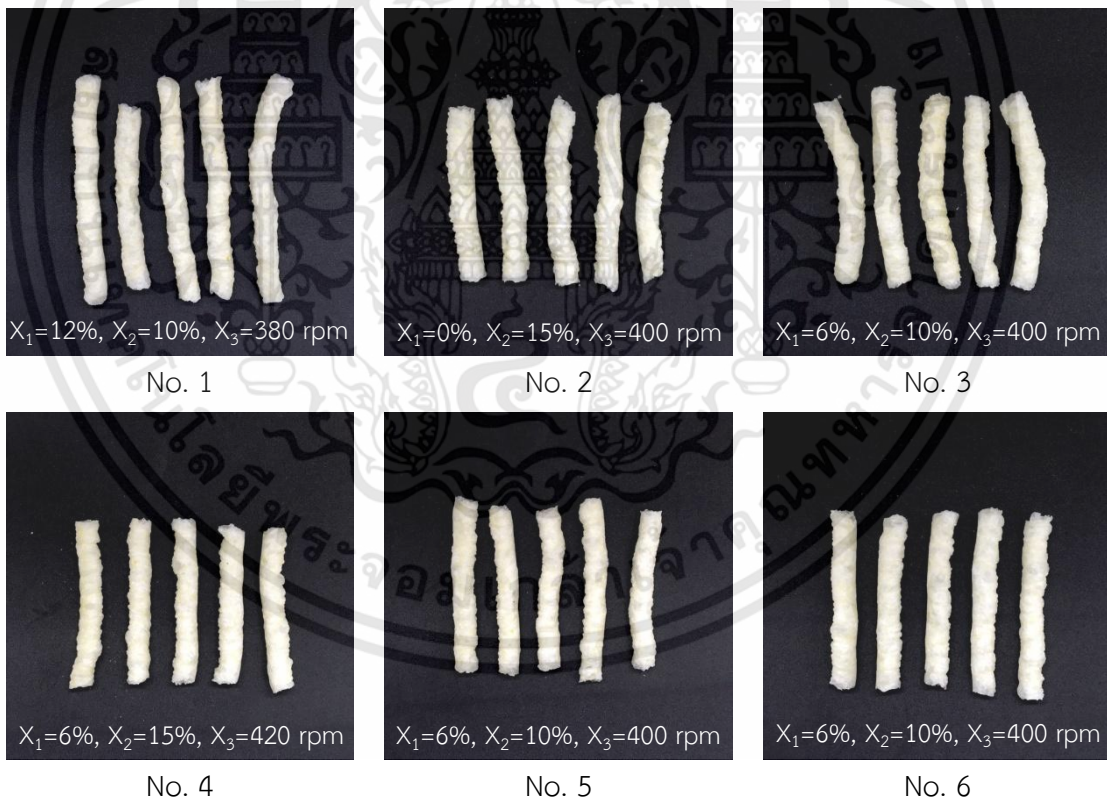


บทที่ 4

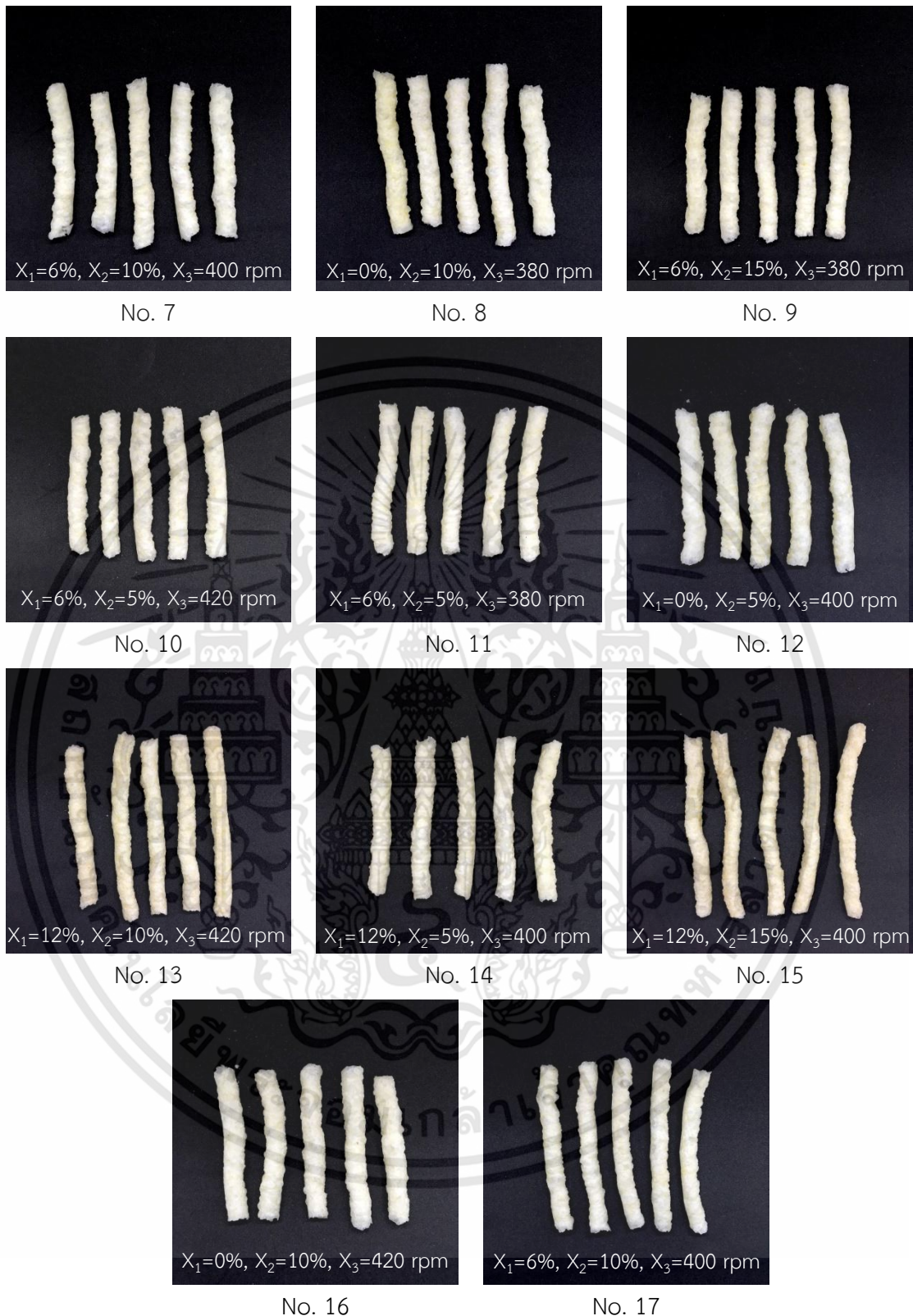
ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 คุณสมบัติของวัตถุดิบ

ความชื้นเริ่มต้นของกากมะพร้าว ข้าวเจ้า และข้าวเหนียว คือ 3.54 11.4 และ 13.62 % ตามลำดับ เมื่อทดลองผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันโดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ปริมาณกากมะพร้าว 0-12 % ปริมาณข้าวเหนียว 5-15 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 380-420 rpm ลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากแต่ละสภาวะการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเอ็กซ์ทรูเดทมีปริมาณใยอาหารอยู่ในช่วง 0.34-2.84 % และมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.2 เป็นการสรุปช่วงผลการทดลองของแต่ละคุณสมบัติของเอ็กซ์ทรูเดทซึ่งแสดงค่าน้อยที่สุดและมากที่สุด ส่วนผลวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในรูปแบบของสมการที่ 3.7 แสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.1 ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากแต่ละสภาวะการทดลอง เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์



รูปที่ 4.1 (ต่อ) ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากแต่ละสภาวะการทดลอง เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของคุณสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทูเรทจากแต่ละสภาวะการทดลอง

No.	MC (%)	a _w (%)	ER	ρ (g/cm ³)	WAI (g/g)	WSI (%)	Crispness (kg.sec)	Hardness (N)	Fiber (%)
1	7.75±0.04	0.31±0.01	2.55±0.07	0.61±0.00	4.42±0.02	27.97±0.71	18.54±3.63	15.45±1.88	2.79
2	7.27±0.04	0.26±0.02	2.66±0.05	0.71±0.01	4.95±0.03	27.60±0.12	19.65±3.08	12.82±1.98	0.44
3	7.15±0.02	0.26±0.00	2.73±0.07	0.67±0.01	4.82±0.00	26.37±0.49	21.04±2.90	15.45±1.67	1.59
4	7.69±0.03	0.30±0.01	2.62±0.12	0.71±0.00	4.95±0.02	25.84±0.53	18.90±3.31	14.22±2.05	1.64
5	7.14±0.02	0.28±0.00	2.54±0.08	0.70±0.01	4.84±0.01	26.21±0.37	21.25±6.47	14.80±1.96	1.59
6	7.11±0.07	0.27±0.00	2.61±0.08	0.71±0.01	4.89±0.06	26.11±0.23	20.14±3.30	12.38±2.27	1.59
7	7.17±0.04	0.26±0.00	2.58±0.06	0.72±0.01	4.90±0.03	26.06±0.47	20.29±7.98	13.54±2.25	1.59
8	7.09±0.04	0.24±0.01	2.71±0.04	0.71±0.02	5.05±0.02	26.94±0.52	17.44±3.61	13.36±2.84	0.39
9	7.16±0.07	0.25±0.01	2.54±0.09	0.69±0.01	4.86±0.07	25.94±0.86	21.46±3.55	14.50±2.51	1.64
10	8.27±0.03	0.32±0.00	2.48±0.08	0.76±0.01	5.51±0.03	21.51±0.72	20.71±7.57	18.43±2.91	1.54
11	7.62±0.02	0.27±0.00	2.68±0.09	0.73±0.00	5.27±0.02	23.71±0.41	21.42±4.55	16.42±2.07	1.54
12	6.97±0.02	0.24±0.01	2.61±0.07	0.74±0.01	5.22±0.05	25.91±0.19	19.33±4.63	14.71±2.58	0.34
13	6.79±0.06	0.24±0.02	2.30±0.04	0.55±0.00	4.61±0.02	27.26±0.37	19.91±3.90	12.98±2.67	2.79
14	7.59±0.03	0.36±0.00	2.33±0.11	0.67±0.00	4.77±0.12	24.65±0.68	27.73±7.20	22.07±2.71	2.74
15	6.76±0.15	0.25±0.01	2.42±0.04	0.57±0.01	4.24±0.03	33.37±0.87	18.53±2.96	14.15±1.97	2.84
16	7.09±0.05	0.22±0.00	2.78±0.09	0.71±0.01	5.15±0.02	26.16±0.51	16.87±2.98	12.99±2.52	0.39
17	7.13±0.04	0.26±0.00	2.69±0.05	0.72±0.00	4.90±0.09	26.21±0.13	21.55±4.57	17.07±1.75	1.59

แสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)

เมื่อ X₁ คือ ปริมาณกากมะพร้าว X₂ คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X₃ คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทูเรเตอร์

ตารางที่ 4.2 ช่วงผลการทดลองของแต่ละคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

Properties	Results
MC	6.76 – 8.27 %
a_w	0.22 – 0.36 %
ER	2.30 – 2.78
ρ	0.55 - 0.76 g/cm ³
WAI	4.24 – 5.50 g/g
WSI	21.51 – 33.37 %
Crispness	16.87 – 27.73 kg.sec
Hardness	12.38 – 22.07 N
Fiber	0.34 – 2.84 %

4.2 ผลกระทบของตัวแปรที่ศึกษาต่อคุณสมบัติของเอ็กซ์ทรูเดท

4.2.1 ความชื้น

ความชื้น คือ ปริมาณน้ำทั้งหมดที่อยู่ในผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งเนื่องจากมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ประสาทสัมผัส และการเสื่อมเสียของอาหาร โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์อาหารแห้งจะมีปริมาณความชื้นประมาณ 2-14 % เพื่อเป็นการยืดอายุในการเก็บรักษา (Taylor et al., 2019) ความชื้นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากสภาวะการทดลองต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 6.76–8.27 % ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการถดถอยกำลังสอง ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1

$$MC = 7.14 + 0.0601(X_1) - 0.1958(X_2) + 0.0280(X_3) - 0.2482(X_1)^2 + 0.2551(X_2)^2 + 0.2872(X_3)^2 - 0.2791(X_1)(X_2) - 0.2415(X_1)(X_3) - 0.0286(X_2)(X_3) \quad (4.1)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.7390 ค่า Standard Error เท่ากับ 0.2969 และค่า p -value เท่ากับ 0.1553

ตารางที่ 4.3 ค่าการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยกำลังสอง

Variables	MC	a _w	ER	ρ	WAI	WSI	Crispness	Hardness
Constant	7.14	0.2660	2.63	0.7015	4.87	26.19	20.85	14.65
X ₁	0.0601	0.0250*	- 0.1442*	- 0.0589*	- 0.2909*	0.8295*	1.43*	1.35
X ₂	- 0.1958	- 0.0163	0.0184	- 0.0267*	- 0.2201*	2.21*	-1.33*	- 1.99*
X ₃	0.0280	0.0012	- 0.0380	- 0.0017	0.0767*	- 0.4740	- 0.3086	- 0.1397
(X ₁) ²	- 0.2482	- 0.0105	- 0.0611	- 0.0545*	- 0.2072*	2.26*	- 0.9865	- 0.4559
(X ₂) ²	0.2551	0.0220	- 0.0686	0.0249	0.1330*	- 0.5724	1.44	1.74
(X ₃) ²	0.2872	- 0.0030	0.0172	- 0.0052	0.1459*	- 1.37*	- 1.67*	- 0.5000
(X ₁)(X ₂)	- 0.2791	- 0.0325*	0.0109	- 0.0180	- 0.0656*	1.76*	- 2.38*	- 1.51
(X ₁)(X ₃)	- 0.2415	- 0.0125	- 0.0823*	- 0.0149	0.0191	0.0168	0.4855	- 0.5268
(X ₂)(X ₃)	- 0.0286	0.00	0.0688	- 0.0055	- 0.0335	0.5206	- 0.4617	- 0.5758
R-Squared	0.7390	0.7349	0.9037	0.9326	0.9941	0.9695	0.8775	0.7605
Std. Error	0.2969	0.0272	0.0633	0.0228	0.0353	0.6224	1.26	1.80
p-value	0.1553	0.1617	0.0079	0.0025	0.00	0.0002	0.0169	0.1232

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$

เมื่อ X₁ คือ ปริมาณกากมะพร้าว X₂ คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X₃ คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

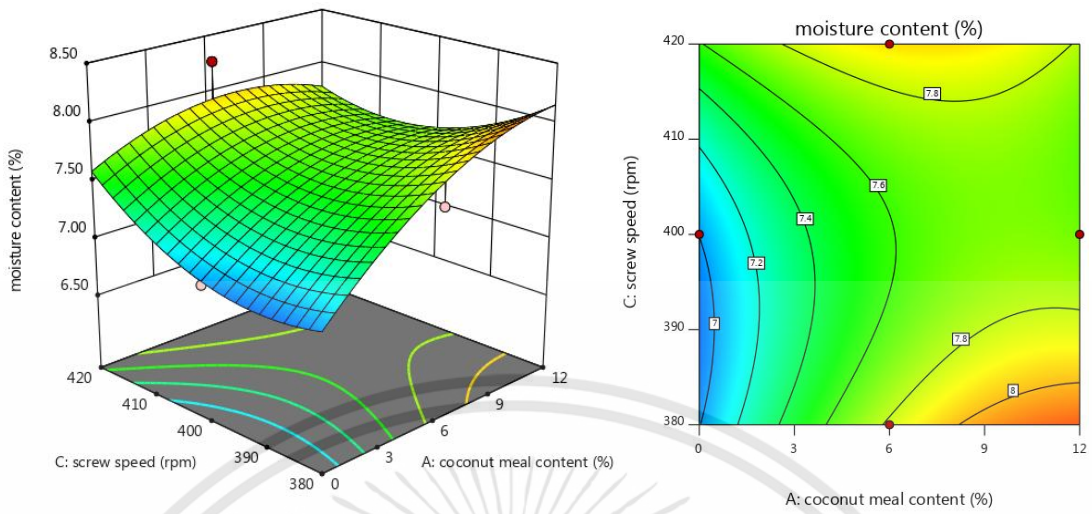
จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยต่าง ๆ ในการทดลองไม่ส่งผลกระทบต่อความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดทอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

จากการศึกษาพบว่า ค่าความชื้นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 6.76 % เกิดขึ้นที่สภาวะการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 15 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 400 rpm และค่าความชื้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 8.27 % เกิดขึ้นที่สภาวะการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าว 6 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 420 rpm

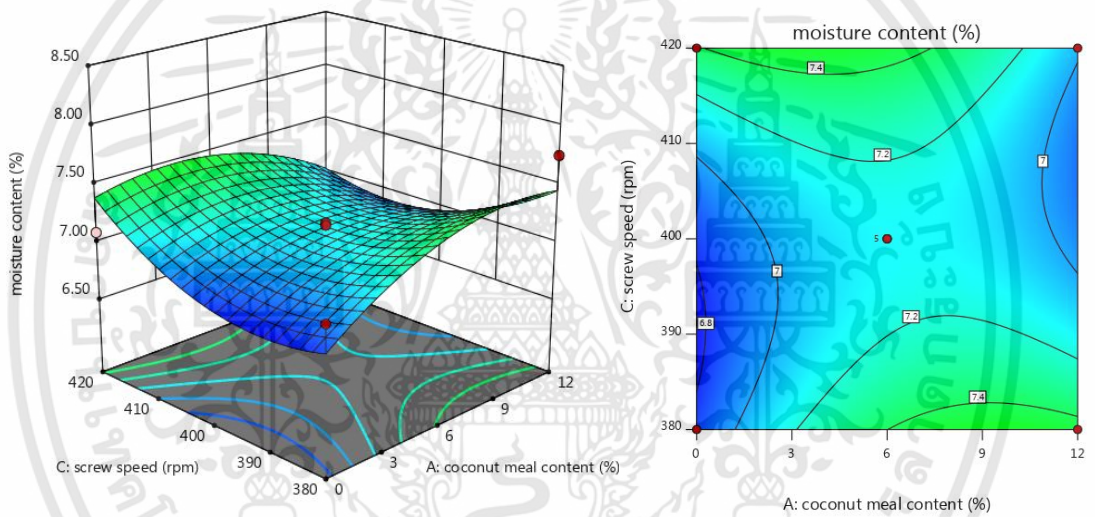
จากรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อปริมาณกากมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะใยอาหารในกากมะพร้าวมีความชื้นต่ำจึงสามารถดูดความชื้นจากสภาพแวดล้อมรอบตัวได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากมะพร้าวลงในวัตถุดิบจึงทำให้เอ็กซ์ทรูเดทมีความชื้นเพิ่มขึ้นจากความสามารถในการดูดความชื้นของใยอาหาร แต่การศึกษาของ Arivalagan et al. (2018) พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าวจาก 10-30 % ในวัตถุดิบผสมซึ่งประกอบด้วยข้าวและข้าวโพด ส่งผลให้ปริมาณความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 6.64-3.56 %

