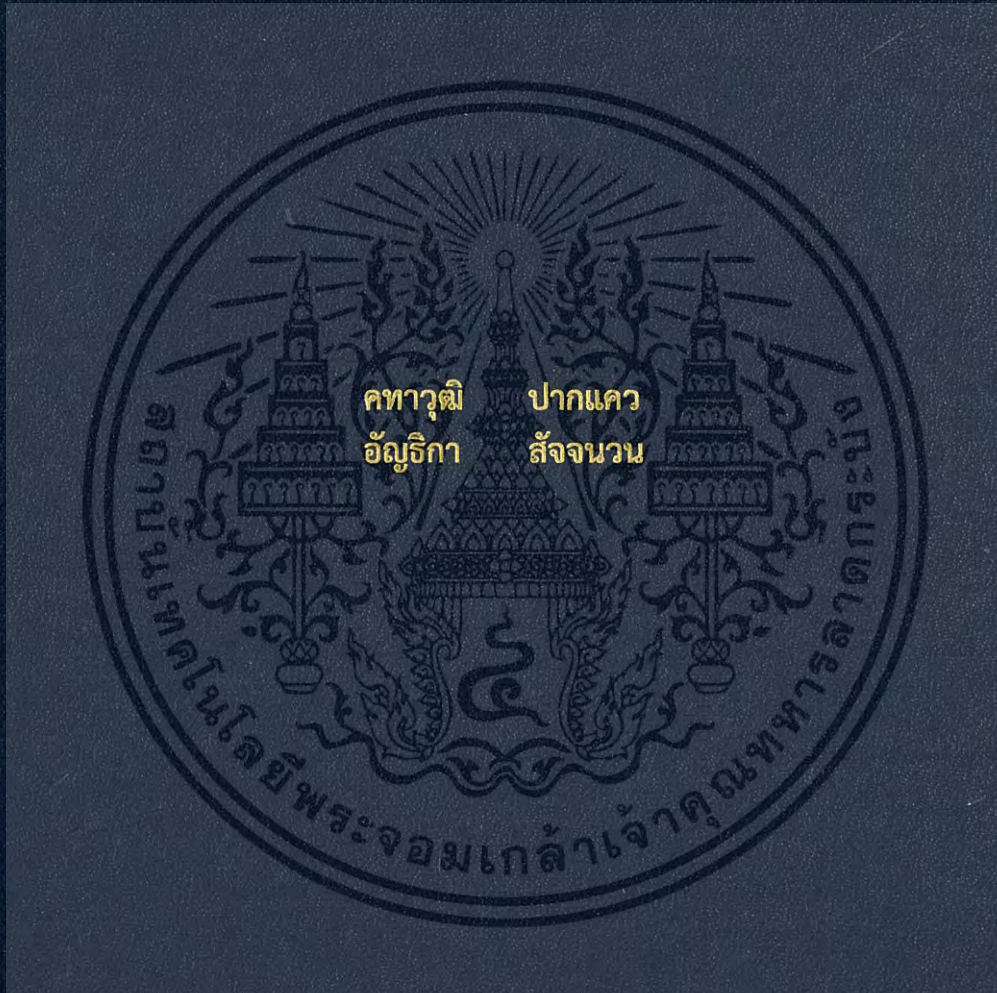


ผลของส่วนประกอบวัตถุดิบต่อสมบัติทางเคมี-กายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก
กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

EFFECT OF RAW MATERIAL COMPONENTS ON THE PHYSICO-CHEMICAL
CHARACTERISTICS OF PRODUCT BY EXTRUSION PROCESS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ผลของส่วนประกอบวัตถุดิบต่อสมบัติทางเคมี-กายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก
กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

EFFECT OF RAW MATERIAL COMPONENTS ON THE PHYSICO-CHEMICAL
CHARACTERISTICS OF PRODUCT BY EXTRUSION PROCESS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF RAW MATERIAL COMPONENTS ON THE PHYSICO-CHEMICAL
CHARACTERISTICS OF PRODUCT BY EXTRUSION PROCESS



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2560

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ผลของส่วนประกอบวัตถุดิบต่อสมบัติทางเคมี-กายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ
เอ็กซ์ทรูชัน

Effect of Raw Material Components on the Physico-chemical Characteristics of
Product By Extrusion Process

ผู้จัดทำ

- | | | |
|------------------|---------|-----------------------|
| 1. นายคทาวุฒิ | ปากแคว | รหัสประจำตัว 57010136 |
| 2. นางสาวอัญธิกา | สัจจนวน | รหัสประจำตัว 57011518 |



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	ผลของส่วนประกอบวัตถุดิบต่อสมบัติทางเคมี-กายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน	
นักศึกษา	นายคทาวุฒิ	ปากแคว
	นางสาวอัญธิกา	สังจนวน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร	
ปีการศึกษา	2560	

บทคัดย่อ

ในโครงการนี้นำเสนอการศึกษาระบบวิธีการผลิตอาหารขบเคี้ยวจากสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเนื่องจากสาหร่ายสไปรูลิน่าเป็นสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ โดยมุ่งเน้นศึกษาถึงผลของอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้ประกอบด้วยแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และรำข้าว ที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมี-กายภาพของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้ เช่น ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดท ความหนาแน่น อัตราส่วนขยายตัว ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ สี และลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ การศึกษาอาศัยแผนการทดลองแบบ Box-Behnken design และทำการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย เพื่อนำมาอธิบายผลกระทบของหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนวัตถุดิบผสมกับสมบัติของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้ ผลการศึกษาที่ได้สามารถนำมาเป็นแนวทางในการคัดเลือกส่วนผสมของวัตถุดิบที่เหมาะสมในการผลิตอาหารขบเคี้ยว จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และรำข้าวมีผลทำให้เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้มีค่าความชื้น ความหนาแน่นขึ้น และอัตราส่วนการขยายตัวเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความสว่างนั้นจะส่งผลให้มีค่าลดลง ส่วนค่าความสามารถในการดูดซับน้ำนั้นมีเพียงรำข้าวเท่านั้นที่ส่งผลให้เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความสามารถในการละลายน้ำและค่าความกรอบมีเพียงแป้งมันสำปะหลังเท่านั้นที่ส่งผลให้เพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความแข็งนั้นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญมากนัก ส่วนค่าความเป็นสีแดงนั้นมีเพียงการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ส่งผลให้ค่าลดลง หลังจากนำผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากท้องตลาดโดยคุณลักษณะที่เปรียบเทียบคือค่าความหนาแน่นขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ และค่าความกรอบ โดยอัตราส่วนของแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และรำข้าวที่ส่งผลให้ค่าคุณลักษณะดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงที่สุดคือ 10:5:0 ตามลำดับ ซึ่งค่าคุณลักษณะที่ได้จากอัตราส่วนดังกล่าว มีค่าความหนาแน่นขึ้นคือ 0.22 g/cm³ ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ 4.23 g/g และค่าความกรอบ 78 no. peak

คำสำคัญ: สไปรูลิน่า, อาหารขบเคี้ยว, กระบวนการอัดพอง, บ็อกซ์เบนเคน, วิเคราะห์พื้นผิวตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Effect of Raw Material Components on the Physico-chemical Characteristics of Product By Extrusion Process
Students	Mr. Katavut Pakkwae Ms. Untika Sajjanuan
Project Advisor	Asst. Prof. Dr. Maradee Phongpipatpong
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Food Engineering
Academic Year	2017

ABSTRACT

A study of the production of spirulina snack by extrusion process is presented in this project, due to its high nutritional value. The study focuses on formulation of feed ingredients, including potato flake, tapioca flour, and rice bran which affect the physical and chemical properties of extrudates such as: moisture content, density, expansion ratio, water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), color and textural characteristic. The experimental trials are conducted based on Box-Behnken design and the analysis of experimental results is performed by using the Response Surface Methodology (RSM) in order to describe the effect of feed compositions on the extrudates characteristics. The studies can provide better understanding of extrusion process and the proper feed compositions for production of tasty and healthy snack from Spirulina. It was found that an increase in the potato flake, tapioca starch and rice bran resulted in an increase in the extrudate's moisture content, piece density, and the expansion ratio, but Lightness. Increasing rice bran causes an increase of WAI. Increasing tapioca starch causes an increase of WAI, crispness while decreased redness and hardness not result in significantly. After extrudate products were compared with snack foods from market place. The characteristic comparison is piece density, WAI and crispness. The processing conditions of potato flake, tapioca starch and rice bran at ratio 10:5:0. The characteristic value obtained from this ratio. The piece densities were 0.22 g/cm³, water absorption 4.23 g/g and crispness 78 no.peak.

Keywords: Spirulina, snack, extrusion, Box-Behnken, RSM

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างยิ่งที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ติดตามผลการดำเนินงาน ตรวจสอบแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ และให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ ตลอดช่วงเวลาในการทำวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภายในสาขาวิศวกรรมอาหารทุกคน ที่ได้ให้ความสะดวกในการยื่นอุปรณ์และห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณทางโครงการส่วนพระองค์สวนจิตรลดา ที่ให้ความอนุเคราะห์ส่วนผสมวัตถุดิบที่ใช้สำหรับในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณบิดามารดาซึ่งเป็นผู้ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษา และเป็นกำลังใจในด้านต่างๆมาโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือจนโครงการวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จ

ท้ายสุดนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และสถานที่สำหรับทำงาน

ศทาวุฒิ ปากแคว
อัญธิกา สัจจนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	IV
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	V
กิตติกรรมประกาศ	VI
สารบัญ	VII
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูปภาพ	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ตรวจสอบเอกสาร	4
2.1 กระบวนการเอ็กซ์ทราซัน	4
2.1.1 เครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์	4
2.1.2 การเปรียบเทียบชนิดของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์	6
2.1.3 กลไกการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์	6
2.1.4 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์	7
2.1.5 ข้อดีของการใช้เครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์	8
2.1.6 ปัจจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัตถุดิบ	8
2.2 ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว	10
2.2.1 ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวแบบพองกรอบ	10
2.2.2 คุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว	11
2.2.3 ประเภทของอาหารขบเคี้ยว	11
2.3 องค์ประกอบของแป้ง	12
2.3.1 อะไมโลส	12
2.3.2 อะไมโลเพคติน	14
2.3.3 คุณสมบัติของแป้ง	16
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 3 วัดถุดิบ เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	22
3.1 วัดถุดิบ เครื่องมือ อุปกรณ์	22
3.1.1 วัดถุดิบ	22
3.1.2 เครื่องมือ อุปกรณ์	22
3.2 การเตรียมวัดถุดิบ	22
3.3 ขั้นตอนการผลิตเอ็กซ์ทราซัน	23
3.3.1 การเตรียมเครื่องเอ็กซ์ทราเดอร์	23
3.3.2 ขั้นตอนการผลิตแบบเอ็กซ์ทราซัน	23
3.3.3 วิธีการคำนวณตามหลักสมมูลเพื่อปรับความชื้น	23
3.3.4 การหาสภาพการณ์ผลิตที่เหมาะสม	24
3.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดต	24
3.4.1 ค่าความชื้น	24
3.4.2 ความหนาแน่นชิ้น	25
3.4.3 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ และค่าความสามารถในการละลายน้ำ	25
3.4.4 ลักษณะเนื้อสัมผัส	25
3.4.5 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	26
3.4.6 สี	26
3.5 การกำหนดตัวแปรที่ศึกษา	26
3.5.1 ตัวแปรอิสระ (Independent variables)	27
3.5.2 ตัวแปรตาม (Dependent variable)	27
3.6 การวางแผนการทดลอง	27
3.7 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	29
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์ทราซัน	20
4.2. คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวสาหร่ายสไปรูลิน่า	31
4.2.1 ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture content, MC)	31
4.2.2 ความหนาแน่นชิ้น (Piece density)	34
4.2.3 ค่าอัตราส่วนการขยายตัว (Expansion Ratio)	37
4.2.4 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index ,WAI)	40
4.2.5 ค่าความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility Index ,WSI)	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
4.2.6 ลักษณะทางเนื้อสัมผัส	46
4.2.6.1 ค่าความแข็ง (Hardness)	46
4.2.6.2 ค่าความกรอบ (Crispsness)	49
4.2.7 ค่าความสว่าง (Lightness , L*)	52
4.2.8 ค่าความเป็นสีแดง (Redness , a*)	55
4.2.9 ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness , b*)	58
4.3. ผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวสำหรับวัยรุ่น นำกับผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากท้องตลาด	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผลการวิจัย	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
บรรณานุกรม	66
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก	70
ภาคผนวก ข	103
ภาคผนวก ค	110

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สารอาหารที่ได้จากการบริโภคอาหารขบเคี้ยวของเด็กอเมริกัน คิดเป็นร้อยละของปริมาณที่แนะนำต่อวัน (RDA)	11
3.1 สัญลักษณ์และความหมาย	27
3.2 แผนการทดลอง	28
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่สภาวะการทดลองต่างๆ	29
4.2 คำสัมประสิทธิ์ในสมการ 3-8 เพื่ออธิบายค่าคุณลักษณะต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย	30
4.3 ค่าคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากห้องตลาด	61
ก.1 ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต (ผ่านการอบ)	71
ก.2 ความหนาแน่นขึ้นของเอ็กซ์ทรูเดต	74
ก.3 ค่าอัตราการขยายของเอ็กซ์ทรูเดต	81
ก.4 ค่า WAI และ WSI ของเอ็กซ์ทรูเดต	82
ก.5 Profile ของเครื่อง Texture Analyzer	88
ก.6 ค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดต	89
ก.7 ค่าความกรอบของเอ็กซ์ทรูเดต	93
ก.8 ค่าสีของเอ็กซ์ทรูเดต	94
ก.9 ความชื้นของขนมขบเคี้ยวในห้องตลาด	98
ก.10 ความหนาแน่นขึ้นของขนมขบเคี้ยวในห้องตลาด	99
ก.11 ค่า WAI และ WSI ของขนมขบเคี้ยวในห้องตลาด	100
ก.12 ค่าความแข็งของขนมขบเคี้ยวในห้องตลาด	101
ก.13 ค่าความกรอบของขนมขบเคี้ยวในห้องตลาด	101
ก.14 ตารางสัญลักษณ์และความหมายที่ใช้	102
ข.1 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความชื้นเอ็กซ์ทรูเดต	103
ข.2 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นขึ้น	104
ข.3 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราการขยายตัว	105
ข.4 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความสามารถในการดูดซับ	106
ข.5 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความสามารถในการละลายน้ำ	107
ข.6 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของลักษณะเนื้อสัมผัส (ความแข็ง)	108
ข.7 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของลักษณะเนื้อสัมผัส (ความกรอบ)	109
ข.8 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสี	110

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว	5
2.2 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่	5
2.3 กลไกการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	7
2.4 โครงสร้างของอะไมโลส	13
2.5 ภาพจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์	13
2.6 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน	14
2.7 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพกตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึก และส่วนอสัณฐาน 1 = ส่วนผลึก 2 = ส่วนอสัณฐาน	15
2.8 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ	17
2.9 ระยะเวลาเกิดเจลสติโนเซชัน	19
3.1 แผนภาพสมดุลมวล	23
3.2 แสดงขั้นตอนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน	24
4.1 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-1)	31
4.2 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์	32
4.3 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์	33
4.4 การเปรียบเทียบความหนาแน่นชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-2)	34
4.5 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นชื้นของผลิตภัณฑ์	35
4.6 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นชื้นของผลิตภัณฑ์	36
4.7 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-3)	37
4.8 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	38
4.9 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	39
4.10 การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-4)	40

สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่	หน้า
4.11 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์	41
4.12 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์	42
4.13 การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-5)	43
4.14 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์	44
4.15 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์	45
4.16 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-6.1)	46
4.17 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์	47
4.18 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์	48
4.19 การเปรียบเทียบค่าความกรอบของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-6.2)	49
4.20 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์	50
4.21 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์	51
4.22 การเปรียบเทียบค่าความสว่างของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-7)	52
4.23 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์	53
4.24 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์	54
4.25 การเปรียบเทียบค่าความเป็นสีแดงของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย ในสมการ (4-8)	55
4.26 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดงของผลิตภัณฑ์	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
4.27 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดงของผลิตภัณฑ์	57
4.28 การเปรียบเทียบค่าความเป็นสีเหลืองของเอ็กซ์ทราคตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-9)	58
4.29 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์	59
4.30 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์	60
4.31 แสดงค่าคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับปริมาณแบริ่งมันสำปะหลัง 0 %	62
4.32 แสดงค่าคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับปริมาณแบริ่งมันสำปะหลัง 5 %	62
4.33 แสดงค่าคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับปริมาณแบริ่งมันสำปะหลัง 10 %	63
ค.1 ปลายข้าวบด	111
ค.2 แบริ่งมันสำปะหลัง	111
ค.3 แบริ่งมันฝรั่ง	111
ค.4 สำหรับรายสไปรูลิน่า	111
ค.5 ราข้าว	112
ค.6 ข้าวโพดบดหยาบ	112
ค.7 เครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์	112
ค.8 เครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์	112
ค.9 ประกอบหน้าแปลน	112
ค.10 การผลิตแบบเอ็กซ์ทราคชัน	112
ค.11 สกรู	113
ค.12 ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer)	113
ค.13 หน้าแปลน	113
ค.14 ชุดป้อนวัตถุดิบ	113
ค.15 เครื่องผสม	113
ค.16 เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธ์	113
ค.17 เครื่องบด (Hammer Mill)	114
ค.18 Texture Analyser	114
ค.19 อัตราการขยายตัว	114
ค.20 WAI & WSI	114
ค.21 Centrifuge	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
ค.22 ตู้อบ Hot air oven	114
ค.23 เครื่องวัดสี	115
ค.24 ความหนาแน่นขึ้น	115
ค.25 ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่ได้จากการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน	116
ค.26 ข้าวโพดอบกรอบ รสบาร์บีคิว	118
ค.27 ข้าวโพดอบกรอบ ซีโตนรสอเมริกันชีส	118



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการบริโภคขนมขเคี้ยวในประเทศไทยมีความนิยมเพิ่มมากขึ้น ด้วยการที่ขนมขเคี้ยวอยู่ในซูเปอร์มาเก็ตอย่างแพร่หลาย ขนมขเคี้ยวประกอบไปด้วยส่วนผสมที่หลากหลายรวมทั้งมันฝรั่งทอด ข้าวโพดคั่ว ขนมปังกรอบ ถั่ว และขนมขเคี้ยว หลายปีที่ผ่านมานักโภชนาการได้รับความกังวลกับพฤติกรรมการกินอาหารขเคี้ยวของวัยรุ่น ซึ่งมักกินระหว่างอาหารว่างของมืออาหาร (Huenemann et al., 1968) อาหารขเคี้ยวเป็นอาหารพร้อมบริโภค (Ready-to-eat foods) ที่ไม่ใช่อาหารมือหลักแต่รับประทานในช่วงระหว่างมือ จากการศึกษาพบว่าวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตอาหารขเคี้ยวประกอบด้วยแป้ง น้ำตาล น้ำมัน ผงชูรส และเกลือ ทำให้ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีคุณค่าทางโภชนาการต่ำน้อยและไม่เหมาะสม (Nutritionally unbalanced) เนื่องจากเป็นอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตและไขมันสูง แต่มีส่วนของโปรตีนและใยอาหารต่ำ (Iqbal et al., 2006) ปัจจุบันผู้บริโภคใส่ใจต่อสุขภาพมากขึ้น ต้องการอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการและเป็นประโยชน์ในเชิงสุขภาพเพิ่มมากขึ้น จึงควรได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารขเคี้ยวให้มีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มสูงขึ้น

สาหร่ายสไปรูลินา หรือสาหร่ายเกลียวทองเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเป็นพืชชั้นต่ำ ไม่มีระบบท่อลำเลียงอาหารจากรากสู่ลำต้นและใบ ซึ่งแท้ที่จริงแล้ว มันไม่ใช่สาหร่ายแต่เป็นแบคทีเรียชนิดหนึ่ง คือไซยาโนแบคทีเรีย (Cyanobacteria) แบ่งเป็น 2 ชนิด ที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Spirulina platensis* (*Arthrospira platensis*) และชนิด *Spirulina maxima* เป็นสาหร่ายที่ชอบขึ้นในแหล่งน้ำที่ค่อนข้างเป็นน้ำด่าง (เริงฤทธิ์, 2556) สไปรูลินามีปริมาณโปรตีนสูงถึง 65-71 % มีกรดอะมิโนที่ร่างกายต้องการครบทุกตัว และเป็นอีกแหล่งที่มาของวิตามิน B12 ปกติในกระบวนการเอ็กซ์ทรักชันมักนำแป้งหรือสตาร์ชที่มีคาร์โบไฮเดรตสูงซึ่งเป็นสารอาหารที่เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของมนุษย์มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตได้แก่ เมล็ดธัญพืช แป้ง ข้าวน้ำตาล ขนมปัง เผือก มันเทศ มันฝรั่ง สตาร์ช และข้าวโพด (Vijayarrani et al., 2012)

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย ซึ่งในไตรมาสที่ 1 ปี 2561 ข้าวมีผลผลิตเพิ่มขึ้น ขยายตัวร้อยละ 4.7 เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปี 2560 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2560) ซึ่งการบริโภคข้าวส่วนใหญ่มักบริโภคข้าวเต็มเมล็ดหรือข้าวสารจากโรงสีข้าว ส่วนปลายข้าวหรือข้าวท่อน ซึ่งมีขนาดความยาวของเมล็ดน้อยกว่า 50% จัดเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวและเป็นสินค้าที่มูลค่าต่ำ ซึ่งจะได้ส่วนของปลายข้าว ประมาณ 15% ปลายข้าวจัดได้ว่าเป็นวัตถุดิบให้พลังงานที่มีความสำคัญยิ่ง ดังนั้นการที่นำปลายข้าวมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ อาทิ เช่น โจ๊ก เส้นหมี่ ก๋วยเตี๋ยว แป้งข้าวเจ้า และอาหารขเคี้ยว เป็นต้น นอกจากจะเป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับปลายข้าวแล้ว ยังช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณประโยชน์เพิ่มมากขึ้น

กระบวนการเอ็กซ์ทรักชันถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการผลิตอาหารสำเร็จรูป ผลิตภัณฑ์ธัญชาติ และอาหารขเคี้ยว ลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหารประเภทนี้มีสมบัติด้านการพองตัว

(Expansion) ความแข็ง (Hardness) ความหนาแน่น (Density) เป็นตัวแปรสำคัญในด้านของการยอมรับของผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวส่วนใหญ่ทำจากธัญพืช เนื่องจากมีลักษณะการพองตัวที่ดี ตัวแปรสำคัญในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เช่น ความเร็วรอบสกรู อุณหภูมิบาร์เรล อัตราส่วนองค์ประกอบของวัตถุดิบ และความชื้นของวัตถุดิบ ผสมเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อให้ได้คุณสมบัติผลิตภัณฑ์และคุณค่าทางโภชนาการตามต้องการ (Joshi et al., 2014) ถึงแม้ว่ากรรมวิธีผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันจะมีข้อได้เปรียบหลายประการ แต่ในปัจจุบันการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่ยังคงจำกัดอยู่เพียงกลุ่มวัตถุดิบจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าว และแป้งสาลี เท่านั้น ส่วนวัตถุดิบในกลุ่มแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และข้าว ยังมีการนำมาใช้ไม่มากนัก กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันนี้จัดว่าเป็นกรรมวิธีการผลิตที่มีประสิทธิภาพสามารถดำเนินการผลิตเพื่อให้ได้ลักษณะผลิตภัณฑ์ตามต้องการได้ภายในขั้นตอนเดียว กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่ทำให้วัตถุดิบส่วนใหญ่ที่เป็นธัญพืชเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและกายภาพภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงภายในระยะเวลาสั้นๆ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ อาทิ ขนมขบเคี้ยว เป็นต้น ซึ่งสะดวกต่อการบริโภคและสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน จากเหตุผลข้างต้นดังนั้นในโครงการนี้จึงสนใจที่จะนำกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันมาประยุกต์ใช้ในการแปรรูปสาหร่ายสไปรูลิน่าให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมแก่การรับประทานในรูปแบบของอาหารขบเคี้ยว

1.2 วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ คือ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาถึงกรรมวิธีการผลิตอาหารขบเคี้ยวด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของส่วนผสมวัตถุดิบต่อคุณภาพของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย

1.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน คือ ปลาเยข้าว สาหร่ายสไปรูลิน่า แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และรำข้าว กระบวนการผลิตใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดียวในการผลิตและขึ้นรูป

1.3.2 กำหนดเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

- อัตราส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และรำข้าว

1.3.4 คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ศึกษา ประกอบด้วย

- ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดท (Moisture content, MC)
- ความหนาแน่นชิ้น (Piece density, PD)
- อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion Ratio, ER)
- ความสามารถในการดูดซับ (Water absorption index, WAI)
- ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility index, WSI)
- ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analysis)
- สี (Color)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษากระบวนการทำเอ็กซ์ทราซัน หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ วัตถุดิบที่มีคุณค่าทางโภชนาการในการผลิตเอ็กซ์ทราเตต และการวิเคราะห์คุณลักษณะของเอ็กซ์ทราเตต
- 1.4.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่มีผลต่อเอ็กซ์ทราเตต
- 1.4.3 ทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
- 1.4.4 ดำเนินการทดลองตามสภาวะที่เหมาะสม
- 1.4.5 วิเคราะห์ลักษณะเอ็กซ์ทราเตตที่ได้และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้แนวทางการผลิตอาหารขบเคี้ยวจากสาหร่ายสีโปรลีน่า
- 1.5.2 ทราบผลกระทบของส่วนผสมวัตถุดิบต่อการผลิตแบบเอ็กซ์ทราซันต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทราเตตที่ได้

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาทั้งหมดออกเป็น 5 บท โดยเนื้อหาแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กระบวนการเอ็กซ์ทราซัน เครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ กลไกการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์ การผลิตอาหารขบเคี้ยว คุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายเกลียวทอง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง การทดลองเบื้องต้น และการทดลองตามสภาวะต่างๆ

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์ ความชื้นของเอ็กซ์ทราเตต ความหนาแน่นขึ้น อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และค่าความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) ลักษณะเนื้อสัมผัส และสี

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

สำหรับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับขนมขบเคี้ยวที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ในการทบทวน เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้ทบทวนและสรุปสาระสำคัญจากการทบทวนเอกสารต่างๆ ดังนี้

- 2.1 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion process)
- 2.2 ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว
- 2.3 ส่วนประกอบของวัตถุดิบ
- 2.4 องค์ประกอบของแป้ง
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion process)

เอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion) เป็นกระบวนการแปรรูปเป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อการแปรรูปอาหาร ทำให้ ส่วนผสมของวัตถุดิบสุกจนได้ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปเกิดขึ้นภายในขั้นตอนเดียว โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่อง เอ็กซ์ทรูเดอร์ ซึ่งสามารถนำไปใช้เมื่อต้องการผลิตอาหารให้มีคุณสมบัติต่างๆ (Guha and Ali, 2006) เช่น ต้องการผลิตภัณฑ์อาหารที่มีลักษณะพอง หรือต้องการสร้างผลิตภัณฑ์อาหารที่มีรูปร่างต่างๆ และ ต้องการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้กับผลิตภัณฑ์อาหาร เป็นต้น โดยเฉพาะกับผลิตภัณฑ์อาหาร ประเภทอาหารขบเคี้ยว ซึ่งเป็นที่นิยมของตลาดที่ต้องการความหลากหลายในด้านรูปร่าง ขนาด สี และ ลักษณะเนื้อสัมผัส (Harper, 1981)

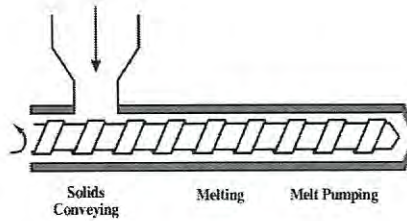
2.1.1 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder)

การจำแนกประเภทเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) มีการแบ่งออกตามเกณฑ์ต่างๆ ดังนี้

(1) แบ่งตามลักษณะโครงสร้าง (Harper, 1981)

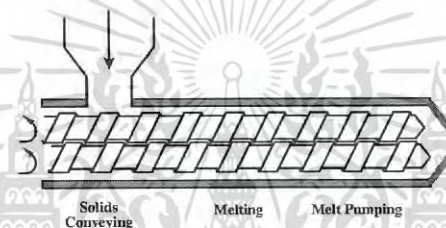
แบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruders) ประกอบด้วยส่วนของการทำงานดังแสดงในรูปที่ 1 คือ ส่วนของการป้อนวัตถุดิบเข้าไปเพื่อทำการอัดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนของการคลุกเคล้าผสม การตัด ผลิตภัณฑ์ให้มีขนาดต่างๆตามลักษณะของหน้าแปลน (Die) ที่ใช้การลำเลียงวัตถุดิบภายในเครื่องอัดแบบ สกรูเดี่ยวขึ้นอยู่กับแรงดันจากการหมุนของสกรูที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ ส่วนของการให้ความร้อนเกิดจากความเสียดทานที่ผิวของบาร์เรล โดยทั่วไปเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruders) มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนและการดำเนินการที่ต่ำกว่าแบบสกรูคู่ และมีข้อจำกัดของปริมาณไขมันอยู่ที่ 12-17 % (Guy, 2001)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว
ที่มา : (White, 1991)

แบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) เป็นเอ็กซ์ทรูเดอร์ ที่พัฒนาขึ้นมาโดยภายในบาร์เรล มีสกรู 2 อันวางขนานกันตามแนวอน ลักษณะการทำงานทำนองเดียวกันกับแบบสกรูคู่แต่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่จะมีประสิทธิภาพและความยืดหยุ่นสูงกว่า



รูปที่ 2.2 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่
ที่มา : (White, 1991)

(2) แบ่งตามแรงเฉือน

Cold forming extruder เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่มีแรงเฉือนต่ำ พื้นผนังของบาร์เรล เรียบเกลียวสกรูลึก ความเร็วรอบสกรูต่ำ เกลียวสกรูมีหน้าที่ บด นวด และผลักดันวัตถุดิบเคลื่อนที่ไปข้างหน้า มีอัตราแรงเฉือนต่ำ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ถึงกับสุกพอง ต้องมีขั้นตอนอื่นเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์สุก เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้มักใช้ทำเป็นเครื่องผสมและขึ้นรูปแบบต่อเนื่อง สำหรับอาหารประเภทขนมแป้งอบกรอบ

High – pressure forming extruder เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่มีแรงเฉือนต่ำ แต่พื้นผนังของบาร์เรลเป็นร่องตรงหรือเป็นส่วนเกลียวสว่าง เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นี้ใช้อัตว์วัตถุดิบที่เป็นโด (Dough) หรือแป้งธัญชาติที่เปลี่ยนสภาพมาเป็นเจลแล้วอัดผ่านรูเปิด ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังไม่สุกพองจะต้องนำไปผ่านการอบแห้งก่อนจึงจะสุก

Low – shear cooking extruder เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่มีแรงเฉือนปานกลาง พื้นผนังของบาร์เรลเป็นร่องตรง ๆ มีอัตราส่วนในการอัดสูง ความร้อนส่งผ่านทางบาร์เรลเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์สุก

Collet extruder เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่มีแรงเฉือนสูง พื้นผนังของบาร์เรล เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่มีความยาวของสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) น้อยเท่ากับ 3 : 1 เรียกว่า short screw และมีชนิดที่ L/D ยาวเท่ากับ 10 :1 วัตถุดิบที่มักใช้กับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นี้ ได้แก่ คอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

High – shear cooking extruder เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่มีหลากหลายรูปแบบ มีความลึกตื่นของสกรู และระยะพิทช์ (Pitch) แตกต่างกันไป ใช้ในโรงงานพลาสติก

2.1.2 การเปรียบเทียบชนิดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (รุ่งนภา, 2541)

ข้อดีของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่

(1) เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่จะได้ผลผลิตที่ได้ออกมาอย่างต่อเนื่อง ส่วนเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวต้องเติมส่วนผสมของอาหารให้เต็มชั้นแนลของสกรู เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวทำงานโดยใช้แรงเสียดทานทำให้เกิดการไหลแบบลาก เนื่องจากการหมุนภายในสกรูบาร์เรลอยู่หนึ่งทำให้อัตราการไหลเป็นสัดส่วนกับความเร็วสกรู

(2) เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่สามารถใช้ร่วมกับส่วนผสมที่มีน้ำมันค่อนข้างเหนียวหรือแฉะมาก หรือองค์ประกอบของส่วนผสมที่เป็นข้อจำกัดในการใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวหรือสกรูคู่ คือ น้ำมัน 4% และ 20% น้ำตาล 10% และ 40% ความชื้น 30% และ 65% ตามลำดับ จะเห็นว่าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่มีความยืดหยุ่นในการทำงานมากกว่า และบางครั้งยังสามารถเติมองค์ประกอบต่างๆ ในระหว่างกระบวนการผลิตได้ด้วย เช่น สารให้กลิ่นรส (flavor)

(3) การขนถ่ายทั้งชนิดไปด้านหลัง หรือชนิดย้อนกลับจะใช้การควบคุมความดันในบาร์เรล เช่น ในการผลิตกับผลไม้ อาหารจะถูกทำให้ร้อนขึ้นและถูกอัดด้วยการขนถ่ายไปด้านหน้า ความดันจะถูกปลดปล่อยออกมาเพื่อระบายความชื้นที่มากเกินไปหรือเพื่อเพิ่มส่วนผสมที่เติมเข้าไปด้วยการขนถ่ายย้อนกลับ แล้วอาหารจะถูกอัดครั้งสำหรับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

(4) ส่วนที่ปล่อยออกมา (Discharge) ของเครื่องแบบสกรูคู่ทำให้เกิดความดันที่ต้องใช้เพื่อการเอ็กซ์ทรูชันและทำให้ส่วนของเครื่องมีการสึกน้อยกว่าสกรูเดี่ยว

(5) เครื่องแบบสกรูคู่สามารถใช้กับของผสมที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ จากผงละเอียดไปเป็นเม็ดๆ ขณะที่สกรูเดี่ยวใช้กับช่วงที่มีอนุภาคที่เป็นเม็ดๆ

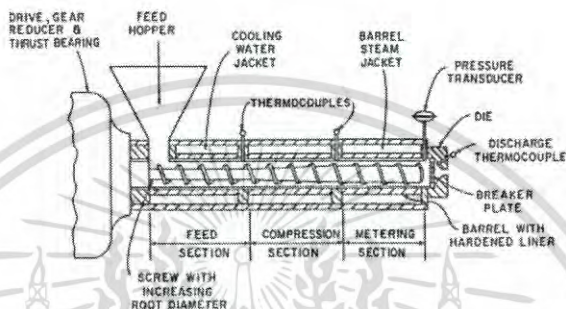
2.1.3 กลไกการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประกอบด้วย การหมุนของสกรูภายในบาร์เรล สามารถแบ่งส่วนการทำงานออกเป็น 4 ส่วนดังนี้ คือ

- (1) ส่วนป้อนวัตถุดิบ (Feed หรือ Transport)
- (2) ส่วนที่มีการให้ความร้อนจนวัตถุดิบเปลี่ยนสภาพ (Transition)
- (3) ส่วนที่เกิดแรงอัดเฉือน (Compression)
- (4) หน้าแปลน (Die)

Harper (1981) ได้อธิบายการทำงานของเอ็กซ์ทรูเดอร์ไว้ว่า เมื่อส่วนผสมที่ผ่านการปรับสภาวะ เช่น ความชื้น อุณหภูมิ ในส่วนของการปรับสภาพ (Preconditioning) แล้วจะถูกส่งมาสู่ส่วนที่มีการผสมและการลำเลียง (Transport section) โดยวัตถุดิบที่เข้ามาในส่วนนี้มีทั้งความชื้นในระดับต่ำประมาณ (10 – 40 %) สกรูในช่วงนี้มีความกว้างระหว่างเกลียวสกรูมาก และมีร่องเกลียวสกรู (flight) ลึก เพื่อประโยชน์ในการพาว์ตอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ (Hauck, 1993) หลังจากนั้นวัตถุดิบอาหารอาจได้รับความร้อนจากภายนอกระบบเพิ่ม เช่น ความร้อนจากพลังไฟฟ้า หรือ ไอน้ำที่ส่งผ่านทางบาร์เรล รวมทั้งความร้อนที่เกิดจากพลังงานกล ที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างอาหารกับสกรูและผนังด้านในของบาร์เรล

ที่มีพื้นที่จำกัด ทำให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว วัตถุดิบอาหารจะหลอมเหลว ซึ่งในส่วนนี้สกรูมีร่องเกลียวตื้นที่สุดจึงเกิดแรงเฉือนและแรงเสียดทานสูงสุด จากนั้นวัตถุดิบอาหารถูกดันผ่านช่องเปิดที่หน้าแปลน (Die) ออกมาสู่บรรยากาศภายนอกที่มีความดันบรรยากาศต่ำกว่าความดันภายในเครื่อง ทำให้น้ำในวัตถุดิบอาหารที่มีอุณหภูมิสูงอยู่ในสภาวะไอร้อนยิ่งยวดเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นไอน้ำระเหยออกไปอย่างรวดเร็ว ได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นรูพรุนและมีการพองตัวทันที การสูญเสียความชื้นและความร้อนในผลิตภัณฑ์รวมกับการพองตัวทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากนั้นอาจนำไปอบต่อในเครื่องทำแห้งแบบลมร้อนอีกเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่มีความชื้นสุดท้ายตามต้องการ



รูปที่ 2.3 กลไกการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์
ที่มา : (Harper, 1981)

2.1.4 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (วรวิฒิ, 2541)

(1) ส่วนป้อนวัตถุดิบ (Feed Hopper)

เป็นส่วนที่รับวัตถุดิบ มีรูปร่างเป็นกรวยแบบง่าย ๆ บางทีอาจเพิ่มระบบการกวนเข้าไปได้ถ้าวัตถุดิบมีความหนืด ในช่วงนี้จะมีการควบคุมอัตราเร็วในการป้อนวัตถุดิบ เพื่อป้องกันการเกิดการติดขัดในเครื่อง

(2) บาร์เรล (Barrel)

มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกครอบอยู่ตามความยาวของสกรู สามารถถอดออกเป็นตอนๆ ได้ ผิวด้านในมีการเซาะร่องเป็นแนวเพื่อลดการสั่นไหวของวัตถุดิบ ขณะเคลื่อนที่อยู่ภายในและยังเพิ่มแรงดันและแรงเฉือนด้วยแต่การมีร่องที่ผนังด้านในอาจทำให้เกิดการไหลย้อนกลับบ้างหากต้องการเพิ่มความสามารถในการทำงานในการเคลื่อนที่ไปด้านหน้าของผลิตภัณฑ์จะออกแบบให้มีร่องเว้าเป็นเกลียวรอบผนังด้านใน ที่บริเวณนี้จะมีการเกิดแรงเฉือนสูงมากจะต้องออกแบบให้มีความแข็งแรงสูงทนต่อการชูด่วน จึงมักจะเคลือบผิวด้านในด้วยโลหะพิเศษโดยระหว่างการใช้งานจะต้องตรวจสอบดูแลสม่ำเสมอไม่ให้ช่องว่างระหว่างสกรูกับผิวด้านในของบาร์เรลกว้างเกินไปจะต้องทำให้มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะทำได้ แต่ให้มีขนาดคงเดิมอยู่เสมอ แรงดันภายในระหว่างการใช้งานปกติอยู่ในช่วง 15-70 บรรยากาศ การใช้งานกับของแข็งมากหรือสภาวะที่การไหลภายในถูกขัดขวางแรงดันภายในอาจสูงกว่า 70 บรรยากาศ

(3) Jacket

อยู่ล้อมรอบบาร์เรล มีหน้าที่ให้น้ำเย็นหรือน้ำร้อนไหลอยู่ภายใน เพื่อควบคุมอุณหภูมิขณะใช้เครื่องซึ่งจะแบ่งออกเป็นช่วงๆ บางช่วงอาจใช้น้ำเย็น บางช่วงอาจใช้น้ำร้อนเพื่อให้ความร้อน

(4) สกรู (Screw)

สกรูมีลักษณะเป็นแกน มีเกลียวอยู่โดยรอบ โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลางของสกรูอัดเท่าเดิม หรือค่อยๆเพิ่มขึ้นก็ได้ เช่นเดียวกับเกลียวบนสกรูอาจมีความลึกคงที่หรือไม่มีก็ได้ ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และหน้าที่ในการทำงานนอกจากนี้สกรูยังอาจมีทิศทางที่แตกต่าง หรือเหมือนกันก็ได้ หน้าที่ของสกรูในการทำงาน คือ รับและขนถ่ายวัตถุดิบ กดดันและเพิ่มแรงเฉือนให้แก่วัตถุดิบทำให้เกิดการผสมอย่างสม่ำเสมอ บนสกรูอาจจะมีแผ่นกันเพื่อลดอัตราการเคลื่อนที่หรือเพิ่มแรงอัดซึ่งเรียกว่า restriction เข้าไปเป็นช่วงๆ ด้วยการออกแบบสกรูและทรงกระบอกที่หุ้มสกรูให้มีลักษณะต่างๆกัน จะทำให้เกิดแรงดันและแรงอัดต่ออาหารที่มีขนาดต่างๆกัน

(5) หน้าแปลน (Die)

ส่วนนี้อยู่ปลายสุดของเครื่อง มีรูปร่างลักษณะอันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆกันไป เมื่อเอ็กซ์ทราเดตต์ผ่านออกมาจากช่องนี้ จะเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการระเหยน้ำอย่างรวดเร็วทันทีที่ออกมาจากหน้าแปลน เนื่องจากมีการลดความดันสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์มักจะมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดของน้ำ ปริมาณน้ำที่ระเหยจากผลิตภัณฑ์อาจคำนวณได้จากการสมดุลความร้อนที่ส่วนของช่องเปิดนี้ถ้าสมมุติว่ากระบวนการเป็นแบบอะเดียแบติก การสูญเสียความร้อนมีค่าน้อยเมื่อเทียบอัตราการไหลของมวลก่อนและหลังเปิดเท่านั้น และความจุความร้อนของผลิตภัณฑ์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิหรือความดันเปลี่ยนแปลงไป

(6) ใบมีด (Knife)

เป็นส่วนที่กำหนดความยาวของเอ็กซ์ทราเดตต์ที่ออกมาจากหน้าแปลน ซึ่งมีให้เลือกหลายใบมีด อาจแบ่งเป็น 2 ใบมีด 3 ใบมีด หรือเท่าใดก็ได้ แล้วแต่ความต้องการทางด้านคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้าย

2.1.5 ข้อดีของการใช้เครื่องเอ็กซ์ทราเดเตอร์

(1) มีความหลากหลาย (versatility) สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลายประเภทและหลายรูปทรง กระบวนการมีความยืดหยุ่นสูง สามารถดัดแปลงผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ตามความต้องการของผู้บริโภคได้โดยการแปร สภาวะในการผลิต แบบหน้าแปลน และส่วนผสมของวัตถุดิบ ทำให้มีรูปร่างของผลิตภัณฑ์หลากหลาย (product shapes) ได้ผลิตภัณฑ์อาหารใหม่ๆ (production of new foods)

(2) มีอัตราการผลิตสูง (high productivity) เนื่องจากมีการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยผลิตต่อเนื่องแบบอัตโนมัติได้

(3) ต้นทุนต่ำ (low cost) เนื่องจากมีอัตราการผลิตสูง ใช้คนทำงานน้อย ใช้พื้นที่ในการผลิตน้อย นอกจากนี้ การดันผ่านเกลียวอัดมีค่าใช้จ่ายต่ำ และให้ผลผลิตสูงกว่าวิธีการต้มหรือการขึ้นรูปอื่นๆ และเนื่องจากเอ็กซ์ทราเดเตอร์ใช้อุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อย ทำให้ประหยัดพลังงานไอน้ำ

(4) ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี (high product quality) เนื่องจากในกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทราซัน โดยทั่วไปนั้น เป็นกระบวนการแบบ HTST (High temperature shot times)ซึ่งมีการสูญเสียคุณค่าทางอาหารน้อยมาก

(5) ไม่มีของเสีย (no effluents or waste) จากกระบวนการผลิต

2.1.6 ปัจจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัตถุดิบ

เนื่องจากปฏิกิริยาในกระบวนการเอ็กซ์ทราซันมีการเปลี่ยนแปลงทางทั้งด้านความร้อนและความดัน ซึ่งส่งผลให้วัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านเคมีและกายภาพ ดังนั้นความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับชนิดและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของวัตถุดิบจะเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้วัตถุดิบในกระบวนการเอ็กซ์ทราซัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะที่ดีตามต้องการ ดังนี้

ก. ธัญพืช (cereals) เป็นกลุ่มวัตถุดิบหลักของผลิตภัณฑ์อาหารจากกระบวนการเอ็กซ์ทราซัน ได้แก่

(1) ข้าวโพด นิยมใช้มากและประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย ราคาถูก พองตัวได้ดี และมีกลิ่นรสที่ดี

(2) ข้าว พองตัวได้ดี มีสีเหลือง รสจัดเป็นธรรมชาติ ซึ่งเป็นผลดีต่อการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเติมรสชาติอื่นๆ

(3) ข้าวสาลี จะพองตัวได้ยากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณกลูเตนในแป้งสาลีมีมากกว่าข้าวโพดและข้าว มีกลิ่นรสมันๆ

(4) ข้าวโอ๊ต เป็นแหล่งที่ดีของโปรตีนจากธัญพืช มีไขมันสูงซึ่งยากต่อการสุกพองมักนิยมใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเช้าธัญชาติ

ข. พืชหัว (root crop) ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการเอ็กซ์ทราซันมี 2 ชนิด คือ มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นแหล่งแป้งที่ใช้ปรับปรุงลักษณะเนื้อแฉก

ค. โปรตีน นิยมใช้แป้งถั่วเหลือง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม ในกรณีของขนมขบเคี้ยวและอาหารเช้าชนิดธัญชาติชนิดกรอบพอง โปรตีนจะลดการพองตัวของโปร่งอากาศ เพิ่มความหนาแน่น และให้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสกรอบแข็งมากยิ่งขึ้น

ง. ความชื้น ในการผลิตจะต้องมีการเพิ่มความชื้นโดยการเติมน้ำลงไปในส่วนผสม เพื่อลดอุณหภูมิพร้อมกับกลายเป็นตัวหล่อลื่นให้ผลิตภัณฑ์ไหลไปข้างหน้า และเป็นส่วนสำคัญในการเกิดเจลเมื่อแป็งดู ความชื้นจะทำให้เกิดการพองตัว ทำให้น้ำเข้าไปได้มากขึ้นถ้ามีการกวนที่แรงเพียงพอ หรืออุณหภูมิที่เพียงพอ หากความชื้นไม่สม่ำเสมอจะทำให้ปฏิกิริยาการเกิดเจลของอาหารไม่สม่ำเสมอ เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายไม่ได้คุณภาพ

จ. แป้งหรือสตาร์ช ถ้าแป้งมีการทำให้สุกในที่ความชื้นที่สูง โครงสร้างของสตาร์ชจะขยายตัวดูดซับโมเลกุลของน้ำไว้ในจำนวนมาก ทำให้เกิดเจลลาตินในซ์ มีลักษณะชั้นคล้ายพลาสติก ถ้าที่ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นต่ำที่ใช้สำหรับกระบวนการเอ็กซ์ทราซัน การเจลลาตินในซ์ของเมล็ดแป้งขึ้นกับการผลของความร้อนและแรงเฉือนทางกลร่วมกัน เมล็ดแป้งจะถูกเฉือนขณะเคลื่อนผ่านเครื่องเอ็กซ์ทราเดอร์ การไหลของส่วนผสมต่างๆ ที่เหนียวในเครื่องเอ็กซ์ทราเดอร์จะต้องอาศัยพลังงานทางกล จำนวนมากเพื่อใช้หมุนสกรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะปล่อยออกมาในรูปความร้อนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น ผลของเจลาตินไซเซชันและการเดกซ์เจอร์ไรเซชันคือ โดโตที่เหนียวหรือโดที่หลอมซึ่งสามารถผ่านรูเอ็กซ์ทรูผ่านได้เพื่อขึ้นรูปและพองทันทีเมื่อความชื้นภายในที่มีอุณหภูมิสูงเปลี่ยนไปเป็นไอน้ำหลังจากออกจากไดแล้วการเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชเมื่อใช้ อุณหภูมิและแรงเฉือนต่างกัน จะทำได้โดยการวัดค่าดัชนีการดัชนีการคูดน้ำ(WAI) และลักษณะการละลายน้ำ (WSI) โดยค่า WAI จะสูงขึ้นเมื่อความรุนแรงของสภาวะที่ใช้เพิ่มขึ้นส่วนค่า WSI จะลดลงเมื่อค่า WAI เพิ่มขึ้น

ฉ. ไขมัน ทำหน้าที่เหมือนตัวหล่อลื่น ลดความเหนียวของส่วนผสมทำให้ถูกผลักได้ง่าย ถ้าไขมันสูงจะทำให้ผลิตภัณฑ์เนื้อแน่น ดังนั้นในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความพองไขมันควรต่ำกว่า 2% แต่สำหรับผลิตภัณฑ์สแนคเพลเลท หรืออาหารสัตว์ที่ความชื้นสูง ซึ่งต้องการเนื้อแน่นปริมาณไขมันใช้ได้ตั้งแต่ 1-10% สำหรับสกรูเดี่ยว ในกระบวนการผลิตนั้น วัตถุประสงค์จำเป็นต้องมีไขมันอยู่ในช่วง 12-17% db เพราะ หากวัตถุประสงค์มีไขมันมากกว่านั้นจะทำให้แรงเสียดทานในบาร์เรลดลง ทำให้พลังงานที่จะเปลี่ยนสภาพทำอาหารให้สุกมีค่าลดลง แต่สกรูคู่ วัตถุประสงค์ต้องมีไขมันอยู่ในช่วง 18-22% db

ข. น้ำตาล มักใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเข้าธัญชาติส่วนใหญ่ น้ำตาลจะหลอมละลายที่อุณหภูมิประมาณ 250 °F จะช่วยลดความชื้นเหนียวของส่วนผสม ทำให้ผลักส่วนผสมได้ง่าย แต่อัตราที่น้อยกว่า น้ำและไขมัน ให้รสชาติหวานและสี หากอุณหภูมิสูงกว่านี้จะเกิดคาราเมลเป็นสีน้ำตาล

ช. อิมัลซิไฟเออร์ ใช้ในปริมาณน้อย น้อยกว่า 1% จะมีผลต่อเนื้อสัมผัสขนาดของโพรงอากาศและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ที่มีการพอง เช่นการใช้ lecithin 0.5-1% จะควบคุมเนื้อสัมผัสและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ใช้ glycerol monostearate (GMS) 0.3-0.5% จะช่วยการติดฟัน (stickiness) และช่วยยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากอิมัลซิไฟเออร์สามารถจับกับอะไมโลสของแป้งทำให้เกิดการสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อเคี้ยวถูกน้ำลายในปากจึงไม่ติดฟัน

ฅ. เส้นใย มีผลต่อโครงสร้างและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เพราะ fiber จะทำหน้าที่เหมือน solid filler ทำให้ลักษณะการพองของโมเลกุลของแป้งพองตัวยากขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นถ้ามีไฟเบอร์มากขึ้น

ญ. ขนาดของวัตถุประสงค์ เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ เพราะส่วนใหญ่ ส่วนผสม หรืออาหารที่ป้อนเข้าสู่บาร์เรลมักอยู่ในรูปที่เป็นผงหรือเม็ดเล็กๆ เนื่องจากจะทำให้ง่ายต่อการขนถ่ายส่วนผสมเพื่ออัดด้วยการเฉือนและนวด อีกทั้งยังทำให้ส่วนผสมรับความร้อนได้ทั่วถึง เพราะพื้นที่เนื้อสัมผัส หลอมเหลว สุกและขึ้นรูปขยายตัวได้ง่าย

2.2 ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว

อาหารขบเคี้ยว หมายถึง อาหารที่รับประทานเล่นระหว่างมื้ออาหารหลัก ลักษณะเด่นของอาหารขบเคี้ยวในปัจจุบันคือ น้ำหนักเบา เก็บรักษาง่าย สามารถนำติดตัวไปตามที่ต่างๆ ได้สะดวก อาหารขบเคี้ยวจัดเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง เนื่องจากมีสารอาหารจำพวกคาร์โบไฮเดรตเป็นจำนวนมากจึงช่วยให้ อิ่มท้องได้ (นฤคันธ์, 2541) นอกจากนี้ (Blanford, 1982) ได้ให้คำจำกัดความของอาหารขบเคี้ยวว่าเป็นอาหารที่ผ่านกระบวนการแปรรูปมาแล้ว ที่พร้อมบริโภคได้ทันทีหรือเตรียมเพียงเล็กน้อยก็สามารถ

บริโภคได้ และสามารถเก็บไว้ได้นาน โดยไม่ต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วน (Fazzolare et al., 1969) ได้ให้คำจำกัดความของอาหารขบเคี้ยวว่าเป็นอาหารที่สามารถรับประทานได้ทันที โดยทั่วไปนิยมรับประทานระหว่างมื้ออาหารหรืออาจรับประทานแทนอาหารได้ ดังนั้นอาหารขบเคี้ยวควรมีลักษณะที่มีความสะดวกสบายในการใช้หรือบริโภค และมีรสชาติตอบสนองความพึงพอใจในเวลาสั้นๆ อาหารขบเคี้ยวที่พบเห็นทั่วไป ได้แก่ มันฝรั่งทอด (Potato chip) ข้าวโพดคั่ว (Popcorn) แครกเกอร์ (Crackers) ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากถั่ว (Nuts) รวมไปถึงขนมกรอบจากธัญชาติชนิดต่าง ๆ (Harper, 1981)

2.2.1 ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวแบบพองกรอบ (Direct expanded products)

(สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2541) ได้ให้คำนิยามของขนมกรอบจากธัญชาติว่า หมายถึง ผลิตภัณฑ์ขนมที่มีธัญชาติต่าง ๆ ได้แก่ ข้าวเจ้า ข้าวสาลี ข้าวโพด เป็นส่วนประกอบหลัก แล้วผ่านกระบวนการต่างๆจนผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็น เส้นเกลียว แผ่น แท่ง หลอด ทรงกลม หรือ วงแหวน ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวชนิดนี้ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดแรงเฉือนสูง การพองของผลิตภัณฑ์เกิดจากการทำให้ส่วนผสมของโดร่อนจนอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยความร้อนและแรงทางกลจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ทำให้ความดันภายในเครื่อง สูงกว่าความดันบรรยากาศ และเมื่อวัตถุดิบอาหารเคลื่อนผ่านช่องเปิดของหน้าได (Die) น้ำในวัตถุดิบอาหารซึ่งเป็นน้ำร้อนยิ่งยวด (Superheated water) จะระเหยกลายเป็นไออย่างรวดเร็วได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะ พองกรอบ ความหนาแน่นต่ำ และมีรูปแบบต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะของช่องเปิดหน้าแปลน หลังจากนั้นนำไปอบไล่ความชื้น แล้วเคลือบกลินรสต่าง ๆ ตามความต้องการ (Moore, 1994)

2.2.2 คุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว

ในปัจจุบันกลุ่มผู้บริโภคที่เป็นเด็กนิยมบริโภคอาหารขบเคี้ยวกันมากขึ้น พลังงานจากการบริโภคอาหารขบเคี้ยวคิดเป็นร้อยละ 20 ของพลังงานที่ได้จากการบริโภคอาหารทั้งหมดใน 1 วัน (Ranhotra และ Vetter, 1991) สารอาหารจากองค์ประกอบหลักที่เป็นส่วนผสมของอาหารขบเคี้ยวที่ได้จากการบริโภคอาหารขบเคี้ยวของเด็กในประเทศอเมริกา คิดเป็นร้อยละของปริมาณที่แนะนำในแต่ละวัน (Recommended Dietary Allowances ; RDA) แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารอาหารที่ได้จากการบริโภคอาหารขบเคี้ยวของเด็กอเมริกัน คิดเป็นร้อยละของปริมาณที่แนะนำต่อวัน (RDA)

สารอาหาร	ปริมาณ (ร้อยละ RDA)	สารอาหาร	ปริมาณ (ร้อยละ RDA)
พลังงาน	19	ไรโบฟลาวิน	15
โปรตีน	11	วิตามินบี 6	12
คอเลสเตอรอล	17	วิตามินบี 12	10
ไขมัน	12	วิตามินซี	18
คาร์โบไฮเดรต	22	แคลเซียม	16
เส้นใยอาหาร	16	โซเดียม	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิตามินเอ	10	เหล็ก	11
ไทอะมิน	12	สังกะสี	12

ที่มา : (Ranhotra และ Vetter ,1991)

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าอาหารขบเคี้ยวอุดมไปด้วยแป้งซึ่งเป็นสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตและไขมันซึ่งเป็นแหล่งที่ให้พลังงาน แต่ยังคงขาดคุณค่าทางอาหารจากส่วนอื่น ๆ เช่น โปรตีน วิตามิน แคลเซียม ดังนั้นผู้ผลิตจึงควรมีการเติมสารอาหารส่วนอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการในอาหารขบเคี้ยว

2.2.3 ประเภทของอาหารขบเคี้ยว

แบ่งตามวิธีการผลิตเป็น 4 ประเภท (นฤคินทร์, 2541) คือ

(1) Deep fat fried เป็นผลิตภัณฑ์ทอดในน้ำมันอุณหภูมิ 162–205 °C นาน 3 นาที นิยมใช้กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแบบแผ่น แท่ง วงแหวน และรูปแบบต่างๆ

(2) Quick fried เป็นผลิตภัณฑ์ทอดที่อุณหภูมิสูงประมาณ 200 °C ในระยะเวลาสั้น 10 – 15 วินาที นิยมใช้กับลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะแผ่นบางๆ

(3) Extrusion cooked ใช้ธัญพืชทั้งเมล็ดหรือใช้แป้งผสมน้ำ ทำให้เกิดโด (Dough) และสุกภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูปร่างเป็นแผ่นบางสามารถปรับขนาดตามความต้องการได้

(4) Roasted เป็นการอบ นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทถั่ว

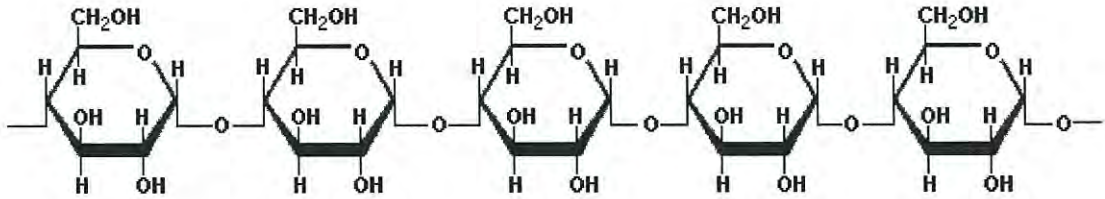
2.3 องค์ประกอบของแป้ง

แป้ง คือ คาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นสายพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (amylopectin) (กลาณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

2.3.1 อะไมโลส (amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 500-6,000 หน่วย ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 - glycosidic linkage (รูปที่ 5) แป้งแต่ละชนิดมีปริมาณของอะไมโลสที่แตกต่างกันออกไป แป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งข้าวสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูง (ประมาณ 25-35%) แป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคุ มีปริมาณ อะไมโลสต่ำกว่า (ประมาณ 15-20%) น้ำหนักของอะไมโลสอยู่ในช่วง 10^5 ถึง 10^6 ดาลตัน ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีขนาดโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมีขนาดโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะไมโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ลดลง (Hizukuri, 1986)

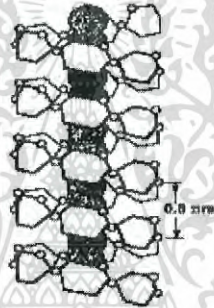
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลส

(ที่มา : <http://www.scientificpsychic.com>)

อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น butanol, fatty acid, surfactant, phenol และ hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมสารประกอบอินทรีย์ (Gallaird และ Bowler, 1987) ดังรูปที่ 2.5 อะไมโลสที่รวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลส



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองการจับตัวของอะไมโลสกับสารอินทรีย์

(ที่มา : Gallaird และ Bowler, 1987)

ตำแหน่งของอะไมโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะไมโลสบางส่วนแทรกอยู่ในกลุ่มของอะไมโลเพคติน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystallite) ในแป้งสาลีพบอะไมโลสอยู่ร่วมกับอะไมโลเพคตินในส่วนผลึก จากการศึกษาการเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งมันฝรั่งบ่งชี้ว่าอะไมโลสกระจายอยู่ในส่วนรอบนอกของแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในใจกลางเม็ดแป้ง (Jane และ Shen, 1993) อะไมโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะไมโลเพคตินอยู่ใจกลางเม็ดแป้งส่วนอะไมโลสขนาดเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดแป้ง จากการศึกษาตำแหน่งของอะไมโลสในแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่งโดยการตัดแปรแป้งด้วยวิธีการโครสลิงค์ บ่งชี้ว่าอะไมโลสกระจายอยู่ทั่วไปในส่วนของอะไมโลเพคตินมากกว่าที่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (Jane et al., 1992; Kasemsuwan and Jane, 1994)

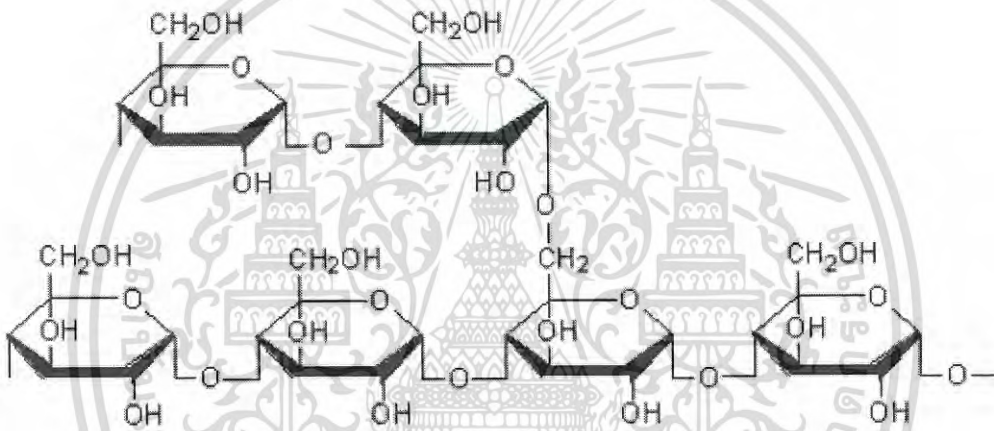
โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (random coil) ในสารละลายที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้อง อะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว อะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้ง 6,500 ถึง 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและจะไม่ละลายในสารละลาย สำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 อาจจะมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Whistler et al., 1984)

2.3.2 อะไมโลเพคติน (amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นสายตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1,4 (α -1,4 -glycosidic linkage) และจุดที่แตกกิ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1,6 (α -1,6 -glycosidic linkage) สายโซ่กิ่งประกอบด้วยกลูโคสในช่วง 6 ถึง 100 หน่วย ลักษณะโมเลกุลของอะไมโลเพคตินแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน

(ที่มา : <http://www.scientificpsychic.com>)

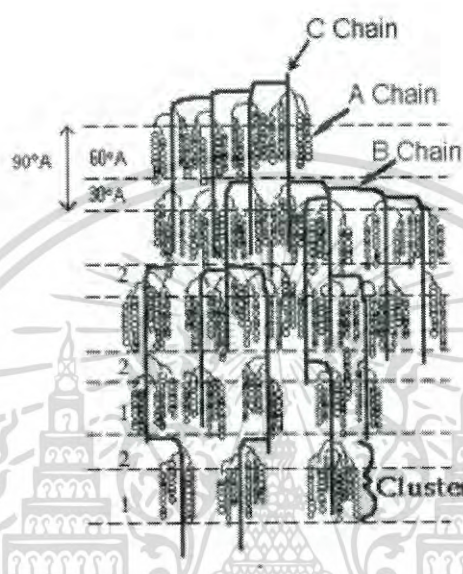
หน่วยกลูโคสที่มีพันธะไกลโคซิดิกชนิด α -1,6 -glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสทั้งหมดในอะไมโลเพคติน ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพคตินอยู่ในช่วง 5,000 ถึง 40,000 หน่วยกลูโคส อะไมโลเพคตินมีอัตราในการคืนตัวต่ำเนื่องจากมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

โครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพคตินประกอบด้วยสาย (chain) 3 ชนิด คือ

- 1) สาย A (A-chain) เป็นสายที่เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว
- 2) สาย B (B-chain) เป็นสายที่เชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สาย หรือมากกว่า
- 3) สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะไมโลเพคตินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดสายโซ่ของอะไมโลเพคตินมีตั้งแต่ขนาดเล็กซึ่งมี DP ประมาณ 6 หน่วย ไปจนถึงสายยาวที่มี DP 100 หน่วยหรือมากกว่า โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 20-30 หน่วย (Robin et al., 1974) ศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของอะไมโลเพคตินจากมันฝรั่ง พบว่าโครงสร้างของอะไมโลเพคติน ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่มีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบหรือ ส่วนผลึก เรียกว่า crystallite region และส่วนที่ไม่เป็นระเบียบหรือส่วนอสัณฐาน เรียกว่า amorphous region แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างอะไมโลเพคตินที่ประกอบด้วยส่วนผลึกและส่วนอสัณฐาน

1 = ส่วนผลึก 2 = ส่วนอสัณฐาน

(ที่มา : Robin et al., 1974)

ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวนหนาแน่นที่เรียกว่า growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ เม็ดแป้งที่มีขนาดใหญ่ในสภาพเปียกและสดจะสังเกตเห็นวงแหวนได้ง่าย ส่วนในสภาพที่แห้งจะไม่พบวงแหวน สำหรับเม็ดแป้งที่มีขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์และแป้งข้าวเจ้าจะสังเกตจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ได้ยาก แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งมาผ่านปฏิกิริยาเคมีหรือย่อยด้วยเอนไซม์และศึกษาด้วยกล้อง SEM (French, 1984) จากโครงสร้างของวงแหวนแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเจริญของเม็ดแป้ง โดยเนื้อเยื่อชั้นแรกจะเจริญมาจากศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (hilum) ซึ่งส่วนนี้ประกอบด้วยส่วน reducing end ของโมเลกุลแป้ง และมีส่วนที่เป็น non-reducing end ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแผ่กระจายออกไป (Oates, 1997) จุดเชื่อมกิ่ง(branch point) ของอะไมโลเพคตินอยู่ในส่วนอสัณฐานและสายโซ่อยู่ในส่วนผลึก (French, 1984)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 คุณสมบัติของแป้ง

(1) การดูดซับ การพองตัว และการละลายน้ำ

การเติมน้ำลงไปแป้ง และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำที่เติมลงไปจนเกิดคุณสมบัติภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมลงไปกับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิขณะนั้น น้ำในเม็ดแป้ง มีอยู่ 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก น้ำในรูปที่ไม่อิสระหรือน้ำยึดเหนี่ยว (bound water) และน้ำในรูปอิสระ (free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่น ลดลงตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8–10% สามารถจับกับน้ำได้ น้อยกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะโคสตาโรไฮโมโนไฮเดรต $[n(C_6H_{10}O_5 \cdot H_2O)]$ น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่ และผ่านเข้าไปในไมเซลล (micelles) ของเม็ดแป้งได้อย่าง อิสระ ทดสอบได้จาก การแขวนลอยของเม็ดแป้งในสารละลายไอโอดีนเจือจาง จะเกิดสีขึ้นในเม็ดแป้ง เมื่อใส่โซเดียมไทโอซัลเฟตลงไป พบว่าสีจะหายไปอย่างรวดเร็วและเมื่อนำมาส่องไปส่องกล้องจุลทรรศน์ พบว่าเม็ดแป้งมีรูพรุนจำนวนมาก จึงทำหน้าที่เป็นตัวคัดขนาดโมเลกุล (molecule sieve) รูพรุนที่เกิดขึ้นใน ขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง หรืออาจมีอยู่แล้วในแป้งธรรมชาติแต่จะมีขนาดใหญ่ขึ้นในขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตแป้ง แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาตินไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่ถ้ามีการผสมแป้งกับน้ำในอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิเจลาตินไนซ์ (ถ้าอุณหภูมิและ เวลา, 2546) ความร้อนจะไปทำลายพันธะไฮโดรเจน โมเลกุลของแป้งจะเข้าไปจับตัวกับน้ำ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายขึ้นกับชนิดของแป้ง ความแข็งแรงของเม็ดแป้ง ลักษณะร่างแหภายในเม็ดแป้ง คุณสมบัติหลังการตัดแปรรูป เคมี และปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว และบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา กำลังการพองตัวแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้

(2) ความหนืด

ความหนืด คือ ความต้านทานการไหลของของไหล ของเหลวซึ่งมีการต้านทานการไหลมากจะมี ความหนืดสูง ซึ่งความหนืดเป็นคุณสมบัติสำคัญของวัตถุดิบอาหาร สามารถใช้เป็นข้อ กำหนดมาตรฐานคุณภาพและใช้เพื่อควบคุมขั้นตอนการผลิตด้วย

ก. ปัจจัยการเกิดความหนืด

ความหนืดเป็นคุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยปัจจัยที่มีผลต่อความหนืด ได้แก่

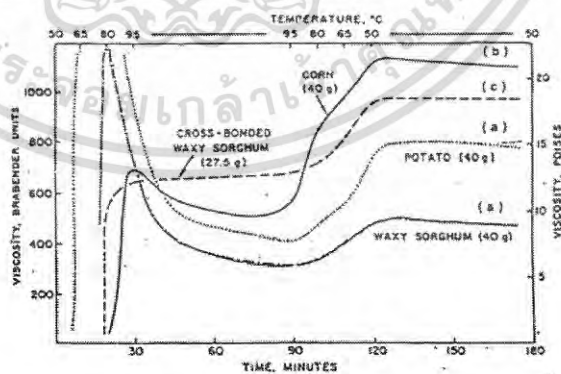
(1) ชนิดของแป้ง

แป้งแต่ละชนิดจะมีความหนืดแตกต่างกันไป เมื่อนำน้ำแป้งไปให้ความร้อนและมีการกวนอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 2.5 นาที จะพบว่าเม็ดแป้งจากธัญพืชจะมีการพองตัวสูง ทำให้แรงที่ยึดกันภายในโมเลกุลแป้งอ่อนตัวลง เม็ดแป้งจะกระจายตัวออกเมื่อได้รับแรงเฉือนและมีความหนืดสูง

ระหว่างการต้มสุก เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวฟ่าง เม็ดแป้งที่มีการพองตัวปานกลาง เม็ดแป้งไม่พองตัวมากถึงขั้นกระจายตัวออก มีความหนืดและเกิดการสลายตัวระหว่างการต้มสุกน้อยกว่าเม็ดแป้งที่มีการพองตัวสูง ได้แก่ เม็ดแป้งจากธัญพืชต่าง ๆ ส่วนเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อย เช่น แป้งถั่วชนิดต่าง ๆ มีความหนืดต่ำ และเม็ดแป้งที่มีการพองตัวน้อยมาก ได้แก่ แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูง เช่น แป้งข้าวโพด อะมิโลเมสที่มีอะมิโลส 50 – 80% มีความหนืดต่ำ

(2) การตัดแปรของแป้ง

- การตัดแปรทางกายภาพ ได้แก่ การลดขนาดทางกล การเกิดเจลลาติโนเซชัน เช่น แป้งพรีเจลลาติไนซ์ (pregelatinized starch) สามารถกระจายตัวในน้ำเย็นหรือที่อุณหภูมิห้อง และให้ความหนืดทันทีที่เหมาะสมในการผลิตอาหารที่ไม่ต้องให้ความร้อน เช่น น้ำเกรวี่ ซอส หรือครีมหน้าขนมต่าง ๆ
- การตัดแปรทางเคมี ได้แก่ การลดขนาดโมเลกุลด้วยกรดอะซิติกหรือเดกซ์ทรีโนเซชัน (dextrinization) ขณะให้ความร้อนจะให้ความหนืดต่ำกว่าแป้งดิบ เจลที่ได้จะมีลักษณะใสและแข็งกว่า แป้งดิบ ใช้สำหรับผลิตลูกกวาด ทอฟฟี่
- การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ได้แก่ แป้งเอสเตอริสตาเรซ อะซีเทต (ester starch acetate) และสตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (starch phosphate mono- ester) ซึ่งมีความหนืดสูงกว่าแป้งดิบและคงความหนืดไว้ได้ดี มีอุณหภูมิที่เกิดความหนืด (pasting temperature) ต่ำกว่าแป้งดิบ มีลักษณะเจลใส และมีความคงตัวในอุณหภูมิที่เหมาะสมใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารเยือกแข็ง หรืออาหารที่ต้องการความข้นหนืดและต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำในระหว่าง การขนส่งและการเก็บรักษา



รูปที่ 2.8 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งชนิดต่างๆ
(ที่มา: Pomeranz, 1985)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) การเกิดเจลาตินในเซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) ดังนั้นการเรียงตัวลักษณะนี้ทำให้เม็ดแป้งละลายตัวในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นเม็ดแป้งจึงดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและ พองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดและใสมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งจะเคลื่อนตัวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเจลาตินในซ์ เมื่อวัด ด้วยเครื่องมือตรวจวัดความหนืด มักเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

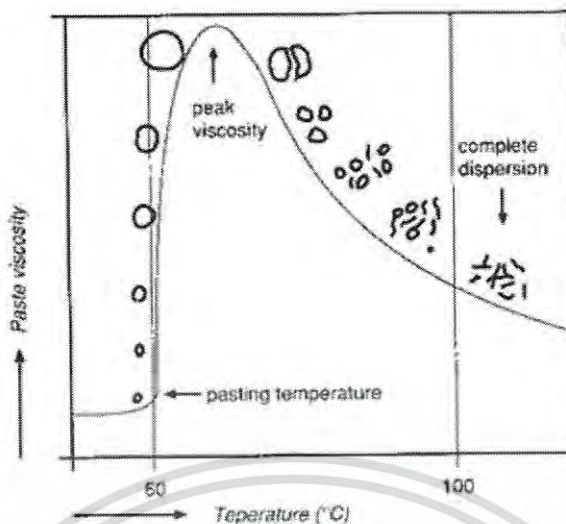
การเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ ดังนี้ (รูปที่ 2.10)

(1) ระยะแรก เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและมีการพองตัวแบบผันกลับได้ มีความยืดหยุ่นจำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยไม่เพิ่มขึ้น เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและเป็นโครงสร้างแบบที่ เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ (birefringence) เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้ น้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 °C

(2) ระยะที่สอง เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหภายในเม็ดแป้งจะอ่อนลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลายเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำได้มากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่า การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization) เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งจะละลายออกมา ถ้าแยกส่วนใส่ออกมาไปทดสอบกับไอโอดีนจะเกิดสีน้ำเงิน

(3) ระยะที่สาม เม็ดแป้งจะมีรูปร่างไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล

ความหนืดสูงสุดของสารละลายแป้งในระหว่างการเกิดเจลาตินในซ์จะเปลี่ยนไปตามชนิดของแป้ง แป้งมันฝรั่งจะให้ความหนืด (peak viscosity) สูงสุด หรือความข้นหนืด(thickening) สูง ในขณะที่แป้งข้าวโพดและแป้งสาลีจะให้ความหนืดต่ำ



รูปที่ 2.9 ระยะการเกิดเจลลาตินในเซชัน
(ที่มา : กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546)

(4) การเกิดรีโทรเกรดชัน

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาตินในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดพองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะแตกตัวทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลของอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก จะให้ความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเป็นเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว (setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไป อีกลักษณะการจับเรียงตัวของโมเลกุลจะหนาแน่นขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบอัดออกมา นอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระและมีความหนืดมากขึ้น การคืนตัวของแป้งที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เจลขุ่น การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด - เบสของสารละลาย ปริมาณและ ขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับกรรมวิธีการผลิตอาหารขบเคี้ยวจากสาหร่ายสไปรูรีน่าด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอาหารขบเคี้ยวจากสาหร่ายสไปรูรีน่าด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน และกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอาหารขบเคี้ยวจากแป้งชนิดต่างๆด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน โดยกลุ่มวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสาหร่ายสไปรูรีน่า ได้แก่ Vijayarani et al. (2012) ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทโดยใช้สาหร่ายสไปรูรีน่า Joshi et al. (2012) ศึกษาการทำ

Extrusion Cooking โดยการผสมระหว่าง Maize กับ Spirulina และปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ Morsy (2015) ศึกษาการผลิตและประเมินผลผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ใช้สำหรับสาหร่ายสไปรูลีนา Singh et al. (2017) ศึกษาการเสริมกำลังของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทด้วยสาหร่ายสีน้ำตาล (*Sargassum tenerrimum*) และการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการโดยวิธีการตอบสนองพื้นผิว

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอาหารขบเคี้ยวจากแป้งชนิดต่างๆด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ได้แก่ นิพัทธ์ และคณะ (2009) ศึกษาอิทธิพลของแป้งข้าวโพดบดหยาบตัดแปรด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีในผลิตภัณฑ์อัดพอง สันติ และคณะ (2008) ศึกษาผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากปลายข้าวโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรู และ Bhosale et al. (2015) ศึกษาการแปรรูปและโภชนาการโดยองค์ประกอบของรำข้าว

