รายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ทุนอุดหนุนวิจัย 2551

การผลิตอาหารขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพจากลูกเดือย ด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่น

Production of Job's Tear Snack by Extrusion Process

โดย

มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เสนอต่อ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พฤศจิกายน 2551

RCH
GK
A95
G74
2548 ก1

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 120183
วัน, เดือน, ปี 29 ก.ค. 2555

b.12339489
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงงานนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันจากลูกเดือย ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (14-18% wb.) ความเร็วรอบของสกรู (420-580 rpm) และอุณหภูมิของบาร์เรล (80-100° C) ที่มีต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย ความชื้นของผลิตภัณฑ์ ความหนาแน่น อัตราส่วนการขยายตัว ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และค่าความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) ลักษณะเนื้อสัมผัส และสี จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบจะมีผลทำให้ค่าความหนาแน่น อัตราส่วนการขยายตัว ค่าความสามารถในการละลายน้ำ ค่าความแข็ง และความสว่างของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แต่ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและความกรอบมีค่าลดลง การเพิ่มความเร็วรอบของสกรูนั้นจะทำให้อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและค่าความแข็งลดลง แต่ค่าความสามารถในการละลายน้ำและความกรอบจะมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Abstract

The objective of this project is to investigate the effect of extrusion conditions of Job's tear seed including feed moisture content (14-18%), screw speed (420-580 rpm) and barrel temperature (80-100°C) on properties of extrudates (moisture content, density, expansion, water absorption index (WAI), water solubility index (WSI), textural characteristic and color). Increasing feed moisture content results in extrudates with a higher moisture content, higher density, lower expansion, lower WAI, higher WSI and higher hardness. Increasing screw speed causes a reduction of expansion, density and hardness while increased WAI and lightness of extrudates. Increasing Barrel temperature reduces extrudate's moisture content, density, WAI and hardness but increases in crispness and WSI of extrudate.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
ปก	i
บทคัดย่อ	ii
ABSTRACT	iii
สารบัญ	iv
1. บทนำ	1
2. การสำรวจเอกสาร	2
2.1 กระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชั่น	2
2.2 ข้อมูลลูกเดือย	5
2.3 อาหารขบเคี้ยว	7
2.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวตอบ	9
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	12
3.1 การเตรียมวัตถุดิบลูกเดือย	12
3.2 รายละเอียดเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	13
3.3 การวางแผนการทดลอง	15
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	16
3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดต	17
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	22
4.1 ผลการทดลองที่สภาวะต่างๆ	22
4.2 ความขึ้นของผลิตภัณฑ์	24
4.3 ความหนาแน่น	28
4.4 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	31
4.5 ความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในการละลายน้ำ	34
4.6 ลักษณะเนื้อสัมผัส	40
4.7 ค่าสี	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุปผลการทดลอง 52
เอกสารอ้างอิง 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

จากสภาวการณ์ปัจจุบันพบว่าผลิตภัณฑ์ประเภทอาหารขบเคี้ยวเป็นที่นิยมมากสำหรับเด็กๆ วัยรุ่น และผู้บริโภคโดยทั่วไป ดังข้อมูลทางการตลาดซึ่งแสดงเป็นมูลค่าสูงกว่า 10,000 ล้านบาท/ปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่าอาหารขบเคี้ยวโดยมากมักปราศจากคุณค่าอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการเสริมสร้างสุขภาพ[2] (สสส.) ได้ชี้ให้เห็นถึงปัญหาด้านโภชนาการของผู้บริโภคที่นิยมอาหารขบเคี้ยวและได้รณรงค์ให้ผู้ประกอบการอาหารขบเคี้ยวช่วยกันผลิตอาหารขบเคี้ยวที่เป็นประโยชน์และมีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้น เพื่อช่วยลดปัญหาภาวะโรคอ้วน โรคหัวใจและอื่นๆ ผลิตภัณฑ์อาหารประเภทขนมขบเคี้ยวส่วนใหญ่จะผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ทั้งนี้เนื่องจากการผลิตอาหารด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นเป็นการแปรรูปอาหารที่มีข้อได้เปรียบหลายประการ สามารถดำเนินการผลิตภายในขั้นตอนเดียว ใช้ระยะเวลาการผลิตสั้น ให้อัตราการผลิตสูง ในขณะที่ใช้ค่าใช้จ่ายดำเนินการผลิตต่ำ สามารถทำการเปลี่ยนขนาดหรือรูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ง่าย การควบคุมสภาวะการผลิตทำได้ไม่ยุ่งยาก และลักษณะการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ไม่ก่อให้เกิดการสะสมเศษวัตถุดิบติดค้างภายใน จึงสามารถทำความสะอาดง่าย ผลิตภัณฑ์อาหารที่สามารถผลิตจากกระบวนการนี้ มีหลายประเภท แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เพื่อให้ได้คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ตามต้องการนั้น มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ อาทิ เช่น อุณหภูมิบาร์เรล ความดัน ความเร็วรอบสกรู ขนาดหน้าแปลน ลักษณะสกรู รวมทั้งคุณสมบัติของวัตถุดิบ เป็นต้น การผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพจำเป็นต้องเข้าใจสมบัติทางเคมี-กายภาพของข้าวจากสายพันธุ์ต่างๆ ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักเริ่มต้น

ลูกเดือยเป็นธัญพืชที่มีคุณค่าทางด้านโภชนาการสูง ปกตินิยมบริโภคในรูปลูกเดือยสดหรือแปรรูปเป็นน้ำลูกเดือยซึ่งมีวิธีการเตรียมที่ยุ่งยากและเสียเวลา เทคนิควิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการแปรรูปลูกเดือยให้เป็นผลิตภัณฑ์ผงโดยเน้นการคงคุณค่าทางด้านโภชนาการไว้ให้มากที่สุด เพื่อสะดวกในการเตรียม ง่ายต่อการเก็บรักษาและเป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่ระดับอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษากรรมวิธีการผลิตอาหารขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพจากลูกเดือยด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นและศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อการผลิตอาหารขบเคี้ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การสำรวจเอกสาร

2.1 กระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน -Extrusion Process (Harper, 1981)

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชั่นเป็นกระบวนการผลิตอาหารสำเร็จรูปที่รวมการทำงานในหลายส่วนเข้าด้วยกัน เช่น การผสม การนวด การทำให้สุก และการขึ้นรูป โดยการอัดอาหารด้วยสกรู ทำให้เนื้ออาหารได้รับความร้อนจากแรงเฉือนและแรงเสียดทาน เกิดการหลอมเหลวและถูกดันผ่านรูหน้าแปลนออกจากเครื่องที่ปลายอีกด้านหนึ่ง เมื่ออาหารพ้นออกจากรูหน้าแปลน อาหารจะมีการเปลี่ยนแปลงความดันกะทันหัน น้ำในอาหารระเหยออกจากอาหารอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดลักษณะการพองตัวในผลิตภัณฑ์ ขณะเดียวกันโดยทั่วไปที่บริเวณหน้าแปลนจะมีใบมีดติดตั้งอยู่ ดังนั้นเมื่ออาหารโผล่ออกมาใบมีดจะทำหน้าที่ตัดชิ้นอาหารให้ได้ขนาดตามต้องการ เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทอาหารขบเคี้ยว (Snack Foods) และผลิตภัณฑ์อาหารเช้า (Breakfast Cereals)

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันนั้น อาจแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1) สภาวะการทำงานของเครื่อง (Operating Conditions) ประกอบด้วย อุณหภูมิบาร์เรล ความเร็วรอบสกรู อัตราการป้อน และ 2) สภาพของวัตถุดิบที่ใช้ ประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางด้านรีโอโลยีของวัตถุดิบที่ใช้ ขนาดอนุภาค ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ได้แก่ ลักษณะเนื้อสัมผัส ความกรอบ ความหนาแน่น สี ความสามารถในการดูดซับน้ำ และความสามารถในการละลายน้ำ

โดยทั่วไปเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สามารถจำแนกตามจำนวนสกรูได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) และเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ทั้งสองชนิดนี้มีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกัน โดยที่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวนั้นจะมีส่วนประกอบที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก แต่จะมีข้อจำกัดในการใช้งานคือ มักมีปัญหาในการส่งผ่านส่วนผสมที่มีความหนืดต่ำ ในอุตสาหกรรมอาหาร มักนิยมใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ เนื่องจากใช้กับวัตถุดิบได้หลายประเภท วัตถุดิบที่มีความชื้นต่างๆ รวมทั้งวัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันมาก นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการผสมและการผลักพาวัตถุดิบเป็นอย่างดี

สำหรับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้ใช้สำหรับอัดหรือดันให้โดของอาหารผ่านได เพื่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำโดยไม่มีการพอง หรือใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการทำให้สุกและขึ้นรูปด้วยการใช้ความร้อนอย่างรุนแรงแล้วทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัว ในกรณีแรกที่ใช้เพื่อการขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำโดยไม่มีการพอง สกรูต้องมีเกลียวที่ลึกและต้องมีการหมุนอย่างช้าๆ เพื่อให้พลังงานกลถูกปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการให้น้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น กระบวนการผลิตมักกะโรนีและหมากฝรั่ง ส่วนในกรณีที่เป็นการใช้เพื่อการขึ้นรูปด้วยการใช้ความร้อนอย่างรุนแรงทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัวนั้น จะมีสกรูสำหรับการอัดโดยลดความลึกของร่องเกลียวและต้องมีการหมุนด้วยความเร็วสูง เพื่อเพิ่มแรงเฉือนและพลังงานกลสำหรับการให้ความร้อน โดยส่วนผสมอาจได้รับความร้อนจากการเติมไอน้ำก่อนที่จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในกระบวนการผลิต เครื่องเอ็กซทรูเดอร์ชนิดนี้สามารถแบ่งตามระดับแรงเฉือนที่กระทำต่ออาหาร

สกรูสามารถแบ่งออกเป็นส่วนๆ ได้แก่ ส่วนที่ป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่อง ส่วนที่นวดจนถึงการอัดและส่วนที่ทำให้สุก การขนถ่ายของส่วนผสมต่างๆผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวขึ้นอยู่กับความเสียดทานที่ผิวของบาร์เรล วัตถุดิบจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เนื่องจากแรงกระทำของสกรู เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวมีราคาและต้นทุนการเดินเครื่องต่ำกว่า และต้องการความชำนาญในการเดินเครื่องและการดูแลรักษาน้อยกว่าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ช่องว่างภายในของสกรูต้องมีการใส่หรืออัดวัตถุดิบให้เต็ม เพื่อให้เกิดการนวดและการเฉือน การผสม และการอัดส่วนผสม ความดันที่เพิ่มขึ้นหลังไดทำให้ผลผลิตสุทธิที่ออกมาอย่างต่อเนื่อง (throughput) ลดลง เนื่องจากเกิดการไหลของความดันย้อนกลับขึ้นตามแนวชันแนลของสกรูอย่างต่อเนื่อง

ลักษณะเฉพาะในการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ขึ้นกับความดันที่อยู่หลังได ความลื่นบนผนังบาร์เรล (ส่วนใหญ่ควบคุมด้วยอุณหภูมิผนังบาร์เรลและการที่มีรอยหยักหรือช่องเจาะที่ผนังบาร์เรล) ความยาวของสกรูที่ถูกอัดเต็มไปด้วยผลิตภัณฑ์ (ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราการป้อนและความเร็วของสกรู) และลักษณะเฉพาะของโดที่ขึ้นกับชนิดของส่วนผสม ความชื้นและอุณหภูมิ (Happer, 1981) อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยเหล่านี้จะจำกัดช่วงและความยืดหยุ่นของการปฏิบัติงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

สำหรับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ลักษณะการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่จะแตกต่างจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว และมีแนวโน้มว่าจะเป็นที่นิยมมากขึ้น เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่มีสองสกรูซึ่งวางข้างๆกัน โดยที่มีเกลียวอินเตอร์เมส (Intermeshing) กันและกัน และหมุนในลักษณะตัวเลข "8" ในบาร์เรล เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่มักแบ่งตามทิศทางการหมุนและลักษณะสกรูที่อินเตอร์เมสกัน สกรูที่อินเตอร์เมสแบบหมุนตามกันพบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร การหมุนจะทำให้วัตถุดิบเคลื่อนที่ผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ และการอินเตอร์เมสช่วยให้การผสมของวัตถุดิบในบาร์เรลดีขึ้น

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่จำแนกได้ตามทิศทางการหมุนของสกรู ส่วนต้นของสกรูออกแบบมาเพื่อขนถ่ายส่วนผสมที่เป็นเม็ดๆ ความสามารถในการขนถ่ายของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ที่เพิ่มขึ้นทำให้ใช้ส่วนผสมที่เหนียวได้ดีกว่าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว สกรูคู่ที่ขนานกันนี้จะถูกันเอง (Self-wiping) เมื่อเกลียวที่ซ้อนบนสกรูหนึ่งเช็ดหรือถูด้านล่างของช่องชั้นแนลของอีกสกรูที่อยู่ติดกัน โดยปกติจานนวด (Kneading disk) จะช่วยกระจายพลังงานกลระหว่างการขนถ่ายมากขึ้น โดยส่วนผสมของวัตถุดิบต่างๆจะเคลื่อนที่จากจานหนึ่งไปยังอีกจานหนึ่งซึ่งทำให้เกิดการผสมกันขึ้น การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังบาร์เรลและการกระจายพลังงานกลจะมากขึ้นเมื่อส่วนต่างๆเหล่านี้มีส่วนผสมของอาหารบรรจุอยู่เต็ม

ข้อดีของการผลิตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

เอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการผลิตอาหารสมัยใหม่ ช่วยให้การขยายงานด้านอุตสาหกรรมการผลิตอาหารกว้างขวางยิ่งขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะโดยตัวของระบบหรือเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นั้นมีคุณลักษณะพิเศษหลายประการ ดังนี้

1. เอนกประสงค์ (Versatility) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆได้หลากหลาย เพียงแต่เลือกใช้วัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบและปรับสภาวะของกระบวนการผลิตให้เหมาะสม

2. อัตราการผลิตสูง (High productivity) เป็นเครื่องจักรแบบต่อเนื่อง และมีอัตราการผลิตได้มากกว่าระบบอื่นๆ

3. ต้นทุนการผลิตต่ำ (Low cost) จำนวนคนงานและพื้นที่ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันต่อหนึ่งหน่วยการผลิตนั้นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตวิธีอื่น

4. รูปทรงของผลิตภัณฑ์ (Products shape) ทำได้มากมายหลายแบบ ทำได้ง่ายเพียงเปลี่ยนแบบรูปทรงของรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลน

5. คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีมาก (High product quality) คุณภาพสูงเนื่องมาจากเป็นระบบ HTST (High Temperature Short Time)

6. ประหยัดพลังงาน (Energy efficient)

7. ทำผลิตภัณฑ์อาหารใหม่ๆ (Production of new foods)

8. ไม่มีน้ำทิ้งหรือสิ่งโสโครกที่ไหลจากโรงงาน (No effluents)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ข้อมูลลูกเดือย

ชื่อสามัญ	Job's tears, Adley, Millet
ชื่อวิทยาศาสตร์	*Coix lachyma-jobi* Linn
วงศ์	Gramineae, Poaceae
ชื่ออื่น	ประชาชนในภาคเหนือของไทยเรียกว่า เดือย เดือยหิน มะเตย พายัพเรียกว่า มะเดือย ชาวกะเหรี่ยง-กำแพงเพชรเรียกว่า เป้นี ชาวเขมรเรียกว่า สกูย
ถิ่นที่อยู่	เป็นพืชในเขตร้อนทั่วไป เช่น ประเทศไทย อินเดีย จีน แอฟริกา อเมริกา
ส่วนที่ใช้	รากและเมล็ด

(ข้อมูลจาก www.thaiherbclub.com)

ลูกเดือยอาจแบ่งตามการใช้ประโยชน์ได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน คือ

1. ลูกเดือยหิน ใช้เป็นเครื่องประดับคล้ายลูกปัด เช่น ทำสายสร้อย ตกแต่งเสื้อผ้า ซึ่งเป็นที่นิยมปลูกกันในหมู่ชาวเขาทางภาคเหนือ เดือยประเภทนี้มีเปลือกหุ้มเมล็ดเป็นเงา หนา แข็ง และเหนียวมากและมีหลายสี เช่น สีขาวหรือสีเทาอ่อนหรือมีหลายสีอ่อนแก่บนเมล็ดเดียวกัน น้ำหนักทั้งเปลือก 100 เมล็ดอยู่ระหว่าง 10.5-32.8 กรัม ส่วนมากลำต้นจะเตี้ยกว่าเดือยประเภทอื่น