ในขณะที่การเพิ่มปริมาณข้าวเหนียวส่งผลให้ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดทมีแนวโน้มลดลง และการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ส่งผลให้ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดทมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์อาจทำให้วัตถุดิบถูกผลักออกจากเครื่องเร็วเกินไปจึงอาจยังเกิดการหลอมละลายไม่สมบูรณ์ทำให้น้ำในเซลล์วัตถุดิบระเหยออกไปได้ยาก ความชื้นของผลิตภัณฑ์จึงเพิ่มขึ้น

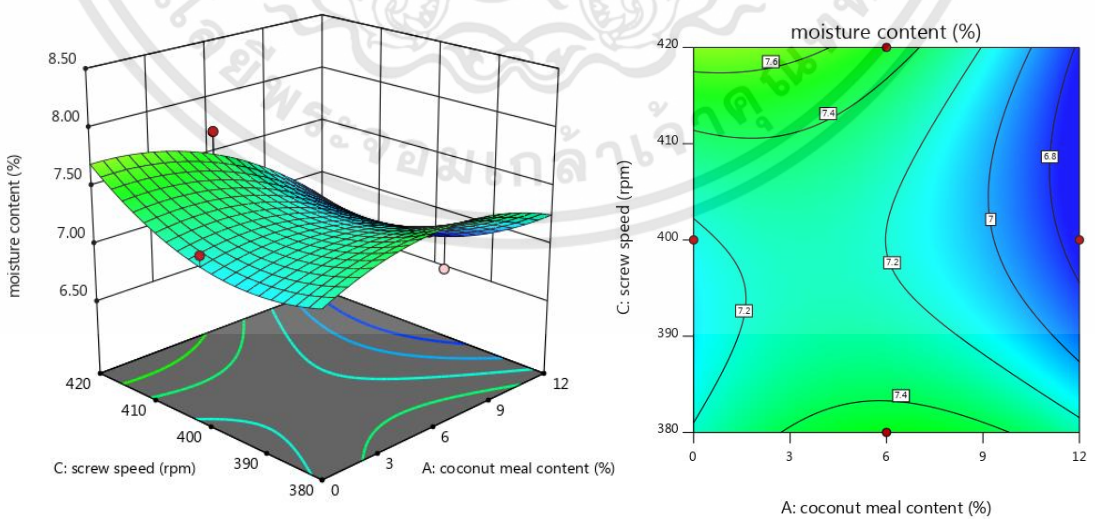
(ก.) ปริมาณข้าวเหนียว 5 %



(ข.) ปริมาณข้าวเหนียว 10 %



(ค.) ปริมาณข้าวเหนียว 15 %



รูปที่ 4.2 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองของความชื้นที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ค่า Water activity (a_w)

ค่า a_w เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร จึงมีผลโดยตรงต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากค่า a_w เป็นปัจจัยที่ขึ้นกับปริมาณน้ำอิสระในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ โดยทั่วไปขนมขบเคี้ยวมักมีค่า a_w ประมาณ 0.3-0.4 จึงจะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้เป็นอย่างดี (Taylor et al., 2019) ค่า a_w ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากสภาวะการทดลองต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 0.22–0.36 % ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการถดถอยกำลังสอง ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.2

$$a_w = 0.2260 + 0.0250(X_1) - 0.0163(X_2) + 0.0012(X_3) - 0.0105(X_1)^2 + 0.0220(X_2)^2 - 0.0030(X_3)^2 - 0.0325(X_1)(X_2) - 0.0125(X_1)(X_3) \quad (4.2)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

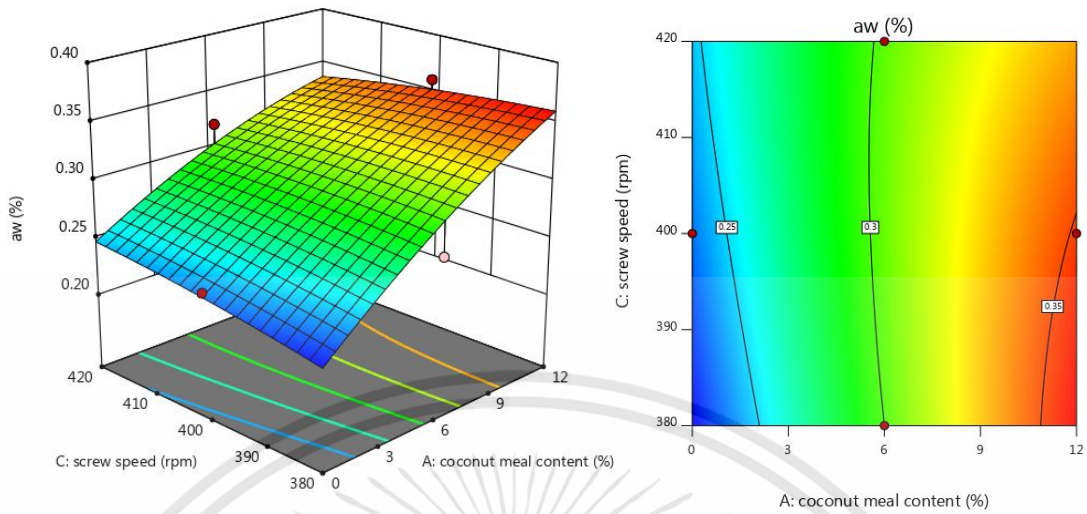
โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.7349 ค่า Standard Error เท่ากับ 0.0272 และค่า p -value เท่ากับ 0.1617

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณกากมะพร้าวส่งผลให้ค่า a_w เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และผลกระทบร่วมกันระหว่างปริมาณกากมะพร้าวและปริมาณข้าวเหนียวส่งผลให้ค่า a_w ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

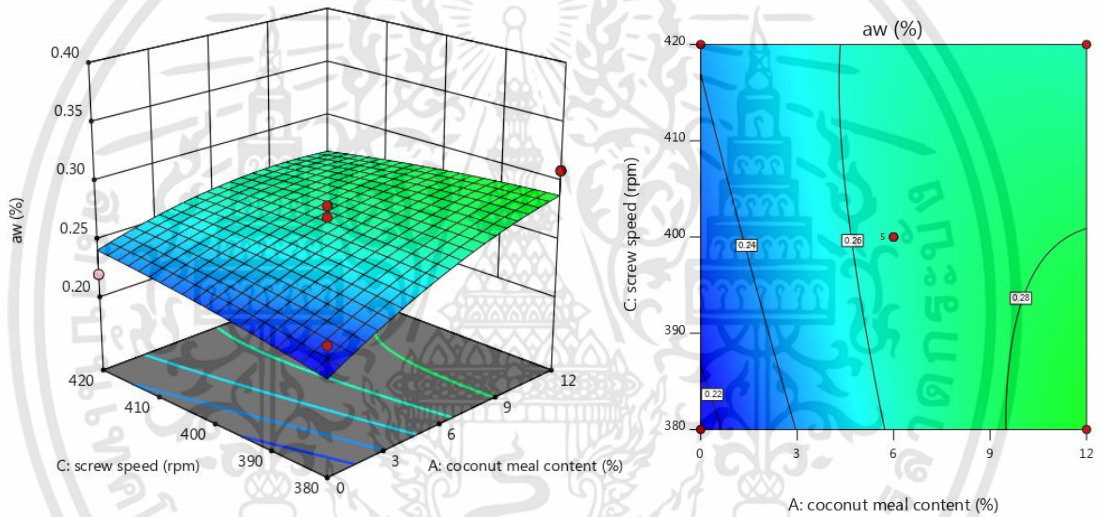
จากการศึกษาพบว่า ค่า a_w ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.22 % เกิดขึ้นที่สภาวะปริมาณกากมะพร้าว 6 % ปริมาณข้าวเหนียว 10 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 400 rpm และค่า a_w สูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.36 % เกิดขึ้นที่สภาวะการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 420 rpm

จากรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อปริมาณกากมะพร้าวและความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า a_w ของเอ็กซ์ทรูเดทเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่การเพิ่มปริมาณข้าวเหนียวส่งผลให้ค่า a_w ของเอ็กซ์ทรูเดทลดลง ซึ่ง ค่า a_w นั้นมีความเกี่ยวข้องกับความชื้น จะเห็นได้ว่าค่า a_w มีแนวโน้มเหมือนกับค่าความชื้น

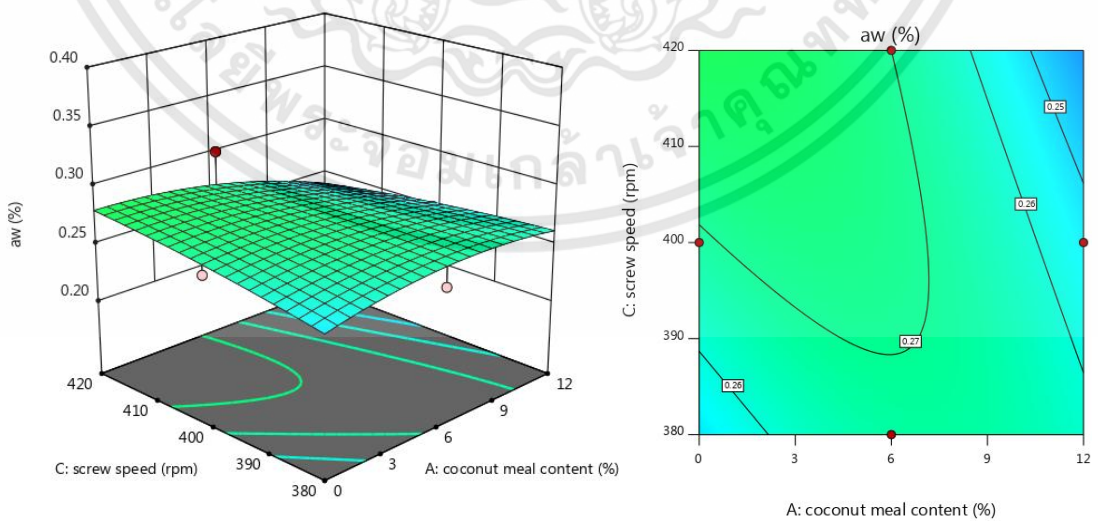
(ก.) ปริมาณข้าวเหนียว 5 %



(ข.) ปริมาณข้าวเหนียว 10 %



(ค.) ปริมาณข้าวเหนียว 15 %



รูปที่ 4.3 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองของค่า a_w ที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 อัตราการพองตัว

อัตราการพองตัวเป็นหนึ่งในคุณสมบัติสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว โดยทั่วไปอัตราการพองตัวจะได้รับผลกระทบจากสภาวะต่าง ๆ ของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เช่น ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบเริ่มต้น อุณหภูมิของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เส้นผ่าศูนย์กลางของรูหน้าแปลน อัตราการป้อนวัตถุดิบ และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Wani and Kumar, 2016) ในงานวิจัยนี้ อัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทมีค่าอยู่ในช่วง 2.30–2.78 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูหน้าแปลน นำอัตราการพองตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการถดถอยกำลังสอง ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.3

$$ER = 2.63 - 0.1442(X_1) + 0.0184(X_2) - 0.0380(X_3) - 0.0611(X_1)^2 - 0.0686(X_2)^2 + 0.0172(X_3)^2 + 0.0109(X_1)(X_2) - 0.0823(X_1)(X_3) + 0.0688(X_2)(X_3) \quad (4.3)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ โดยมีค่า

โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9037 ค่า Standard Error เท่ากับ 0.0633 และค่า p -value เท่ากับ 0.0079

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณกากมะพร้าว และความสัมพันธ์ร่วมระหว่างปริมาณกากมะพร้าวและความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ส่งผลให้อัตราการพองตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาพบว่า อัตราการพองตัวต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 2.30 เกิดขึ้นที่สภาวะปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 10 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 420 rpm และอัตราการพองตัวสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.78 เกิดขึ้นที่สภาวะการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าว 0 % ปริมาณข้าวเหนียว 10 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 420 rpm

จากรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อปริมาณกากมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการพองตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Arivalagan et al. (2018) ซึ่งศึกษาเอ็กซ์ทรูเดทที่ผลิตจากจาวมะพร้าวและข้าว พบว่าอัตราการพองตัวลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณจาวมะพร้าวเนื่องจากในจาวมะพร้าวมีใยอาหารในปริมาณมาก ซึ่งใยอาหารมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงทำให้ลดการระเหยน้ำจากเอ็กซ์ทรูเดทเมื่อออกจากหน้าแปลนเป็นผลให้อัตราการพองตัวลดลง และงานวิจัยของ Selani et al. (2014) ที่ศึกษาการใช้กากสับประรดในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทขนมขบเคี้ยว พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากสับประรด 0-21 % ส่งผลให้อัตราการพองตัวลดลง

การเพิ่มปริมาณข้าวเหนียวส่งผลให้อัตราการพองตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ของข้าวเหนียวคืออะไมโลเพคตินซึ่งง่ายต่อการถูกทำลายจากแรงเฉือนของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

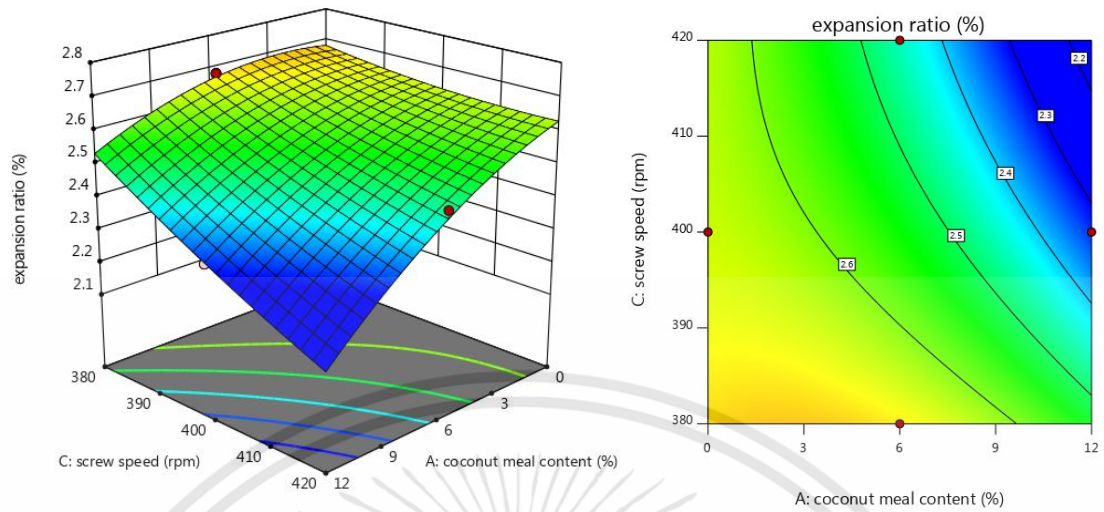
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าโมเลกุลของอะไมโลสที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีการจัดเรียงตัวที่มีความเป็นระเบียบสูงจึงยากต่อการถูกดึงให้ขยายตัวออก (Jongsutjarittam and Charoenrein, 2014)

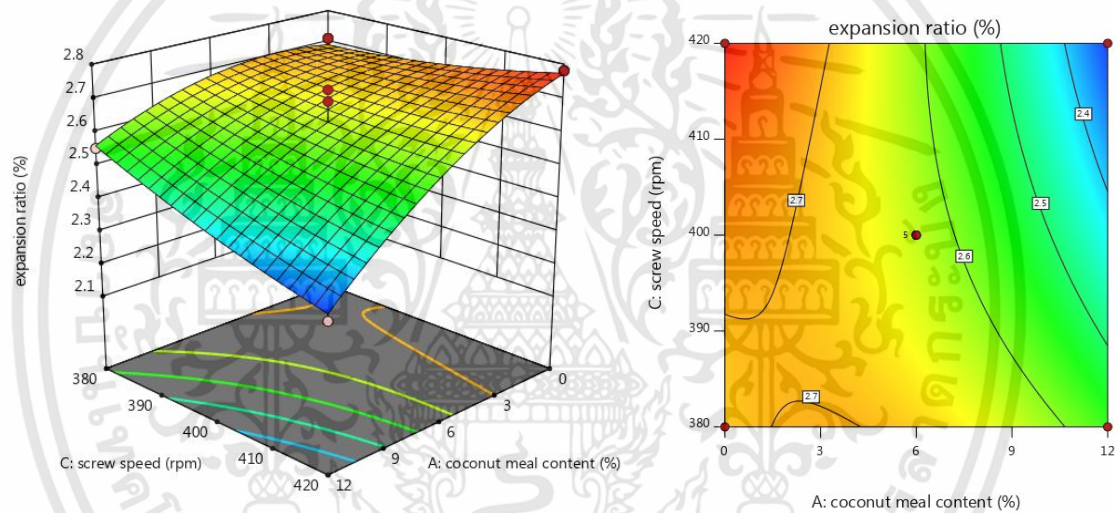
ในขณะที่การเพิ่มความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ส่งผลให้อัตราการพองตัวลดลง ซึ่งตรงข้ามกับผลการทดลองของ Wani and Kumar (2016) ที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากส่วนผสมของข้าวโอ๊ต ถั่วเขียว ผงจากใบและแป้งจากเมล็ดลูกช้ด พบว่าความเร็วยรอบสกรูส่งผลให้อัตราการพองตัวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.001$) ซึ่งอาจเกิดจากแรงเฉือนเชิงกลที่สูงขึ้น จึงทำให้อัตราการพองตัวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามทั้งการเพิ่มปริมาณข้าวเหนียวและความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นั้นส่งผลกระทบท่ออัตราการพองตัวอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)