Vijayarani et al. (2012) ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทโดยใช้ปริมาณของสาหร่ายสไปรูลีนาในอัตราส่วนที่แตกต่างกันคือ 5% 10% และ 15% โดยผลจากการศึกษาดังกล่าวสรุปว่า ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ซึ่งมีส่วนผสมของสาหร่าย 5% พบว่าปริมาณสารอาหารในผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้รับการพัฒนานี้จะช่วยแก้ปัญหาทางด้านโภชนาการภายในชุมชนให้ดียิ่งขึ้น

Joshi et al. (2012) ศึกษาการทำ Extrusion Cooking โดยการผสมระหว่าง Maize กับ Spirulina และปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ โดยผลจากการศึกษาดังกล่าวสรุปว่า ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่มีการผสมสาหร่ายสไปรูลีนาซึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการที่สูงกับแป้งข้าวโพด ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและส่งผลให้ผู้บริโภคมีสุขภาพที่ดีด้วย จึงเป็นโอกาสสำหรับผู้ผลิตอาหารที่ปัจจุบันผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่ส่งผลดีทางด้านสุขภาพแก่ผู้บริโภคน้อย

Morsy (2015) ศึกษาการผลิตและประเมินผลผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ใช้สำหรับสาหร่ายสไปรูลีนา โดยผลจากการศึกษาดังกล่าวสรุปว่า สาหร่ายสไปรูลีนาเป็นอาหารที่น่าสนใจด้วยเหตุผลหลายประการซึ่งมันอุดมไปด้วยโปรตีน กรดอะมิโนและวิตามินตามธรรมชาติที่สูง ดังนั้นสาหร่ายเกลียวทองจึงมีประโยชน์และจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของเด็ก

Xavier et al. (2017) ศึกษาการเสริมกำลังของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทด้วยสาหร่ายสีน้ำตาล (*Sargassum tenerrimum*) และการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการโดยวิธีการตอบสนองพื้นผิว ซึ่งใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่และใช้การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken โดยผลจากการศึกษาดังกล่าวสรุปว่า ความชื้นของอาหารมีผลเชิงสำคัญสูงที่สุดเกี่ยวกับการขยายตัวและพารามิเตอร์ความพรุนของเอ็กซ์ทรูเดท

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตอาหารขบเคี้ยวจากแป้งชนิดต่างๆด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ได้แก่

นิพัทธ์ และคณะ (2009) ศึกษาอิทธิพลของแป้งข้าวโพดบดหยาบตัดแปรด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีในผลิตภัณฑ์ซึ่งก็คือ อัตราการพองตัว ความหนาแน่นรวมความสามารถในการดูดซับน้ำ การละลายน้ำ ความหนืด คุณสมบัติการไหลและลักษณะเนื้อสัมผัส โดยผลจากการศึกษาสรุปว่า ในกรณีของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว การเพิ่มปริมาณแป้ง ความชื้นเริ่มต้น และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วรอบสกรู จะช่วยพัฒนาลักษณะทางกายภาพที่ดีของผลิตภัณฑ์ ในด้านของอัตราการพองตัวที่สูงขึ้น ความแข็งแรงต่างลดลง และความกรอบที่มากขึ้น

สันติ และคณะ (2008) ศึกษาผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากปลายข้าวโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว โดยผลจากการศึกษาสรุปว่า ความเร็วรอบสกรูและความชื้นของวัตถุดิบ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้ ขณะที่ความเร็วรอบของใบมีดมีผลเล็กน้อยต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดต

Bhosale et al. (2015) ศึกษาการแปรรูปและโภชนาการโดยองค์ประกอบของรำข้าว โดยผลจากการศึกษาสรุปว่า รำข้าวเป็นวัตถุดิบที่ได้ระหว่างกระบวนการแปรรูปข้าว โดยรำข้าวสำเร็จรูปอุดมไปด้วยแหล่งโปรตีน, ไขมัน, เส้นใย, โยอาหารรวม, คาร์โบไฮเดรต, แกล็ก, แคมเบียม, ฟอสฟอรัส, เหล็ก และสังกะสี โดยโปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส และธาตุเหล็กจะเพิ่มขึ้นในรำข้าวโปรไบโอติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัตถุดิบ เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบ

- 1) สาหร่ายเกลียวทอง (Spirulina Algae)
- 2) ปลายข้าวบด
- 3) แป้งมันฝรั่ง
- 4) แป้งมันสำปะหลัง
- 5) รำข้าว

3.1.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์

- 1) เครื่องเอ็กซ์ทราซัน ชนิดสกรูเดี่ยว
- 2) เครื่อง Hammer mill
- 3) เครื่อง Sieve shaker
- 4) เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT Plus
- 5) เครื่องวัดความชื้นเมลิตพันธุ์พีช (Ketts)
- 6) เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 และ 4 ตำแหน่ง
- 7) เครื่องวัดสี Hunter lab
- 8) ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
- 9) ตู้อบลมร้อน (Tray dryer)
- 10) เครื่องปั่น
- 11) โถดูดความชื้น
- 12) เครื่อง Centifuge
- 13) เวย์เนียร์ลิปเปอร์
- 20) บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 21) กระจกตวงพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร

3.2 การเตรียมวัตถุดิบ

ในการศึกษาใช้สาหร่ายสไปรูลิनाที่เพาะเลี้ยง ในโครงการสวนพระองค์สวนจิตรลดา ที่ผ่านการทำแห้งและถูกบดเป็นผงละเอียด นำมาผสมกับ แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และแป้งรำข้าวในอัตราส่วนต่างๆ ปลายข้าวเจ้าจะต้องนำมาผ่านการบดด้วยเครื่อง Hammer mill 2 ครั้ง โดยการบดครั้งที่ 1 ใช้ตะแกรงของเครื่องบดขนาด 2 มิลลิเมตร และการบดครั้งที่ 2 ใช้ตะแกรง 1 มิลลิเมตร ทำการปรับความค่าความชื้นให้คงที่ก่อนนำไปทดลองผลิตแบบเอ็กซ์ทราซัน

3.3 ขั้นตอนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน

3.3.1 การเตรียมเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

ในการทดลองครั้งนี้ ใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ซึ่งสกรูมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (d) 28 mm เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (D) 35 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนสกรูนับเป็นส่วนประกอบสำคัญของเครื่องสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ แบบผลิตภัณฑ์อาหารเช้า (breakfast cereal) และ ขนมขบเคี้ยว (snack)

3.3.2 ขั้นตอนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน

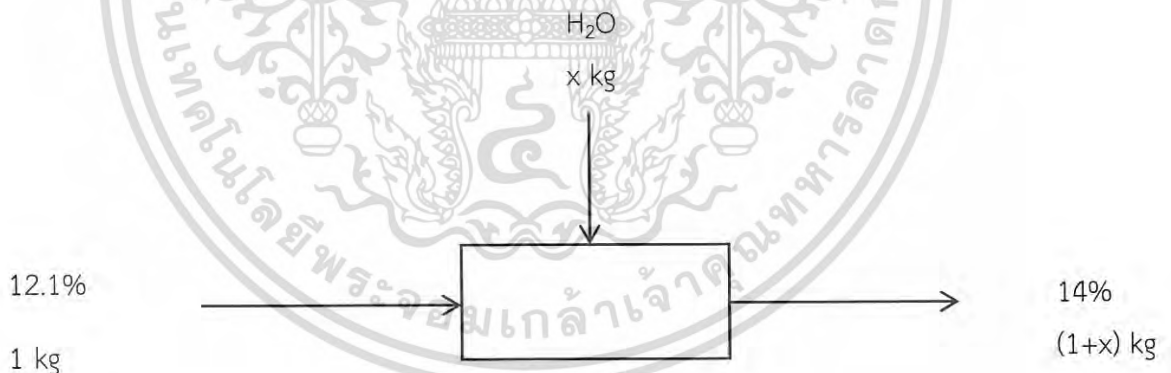
เตรียมนำตัวอย่างผสมเข้าด้วยกัน โดยมีแป้งมันฝรั่ง ในการทดลองเบื้องต้นปริมาณ 5 7.5 และ 10% แป้งมันสำปะหลังในระดับ 0 5 และ 10% แป้งข้าวเจ้าในระดับ 0 2.5 และ 5% ทำการผสมเข้าด้วยกันเตรียมตัวอย่างละ 1 กิโลกรัม แล้วปรับความชื้นโดยการผสมกับน้ำและทิ้งให้เข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิห้องก่อนนำไปทดลองด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ดำเนินผลิตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ขนาด L/D = 9.1 ความเร็วรอบของสกรู 450 รอบต่อนาที, อุณหภูมิบาร์เรล 100±10 องศาเซลเซียส, และระดับความชื้นของตัวอย่าง 14% เก็บตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดตไปทำการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

3.3.3 วิธีการคำนวณตามหลักสมดุลเพื่อปรับความชื้น

ตัวอย่าง วัตถุดิบเริ่มต้น 1 kg

วัตถุดิบมีความชื้นเริ่มต้น 12.1%

ต้องการปรับความชื้นให้วัตถุดิบมีความชื้น 14%



รูปที่ 3.1 แผนภาพสมดุลมวล

สมดุลมวล (Mass balance)

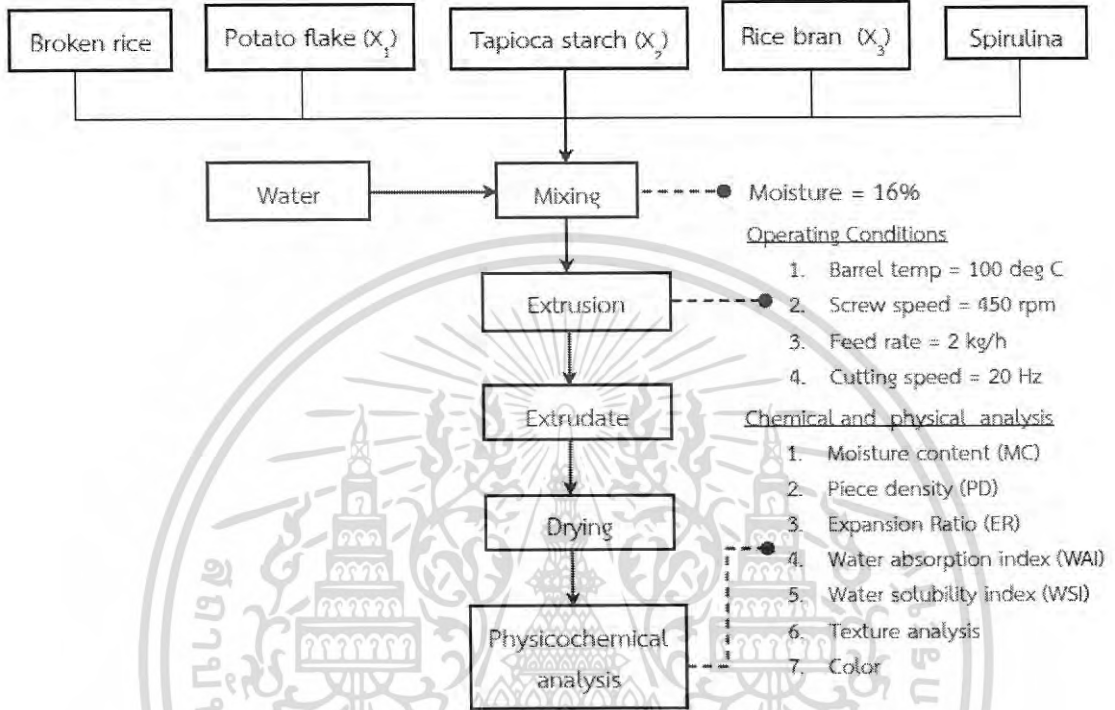
$$\begin{aligned} \frac{12.1}{100}(1000) + x &= \frac{14}{100}(1000 + x) \\ 121 + X &= 140 + 0.14X \\ (1-0.14)X &= 140-121 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = \frac{19}{0.86}$$

$$X = 22.09 \text{ g}$$

3.3.4 การหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสม



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน

3.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเด็ด

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเด็ดที่ได้ นำมาวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ (หรือค่าตัวแปรตามในข้อที่ 3.5.2) มีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 ค่าความชื้น (Moisture Content)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (AOAC, 1990)

1. ชั่งภาชนะอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด บันทึกค่าน้ำหนัก
2. นำตัวอย่างที่ผ่านการบดแล้วประมาณ 2 กรัม ใส่ลงในภาชนะอลูมิเนียม
3. นำภาชนะพร้อมฝาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ปิดภาชนะแล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้น ประมาณ 20 นาที
5. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ
6. คำนวณหาค่าความชื้นฐานเปียก ดังสมการ

$$MC (\% \text{ wb}) = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100 \tag{1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ความหนาแน่นชิ้น (Piece density)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Park, 1993)

1. นำผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตวัดความยาว และเส้นผ่านศูนย์กลาง บันทึกค่าที่ได้
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง บันทึกค่าที่ได้
3. ทำการวัดค่า 10 ซ้ำ
4. คำนวณหาความหนาแน่นชิ้น ดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่นชิ้น} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{4m}{\pi D^2 L} \quad (2)$$

3.4.3 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และค่าความสามารถในการละลายน้ำ (WSI)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Anderson, 1969)

1. บดตัวอย่างด้วยเครื่องปั่น
2. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการบด 2 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนัก
3. เติมน้ำกลั่นประมาณ 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนัก
4. ทำการคนให้สม่ำเสมอ เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง เครื่อง Magnetic stirrer
5. เทตัวอย่างลงในหลอด Centrifuge ที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้น
6. นำมาเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge โดยใช้ความเร็วที่ 3000 g เป็นเวลา 10 นาที
7. ปิดเครื่อง แยกส่วนใสที่ได้ลงในจานระเหยที่ทราบน้ำหนักและชั่งน้ำหนัก ส่วนตะกอนที่กั้น
หลอดให้นำมาชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า WAI ดังสมการ

$$\text{WAI} = \frac{\text{นน. ตะกอน}}{\text{นน. แห่งของตัวอย่างเริ่มต้น}} \quad (3)$$

8. ระเหยส่วนใสบนเครื่อง Hot plate จนแห้งแล้วจึงนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C จนน้ำหนักคงที่

9. นำจานระเหยออกมาวางไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาค่า WSI ดังสมการ

$$\text{WSI} = \frac{\text{นน. ของแข็งที่ละลายในส่วนใส}}{\text{นน. แห่งของตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100 \quad (4)$$

3.4.4 ลักษณะเนื้อสัมผัส

วิเคราะห์โดยเครื่อง Texture Analyzer (TA-XT.Plus. Stable Micro system Co., Ltd., UK)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ประกอบหัววัดแบบ โพรบรูปทรงกระบอกรุ่น P/2
2. เปิดเครื่องสำรองไฟ เปิดคอมพิวเตอร์และเครื่อง TA
3. เข้าโปรแกรม Texture Exponent 32
4. ทำการ Calibrate force โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน 3000 กรัม
5. ทำการ Calibrate height โดยตั้งระยะหัววัดให้สูงกว่าความสูงตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ตั้งค่าโปรแกรมโดยเลือกรูปแบบการทดสอบพร้อมทั้งจัดค่าความเร็วของหัววัดเริ่มต้น 2 mm/s ความเร็วขณะกดเป็น 2 mm/s ความเร็วของหัวกลับเป็น 10 mm/s ระยะใช้กด strain 50% trigger เป็น 5 g. และ Acquisition Rate เป็น 400 pps ตั้งหน่วยของกราฟที่ต้องการโดยแกน X เป็น เวลา (s) และแกน Y เป็นแรง(g)

7. นำตัวอย่างมา 1 ชิ้นและทำเครื่องหมายตามตำแหน่งที่ต้องการวัด
8. เดินเครื่องโดยควบคุมตำแหน่งกดให้มั่นคง รอจนกระทั่งเครื่องทำงานเสร็จ
9. ทำการวัดวัดค่าแรงกด 10 ซ้ำ
10. บันทึกกราฟที่ได้ อ่านค่าแรงแตกหักสูงสุด (g) และจำนวนพีก (Crispsness)
11. คำนวณหาค่า ดังสมการ

$$\text{Hardness} = \frac{\text{แรงแตกหักสูงสุด (g)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดของตัว อย่าง (mm}^2\text{)}} \quad (5)$$

$$\text{Cripsness} = \text{จำนวนพีกของกราฟจนถึง จุดที่เกิดค่าแรงสูงสุด} \quad (6)$$

3.4.5 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ (Expansion Ratio, ER)

คือ อัตราส่วนการพองของเอ็กซ์ทรูเดต

โดยสูตรการคำนวณ (Alvarez-Martinez, 1988) คือ

$$\text{ER} = \frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ ผลิตภัณฑ์}}{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางของ ช่องเปิดของ หน้าแปลน}} \quad (7)$$

3.4.6 สี (Color)

วิเคราะห์โดยเครื่อง Hunter lab

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. เปิดเครื่องสำรองไฟ เปิดคอมพิวเตอร์และเครื่อง Hunter lab
2. เข้าโปรแกรม EZMQC
3. ตั้งค่ามาตรฐานของเครื่องโดยใช้จานเทียบสี สีดำ และสีขาว อ่านค่าสี
4. พรอมกับเลือก ระบบวัดสีที่จะใช้วัด เลือกทำในระบบ XYZ และ ระบบ Lab*
5. เลือก D65/10
6. นำตัวอย่างวางลงบนช่องอ่านค่าสีด้านบนของเครื่อง แล้วครอบด้วยฝาครอบที่เป็นอุปกรณ์ของเครื่อง เพื่อป้องกันแสงจากแหล่งอื่น
7. กด Read อ่านค่ามาตรฐาน
8. บันทึกค่าสีที่ได้จากเครื่อง
7. ทำการวัดค่า 5 ซ้ำ

3.5 การกำหนดตัวแปรที่ศึกษา

ในการทดลองครั้งนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตที่มีผลต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้ โดยกำหนดตัวแปรเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 ตัวแปรอิสระ (Independent variables)

1. อัตราส่วนผสมแป้งมันสำปะหลัง แบ่งเป็น 3 ระดับ

1.1 0 %

1.2 5 %

1.3 10 %

2. อัตราส่วนผสมแป้งมันฝรั่ง แบ่งเป็น 3 ระดับ

2.1 5 %

2.2 7.5 %

2.3 10 %

3. อัตราส่วนผสมรำข้าว แบ่งเป็น 3 ระดับ

3.1 0 %

3.2 2.5 %

3.3 5 %

3.5.2 ตัวแปรตาม (Dependent variable)

1). ความชื้น (Moisture content)

2). ความหนาแน่นชิ้น (Piece density)

3). อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion Ratio, ER)

4). ความสามารถในการดูดซับ (Water Absorption Index)

5). ความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility Index)

6). ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture)

7). สี (Color)

3.6 การวางแผนการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้จะใช้ปลายข้าวบดเป็นวัตถุดิบหลักผสมกับแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง และรำข้าวซึ่งจะใช้ค่าความชื้นเริ่มต้นที่ 16% ความเร็วรอบของสกรูที่ 450 rpm

ใช้การวางแผนการทดลองแบบ Box-Behnken design แบ่งเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย 27 การทดลองที่สภาวะต่างๆ กันตารางที่ 3.1 โดยบอกความหมายของตัวแปรและสัญลักษณ์ตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์และความหมาย

สัญลักษณ์	ตัวแปรที่ศึกษา	ระดับ		
		-1	0	1
X_1	แป้งมันฝรั่ง (%)	5	7.5	10
X_2	แป้งมันสำปะหลัง (%)	0	5	10
X_3	รำข้าว (%)	0	2.5	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลอง

No.	X ₁	X ₂	X ₃
1.	-1	-1	0
2.	1	-1	0
3.	-1	1	0
4.	1	1	0
5.	-1	0	-1
6.	1	0	-1
7.	-1	0	1
8.	1	0	1
9.	0	-1	-1
10.	0	1	-1
11.	0	-1	1
12.	0	1	1
13.	0	0	0
14.	0	0	0
15.	0	0	0

3.7 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ผลการทดลองใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) โดยใช้รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพหุนามเมื่อยลอันดับที่ 2 เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดทที่ได้ รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดังนี้

$$Y_i = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_1^2 + a_5 X_2^2 + a_6 X_3^2 + a_7 X_1 X_2 + a_8 X_1 X_3 + a_9 X_2 X_3 \quad (8)$$

Y_i = คุณลักษณะของเอ็กซ์ทราเดท ได้แก่ ความหนาแน่นขึ้น ความสามารถในการดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำ ความชื้น ลักษณะเนื้อสัมผัส สี และอัตราส่วนการขยาย

X_i = ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณแป้งมันฝรั่ง ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง และปริมาณรำข้าว

a₀, a₁, a₂, a₃ = ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

การวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันและการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ 3-8 เพื่ออธิบายค่าคุณลักษณะต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิเคราะห์แบบถดถอยจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1. ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

เมื่อนำผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้ตามแผนการทดลองที่สภาวะต่างๆมาวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ ผลที่ได้แสดง ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่สภาวะการทดลองต่างๆ

No.	ตัวอย่าง PF:TS:RB	ความชื้น (%)	Density (g/cm ³)	ER (เท่า)	WAI (g/g)	WSI (%)	Hardness (g/mm ²)	Crispness (peak/mm ²)	L*	a*	b*
1	5:0:2.5	1.9951	0.1977	2.3956	6.0077	23.8445	12.7313	77.4000	58.6740	1.5920	19.8400
2	10:0:2.5	2.4712	0.1897	2.5000	5.4650	23.6902	15.2411	75.7000	56.3920	2.0380	16.4820
3	5:10:2.5	2.7538	0.2020	2.3967	5.3684	59.2938	11.8842	74.9000	56.5600	1.4920	15.8240
4	10:10:2.5	2.849	0.2077	2.4856	5.3521	32.9226	16.3307	59.7000	57.0720	2.1520	21.0460
5	5:5:0	3.2176	0.2049	2.4922	4.0634	40.2240	13.7288	72.9000	56.7420	1.5360	16.6780
6	10:5:0	3.107	0.2245	2.5022	4.2273	39.4043	14.7223	77.6000	50.9660	1.9820	18.8900
7	5:5:5	3.0826	0.2268	2.3056	4.1066	43.3917	16.2622	68.3000	55.2420	1.9040	16.4340
8	10:5:5	2.0529	0.1997	2.1622	3.3877	47.5482	15.1186	93.2000	59.1760	1.4940	19.0400
9	7.5:0:0	2.6921	0.2365	2.4433	4.5426	37.9828	11.2392	74.50000	58.3340	0.7760	17.3500
10	7.5:10:0	3.7652	0.2752	2.2389	3.8975	41.8062	19.1750	88.3000	54.2040	1.2780	18.2780
11	7.5:0:5	2.7802	0.2402	2.3700	4.4300	34.8699	13.1294	77.5000	53.9080	1.2980	18.3080
12	7.5:10:5	3.0438	0.2290	2.2378	3.6206	46.0387	13.0092	85.7000	58.8480	1.4940	19.4640
13	7.5:5:2.5	3.4214	0.2404	2.3422	3.8011	47.5539	12.9578	78.1000	55.7280	1.4140	16.2760
14	7.5:5:2.5	2.7236	0.2287	2.3011	3.9461	41.8061	13.9760	71.100	58.1840	1.3660	18.7920
15	7.5:5:2.5	2.4533	0.2134	2.2878	3.9127	42.8814	13.4572	80.8000	58.5100	0.7940	14.6240

หมายเหตุ PF = Potato Flake ,TS = Tapioca Starch ,RB = Rice Bran

4.2. คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

การผลิตเอ็กซ์ทรูเดตจากการกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันโดยทำการปรับส่วนผสมวัตถุดิบตามแผนการทดลองดังตารางที่ 3.2 เมื่อนำมาผลิตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ โดยมีค่าตัวแปร อัตราส่วนผสมของปริมาณแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และปริมาณรำข้าวที่แตกต่างกัน ผลกระทบต่อคุณลักษณะสามารถอธิบายด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยมีรายละเอียดที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ 3-8 เพื่ออธิบายค่าคุณลักษณะต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย

สปส.ตัวแปรในสมการ (8)	คุณลักษณะต่างๆของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดต									
	MC	Density	WAI	WSI	Hardness	Crispness	ER	L*	a*	b*
β_0	-2.2162	0.0383	3.8588**	26.8021	20.5174	103.3250	2.1307**	58.847***	5.5933	35.1213*
β_1	2.2759 *	0.0489*	0.1926	0.6875	-2.8223	-6.6550	0.0678	1.1526	-1.3545*	-4.0499
β_2	-0.0087	-0.0031	-0.1610*	5.9980	0.1113	-0.1108	0.0152	-0.7744	-0.0380	-2.0495**
β_3	1.3439 *	-0.0047	1.4333***	-5.8875	0.2454	-14.7967	0.1222	-1.9316	0.3120	-1.2423
β_{11}	-0.1416	-0.0031*	-0.0142	0.0185	0.2122	0.4413	-0.0032	-0.1722	0.0984*	0.2324
β_{22}	-0.0013	0.0005	0.0035	-0.0941	0.0203	0.2503	-0.0025	-0.0114	0.0039	0.0817
β_{33}	-0.1633	0.0043*	-0.2423**	0.8563	0.2268	1.9733	-0.0227	-0.3084	0.0013	0.2408
β_{12}	0.0009	0.0003	0.0105	-0.5243	0.0387	-0.27	-0.0003	0.0559	0.0043	0.1716**
β_{13}	-0.0855*	-0.0019*	-0.0353**	0.1990	-0.0855	0.808	-0.0061	0.3884	-0.0342	0.0158
β_{23}	0.0048	-0.0001*	-0.0033	0.1469	-0.1611	-0.112	0.0014	0.1814	-0.0061	0.0046
R^2	0.7470	0.9177	0.9890	0.7809	0.6403	0.4143	0.6716	0.8554	0.7645	0.7485
SE	0.5226	0.0107	0.1370	7.1178	2.0243	10.3873	0.1035	1.4508	0.3261	1.4712

หมายเหตุ * Significant at $p < 0.1$ ** Significant at $p < 0.05$ *** Significant at $p < 0.01$

X_1 = ปริมาณแป้งมันฝรั่ง (%), X_2 = ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(%), X_3 = ปริมาณรำข้าว(%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

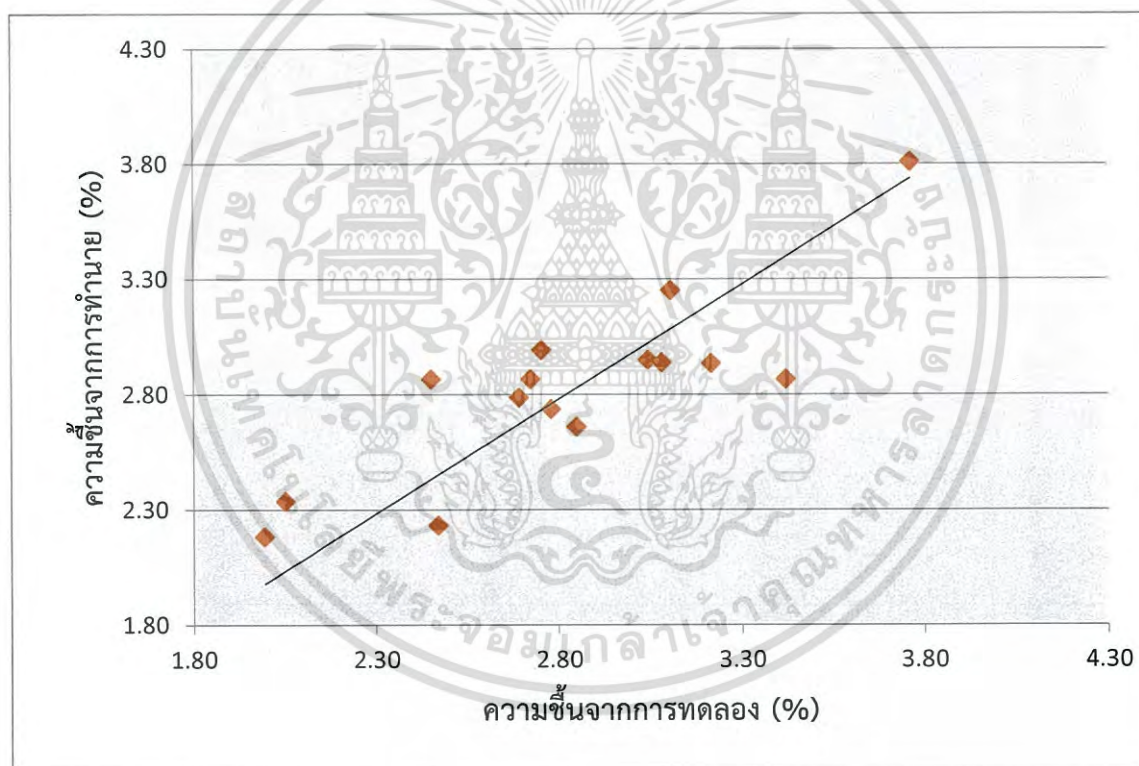
4.2.1 ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture content, MC)

ความชื้นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดตที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 1.99-3.76 % และจากสภาวะการผลิตต่างๆเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณแป้งมันฝรั่ง(x_1) ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(x_2) และปริมาณรำข้าว(x_3) โดยให้ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้นคงที่ที่ 16% , อุณหภูมิอบที่ 100 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 450 rpm จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

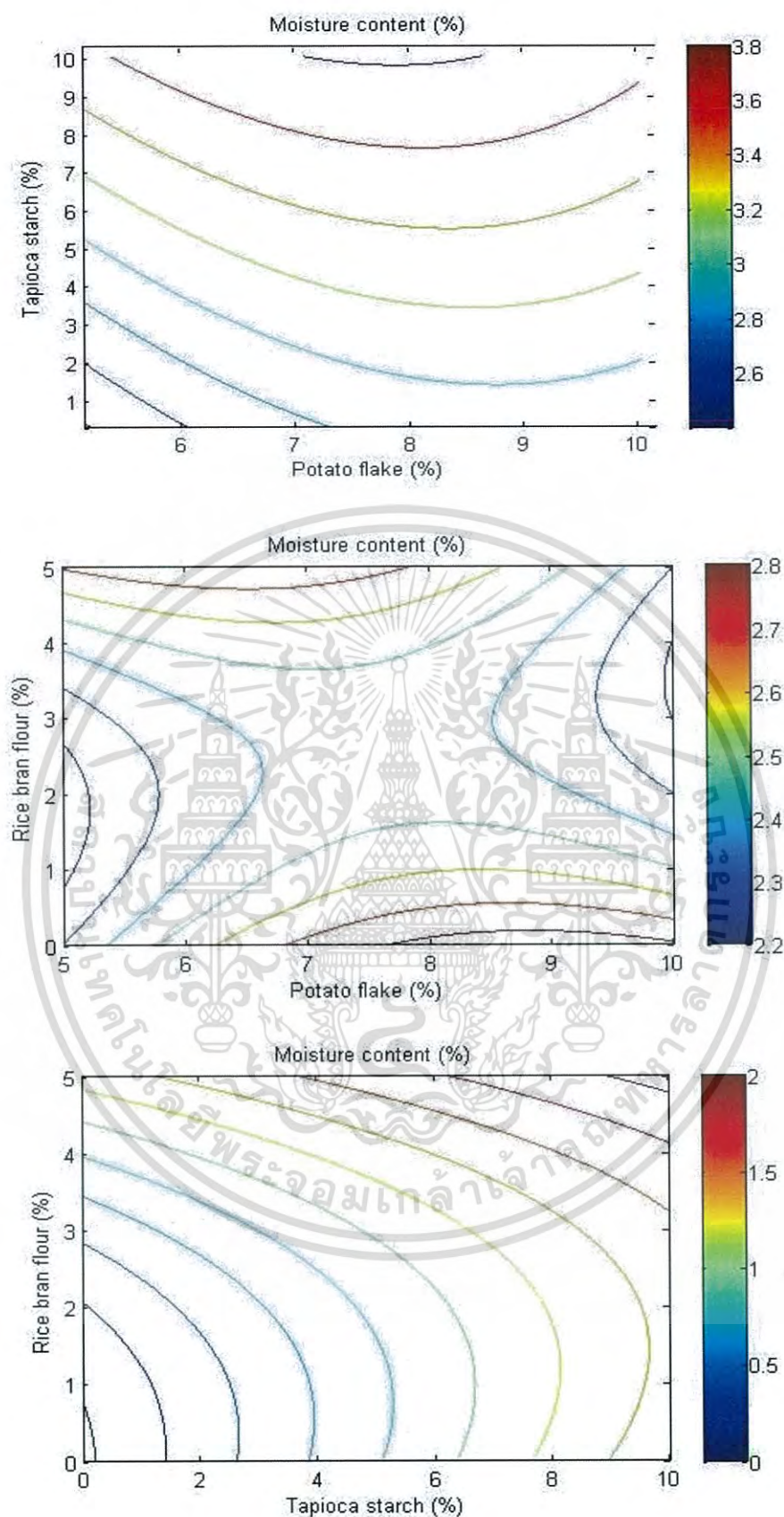
$$\begin{aligned} MC = & (-0.0349) + (0.6590)X_1 + (0.1689)X_2 + (0.0062)X_3 + (-0.0366)X_1^2 + \\ & (-0.0009)X_2^2 + (0.0519)X_3^2 + (-0.0076)X_1 X_2 + (-0.0368)X_2 X_3 + \\ & (-0.0162)X_1 X_3 \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$R^2 = 0.7134 \quad SE = 0.426$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-1 แสดงในรูปที่ 4.1

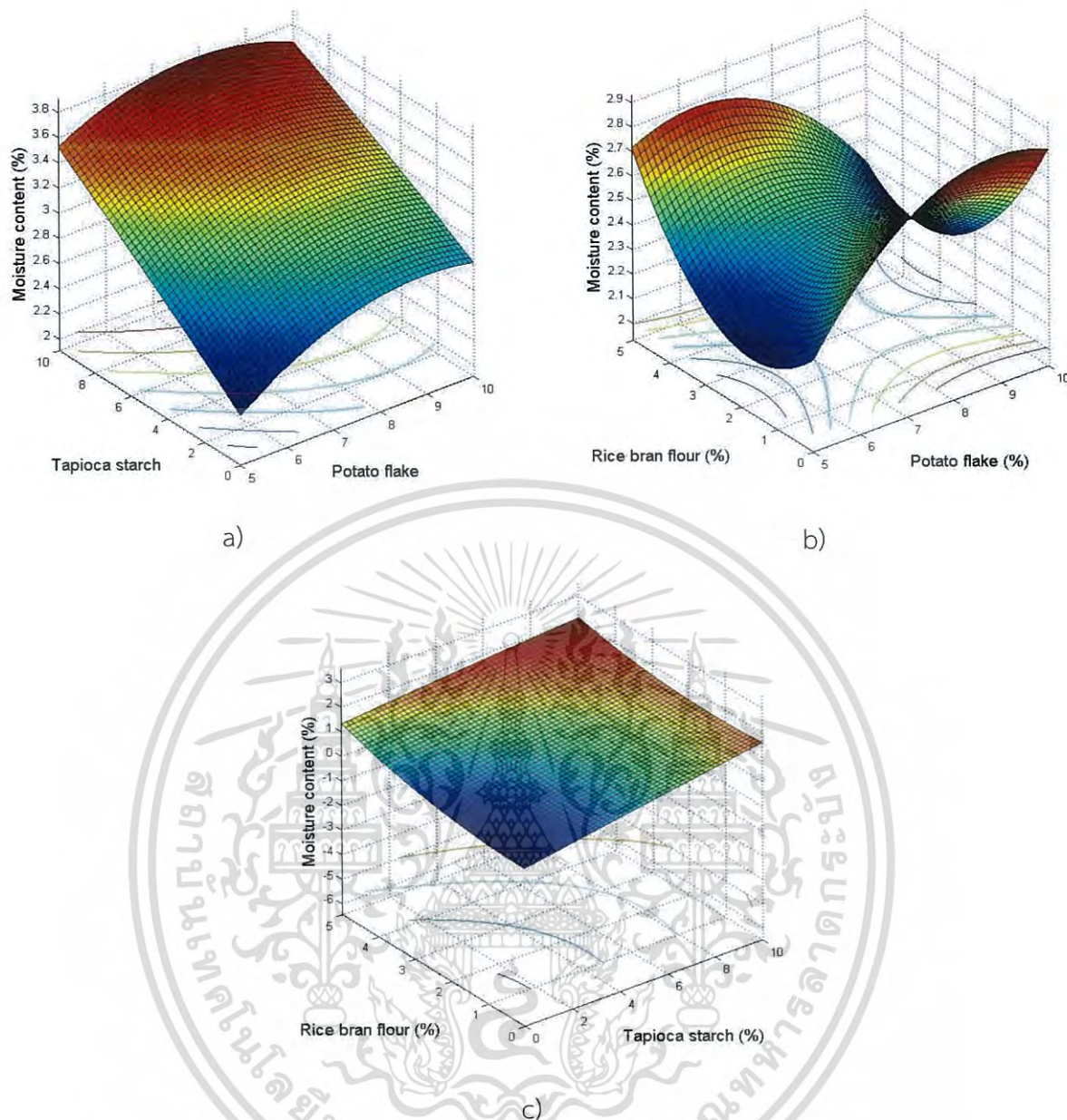


รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของเอ็กซ์ทราเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-1)



รูปที่ 4.2 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่าง a) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง b) แป้งมันฝรั่งและรำข้าว c) แป้งมันสำปะหลังและรำข้าว ที่มีผลต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์

จากกราฟเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่งให้มีอัตราส่วนจนถึงค่าประมาณ 8% และเพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่งให้มีอัตราส่วนที่ 10 % จะส่งผลให้ค่าความชื้นมีค่าสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มจนสูงกว่า 8% กลับทำให้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง

ส่วนการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังและรำข้าวให้มีอัตราส่วนที่สูงขึ้นนั้นก็ทำให้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์สูงขึ้นเช่นเนื่องจากโมเลกุลของแป้งมีความสามารถแตกตัวและสร้างพันธะทางเคมีกับน้ำได้ดีความชื้นที่ได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น