2. ลูกเดือยขบ มักจะปลูกกันตามบ้านในปริมาณน้อย สำหรับเป็นของขบเคี้ยวในครอบครัวหรือจำหน่ายในตลาดท้องถิ่น โดนจะตัดทั้งช่อแล้วนำมาต้ม มักพบในชนบททั่วไป เมล็ดจะมีขนาดโตค่อนข้างกลม เปลือกค่อนข้างหนาและแข็งปานกลาง ในการบริโภคนั้นต้องใช้ฟันขบจึงเรียกว่า "เดือยขบ" เปลือกมีหลายสีปนกันบนเมล็ดเดียว น้ำหนักทั้งเปลือก 100 เมล็ดอยู่ระหว่าง 18.6 กรัม เดือยขบมีลำต้นสูงประมาณ 2 เมตร

3. ลูกเดือยการค้า เป็นเดือยที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและมีการปลูกมากที่สุด เมล็ดที่กะเทาะเอาเปลือกออกแล้วจะใช้บริโภคได้หลายรูปแบบ เดือยการค้าจะมีทั้งเดือยข้าวเจ้าและเดือยข้าวเหนียว เนื่องจากมีทั้งประเภทที่เปลือกหนาค่อนข้างแข็งและประเภทเปลือกบางเปราะ ถ้าเป็นชนิดแรกผิวเปลือกมักจะเป็นมันเงามีสีขาวปนเทา ส่วนชนิดหลังผิวเปลือกจะด้านและมักมีสีเดียวกันล้วนๆ เช่น มีสีน้ำตาลอมเทา เมล็ดจะยาวรี น้ำหนัก 100 เมล็ดทั้งเปลือกอยู่ระหว่าง 10.8-19.0 กรัม เดือยการค้าจะมีลำต้นสูงพอๆกับเดือยขบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปรรูปลูกเดือยนั้นสามารถที่จะแปรรูปเป็นอาหารได้หลายชนิด เช่น ทำขนม ทำน้ำลูกเดือย ทำแป้งลูกเดือย เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการแปรรูปแป้งเดือยเพียงอย่างเดียวและเมื่อพิจารณาคุณภาพของแป้ง จะแบ่งลูกเดือยได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ลูกเดือยข้าวเจ้า เมื่อนำเดือยประเภทนี้ไปต้มแป้งและน้ำต้มเดือยจะไม่เหนียวลื่นหรือเป็นเมือก เมล็ดทั้งเปลือกของเดือยข้าวเจ้าจะค่อนข้างยาวและมีขนาดเล็ก เปลือกจะมีสีน้ำตาลแก่ค่อนข้างหนาและแข็ง เนื้อแป้งของเมล็ดจะค่อนข้างแข็ง

2. ลูกเดือยข้าวเหนียว เนื้อแป้งเมื่อหุงต้มจะนุ่มเป็นเมือกลื่นๆคล้ายกับข้าวเหนียวหรือมีแป้งข้าวเหนียว (อะไมโลเพ็คตินเป็นส่วนใหญ่) มีแป้งอะไมโลสเพียง 2-3% ผู้บริโภคจะนิยมเดือยข้าวเหนียวมากกว่าเดือยข้าวเจ้า เมล็ดทั้งเปลือกมีลักษณะกลมสั้นและโตกว่าเดือยข้าวเจ้า เปลือกของเมล็ดมีสีเทาอ่อน บางและกรอบ บีบแตกง่าย เนื้อแป้งของเมล็ดจะค่อนข้างอ่อนทำให้เมื่อนำมาสีหรือกะเทาะจะได้น้ำหนักน้อยเพราะแตกหักง่าย

คุณค่าทางโภชนาการ

ลูกเดือยมีกรดอะมิโนทุกชนิดที่สูงกว่าความต้องการทางมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก ยกเว้น เมทไธโอนีนและไลซีน เช่น มีปริมาณกรดกลูตามิกในปริมาณมากตามด้วยลิวซีน อนาลีน โปรลีน วาลีน ฟินนิลอลานีน ไอโซลิวซีนและอาร์จีนีนลดหลั่นลงมา นอกจากนี้ลูกเดือยยังมีกรดไขมันจำเป็นชนิดที่ไม่อิ่มตัว เช่น กรดโอเลอิกและกรดลิโนโลอิกรวมแล้วประมาณ 84% และเป็นกรดไขมันชนิดอิ่มตัว คือ ปาล์มิติกและสเตียริกเพียง 16% เท่านั้น ดังนั้นลูกเดือยจึงเป็นแหล่งอาหารที่ดีที่ให้ทั้งพลังงาน กรดอะมิโน และไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย

ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของลูกเดือย

องค์ประกอบ	ปริมาณ
คาร์โบไฮเดรต (%)	70.65
โปรตีน (%)	13.48
ไขมัน (%)	5.03
ใยอาหาร (%)	0.23
น้ำ (%)	10.22
แร่ธาตุ (%)	1.39
วิตามินบี 1 (ไมโครกรัม/100 กรัม)	755
วิตามินบี 2 (ไมโครกรัม/100 กรัม)	29
ฟอสฟอรัส (พีพีเอ็ม)	2516

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพแทสเซียม (พีพีเอ็ม)	1521
โซเดียม (พีพีเอ็ม)	181
เหล็ก (พีพีเอ็ม)	47.4
สังกะสี (พีพีเอ็ม)	29.5
แมงกานีส (พีพีเอ็ม)	20.3
แคลเซียม (พีพีเอ็ม)	18.1
ทองแดง (พีพีเอ็ม)	4.81

(www.kpt.ac.th/etc/herb.htm)

2.3 อาหารขบเคี้ยว

อาหารขบเคี้ยว หมายถึง อาหารที่ใช้รับประทานเล่นระหว่างมื้ออาหารหลัก ลักษณะเด่นของอาหารขบเคี้ยวในปัจจุบัน คือ น้ำหนักน้อย เก็บรักษาง่าย นำติดตัวไปในที่ต่างๆได้สะดวก อาหรขบเคี้ยวจัดได้ว่าเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง เนื่องจากมีส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรตเป็นจำนวนมากจึงช่วยให้อิ่มท้องได้ (Gordon, 1990) ผลิตภัณฑ์อาจมีลักษณะร้อนหรือเย็น ในรูปของแข็งหรือของเหลว ซึ่งอาศัยการเตรียมเพียงเล็กน้อยอาหารขบเคี้ยวอาจเป็นของหวานหรือเป็นของคาว และอาจใช้เป็นอาหารที่มีคุณลักษณะเฉพาะ เช่น อาหารเพื่อสุขภาพหรืออาหารว่างในงานสังสรรค์ หรืออาหารที่ผ่านการแปรรูปพร้อมบริโภคทันที หรือต้องการการเตรียมเพียงเล็กน้อย เช่น การเติมน้ำเดือด เป็นต้น สามารถใช้เป็นอาหารที่บริโภคได้ระหว่างมื้อ

อาหารขบเคี้ยวนับว่ามีบทบาทในวิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภครุ่นใหม่เป็นอย่างยิ่ง ดังจะสังเกตเห็นได้ว่า มีการจัดจำหน่ายอาหารขบเคี้ยวในร้านค้าทั่วไปเป็นจำนวนมาก และมีผลิตภัณฑ์ต่างๆเข้าสู่ท้องตลาดตลอดเวลา การพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารขบเคี้ยวในระดับสากลกล่าวกันว่าได้เริ่มอย่างจริงจังเมื่อหลังสงครามครั้งที่ 2 มีการนำเทคโนโลยีต่างๆมาใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต พัฒนาส่วนผสมที่ใช้ปรุงรสและรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ทำให้อาหารขบเคี้ยวน่ารับประทานและสะดวกมากยิ่งขึ้น มีการพัฒนาการผลิตแบบต่อเนื่อง (batch process) เพื่อช่วยให้การผลิตเป็นไปอย่างรวดเร็วและสามารถผลิตอาหารได้เป็นจำนวนมาก การพัฒนาการบรรจุหีบห่อที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์เก็บรักษาได้นานขึ้นและมีคุณภาพดี (เพ็ญขวัญและทัศนีย์, 2541)