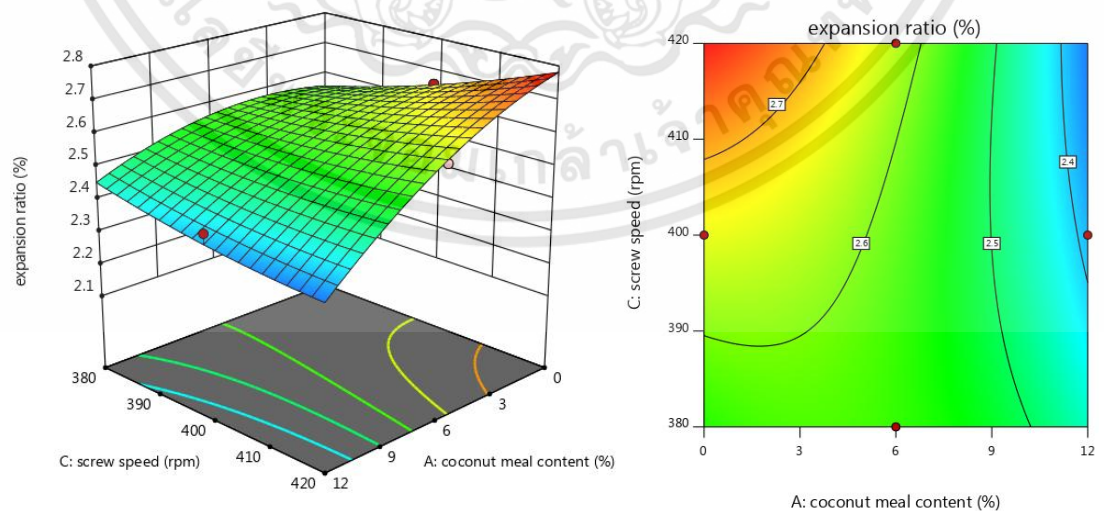
(ก.) ปริมาณข้าวเหนียว 5 %



(ข.) ปริมาณข้าวเหนียว 10 %



(ค.) ปริมาณข้าวเหนียว 15 %



รูปที่ 4.4 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองของอัตราการพองตัวที่ ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ความหนาแน่น

ความหนาแน่น (true density) เป็นคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของวัสดุชีวภาพโดยไม่รวมโพรงอากาศภายใน (Martynenko, 2014) ในงานวิจัยนี้ความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดทมีค่าอยู่ในช่วง 0.55–0.76 g/cm³ นำความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการถดถอยกำลังสอง ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.4

$$\rho = 0.7015 - 0.0589(X_1) - 0.0267(X_2) - 0.0017(X_3) - 0.0545(X_1)^2 + 0.0249(X_2)^2 - 0.0052(X_3)^2 - 0.0180(X_1)(X_2) - 0.0149(X_1)(X_3) - 0.0055(X_2)(X_3) \quad (4.4)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9326 ค่า Standard Error เท่ากับ 0.0228 และค่า p -value เท่ากับ 0.0025

จากการศึกษาพบว่า ความหนาแน่นต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0.55 g/cm³ เกิดขึ้นที่สภาวะปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 10 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 420 rpm และความหนาแน่นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.76 g/cm³ เกิดขึ้นที่สภาวะการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าว 6 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 420 rpm

จากรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อปริมาณกากมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ผลที่ได้ทำนองเดียวกับ Raghavendra et al. (2006) ที่ได้ศึกษาผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทจากถั่วและข้าว และมีการเติมกัวร์กัม (guar gum) และโลคัสปินกัม (locust bean gum) ซึ่งพบว่าเมื่อมีการเติมกัวร์กัมและโลคัสปินกัมส่งผลให้ความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดทลดลงมาก แต่ Alam et al. (2016) ศึกษาการใช้กากแครอทและเศษกะหล่ำดอกในการผลิตขนมขบเคี้ยวจากข้าว พบว่าการเพิ่มปริมาณกากแครอทและเศษกะหล่ำดอกในวัตถุดิบทำให้เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเนื่องจากใยอาหารในกากแครอทและเศษกะหล่ำดอกมีความสามารถในการดูดซับน้ำ จึงทำให้เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และ Selani et al. (2014) ที่ศึกษาการใช้กากสับปะรดในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทขนมขบเคี้ยว พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณกากสับปะรดส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากปริมาณใยอาหารและน้ำตาลในกากสับปะรดมีความสามารถในการดูดซับน้ำซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น

เมื่อปริมาณข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และเมื่อความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์จะไปลดความหนืด ความยืดหยุ่น และการเกิดเจลลาตินในซ์ของแป้ง ซึ่งทำให้อัตราการพองตัวลดลงจึงเป็นผลให้ความหนาแน่นลดลงด้วย ผลที่ได้ทำนองเดียวกับ

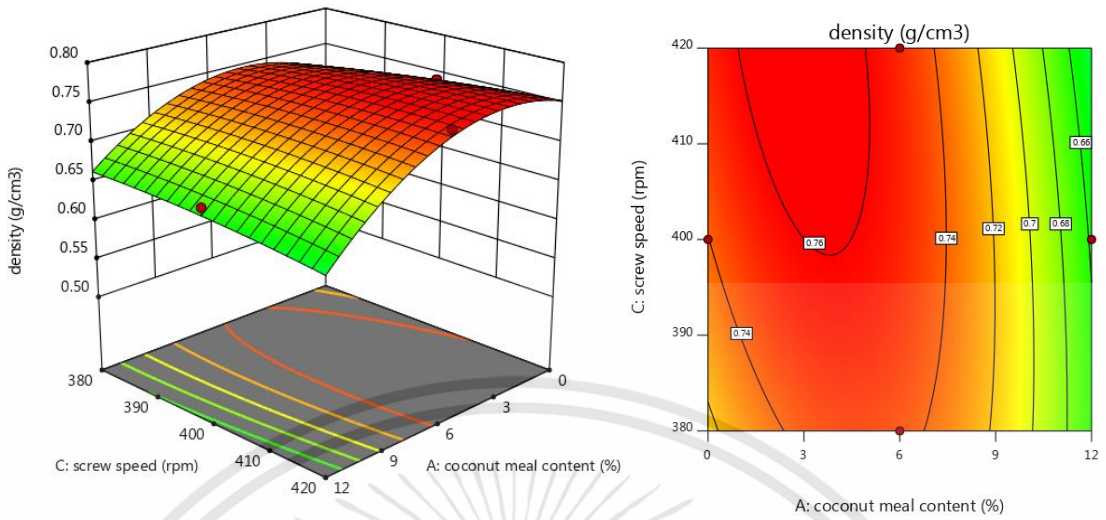
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pardhi et al. (2019) ที่ศึกษาการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากปลายข้าวกล้อง พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นั้นส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

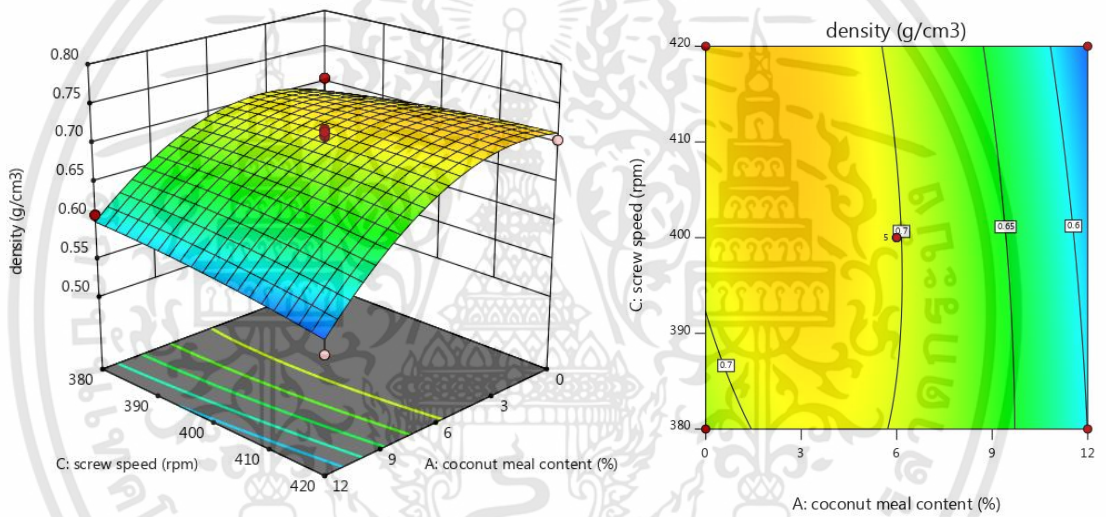


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

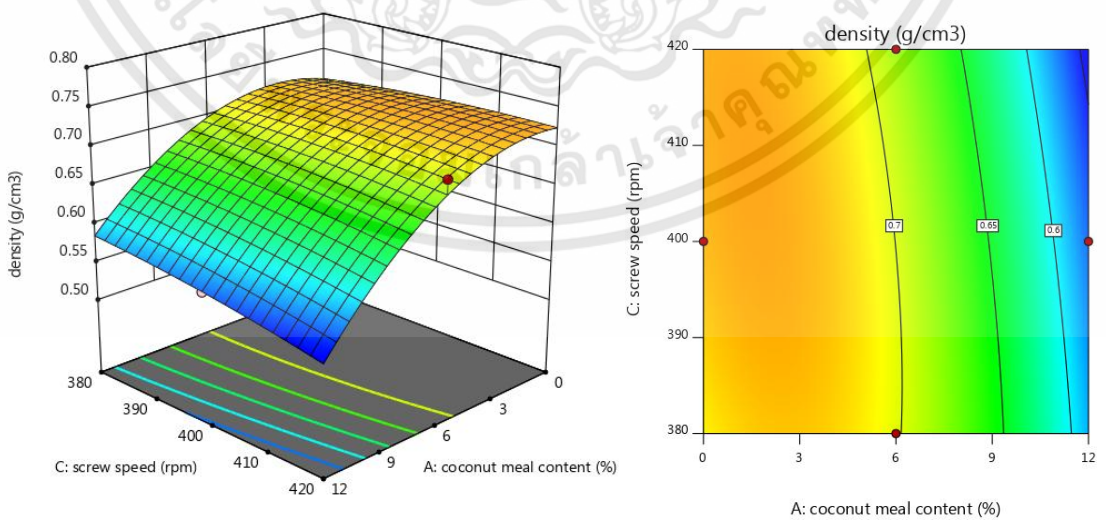
(ก.) ปริมาณข้าวเหนียว 5 %



(ข.) ปริมาณข้าวเหนียว 10 %



(ค.) ปริมาณข้าวเหนียว 15 %



รูปที่ 4.5 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองของความหนาแน่นที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI)

ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การกระจายตัวของแป้งในน้ำที่มากเกินไป การกระจายตัวจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเสียดทานของแป้งเนื่องจากการเกิดการเจลาติไนซ์และความเสียหายที่เกิดจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Rajesh et al., 2014) ค่าดัชนีการดูดซับน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกลุ่มโมเลกุลที่ชอบน้ำซึ่งจะไปจับกับน้ำเมื่อเติมน้ำลงไป ดัชนีการดูดซับน้ำเป็นการวัดปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไว้โดยแป้งซึ่งสามารถใช้ในการบ่งบอกถึงระดับการเกิดการเจลาติไนซ์ (Pardhi et al., 2016) ในงานวิจัยนี้ดัชนีการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทมีค่าอยู่ในช่วง 4.24–5.50 g/g นำดัชนีการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการถดถอยกำลังสอง ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.5

$$\begin{aligned} \text{WAI} = & 4.87 - 0.2909(X_1) - 0.2201(X_2) + 0.0767(X_3) - 0.2072(X_1)^2 + 0.1130(X_2)^2 + \\ & 0.1459(X_3)^2 - 0.0656(X_1)(X_2) + 0.0191(X_1)(X_3) - 0.0335(X_2)(X_3) \end{aligned} \quad (4.5)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9941 ค่า Standard Error เท่ากับ 0.0353 และค่า p -value เท่ากับ 0.00

จากตารางที่ 4.3 พบว่าปัจจัยในการทดลองทั้ง 3 ปัจจัย ส่งผลกระทบต่อดัชนีการดูดซับน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาพบว่า ค่าดัชนีการดูดซับน้ำต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 4.24 g/g เกิดขึ้นที่สภาวะ ปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 15 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 400 rpm และค่าดัชนีการดูดซับน้ำสูงสุดมีค่าเท่ากับ 5.51 g/g เกิดขึ้นที่สภาวะการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าว 6 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 420 rpm

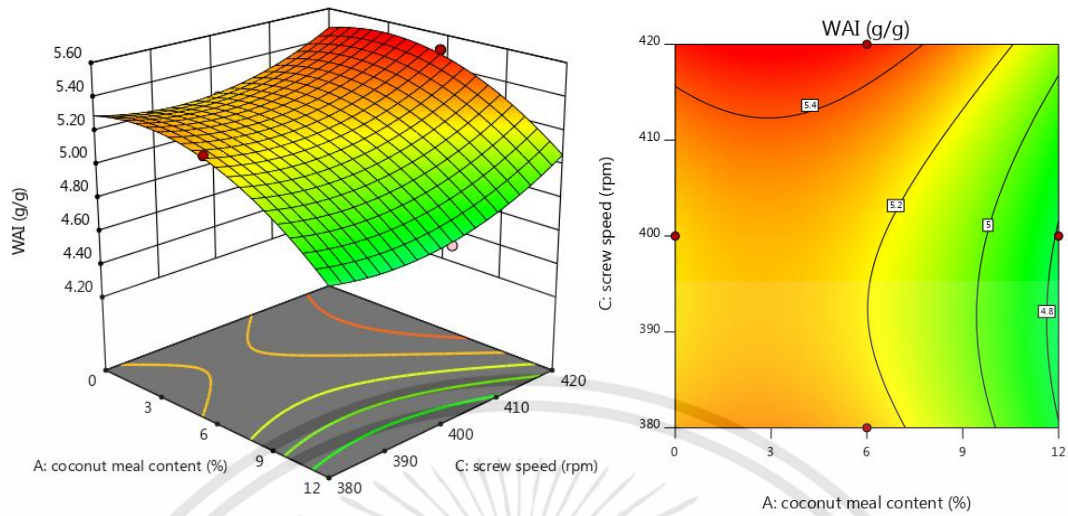
จากรูปที่ 4.6 เมื่อปริมาณกากมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ดัชนีการดูดซับน้ำลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าวเป็นการลดปริมาณแป้งในวัตถุดิบจึงทำให้มีค่าดัชนีการดูดซับน้ำลดลง Arivalagan et al. (2018) ศึกษาการใช้จาวมะพร้าวกับเอ็กซ์ทรูเดทที่ทำจากข้าวและข้าวโพด พบว่าเมื่อปริมาณจาวมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีการดูดซับน้ำของเอ็กซ์ทรูเดทลดลง ในขณะที่ Khan et al. (2015) รายงานว่าการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าวทำให้เอ็กซ์ทรูเดทมีค่าดัชนีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น

เมื่อปริมาณข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ดัชนีการดูดซับน้ำลดลง และเมื่อความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ดัชนีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงเฉือนจากการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูจะไปทำให้สายโซ่ของโพลีเมอร์เกิดความเสียหายจึงทำให้ค่าดัชนีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ผลที่ได้

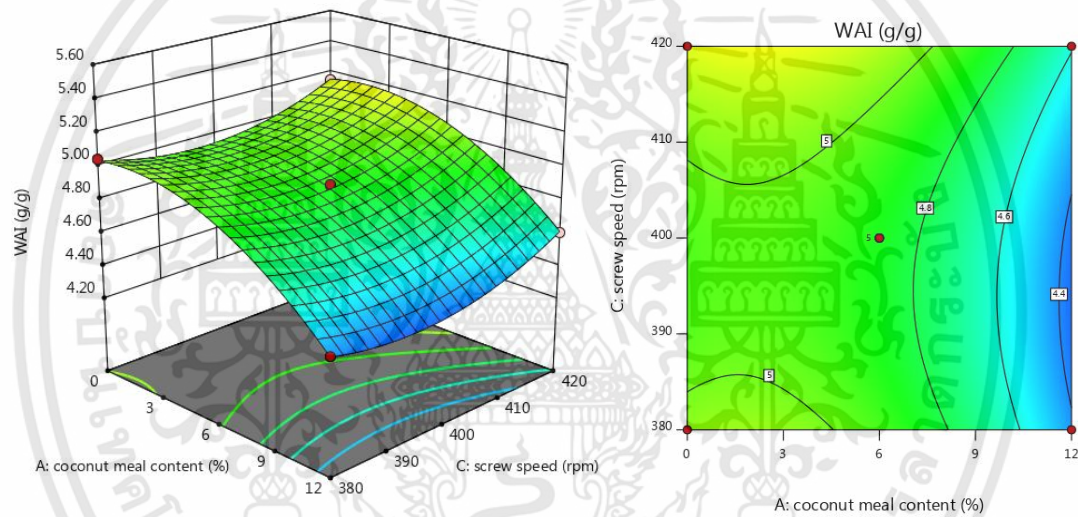
ทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Wani and Kumar (2016) ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจาก ส่วนผสมของข้าวโอ๊ต ถั่วเขียว ผงจากใบและแป้งจากเมล็ดลูกชืด พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูของ เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ส่งผลให้ค่าดัชนีการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่ Pardhi et al. (2019) ศึกษาการ ผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากปลายข้าวกล้อง พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูส่งผลให้ค่าดัชนีการดูดซับน้ำ ลดลง อาจเป็นเพราะกลุ่มของสารประกอบที่ชอบน้ำซึ่งมีความสามารถในการอุ้มน้ำถูกทำลายจากแรง ฉีกที่มากขึ้นจากการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูจึงทำให้ดัชนีการดูดซับน้ำลดลง



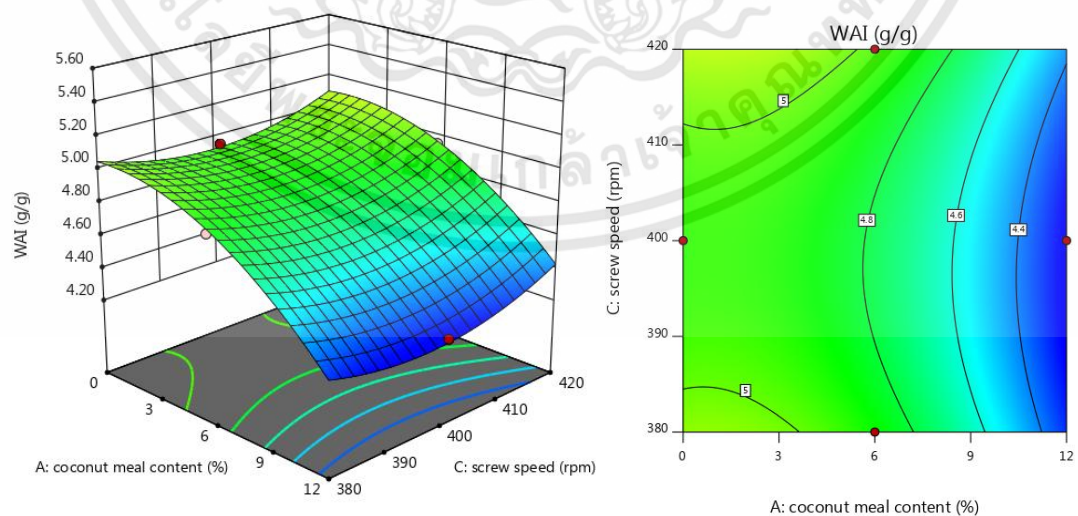
(ก.) ปริมาณข้าวเหนียว 5 %



(ข.) ปริมาณข้าวเหนียว 10 %



(ค.) ปริมาณข้าวเหนียว 15 %



รูปที่ 4.6 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองของดัชนีการดูดซับน้ำที่ ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ดัชนีการละลายน้ำ (WSI)