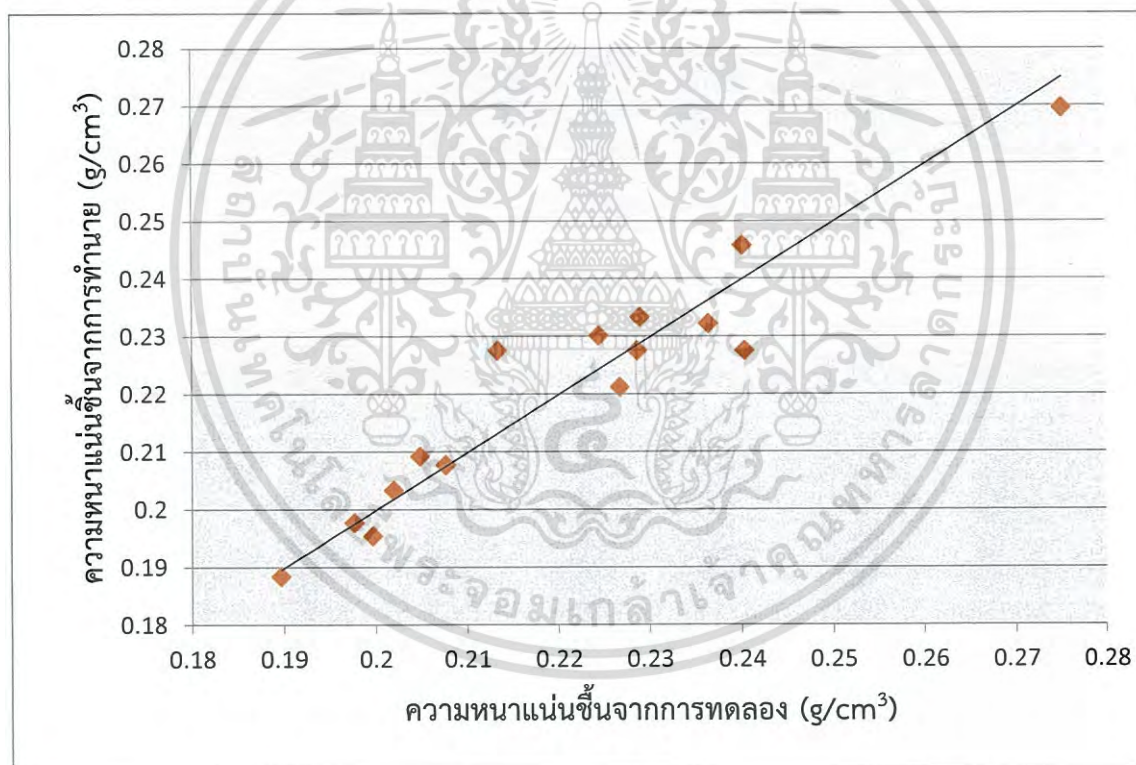
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ความหนาแน่นชิ้น (Piece density)

ความหนาแน่นชิ้นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเดตที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.19-0.28 (g/cm³) และจากสภาวะการผลิตต่างๆเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณแป้งมันฝรั่ง(x₁) ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(x₂) และปริมาณรำข้าว(x₃) โดยให้ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้นคงที่ที่ 16% ,อุณหภูมิบาร์เรลที่ 100 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 450 rpm จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

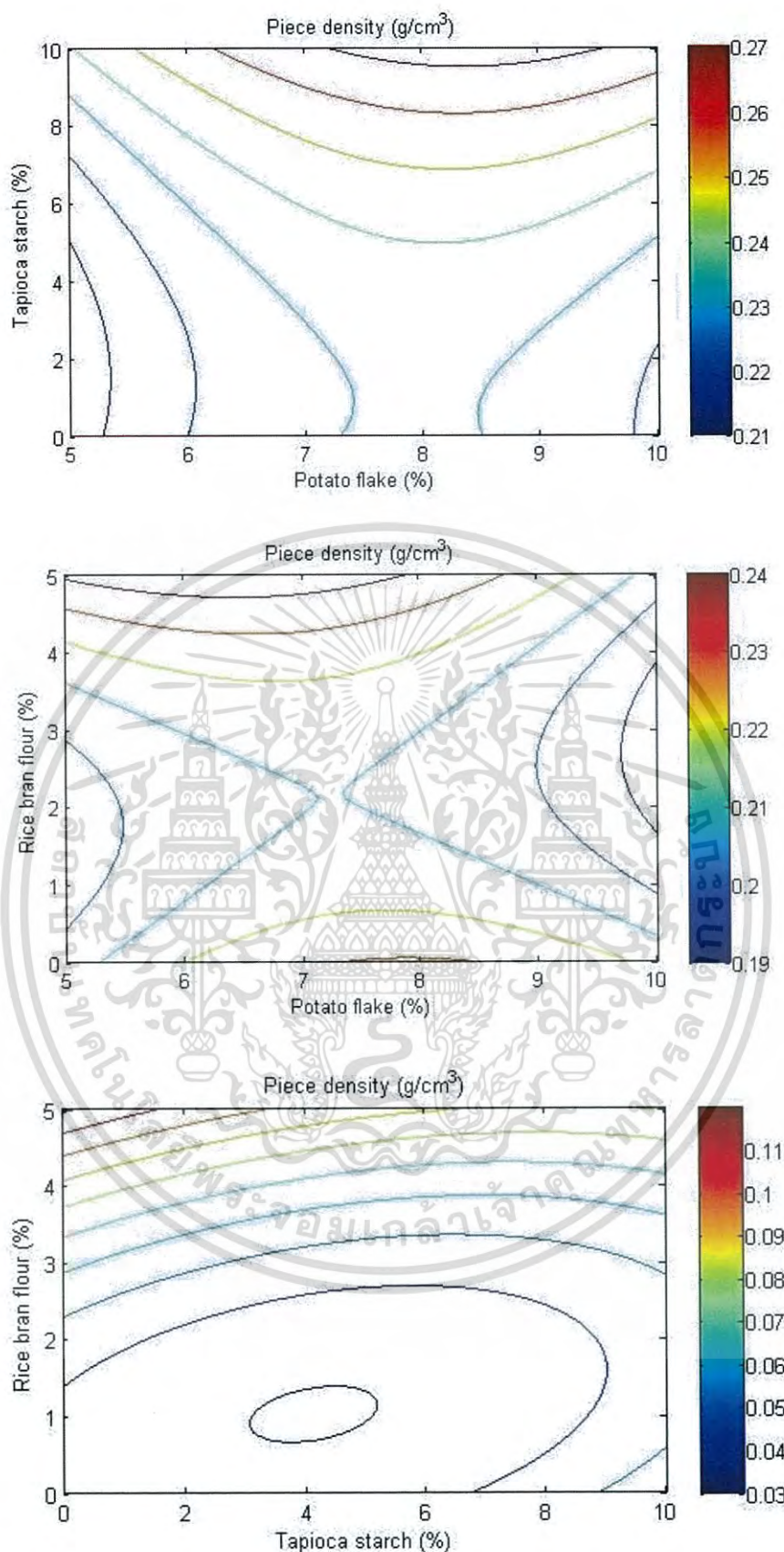
$$\begin{aligned}
 PD = & 0.0383 + (0.0489)X_1 + (-0.0031)X_2 + (-0.0047)X_3 + (-0.0031)X_1^2 + \\
 & (0.0005)X_2^2 + (0.0043)X_3^2 + (0.0003)X_1 X_2 + (-0.001)X_2 X_3 + \\
 & (-0.0019)X_1 X_3 \\
 R^2 = & 0.9178 \quad SE = 0.0107
 \end{aligned}
 \tag{4-2}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-2 แสดงในรูปที่ 4.4



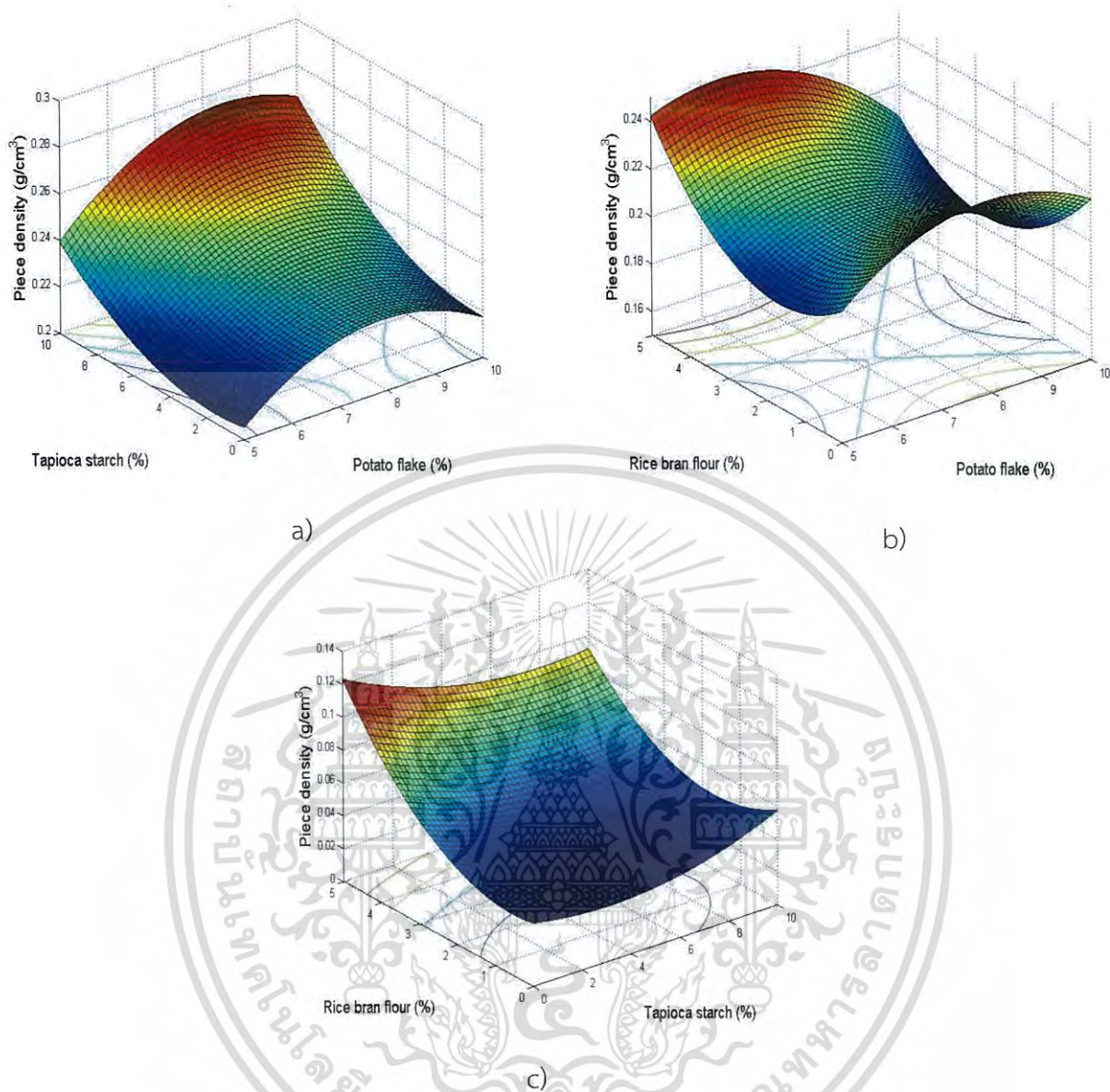
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความหนาแน่นชิ้นของเอ็กซ์ทราเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นชิ้นของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่าง a) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง b) แป้งมันฝรั่งและรำข้าว c) แป้งมันสำปะหลังและรำข้าว ที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นชิ้นของผลิตภัณฑ์

จากกราฟพบว่า การเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันฝรั่งให้สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันฝรั่งมีค่าปริมาณโปรตีนที่สูงกว่า ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นสูงขึ้น

ส่วนการเพิ่มปริมาณรำข้าว ซึ่งมีส่วนประกอบของไขมันสูงกว่าวัตถุดิบอื่น จึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นสูงขึ้นด้วย ส่วนการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ค่าอัตราส่วนการขยายตัว (Expansion Ratio)

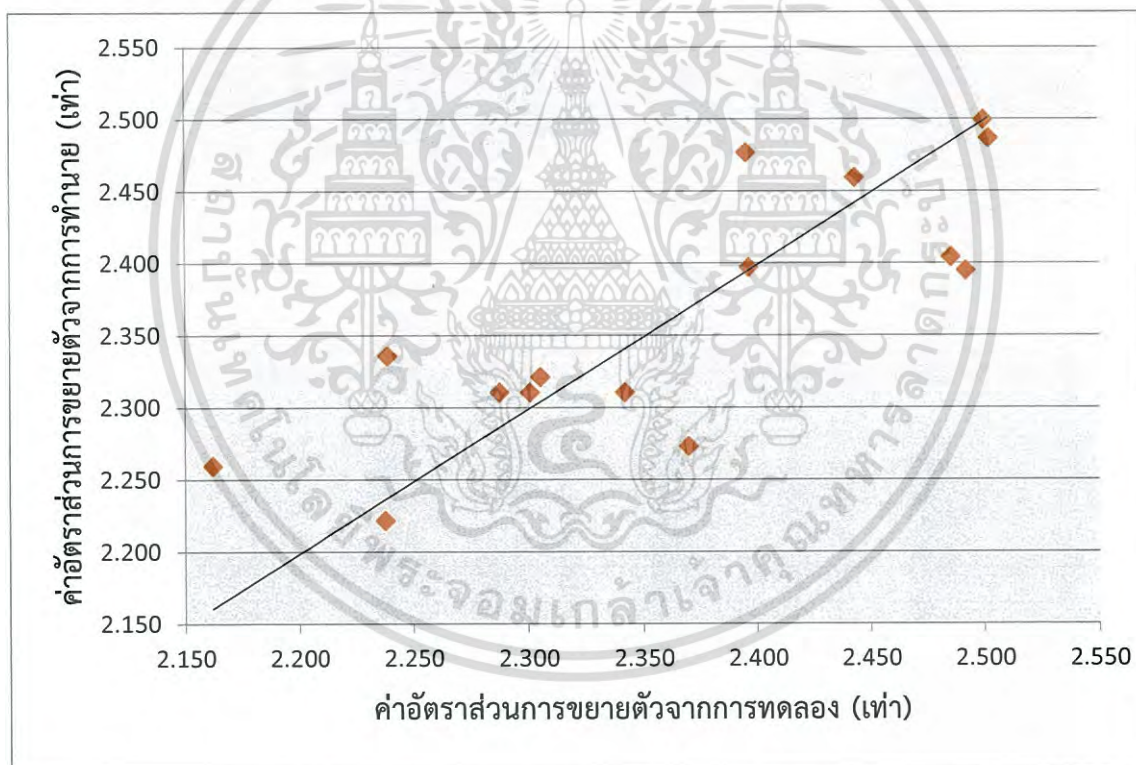
ค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.16-2.50 เท่า และจากสภาวะการผลิตต่างๆเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณแป้งมันฝรั่ง(x_1) ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(x_2) และปริมาณรำข้าว(x_3) โดยให้ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้นคงที่ที่ 16% , อุณหภูมิบาร์เรลที่ 100 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 450 rpm จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$ER = 2.1307 + (0.0678)X_1 + (0.0152)X_2 + (0.1222)X_3 + (-0.0032)X_1^2 + (-0.0025)X_2^2 + (-0.0227)X_3^2 + (-0.0003)X_1 X_2 + (-0.0061)X_2 X_3 + (0.0014)X_1 X_3$$

(4-3)

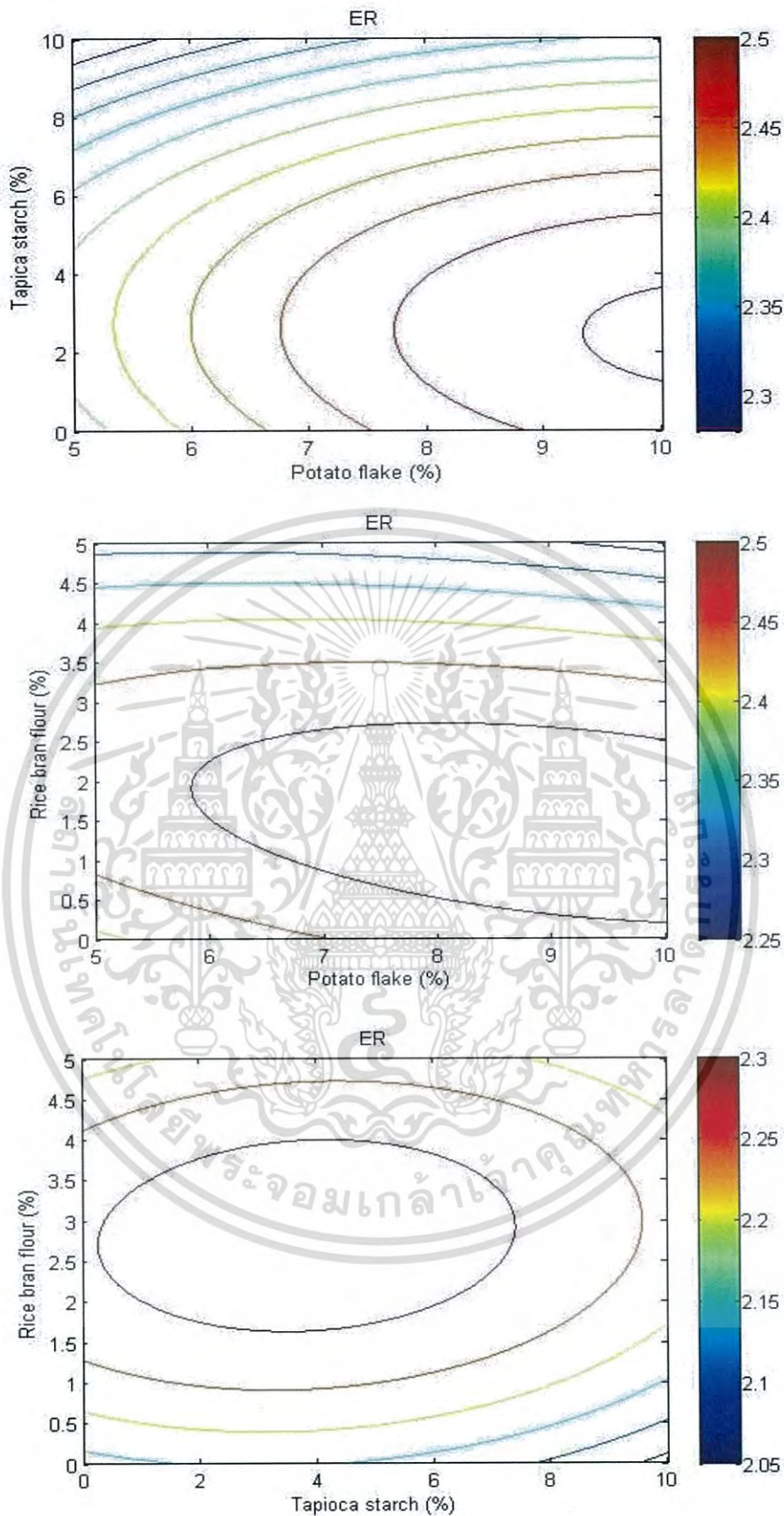
$$R^2 = 0.6716 \quad SE = 0.1035$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-3 แสดงในรูปที่ 4.7



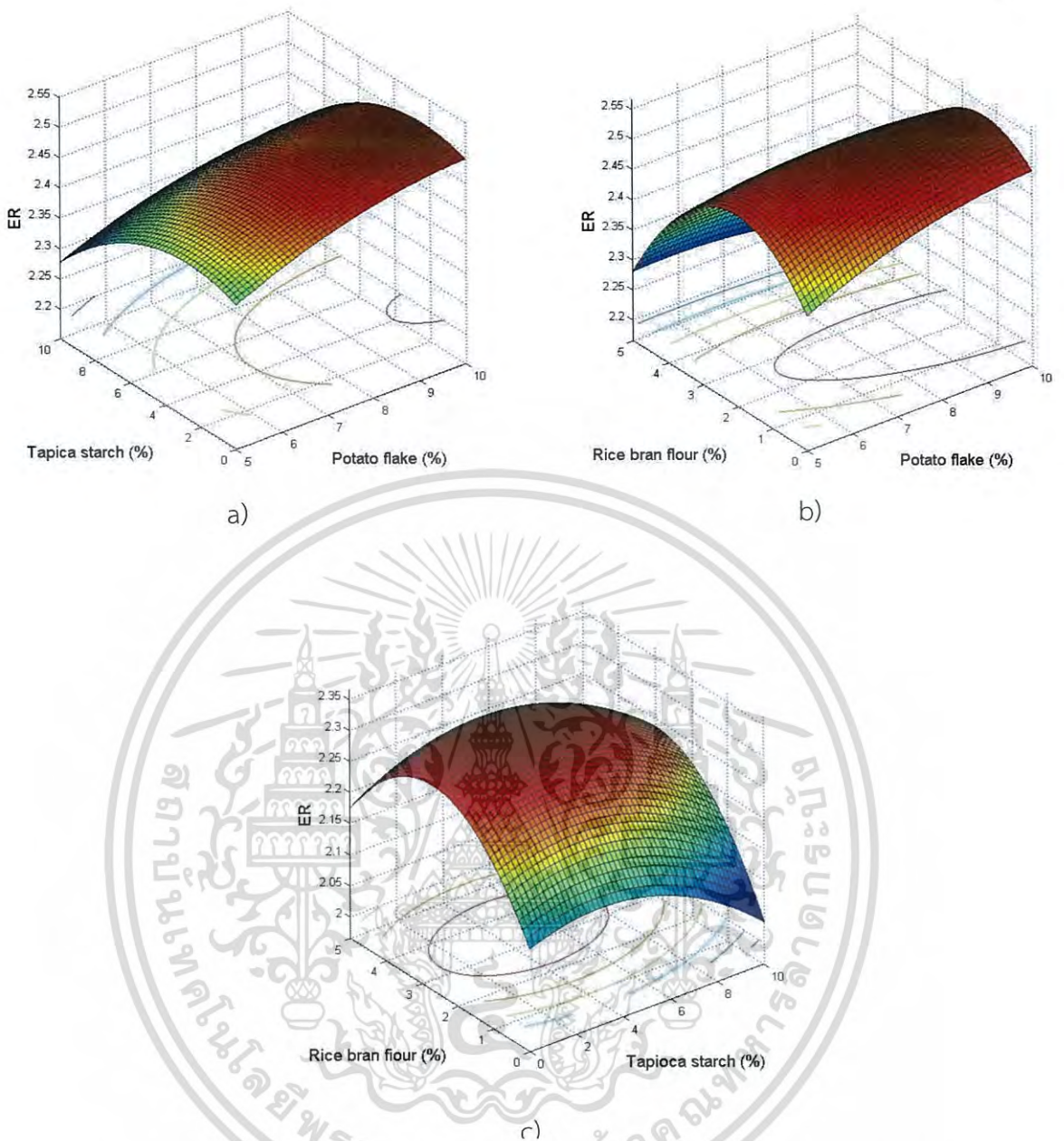
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่าง a) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง b) แป้งมันฝรั่งและรำข้าว c) แป้งมันสำปะหลังและรำข้าว มีผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์

จากกราฟเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังให้ให้มีอัตราส่วนจนถึงค่าประมาณ 4% จะทำให้อัตราส่วนการขยายตัวเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มให้สูงกว่า 4% กลับส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ส่วนของการเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันฝรั่งและรำข้าวก็ส่งผลให้อัตราส่วนการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบมีความชื้นสูง เมื่อหλοมเหลวเป็นเนื้อแป้งสุกผ่านออกจากหน้าแปลนจะเกิดการระเหยตัวของน้ำสูงขึ้นจึงทำให้อีเก็ชทรูเดตที่ได้มีการพองตัวเพิ่มมากขึ้น

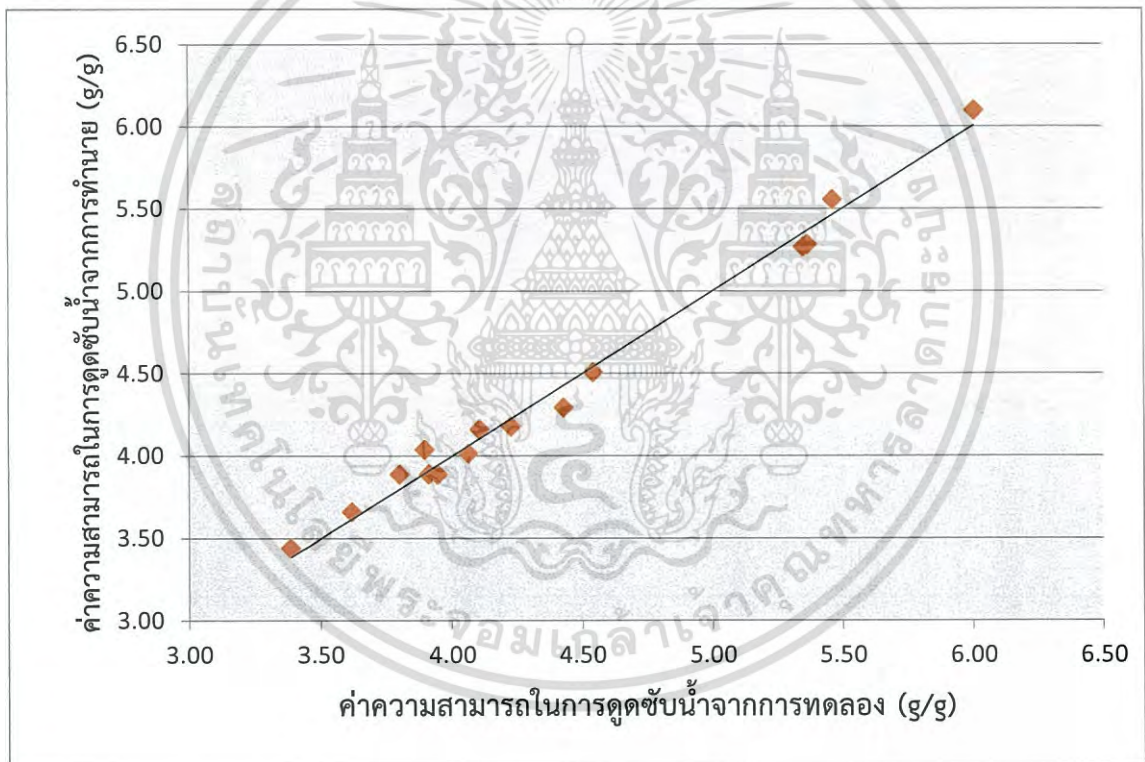
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index ,WAI)

ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเกตที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 3.39-6.01 g/g และจากสภาวะการผลิตต่างๆเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณแป้งมันฝรั่ง(x_1) ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(x_2) และปริมาณรำข้าว(x_3) โดยให้ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้นคงที่ที่ 16% ,อุณหภูมิบาร์เรลที่ 100 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 450 rpm จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

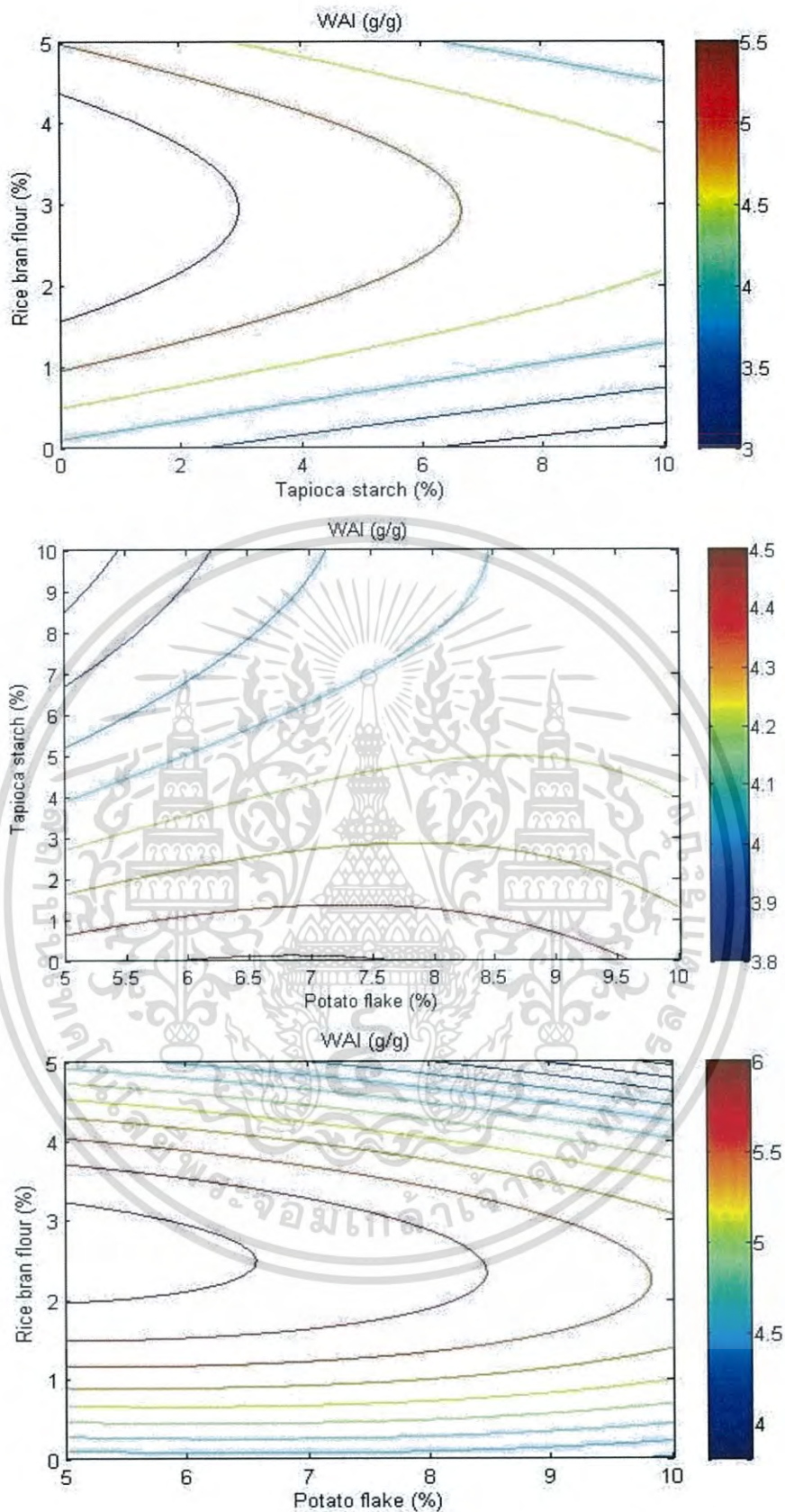
$$\begin{aligned} \text{WAI} = & 3.8588 + (0.1926)X_1 + (-0.1610)X_2 + (1.4333)X_3 + (-0.0142)X_1^2 + \\ & (0.0035)X_2^2 + (-0.2423)X_3^2 + (0.0105)X_1X_2 + (-0.0353)X_2X_3 + (-0.0033)X_1X_3 \\ R^2 = & 0.9890 \quad SE = 0.1370 \end{aligned} \quad (4-4)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-4 แสดงในรูปที่ 4.9



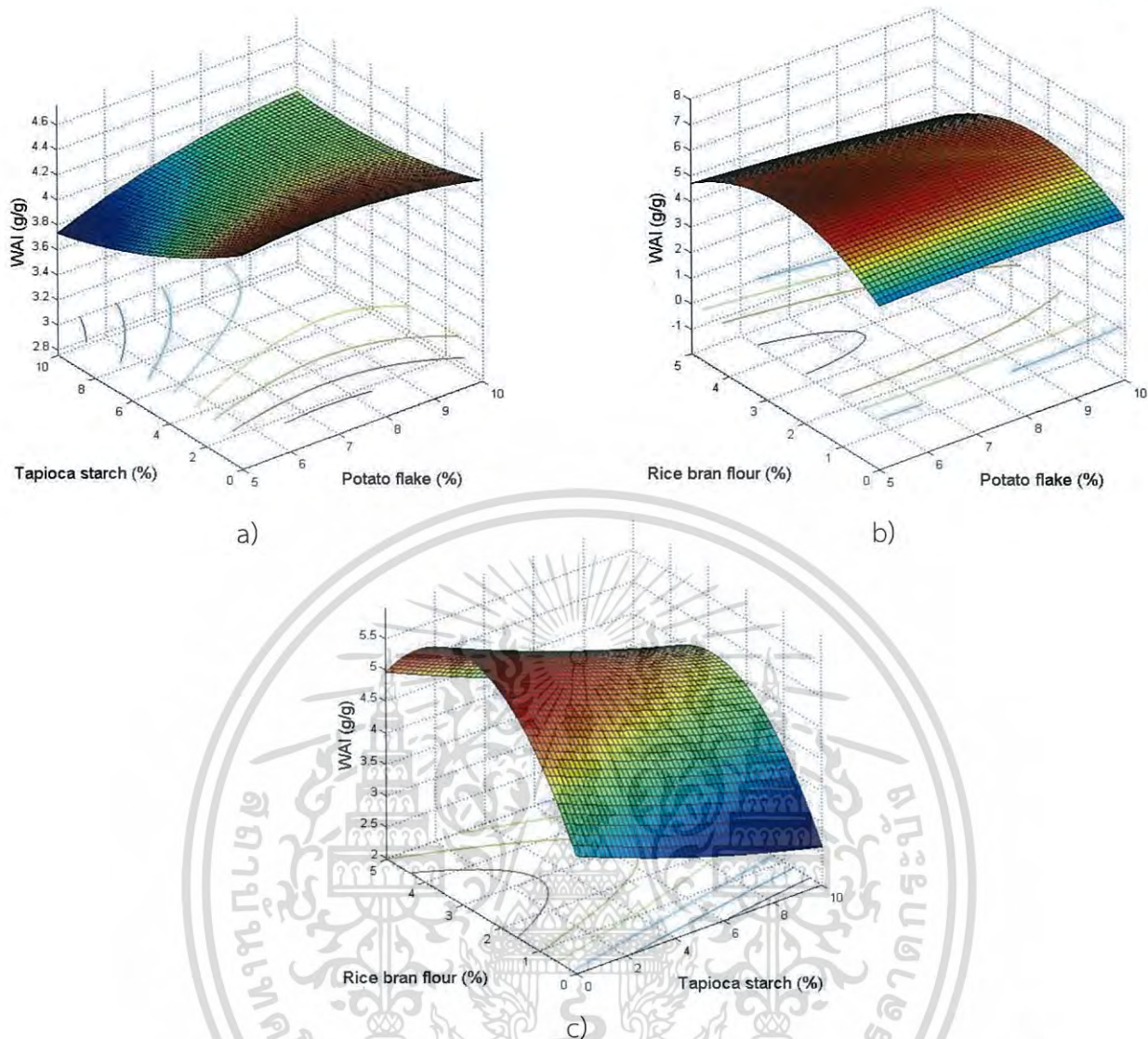
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเอ็กซ์ทราเกตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.12 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่าง a) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง b) แป้งมันฝรั่งและรำข้าว c) แป้งมันสำปะหลังและรำข้าว ที่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์

จากกราฟเมื่อเพิ่มปริมาณรำข้าวส่งผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับน้ำอย่างมีนัยสำคัญ โดยเพิ่มให้มีอัตราส่วนจนถึงค่าประมาณ 3% นั้นจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าสูงขึ้น แต่หากเพิ่มมากกว่านี้จะส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากรำข้าวมีปริมาณใยอาหารที่สูง ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติในการละลายน้ำเพิ่มมากขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์สามารถดูดซับน้ำได้ดีขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดซับความชื้นสูง และเมื่อแป้งได้รับความร้อนเพิ่มมากขึ้นจะเกิดการพองเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วแตกออกเป็นโครงสร้างใหม่ที่ไม่ดูดน้ำเข้ามาอีก จึงทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าลดลงเมื่อถึงจุดที่พองตัวเต็มที่ส่วนของการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันฝรั่งหากเพิ่มให้สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากการมีเพิ่มปริมาณรำข้าวในวัตถุดิบด้วย จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

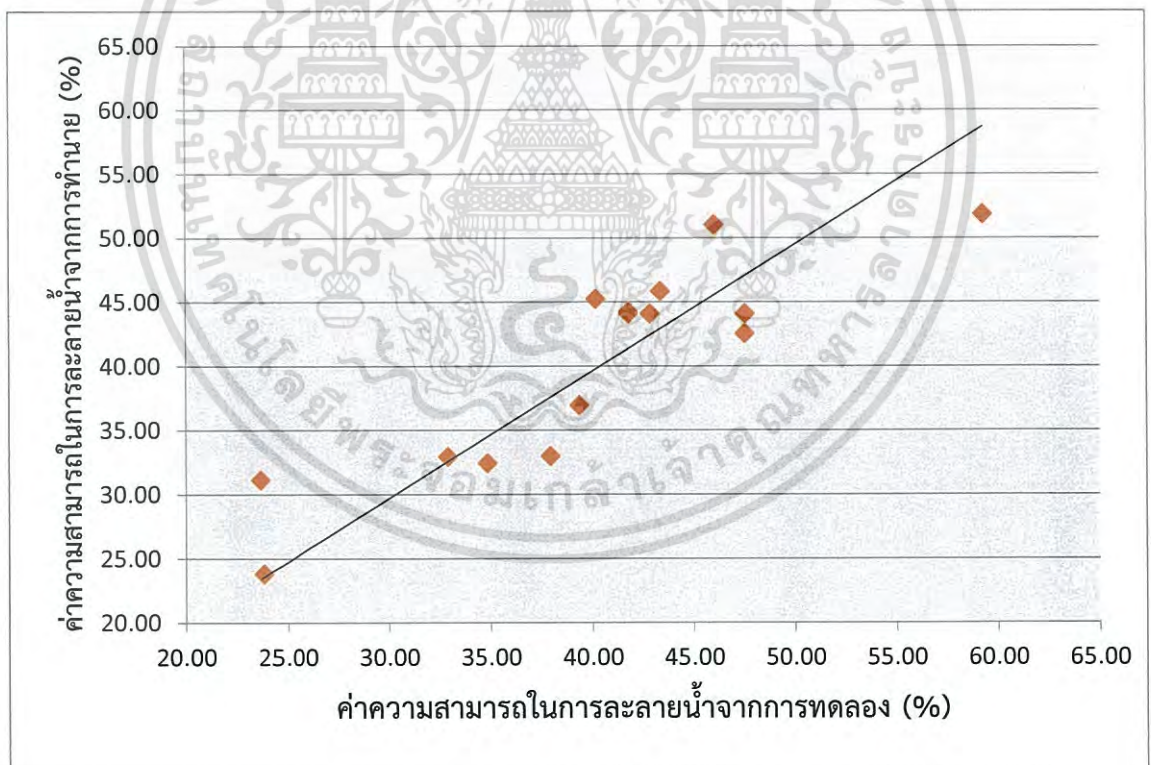
ทำให้วัตถุดิบไปถึงจุดที่พองตัวเต็มที่เร็วขึ้นทำให้ไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีกจึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าลดลง

4.2.5 ค่าความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility Index ,WSI)

ค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 23.69-59.29 % และจากสภาวะการผลิตต่างๆเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณแป้งมันฝรั่ง(x_1) ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(x_2) และปริมาณรำข้าว(x_3) โดยให้ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้นคงที่ที่ 16% ,อุณหภูมิบาร์เรลที่ 100 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 450 rpm จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