ชนิดของอาหารขบเคี้ยว

อาหารขบเคี้ยวเป็นกลุ่มของผลิตภัณฑ์ที่มีได้หลายชนิด และเป็นกลุ่มที่อยู่ระหว่างการพัฒนาจึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมาตลอดเวลา การให้ความหมายหรือแม้แต่การจัดแบ่งประเภทจึงยังไม่มีการกำหนดที่ชัดเจน การจัดแบ่งประเภทของอาหารขบเคี้ยวมีหลายลักษณะ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแบ่งอาหารขบเคี้ยวตามระยะเวลาและชนิดของผลิตภัณฑ์ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท (Harper, 1981) คือ

1. อาหารขบเคี้ยวยุคที่หนึ่ง (First Generation Snacks) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตแบบดั้งเดิมโดยใช้กรรมวิธีการผลิตแบบง่ายๆ เช่น การทอดหรือการอบ ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ เช่น มันฝรั่งทอด แครกเกอร์ชนิดต่างๆ เป็นต้น

2. อาหารขบเคี้ยวยุคที่สอง (Second Generation Snacks) เป็นอาหารขบเคี้ยวประเภทสุกพองทันที (Direct-expanded Product) ส่วนใหญ่ทำจากวัตถุดิบประเภทธัญชาติ เช่น Collet Extruder ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นต่ำ นำมาอบเพื่อลดความชื้นลงให้มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 4 เคลือบด้วยกลิ่นรสต่างๆ การพองของผลิตภัณฑ์เกิดจากการทำให้ส่วนผสมของโด (Dough) ร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่า 100°C และความดันภายในเครื่องสูงกว่าความดันบรรยากาศ เมื่อโดเคลื่อนที่ออกจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์โดยผ่านช่องเปิดของหน้าแปลนจะเกิดการระเหยของน้ำเป็นไอน้ำในขณะที่ความลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการพองตัวของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะพองกรอบ ความหนาแน่นต่ำ มีรูปร่างต่างๆตามแบบพิมพ์หรือช่องเปิดหน้าแปลนของเครื่องทำการผลิต และมีการเคลือบกลิ่นรสต่างๆให้กับผลิตภัณฑ์

3. อาหารขบเคี้ยวยุคที่สาม (Third Generation Snacks) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีหลายรูปแบบและมีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แรงเฉือนสูง เริ่มจากการผสมธัญชาติและ/หรือสตาร์ชที่ดัดแปรหรือไม่ก็ได้ น้ำมันพืช และอิมัลซิไฟเออร์ อาหารขบเคี้ยวประเภทสุกแต่ไม่พองทันที (Indirect-expanded product) บางครั้งเรียกว่า เป็นอาหารขบเคี้ยวกึ่งสำเร็จรูปโดยมีชื่อเรียกดังนี้ half product, semi-product หรือ intermediate product อาหารขบเคี้ยวชนิดนี้เมื่อผลิตออกมาครั้งแรกจะมีความชื้นอยู่ค่อนข้างสูง หลังจากนำไปอบไล่ความชื้นจนมีความชื้นในผลิตภัณฑ์ประมาณร้อยละ 8-12 จะอยู่ในรูปของกึ่งสำเร็จรูป มีรูปร่างต่างๆตามแบบพิมพ์หรือช่องเปิดของหน้าแปลนของเครื่องที่ทำการผลิต มีลักษณะเนื้อแข็งแน่น โปร่งแสง เป็นมันวาวที่เรียกว่า เพลเลต (Pellet) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทอดหรือการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่พองกรอบและ ทำการเคลือบกลิ่นรสต่างๆบนผลิตภัณฑ์ ข้อดีของเพลเลต คือ เก็บได้นาน ไม่เสีย ถ้าเก็บภายใต้สภาพที่แห้งจะมีอายุการเก็บประมาณ 1 ปี สะดวกในการขนถ่าย สามารถขนส่งไปยังที่ไกลๆได้ ไม่ต้องกังวลเรื่องผลิตภัณฑ์แตกหัก

การตลาดของขนมขบเคี้ยว

ตลาดขนมขบเคี้ยวมีแนวโน้มการขยายตัวค่อนข้างสูง เนื่องจากมีรูปแบบและรสชาติที่แปลกใหม่อยู่เสมอ รวมทั้งการมีกิจกรรมทางการตลาดอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวในตลาดอยู่ตลอดเวลา (Moria, 2001) ตลาดของขนมขบเคี้ยวในปี 2544 (มกราคม-ตุลาคม) มีอัตราการเติบโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นร้อยละ 17 แบ่งเป็นตลาดขนมขบเคี้ยวขึ้นรูป (Extrudate snacks) ร้อยละ 38.5 เติบโตร้อยละ 29.74, มันฝรั่งร้อยละ 28.5 เติบโตร้อยละ 7.9, ขนมขบเคี้ยวจากปลาร้อยละ 10.4 เติบโตร้อยละ 8.01, ปลาหมึกร้อยละ 8.9 เติบโตร้อยละ 7.34, ถั่วร้อยละ 8.8 โตเพิ่มขึ้นจากปีที่ผ่านมาร้อยละ 20.66, ปลาเส้นร้อยละ 3.6 เติบโตร้อยละ 33.16 และข้าวโพดร้อยละ 1.3 เติบโตเพิ่มร้อยละ 7.04

ในปัจจุบันผู้ผลิตได้หันมาสนใจในตัวสินค้า โยเฉพาะรสชาติ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การผลิตสินค้าใหม่จะต้องมีความแตกต่างจากสินค้าอื่นในตลาด มีจุดขายที่ชัดเจน มีคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากผู้บริโภคมีแนวโน้มที่จะใส่ใจในสุขภาพของตนเอง ดังนั้น ถ้าอาหารขบเคี้ยวใดมีคุณค่าทางอาหาร หรือมีภาพพจน์ของผลิตภัณฑ์ที่ดีก็จะสามารถทำตลาดได้ดีและเร็วในตลาดสินค้าอาหารขบเคี้ยว

2.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology, RSM)

การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวตอบเป็นวิธีที่ใช้ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Data) จากการทดลองมาสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ศึกษา (Factor หรือ Independence variables) กับผลตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Response หรือ Dependence variables) ลักษณะสำคัญของวิธีวิเคราะห์พื้นผิวตอบคือเพื่อสร้างฟังก์ชันพื้นผิวตอบสนอง (Response surface function) ที่แสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง และเพื่อหาระดับของปัจจัยเชิงปริมาณที่เหมาะสม (Optimum value) ที่ได้จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด (Khuri and Cornell, 1987)

วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวตอบ แบ่งเป็นขั้นตอนสำคัญ คือ

1. กำหนดปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการทดลอง 2-3 ปัจจัย
2. กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง
3. กำหนดแผนการทดลองที่ใช้ (Experimental Design) และการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ
4. รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้และตีความผลที่ได้

แผนการทดลองเพื่อศึกษา RSM

ถ้า $X_1, X_2, \ldots, X_k$ เป็นปัจจัยเชิงปริมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ RSM ที่พบว่าสอดรับ (fit) กับข้อมูลในธรรมชาติ โดยทั่วไปมี 2 ลักษณะ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แบบจำลองลำดับที่หนึ่ง (First ordered model) เป็นแบบจำลองที่ประกอบขึ้นด้วยดีกรีที่ 1 ของปัจจัย

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_k X_k + \sum_i$$

2. แบบจำลองลำดับที่สอง (Second ordered model) เป็นแบบจำลองที่ประกอบขึ้นด้วยดีกรีที่หนึ่งและดีกรีที่สองของปัจจัย

$$Y_i = \beta_0 X_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_k X_k + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{12} X_2^2 + \ldots + \beta_{kk} X_k^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \ldots + \beta_{k-1} X_{k-1} X_k + \sum_i$$

(Cochran and Cox, 1957)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Badrie และ Mellowes (1991)I ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันของแป้งมันสำปะหลังพบว่า การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางด้านกายภาพและทางเคมีที่เกิดขึ้นในอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตสูงในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการใช้อุณหภูมิสูงในระยะเวลาสั้นนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะการดำเนินการของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ คุณสมบัติทางด้านรีโอโลยีของอาหารและส่วนผสมต่างๆเช่น น้ำตาลและกรดที่เติมเข้าไป

Onyango (2004) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันของเกล็ดข้าวโพดหมักผสมกับแป้งข้าวฟ่างในการผลิตอาหารพื้นเมืองของชาวแอฟริกาที่ชื่อว่า ยูจิ พบว่าการเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบจะทำให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์, ปริมาตรจำเพาะ และความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง แต่จะทำให้ความชื้นและความหนาแน่นของเอ็กซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้น และทำให้เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีสีเข้มขึ้น