ค่าดัชนีการละลายน้ำ ใช้ในการหาปริมาณโพลีแซคคาไรด์ที่ละลายได้หลังจากการเติมน้ำ มักถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้การย่อยสลายของส่วนประกอบของโมเลกุล (Wani and Kumar, 2016) ในงานวิจัยนี้ดัชนีการละลายน้ำมีค่าอยู่ในช่วง 21.51–33.37 % นำดัชนีการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคท์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการถดถอยกำลังสอง ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.6

$$\text{WSI} = 26.19 + 0.8295(X_1) + 2.21(X_2) - 0.4740(X_3) + 2.26(X_1)^2 - 0.5724(X_2)^2 - 1.37(X_3)^2 + 1.76(X_1)(X_2) + 0.0168(X_1)(X_3) + 0.5206(X_2)(X_3) \quad (4.6)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์

โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9695 ค่า Standard Error เท่ากับ 0.6224 และค่า p -value เท่ากับ 0.0002

จากการศึกษาพบว่า ค่าดัชนีการละลายน้ำต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 21.51 % เกิดขึ้นที่สภาวะ ปริมาณกากมะพร้าว 6 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์ 420 rpm และค่าดัชนีการละลายสูงสุดมีค่าเท่ากับ 33.37 % เกิดขึ้นที่สภาวะการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 15 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์ 400 rpm

จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อปริมาณกากมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ดัชนีการละลายน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) Arivalagan et al. (2018) ศึกษาการใช้จาวมะพร้าวกับเอ็กซ์ทราคท์ที่ทำจากข้าวและข้าวโพด พบว่าเมื่อปริมาณจาวมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีการละลายน้ำของเอ็กซ์ทราคท์เพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการเอ็กซ์ทราคชันทำให้ใยอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงและปล่อยสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกมาจึงทำให้ค่าดัชนีการละลายน้ำเพิ่มขึ้น (Maskan and Altan, 2012) ในขณะที่ Rajesh et al. (2014) ศึกษาการผลิตเอ็กซ์ทราคท์จากปลากะพงและข้าว พบว่าการเพิ่มปริมาณปลากะพงส่งผลให้ค่าดัชนีการละลายน้ำลดลง

เมื่อปริมาณข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ดัชนีการละลายน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินในข้าวเหนียวถูกย่อยสลายในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทราคชัน และเมื่อความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีการละลายน้ำลดลง คล้ายกับงานวิจัยของ Jongsutjarittam and Charoenrein (2014) ที่พบว่าเอ็กซ์ทราคท์ที่มีส่วนประกอบของปริมาณข้าวเหนียวที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าดัชนีการละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นด้วย

และเมื่อความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีการละลายน้ำลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ในขณะที่ Wani and Kumar (2016) ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากส่วนผสมของข้าวโอ๊ต ถั่วเขียว ผงจากใบและแปงจากเมล็ดลูกชืด พบว่าการเพิ่มความเร็ว

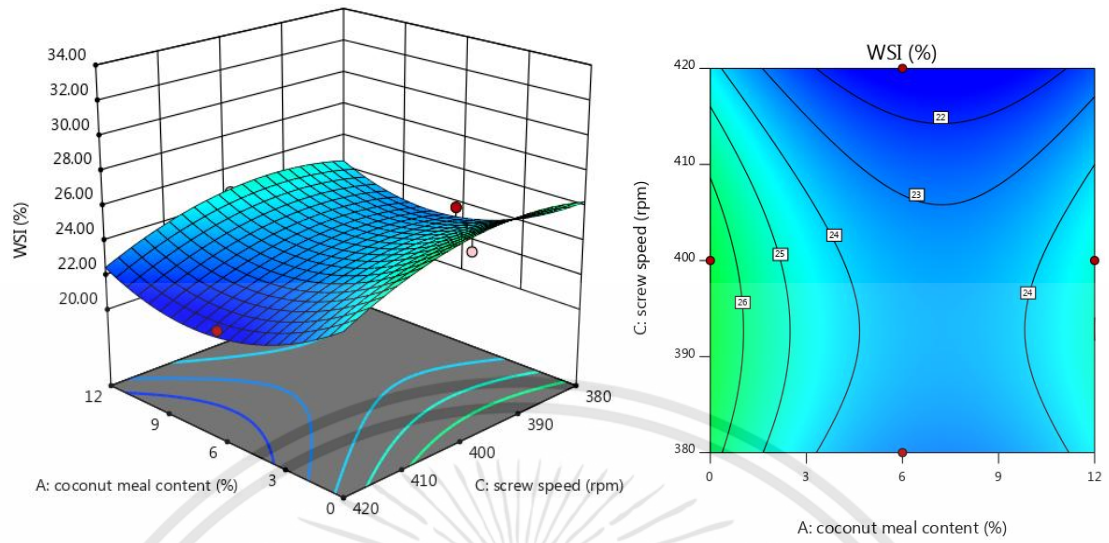
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ส่งผลให้ค่าดัชนีการละลายน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูทำให้ค่าพลังงานกลจำเพาะ (SME) และแรงเฉือนสูงขึ้น จึงทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่ถูกทำให้เล็กลงและมีน้ำหนักโมเลกุลที่เล็กลง ค่าดัชนีการละลายน้ำจึงเพิ่มขึ้น และ Pardhi et al. (2019) ศึกษาการผลิตเอ็กซ์ทราคตจากปลายข้าวกล้อง พบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูส่งผลให้ค่าดัชนีการละลายน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

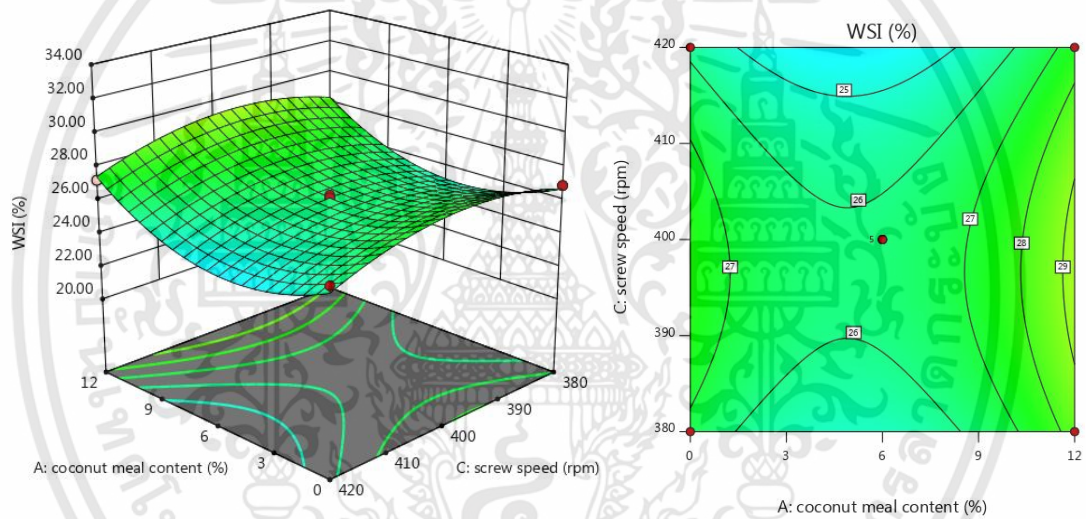


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

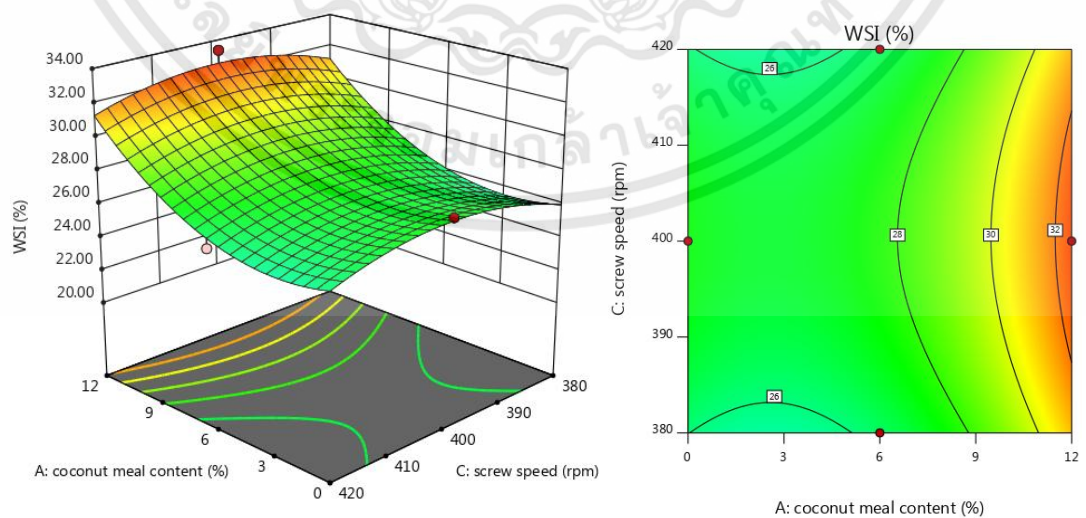
(ก.) ปริมาณข้าวเหนียว 5 %



(ข.) ปริมาณข้าวเหนียว 10 %



(ค.) ปริมาณข้าวเหนียว 15 %



รูปที่ 4.7 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองของดัชนีการละลายน้ำที่ ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 ลักษณะเนื้อสัมผัส

4.2.7.1 ความกรอบ

ลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการบ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดท ซึ่งเป็นปัจจัยที่เป็นตัวขับเคลื่อนความพึงพอใจของผู้บริโภค จากคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหาร ความกรอบจัดเป็นหนึ่งในคุณสมบัติสำคัญและเป็นที่ต้องการมากที่สุดสำหรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดท (Nascimento et al., 2017) ความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดทที่ได้จากสภาวะการทดลองต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 16.87–27.73 kg.sec นำค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดทมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการถดถอยกำลังสอง ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.7

$$\begin{aligned} \text{Crispness} = & 20.85 + 1.43(X_1) - 1.33(X_2) - 0.3086(X_3) - 0.9865(X_1)^2 + 1.44(X_2)^2 - \\ & 1.67(X_3)^2 - 2.38(X_1)(X_2) + 0.4855(X_1)(X_3) - 0.4617(X_2)(X_3) \end{aligned} \quad (4.7)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราเดอร์

โดยมี ค่า R^2 เท่ากับ 0.8775 ค่า Standard Error เท่ากับ 1.26 และค่า p -value เท่ากับ 0.0169

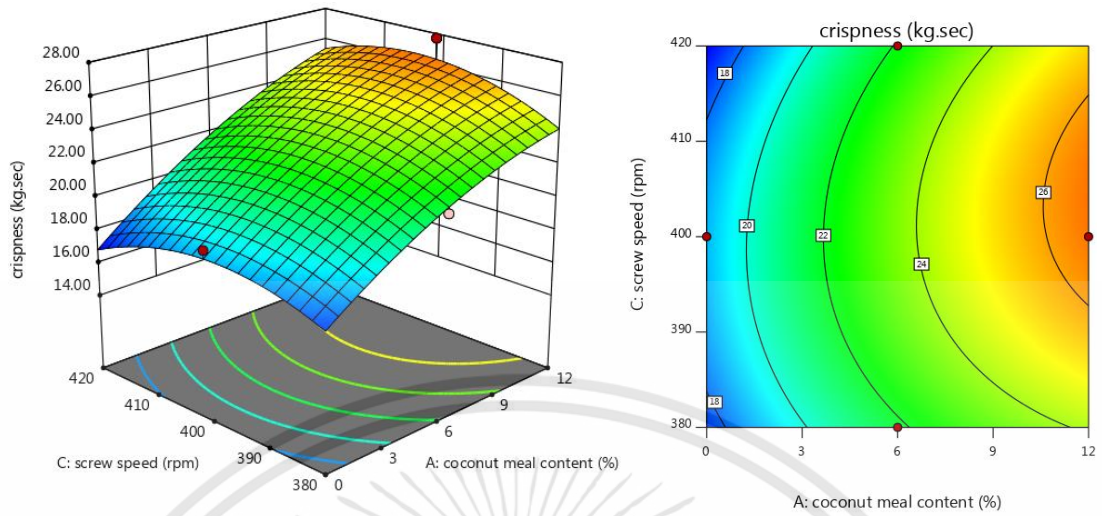
จากตารางที่ 4.3 พบว่าการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าวและปริมาณข้าวเหนียวส่งผลกระทบต่อความกรอบอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาพบว่า ค่าความกรอบต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 16.87 kg.sec เกิดขึ้นที่สภาวะปริมาณกากมะพร้าว 0 % ปริมาณข้าวเหนียว 10 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราเดอร์ 420 rpm และค่าความกรอบสูงสุดมีค่าเท่ากับ 27.73 kg.sec เกิดขึ้นที่สภาวะการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราเดอร์ 400 rpm

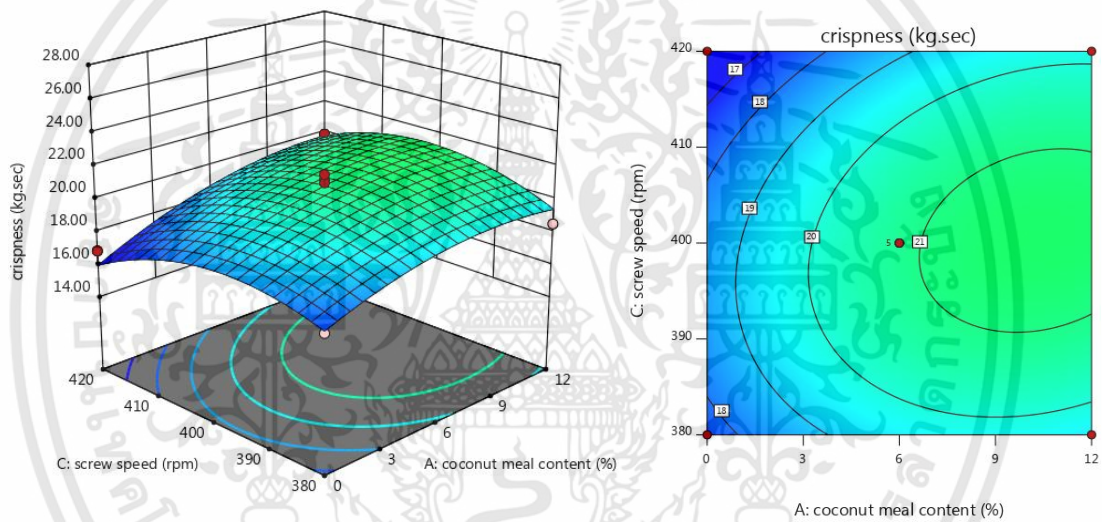
จากรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อปริมาณกากมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกรอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณโยอาหารส่งผลให้ขนาดของเซลล์ลดลงและเพิ่มความถี่ของสะเก็ดและหลุมบนผนังเซลล์ (Maskan and Altan, 2012) ผลที่ได้ทำนองเดียวกับ Nascimento et al. (2017) ศึกษาการผลิตเอ็กซ์ทราเดทจากข้าวเสริมกากมอลต์ที่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ 0-30 % พบว่าการเพิ่มปริมาณกากมอลต์ส่งผลให้ความกรอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ในขณะที่เมื่อปริมาณข้าวเหนียวและความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราเดอร์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกรอบลดลง เนื่องจากข้าวเหนียวส่วนใหญ่มีปริมาณอะไมโลสค่อนข้างต่ำ แต่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง ซึ่งทำให้ข้าวเหนียวมีคุณสมบัติที่เหนียวนุ่มหลังจากการปรุงสุกจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีข้าวเหนียวเป็นส่วนประกอบมีความกรอบลดลง (Setyawati et al., 2016)

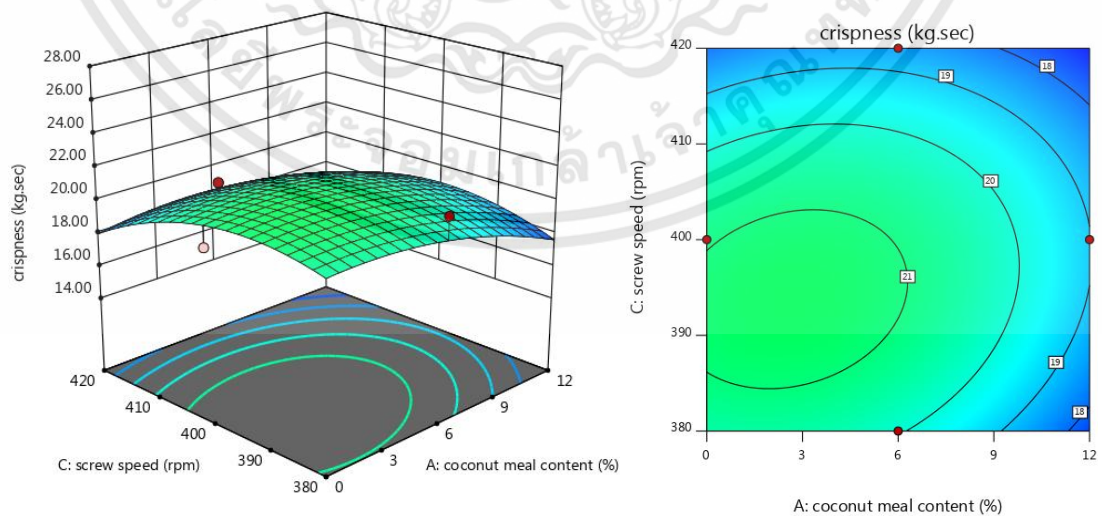
(ก.) ปริมาณข้าวเหนียว 5 %



(ข.) ปริมาณข้าวเหนียว 10 %



(ค.) ปริมาณข้าวเหนียว 15 %



รูปที่ 4.8 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองของความกรอบที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7.2 ความแข็ง