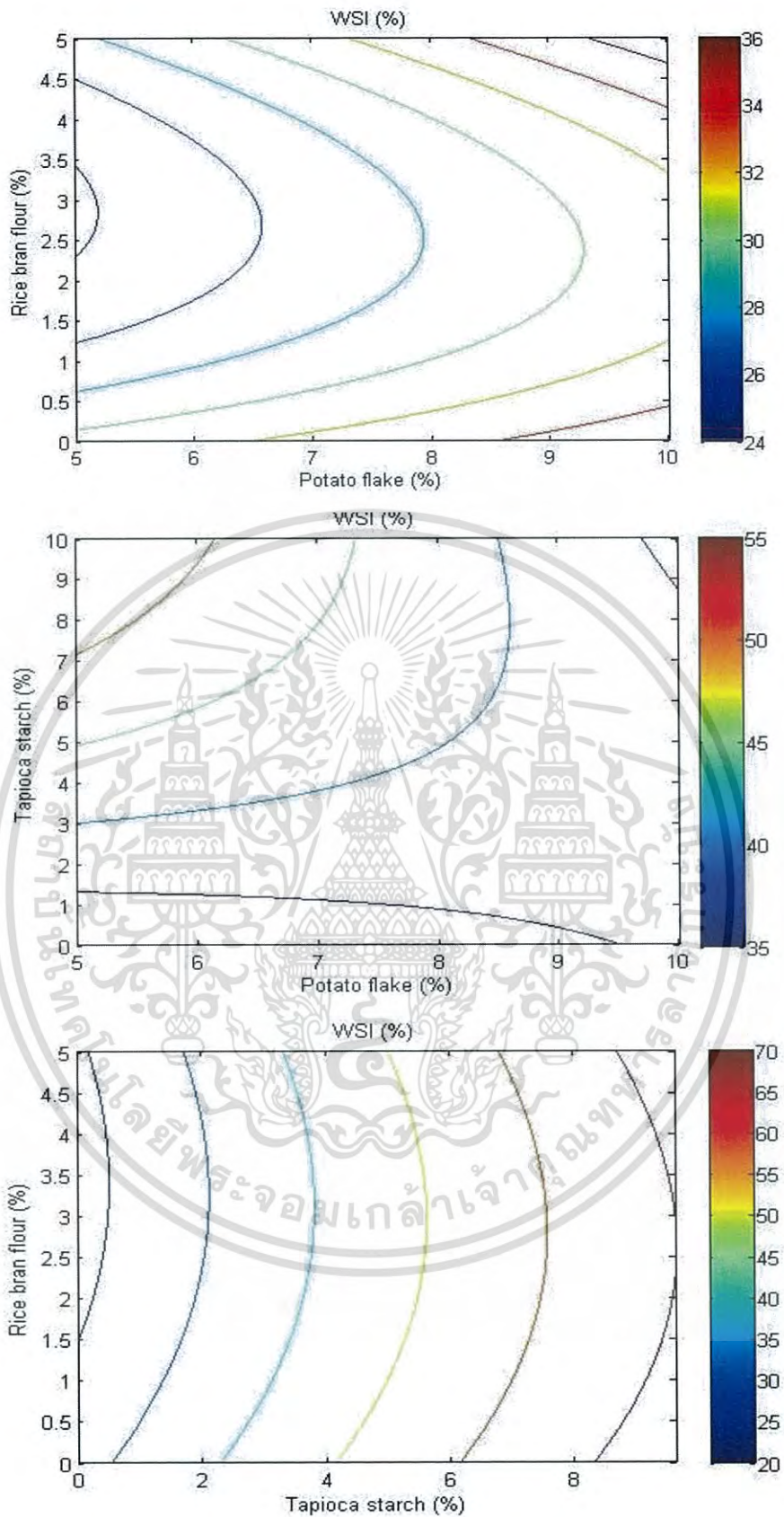
$$\begin{aligned} WSI = & 26.8021 + (0.6875)X_1 + (5.9980)X_2 + (-5.8875)X_3 + (0.0185)X_1^2 + \\ & (-0.0941)X_2^2 + (0.8563)X_3^2 + (-0.5243)X_1X_2 + (0.1990)X_2X_3 + \\ & (0.1469)X_1X_3 \\ R^2 = & 0.9890 \quad SE = 0.1370 \end{aligned} \quad (4-5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-5 แสดงในรูปที่ 4.12



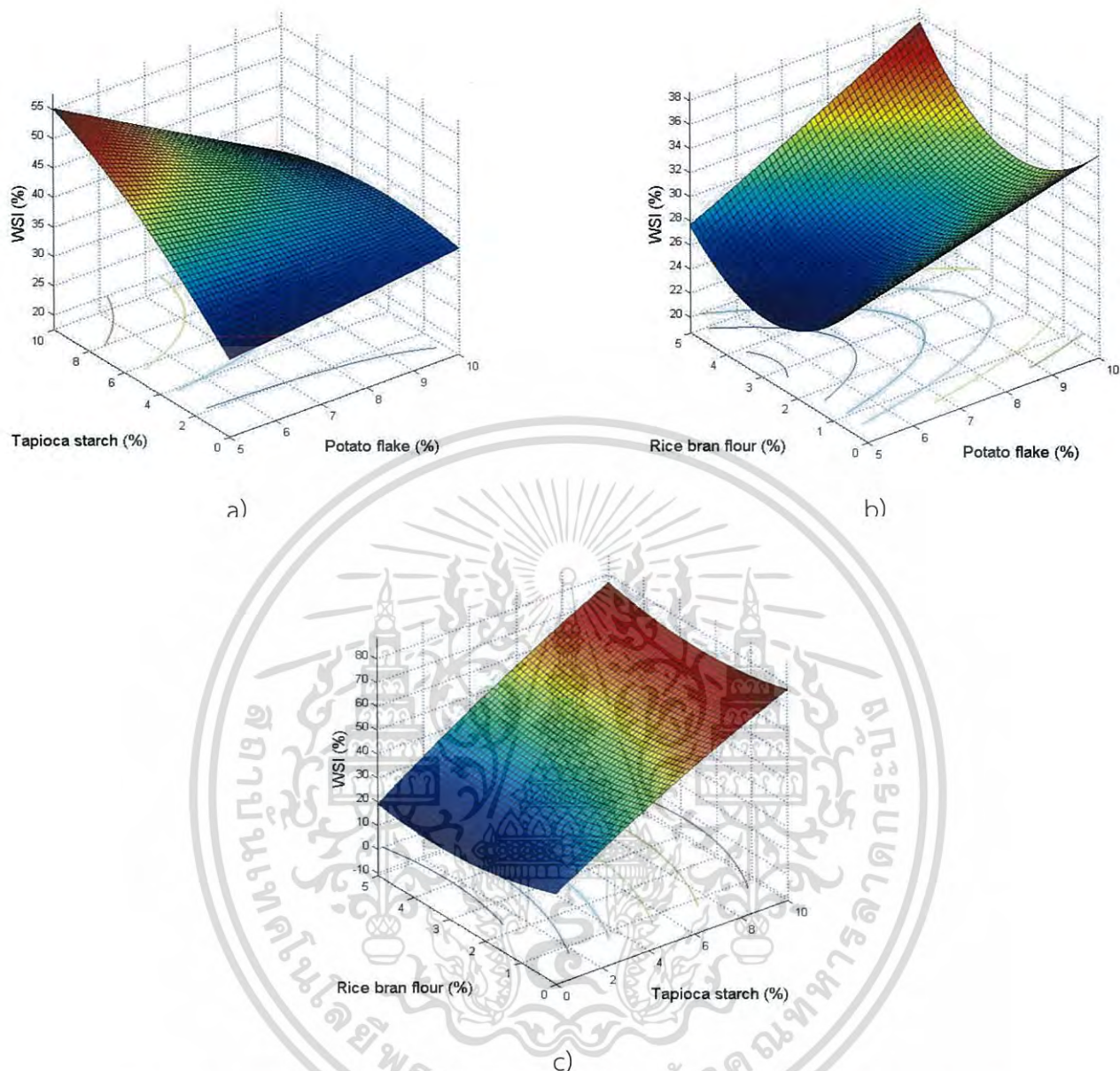
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่าง a) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง b) แป้งมันฝรั่งและรำข้าว c) แป้งมันสำปะหลังและรำข้าว ที่มีผลต่อค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์

จากกราฟพบว่าการเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังให้สูงขึ้นนั้นจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำสูงขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังถูกทำลายได้ง่าย จึงทำให้ส่วนประกอบสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น

ส่วนการเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันฝรั่งและรำข้าวนั้นจะทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำลดลง ทั้งนี้เนื่องจากรำข้าวนี้มีปริมาณใยอาหารที่สูง ผลิตภัณฑ์สุกยากขึ้น โมเลกุลถูกทำลายไม่เพียงพอ จึงมีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ลักษณะทางเนื้อสัมผัส

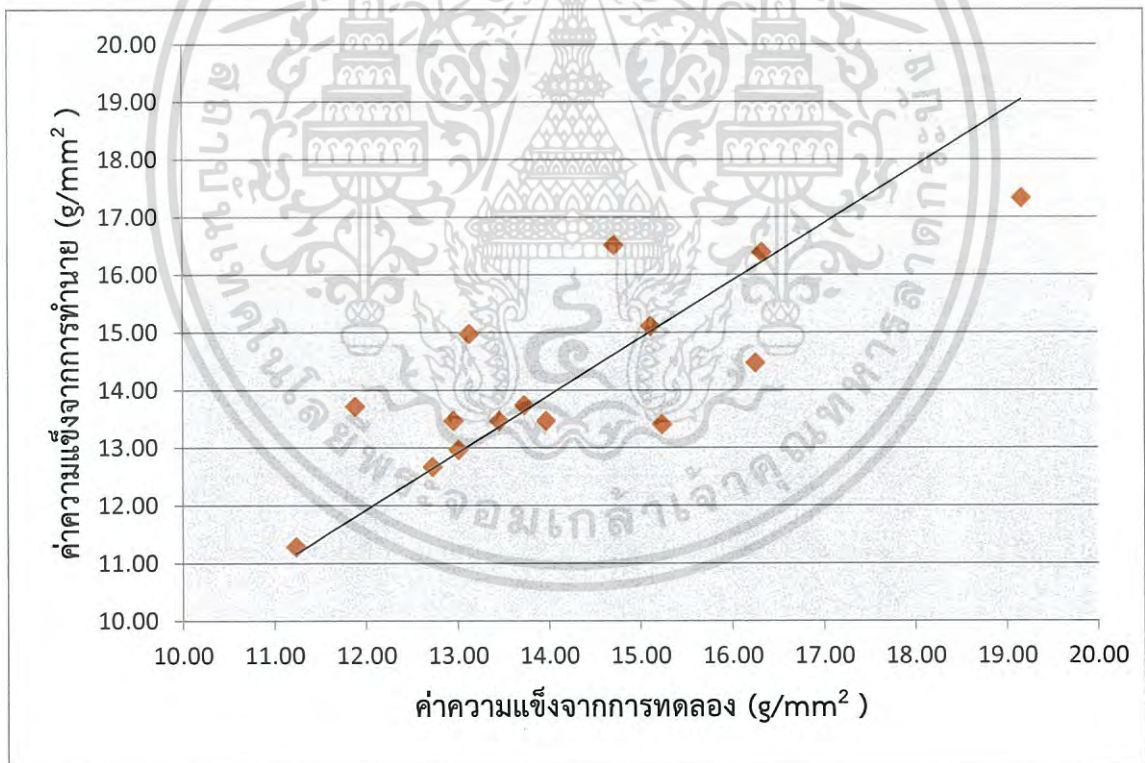
4.2.6.1 ค่าความแข็ง (Hardness)

ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 11.24-19.17 (g/mm²) และจากสภาวะการผลิตต่างๆเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณแป้งมันฝรั่ง(x_1) ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(x_2) และปริมาณรำข้าว(x_3) โดยให้ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้นคงที่ที่ 16% อุณหภูมิบาร์เรลที่ 100 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 450 rpm จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{Hardness} = & 20.5174 + (-2.8223)X_1 + (0.1113)X_2 + (0.2454)X_3 + (0.2122)X_1^2 \\ & + (0.0203)X_2^2 + (0.2268)X_3^2 + (0.0387)X_1 X_2 + (-0.0855)X_2 X_3 \\ & + (-0.1611)X_1 X_3 \end{aligned} \quad (4-6.1)$$

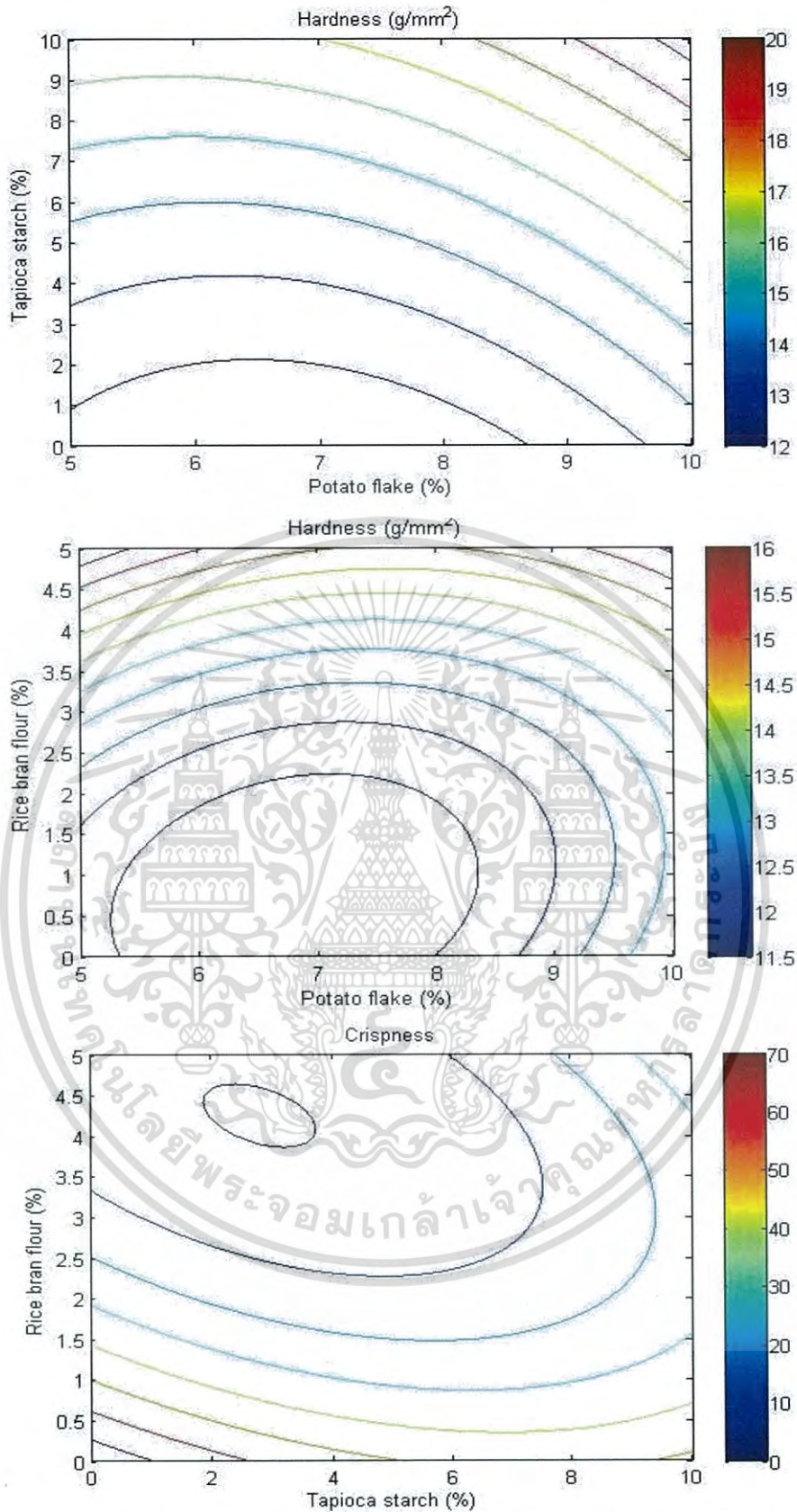
$$R^2 = 0.6403 \quad SE = 2.0243$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-6.1 แสดงในรูปที่ 4.1



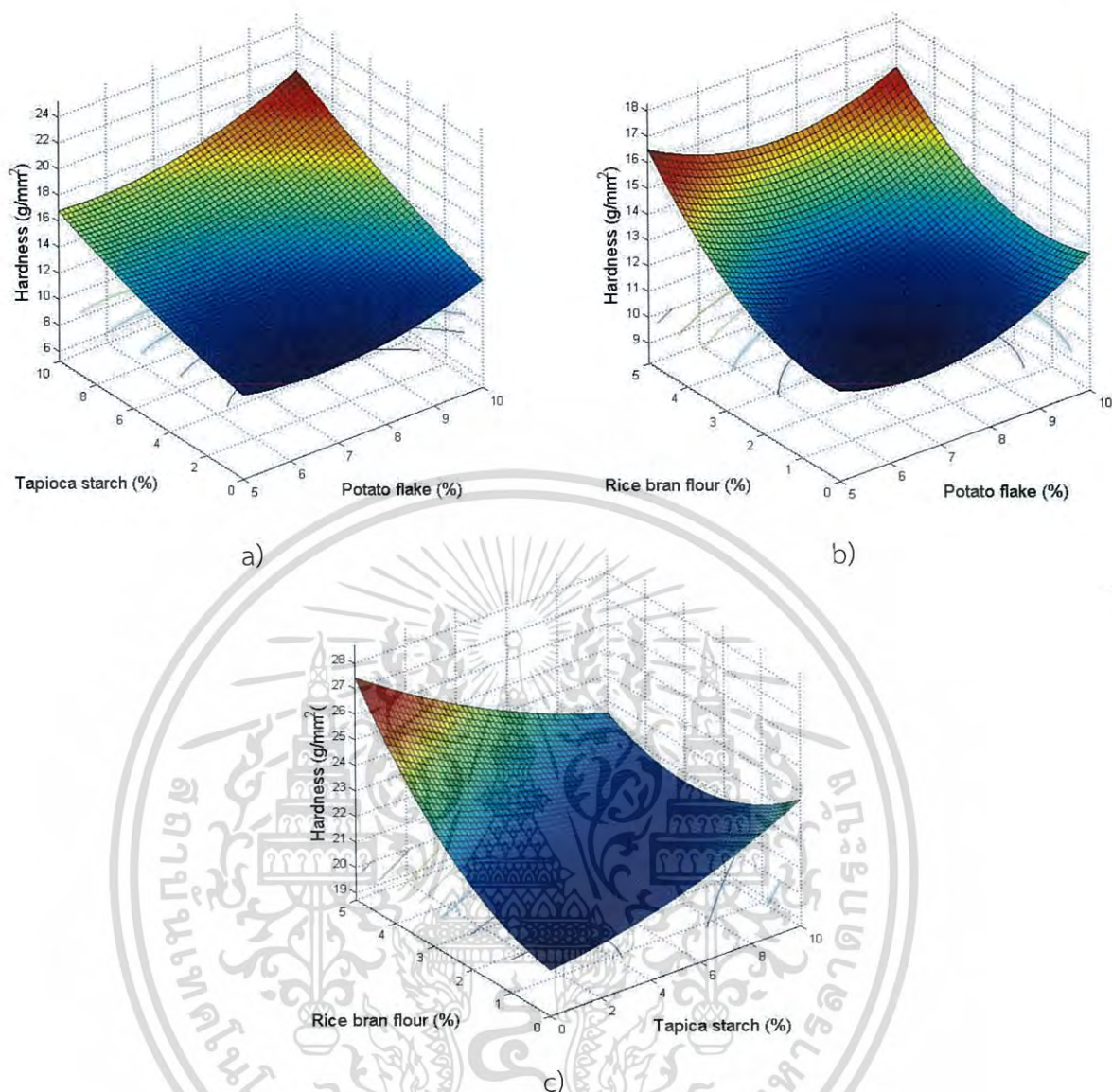
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-6.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่าง a) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง b) แป้งมันฝรั่งและรำข้าว c) แป้งมันสำปะหลังและรำข้าว ที่มีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์

จากกราฟพบว่า การเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง รวมทั้งรำข้าว ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความแข็งมากนัก แต่อย่างไรก็ตาม เป็นที่สังเกตว่า การเพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่งและปริมาณแป้งมันสำปะหลังให้สูงทั้งคู่ส่งผลให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าสูงเพิ่มขึ้นด้วย

จากการศึกษาพบว่าเมื่อเอ็กซ์ทรูเดตพองตัวขึ้นส่งผลให้ความแข็งลดลง เนื่องจาก เกิดรูพรุนในเอ็กซ์ทรูเดตมากขึ้น การเพิ่มวัตถุดิบต่างๆ จะทำให้เอ็กซ์ทรูเดตมีความแข็งเพิ่มขึ้น ความกรอบน้อยลงด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

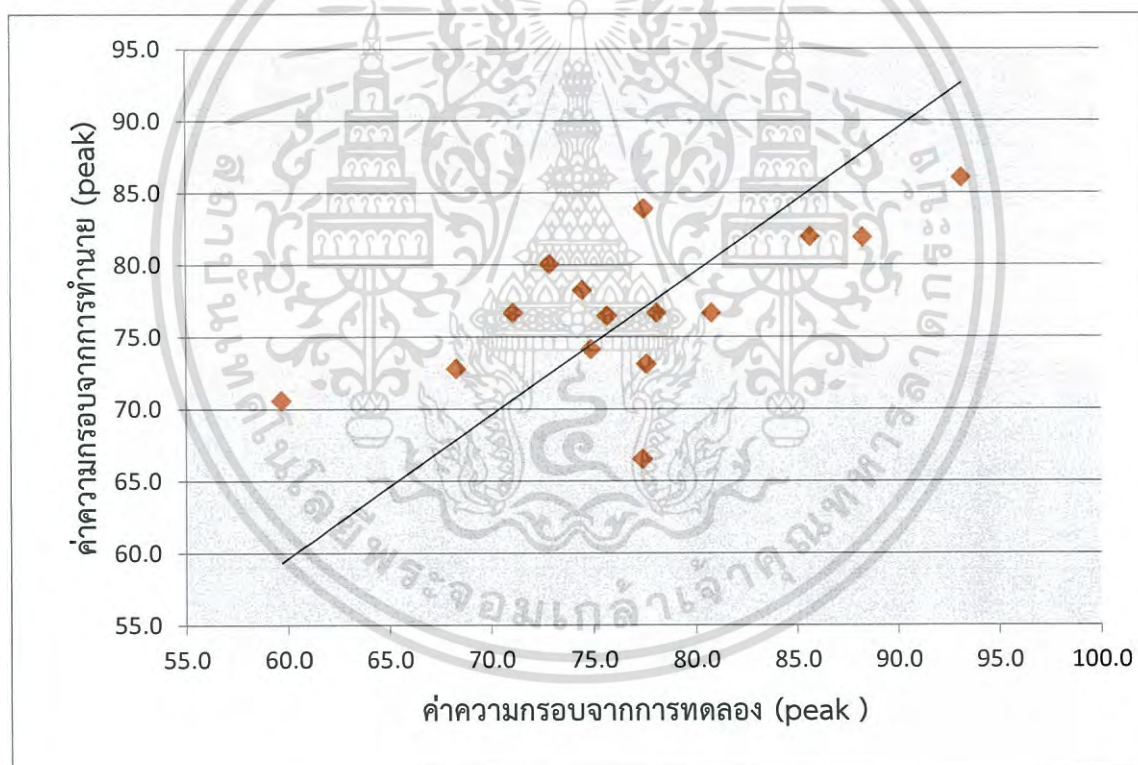
4.2.6.2 ค่าความกรอบ (Cripsness)

ค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 60-93 (peak) และจากสภาวะการผลิตต่างๆเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณแป้งมันฝรั่ง(x_1) ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(x_2) และปริมาณรำข้าว(x_3) โดยให้ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้นคงที่ที่ 16% ,อุณหภูมิบารเรลที่ 100 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 450 rpm จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{Cripsness} = & 103.3250 + (-6.655)X_1 + (-0.1109)X_2 + (-14.7967)X_3 + \\ & (0.4413)X_1^2 + (0.2503)X_2^2 + (1.9733)X_3^2 + (-0.2700)X_1 X_2 + \\ & (-0.1120)X_2 X_3 + (0.8080)X_1 X_3 \end{aligned} \quad (4-6.2)$$

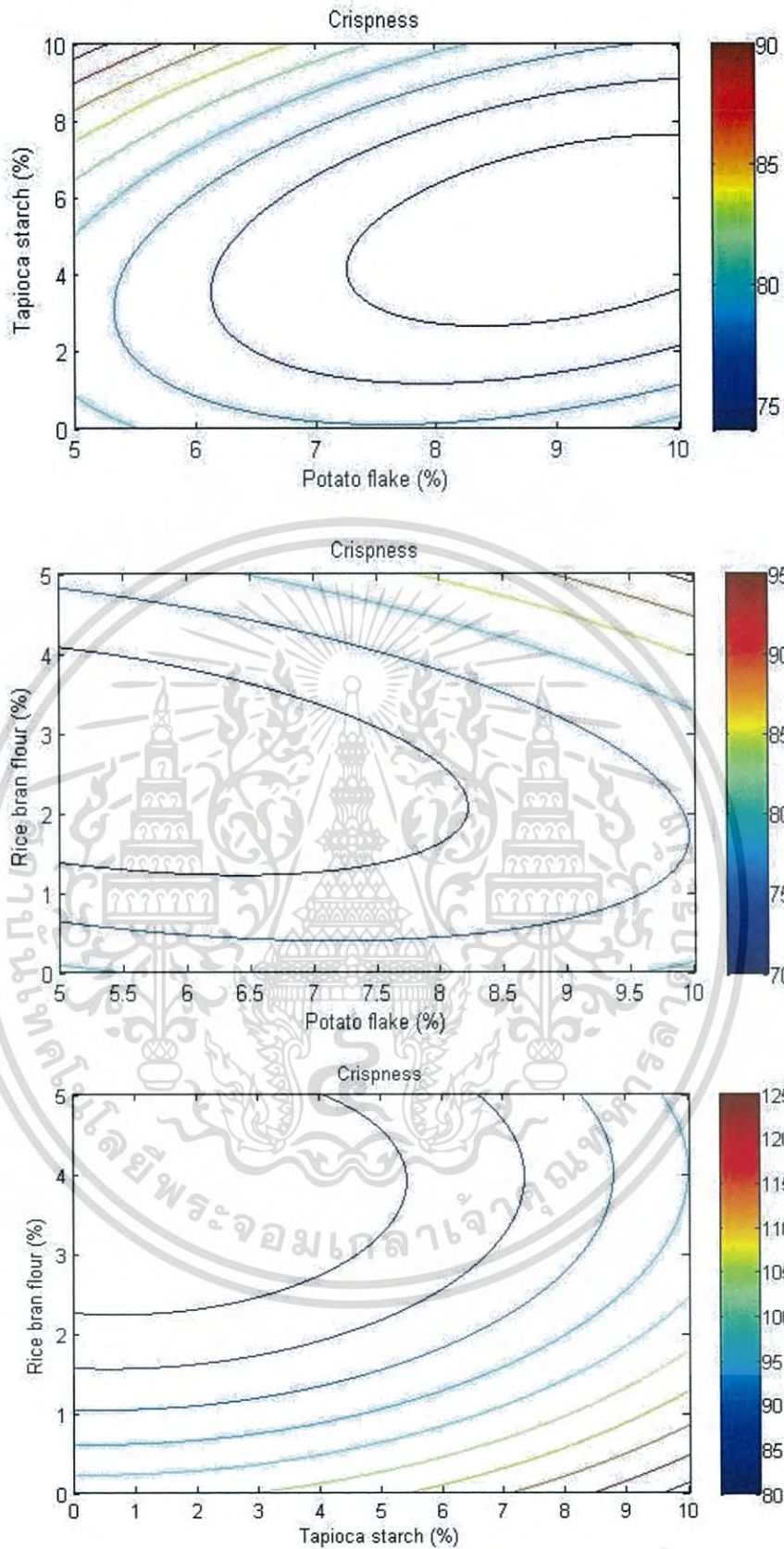
$$R^2 = 0.4143 \quad SE = 10.3873$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-6.2 แสดงในรูปที่ 4.18



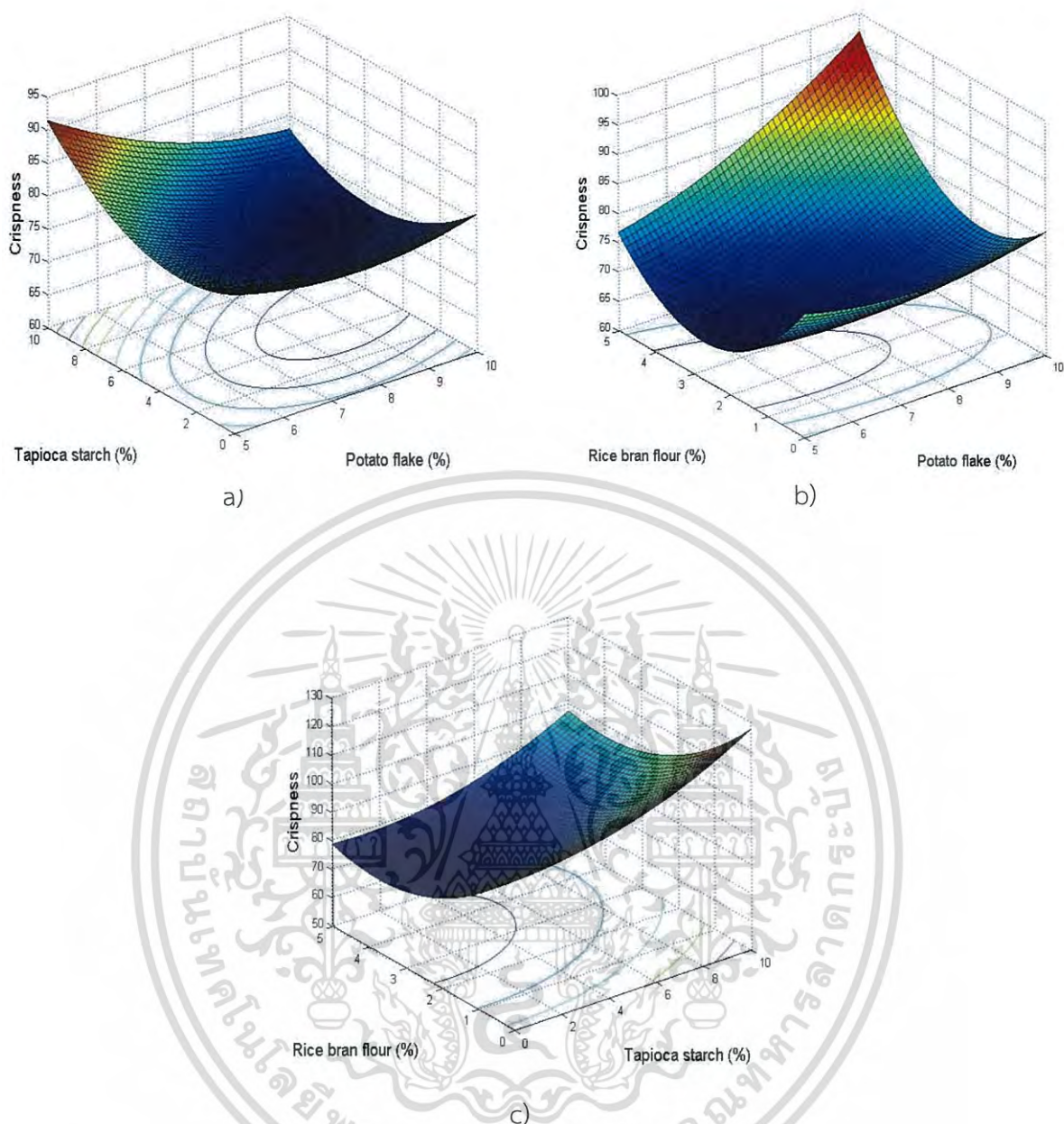
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าความกรอบของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-6.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่าง a) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง b) แป้งมันฝรั่งและรำข้าว c) แป้งมันสำปะหลังและรำข้าว ที่มีผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์

จากกราฟพบว่าการเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังจะส่งผลให้ค่าความกรอบมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการเพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่ง และรำข้าว นั้น จะส่งผลให้ค่าความกรอบมีค่าลดลง ทั้งนี้ เนื่องจากวัตถุดิบมีน้ำเป็นองค์ประกอบมากจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสูงทำให้มีผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าความกรอบน้อยและแข็งมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

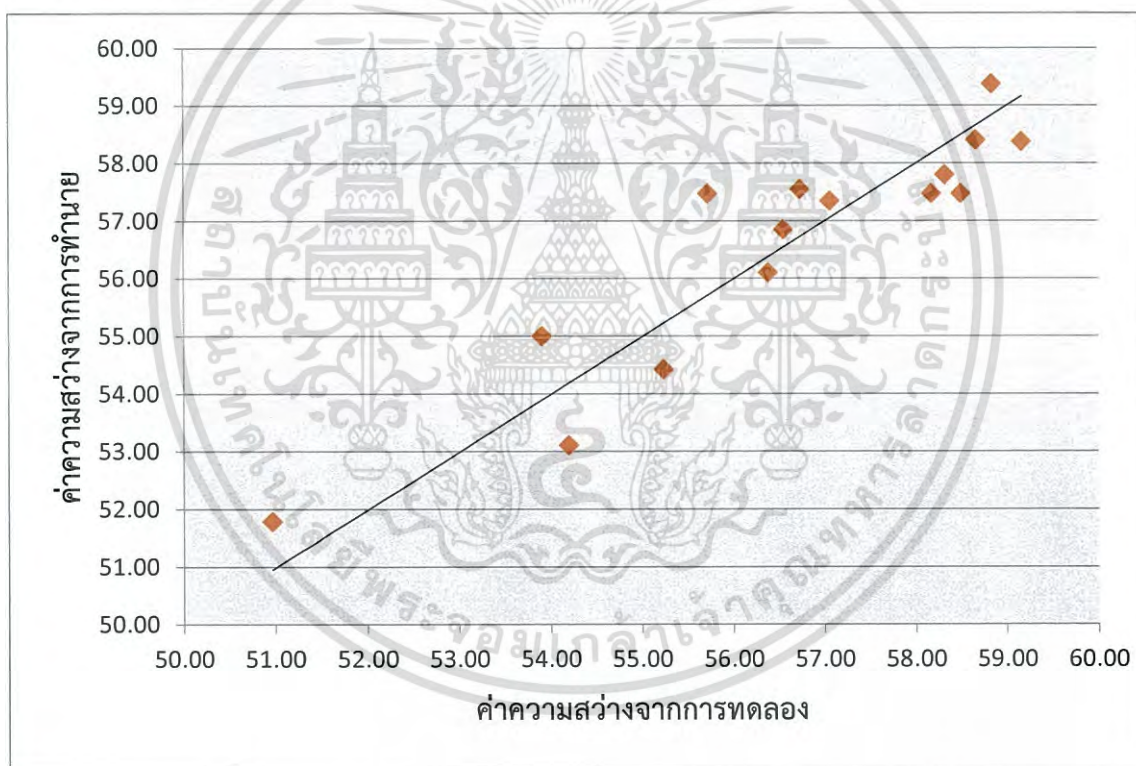
4.2.7 ค่าความสว่าง (Lightness , L*)

ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 50.97-59.18 และจากสภาวะการผลิตต่างๆเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณแป้งมันฝรั่ง(x_1) ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(x_2) และปริมาณรำข้าว(x_3) โดยให้ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้นคงที่ที่ 16% อุณหภูมิบาร์เรลที่ 100 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 450 rpm จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$L^* = 58.8470 + (1.1526)X_1 + (-0.7744)X_2 + (-1.9316)X_3 + (-0.17224)X_1^2 + (-0.0114)X_2^2 + (-0.3084)X_3^2 + (0.05588)X_1X_2 + (0.3884)X_2X_3 + (0.1814)X_1X_3 \quad (4-7)$$

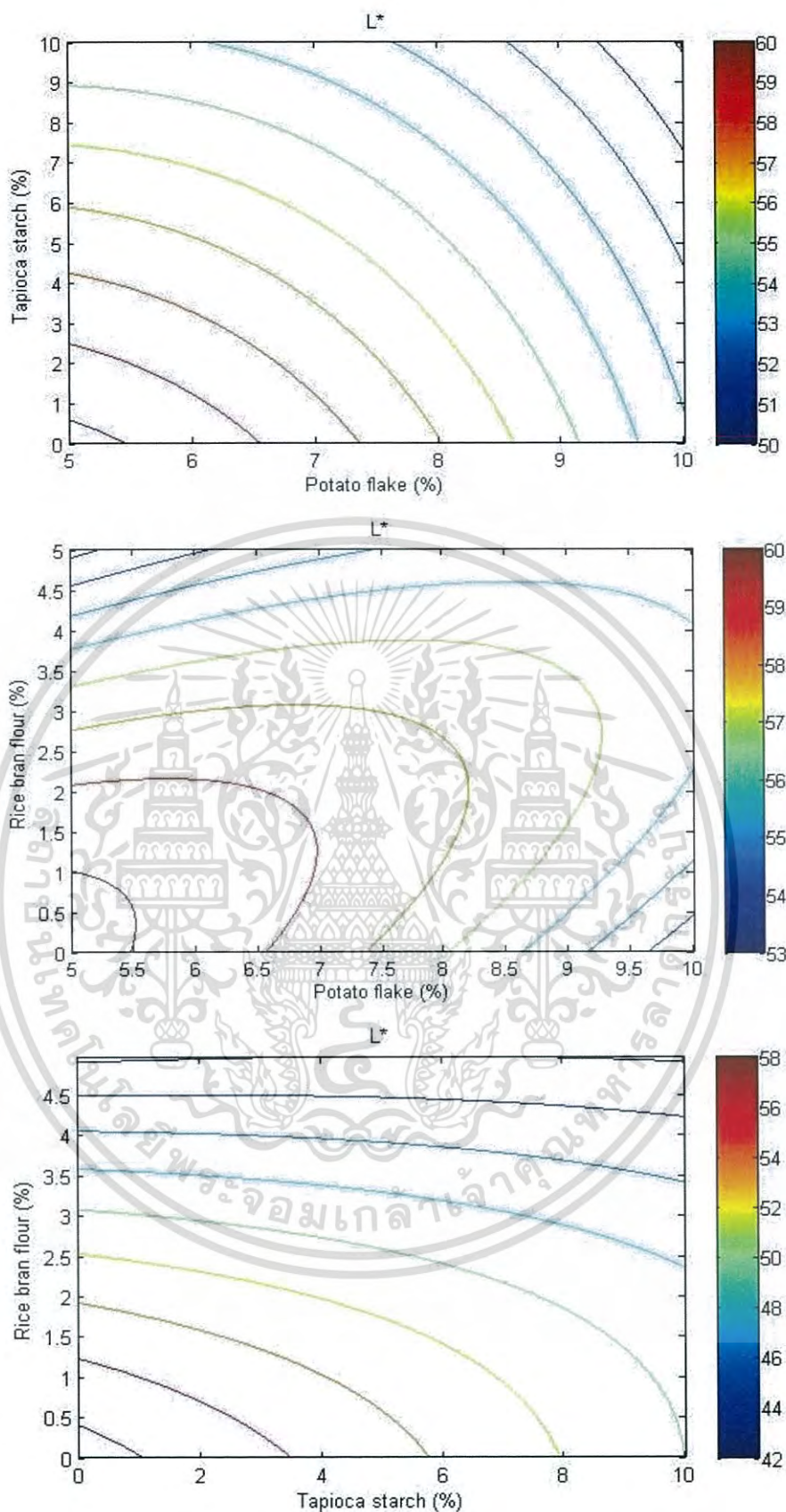
$$R^2 = 0.7134 \quad SE = 1.4508$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-7 แสดงในรูปที่ 4.21