Qing-Bo Ding (2005) ได้ทำการศึกษาผลของสภาวะการผลิตที่มีต่อคุณลักษณะทางกายภาพของขนมขบเคี้ยวแบบกรอบพองจากข้าวสาลีที่ผลิตจากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน พบว่าการเพิ่มอัตราการป้อนของวัตถุดิบจะทำให้เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบจะมีผลทำให้เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีความหนาแน่น, ความสามารถในการละลายน้ำและมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้อัตราส่วนการขยายตัวและความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง ในขณะที่เพิ่มความเร็วรอบของสกรูนั้นจะทำให้ค่าความหนาแน่น, ความสามารถในการดูดซับน้ำและความแข็งลดลง แต่จะทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

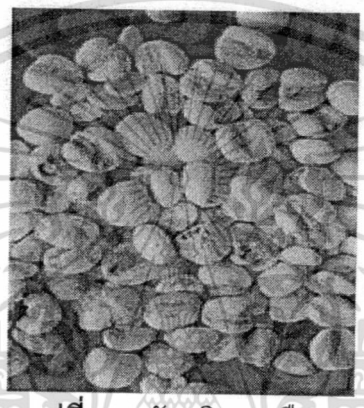
Thymi (2004) ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตจากแป้งข้าวโพด พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ, ค่าความพรุน และอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ, ระยะเวลาของวัตถุดิบที่อยู่ในเครื่อง และอุณหภูมิบาร์เรล ในขณะที่ความเร็วรอบของสกรูจะไม่มีผลกระทบต่อค่าต่างๆเหล่านี้ ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าค่าความหนาแน่นปรากฏของผลิตภัณฑ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและระยะเวลาของวัตถุดิบที่อยู่ในเครื่องมากขึ้น ในขณะที่ค่าความพรุนและอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและระยะเวลาของวัตถุดิบที่อยู่ในเครื่องและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของบาร์เรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ในการศึกษา ใช้ลูกเดือยพันธุ์ข้าวเหนียวความชื้น 11.4% นำมาบดหยาบด้วยเครื่องโม่แบบจานบด ก่อนนำไปบดละเอียดอีกครั้งด้วยเครื่องบดแบบ Fitz Mill ซึ่งมีตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 40 mesh ประกอบอยู่ ลูกเดือยหลังบดถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาขนาดอนุภาคด้วยวิธี Screen Analysis จากนั้นนำมาปรับค่าความชื้นด้วยการผสมน้ำ และทิ้งไว้เป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้ความชื้นกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในวัตถุดิบลูกเดือย ก่อนนำไปทดลองผลิตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์



รูปที่ 3.1. วัตถุดิบลูกเดือย

3,2 รายละเอียดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ แบ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญได้ ดังนี้

1. ส่วนป้อนวัตถุดิบ (Feed Hopper) ประกอบด้วยถังรองรับวัตถุดิบเพื่อป้อนเข้าเครื่อง มีรูปร่างเป็นกรวยเหลี่ยม มีการติดตั้งสกรูลำเลียงทางด้านล่างของถังป้อนเพื่อช่วยให้วัตถุดิบไหลลงสู่เครื่องได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ สกรูลำเลียงประกอบอยู่กับมอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ เพื่อควบคุมอัตราการป้อนของวัตถุดิบ

2. สกรู (Screw) สกรูมีลักษณะเป็นแกนมีเกลียวอยู่โดยรอบ โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูอาจเท่าเดิมหรือค่อยๆเพิ่มขึ้นก็ได้ เช่นเดียวกันกับเกลียวบนสกรูอาจมีความลึกคงที่หรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และหน้าที่ในการทำงาน นอกจากนี้สกรูยังอาจมีทิศทางที่แตกต่างกันหรือเหมือนกันก็ได้ หน้าที่ในการทำงานของสกรูคือ รับและขนถ่ายวัตถุดิบ กดดันและเพิ่มแรงเฉือนให้แก่วัตถุดิบทำให้เกิดการผสมอย่างสม่ำเสมอ

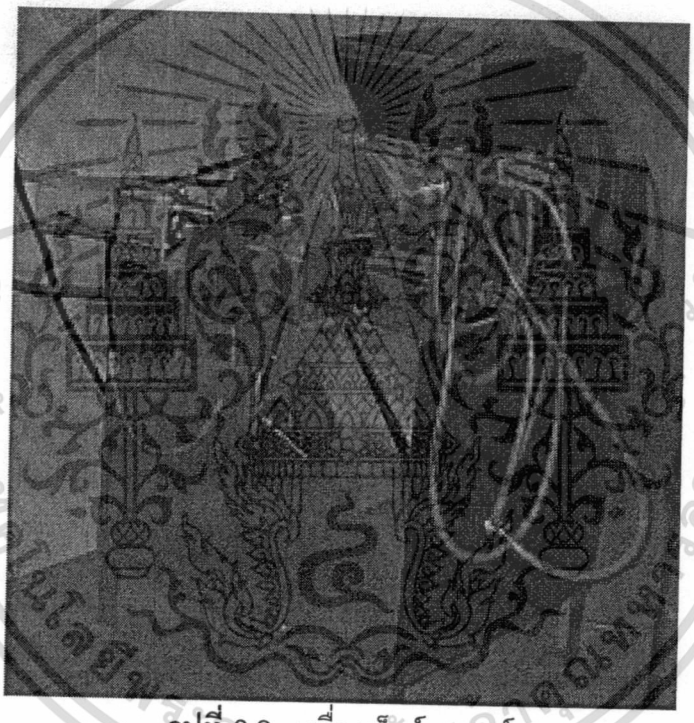
3. บาร์เรล (Barrel) มีรูปร่างเป็นท่อทรงกระบอกครอบอยู่ตามความยาวของสกรู สามารถถอดออกเป็นตอนๆได้ ผิวด้านในมีการเซาะร่องเป็นแนวเพื่อลดการลื่นไหลของวัตถุดิบ ขณะเคลื่อนที่อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในและยังเพิ่มแรงดันและแรงเฉือนด้วย Jacket อยู่ล้อมรอบบาร์เรลมีหน้าที่ให้น้ำเย็นหรือน้ำร้อนไหลอยู่ภายในเพื่อควบคุมอุณหภูมิขณะใช้เครื่อง ซึ่งแบ่งออกเป็นช่วงๆ บางช่วงอาจใช้น้ำเย็นบางช่วงอาจใช้น้ำร้อนเพื่อการให้ความร้อน

4. หน้าแปลน (Die) ส่วนนี้อยู่ปลายสุดของเครื่อง มีหลายรูปร่างลักษณะอันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆกันออกไป เมื่อเอ็กซ์ทรูเดตผ่านออกมาจากช่องนี้จะเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการระเหยน้ำอย่างรวดเร็วทันทีที่ออกมาจากหน้าแปลน

5. ใบมีด (Knife) เป็นส่วนที่กำหนดความยาวของเอ็กซ์ทรูเดตที่ออกมาจากหน้าแปลน ซึ่งมีให้เลือกหลายใบมีดอาจจะเป็นแบบ 2 ใบมีดหรือ 3 ใบมีดหรือเท่าใดก็ตามแล้วแต่ความต้องการทางด้านคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้าย



รูปที่ 3.2. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

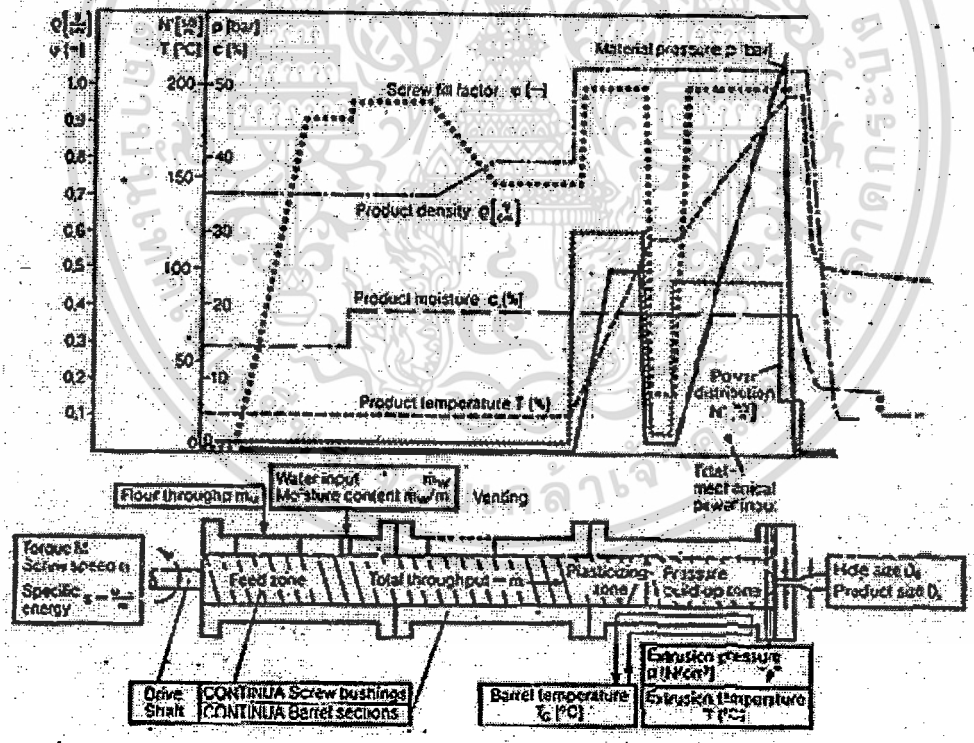
หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