ความแข็ง คือ แรงสูงสุดที่หัววัดต้องการในการเจาะเข้าไปในผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท ซึ่งวัดได้จากพีคที่สูงที่สุดของกราฟ (Jakubczyk et al., 2017) ความแข็งมีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภคเป็นอย่างมากและยังเกี่ยวข้องกับการพองตัวและโครงสร้างของเอ็กซ์ทรูเดทด้วย (Dalbhagat et al., 2019) ค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากสภาวะการทดลองต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วง 12.38–22.07 N นำค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการถดถอยกำลังสอง ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.8

$$\text{Hardness} = 14.65 + 1.35(X_1) - 1.99(X_2) - 0.1397(X_3) - 0.4559(X_1)^2 + 1.74(X_2)^2 - 0.5000(X_3)^2 - 1.51(X_1)(X_2) - 0.5268(X_1)(X_3) - 0.5758(X_2)(X_3) \quad (4.8)$$

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

โดยมี ค่า R^2 เท่ากับ 0.7605 ค่า Standard Error เท่ากับ 0.1838 และค่า p -value เท่ากับ 0.1232

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณข้าวเหนียวส่งผลให้ความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดทลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการศึกษาพบว่า ค่าความแข็งต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 12.38 N เกิดขึ้นที่สภาวะปริมาณกากมะพร้าว 6 % ปริมาณข้าวเหนียว 10 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 400 rpm และค่าความแข็งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 22.07 N เกิดขึ้นที่สภาวะการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 400 rpm

จากรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อปริมาณกากมะพร้าวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดทเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณข้าวเหนียวและความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ส่งผลให้ค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดทลดลง Promsakha na Sakon Nakhon et al. (2018) รายงานว่า เอ็กซ์ทรูเดทที่ทำจากข้าวและฟักทองมีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณฟักทองเพิ่มขึ้น เนื่องจากใยอาหารในฟักทองยับยั้งการบวมของแป้งและทำให้ผนังเซลล์ของโมเลกุลหนาขึ้น และ Arinalagan et al. (2018) ศึกษาการใช้จาวมะพร้าวผสมกับข้าวและข้าวโพดในการผลิตเอ็กซ์ทรูเดท พบว่าการเพิ่มปริมาณจาวมะพร้าว 10-30 % ส่งผลให้ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

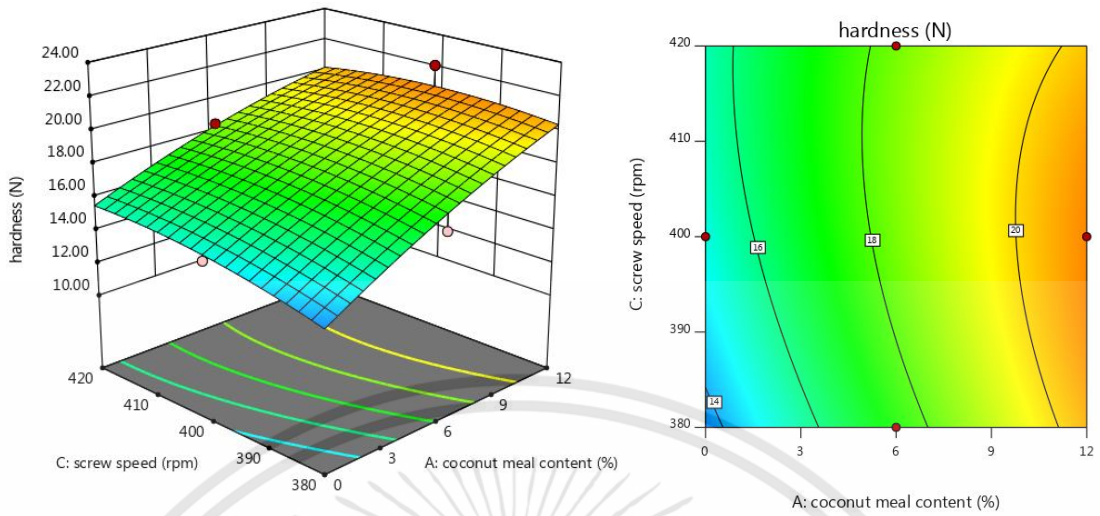
ความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดทมีความสัมพันธ์กับอัตราการพองตัวและความหนาแน่น ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีค่าความแข็งต่ำ การเพิ่มปริมาณใยอาหารจากกากมะพร้าวทำให้อัตราการพองตัวลดลงและทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณข้าวเหนียวเป็นการเพิ่ม

ปริมาณอะไมโลเพคตินให้กับวัตถุดิบซึ่งอะไมโลเพคตินจะทำผลิตภัณฑ์หลังการปรุงสุกมีลักษณะเหนียวและอ่อนนุ่มจึงทำให้มีความแข็งลดลง

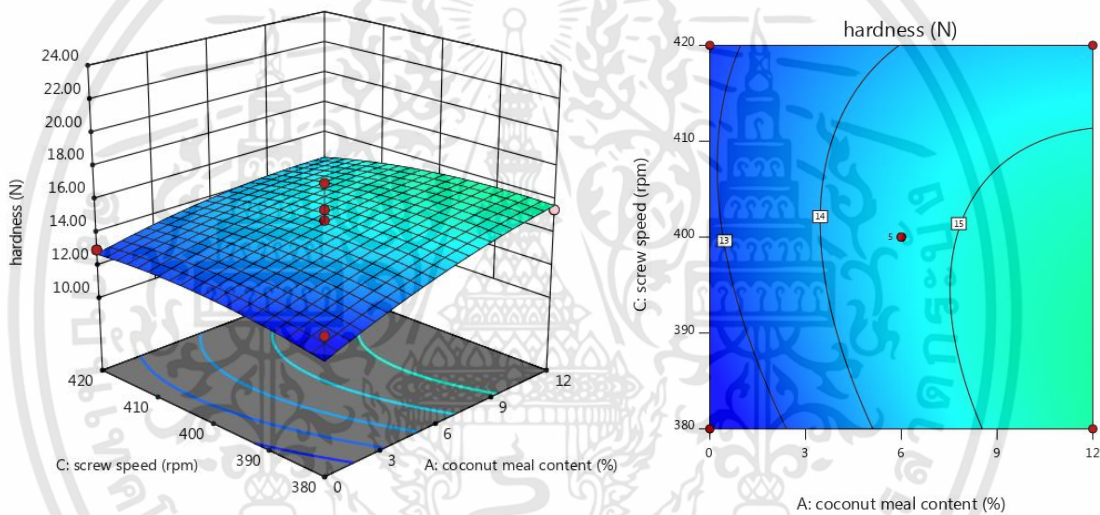


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

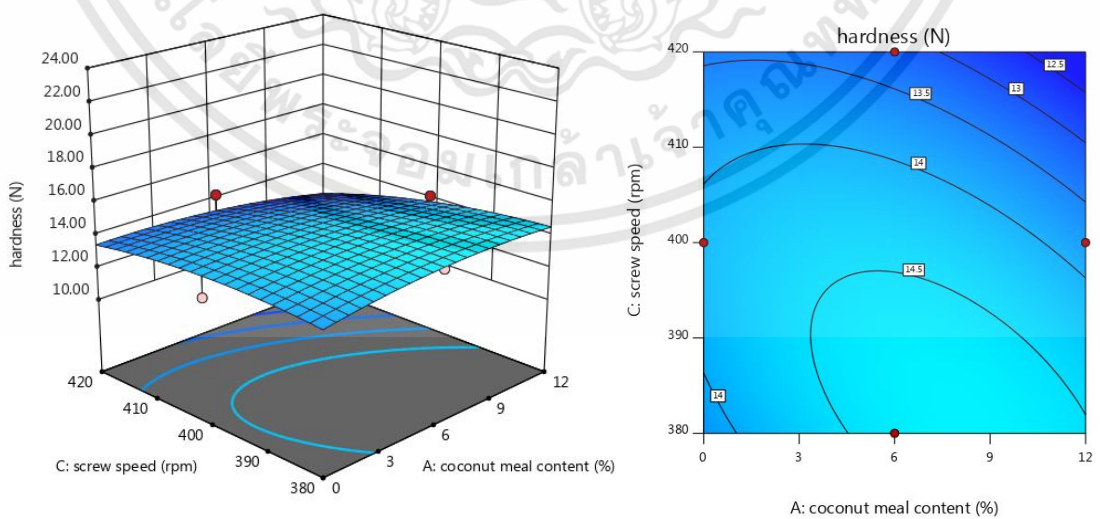
(ก.) ปริมาณข้าวเหนียว 5 %



(ข.) ปริมาณข้าวเหนียว 10 %



(ค.) ปริมาณข้าวเหนียว 15 %



รูปที่ 4.9 ภาพพื้นผิวตอบสนองและพล็อตโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองของความแข็งที่ปริมาณข้าวเหนียว (ก.) 5 % (ข.) 10 % และ (ค.) 15 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

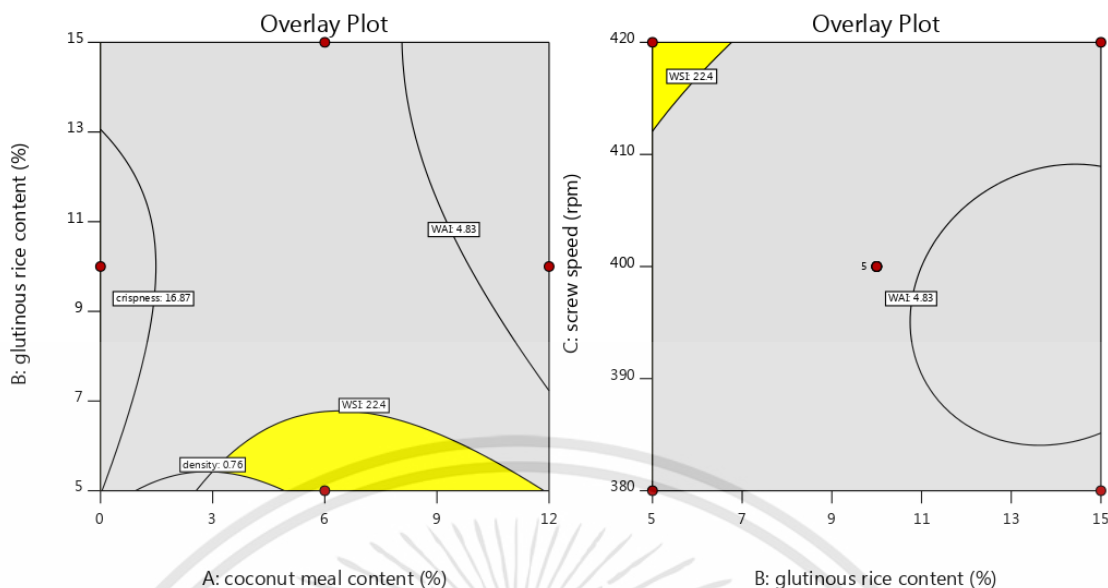
4.3 สภาพที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต

วิธีการกราฟ (Superimposing Graphical Method) ถูกนำมาใช้ในการหาสภาพที่เหมาะสมในการผลิตผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดท โดยใช้โปรแกรม Design Expert วิธีการดังกล่าวใช้หลักการการนำเส้นกราฟจากสมการทั้งหมดมาซ้อนทับกัน และช่วงสภาพที่เหมาะสมได้จากการกำหนดเกณฑ์คัดเลือกเพื่อให้ได้เอ็กซ์ทราเดทที่มีคุณสมบัติได้มาตรฐาน (Sampaio et al., 2006) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.4 ประกอบด้วย อัตราการพองตัว 1.32-3.69 ความหนาแน่น 0.55-0.76 g/cm³ ดัชนีการดูดซับน้ำ 4.83-10.13 g/g ดัชนีการละลายน้ำ 9.26-22.4 % และความกรอบให้มีค่าสูง ข้อมูลที่ได้นำมาใช้เป็นขอบเขตในการคัดเลือกสภาพที่เหมาะสมซึ่งแสดงไว้ในพื้นที่สีเหลือง ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งพบว่าช่วงของสภาพที่เหมาะสมในการผลิตเอ็กซ์ทราเดทจากข้าวเสริมใยอาหารจากกากมะพร้าวคือ ปริมาณกากมะพร้าว 2.99-11.82 % ปริมาณข้าวเหนียว 5-6.78 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราเดอร์ 412.09-420 rpm

ตารางที่ 4.4 เกณฑ์การคัดเลือกผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดทในการหาสภาพที่เหมาะสม

คุณสมบัติ	เกณฑ์
ER	1.32 - 3.69
ρ	0.55 - 0.76 g/cm ³
WAI	4.83 - 10.13 g/g
WSI	9.26 - 22.4 %
Crispness	สูงสุด

ที่มา : Khan et al. (2015); Arivalagan et al. (2018)



รูปที่ 4.10 ช่วงของสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากข้าวเสริมใยอาหารจากกากมะพร้าว

4.4 การยอมรับทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสต่อผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ผลิตในช่วงสภาวะที่เหมาะสมจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่สภาวะต่าง ๆ (แสดงดังตารางที่ 4.5) ถูกนำมาเปรียบเทียบโดยใช้วิธีแบบ Hedonic scaling test ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับใช้วัดลักษณะของผลิตภัณฑ์และการยอมรับผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่ง โดยให้ระดับของความชอบและไม่ชอบผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ระดับสเกลความชอบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ สเกลความชอบ 9 จุด (Nine-point hedonic scale) ผู้ทดสอบสามารถให้ความพอใจของตนโดยการแสดงออกมาในรูประดับของความชอบและไม่ชอบผลิตภัณฑ์จากสเกลที่กำหนด ทำการแปลระดับความรู้สึกของผู้ทดสอบเป็นตัวเลขดังต่อไปนี้ ชอบมากที่สุด (Like extremely) มีคะแนนเป็น 9, ชอบมาก (Like very much) มีคะแนนเป็น 8, ชอบปานกลาง (Like moderately) มีคะแนนเป็น 7, ชอบเล็กน้อย (Like slightly) มีคะแนนเป็น 6, เฉย ๆ (Neither like nor dislike) มีคะแนนเป็น 5, ไม่ชอบเล็กน้อย (Dislike slightly) มีคะแนนเป็น 4, ไม่ชอบปานกลาง (Dislike moderately) มีคะแนนเป็น 3, ไม่ชอบมาก (Dislike very much) มีคะแนนเป็น 2 และไม่ชอบมากที่สุด (Dislike extremely) มีคะแนนเป็น 1 นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติ ผลการทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างเอ็กซ์ทูเดทจากสภาวะการผลิตที่คัดเลือกมาทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส

ตัวอย่างที่	สภาวะการทดลองที่	ปริมาณกากมะพร้าว (%)	ปริมาณข้าวเหนียว (%)	ความเร็วรอบสกรู (rpm)
1	10	6	5	420
2	12	0	5	400
3	14	12	5	400

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสต่อผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทูเดทจากผู้ชิมจำนวน 10 คน

ค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)	ลักษณะปรากฏ	สี				เนื้อสัมผัส	ความชอบรวม
		สี	รสชาติ	กลิ่นรส	เนื้อสัมผัส		
ตัวอย่างที่ 1 (1.40)	6.20 ^a (1.40)	6.40 ^a (1.17)	5.60 ^a (0.97)	6.70 ^a (1.42)	4.40 ^a (1.43)	6.10 ^{ab} (1.10)	
ตัวอย่างที่ 2 (1.16)	6.70 ^a (1.16)	6.80 ^a (1.14)	6.20 ^a (0.79)	6.00 ^a (1.05)	6.20 ^b (1.48)	6.80 ^b (0.63)	
ตัวอย่างที่ 3 (1.25)	6.00 ^a (1.25)	6.70 ^a (1.16)	5.60 ^a (0.97)	6.00 ^a (0.82)	4.80 ^a (1.48)	5.70 ^a (1.06)	

จากการทดสอบ พบว่าผู้ทดสอบชอบลักษณะปรากฏและสีเล็กน้อย คะแนนสูงสุดเท่ากับ 6.70 และ 6.80 ตามลำดับ ได้มาจากตัวอย่างที่ 2 สภาวะการทดลองที่ 12 คือ ปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทูเดเตอร์ 400 rpm ซึ่งทั้ง 3 ตัวอย่างนี้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

นอกจากนั้นการยอมรับด้านรสชาติ พบว่าผู้ทดสอบรู้สึกเฉย ๆ และชอบเล็กน้อย คะแนนสูงสุดเท่ากับ 6.20 ได้มาจากตัวอย่างที่ 2 สภาวะการทดลองที่ 12 คือ ปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทูเดเตอร์ 400 rpm ซึ่งทั้ง 3 ตัวอย่างนี้ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

ส่วนคะแนนด้านกลิ่นรสของตัวอย่างที่ 1 มีคะแนนสูงสุดเท่ากับ 6.70 ได้มาจากสภาวะการทดลองที่ 10 คือ ปริมาณกากมะพร้าว 6 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทูเดเตอร์ 420 rpm แต่อย่างไรก็ตามคะแนนกลิ่นรสที่ได้จากทั้ง 3 ตัวอย่างนั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$)

สำหรับการยอมรับด้านเนื้อสัมผัส พบว่าตัวอย่างที่ 3 มีคะแนนสูงสุดเท่ากับ 6.20 ได้มาจากสภาวะการทดลองที่ 12 คือ ปริมาณกากมะพร้าว 0 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วรอบสกรู

รูปของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ 400 rpm อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ 1 และ 3 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่แตกต่างจากตัวอย่างที่ 2 อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

และความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเตอร์ พบว่าตัวอย่างที่ 2 มีคะแนนสูงสุดเท่ากับ 6.80 ได้มาจากสภาวะการทดลองที่ 12 คือ ปริมาณกากมะพร้าว 0 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ 400 rpm ส่วนตัวอย่างที่ 3 มีคะแนนความชอบโดยรวมต่ำสุด ได้มาจากสภาวะการทดลองที่ 14 คือ ปริมาณกากมะพร้าว 12 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ 400 rpm อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ 1 ไม่มีความแตกต่างกับตัวอย่างที่ 2 และ 3 อย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่ตัวอย่างที่ 2 และ 3 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของปัจจัยของกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ประกอบด้วย ปริมาณกากมะพร้าวและปริมาณข้าวเหนียวในวัตถุดิบผสม และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ที่มีต่อคุณสมบัติทางเคมีกายของเอ็กซ์ทรูเดท คือ ความชื้น ค่า water activity อัตราการพองตัว ความหนาแน่น ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายน้ำ และลักษณะเนื้อสัมผัส เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้มีปริมาณใยอาหารอยู่ในช่วง 0.34-2.84% ความชื้นคือ 6.76-8.27 % ค่า a_w คือ 0.22-0.36 อัตราการพองตัวคือ 2.30-2.78 ความหนาแน่นคือ 0.55-0.76 g/cm^3 ดัชนีการดูดซับน้ำคือ 4.24-5.50 g/g ดัชนีการละลายน้ำคือ 21.51-33.37 % ความกรอบคือ 16.87-27.73 $kg.sec$ และความแข็งคือ 12.38-22.07 N