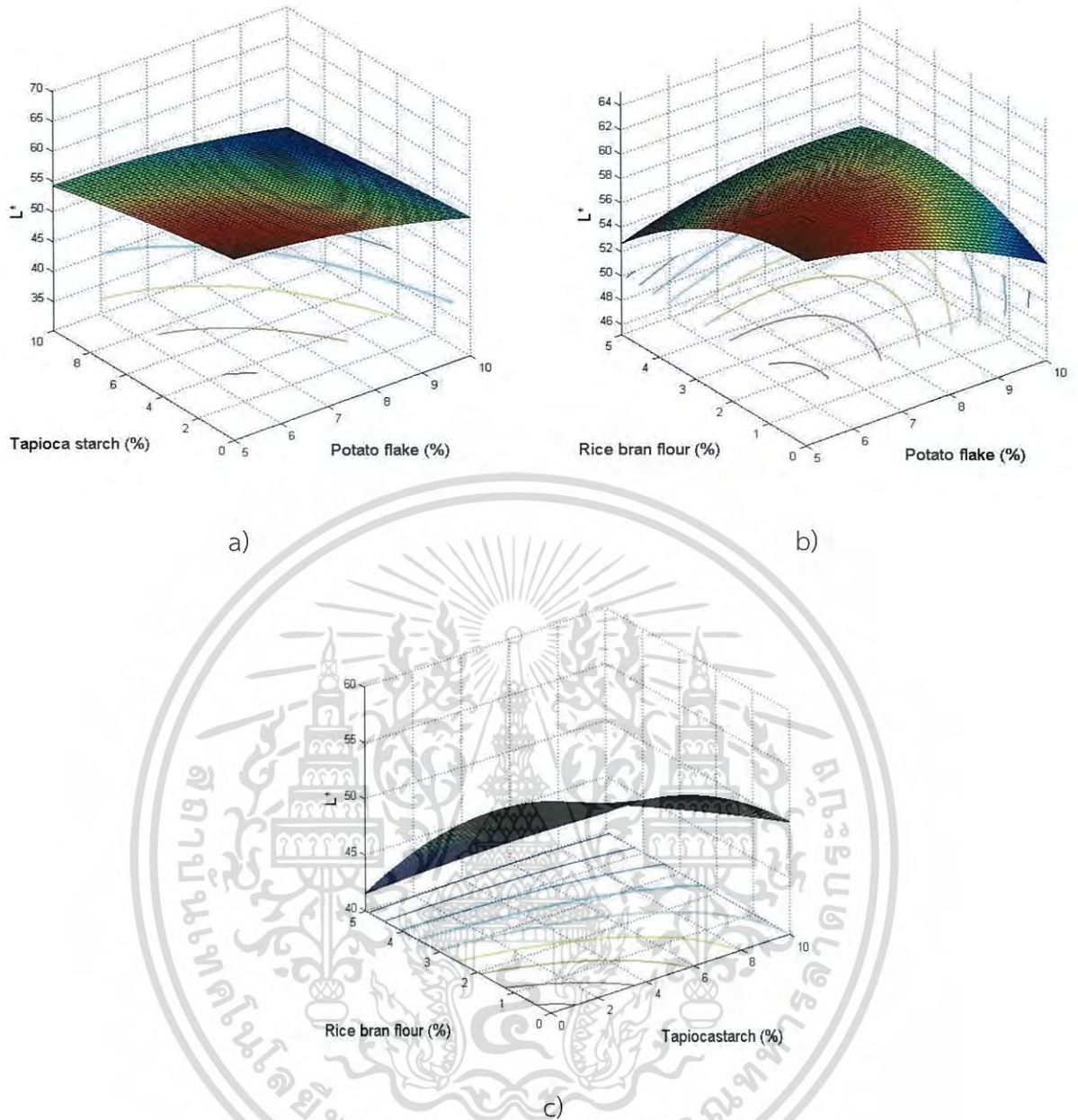
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าความสว่างของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่าง a) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง b) แป้งมันฝรั่งและรำข้าว c) แป้งมันสำปะหลังและรำข้าว ที่มีผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์

จากการทดลองพบว่าส่วนผสมของวัตถุดิบที่เดิม เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และรำข้าว ในปริมาณน้อย สีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีสีเข้มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมให้สูงขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีสว่าง (L^*) ลดลง

จากการพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และรำข้าวให้มากขึ้นนั้น จะส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) มีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

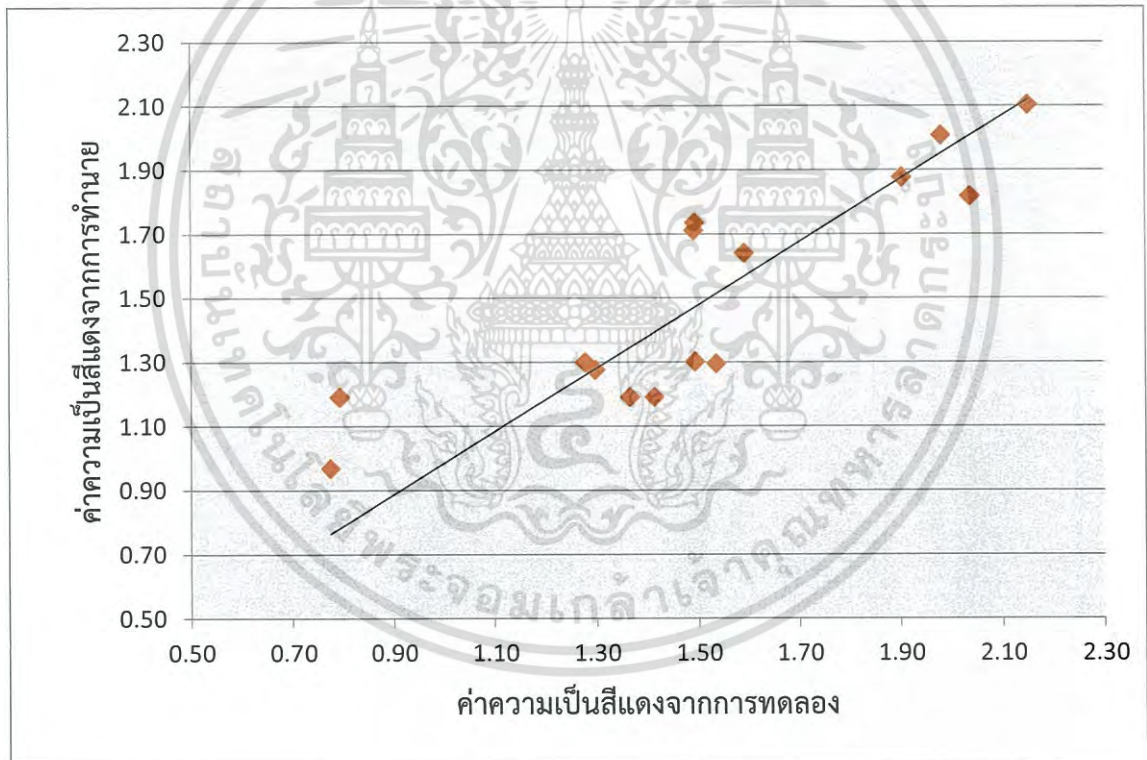
4.2.8 ค่าความเป็นสีแดง (Redness , a*)

ค่าความเป็นสีแดงของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราคตที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.78-2.15 และจากสภาวะการผลิตต่างๆเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณแป้งมันฝรั่ง(x_1) ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(x_2) และปริมาณรำข้าว(x_3) โดยให้ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้นคงที่ที่ 16% ,อุณหภูมิบ่มที่ 100 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 450 rpm จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$a^* = 5.5932 + (-1.3545)X_1 + (-0.0380)X_2 + (0.3120)X_3 + (0.0984)X_1^2 + (0.0039)X_2^2 + (0.0013)X_3^2 + (0.0043)X_1X_2 + (-0.0061)X_2X_3 + (-0.0342)X_1X_3$$

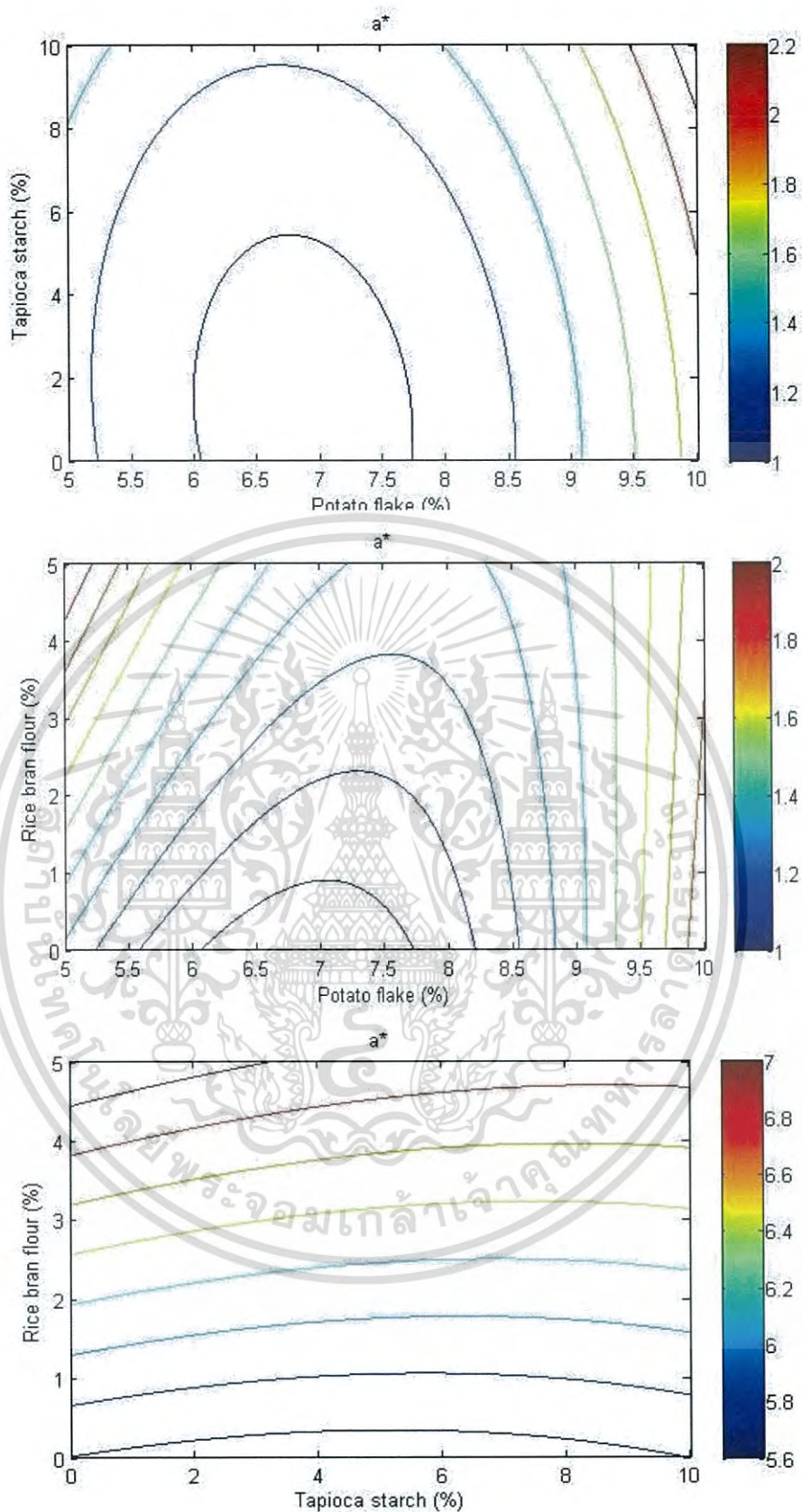
$$R^2 = 0.7645 \quad SE = 0.3261 \quad (4-8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-8 แสดงในรูปที่ 4.24



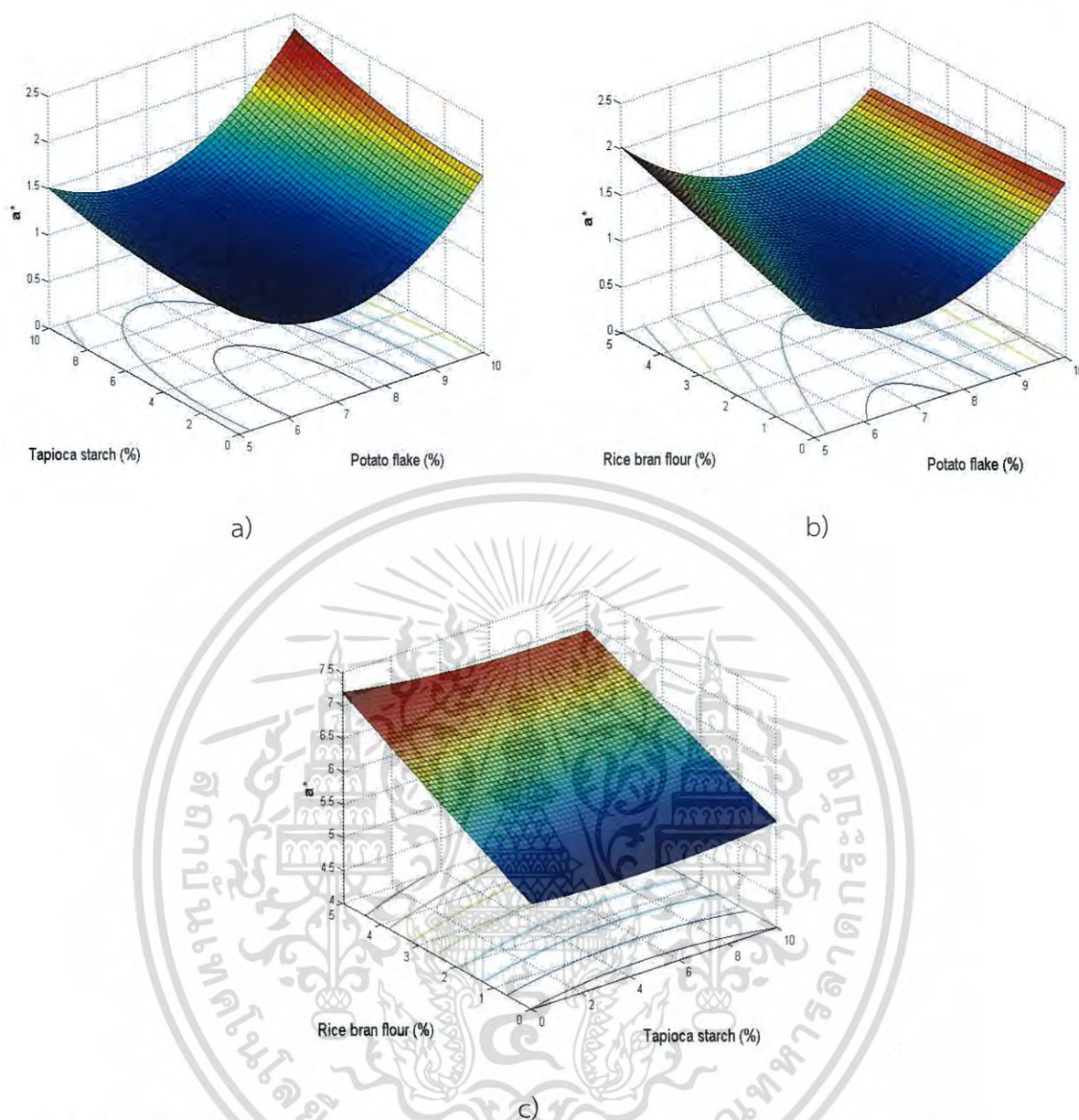
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าความเป็นสีแดงของเอ็กซ์ทราคตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดงของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่าง a) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง b) แป้งมันฝรั่งและรำข้าว c) แป้งมันสำปะหลังและรำข้าว ที่มีผลต่อค่าความเป็นสีแดงของผลิตภัณฑ์

จากกราฟจะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันฝรั่ง และรำข้าว จะทำให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสีของวัตถุดิบในส่วนของแป้งมันฝรั่ง และรำข้าวจะมีสีโน้มแนวไปทางสีแดงเป็นที่เด่นชัดจึงทำให้ค่าสีแดง (a^*) มีค่าเพิ่มขึ้น

ขณะที่การเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังจะส่งผลให้ค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากในส่วนของสีวัตถุดิบนั้นมีการใส่ปริมาณสาหร่ายสไปรูรีน่าเข้าไปด้วยจึงทำให้ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเกตต์ที่ได้มีความค่าเป็นสีแดง (a^*) ที่ไม่มากนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

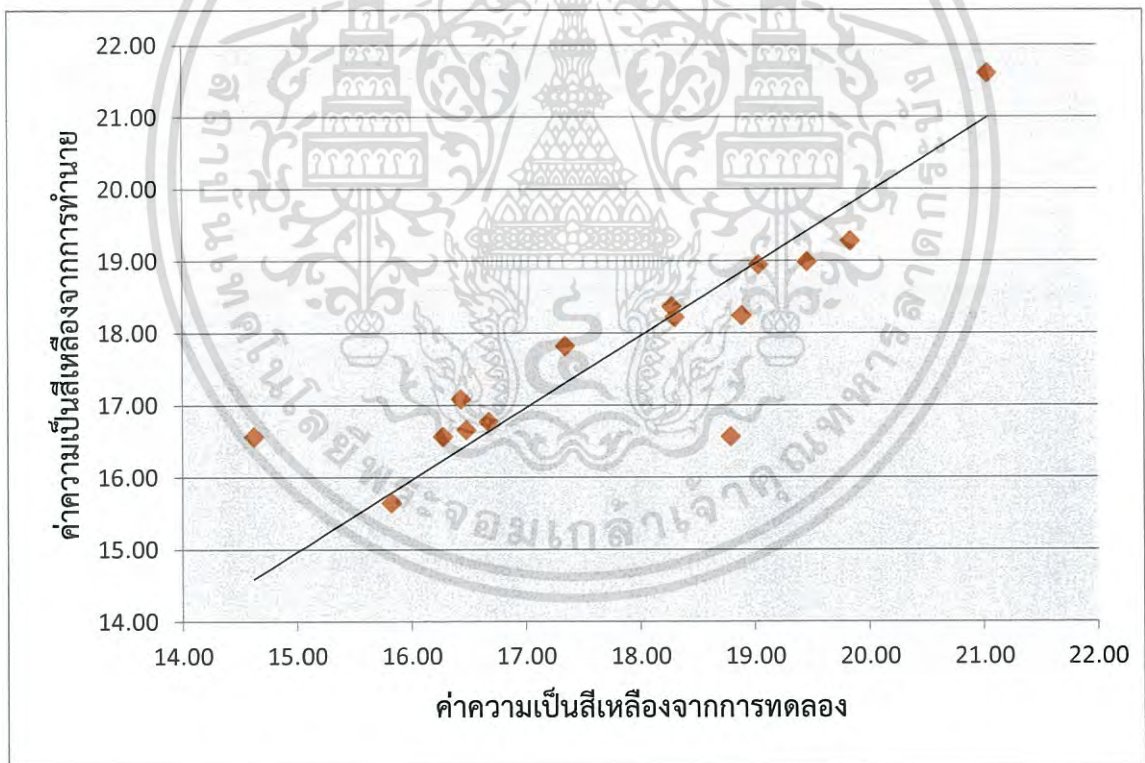
4.2.9 ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness , b*)

ค่าความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง 14.62-21.05 และจากสถานะการผลิตต่างๆเมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของปริมาณแป้งมันฝรั่ง(x_1) ปริมาณแป้งมันสำปะหลัง(x_2) และปริมาณรำข้าว(x_3) โดยให้ความชื้นวัตถุดิบเริ่มต้นคงที่ที่ 16% ,อุณหภูมิบาร์เรลที่ 100 °C และความเร็วรอบสกรูที่ 450 rpm จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$b^* = 35.1212 + (-4.0499)X_1 + (-2.0495)X_2 + (-1.2423)X_3 + (0.2324)X_1^2 + (0.0817)X_2^2 + (0.2408)X_3^2 + (0.1716)X_1X_2 + (0.0046)X_2X_3 + (0.0158)X_1X_3 \quad (4-9)$$

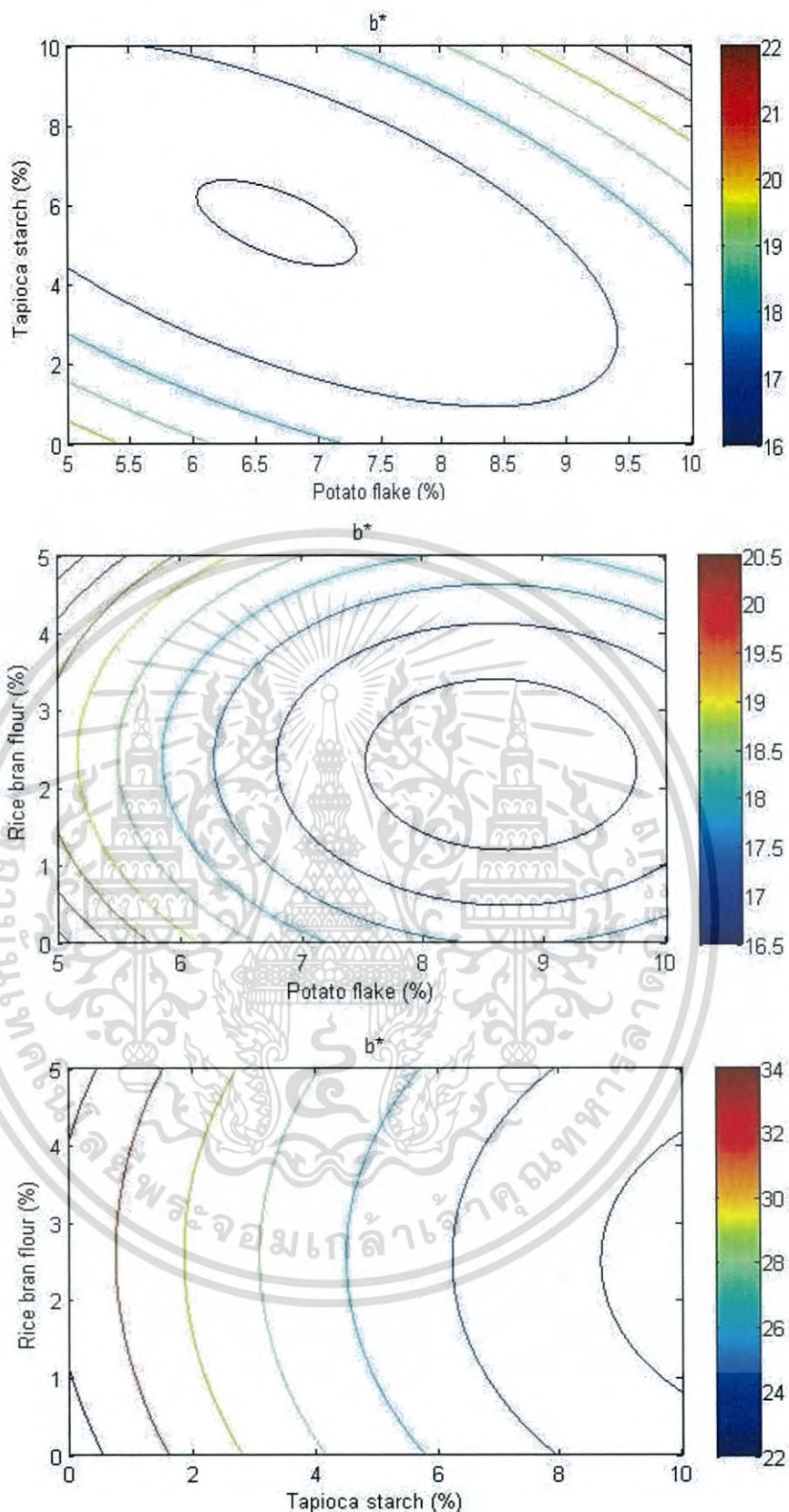
$$R^2 = 0.7485 \quad SE = 1.4712$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-9 แสดงในรูปที่ 4.27



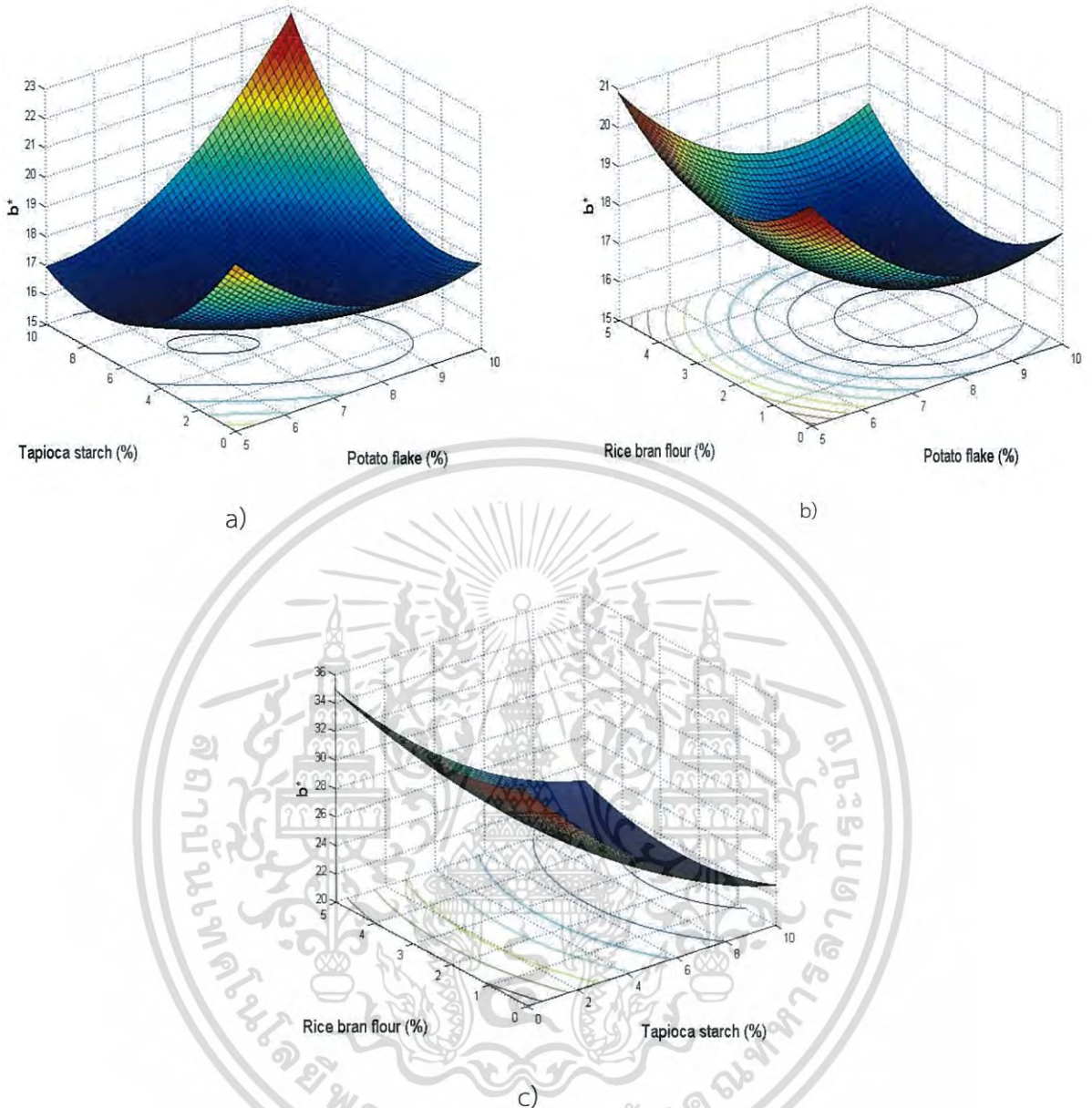
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าความเป็นสีเหลืองของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แสดง Contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนต่างๆที่มีผลต่อค่าความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดง Surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่าง a) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง b) แป้งมันฝรั่งและรำข้าว c) แป้งมันสำปะหลังและรำข้าว ที่มีผลต่อค่าความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์

จากกราฟจะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณอัตราส่วนรำข้าวจะส่งผลให้ค่าความเป็นสีเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ต้องไม่เพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่ง และแป้งมันสำปะหลังจึงจะเกิดผลสูงสุด ขณะที่การเพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังจะต้องเพิ่มทั้งคู่จึงจะทำให้ค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มขึ้น แต่หากเพิ่มเพียงอย่างเดียวจะส่งผลให้ค่าความเป็นสีเหลืองลดลงเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

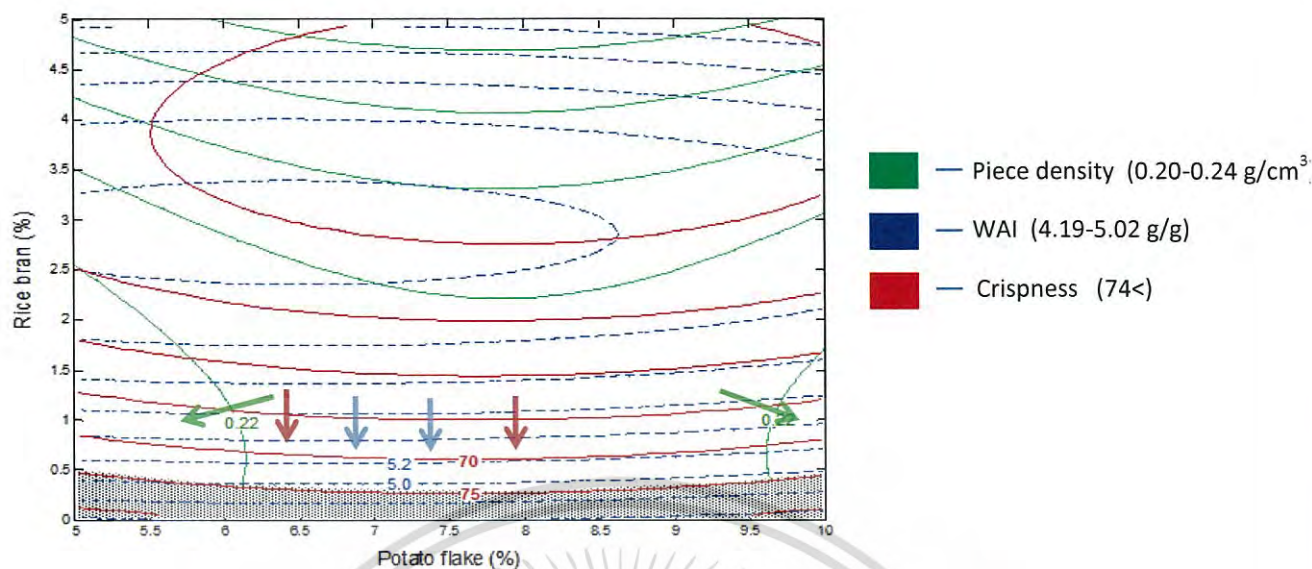
4.3. ผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันกับผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากห้องตลาด

ได้ทำการคัดเลือกผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่ผลิตจากวัตถุดิบใกล้เคียงกันเพื่อนำมาหาค่าอัตราส่วนของวัตถุดิบต่างๆที่เหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันด้วยการนำเส้นแสดงรูปร่าง (Contour plot) ของความสัมพันธ์ของคุณลักษณะแต่ละชนิดที่ได้ในสมการที่สร้างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากสมการที่ 3-8 มาทำการหาค่าที่ซ้อนทับกัน (Intersection) โดยค่าคุณลักษณะที่นำมาเปรียบเทียบคือ ค่าความหนาแน่นชิ้น (Piece density) , ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และค่าความกรอบ (Crispness) สาเหตุที่นำค่าคุณลักษณะดังกล่าวมาเปรียบเทียบเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ควรจะต้องมีค่าความชื้นที่น้อยอยู่แล้วเพื่ออายุการเก็บรักษาที่นานจึงไม่ทำการเปรียบเทียบ จึงทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นชิ้นของผลิตภัณฑ์ว่ามีค่าอยู่ในช่วงใด เพื่อการคาดเดาลักษณะของการเคี้ยวผลิตภัณฑ์เมื่อทำการรับประทาน ซึ่งก็ส่งผลต่อเนื่องไปที่ค่าความกรอบ ส่วนค่าความสามารถในการดูดซับน้ำนั้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณอัตราส่วนแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และรำข้าว นั้นส่งผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนเรื่องของค่าสีที่ไม่ทำการเปรียบเทียบ เนื่องจากผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีการเพิ่มปริมาณสาหร่ายสไปรูรีน่าเข้าไปจึงไม่ทำการเปรียบเทียบ เมื่อนำผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากห้องตลาดมาทำการหาค่าคุณลักษณะดังกล่าวซึ่งก็คือค่าความหนาแน่นชิ้น (Piece density) , ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และค่าความกรอบ (Crispness) โดยจะมีรายละเอียดแสดง ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากห้องตลาด

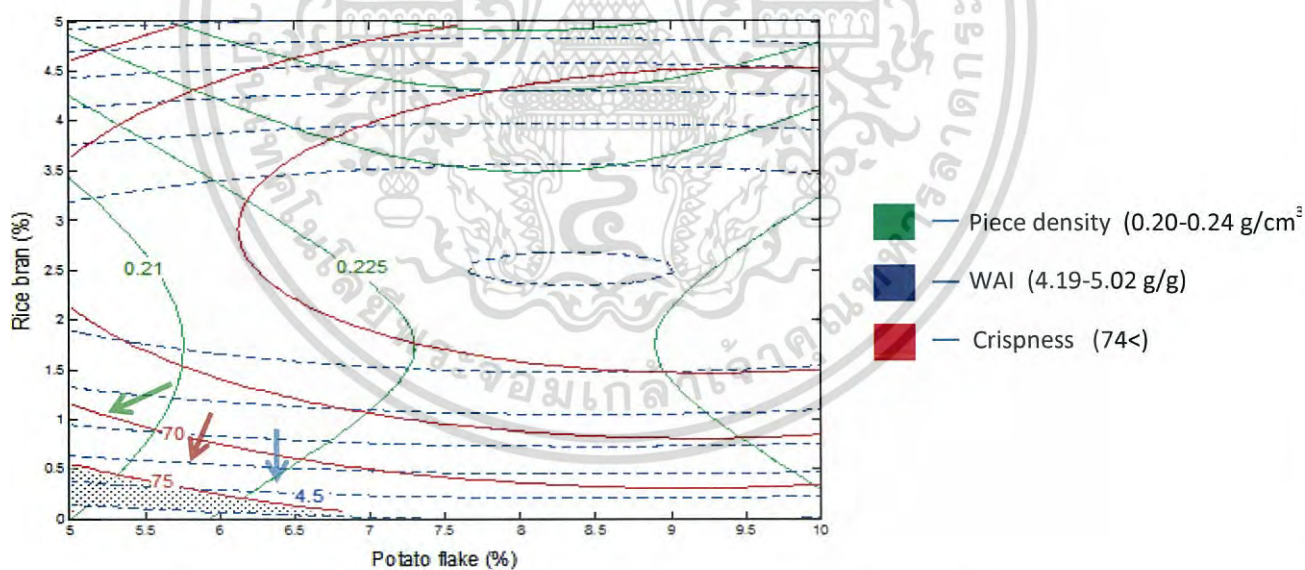
No.	WAI (g/g)	Cripness (peak)	Density (g/cm ³)
1 (ซีโตส)	4.1929	74	0.2090
2 (ทวิสโก้)	5.0206	74	0.2397

โดยทำการเปลี่ยนปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่ 3 ระดับ คือ 0 , 5 และ 10 % ตามลำดับ โดยจะแสดงค่าที่เหมาะสมสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากห้องตลาดในรูปแบบของ Contour plot ดังแสดงในรูปที่ 4.30 , 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ



รูปที่ 4.31 แสดงค่าคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 0 %

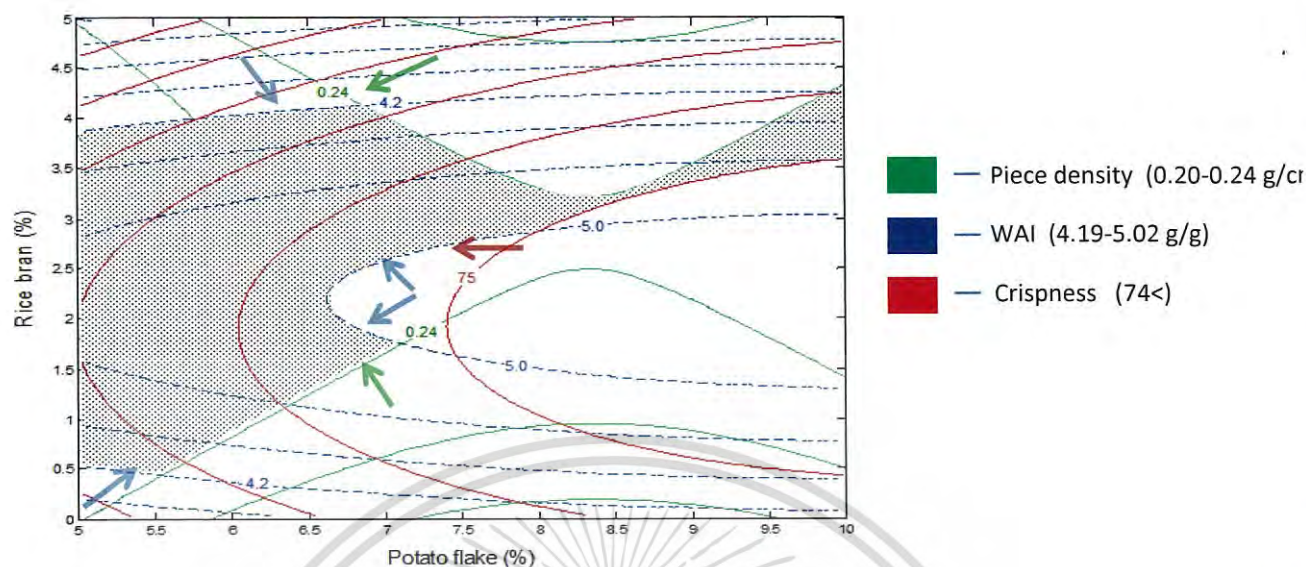
จากกราฟค่าความหนาแน่นชิ้นที่ได้จะอยู่ในช่วง $0.20 - 0.23 \text{ g/cm}^3$ ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำจะอยู่ในช่วง $4.2 - 5 \text{ g/g}$ และค่าความกรอบอยู่ในช่วง $75 - 80$ peak โดยที่ส่วนแรงเสียดาคือส่วนที่มีค่าที่เหมาะสมสำหรับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 0 %