เมื่อป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่อง พลังงานทางกลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องจะทำให้อุณหภูมิของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว พลังงานส่วนใหญ่ที่วัตถุดิบได้รับนั้น เกิดจากการหมุนของสกรูเป็นส่วนสำคัญ คิดเป็น 50-100% ของพลังงานทั้งหมด นอกจากนั้นเป็นพลังงานที่ป้อนเข้าเครื่อง ซึ่งอาจได้จากความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังบาร์เรลหรือพลังงานที่เกิดจากการฉีดไอน้ำเข้าไปและผสมโดยตรงกับอาหารภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

ในกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน อุณหภูมิของส่วนผสมอาหารหลังจากที่ถูกดันอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิ 150-200°C ในช่วงเวลาสั้นๆ (20-30 วินาที) ความดันภายในเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็กซ์ทรูเดอร์ที่สูงทำให้เกิดสภาวะคล้ายกับหม้อต้มความดัน (Pressure cooker) ซึ่งจะป้องกันการพุ่งกระจายของไอน้ำจนกว่าความดันจะถูกปล่อยออกมาเมื่อผลิตภัณฑ์ออกจากหน้าแปลน เมื่อวัตถุดิบได้รับความร้อนสูง จะเกิดการเจลาติไนซ์ เป็นวัสดุหลอมละลายและข้นหนืด เรียกว่าโด เมื่อโดออกจากหน้าแปลน ความดันจะถูกปล่อยออกมา ทำให้เกิดการพองตัว (Puffing) อย่างทันทีที่อุณหภูมิสูง การพองตัวนี้ส่วนใหญ่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของน้ำเป็นไอน้ำและเคลื่อนออกจากผลิตภัณฑ์ที่ถูกทำให้ร้อนขึ้น การสูญเสียความชื้นและความร้อนในผลิตภัณฑ์ร่วมกับการพองตัวทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็วจนมีอุณหภูมิประมาณ 60°C ผลิตภัณฑ์ที่ออกมานี้ เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดตที่ขยายตัวจะมีโครงสร้างของเซลล์เปิด ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ที่แต่ละเซลล์ถูกล้อมรอบด้วยเมมเบรนของแป้งหรือโปรตีน ขนาดของเซลล์เหล่านี้จะควบคุมลักษณะเฉพาะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ คือ ลักษณะเนื้อสัมผัสและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ เอ็กซ์ทรูเดตมักจะถูกตัดที่ผิวหน้าของหน้าแปลนด้วยใบมีดหมุนให้มีขนาดเล็กลง ก่อนนำไปอบแห้งต่อในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนให้มีความชื้นสุดท้ายผลิตภัณฑ์ 2-12% ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการอาจเคลือบด้วยสี กลิ่นรส น้ำมัน และน้ำตาลเป็นต้น



รูปที่ 3.3. ลักษณะการทำงานและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวางแผนการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ซึ่งประกอบด้วย ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบของสกรู และอุณหภูมิบาร์เรล ต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้

การกำหนดค่าตัวแปรเป็นดังนี้ คือ

1. ตัวแปรอิสระ (Independent variables) ได้แก่

1. ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ซึ่งแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ

1.1) 14%

1.2) 16%

1.3) 18%

2. ความเร็วรอบของสกรู ซึ่งแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ

2.1) 420 รอบต่อนาที

2.2) 500 รอบต่อนาที

3.3) 580 รอบต่อนาที

3. อุณหภูมิบารร์เรล ซึ่งแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ

3.1) 80°C

3.2) 90°C

3.3) 100°C

2. ตัวแปรตาม (Dependent variables) ประกอบด้วย

1. ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต

2. ความหนาแน่นรวม

3. ความหนาแน่นจริง

4. อัตราส่วนการขยายตัว

5. ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI)

6. ความสามารถในการละลายน้ำ (WSI)

7. ค่าสี

8. ลักษณะเนื้อสัมผัส

9. ค่าความหนืด

ใช้แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design ประกอบด้วย 15 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรและระดับค่าตัวแปร

สัญลักษณ์	ระดับ / ค่าตัวแปร	1	0	-1
X_1	ความชื้นเริ่มต้น (%)	14	16	18
X_2	ความเร็วรอบของสกรู (rpm)	420	500	580
X_3	อุณหภูมิบาร์เรล (°C)	80	90	100

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design

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

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

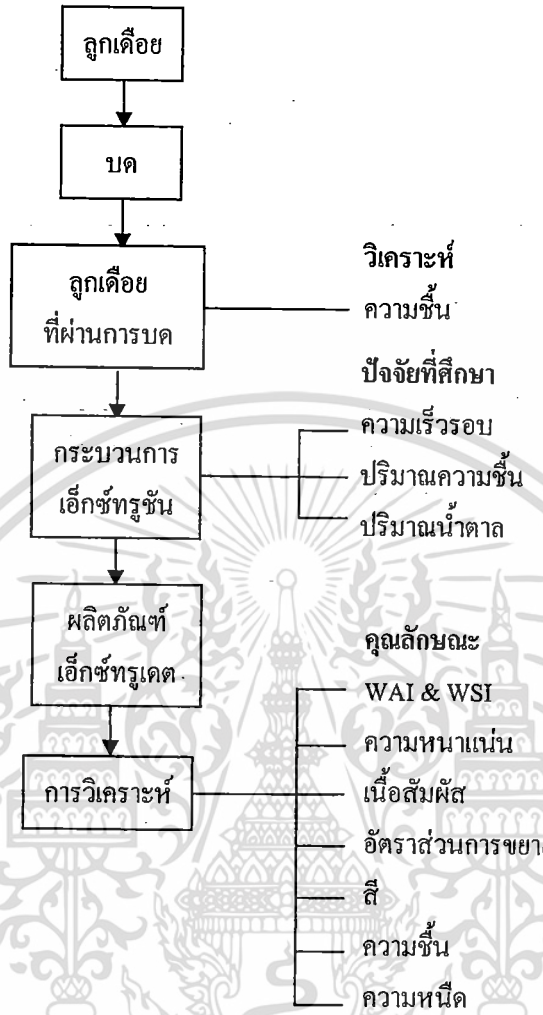
การทดลองผลิตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

นำตัวอย่างลูกเดือยบดที่ผ่านการปรับความชื้นตามต้องการมาตัวอย่างละ 3 กิโลกรัม เพื่อทำการทดลองผลิตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวขนาด L/D = 9:1 ปรับค่าอุณหภูมิและความเร็วรอบของเครื่องที่สภาวะการทดลองต่างๆ โดยป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ด้วยอัตราการป้อน 12 กิโลกรัม/ชั่วโมงและทำการผลิตจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลจึงเก็บตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้ไปทำการอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80° C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการอบเก็บใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ถุงพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีน (PP) ปิดผนึกก่อนนำไปวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดต รูปที่แสดงแผนภาพการทดลอง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดต

ค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต (Moisture Content) (AOAC, 1990)

1. นำภาชนะอลูมิเนียมพร้อมฝาปิดที่ล้างสะอาดแล้วมาอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 20 นาที นำออกมาวางให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนัก
2. นำตัวอย่างที่บดแล้วประมาณ 2 กรัมใส่ลงในภาชนะ
3. นำภาชนะพร้อมฝาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ปิดฝาแล้วนำเข้าไปวางในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 20 นาที
5. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ
6. คำนวณหาค่าความชื้นมาตรฐานเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
120183