เมื่อเพิ่มปริมาณกากมะพร้าวส่งผลให้อัตราการพองตัว ความหนาแน่น และดัชนีการดูดซับน้ำมีค่าลดลง ในขณะที่ความชื้น ค่า water activity ดัชนีการละลายน้ำ ความกรอบ และความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณข้าวเหนียวส่งผลให้ความชื้น ค่า water activity ความหนาแน่น ดัชนีการดูดซับน้ำ ความกรอบ และความแข็งมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราการพองตัวและดัชนีการละลายน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ส่งผลให้อัตราการพองตัว ความหนาแน่น ดัชนีการละลายน้ำ ความกรอบ และความแข็งมีค่าลดลง ในขณะที่ความชื้น ค่า water activity และดัชนีการดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น

จากสมการถดถอยแสดงให้เห็นว่าอัตราการพองตัว ความหนาแน่น ดัชนีการดูดซับน้ำ ดัชนีการละลายน้ำ และความกรอบ มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนความชื้น ค่า water activity และความแข็งนั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และพบว่าปริมาณกากมะพร้าวเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของเอ็กซ์ทรูเดทมากที่สุดตามด้วยปริมาณข้าวเหนียวและความเร็วยรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองถูกนำมาใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสมของการผลิต และช่วงของสถานะการผลิตที่เหมาะสมคือเมื่อใช้ปริมาณกากมะพร้าว 2.99-11.82 % ปริมาณข้าวเหนียว 5-6.78 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 412.09-420 rpm

และเมื่อนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่อยู่ในช่วงสถานะการผลิตที่เหมาะสมมาทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัส พบว่าการยอมรับด้านลักษณะปรากฏ สี รสชาติ และกลิ่นรสของเอ็กซ์ทรูเดททั้ง 3 ตัวอย่างนั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และพบว่าเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากสถานะการผลิตที่มีปริมาณกากมะพร้าว 0 % ปริมาณข้าวเหนียว 5 % และความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ 400 rpm นั้นมีคะแนนความชอบโดยรวมสูงสุดเท่ากับ 6.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

วัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองควรมาจากแหล่งเดียวกันเพื่อควบคุมปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทดลองแต่อาจส่งผลต่อการทดลองได้ ในระหว่างดำเนินการทดลองทั้งหมดหากมีช่วงระยะเวลาที่ห่างกันในการดำเนินการกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน วัตถุดิบเริ่มต้นที่จะนำมาใช้ในการเตรียมวัตถุดิบผสมควรได้รับการตรวจสอบความชื้นเริ่มต้นอยู่เสมอเพื่อให้ได้ความชื้นเริ่มต้นที่ถูกต้อง และก่อนการนำวัตถุดิบผสมป้อนเข้าสู่กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันควรมีการตรวจสอบความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบผสมเพื่อให้แน่ใจว่าตรงตามความต้องการ ในระหว่างขั้นตอนกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันควรมีการตรวจสอบว่าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มีอัตราการป้อนที่สม่ำเสมอเพื่อให้การดำเนินการเป็นไปอย่างต่อเนื่องและได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทเสริมใยอาหารจากกากมะพร้าว หากมีการพัฒนาหรือปรับปรุงสูตรการผลิตจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่มีคุณลักษณะที่เป็นที่ยอมรับมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- เนตรนภิส วัฒนสุขชาติ, (ผู้รวบรวม). 2550. **ขนมทางเลือกเพื่อสุขภาพ : เทคโนโลยีการผลิตและต้นแบบผลิตภัณฑ์**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด พิมพ์.
- บุญหงส์ จงคิด. 2553. **ข้าวและเทคโนโลยีการผลิต**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ประพาส วีระแพทย์. 2555. **ความรู้เบื้องต้นเรื่องข้าว**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว.
- ปารเมศ ชูติมา. 2545. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมส่งเสริมการเกษตร. 2560. **สถานการณ์การปลูกมะพร้าว ปี 2559**. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.agriinfo.doae.go.th/year60/plant/rotor/perennial/coconut.pdf>.
- สายชล สีนสมบูรณ์ทอง. 2558. **การวางแผนแบบการทดลอง = Experimental designs**. เล่มที่ 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : จามจุรีโปรดักส์.
- Adams, E.L. and Savage, J.S. 2017. "From the Children's Perspective : What are Candy, Snacks, and Meals?." **Appetite**. 116 : 215-222.
- 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. **Association of Official Analytical Chemists, Official Methods of Analysis**. 18th ed. Washington DC.
- Arivalagan, M., Manikantan, M.R., Yasmeen, A.M., Sreejith, S., Balasubramanian, D., Hebbar, K.B. and Kanade, S.R. 2018. "Physiochemical and Nutritional Characterization of Coconut (*Cocos nucifera* L.) Haustorium Based Extrudates." **LWT-Food Science and Technology**. 89 : 171-178.
- Chaiyakul, S., Jangchud, K., Jangchud, A., Wuttijumong, P. and Winger, R. 2009. "Effect of Extrusion Conditions on Physical and Chemical Properties of High Protein Glutinous Rice-based Snack." **LWT-Food Science and Technology**. 42 : 781-787.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Dalbhat, C.G., Mahato, D.K. and Mishra, H.N. 2019. "Effect of Extrusion Processing on Physicochemical, Functional and Nutritional Characteristics of Rice and Rice-based Products : A Review." **Trends in Food Science & Technology.** 85 : 226-240.
- 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.
- Grunert, K.G., Brock, S., Brunsø, K., Christiansen, T., Edelenbos, M., Kastberg, H., Krogager, S.G.S., Mielby, L.H. and Povlsen, K.K. 2016. "Cool snacks : A Cross-disciplinary Approach to Healthier Snacks for Adolescents." **Trends in Food Science & Technology.** 47 : 82-92.
- Guy, R. 2001. **Extrusion cooking.** First Published. England : TJ International.
- Jakubczyk, E., Gondek, E. and Tryzno, E. 2017. "Application of Novel Acoustic Measurement Techniques for Texture Analysis of Co-extruded Snacks." **LWT-Food Science and Technology.** 75 : 582-589.
- Jongsutjarittam, O. and Charoenrein, S. 2014. "The Effect of Moisture Content on Physicochemical Properties of Extruded Waxy and Non-waxy Rice Flour." **Carbohydrate Polymers.** 114 : 133-140.
- Kang, M., Rico, C.W. and Lee, S. 2010. "Physicochemical Properties of Eight Popular Glutinous Rice Varieties in Korea." **Plant Production Science.** 13(2) : 177-184.
- Kee-Ariyo, C., Dangsungwal, N. and Pomchiangpin, S. 2014. **Dietary Fiber Supplement by Coconut Flour from Coconut Wastes Oil Extraction Process in Bakery Product.** Bangkok : Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon.
- Khan, M.A., Mahesh, C., Semwal, A.D. and Sharma, G.K. 2015. "Effect of Virgin Coconut Meal (VCM) on the Development of Rice-based Extruded Snacks." **International Journal of Advanced Research.** 3(10) : 717-725.
- Khuwijitjaru, P., Watsanit, K. and Adachi, S. 2012. "Carbohydrate Content and Composition of Product from Subcritical Water Treatment of Coconut Meal." **Journal of Industrial and Engineering Chemistry.** 18 : 225-229.

- Koch, L., Emin, M.A. and Schuchmann, H.P. 2017. "Influence of Processing Conditions on the Formation of Whey Protein-citrus Pectin Conjugates in Extrusion." **Journal of Food Engineering**. 193 : 1-9.
- Kukusamude, C. and Kongsri, S. 2018. "Elemental and Isotopic Profiling of Thai Jasmine Rice (Khao Dawk Mali 105) for Discrimination of Geographical Origins in Thung Kula Rong Hai Area, Thailand." **Food Control**. 91 : 357-364.
- Lazou, A. and Krokida, M. 2010. "Structural and Textural Characterization of Corn-lentil Extruded Snacks." **Journal of Food Engineering**. 100 : 392-408.
- Leszek, M. 2011. **Extrusion-Cooking Techniques : Applications, Theory and Sustainability**. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Lusas, E.W. and Rooney, L.W. 2001. **Snack Foods Processing**. United States of America : Technomic Publishing Company.
- Mans, J. 1982. "Extruder." **Prep. Foods**. 11 : 60-63.
- Martynenko, A. 2014. "True, Particle, and Bulk Density of Shrinkable Biomaterials : Evaluation from Drying Experiments." **Drying Technology**. 32 : 1319-1325.
- Maskan, M. and Altan, A. 2012. **Advances in Food Extrusion Technology**. United States of America : Taylor & Francis Group.
- Mats, S.A. 1984. **Snack Food Technology**. 2nd ed. Connecticut : Ltd. Westport.
- Mikko Mäkelä. 2017. "Experimental Design and Response Surface Methodology in Energy Applications : A Tutorial Review." **Energy Conversion and Management**. 151 : 630-640.
- Morales, P., Cebadera-Miranda, L., Cámara, R.M., Reis, F.S., Barros, L., Berrios, J.D.J., Ferreira, I.C.F.R. and Cámara, M. 2015. "Lentil Flour Formulations to Develop New Snack-type Products by Extrusion Processing : Phytochemicals and Antioxidant Capacity." **Journal of Functional Foods**. 19 : 537-544.
- Nascimento, T.A., Calado, V. and Carvalho, C.W.P. 2017. "Effect of Brewer's Spent Grain and Temperature on Physical Properties of Expanded Extrudates from Rice." **LWT-Food Science and Technology**. 79 : 145-151.
- Okafor, G.I. and Ugwu, F.C. 2014. "Production and Evaluation of Cold Extruded and Baked Ready-to-eat Snacks from Blends of Breadfruit (*Treculia africana*), Cashewnut (*Anacardium occidentale*) and Coconut (*Cocos nucifera*)." **Food Science and Quality Management**. 23 : 65-77.

- Paixão, L.B., Brandão, G.C., Araujo, R.G.O. and Korn, M.G.A. 2019. "Assessment of Cadmium and lead in Commercial Coconut Water and Industrialized Coconut Milk Employing HR-CS GF AAS." **Food Chemistry**. 284 : 259-263.
- Pardhi, S.D., Singh, B., Singh, G.A. and Singh, B.N. 2019. "Evaluation of Functional Properties of Extruded Snacks Developed from Brown Rice Grits by Using Response Surface Methodology." **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. 18 : 7-16.
- Philipp, C., Oey, I., Silcock, P., Beck, S.M. and Buckow, R. 2017. "Impact of Protein Content on Physical and Microstructural Properties of Extruded Rice Starch-pea Protein Snacks." **Journal of Food Engineering**. 212 : 165-173.
- Phoeurk, C., Somana, J., Sornwatana, T., Udompaisarn, S., Traewachiwiphak, S., Sirichaiyakul, P., Phongsak, T. and Arthan, D. 2018. "Three Novel Mutations in α -galactosidase Gene Involving in Galactomannan Degradation in Endosperm of Curd Coconut." **Phytochemistry**. 156 : 33-42.
- 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.
- Qin, Y., Liu, C., Jiang, S., Cao, J., Xiong, L. and Sun, Q. 2016. "Functional Properties of Glutinous Rice Flour by Dry-Heat Treatment." **PLoS ONE**. 11(8) : 1-16.
- Raghavendra, S.N., Swamy, S.R.R., Rastogi, N.K., Raghavarao, K.S.M.S., Kumar, S. and Tharanathan, R.N. 2006. "Grinding Characteristics and Hydration Properties of Coconut Residue : A Source of Dietary Fiber." **Journal of Food Engineering**. 72 : 281-286.
- Rajesh, G.K., Thirupathi, V., Nambi, V.E. and Pandiselvam R. 2014. "Optimization of Extrusion Cooking Process for Rice-fish Extrudates with an Underutilized Fish Mince Based on Physical, Functional and Textural Properties." **Scientific Journal Agricultural Engineering**. 2 : 9-21.
- Rathod, R.P. and Annapure, U.S. 2016. "Effect of Extrusion Process on Antinutritional Factors and Protein and Starch Digestibility of Lentil Splits." **LWT-Food Science and Technology**. 66 : 114-123.

- Ravindran, G., Carr, A. and Hardacre, A. 2011. "A Comparative Study of the Effects of Three Galactomannans on the Functionality of Extruded Pea-rice Blends." **Food Chemistry**. 124 : 1620-1626.
- Riaz, M.N. 2003. **Extruders Basics**. In **Petfood Technology**. USA : Mt. Morris, IL.
- Riaz, M.N. 2007. **Extruders and Expanders in Pet Food, Aquatic and Livestock Feeds**. Germany : Agrimedia GmbH.
- Riaz, M. and Rokey, G.J. 2013. "Food Extrusion." **Food Technol**. 27 : 46-53.
- Rodsamran, P. and Sothornvit, R. 2018. "Bioactive Coconut Protein Concentrate Films Incorporated with Antioxidant Extract of Mature Coconut Water." **Food Hydrocolloids**. 79 : 243-252.
- Rossen, J.L. and Miller, R.C. 1973. "Food Extrusion." **Food Technol**. 27 : 46-53.
- Sampaio, F.C., Faveri, D.D., Mantovani, H.C., Passos, F.M.L., Perego, P. and Converti, A. 2006. "Use of Response Surface Methodology for Optimization of Xylitol Production by the New Yeast Strain *Debaryomyces hansenii* UFV-170." **Journal of Food Engineering**. 76 : 376-386.
- Selani, M.M., Guidolin, S., Brazaca, C., Dias, C.T.S., Ratnayake, W.S., Flores, R.A. and Bianchini, A. 2014. "Characterisation and Potential Application of Pineapple Pomace in an Extruded Product for Fibre Enhancement." **Food Chemistry**. 163 : 23-30.
- Setyawati, Y.D., Ahsan, S.F., Ong, L.K., Soetaredjo, F.E. and Ismadji, S. 2016. "Production of Glutinous Rice Flour from Broken Rice via Ultrasonic Assisted Extraction of Amylose." **Food Chemistry**. 203 : 158-164.
- Sombunjitt, S., Sriwongchai, T., Kuleung, C. and Hongtrakul, V. 2017. "Searching for and Analysis of Bacterial Blight Resistance Genes from Thailand Rice Germplasm." **Agriculture and Natural Resources**. 51 : 365-375.
- Taylor, B.J., Quinn, A.R. and Kataoka, A. 2019. "*Listeria monocytogenes* in Low-moisture Foods and Ingredients." **Food Control**. 103 : 153-160.
- Thongsook, T. and Chaijamrus, S. 2013. **Studies on Modifications of Copra Meal for Utilization as Fiber Supplements in Food Products**. Bangkok : Office of the Higher Education Commission.
- Thushari, I. and Babel, S. 2018. "Sustainable Utilization of Waste Palm Oil and Sulfonated Carbon Catalyst Derived from Coconut Meal Residue for Biodiesel Production." **Bioresource Technology**. 248 : 199-203.

- Trinidad, T.P., Mallillin, A.C., Valdez, D.H., Loyola, A.S., Askali-Mercado, F.C., Castillo, J.C., Encabo, R.R., Masa, D.B., Maglaya, A.S. and Chua, M.T. 2006. "Dietary Fiber from Coconut Flour : A Functional Food." **Innovative Food Science and Emerging Technologies**. 7 : 309-317.
- Wang, H., Xiao, N., Wang, X., Zhao, X. and Zhang, H. 2019. "Effect of Pregelatinized Starch on the Characteristics, Microstructures, and Quality Attributes of Glutinous Rice flour and Dumplings." **Food Chemistry**. 283 : 248-256.
- Wani, S.A. and Kumar, P. 2016. "Development and Parameter Optimization of Health Promising Extrudate Based on Fenugreek Oat and Pea." **Food Bioscience**. 14 : 34-40.
- Wolz, M., Kastenhuber, S. and Kulozik, U. 2016. "High Moisture Extrusion for Microparticulation of Whey Proteins - Influence of Process Parameters." **Journal of Food Engineering**. 185 : 56-61.
- Yalegama, L.L.W.C., Karunaratne, D.N., Sivakanesan, R. and Jayasekara, C. 2013. "Chemical and Functional Properties of Fibre Concentrates Obtained from By-products of Coconut Kernel." **Food Chemistry**. 141 : 124-130.
- Zhang, Y., Chen, C., Chen, Y. and Chen, Y. 2019. "Effect of Rice Protein on the Water Mobility, Water Migration and Microstructure of Rice Starch During Retrogradation." **Food Hydrocolloids**. 91 : 136-142.
- Zheng, Y., Wang, Q., Huang, J., Fang, D., Zhuang, W., Luo, X., Zou, X., Zheng, B. and Cao, H. 2019. "Hypoglycemic Effect of Dietary Fibers from Bamboo Shoot Shell : An *In Vitro* and *In Vivo* Study." **Food and Chemical Toxicology**. 127 : 120-126.