รูปที่ 4.32 แสดงค่าคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 5 %

จากกราฟค่าความหนาแน่นชิ้นที่ได้จะอยู่ในช่วง $0.20 - 0.23 \text{ g/cm}^3$ ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำจะอยู่ในช่วง $4.6 - 5 \text{ g/g}$ และค่าความกรอบอยู่ในช่วง $75 - 80$ peak โดยที่ส่วนแรงเสียดาคือส่วนที่มีค่าที่เหมาะสมสำหรับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 แสดงค่าคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 10 %

จากกราฟค่าความหนาแน่นขึ้นที่ได้จะอยู่ในช่วง $0.20 - 0.24 \text{ g/cm}^3$ ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำจะอยู่ในช่วง $4.2 - 5 \text{ g/g}$ และค่าความกรอบอยู่ในช่วง $75 - 95 \text{ peak}$ โดยที่ส่วนแรงสีต่ำคือส่วนที่มีค่าที่เหมาะสมสำหรับปริมาณแป้งมันสำปะหลัง 10 %

จากการเปรียบเทียบทั้ง 3 แบบ จะได้ค่าสภาวะที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากท้องตลาดที่สุดคือ การใช้อัตราส่วนปริมาณแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และรำข้าวที่อัตราส่วน 10:5:0 ซึ่งจะมีค่าคุณลักษณะต่างๆคือ ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ 4.2273 g/g , ค่าความกรอบ 78 peak และค่าความหนาแน่นขึ้น 0.2245 g/cm^3

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษากระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้วัตถุดิบจากปลายข้าวบด สำหรับสายสไปรูลิน่า แป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และรำข้าว โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว ปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วย อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ แป้งมันฝรั่ง เท่ากับ 5 7.5 และ 10%, แป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 0 5 และ 10% และรำข้าว สำปะหลัง เท่ากับ 0 2.5 และ 5% ซึ่งอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

5.1. การใช้อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบโดยการเพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่งทำให้เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าความชื้น ,ค่าความหนาแน่นขึ้น ,อัตราส่วนการขยายตัว และค่าความเป็นสีแดงมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ ,ค่าความสามารถในการละลายน้ำ ,ค่าความกรอบ และค่าความสว่างมีค่าลดลง ส่วนค่าความแข็งนั้นไม่ส่งผลมากนัก ขณะที่ค่าความเป็นสีเหลืองจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังทั้งคู่

5.2. การใช้อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบโดยการเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังทำให้เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าความชื้น ,ค่าความหนาแน่นขึ้น ,อัตราส่วนการขยายตัว ,ค่าความสามารถในการละลายน้ำ และค่าความกรอบมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ ,ค่าความสว่าง และค่าความเป็นสีแดงมีค่าลดลง ส่วนค่าความแข็งนั้นไม่ส่งผลมากนัก

5.3. การใช้อัตราส่วนผสมของวัตถุดิบโดยการเพิ่มปริมาณรำข้าวทำให้เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าความชื้น ,อัตราส่วนการขยายตัว ,ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ ,และค่าความเป็นสีแดงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งค่าความเป็นสีเหลืองก็มีค่าสูงขึ้นเช่นกันแต่จะต้องไม่เพิ่มปริมาณแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังเลยจึงจะเกิดผลสูงสุด ในขณะที่ค่าความสามารถในการละลายน้ำ ,ค่าความกรอบ และค่าความสว่างมีค่าลดลง ส่วนค่าความแข็งและค่าความหนาแน่นนั้นไม่ส่งผลมากนัก โดยที่การเพิ่มปริมาณรำข้าว นั้นจะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ

5.4. สภาพที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวสายสไปรูริน่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากท้องตลาดซึ่งได้แก่ ผลิตภัณฑ์ข้าวโพดกรอบ รสบาร์คิว ตราสินค้าทวิสโก้ และผลิตภัณฑ์ข้าวโพดกรอบ รสอเมริกันชีส ตราสินค้าซีโตส คือการใช้อัตราส่วนผสมแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และรำข้าวในอัตรา 10:5:0 โดยสภาพที่เหมาะสมที่ได้เป็นเพียงการคาดเดาที่เกิดจากการเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์จากท้องตลาดที่มีค่าคุณลักษณะใกล้เคียงกันมากที่สุดเท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ปัญหาของการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากสาหร่ายสไปรูรีน่านั้นคือข้อจำกัดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ในเรื่องของสภาวะการผลิตซึ่งก็คือ ความเร็วรอบสกรู อุณหภูมิบาร์เรล และใบมีดตัด จึงทำให้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูปร่างเป็นแท่งยาว ซึ่งความจริงแล้วสามารถทำให้เป็นชิ้นเล็กๆได้ หรือหากต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีรูปร่างอื่นๆก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนหน้าแปลน ซึ่งควรมีการศึกษากระบวนการผลิตเอ็กซ์ทรูชั่นเพิ่มเติม

2) การปรุงแต่งสีเพื่อให้ได้ลักษณะที่สวยงามของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวจากสาหร่ายสไปรูรีน่านั้นสามารถใช้สีธรรมชาติจากพืชสมุนไพร ซึ่งควรมีการศึกษาวิธีการผลิตสีผสมอาหารจากพืชผักหรือผลไม้มาใช้ประโยชน์

3) เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ได้ผ่านการใช้งานมาหลายปีทำให้ระบบการทำงาน และประสิทธิภาพของเครื่องลดลง มีผลทำให้เอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ได้ไม่คงที่ การแก้ปัญหาเบื้องต้น คือ ต้องทำการทดลองให้เสร็จภายในวันเดียวกัน

4) ปัญหาของวัตถุดิบที่มีขนาดอนุภาคไม่เท่ากัน ทำให้เอ็กซ์ทรูเดอร์แตกไม่ทั่วถึงและไม่พอง ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ ดังนั้นควรมีการศึกษาขนาดอนุภาคของวัตถุดิบที่นำมาทำการทดลองหรือใช้เครื่อง Hammer Mill ในการบดส่วนผสมให้มีขนาดใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นฤคันธ์ วาสิตติก. (2541) การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว จากปลายข้าวหอมมะลิ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. : 46-67.
- นิพัฒน์ สุขวิบูลย์, สุทธิณี เจริญคิด, สันติ โยธาราชภูร์, กิ่งกาญจน์ เกียรติอนันต์, ศิวพร แสงภัทรเนตร, พันธุ์ศักดิ์ แก่นหอม และประนอม ใจอ้าย. 2556. เทคโนโลยีการผลิตพริก คุณภาพในภาคเหนือตอนบน. หจก.ดาราวรรณการพิมพ์ : เชียงใหม่
- รุ่งนภา พงศ์สวัสดิมานิต์ . (2541). วิศวกรรมอาหาร: หน่วยปฏิบัติการในอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วรุฒิ บุญลี. (2541). การศึกษาเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์: ปัญหาพิเศษปริญญาตรี. นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร.
- สันติ หิรัญอร, และมาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์. (2008). ผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของเอกซ์ทรูเดทที่ได้จากปลายข้าวโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว. วิศวกรรมลาดกระบัง, 25, 31-36.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวง อุตสาหกรรม. (2541) มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ขนมกรอบจากธัญชาติ). มอก.1534-2541.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2560). สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญและแนวโน้ม มปี2560 [ออนไลน์].ได้จาก:
- อรอนงค์ วินัยกุล. 2535. ผลิตภัณฑ์จากข้าวและคุณค่าทางโภชนาการ(ต่อ). วารสารอุตสาหกรรมเกษตร 3.(1):44.
- Alvarez-Martinez L., Kondury K.P. and Harper J.M., A general model for expansion of extruded products, Journal of Food Science, 53, (1988)
- Anderson, R.A., Conway, H.F., Pfeifer, V.F. and Griffin, E.L., (1969). Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking. Cereal Science Today 14, pp. 4–12.
- AOAC (1990) Official methods of analysis (14th ed.). Washington: Association of Official Analytical Chemists.
- Bhosale S. and Vijayalakshmi D. (2015) Processing and nutritional composition of Rice Bran. Current Research in Nutrition and Food Science, 3(1): 74-80
- Blenford, D.E. (1982) What is a snack ? Food Flavours Ingredients. Processing and Packagings. 4 (11) : 30–37.
- Fazzolare, C. (1969) Extruded Starch – base Snack Cereal Sci. Today. 14 : 212–214.
- French, D. (1984). In Starch Chemistry and Technology, ed. R.L. Whistler, J.N. Bemiller & E.F. Paschall. Academic Press Inc., Orlando, Florida, USA, p. 184.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Galliard, T. and Bowler, P. (1987) Morphology and Composition of Starch, In: Galliard, T., Ed. Starch: Properties and Potential, John Wiley & Sons, New York, 281.
- Guha, M. and Ali, S. Z. 2006. Extrusion Cooking of Rice: Effect of amylose content and barrel temperature on product profile. *Journal of Food Processing and Preservation* 30 (6): 706-716.
- Guy R. (2001) Single-Vs.twin-screw extruder. *Extrusion cooking Technologies and applications*. : 57-58
- Guy, R. (2001). *Extrusion cooking: technologies and applications*, Woodhead Publishing, ISBN 978-185-5735-59-0, Cambridge, United Kingdom.
- Harper, J.M. (1981) Starch-based extruded foods. Ch.12 In *Extrusion of Foods V. II*. :61-88.
- Hauck, B.W. (1993) Choosing an extruder in (A. Turner,Ed.). *Food Technology International Europe*. Sterling Publications International. London. : 81-82
- Hizukuri, S., (1986). Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectin and its significance. *Carbohydrate Research* 147, 342–347.
http://www.oae.go.th/assets/portals/1/files/econ/2561/econof1_2561.pdf
- Huenemann, R.L, L.R. Shapiro, M.C. Hampton, and B.W. Mitchell (1968). Food and Eating practices of teenagers. *J Am Diet Assoc* 53 : 17.
- Iqbal A., Khalil I.A., Ateeq N. and Khan M.S. (2006) Nutritional quality of important food legumes. *Food chem.* 97,331-335
- Jane, J., & Shen, J. J. (1993). Internal structure of the potato starch granule revealed by chemical gelatinization. *Carbohydrate Research*, 247, 279–290.
- Jane, J., Xu, A., Radosavljevic, M. and Seib, P. A. 1992. Location of Amylose in Normal Starch Granules .1. Susceptibility of Amylose and Amylopectin to Cross-Linking Reagents. *Cereal Chemistry* 69:405-409
- Joshi S.M.R., Bera M.B. and Panesar P.S. (2012) Extrusion cooking of maize /spirulina mixture: Factors affecting expanded product characteristics and sensory quality. *Journal of food processing and preservation*. 38(2014): 655-664.
- Kasemsuwan, T. and Jane, J. 1994. Location of Amylose in Normal Starch Granules .2. Locations of Phosphodiester Cross-Linking Revealed by P-31 Nuclear-Magnetic-Resonance. *Cereal Chemistry* 71:282-287.
- Khan, Z; Bhadouria, P; Bisen, PS. (2005) Nutritional and therapeutic potential of Spirulina. *Current pharmaceutical biotechnology*. 6 (5): 373–9.

- Moore, G (1994). Snack food extrusion. In N.D. Frame (ed). *The Technology of Extrusion Cooking*. Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman and Hall, Bishopbriggs, Glasgow.
- Morsy, O. M., Sharoba, A. M., El-Desouky, A. I., Bahlol, H. E. M., & Abd El Mawla, E. M. (2014). Production and evaluation of some extruded food products using *Spirulina* algae. *Annals of Agricultural Science Moshtohor*, 52(4), 329-342.
- Park, J., Rhee, K.S., Kim, B.K. and Rhee, K.C., Effect of extrusion parameters on the quality of buchweat flour mixes. *Cereal Chemistry* 75 (1993)
- Pomeranz, Y. (1985). *Functional properties of food components*. Academic Press: Orlando, FL.
- Ranhotra, G.S. and Vetter, J.L. (1991) Food considered for nutrition addition : Snacks and confectioneries. *Nutrient Additions to Food*. Food & Nutrition Press, Inc., Connecticut. : 319–346.
- Robin, J.P., Mercier, C., Charbonniere, R & Guilbot, A. (1974). Lintnerized starch . Gel filtration and enzymatic studies of insoluble residues from prolonged acid treatment of potato starch. *Cereal Chem.* 51, 389-406
- Singh CB, Xavier KAM, Deshmukhe G, Gudipati V. Shitole SS and Balange AK (2017) Fortification of Extruded Product with Brown Seaweed (*Sargassum tenerrimum*) and Its Process Optimization by Response Surface Methodology. *Waste and Biomass Valorization*. DOI 10.1007/s12649-017-9831-2
- Vijayarani D., Ponnalaghu S. and Rajathivya J. (2012) Development of Value Added Extruded Product Using *Spirulina*. *International Journal of Health Sciences & Research* (www.ijhsr.org) .Vol.2; Issue: 4; July 2012
- Whistler , R.L. and J.R., Daniel. 1984. Molecular Structure of starch. pp. 153 – 182. In R.L., Whistler , J.N., Bemiller and E.F., Paschall (eds.). *Starch Chemistry and Technology*. Academic Press. New York. 718p.
- White, J.L., *Twin Screw Extrusion: Technology and Principles*, Hanser Publishers, New York (1991) ISBN 3446156917.



ภาคผนวก

- ก. ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง
- ข. ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ แสดงนัยสำคัญทางสถิติ
- ค. ภาพอุปกรณ์ วิธีการทดลอง และผลิตภัณฑ์อาหารคบเคี้ยวสำหรับรายสไปรูลิน่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองของผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวในท้องตลาด

- ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดท (Moisture content, MC)
- ความหนาแน่นชิ้น (Piece density, PD)
- อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion Ratio, ER)
- ความสามารถในการดูดซับ (Water absorption index, WAI)
- ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility index, WSI)
- ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture analysis)
- สี (Color)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต (ผ่านการอบ)

No	ครั้งที่	นน.ภาชนะ (g)	นน.ภาชนะ+นน.ตัวอย่าง (ก่อนอบ)(g)	นน.ภาชนะ+นน.ตัวอย่าง (หลังอบ)(g)	ความชื้น (%)
1	1	10.7661	12.7721	12.7379	1.7049
	2	10.8398	12.8516	12.8097	2.0827
	3	12.6263	14.6376	14.5934	2.1976
	เฉลี่ย	11.4107	13.4204	13.3803	1.9951
2	1	10.1134	12.1180	12.0625	2.7686
	2	10.2777	12.2802	12.2329	2.3620
	3	9.5100	11.5162	11.4704	2.2829
	เฉลี่ย	9.9670	11.9715	11.9219	2.4712
3	1	7.8670	9.8685	9.8032	3.2626
	2	8.0085	10.0110	9.9614	2.4769
	3	7.9210	9.9273	9.8767	2.5221
	เฉลี่ย	7.9322	9.9356	9.8804	2.7538
4	1	12.9790	14.9844	14.9284	2.7925
	2	12.5116	14.5164	14.4571	2.9579
	3	10.0740	12.0800	12.0239	2.7966
	เฉลี่ย	11.8549	13.8603	13.8031	2.8490
5	1	12.8737	14.8775	14.8123	3.2538
	2	9.3532	11.3562	11.2852	3.5447
	3	12.7429	14.7469	14.6897	2.8543
	เฉลี่ย	11.6566	13.6602	13.5957	3.2176
6	1	12.6109	14.6148	14.5593	2.7696
	2	10.3548	12.3578	12.2922	3.2751
	3	12.7698	14.7751	14.7094	3.2763
	เฉลี่ย	11.9118	13.9159	13.8536	3.1070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต (ผ่านการอบ)

No	ครั้งที่	นน.ภาชนะ (g)	นน.ภาชนะ+นน.ตัวอย่าง (ก่อนอบ)(g)	นน.ภาชนะ+นน.ตัวอย่าง (หลังอบ)(g)	ความชื้น (%)
7	1	12.6803	14.6843	14.6414	2.1407
	2	12.6929	14.6978	14.6261	3.5762
	3	12.4227	14.4279	14.3571	3.5308
	เฉลี่ย	12.5986	14.6033	14.5415	3.0826
8	1	10.2570	12.2609	12.2121	2.4353
	2	12.6120	14.6153	14.5805	1.7371
	3	12.7611	14.7697	14.7298	1.9865
	เฉลี่ย	11.8767	13.8820	13.8408	2.0529
9	1	12.6254	14.6353	14.5715	3.1743
	2	10.5296	12.5363	12.4915	2.2325
	3	9.3502	11.3544	11.3009	2.6694
	เฉลี่ย	10.8351	12.8420	12.7880	2.6921
10	1	12.4149	14.4172	14.3452	3.5959
	2	12.7137	14.7161	14.6389	3.8554
	3	10.6264	12.6293	12.5523	3.8444
	เฉลี่ย	11.9183	13.9209	13.8455	3.7652
11	1	12.6064	14.6117	14.5613	2.5133
	2	9.9433	11.9479	11.8937	2.7038
	3	13.0967	15.1008	15.0382	3.1236
	เฉลี่ย	11.8821	13.8868	13.8311	2.7802
12	1	12.6388	14.6432	14.5877	2.7689
	2	10.4526	12.4610	12.4000	3.0372
	3	10.7698	12.7726	12.7060	3.3253
	เฉลี่ย	11.2871	13.2923	13.2312	3.0438

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต (ผ่านการอบ)

No	ครั้งที่	นน.ภาชนะ (g)	นน.ภาชนะ+นน.ตัวอย่าง (ก่อนอบ)(g)	นน.ภาชนะ+นน.ตัวอย่าง (หลังอบ)(g)	ความชื้น (%)
13	1	12.8575	14.8603	14.8012	2.9509
	2	12.7476	14.7567	14.6834	3.6484
	3	12.4269	14.4297	14.3563	3.6649
	เฉลี่ย	12.6773	14.6822	14.6136	3.4214
14	1	10.6149	12.6212	12.5669	2.7065
	2	12.7145	14.7157	14.6512	3.2231
	3	12.8232	14.8310	14.7860	2.2413
	เฉลี่ย	12.0509	14.0560	14.0014	2.7236
15	1	7.8399	9.8483	9.8047	2.1709
	2	7.9615	9.9647	9.9099	2.7356
	3	7.8378	9.8433	9.7941	2.4533
	เฉลี่ย	7.8797	9.8854	9.8362	2.4533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นขึ้นของเอ็กซ์ทรูเดต

ครั้งที่	การทดลอง							ความหนาแน่น (g/cm ³)
	1			ความหนาแน่น (g/cm ³)	2			
	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)		น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)	
1	1.2478	0.965	7.410	0.2301	1.3045	1.110	6.560	0.2054
2	1.3848	1.090	7.550	0.1965	1.3655	1.140	6.240	0.2143
3	1.5048	1.060	8.150	0.2091	1.2817	1.160	6.840	0.1772
4	1.2084	1.110	7.215	0.1730	1.2661	1.165	6.890	0.1723
5	1.2575	1.120	7.855	0.1624	1.2759	1.185	7.015	0.1648
6	1.3242	1.070	7.250	0.2030	1.2682	1.060	7.210	0.1992
7	1.4566	1.070	7.180	0.2255	1.2472	1.090	6.890	0.1939
8	1.3284	1.110	7.280	0.1885	1.2473	1.070	7.110	0.1950
9	1.3498	1.120	7.185	0.1906	1.4099	1.120	7.240	0.1976
10	1.3743	1.065	7.370	0.2092	1.2036	1.150	6.230	0.1859
average	1.3437	1.0780	7.4445	0.1977	1.2870	1.1250	6.8225	0.1897

ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นขึ้นของเอ็กซ์ทรูเดต

ครั้งที่	การทดลอง							
	3			ความ หนาแน่น (g/cm ³)	4			ความ หนาแน่น (g/cm ³)
	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)		น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)	
1	1.2583	1.135	7.330	0.1696	1.4600	1.110	7.290	0.2069
2	1.3937	1.080	7.255	0.2096	1.6066	1.130	7.550	0.2121
3	1.5781	1.140	7.305	0.2116	1.5685	1.160	7.120	0.2084
4	1.2708	1.090	7.070	0.1925	1.4178	1.090	7.210	0.2107
5	1.2475	1.050	7.670	0.1878	1.4161	1.080	7.030	0.2198
6	1.4492	1.080	7.920	0.1997	1.4449	1.100	7.310	0.2079
7	1.4176	1.090	7.340	0.2069	1.5569	1.140	7.430	0.2052
8	1.2833	1.060	7.340	0.1980	1.5769	1.100	7.390	0.2244
9	1.3558	1.050	7.470	0.2095	1.4895	1.155	7.740	0.1836
10	1.4527	1.010	7.540	0.2404	1.4220	1.120	7.200	0.2004
average	1.3707	1.0785	7.4240	0.2020	1.4959	1.1185	7.3270	0.2077

ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นขึ้นของเอ็กซ์ทรูเดต

ครั้งที่	การทดลอง							ความหนาแน่น (g/cm ³)
	5			ความหนาแน่น (g/cm ³)	6			
	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)		น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)	
1	1.5288	1.120	7.640	0.2030	1.5515	1.105	8.020	0.2016
2	1.6692	1.130	7.820	0.2128	1.9029	1.120	7.610	0.2537
3	1.5114	1.110	7.960	0.1961	1.7388	1.160	8.170	0.2013
4	1.7431	1.115	8.140	0.2192	1.9767	1.110	8.610	0.2372
5	1.5734	1.170	7.860	0.1861	1.7022	1.120	8.085	0.2136
6	1.6541	1.110	8.040	0.2125	1.5842	1.130	7.440	0.2122
7	1.5886	1.100	7.990	0.2091	1.5890	1.100	7.805	0.2141
8	1.6515	1.110	8.000	0.2132	1.7186	1.105	7.910	0.2265
9	1.5001	1.170	7.360	0.1895	1.8625	1.110	7.830	0.2457
10	1.5796	1.080	8.200	0.2102	1.9729	1.200	7.220	0.2415
average	1.6000	1.1215	7.9010	0.2049	1.7599	1.1260	7.8700	0.2245

ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นชั้นของเอ็กซ์ทรูเดต

ครั้งที่	การทดลอง							ความหนาแน่น (g/cm ³)
	7			ความหนาแน่น (g/cm ³)	8			
	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)		
1	1.6347	1.050	8.215	0.2297	1.1182	0.990	7.620	0.1906
2	1.4566	1.010	8.160	0.2227	1.0970	0.980	7.640	0.1903
3	1.6469	1.040	8.010	0.2419	1.1433	1.020	7.415	0.1886
4	1.5133	1.060	8.170	0.2098	1.1337	0.940	7.730	0.2113
5	1.6371	1.065	8.170	0.2248	1.0194	0.940	7.215	0.2035
6	1.5278	1.055	8.135	0.2148	1.1292	0.960	7.670	0.2033
7	1.5756	1.015	8.250	0.2359	1.1668	0.940	7.410	0.2268
8	1.4822	1.010	8.170	0.2263	1.1000	0.980	7.410	0.1967
9	1.6990	1.050	8.130	0.2412	1.1074	1.020	7.260	0.1866
10	1.4184	1.020	7.860	0.2208	1.0705	0.960	7.250	0.2039
average	1.5592	1.0375	8.1270	0.2268	1.1086	0.9730	7.4620	0.1997

ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นขึ้นของเอ็กซ์ทรูเดต

ครั้งที่	การทดลอง							
	9			ความ หนาแน่น (g/cm ³)	10			ความ หนาแน่น (g/cm ³)
	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)		น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)	
1	1.5760	1.060	7.260	0.2459	1.6696	0.990	7.705	0.2814
2	1.7510	1.100	7.900	0.2331	1.6843	0.920	7.620	0.3324
3	1.5341	1.130	6.630	0.2306	1.7018	1.020	7.430	0.2802
4	1.5314	1.100	6.930	0.2324	1.5815	1.010	7.440	0.2652
5	1.8500	1.100	7.355	0.2646	1.6211	1.060	7.880	0.2330
6	1.6381	0.985	7.235	0.2970	1.5509	1.000	7.660	0.2577
7	1.5931	1.115	7.100	0.2297	1.6793	1.025	7.595	0.2678
8	1.5637	1.140	6.985	0.2192	1.8806	1.020	7.965	0.2888
9	1.5887	1.165	7.210	0.2066	1.8074	1.030	7.670	0.2827
10	1.4872	1.100	7.130	0.2194	1.6815	1.000	7.855	0.2724
average	1.6113	1.0995	7.1735	0.2365	1.6858	1.0075	7.6820	0.2752

ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นขึ้นของเอ็กซ์ทรูเดต

ครั้งที่	การทดลอง							ความหนาแน่น (g/cm ³)
	11			ความหนาแน่น (g/cm ³)	12			
	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)		น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)	
1	1.6828	1.100	7.820	0.2263	1.5512	0.990	8.170	0.2466
2	1.3589	0.940	7.700	0.2542	1.3975	0.980	8.135	0.2277
3	1.7714	1.180	8.100	0.1999	1.3331	1.020	7.960	0.2049
4	1.6087	1.065	7.200	0.2507	1.5071	0.980	8.190	0.2439
5	1.7692	1.075	7.630	0.2554	1.5158	1.030	8.180	0.2223
6	1.5423	1.000	7.770	0.2526	1.4936	0.960	8.040	0.2565
7	1.7370	1.090	7.665	0.2428	1.5190	1.060	8.070	0.2132
8	1.4051	1.010	7.400	0.2369	1.5276	1.000	8.170	0.2380
9	1.7767	1.125	7.665	0.2331	1.4962	1.020	7.850	0.2332
10	1.7958	1.080	7.660	0.2558	1.3702	1.030	7.870	0.2089
average	1.6448	1.0665	7.6610	0.2402	1.4711	1.0070	8.0635	0.2290

ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นขึ้นของเอ็กซ์ทรูเดต

ครั้งที่	การทดลอง							
	13			ความหนาแน่น (g/cm ³)	14			ความหนาแน่น (g/cm ³)
	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)		น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)	
1	1.6469	1.030	7.990	0.2473	1.5295	1.005	7.630	0.2526
2	1.6415	1.040	8.030	0.2405	1.4745	1.030	7.750	0.2282
3	1.7271	1.090	8.030	0.2304	1.4242	1.090	7.700	0.1981
4	1.6606	1.025	7.720	0.2606	1.5548	1.060	7.850	0.2244
5	1.5623	1.040	7.775	0.2364	1.4121	1.070	7.230	0.2171
6	1.6287	1.030	7.940	0.2461	1.5085	1.020	7.590	0.2431
7	1.7719	1.105	8.005	0.2307	1.5180	1.010	7.570	0.2502
8	1.7038	1.070	7.820	0.2422	1.3278	1.020	7.570	0.2146
9	1.6232	1.050	8.020	0.2336	1.4753	1.040	7.510	0.2312
10	1.6457	1.060	7.830	0.2381	1.4190	1.010	7.590	0.2333
average	1.6612	1.0540	7.9160	0.2404	1.4644	1.0355	7.5990	0.2287

ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นขึ้นของเอ็กซ์ทรูเดต

ครั้งที่	การทดลอง			ความหนาแน่น (g/cm ³)
	15			
	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)	
1	1.3354	1.070	7.150	0.2076
2	1.2866	1.020	7.260	0.2168
3	1.3101	1.040	7.270	0.2121
4	1.2278	0.975	7.320	0.2246
5	1.2269	1.040	6.920	0.2086
6	1.3059	1.050	7.190	0.2097
7	1.2298	0.980	7.000	0.2328
8	1.3033	1.040	7.460	0.2056
9	1.1632	1.030	7.200	0.1938
10	1.4253	1.050	7.330	0.2245
average	1.2814	1.0295	7.2100	0.2134

ตารางที่ ก.3 ค่าอัตราการขยายของเอ็กซ์ทรูเดต

No.	ครั้งที่ (mm)										ค่าเฉลี่ย (mm)	ER
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	9.65	10.90	10.60	11.10	11.20	10.70	10.70	11.10	11.20	10.65	10.78	2.3956
2	11.10	11.40	11.60	11.65	11.85	10.60	10.90	10.70	11.20	11.50	11.25	2.5000
3	11.35	10.80	11.40	11.40	10.50	10.80	10.90	10.60	10.50	10.10	10.84	2.4078
4	11.10	11.30	11.60	10.90	10.80	11.00	11.40	11.00	11.55	11.20	11.19	2.4856
5	11.20	11.30	11.10	11.15	11.70	11.10	11.00	11.10	11.70	10.80	11.22	2.4922
6	11.05	11.20	11.60	11.10	11.20	11.30	11.00	11.05	11.10	12.00	11.26	2.5022
7	10.50	10.10	10.40	10.60	10.65	10.55	10.15	10.10	10.50	10.20	10.38	2.3056
8	9.90	9.80	10.20	9.40	9.40	9.60	9.40	9.80	10.20	9.60	9.73	2.1622
9	10.60	11.00	11.30	11.00	11.00	9.85	11.15	11.40	11.65	11.00	11.00	2.4433
10	9.90	9.20	10.20	10.10	10.60	10.00	10.25	10.20	10.30	10.00	10.08	2.2389
11	11.00	9.40	11.80	10.65	10.75	10.00	10.90	10.10	11.25	10.80	10.67	2.3700
12	9.90	9.80	10.20	9.80	10.30	9.60	10.60	10.00	10.20	10.30	10.07	2.2378
13	10.30	10.40	10.90	10.25	10.40	10.30	11.05	10.70	10.50	10.60	10.54	2.3422
14	10.05	10.30	10.90	10.60	10.70	10.20	10.10	10.20	10.40	10.10	10.36	2.3011
15	10.70	10.20	10.40	9.75	10.40	10.50	9.80	10.40	10.30	10.50	10.30	2.2878

หมายเหตุ รูปร่างแผ่นมีขนาด 4.5 mm

ตารางที่ ก.4 ค่า WAI และ WSI ของเอ็กซ์ทราคต

No.	ครั้งที่	นน.ของแข็งแห้ง (g)	นน.ตะกอน (g)	นน.ถั่ว (g)	นน.เจด (g)	นน.ถั่ว + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	นน.ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
1	1	2.0050	12.0112	10.6123	10.8466	11.0956	0.4833	5.9906	24.1047
	2	2.0080	12.0854	9.9422	10.9315	10.4286	0.4864	6.0186	24.2231
	3	2.0034	12.0483	10.8406	10.8633	11.3055	0.4649	6.0139	23.2056
	เฉลี่ย	2.0055	12.0483	10.4650	10.8805	10.9432	0.4782	6.0077	23.8445
2	1	2.0036	10.0903	9.3533	11.7097	9.8488	0.4955	5.0361	24.7305
	2	2.0022	12.3923	12.4157	11.2419	12.8874	0.4717	6.1893	23.5591
	3	2.0021	10.3498	12.6278	11.2303	13.0839	0.4561	5.1695	22.7811
	เฉลี่ย	2.0026	10.9441	11.4656	11.3940	11.9400	0.4744	5.4650	23.6902
3	1	2.0013	10.9953	9.3533	10.2583	10.5867	1.2334	5.4941	61.6299
	2	2.0030	10.9143	12.4157	12.4335	13.5604	1.1447	5.4490	57.1493
	3	2.0050	10.3498	11.0127	10.3654	12.1977	1.1850	5.1620	59.1022
	เฉลี่ย	2.0031	10.7531	10.9272	11.0191	12.1149	1.1877	5.3684	59.2938

หมายเหตุ เติมน้ำกลั่น 25 กรัม

ตารางที่ ก.4 ค่า WAI และ WSI ของเอ็กซ์ทรูเดต

No.	ครั้งที่	นน.ของแข็งแห้ง (g)	นน.ตะกอน (g)	นน.ถั่ว (g)	นน.เจล (g)	นน.ถั่ว + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	นน.ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
4	1	2.0037	11.0328	12.6053	12.6125	13.2446	0.6393	5.5062	31.9060
	2	2.0079	10.5919	10.4548	12.8065	11.1027	0.6479	5.2751	32.2675
	3	2.0090	10.5974	10.6308	13.1504	11.3258	0.6950	5.2750	34.5943
	เฉลี่ย	2.0069	10.7407	11.2303	12.8565	11.8910	0.6607	5.3521	32.9226
5	1	2.0037	7.5054	10.6137	15.9684	11.4853	0.8716	3.7458	43.4995
	2	2.0064	8.8455	12.6276	13.0670	13.3443	0.7167	4.4086	35.7207
	3	2.0045	8.0897	12.4152	14.5573	13.2461	0.8309	4.0358	41.4517
	เฉลี่ย	2.0049	8.1469	11.8855	14.5309	12.6919	0.8064	4.0634	40.2240
6	1	2.0069	7.1320	12.8444	15.8107	13.7817	0.9373	3.5537	46.7039
	2	2.0056	10.1588	10.4531	11.4870	11.0697	0.6166	5.0652	30.7439
	3	2.0022	8.1349	10.3654	15.0782	11.1816	0.8162	4.0630	40.7652
	เฉลี่ย	2.0049	8.4752	11.2210	14.1253	12.0110	0.7900	4.2273	39.4043

หมายเหตุ เติมน้ำกลั่น 25 กรัม

ตารางที่ ก.4 ค่า WAI และ WSI ของเอ็กซ์ทรูเดต

No.	ครั้งที่	นน.ของแข็งแห้ง (g)	นน.ตะกอน (g)	นน.ถั่ว (g)	นน.เจล (g)	นน.ถั่ว + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	นน.ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
7	1	2.0071	7.5247	10.2587	15.0598	11.0901	0.8314	3.7490	41.4229
	2	2.0032	8.4560	12.6266	14.4179	13.6572	1.0306	4.2212	51.4477
	3	2.0070	8.7297	12.4240	13.8737	13.1727	0.7487	4.3496	37.3044
	เฉลี่ย	2.0058	8.2368	11.7698	14.4505	12.6400	0.8702	4.1066	43.3917
8	1	2.0020	5.3209	9.9417	16.7813	10.9853	1.0436	2.6578	52.1279
	2	2.0048	7.4574	12.7146	16.0775	13.6352	0.9206	3.7198	45.9198
	3	2.0044	7.5878	12.8232	14.7230	13.7171	0.8939	3.7856	44.5969
	เฉลี่ย	2.0037	6.7887	11.8265	15.8606	12.7792	0.9527	3.3877	47.5482
9	1	2.0025	8.5970	10.1138	14.4212	10.9073	0.7935	4.2931	39.6255
	2	2.0073	8.9129	12.6381	15.0953	13.4934	0.8553	4.4402	42.6095
	3	2.0042	9.8095	10.6274	13.4288	11.2630	0.6356	4.8945	31.7134
	เฉลี่ย	2.0047	9.1065	11.1264	14.3151	11.8879	0.7615	4.5426	37.9828

หมายเหตุ เติมน้ำกลั่น 25 กรัม

ตารางที่ ก.4 ค่า WAI และ WSI ของเอ็กซ์ทราคต

No.	ครั้งที่	นน.ของแข็งแห้ง (g)	นน.ตะกอน (g)	นน.ถั่ว (g)	นน.เจด (g)	นน.ถั่ว + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	นน.ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
10	1	2.0078	6.8539	12.7709	15.889	13.7255	0.9546	3.4136	47.5446
	2	2.0082	8.4186	10.278	12.2715	10.9396	0.6616	4.1921	32.9449
	3	2.0085	8.2085	10.8402	14.2836	11.7426	0.9024	4.0869	44.9291
	เฉลี่ย	2.0082	7.8270	11.2964	14.1480	12.1359	0.8395	3.8975	41.8062
11	1	2.0035	9.3311	9.5125	13.0840	10.1644	0.6519	4.6574	32.5381
	2	2.0045	8.4745	12.6060	13.9957	13.3644	0.7584	4.2277	37.8349
	3	2.0037	8.8262	9.3531	13.2129	10.0391	0.6860	4.4050	34.2367
	เฉลี่ย	2.0039	8.8773	10.4905	13.4309	11.1893	0.6988	4.4300	34.8699
12	1	2.0088	6.0921	13.0967	15.7568	14.1520	1.0553	3.0327	52.5339
	2	2.0082	7.5932	9.3535	14.7857	10.2457	0.8922	3.7811	44.4278
	3	2.0010	8.1003	10.7669	15.2297	11.5904	0.8235	4.0481	41.1544
	เฉลี่ย	2.0060	7.2619	11.0724	15.2574	11.9960	0.9237	3.6206	46.0387

หมายเหตุ เติมน้ำกลั่น 25 กรัม

ตารางที่ ก.4 ค่า WAI และ WSI ของเอ็กซ์ทรูเดต

No.	ครั้งที่	นน.ของแข็งแห้ง (g)	นน.ตะกอน (g)	นน.ถั่ว (g)	นน.เจด (g)	นน.ถั่ว + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	นน.ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
13	1	2.0050	12.0112	10.6123	10.8466	11.0956	0.4833	5.9906	24.1047
	2	2.0080	12.0854	9.9422	10.9315	10.4286	0.4864	6.0186	24.2231
	3	2.0034	12.0483	10.8406	10.8633	11.3055	0.4649	6.0139	23.2056
	เฉลี่ย	2.0055	12.0483	10.4650	10.8805	10.9432	0.4782	6.0077	23.8445
14	1	2.0031	7.9613	12.6934	14.9087	13.5162	0.8228	3.9745	41.0763
	2	2.0039	7.9263	12.4251	15.5793	13.2400	0.8149	3.9554	40.6657
	3	2.0004	7.8182	12.9800	13.9170	13.8537	0.8737	3.9083	43.6763
	เฉลี่ย	2.0025	7.9019	12.6995	14.8017	13.5366	0.8371	3.9461	41.8061
15	1	2.0015	7.7521	7.8538	14.6636	8.7053	0.8515	3.8731	42.5431
	2	2.0017	7.8784	7.9026	13.8720	8.7676	0.8650	3.9359	43.2133
	3	2.0078	7.8886	8.0847	14.3819	8.9458	0.8611	3.9290	42.8877
	เฉลี่ย	2.0037	7.8397	7.9470	14.3058	8.8062	0.8592	3.9127	42.8814

หมายเหตุ เติมน้ำกลั่น 25 กรัม

ตารางที่ ก.5 Profile ของเครื่อง Texture Analyzer

Texture Analyzer Profile		
P/2- 2mm. Diameter Stainless steel cylinder probe		
Test Mode	Compression	
Pre-test Speed	2	mm/sec
Test Speed	2	mm/sec
Post Test Speed	10	mm/sec
Target Mode	Strain	
Strain	50	%
Trigger Type	Auto (Force)	
Trigger Force	5	g.
Acquisition Rate	400	pps.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดต

No.	1			2		
ครั้งที่	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)
1	811.1327	73.1382	11.0904	1683.5495	96.7689	17.3976
2	1163.4061	93.3132	12.4678	1482.7228	102.0703	14.5265
3	1226.7845	88.2473	13.9017	1204.6296	105.6832	11.3985
4	905.5940	96.7689	9.3583	1910.8298	106.5962	17.9259
5	1437.7517	98.5203	14.5934	1433.0121	110.2876	12.9934
6	1185.1201	89.9202	13.1797	1828.2726	88.2473	20.7176
7	1504.5470	89.9202	16.7320	964.2327	93.3132	10.3333
8	1499.5869	96.7689	15.4966	1241.9953	89.9202	13.8122
9	742.1330	98.5203	7.5328	1555.8008	98.5203	15.7917
10	1162.8550	89.0818	13.0538	1864.0951	103.8689	17.9466
เฉลี่ย	1163.8911	91.4200	12.7313	1516.9140	99.5276	15.2411

No.	3			4		
ครั้งที่	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)
1	931.6067	101.1770	9.2077	1235.3819	96.7689	12.7663
2	905.7042	91.6088	9.8866	1183.1361	100.2875	11.7974
3	1424.1942	102.0703	13.9531	1285.3130	105.6832	12.1619
4	548.0299	93.3132	5.8730	1476.3298	93.3132	15.8212
5	867.5670	86.5901	10.0192	1347.9198	91.6088	14.7139
6	1300.1931	91.6088	14.1929	1998.8981	95.0332	21.0337
7	1555.2497	93.3132	16.6670	1628.6583	102.0703	15.9562
8	829.0991	88.2473	9.3952	2769.4687	95.0332	29.1421
9	1306.5861	86.5901	15.0893	1311.5461	104.7741	12.5178
10	1201.5433	80.1185	14.9971	1817.9116	98.5203	18.4521
เฉลี่ย	1086.9773	91.4637	11.8842	1605.4563	98.3093	16.3307

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดต

No.	5			6		
ครั้งที่	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)
1	1536.0708	98.5203	15.5914	1601.5434	95.8991	16.7003
2	1156.2416	100.2875	11.5293	2363.0757	98.5203	23.9857
3	2011.6840	96.7689	20.7885	1010.4163	105.6832	9.5608
4	828.9889	97.6427	8.4900	1366.4373	96.7689	14.1206
5	1352.3287	107.5132	12.5783	1288.2890	98.5203	13.0764
6	1497.9336	96.7689	15.4795	855.8833	100.2875	8.5343
7	1698.2092	95.0332	17.8696	855.1118	95.0332	8.9980
8	818.9585	96.7689	8.4630	1690.1629	95.8991	17.6244
9	1130.8903	107.5132	10.5186	1915.2387	96.7689	19.7919
10	1782.3095	109.3588	16.2978	1724.3321	113.0973	15.2464
เฉลี่ย	1381.3615	100.6176	13.7288	1467.0490	99.6478	14.7223

No.	7			8		
ครั้งที่	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)
1	1366.2168	86.5901	15.7780	1613.9986	76.9769	20.9673
2	959.6034	80.1185	11.9773	861.3945	75.4296	11.4198
3	1125.1586	84.9487	13.2452	1207.1647	81.7128	14.7733
4	1917.8841	88.2473	21.7331	1091.6508	69.3978	15.7303
5	1617.1951	89.0818	18.1540	1631.1935	69.3978	23.5050
6	1219.7302	87.4168	13.9530	1009.6447	72.3823	13.9488
7	1183.3565	80.9137	14.6249	1071.9208	69.3978	15.4460
8	1429.7054	80.1185	17.8449	722.5132	75.4296	9.5786
9	1807.8813	86.5901	20.8786	969.3030	81.7128	11.8623
10	1126.8120	81.7128	13.7899	1072.8026	72.3823	14.8213
เฉลี่ย	1375.3543	84.5738	16.2622	1125.1586	74.4220	15.1186

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดต

No.	9			10		
ครั้งที่	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)
1	203.9130	88.2473	2.3107	1046.0000	76.9769	13.5885
2	1537.1731	95.0332	16.1751	1928.5757	66.4761	29.0116
3	1626.5641	100.2875	16.2190	1676.6054	81.7128	20.5183
4	1113.5852	95.0332	11.7179	1148.5260	80.1185	14.3353
5	827.0048	95.0332	8.7023	1033.1223	88.2473	11.7071
6	1067.2915	76.2013	14.0062	968.8621	78.5398	12.3359
7	1799.7248	97.6427	18.4317	2242.6017	82.5159	27.1778
8	834.1693	102.0703	8.1725	1672.5272	81.7128	20.4684
9	927.5284	106.5962	8.7013	2011.7942	83.3229	24.1446
10	753.4859	95.0332	7.9287	1576.1921	78.5398	20.0687
เฉลี่ย	1069.0440	95.1178	11.2392	1530.4807	79.8163	19.1750

No.	11			12		
ครั้งที่	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)
1	1493.5247	95.0332	15.7158	929.8431	76.9769	12.0795
2	1999.0084	69.3978	28.8051	897.5477	75.4296	11.8991
3	983.5218	109.3588	8.9935	1583.4668	81.7128	19.3784
4	1370.9564	89.0818	15.3899	1297.2171	75.4296	17.1977
5	486.6355	90.7626	5.3616	1090.7690	83.3229	13.0909
6	1241.0033	78.5398	15.8009	864.5910	72.3823	11.9448
7	527.5283	93.3132	5.6533	1207.7158	88.2473	13.6856
8	599.9450	80.1185	7.4882	776.6328	78.5398	9.8884
9	1867.0712	82.5159	22.6268	739.9285	81.7128	9.0552
10	981.0969	91.6088	10.7096	981.6480	83.3229	11.7813
เฉลี่ย	1155.0291	87.9730	13.1294	1036.9360	79.7077	13.0092

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดต

No.	13			14		
ครั้งที่	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)
1	1446.0184	83.3229	17.3544	254.6156	79.3272	3.2097
2	1293.9104	84.9487	15.2317	1835.2166	83.3229	22.0254
3	698.8152	93.3132	7.4889	1425.8476	93.3132	15.2802
4	783.5769	82.5159	9.4961	1164.0674	88.2473	13.1910
5	1154.3678	84.9487	13.5890	1025.2964	89.9202	11.4023
6	2412.2352	83.3229	28.9505	980.7662	81.7128	12.0026
7	400.9921	95.8991	4.1814	1158.5563	80.1185	14.4605
8	1076.1093	89.9202	11.9674	963.4612	81.7128	11.7908
9	1040.8379	86.5901	12.0203	1224.0289	84.9487	14.4090
10	1005.6767	88.2473	11.3961	1746.2665	80.1185	21.7961
เฉลี่ย	1131.2540	87.3029	12.9578	1177.8123	84.2742	13.9760

No.	15		
ครั้งที่	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)
1	575.3652	89.9202	6.3986
2	1568.3662	81.7128	19.1936
3	952.1082	84.9487	11.2080
4	1213.0066	74.6619	16.2467
5	1009.0936	84.9487	11.8789
6	1058.4736	86.5901	12.2239
7	1290.7139	75.4296	17.1115
8	1339.8735	84.9487	15.7727
9	1058.1429	83.3229	12.6993
10	1145.6602	86.5901	13.2308
เฉลี่ย	1121.0804	83.3074	13.4572

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ค่าความกรอบของเอ็กซ์ทรูเดต

No.	ครั้งที่ (Peak)										Crispness
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	76	66	65	95	80	68	81	76	97	10	71.40
2	86	83	74	64	72	53	77	76	100	72	75.70
3	71	82	72	86	70	86	68	58	73	83	74.90
4	71	59	62	57	73	48	63	62	42	60	59.70
5	67	59	86	81	75	65	77	55	83	81	72.90
6	88	84	62	95	67	109	66	74	83	48	77.60
7	64	43	87	68	61	82	76	49	61	92	68.30
8	83	72	110	87	76	79	128	96	94	107	93.20
9	76	86	74	73	83	84	66	54	64	85	74.50
10	99	68	109	74	103	81	85	88	80	96	88.30
11	61	62	105	81	89	65	75	99	71	67	77.50
12	95	81	84	80	90	75	74	80	108	90	85.70
13	73	91	85	81	94	73	70	95	62	57	78.10
14	75	79	68	94	52	71	73	63	66	70	71.10
15	70	78	103	62	77	98	101	68	79	72	80.80

ตารางที่ ก.8 ค่าสีของเอ็กซ์ทรูเดต

No	ครั้งที่	L*	a*	b*	X	Y	Z
1	1	59.45	1.45	19.57	26.44	27.52	18.10
	2	59.23	1.52	19.76	26.23	27.28	17.83
	3	58.89	1.57	19.81	25.89	26.91	17.52
	4	57.90	1.71	20.03	24.91	25.85	16.61
	5	57.90	1.71	20.03	24.91	25.85	16.61
	เฉลี่ย	58.6740	1.5920	19.8400	25.6760	26.6820	17.3340
2	1	56.64	2.05	16.61	23.74	24.56	17.2
	2	56.67	2.02	16.63	23.76	24.58	17.21
	3	56.38	2.03	16.46	23.49	24.29	17.06
	4	56.19	2.03	16.35	23.30	24.11	16.95
	5	56.08	2.06	16.36	23.20	23.99	16.86
	เฉลี่ย	56.3920	2.0380	16.4820	23.4980	24.3060	17.0560
3	1	57.85	1.36	15.86	24.78	25.80	18.56
	2	57.73	1.42	16.01	24.67	25.67	18.40
	3	56.60	1.49	15.76	23.58	24.52	17.57
	4	55.35	1.60	15.79	22.41	23.28	16.54
	5	55.27	1.59	15.70	22.33	23.19	16.51
	เฉลี่ย	56.5600	1.4920	15.8240	23.5540	24.4920	17.5160
4	1	57.56	2.14	21.11	24.57	25.40	15.77
	2	57.61	2.10	21.07	24.71	25.55	15.90
	3	57.23	2.15	21.01	24.34	25.16	15.64
	4	56.54	2.16	20.94	23.66	24.45	15.14
	5	56.42	2.21	21.10	23.57	24.34	14.99
	เฉลี่ย	57.0720	2.1520	21.0460	24.1700	24.9800	15.4880

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ค่าสีของเอ็กซ์ทรูเดต

No	ครั้งที่	L*	a*	b*	X	Y	Z
5	1	56.05	1.61	16.67	23.08	23.97	16.69
	2	56.61	1.57	16.77	23.61	24.53	17.10
	3	57.04	1.52	16.67	24.01	24.96	17.49
	4	56.90	1.50	16.62	23.87	24.82	17.41
	5	57.11	1.48	16.66	24.07	25.03	17.55
	เฉลี่ย	56.7420	1.5360	16.6780	23.7280	24.6620	17.2480
6	1	53.18	1.75	18.82	20.47	21.21	13.60
	2	51.45	1.92	18.89	19.01	19.66	12.40
	3	50.87	1.98	18.81	18.54	19.16	12.05
	4	50.06	2.10	18.96	17.90	18.47	11.48
	5	49.27	2.16	18.97	17.28	17.81	10.98
	เฉลี่ย	50.9660	1.9820	18.8900	18.6400	19.2620	12.1020
7	1	56.57	1.81	16.64	23.62	24.49	17.13
	2	55.72	1.86	16.48	22.81	23.63	16.51
	3	55.38	1.90	16.55	22.51	23.30	16.21
	4	54.77	1.93	16.28	21.94	22.70	15.85
	5	53.77	2.02	16.22	21.05	21.76	15.12
	เฉลี่ย	55.2420	1.9040	16.4340	22.3860	23.1760	16.1640
8	1	59.74	1.45	18.95	26.75	27.84	18.67
	2	59.49	1.46	18.94	26.46	27.53	18.43
	3	59.85	1.42	18.94	26.85	27.96	18.76
	4	59.02	1.50	19.11	26.00	27.05	17.97
	5	57.78	1.64	19.26	24.77	25.73	16.87
	เฉลี่ย	59.1760	1.4940	19.0400	26.1660	27.2220	18.1400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ค่าสีของเอ็กซ์ทรูเดต

No	ครั้งที่	L*	a*	b*	X	Y	Z
9	1	58.98	0.77	17.35	25.79	27.01	18.81
	2	58.28	0.78	17.34	25.08	26.26	18.20
	3	58.35	0.77	17.36	25.14	26.33	18.26
	4	58.03	0.80	17.30	24.83	26.00	18.02
	5	58.03	0.76	17.40	24.82	25.99	17.91
	เฉลี่ย	58.3340	0.7760	17.3500	25.1320	26.3180	18.2400
10	1	55.03	1.23	18.23	22.04	22.96	15.19
	2	54.12	1.29	18.25	21.21	22.09	14.51
	3	54.23	1.28	18.29	21.30	22.19	14.57
	4	53.91	1.29	18.30	21.02	21.89	14.33
	5	53.73	1.30	18.32	20.86	21.72	14.19
	เฉลี่ย	54.2040	1.2780	18.2780	21.2860	22.1700	14.5580
11	1	54.12	1.29	18.25	21.21	22.09	14.51
	2	54.23	1.28	18.29	21.30	22.19	14.57
	3	53.91	1.29	18.30	21.02	21.89	14.33
	4	53.73	1.30	18.32	20.86	21.72	14.19
	5	53.55	1.33	18.38	20.71	21.56	14.04
	เฉลี่ย	53.9080	1.2980	18.3080	21.0200	21.8900	14.3280
12	1	58.93	1.49	19.45	25.91	26.95	17.73
	2	59.42	1.41	19.34	26.40	27.49	18.19
	3	58.96	1.48	19.49	25.94	26.99	17.74
	4	58.35	1.55	19.50	25.33	26.33	17.22
	5	58.58	1.54	19.54	25.57	26.58	17.40
	เฉลี่ย	58.8480	1.4940	19.4640	25.8300	26.8680	17.6560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ค่าสีของเอ็กซ์ทรูเดต

No	ครั้งที่	L*	a*	b*	X	Y	Z
13	1	56.33	1.36	16.14	23.29	24.25	17.17
	2	56.02	1.39	16.33	23.00	23.94	16.82
	3	55.19	1.46	16.25	22.23	23.11	16.20
	4	55.48	1.44	16.34	22.49	23.40	16.38
	5	55.62	1.42	16.32	22.63	23.54	16.51
	เฉลี่ย	55.7280	1.4140	16.2760	22.7280	23.6480	16.6160
14	1	58.34	1.37	18.80	25.28	26.32	17.55
	2	58.09	1.38	18.81	25.02	26.05	17.33
	3	58.11	1.38	18.80	25.05	26.08	17.36
	4	58.14	1.36	18.79	25.07	26.10	17.38
	5	58.24	1.34	18.76	25.16	26.21	17.48
	เฉลี่ย	58.1840	1.3660	18.7920	25.1160	26.1520	17.4200
15	1	58.24	0.82	16.63	25.04	26.21	18.53
	2	58.66	0.79	16.59	25.46	26.66	18.91
	3	58.12	0.82	6.590	24.92	26.09	18.44
	4	58.70	0.77	16.65	25.50	26.70	18.91
	5	58.83	0.77	16.66	25.64	26.85	19.02
	เฉลี่ย	58.5100	0.7940	14.6240	25.3120	26.5020	18.7620

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ความชื้นของขนมขบเคี้ยวในท้องตลาด

No	ครั้งที่	นน.ภาชนะ (g)	นน.ภาชนะ+นน.ตัวอย่าง (ก่อนอบ)(g)	นน.ภาชนะ+นน.ตัวอย่าง (หลังอบ)(g)	ความชื้น (%)
T	1	10.3534	12.3546	12.3365	0.9045
	2	10.6119	12.6140	12.5970	0.8491
	3	12.6376	14.6386	14.6222	0.8196
	เฉลี่ย	11.2010	13.2024	13.1852	0.8577
C	1	12.6271	14.6312	14.6136	0.8782
	2	10.3822	12.3864	12.3651	1.0628
	3	10.4518	12.4543	12.4379	0.8190
	เฉลี่ย	11.1537	13.1573	13.1389	0.9200

หมายเหตุ T = ขนมข้าวโพดกรอบ ตรา ทวิสโก้ รสบาร์บีคิว

C = ข้าวโพดอบกรอบ ซีโตสรสอเมริกันชีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 ความหนาแน่นขึ้นของขนมขบเคี้ยวในท้องตลาด

ครั้งที่	การทดลอง							
	T			ความ หนาแน่น (g/cm ³)	C			ความ หนาแน่น (g/cm ³)
	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)		น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm.)	ความยาว (cm.)	
1	0.8761	0.975	5.000	0.234590162	1.2488	1.220	5.530	0.1931
2	0.6418	1.020	4.355	0.180279589	0.8260	0.890	4.760	0.27882
3	0.8437	1.200	4.270	0.174635701	1.0901	0.990	5.715	0.24769
4	0.9122	1.150	5.460	0.160781877	0.9818	1.000	5.670	0.22038
5	0.8622	1.015	4.915	0.216714396	0.7585	0.980	4.975	0.20204
6	0.8014	0.800	4.740	0.33622219	1.1336	0.880	5.990	0.31103
7	0.7794	1.020	4.940	0.193004955	1.0657	0.930	5.130	0.30569
8	0.8385	1.070	5.070	0.18384969	0.8532	0.980	4.950	0.22842
9	0.9259	1.010	4.730	0.244228052	1.2459	1.230	5.240	0.20002
10	1.0283	1.005	5.700	0.227325527	0.8294	0.920	5.095	0.24478
average	0.8510	1.0265	4.9180	0.208993588	1.0033	1.0020	5.3055	0.23972

หมายเหตุ T = ขนมข้าวโพดกรอบ ตรา ทวิสโก้ รสบาร์บีคิว

C = ข้าวโพดอบกรอบ ซีโตรีสอเมริกันชีส

ตารางที่ ก.11 ค่า WAI และ WSI ของขนมขบเคี้ยวในท้องตลาด

No.	ครั้งที่	นน.ของแข็งแห้ง (g)	นน.ตะกอน (g)	นน.ถั่ว (g)	นน.เจล (g)	นน.ถั่ว + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	นน.ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
T	1	2.0029	9.6085	13.0960	12.9881	13.5594	0.4634	4.7973	23.1365
	2	2.0054	10.0236	12.7481	12.4939	13.2216	0.4735	4.9983	23.6112
	3	2.0052	10.5600	12.6904	12.2049	13.1444	0.4540	5.2663	22.6411
	เฉลี่ย	2.0045	10.0640	12.8448	12.5623	13.3085	0.4636	5.0206	23.1296
C	1	2.0081	9.8036	7.9021	13.4559	8.4600	0.5579	4.8820	27.7825
	2	2.0046	7.6827	7.8745	15.8821	8.4750	0.6005	3.8325	29.9561
	3	2.0097	7.7659	7.8385	17.0698	8.3963	0.5578	3.8642	27.7554
	เฉลี่ย	2.0075	8.4174	7.8717	15.4693	8.4438	0.5721	4.1929	28.4980

หมายเหตุ เติมน้ำกลั่น 25 กรัม

T = ขนมข้าวโพดกรอบ ตรา ทวิสโก้ รสบาร์บิคิว

C = ข้าวโพดอบกรอบ ซีโตสรสอเมริกันชีส

ตารางที่ ก.12 ค่าความแข็งของขนมขบเคี้ยวในท้องตลาด

No.	T			C		
ครั้งที่	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)	Force (g)	Distance (mm ²)	Hardness (g/mm ²)
1	637.29	74.6619	8.5357	696.52	116.8987	5.9583
2	889.24	81.7128	10.8825	556.31	62.2114	8.9423
3	922.65	113.0973	8.1580	611.58	76.9769	7.9450
4	650.70	103.8689	6.2646	747.61	78.5398	9.5189
5	629.27	80.9137	7.7771	616.86	75.4296	8.1779
6	921.66	50.2655	18.3358	632.68	60.8212	10.4023
7	1078.01	81.7128	13.1927	591.14	67.9291	8.7024
8	576.64	89.9202	6.4128	504.67	75.4296	6.6906
9	876.94	80.1185	10.9455	599.71	118.8229	5.0471
10	520.05	79.3272	6.5558	479.07	66.4761	7.2066
เฉลี่ย	1163.8911	91.4200	12.7313	603.6151	79.9535	7.5496

ตารางที่ ก.13 ค่าความกรอบของขนมขบเคี้ยวในท้องตลาด

ครั้งที่	T	C
	peak	Peak
1	85	74
2	110	84
3	94	78
4	120	109
5	98	94
6	74	82
7	116	128
8	110	115
9	79	89
10	75	77
crispness	96.100	93.000

หมายเหตุ T = ขนมข้าวโพดกรอบ ตรา ทวิสโก้ รสบาร์บิคิว

C = ข้าวโพดกรอบ ซีโอสอสอเมริกันชีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.14 ตารางสัญลักษณ์และความหมายที่ใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย
PF	Potato flake
TS	Tapioca starch
RB	Rice bran
Rpm	ความเร็วรอบของสกรู (รอบ/นาที)
MC (%)	ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture content)
PD (g/cm ³)	ความหนาแน่นชิ้น (Piece density)
ER (เท่า)	อัตราส่วนการขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดต (Expansion ratio)
WAI (g/g)	ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water adsorption index)
WSI (%)	ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility index)
L*	ค่าความสว่าง (Lightness)
a*	ค่าความเป็นสีแดง (Redness)
B*	ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness)
Hardness (Kg/mm ²)	ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์
Crispness (no.peak)	ค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์
T	ขนมข้าวโพดกรอบ ตรา ทวิสโก้ รสบาร์บิคิว
C	ข้าวโพดอบกรอบ ซีโตส รสอเมริกันชีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ แสดงนัยสำคัญทางสถิติ

ตาราง ข.1 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความขึ้นเิกซ์ทรูเดต

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.8446
R Square	0.7134
Adjusted R Square	0.1975
Standard Error	0.4264
Observations	15

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	2.2624	0.2514	1.3829	0.377136
Residual	5	0.9089	0.1818		
Total	14	3.1713			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	-0.0349	3.3436	-0.0104	0.9921	-8.6298	8.5600	-8.6298	8.5600
X Variable 1	0.6509	0.8717	0.7467	0.4889	-1.5899	2.8916	-1.5899	2.8916
X Variable 2	0.1689	0.1992	0.8477	0.4353	-0.3432	0.6810	-0.3432	0.6810
X Variable 3	0.0062	0.4499	0.0138	0.9895	-1.1502	1.1626	-1.1502	1.1626
X Variable 4	-0.0366	0.0574	-0.6378	0.5516	-0.1842	0.1110	-0.1842	0.1110
X Variable 5	-0.0009	0.0144	-0.0657	0.9502	-0.0378	0.0360	-0.0378	0.0360
X Variable 6	0.0519	0.0750	0.6917	0.5199	-0.1409	0.2446	-0.1409	0.2446
X Variable 7	-0.0076	0.0171	-0.4467	0.6738	-0.0515	0.0362	-0.0515	0.0362
X Variable 8	-0.0368	0.0341	-1.0779	0.3303	-0.1244	0.0509	-0.1244	0.0509
X Variable 9	-0.0162	0.0171	-0.9493	0.3860	-0.0600	0.0276	-0.0600	0.0276

ตาราง ข.2 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นขึ้น

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.9580
R Square	0.9178
Adjusted R Square	0.7698
Standard Error	0.0011
Observations	15

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	6.4E-05	7.1E-06	6.2E+00	2.9E-02
Residual	5	5.7E-06	1.1E-06		
Total	14	6.9E-05			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	0.0038	0.0084	0.4583	0.6660	-0.0177	0.0253	-0.0177	0.0253
X Variable 1	0.0049	0.0022	2.2411	0.0751	-0.0007	0.0105	-0.0007	0.0105
X Variable 2	-0.0003	0.0005	-0.6262	0.5586	-0.0016	0.0010	-0.0016	0.0010
X Variable 3	-0.0005	0.0011	-0.4139	0.6961	-0.0034	0.0024	-0.0034	0.0024
X Variable 4	-0.0003	0.0001	-2.1380	0.0855	-0.0007	0.0001	-0.0007	0.0001
X Variable 5	0.0000	0.0000	1.3403	0.2378	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001
X Variable 6	0.0004	0.0002	2.2809	0.0715	-0.0001	0.0009	-0.0001	0.0009
X Variable 7	0.0000	0.0000	0.6402	0.5502	-0.0001	0.0001	-0.0001	0.0001
X Variable 8	-0.0002	0.0001	-2.1886	0.0802	-0.0004	0.0000	-0.0004	0.0000
X Variable 9	-0.0001	0.0000	-2.3401	0.0664	-0.0002	0.0000	-0.0002	0.0000

ตาราง ข.3 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราส่วนการขยายตัว

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>								
Multiple R	0.8195							
R Square	0.6716							
Adjusted R Square	0.0805							
Standard Error	0.1035							
Observations	15							

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	0.1096	0.0122	1.1362	0.4687
Residual	5	0.0536	0.0107		
Total	14	0.1632			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	2.1307	0.8118	2.6246	0.0468	0.0439	4.2175	0.0439	4.2175
X Variable 1	0.0678	0.2116	0.3202	0.7617	-0.4763	0.6118	-0.4763	0.6118
X Variable 2	0.0152	0.0484	0.3137	0.7664	-0.1092	0.1395	-0.1092	0.1395
X Variable 3	0.1222	0.1092	1.1191	0.3139	-0.1585	0.4030	-0.1585	0.4030
X Variable 4	-0.0032	0.0139	-0.2290	0.8279	-0.0390	0.0326	-0.0390	0.0326
X Variable 5	-0.0025	0.0035	-0.7232	0.5020	-0.0115	0.0064	-0.0115	0.0064
X Variable 6	-0.0227	0.0182	-1.2470	0.2676	-0.0695	0.0241	-0.0695	0.0241
X Variable 7	-0.0003	0.0041	-0.0751	0.9430	-0.0110	0.0103	-0.0110	0.0103
X Variable 8	-0.0061	0.0083	-0.7406	0.4922	-0.0274	0.0152	-0.0274	0.0152
X Variable 9	0.0014	0.0041	0.3488	0.7414	-0.0092	0.0121	-0.0092	0.0121

ตาราง ข.4 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความสามารถในการดูดซับ

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.9945
R Square	0.9890
Adjusted R Square	0.9691
Standard Error	0.1370
Observations	15

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	8.4054	0.9339	49.7517	0.0002
Residual	5	0.0939	0.0188		
Total	14	8.4993			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	3.8588	1.0745	3.5913	0.0157	1.0968	6.6208	1.0968	6.6208
X Variable 1	0.1926	0.2801	0.6875	0.5224	-0.5275	0.9126	-0.5275	0.9126
X Variable 2	-0.1610	0.0640	-2.5156	0.0535	-0.3256	0.0035	-0.3256	0.0035
X Variable 3	1.4333	0.1446	9.9148	0.0002	1.0617	1.8050	1.0617	1.8050
X Variable 4	-0.0142	0.0184	-0.7683	0.4770	-0.0616	0.0333	-0.0616	0.0333
X Variable 5	0.0035	0.0046	0.7618	0.4805	-0.0083	0.0154	-0.0083	0.0154
X Variable 6	-0.2423	0.0241	-10.0538	0.0002	-0.3042	-0.1803	-0.3042	-0.1803
X Variable 7	0.0105	0.0055	1.9210	0.1128	-0.0036	0.0246	-0.0036	0.0246
X Variable 8	-0.0353	0.0110	-3.2218	0.0234	-0.0635	-0.0071	-0.0635	-0.0071
X Variable 9	-0.0033	0.0055	-0.5996	0.5749	-0.0174	0.0108	-0.0174	0.0108

ตาราง ข.5 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความสามารถในการละลายน้ำ

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.8837
R Square	0.7809
Adjusted R Square	0.3866
Standard Error	7.1178
Observations	15

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	902.9559	100.3284	1.9803	0.2338
Residual	5	253.3127	50.6625		
Total	14	1156.2686			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	26.8021	55.8189	0.4802	0.6514	-116.6849	170.2891	-116.6849	170.2891
X Variable 1	0.6875	14.5523	0.0472	0.9641	-36.7204	38.0954	-36.7204	38.0954
X Variable 2	5.9980	3.3259	-1.8034	0.1312	-2.5514	14.5474	-2.5514	14.5474
X Variable 3	-5.8875	7.5103	-0.7839	0.4686	-25.1933	13.4183	-25.1933	13.4183
X Variable 4	0.0185	0.9585	0.0193	0.9854	-2.4454	2.4823	-2.4454	2.4823
X Variable 5	-0.0941	0.2396	-0.3927	0.7108	-0.7100	0.5219	-0.7100	0.5219
X Variable 6	0.8563	1.2519	0.6840	0.5244	-2.3617	4.0744	-2.3617	4.0744
X Variable 7	-0.5243	0.2847	-1.8417	0.1249	-1.2562	0.2075	-1.2562	0.2075
X Variable 8	0.1990	0.5694	0.3496	0.7409	-1.2647	1.6628	-1.2647	1.6628
X Variable 9	0.1469	0.2847	0.5160	0.6279	-0.5850	0.8788	-0.5850	0.8788

ตาราง ข.6 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของลักษณะเนื้อสัมผัส (ความแข็ง)

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.8002
R Square	0.6403
Adjusted R Square	-0.0072
Standard Error	2.0243
Observations	15

ANOVA					
	<i>Df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	36.4722	4.0525	0.9889	0.5359
Residual	5	20.4896	4.0979		
Total	14	56.9618			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	20.5174	15.8752	1.2924	0.2527	-20.2911	61.3259	-20.2911	61.3259
X Variable 1	-2.8223	4.1388	-0.6819	0.5256	-13.4613	7.8167	-13.4613	7.8167
X Variable 2	0.1113	0.9459	0.1176	0.9110	-2.3202	2.5427	-2.3202	2.5427
X Variable 3	0.2454	2.1360	0.1149	0.9130	-5.2452	5.7361	-5.2452	5.7361
X Variable 4	0.2122	0.2726	0.7784	0.4716	-0.4886	0.9129	-0.4886	0.9129
X Variable 5	0.0203	0.0681	0.2972	0.7783	-0.1549	0.1954	-0.1549	0.1954
X Variable 6	0.2268	0.3560	0.6370	0.5521	-0.6884	1.1420	-0.6884	1.1420
X Variable 7	0.0387	0.0810	0.4783	0.6526	-0.1694	0.2469	-0.1694	0.2469
X Variable 8	-0.0855	0.1619	-0.5278	0.6202	-0.5018	0.3308	-0.5018	0.3308
X Variable 9	-0.1611	0.0810	-1.9898	0.1033	-0.3693	0.0470	-0.3693	0.0470

ตาราง ข.7 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของลักษณะเนื้อสัมผัส (ความกรอบ)

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.643693
R Square	0.414341
Adjusted R Square	-0.63985
Standard Error	10.38734
Observations	15

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	381.6732	42.40813	0.393043	0.894151
Residual	5	539.4842	107.8968		
Total	14	921.1573			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	103.325	81.45953	1.268421	0.260495	-106.073	312.7234	-106.073	312.7234
X Variable 1	-6.655	21.23697	-0.31337	0.766651	-61.2464	47.93636	-61.2464	47.93636
X Variable 2	-0.11083	4.853604	-0.02284	0.982665	-12.5874	12.36575	-12.5874	12.36575
X Variable 3	-14.7967	10.96016	-1.35004	0.234897	-42.9707	13.37733	-42.9707	13.37733
X Variable 4	0.441333	1.39876	0.315518	0.765113	-3.15429	4.03696	-3.15429	4.03696
X Variable 5	0.250333	0.34969	0.715872	0.506101	-0.64857	1.14924	-0.64857	1.14924
X Variable 6	1.973333	1.826912	1.080147	0.329402	-2.72289	6.669561	-2.72289	6.669561
X Variable 7	-0.27	0.415494	-0.64983	0.544471	-1.33806	0.79806	-1.33806	0.79806
X Variable 8	0.808	0.830987	0.972337	0.37554	-1.32812	2.944121	-1.32812	2.944121
X Variable 9	-0.112	0.415494	-0.26956	0.79827	-1.18006	0.95606	-1.18006	0.95606

ตาราง ข.8 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าสี่

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.9249
R Square	0.8554
Adjusted R Square	0.5950
Standard Error	1.4508
Observations	15

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	62.2383	6.9154	3.2854	0.1017
Residual	5	10.5243	2.1049		
Total	14	72.7626			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	58.8470	11.3775	5.1722	0.0035	29.6001	88.0939	29.6001	88.0939
X Variable 1	1.1526	2.9662	0.3886	0.7136	-6.4722	8.7774	-6.4722	8.7774
X Variable 2	-0.7744	0.6779	-1.1423	0.3050	-2.5170	0.9682	-2.5170	0.9682
X Variable 3	-1.9316	1.5308	-1.2618	0.2627	-5.8667	2.0035	-5.8667	2.0035
X Variable 4	-0.1722	0.1954	-0.8816	0.4183	-0.6744	0.3300	-0.6744	0.3300
X Variable 5	-0.0114	0.0488	-0.2330	0.8250	-0.1369	0.1142	-0.1369	0.1142
X Variable 6	-0.3084	0.2552	-1.2086	0.2808	-0.9643	0.3475	-0.9643	0.3475
X Variable 7	0.0559	0.0580	0.9629	0.3798	-0.0933	0.2051	-0.0933	0.2051
X Variable 8	0.3884	0.1161	3.3464	0.0204	0.0900	0.6868	0.0900	0.6868
X Variable 9	0.1814	0.0580	3.1258	0.0261	0.0322	0.3306	0.0322	0.3306

ภาคผนวก ค

ภาพอุปกรณ์ วิธีการทดลอง และผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวสำหรับผู้ป่วยสไปรูลิน่า

1. รูปวัตถุดิบ



รูปที่ ค.1 ปลายข้าวบด



รูปที่ ค.2 แป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ ค.3 แป้งมันฝรั่ง



รูปที่ ค.4 สาหร่ายสไปรูลิน่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.5 รำข้าว



รูปที่ ค.6 ข้าวโพดบดหยาบ

2. รูปอุปกรณ์ เครื่องมือในการทดลอง



รูปที่ ค.7 เครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์



รูปที่ ค.8 เครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์

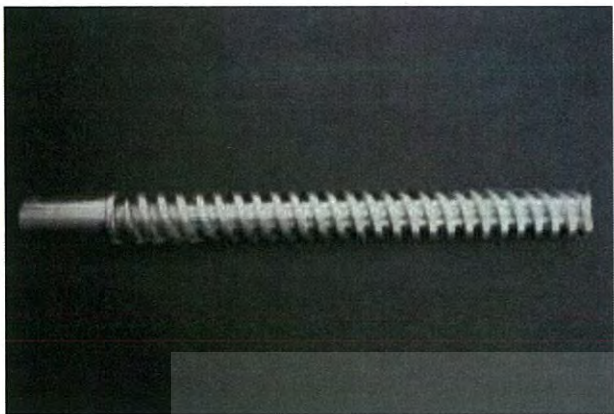


รูปที่ ค.9 ประกอบหน้าแปลน



รูปที่ ค.10 การผลิตแบบเอ็กซ์ทราชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



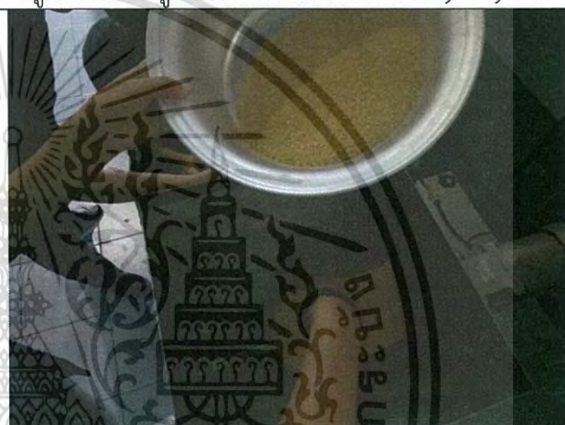
รูปที่ ค.11 สกรู



รูปที่ ค.12 ตู้อบลมร้อนแบบถาด (Tray dryer)



รูปที่ ค.13 หน้าแปลน



รูปที่ ค.14 ชุดป้อนวัตถุดิบ



รูปที่ ค.15 เครื่องผสม



รูปที่ ค.16 เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.17 เครื่องบด (Hammer Mill)



รูปที่ ค.18 Texture Analyser



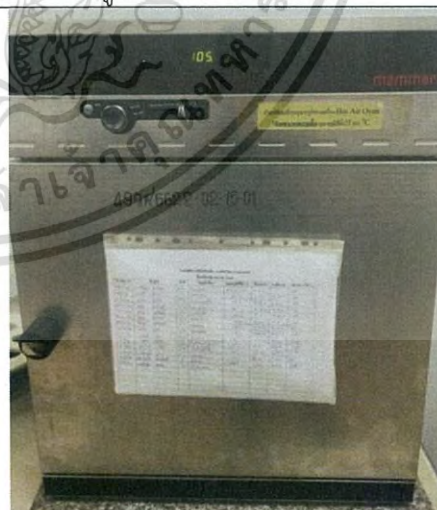
รูปที่ ค.19 อัตราการขยายตัว



รูปที่ ค.20 WAI & WSI

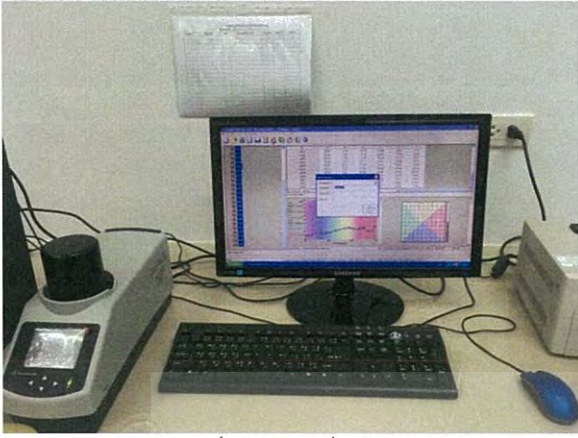


รูปที่ ค.21 Centrifuge



รูปที่ ค.22 ตู้อบ Hot air oven

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.23 เครื่องวัดสี



รูปที่ ค.24 ความหนาแน่นขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. รูปผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะการทดลองต่างๆ



PF:TS:RB ,5:0:2.5



PF:TS:RB ,10:0:2.5



PF:TS:RB ,5:10:2.5



PF:TS:RB ,10:10:2.5



PF:TS:RB ,5:5:0



PF:TS:RB ,10:5:0



PF:TS:RB ,5:5:5



PF:TS:RB ,10:5:5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PF:TS:RB ,7.5:0:0



PF:TS:RB ,7.5:10:0



PF:TS:RB ,7.5:0:5



PF:TS:RB ,7.5:10:5



PF:TS:RB ,7.5:5:2.5



PF:TS:RB ,7.5:5:2.5



PF:TS:RB ,7.5:5:2.5

รูปที่ ค.25 ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่ได้จากการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. รูปผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวในท้องตลาด



รูปที่ ค.26 ข้าวโพดอบกรอบ รสบาร์บีคิว

รูปที่ ค.27 ข้าวโพดอบกรอบ ชีตอสรสอเมริกันชีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้