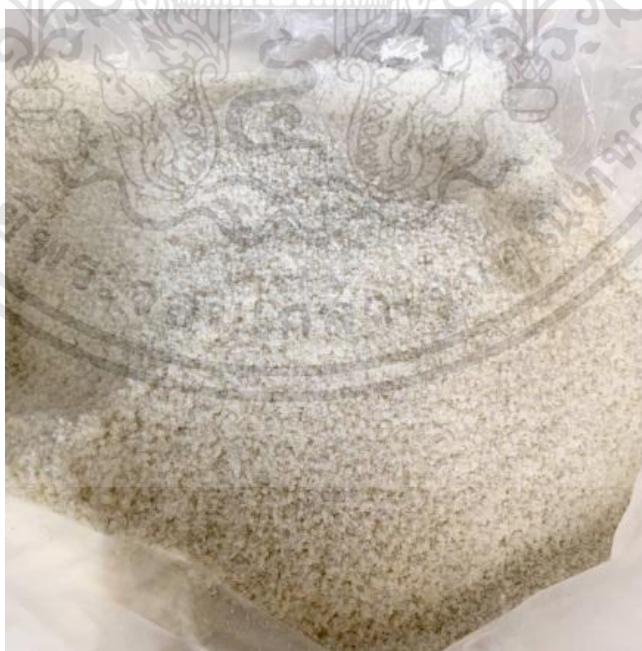
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วัตถุดิบ

1.1 กากมะพร้าว

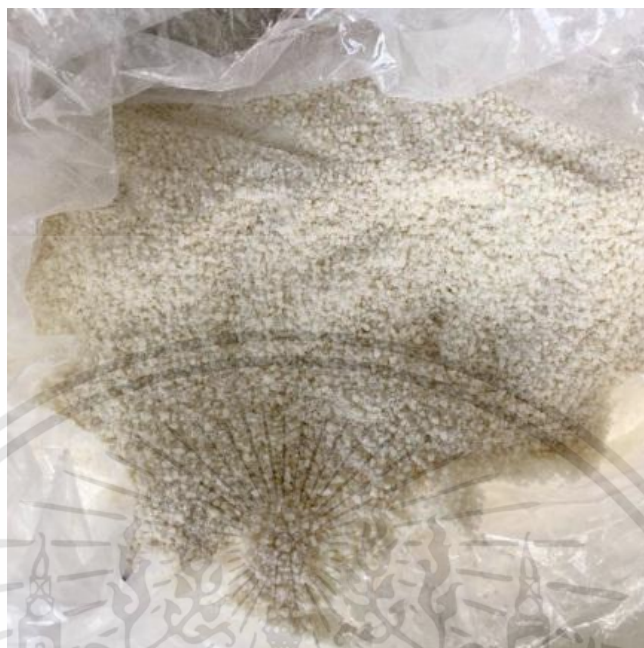


1.2 ปลายข้าวเจ้า



1.3 ปลายข้าวเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

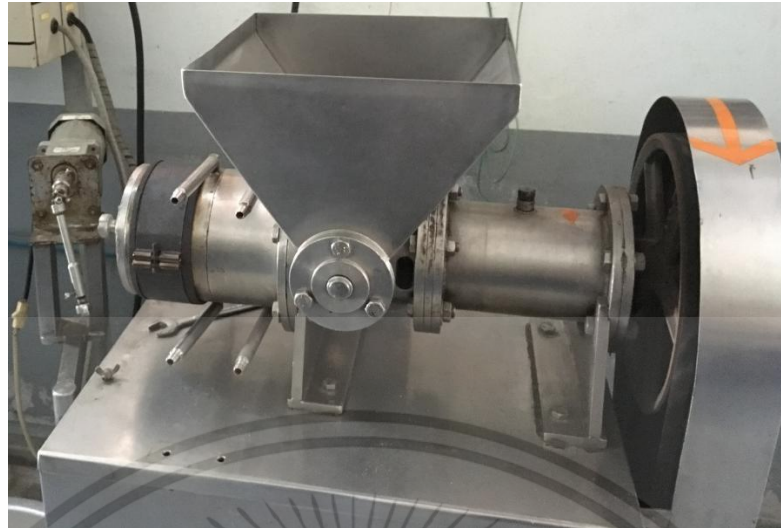


2. เครื่องมือ

2.1 เครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.1.1 สกรู



2.2.2 หน้าแปลน (Die)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 เครื่องบดแบบซ้อนเหวี่ยง (Hammer mill)

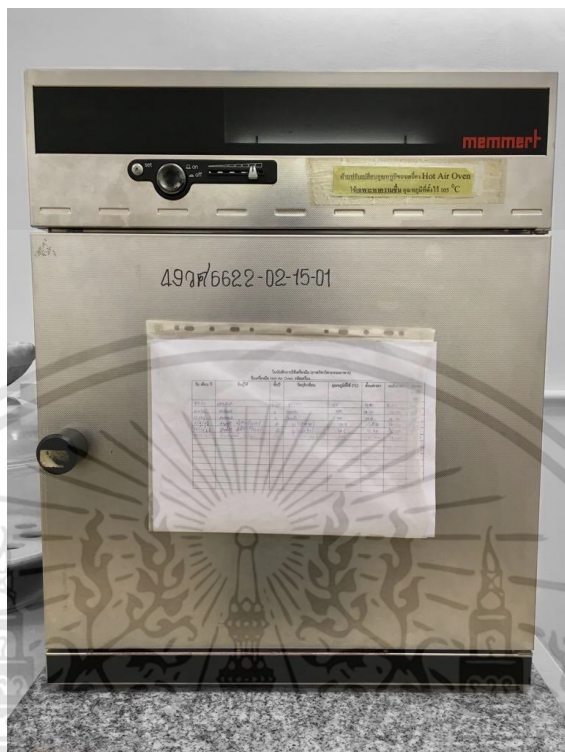


2.2.1 ตะแกรง ขนาดเบอร์ 2

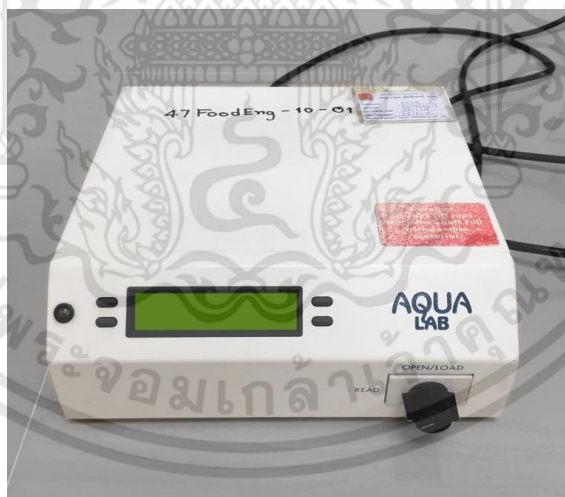


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)



2.4 Water activity meter



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 Vernier caliper

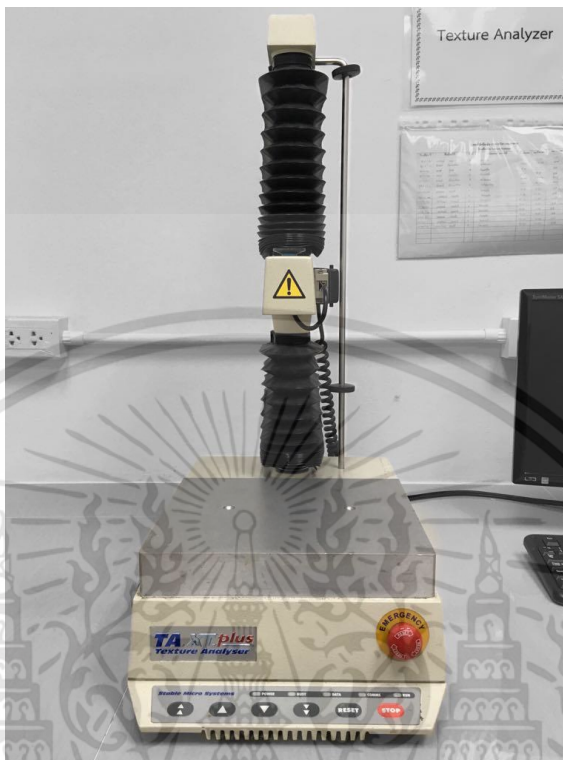


2.6 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer)



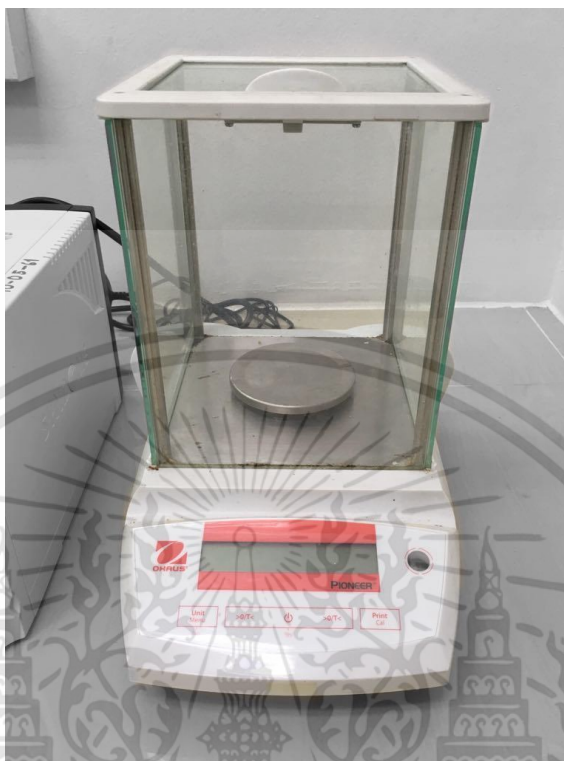
2.7.1 หัววัด ทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร



ที่มา : <https://texturetechnologies.com/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความชื้น

Fit Statistic

Standard Error	0.2969
Mean	7.28
C.V. %	4.08
R ²	0.7390
Adjusted R ²	0.4034

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	1.75	9	0.1941	2.20	0.1553
X ₁	0.0289	1	0.0289	0.3281	0.5847
X ₂	0.3068	1	0.3068	3.48	0.1044
X ₃	0.0063	1	0.0063	0.0713	0.7971
(X ₁) ²	0.2593	1	0.2593	2.94	0.1301
(X ₂) ²	0.2739	1	0.2739	3.11	0.1213
(X ₃) ²	0.3474	1	0.3474	3.94	0.0875
(X ₁)(X ₂)	0.3116	1	0.3116	3.53	0.1021
(X ₁)(X ₃)	0.2332	1	0.2332	2.65	0.1479
(X ₂)(X ₃)	0.0033	1	0.0033	0.0370	0.8529
Lack of Fit	0.6149	3	0.2050	373.33	< 0.0001

เมื่อ X₁ คือ ปริมาณกากมะพร้าว X₂ คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X₃ คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

2. ค่า Water activity (a_w)

Fit Statistic

Standard Error	0.0272
Mean	0.2700
C.V. %	10.09
R^2	0.7349
Adjusted R^2	0.3942

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	0.0144	9	0.0016	2.16	0.1617
X_1	0.0050	1	0.0050	6.74	0.0357
X_2	0.0021	1	0.0021	2.85	0.1354
X_3	0.0000	1	0.0000	0.0168	0.9004
$(X_1)^2$	0.0005	1	0.0005	0.6255	0.4550
$(X_2)^2$	0.0020	1	0.0020	2.75	0.1415
$(X_3)^2$	0.0000	1	0.0000	0.0511	0.8277
$(X_1)(X_2)$	0.0042	1	0.0042	5.69	0.0485
$(X_1)(X_3)$	0.0006	1	0.0006	0.8422	0.3893
$(X_2)(X_3)$	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000
Lack of Fit	0.0049	3	0.0016	20.31	0.0070

เมื่อ X_1 คือ ปริมาณกากมะพร้าว X_2 คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X_3 คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

3. อัตราการพองตัว

Fit Statistic

Standard Error	0.0633
Mean	2.58
C.V. %	2.46
R ²	0.9037
Adjusted R ²	0.7800

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	0.2638	9	0.0293	7.30	0.0079
X ₁	0.1664	1	0.1664	41.48	0.0004
X ₂	0.0027	1	0.0027	0.6765	0.4379
X ₃	0.0115	1	0.0115	2.88	0.1336
(X ₁) ²	0.0157	1	0.0157	3.91	0.0885
(X ₂) ²	0.0198	1	0.0198	4.94	0.0616
(X ₃) ²	0.0013	1	0.0013	0.3117	0.9940
(X ₁)(X ₂)	0.0005	1	0.0005	0.1175	0.7419
(X ₁)(X ₃)	0.0258	1	0.0258	6.42	0.0390
(X ₂)(X ₃)	0.0189	1	0.0189	4.71	0.0666
Lack of Fit	0.0044	3	0.0015	0.2499	0.8581

เมื่อ X₁ คือ ปริมาณกากมะพร้าว X₂ คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X₃ คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

4. ความหนาแน่น

Fit Statistic

Standard Error	0.0228
Mean	0.6852
C.V. %	3.33
R ²	0.9326
Adjusted R ²	0.8460

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	0.0505	9	0.0056	10.77	0.0025
X ₁	0.0277	1	0.0277	53.20	0.0002
X ₂	0.0057	1	0.0057	10.97	0.0129
X ₃	0.0000	1	0.0000	0.0457	0.8369
(X ₁) ²	0.0125	1	0.0125	23.96	0.0018
(X ₂) ²	0.0026	1	0.0026	5.00	0.0603
(X ₃) ²	0.0001	1	0.0001	0.2162	0.6561
(X ₁)(X ₂)	0.0013	1	0.0013	2.48	0.1592
(X ₁)(X ₃)	0.0009	1	0.0009	1.70	0.2340
(X ₂)(X ₃)	0.0001	1	0.0001	0.2327	0.6442
Lack of Fit	0.0019	3	0.0006	1.39	0.3683

เมื่อ X₁ คือ ปริมาณกากมะพร้าว X₂ คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X₃ คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

5. ดัชนีการดูดซับน้ำ (WAI)

Fit Statistic

Standard Error	0.0353
Mean	4.90
C.V. %	0.7205
R ²	0.9941
Adjusted R ²	0.9864

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	1.46	9	0.1626	130.35	< 0.0001
X ₁	0.6772	1	0.6772	542.72	< 0.0001
X ₂	0.3874	1	0.3874	310.48	< 0.0001
X ₃	0.0471	1	0.0471	37.76	0.0005
(X ₁) ²	0.1808	1	0.1808	144.93	< 0.0001
(X ₂) ²	0.0745	1	0.0745	59.67	0.0001
(X ₃) ²	0.0896	1	0.0896	71.81	< 0.0001
(X ₁)(X ₂)	0.0172	1	0.0172	13.82	0.0075
(X ₁)(X ₃)	0.0015	1	0.0015	1.17	0.3154
(X ₂)(X ₃)	0.0045	1	0.0045	3.61	0.0993
Lack of Fit	0.0040	3	0.0013	1.10	0.4450

เมื่อ X₁ คือ ปริมาณกากมะพร้าว X₂ คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X₃ คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

6. ดัชนีการละลายน้ำ (WSI)

Fit Statistic

Standard Error	0.6224
Mean	26.34
C.V. %	2.36
R ²	0.9695
Adjusted R ²	0.9302

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	86.06	9	9.56	24.68	0.0002
X ₁	5.51	1	5.51	14.21	0.0070
X ₂	36.01	1	36.01	92.95	< 0.0001
X ₃	1.80	1	1.80	4.64	0.0682
(X ₁) ²	21.53	1	21.53	55.57	0.0001
(X ₂) ²	1.38	1	1.38	3.56	0.1011
(X ₃) ²	7.91	1	7.91	20.41	0.0027
(X ₁)(X ₂)	12.37	1	12.37	31.93	0.0008
(X ₁)(X ₃)	0.0011	1	0.0011	0.0029	0.9585
(X ₂)(X ₃)	1.08	1	1.08	2.80	0.1383
Lack of Fit	2.66	3	0.8853	63.33	0.0008

เมื่อ X₁ คือ ปริมาณกากมะพร้าว X₂ คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X₃ คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

7. ความกรอบ (Crispness)

Fit Statistic

Standard Error	1.26
Mean	20.28
C.V. %	6.21
R ²	0.8775
Adjusted R ²	0.7199

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	79.53	9	8.84	5.57	0.0169
X ₁	16.31	1	16.31	10.28	0.0149
X ₂	14.17	1	14.17	8.93	0.0203
X ₃	0.7620	1	0.7620	0.4803	0.5106
(X ₁) ²	4.10	1	4.10	2.58	0.1521
(X ₂) ²	8.79	1	8.79	5.54	0.0508
(X ₃) ²	11.81	1	11.81	7.44	0.0294
(X ₁)(X ₂)	22.68	1	22.68	14.29	0.0069
(X ₁)(X ₃)	0.9428	1	0.9428	0.5943	0.4660
(X ₂)(X ₃)	0.8529	1	0.8529	0.5376	0.4873
Lack of Fit	9.61	3	3.20	8.55	0.0325

เมื่อ X₁ คือ ปริมาณกากมะพร้าว X₂ คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X₃ คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

8. ความแข็ง (Hardness)

Fit Statistic

Standard Error	1.80
Mean	15.02
C.V. %	11.99
R ²	0.7605
Adjusted R ²	0.4526

ANOVA for Quadratic model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	72.09	9	8.01	2.47	0.1232
X ₁	14.53	1	14.53	4.48	0.0721
X ₂	31.74	1	31.74	9.79	0.0166
X ₃	0.1560	1	0.1560	0.0481	0.8327
(X ₁) ²	0.8753	1	0.8753	0.2699	0.6194
(X ₂) ²	12.81	1	12.81	3.95	0.0872
(X ₃) ²	1.05	1	1.05	0.3246	0.5867
(X ₁)(X ₂)	9.08	1	9.08	2.80	0.1382
(X ₁)(X ₃)	1.11	1	1.11	0.3422	0.5769
(X ₂)(X ₃)	1.33	1	1.33	0.4088	0.5429
Lack of Fit	9.78	3	3.26	1.01	0.4758

เมื่อ X₁ คือ ปริมาณกากมะพร้าว X₂ คือ ปริมาณข้าวเหนียว และ X₃ คือ ความเร็วรอบสกรูของเครื่องเอ็กซ์ทูเดอร์



ภาคผนวก ค

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





การประชุมวิชาการ
สมาคมวิศวกรรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
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 TSAE International Conference
14-15 March 2019 at Hard Rock Hotel, Pattaya, Thailand

Effect of Extrusion Conditions on the Physical Properties of Coconut Rice-based Extrudates

Kanittha Dumchaiyapoom¹, Pimkhuan Hannanta-anan¹, Maradee Phongpipatpong^{1,*}

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

Abstract. Coconut meal is a by-product of coconut oil and coconut milk production. It is a rich source of dietary fiber which shows to have an important role in lowering the risk of various chronic diseases. Therefore, it is interesting to convert the coconut meal, previously recognized as a valueless by-product, into a nutritious food product. The aim of this work is to investigate the possibility of such conversion using a widely known extrusion method. The effect of extrusion variables, including the coconut meal content (0, 6, and 12%), glutinous rice content (5, 10 and 15%) and screw speed of extruder (380, 400 and 420 rpm) were investigated on the properties of extruded products. Physical properties of the extrudates such as expansion ratio, density, water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), crispness and moisture content were evaluated. Our study showed that the extrudates had expansion ratio of 2.30-2.78%, density of 0.55-0.76 g/cm³, WAI of 4.24-5.50 g/g, WSI of 21.51-33.37%, crispness of 16.87-27.73 kg.sec and moisture content of 6.76-8.27%. The regression models for true density, expansion ratio, crispness, WAI and WSI were derived and statistically significant ($p < 0.05$).

Keywords: Coconut meal; Extrusion; Rice-based extruded

1 Introduction

Extrusion is an important process used to produce and develop a variety of foods e.g. breakfast cereals, baby foods, snacks, meat and cheese analogues, and modified starches etc. [1]. Its advantages over other processes are convenient, versatility, and ability to customize the products into various shape, texture and sensory characteristics [2]. During extrusion process, the raw materials undergo high temperature, high pressure, and accelerated structural transformation that will maintain the flavour as high quality products [3].

Broken rice is a co-product that obtained during the processing stages of rice dehulling. It has unique properties such as mild flavour, white or neutral colour, hypoallergenicity, and easy digestibility, it is suitable to be supplemented by various nutrients [4]. Chaiyakul *et al.* (2009) report the study of the effects of rice and glutinous rice in making potato chips products from the extrusion process. The study found that the products that contained glutinous-rice as ingredient have a better texture, while products without glutinous-rice contained have too hard texture [5].

Coconut meal is a rich source of dietary fiber (76.4%). It is a by-product of coconut processing processes such as coconut oil extraction and coconut milk production [6]. Khuwijitjaru *et al.* (2012) report that 10 g of coconut meal obtained from 100 g of coconut milk production. In Thailand, there was coconut milk production around 36,000 tons every year. Therefore, coconut meal was produced approximately 3,600 tons each year [7]. Dietary fiber has been shown to have important health implications in the prevention of the risk of chronic diseases such as cancer, cardiovascular diseases and diabetes mellitus. It also helps control weight increase [8]. Studies using dietary fiber as ingredients in various foods such as biscuits,

confectionery, drinks, sauces, desserts and yogurt, found that dietary fiber acts as bulking agent and reducing agent of the calorie content [9]. Therefore, the use of coconut meal in the food industry for the production of healthy food is an alternative way to add nutritional value to food products.

There were many studies on rice-based snack extensively while only a few of rice-based extruded enrich with coconut meal has been done. Hence, the aim of this work was to study the effects of extrusion conditions on physical properties of coconut rice-based extrudates.

2 Materials and Methods

Broken jasmine rice and glutinous rice were purchased from local market (Chang Siam, Thailand) and coconut meal was obtained from Asiatic Agro Industry Co., Ltd. Broken jasmine rice and glutinous rice were milled by hammer mill.

2.1 Preparation of blends

Blends for the extrusion process were prepared by varying coconut meal content (0, 6 and 12%) and glutinous rice content (5, 10 and 15%), while moisture content was set constant at 16% for all experiments.

2.2 Extrusion process

A single screw extruder was used for all experiments. The L/D (length: diameter) of screw was 9:1, diameter of die was 3.8 mm and temperature of extruder was set at 100°C. The screw speed of the extruder was studied at 380, 400 and 420 rpm. The extrudates were collected and dried in tray dryer at 80°C for 10 min.

2.3 Properties analysis

2.3.1 Expansion ratio

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

Table 1. Box Behnken design with process variables and experimental results of extruded products.

Exp. no.	Coconut meal content (%)	Glutinous rice content (%)	Screw speed (rpm)	ER (%)	ρ (g/cm ³)	WAI (g/g)	WSI (%)	Crispness (kg.sec)	Moisture content (%)
1	12	10	380	2.55±0.07	0.61±0.00	4.42±0.02	27.97±0.71	18.54±3.63	7.75±0.04
2	0	15	400	2.66±0.05	0.71±0.01	4.95±0.03	27.60±0.12	19.65±3.08	7.27±0.04
3	6	10	400	2.73±0.07	0.67±0.01	4.82±0.00	26.37±0.49	21.04±2.90	7.15±0.02
4	6	15	420	2.62±0.12	0.71±0.00	4.95±0.02	25.84±0.53	18.90±3.31	7.69±0.03
5	6	10	400	2.54±0.08	0.70±0.01	4.84±0.01	26.21±0.37	21.25±6.47	7.14±0.02
6	6	10	400	2.61±0.08	0.71±0.01	4.89±0.06	26.11±0.23	20.14±3.30	7.11±0.07
7	6	10	400	2.58±0.06	0.72±0.01	4.90±0.03	26.06±0.47	20.29±7.98	7.17±0.04
8	0	10	380	2.71±0.04	0.71±0.02	5.05±0.02	26.94±0.52	17.44±3.61	7.09±0.04
9	6	15	380	2.54±0.09	0.69±0.01	4.86±0.07	25.94±0.86	21.46±3.55	7.16±0.07
10	6	5	420	2.48±0.08	0.76±0.01	5.51±0.03	21.51±0.72	20.71±7.57	8.27±0.03
11	6	5	380	2.68±0.09	0.73±0.00	5.27±0.02	23.71±0.41	21.42±4.55	7.62±0.02
12	0	5	400	2.61±0.07	0.74±0.01	5.22±0.05	25.91±0.19	19.33±4.63	6.97±0.02
13	12	10	420	2.30±0.04	0.55±0.00	4.61±0.02	27.26±0.37	19.91±3.90	6.79±0.06
14	12	5	400	2.33±0.11	0.67±0.00	4.77±0.12	24.65±0.68	27.73±7.20	7.59±0.03
15	12	15	400	2.42±0.04	0.57±0.01	4.24±0.03	33.37±0.87	18.53±2.96	6.76±0.15
16	0	10	420	2.78±0.09	0.71±0.01	5.15±0.02	26.16±0.51	16.87±2.98	7.09±0.05
17	6	10	400	2.69±0.05	0.72±0.00	4.90±0.09	26.21±0.13	21.55±4.57	7.13±0.04

The expansion ratio (ER) was calculated as the ratio of the extruded diameter to the die diameter (equation (1)). The diameter was measured at three different locations. Ten extrudates from each condition were analysed.

$$\text{Expansion ratio (ER)} = \frac{\text{extrudate diameter}}{\text{die diameter}} \quad (1)$$

2.3.2 Density (ρ)

The samples were ground in order to remove most of the internal pores. Density was expressed by the equation (2).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

where ρ (g/cm³) is the density, m (g) is the mass and V (cm³) is the volume of the solids. The experiments were done in triplicate.

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

Extrudates were ground and passed through the 40 mesh sieve. 2.5 g ground sample was suspended in 25 ml of distilled water at room temperature for 30 min, and then centrifuged at 4000 rpm for 15 min. Then, the sediment was weighed to calculate WAI as equation (3). The supernatant was decanted and air-dried until a constant weight and dry solid was achieved. The WSI was calculated as equation (4) [10].

$$\text{WAI (g/g)} = \frac{\text{weight of sediment}}{\text{weight of dry solids}} \quad (3)$$

$$\text{WSI (\%)} = \frac{\text{weight of dissolved solids in supernatant}}{\text{weight of dry solids}} \quad (4)$$

2.3.4 Crispness

Crispness of the extrudates was determined using a Texture Analyzer (Serial No.4650, TEE version no.2.64 UK) fitted with a 50 kg load cell. Ten extruded of approximately 5 cm in length were placed on a platform

and penetrated perpendicularly by a 2 mm cylindrical probe. The probe was set at a test speed of 3 mm/s for a distance of 14 mm.

2.3.5 Moisture content (MC)

The moisture content of extruded was determined using a hot-air oven method and calculated the amount of evaporated moisture based on AOAC, 2005 [11].

2.4 Experimental design and data analysis

The effects of three independent variables, including coconut meal content (%), X_1 , glutinous rice content (%), X_2 and screw speed (rpm), X_3 , on the properties of the extrudates were studied. Each variable was set at three different levels. A total number of 17 experiments with 5 replicates of the central point were conducted and designed by Box Behnken design (BBD). Second order polynomial model was applied, which is given as :

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (5)$$

where Y is the physical properties of extruded, β_0 , β_i , β_{ii} and β_{ij} are the constant and coefficient for linear, quadratic and interaction terms. X_i and X_j are the coded values of the variables.

The data were analysed with an analysis of variance method (ANOVA) and response surface plot using Design Expert v.11.0.5. A probability of $p < 0.05$ was used to determine the statistical significance of the results.

3 Results and Discussion

Effect on the rice-based extrudates were evaluated by varying coconut meal content, glutinous rice content and screw speed at different levels (0-12%, 5-15% and 380-420 rpm respectively), and the result are show in Table 1. Statistical analysis of extruded's physical properties are shown in Table 2. The regression models for expansion ratio, density, WAI, WSI and crispness were statistically significant ($p < 0.05$). However, the

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

Table 2. Estimated regression coefficients of the second order polynomial for the variables.

Variables	ER	ρ	WAI	WSI	Crispness	MC
Constant	2.63	0.7015	4.87	26.19	20.85	7.14
X ₁	-0.1442*	-0.0589*	-0.2909*	0.8295*	1.43*	0.0601
X ₂	0.0184	-0.0267*	-0.2201*	2.21*	-1.33*	-0.1958
X ₃	-0.0380	-0.0017	0.0767*	-0.4740	-0.3086	0.0280
(X ₁) ²	-0.0611	-0.0545*	-0.2072*	2.26*	-0.9865	-0.2482
(X ₂) ²	-0.0686	0.0249	0.1330*	-0.5724	1.44	0.2551
(X ₃) ²	0.0172	-0.0052	0.1459*	-1.37*	-1.67*	0.2872
(X ₁)(X ₂)	0.0109	-0.0180	-0.0656*	1.76*	-2.38*	-0.2791
(X ₁)(X ₃)	-0.0823*	-0.0149	0.0191	0.0168	0.4855	-0.2415
(X ₂)(X ₃)	0.0688	-0.0055	-0.0335	0.5206	-0.4617	-0.0286
R-Squared	0.9037	0.9326	0.9941	0.9695	0.8775	0.7390
Std. Error	0.0633	0.0228	0.0353	0.6224	1.26	0.2969
p-value	0.0079	0.0025	0.00	0.0002	0.0169	0.1553

*Significant at $p < 0.05$

regression model for moisture content was not significant at $p < 0.05$. Moisture content was found to be in the range of 6.76-8.27%, and fiber of extruded in range of 0.32-9.51%.

3.1 Expansion ratio

Expansion is a desirable variable, indeed the higher expansion ratio is suitable for extruded snack products. Generally, expansion ratio was affected by various extrusion conditions such as moisture content of feed, temperature of extruder, die diameter, feed rate and screw speed [12]. In this study, the regression analysis report (Table 2.) showed that coconut meal content and screw speed had a negative linear and quadratic effect on ER of extruded, while glutinous rice content had positive linear and quadratic effects of screw speed on ER. The interactive effect of coconut meal and glutinous rice content and glutinous rice content and screw speed showed positive interactive effect. Response surface plot (Fig. 1a) shows that the increased coconut meal content and screw speed led to decrease of ER. Similar results were reported by Arivalagan *et al.* (2018) for coconut haustorium based extruded. Arivalagan *et al.* (2018) also investigated the effect of coconut haustorium content on ER. Found that the highest ER obtained from using 100% rice (3.311±0.126%) and it down from 3.044-1.571% when increased coconut haustorium from 10-30%. Higher water holding capacity of fiber reduces the water loss at the die and thus reduces its ability for expansion [2].

3.2 Density

True density is a constant, fundamental characteristic of the dry material which is determined by the physicochemical composition of a biological material [13]. In this study the extrudates show density in range of 0.55-0.76 g/cm³. Low density was obtained at the lowest values of all of three variables. Regression analysis showed that, with the increase in the coconut meal and glutinous rice content, significant negative effect on density was observed (Table 2.). Response surface plot for density are given in Fig. 1b. Raghavendra *et al.* (2011) studied pea-rice based extruded products fortified with guar gum and locust bean gum found that the inclusion of guar gum and

locust bean gum decreased the true density up to 15% [9].

3.3 WAI and WSI

WAI is used to quantify the range of starch denaturation during extrusion cooking. WAI can indicate the dispersion of starch in excess water. Dispersion can be increased by the rating of starch denaturation due to gelatinization and extrusion induced fragmentation [1]. WAI was found to be in the range of 4.24-5.50 g/g. The coconut meal content, glutinous rice content and screw speed have significant effects on the WAI of the extruded. The negative effect of the linear terms of coconut meal and glutinous rice content indicated that WAI decreased when increased coconut meal and glutinous rice content, while positive coefficients of linear terms of screw speed resulted to increase in WAI. Response surface plots (Fig. 1c) showed that with the increase in coconut meal and glutinous rice content there was a decrease in WAI, and similar trends were observed with screw speed.

WSI is used to determine the amount of polysaccharides that are soluble after excess of water has been added, WSI is often used as an indicator of degradation of molecular components [12]. In this work, WSI occurred in ranged of 21.51-33.37% (Table 1.). From the regression analysis report, it was found that WSI varied significantly with screw speed. Response surface plot on WSI as affected by process conditions is shown in Fig. 1d.

Arivalagan *et al.* (2018) used coconut haustorium in rice and corn extrudates. They study found the increase in coconut haustorium content in the extruded decreased the WAI while increased the WSI [2].

3.4 Crispness

Texture is one of the most important quality features of extruded products, which is the key parameter that drives a consumer preference. Among the texture attributes of food products, crispness is one of the most major and desirable textural attributes in quality assessment of extruded products [4]. The range of crispness was found to be 16.87-27.73 kg.sec. Effect of process variables on the crispness of extruded are

^{*} Corresponding author: maradee.ph@kmitl.ac.th

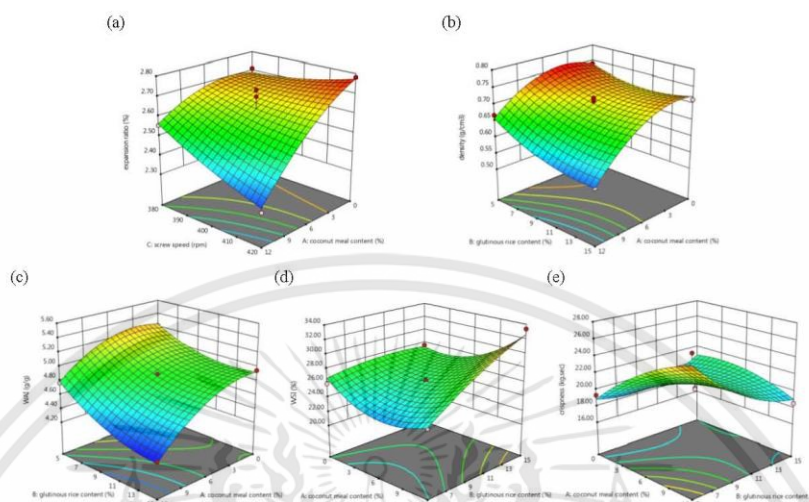


Fig. 1. Response surface plot for (a) ER, (b) density, (c) WAI, (d) WSI and (e) crispness.

presented in Table 1. Regression analysis shows that crispness of extrudates was significantly affected by coconut meal and glutinous rice contents (Table 2.). Response surface plot is shown in Fig. 1e that crispness was high for high coconut meal content and low for high glutinous rice content.

4 Conclusion

This study investigated the physical properties of extrudates under varying coconut meal contents, glutinous rice contents and screw speed by using single screw extruder. The results of extrudates characteristics were shown expansion ratio of 2.30-2.78%, density of 0.55-0.76 g/cm³, WAI of 4.24-5.50 g/g, WSI of 21.51-33.37%, crispness of 16.87-27.73 kg.sec. The regression models for expansion ratio, density, WAI, WSI and crispness were statistically significant ($p < 0.05$). Therefore, this information could be applied to develop an extruded product further.

References

- G.K. Rajesh, V. Thirupathi, V.E. Nambi, & R. Pandiselvam. (2014). Optimization of extrusion cooking process for rice-fish extrudates with an underutilized fish mince based on physical, functional and textural properties. *Scientific Journal Agricultural Engineering*, 2, 9-21.
- M. Arivalagan, M.R. Manikantan, A.M. Yasmeen, S. Sreejith, & D. Balasubramanian. (2018). Physicochemical and nutritional characterization of coconut (*Cocos nucifera* L.) haustorium based extrudates. *LWT-Food Science and Technology*, 89, 171-178.
- M. Riaz & G.J. Rokey. (2013). Food extrusion. *Food Technol*, 27, 46-53.
- T.A. Nascimento, V. Calado, & C.W.P. Carvalho. (2017). Effect of Brewer's spent grain and temperature on physical properties of expanded extrudates from rice. *LWT-Food Science and Technology*, 79, 145-151.
- S. Chaiyakul, K. Jangchud, A. Jangchud, P. Wuttijumrong, & R. Winger. (2009). Effect of extrusion conditions on physical and chemical properties of high protein glutinous rice-based snack. *LWT-Food Science and Technology*, 42, 781-787.
- I. Thushari & S. Babel. (2018). Sustainable utilization of waste palm oil and sulfonated carbon catalyst derived from coconut meal residue for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 248, 199-203.
- P. Khuvijitjaru, K. Watsaniti, & S. Adachi. (2012). Carbohydrate content and composition of product from subcritical water treatment of coconut meal. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18, 225-229.
- T.P. Trinidad, A.C. Mallillin, D.H. Valdez, A.S. Loyola, F.C. Askali-Mercado, J.C. Castillo, R.R. Encabo, D.B. Masa, A.S. Maglaya, & M.T. Chua. (2006). Dietary fiber from coconut flour: A functional food. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 7, 309-317.
- S.N. Raghavendra, S.R.R. Swamy, N.K. Rastogi, K.S.M.S. Raghavarao, S. Kumar, & R.N. Tharanathan. (2006). Grinding characteristics and hydration properties of coconut residue: A source of dietary fiber. *Journal of Food Engineering*, 72, 281-286.
- G. Ravindran, A. Carr, & A. Hardacre. (2011). A comparative study of the effects of three galactomannans on the functionality of extruded pea-rice blends. *Food Chemistry*, 124, 1620-1626.
- Association of Official Analytical Chemists. (2005). *Official Methods of Analysis*, 18th ed., AOAC, Washington, DC.
- S.A. Wani & P. Kumar. (2016). Development and parameter optimization of health promising extrudate based on fenugreek oat and pea. *Food Bioscience*, 14, 34-40.
- A. Martynenko. (2014). True, Particle, and Bulk Density of Shrinkable Biomaterials: Evaluation from Drying Experiments. *Drying Technology*, 32, 1319-1325.

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

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวนิษฐา คุมชัยภูมิ
วัน เดือน ปีเกิด	19 กุมภาพันธ์ 253
ที่อยู่	498/157 หมู่ 4 หมู่บ้านบุรีรัมย์ ซอยบางปูนคร 2 ถนนเทพารักษ์ ตำบลแพรษาใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10280
ประวัติการศึกษา	2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	
พ.ศ. 2562	การประชุมวิชาการ The 12 th TSAE International Conference ในระหว่างวันที่ 14-15 มีนาคม 2562 ณ โรงแรม Hard Rock Hotel, พัทยา ในหัวข้อเรื่อง “Effect of extrusion conditions on the physical properties of coconut rice-based extrudates”
	การประชุมวิชาการวิศวกรรมอาหารแห่งชาติ ครั้งที่ 5 ระหว่างวันที่ 28-29 มีนาคม 2562 ณ สโมสรมณาคาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในหัวข้อเรื่อง “สภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเอ็กซ์ทรูเดทจากข้าวเสริมใยอาหาร”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้