การคำนวณ

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

ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. นำผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตใส่ในกระบอกตวงขนาด 1 ลิตร จนล้นแล้วเขย่า 3 ครั้ง
2. ปาดส่วนที่เกินออก
3. ชั่งน้ำหนักเอ็กซ์ทรูเดตในกระบอกตวง บันทึกค่าที่ได้
4. คำนวณหาค่าความหนาแน่นรวม

การคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \frac{\text{น้ำหนักเอ็กซ์ทรูเดตในกระบอกตวง}}{\text{ปริมาตรกระบอกตวง (1 ลิตร)}}$$

ความหนาแน่นจริง (True Density)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Chinnaswammy และ Hanna, 1988)

1. บดเอ็กซ์ทรูเดตด้วยเครื่องปั่น
2. ร่อนเอ็กซ์ทรูเดตที่บดแล้วผ่านตะแกรงขนาด 20-30 mesh
3. ค่อยๆเทเอ็กซ์ทรูเดตนี้ลงในกระบอกตวงที่ทราบปริมาตรแน่นอน (100 มิลลิลิตร) จนล้น เขย่า 3 ครั้ง
4. ปาดส่วนที่เกินออก
5. ชั่งน้ำหนักเอ็กซ์ทรูเดตในกระบอกตวง
7. คำนวณหาค่าความหนาแน่นจริง

การคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่นจริง} = \frac{\text{น้ำหนักของเอ็กซ์ทรูเดตในกระบอกตวง 100 มิลลิลิตร}}{\text{ปริมาตรกระบอกตวง 100 มิลลิลิตร}}$$

ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) **และความสามารถในการละลายน้ำ** (WSI)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Anderson, 1969)

1. บดตัวอย่างด้วยเครื่องปั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมครอน

3. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการบดประมาณ 2.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนัก

4. เตรียมน้ำกลั่นประมาณ 30 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนัก

5. ทำการคนอย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer เป็นเวลา 30 นาที

6. เทตัวอย่างที่คนเสร็จแล้วลงในหลอด Centrifuge ที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้น

7. นำมาเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge โดยใช้ความเร็วที่ 3000 g เป็นเวลา 10 นาที

8. ปิดเครื่อง แยกส่วนใสที่ได้ลงในจานระเหยที่ทราบน้ำหนักและทำการชั่งน้ำหนัก ส่วนตะกอนที่ก้นหลอดให้นำมาชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า WAI จากสมการ

<u>การคำนวณ</u>

$$\text{WAI (g/g)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอน}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น}}$$

9. ระเหยส่วนใสบนเครื่อง Hot Plate จนแห้งแล้วจึงนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่

10. นำจานระเหยออกมาวางไว้ในโถดูดความชื้นให้เย็นเป็นเวลา 20 นาที แล้วนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาค่า WSI

<u>การคำนวณ</u>

$$\text{WSI (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งที่ละลายในส่วนใส}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้งเริ่มต้น}} \times 100$$

อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ (Expansion Ratio , ER)

หรืออัตราส่วนการพองตัวของเอ็กซ์ทรูเดต

<u>การคำนวณ</u> (Alvarez-Martinez, 1988)

$$\text{ER} = \frac{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวอย่าง (mm)}}{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าแปลน (mm)}}$$

ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะเนื้อสัมผัส

วิเคราะห์โดยเครื่อง Texture Analyzer (TA-XT.Plus. Stable Micro system Co.,Ltd., UK) ใช้หัววัดแบบ P/2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ทำการ calibrate force โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน 2000 กรัม ตั้งค่าความเร็วของหัววัดเริ่มต้นเท่ากับ 1 mm/s ความเร็วขณะกดเป็น 1 mm/s ความเร็วขณะดึงหัวกลับเป็น 10 mm/s ระยะที่ใช้กดเป็น 5 mm แรงกดเริ่มต้นที่ 5 g. และ Acquisition rate เป็น 400 pps. รวมถึงตั้งหน่วยของกราฟที่ต้องการโดยแกน x เป็นเวลา (s) และแกน y เป็นแรง (g.) บันทึกกราฟที่ได้ วิเคราะห์ค่าแรงแตกหักสูงสุด (g) จำนวนพีค (Crispness)

<u>การคำนวณ</u>

ค่า Hardness

$$\text{Hardness (g/mm}^2\text{)} = \frac{\text{แรงแตกหักสูงสุด (g)}}{\text{พื้นที่ของตัวอย่างที่ทำการวัด (mm}^2\text{)}}$$

ค่า Crispness

Crispness = จำนวนพีคของกราฟจนถึงจุดที่เกิดแรงสูงสุด

14. เปลี่ยนหัวกดเป็นแบบ Warner – Blatzler Blade และทำตามขั้นตอนที่ 1-13

ค่าสี (Color)

ขั้นตอนการวิเคราะห์อาศัยเครื่อง Colorimeter ใช้ระบบสี CIE-LAB-System ในการหาค่า L* (lightness), a* (redness), b* (yellowness)

3.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ผลการทดลองใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) เลือกใช้รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบโพลิโนเมียลอันดับที่ 2 ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับคุณลักษณะบางประการของผลิตภัณฑ์ที่ได้ รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_i = a_0X_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ Y_i = ตัวแปรตาม ได้แก่ ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต ความหนาแน่น อัตราส่วนการขยายตัว สี ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำ ลักษณะเนื้อสัมผัส

X_i = ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1) ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3)

a_{ij} = ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร โดยที่ i,j = 0,1,2,3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองที่สภาวะต่าง ๆ

ผลการทดลองที่ได้จากการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชั่นของลูกเดือยที่สภาวะการผลิตตามแผนการทดลอง แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเอ็กซ์ทรูเดตที่สภาวะการทดลองต่างๆ

No,	ความชื้น (%)	Bulk density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	ER	WAI (g/g)	WSI (%)	L*	a*	b*	ΔE	Hardness (g/mm^2)	Crispness
1	5.11	0.104	0.557	3.57	1.629	58.672	84.473	4.63	16.117	4.540	224.2	17.4
2	3.86	0.07	0.291	3.59	1.728	62.557	90.907	4.387	13.94	7.144	176.94	16.9
3	5.06	0.118	0.656	3.82	1.177	62.096	78.967	1.59	18.75	8.540	219.87	13.4
4	4.4	0.102	0.565	3.67	1.437	63.709	81.603	1.823	18.403	6.863	193.54	18.2
5	6.67	0.103	0.578	3.43	1.502	59.731	76.747	5.46	18.593	10.356	165.97	20.8
6	6.36	0.088	0.442	3.29	1.498	61.875	81.473	4.69	16.717	5.812	287.6	26.8
7	5.53	0.082	0.619	4.58	1.488	59.212	82.9	4.917	16.617	5.290	353.56	13.4
8	5.12	0.076	0.372	3.42	1.847	51.278	80.957	4.933	17.867	7.068	198.22	16.3
9	6.3	0.082	0.487	3.23	1.385	60.774	79.997	4.9	18.98	8.433	179.02	30.9
10	6.53	0.093	0.509	3.32	1.483	60.724	80.743	4.697	17.51	6.808	190.45	38.3
11	5.36	0.079	0.444	3.55	1.601	61.351	80.46	4.353	17.773	7.066	204.44	13.8

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเอ็กซ์ทรูเดตที่สภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

No,	ความชื้น (%)	Bulk density (g/cm^3)	True density (g/cm^3)	ER	WAI (g/g)	WSI (%)	L*	a*	b*	ΔE	Hardness (g/mm^2)	Crispness
12	6.58	0.083	0.546	4.16	1.199	64.716	79.123	4.623	19.873	9.547	198.81	13.6
13	5.29	0.091	0.477	3.78	1.656	61.637	85.72	4.31	14.37	3.239	134.43	13.8
14	5.07	0.098	0.507	3.56	1.858	58.744	85.623	4.407	13.923	2.960	144.18	8.2
15	6.96	0.095	0.512	3.95	1.613	59.638	86.06	3.96	14.633	3.422	159.56	20.3

ผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย

สัมประสิทธิ์ของสมการ (3-3)	ค่าคุณลักษณะต่างๆของเอ็กซ์ทรูเดต								
	MC	Density	ER	WAI	WSI	Hardness	Crispness	L*	b*
a0	27.135	-0.334	-18.375	-13.784	-136.103	2770.55 *	451.903	-566.26 **	459.17 ***
a1	5.569	-0.047	1.313	-0.381	21.591	-161.02 *	8.322	15.229	-10.383
a2	0.024	-4.14E-04	4.88E-03 *	0.042 **	-0.491	-0.026	-0.488	0.354	-0.438
a3	-1.652 *	0.019 *	0.255	0.183	3.228	-28.935	-9.056	9.873 **	-5.571 ***
a11	-0.180 *	0.001 *	1.77E-03	-6.19E-03	-0.264	14.468 ***	-0.306	-0.172	0.176
a22	-6.98E-05	1.00E-07	-1.69E-05	-2.99E-05 **	4.39E-04	-4.56E-05	5.63E-04	-1.76E-04	2.8E-04 **
a33	8.66E-03 *	-1.08E-04 *	-9.04E-04	-1.01E-03	-9.25E-03	0.474 ***	0.064 *	-0.046 **	0.024 ***
a12	9.22E-04	2.81E-05	-2.66E-04 *	2.52E-04	-3.55E-03	0.033	8.28E-03	-5.93E-03	0.003
a13	-1.25E-03	1.13E-04	-0.013 *	4.54E-03	-0.126	-3.462 ***	-0.039	-0.083	0.039
a23	3.09E-04	-2.19E-06	1.63E-04	-1.56E-04 *	1.07E-03	-5.33E-03	-2.38E-03	-6.51E-04	0.001
R^2	0.766	0.868	0.929	0.858	0.615	0.976	0.814	0.802	0.88
SE	0.736	0.008	0.042	0.125	3.202	14.448	5.65	2.687	1.134

* Significant at P< 0.1 ** Significant at P< 0.05 *** Significant at P< 0.01

4.2 ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture Content, MC)

ความชื้นที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 3.86-6.96% และเมื่อนำค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

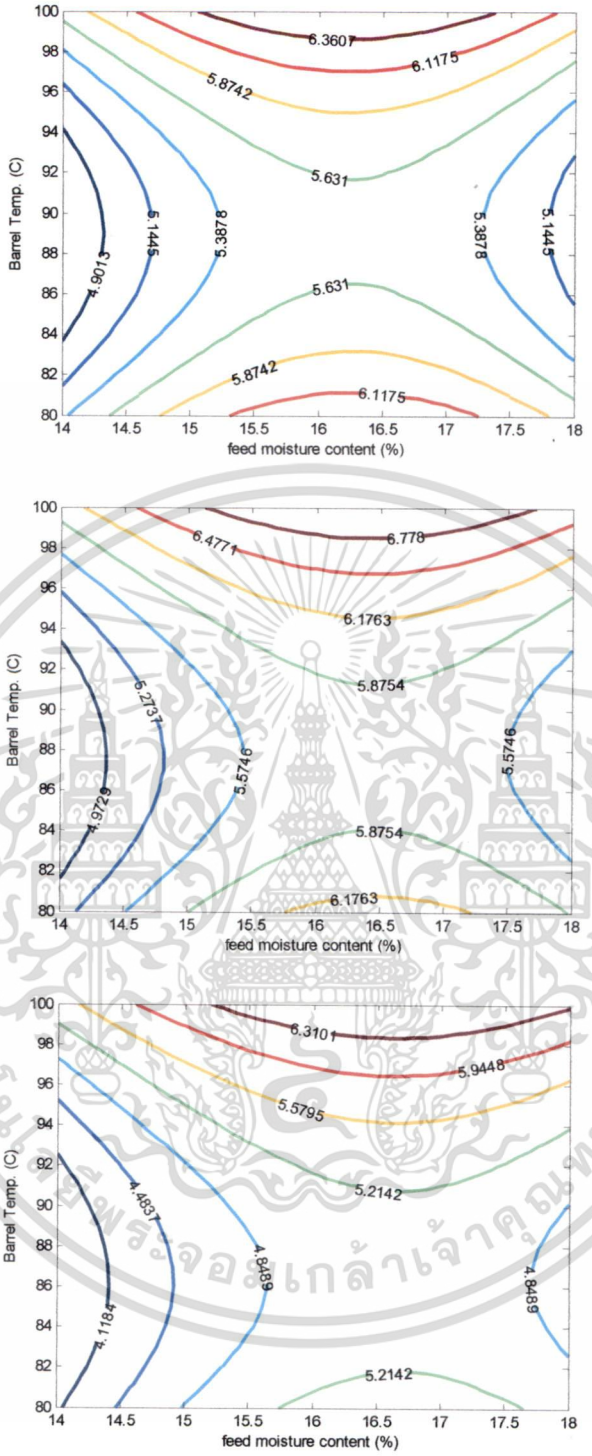
$$MC = (27.135) + (5.5692708)X_1 + (0.0241667)X_2 - (1.652313)X_3 - (0.179792)X_1^2 - (0.0000698)X_2^2 + (0.0086583)X_3^2 + (0.0009219)X_1X_2 - (0.00125)X_1X_3 + (0.0003094)X_2X_3 \quad (4\text{-}1)$$

$R^2 = 0.7658$ SE. $= 0.7357$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

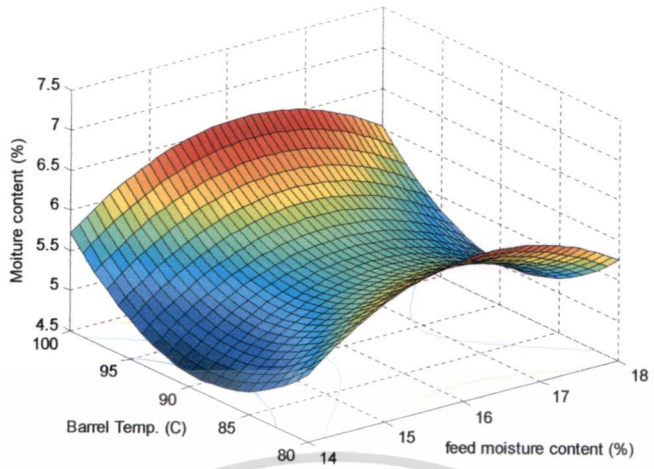
เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-1) มาพลอตกราฟ แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 จากกราฟจะพบว่า การเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบให้สูงขึ้นจนถึงค่าประมาณ 16.5% ทำให้ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าสูงขึ้นด้วย ส่วนที่ค่าความชื้นเริ่มต้นมีค่าสูงกว่า 16.5% จะทำให้ค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าลดลง การเพิ่มความเร็วรอบที่สภาวะอุณหภูมิบาร์เรล 80-90°C ทำให้ค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าลดลง สาเหตุอาจเกิดได้จาก การเพิ่มความเร็วรอบเหมือนเป็นการเพิ่มแรงเฉือนเข้าไป ทำให้ความร้อนภายในมากขึ้นจึงทำให้น้ำสามารถระเหยได้ดี ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จึงมีค่าลดลง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลนั้นจะทำให้ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าลดลง แต่ในสภาวะการผลิตที่อุณหภูมิบาร์เรล 100°C นั้นกลับทำให้ค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น สันนิษฐานว่าอาจเป็นเพราะว่าที่สภาวะการผลิตที่อุณหภูมิบาร์เรล 100°C เป็นการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้ผนังเซลล์เกิดการไหม้และทำให้น้ำระเหยออกมาได้น้อย ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จึงมีค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

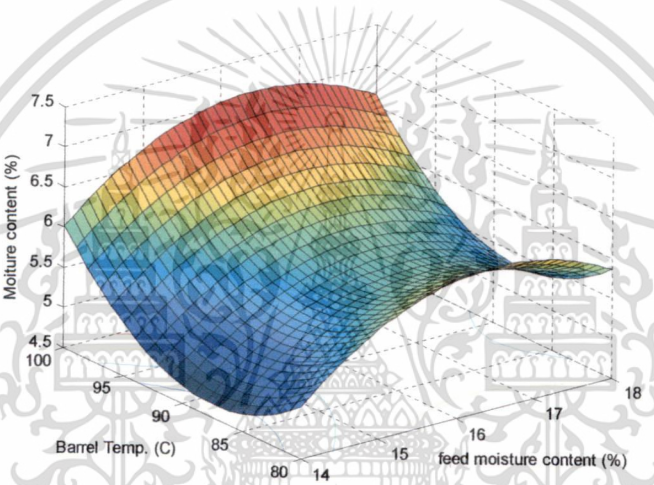


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบาร์เรลที่มีผลต่อค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ความเร็วรอบต่างๆกัน

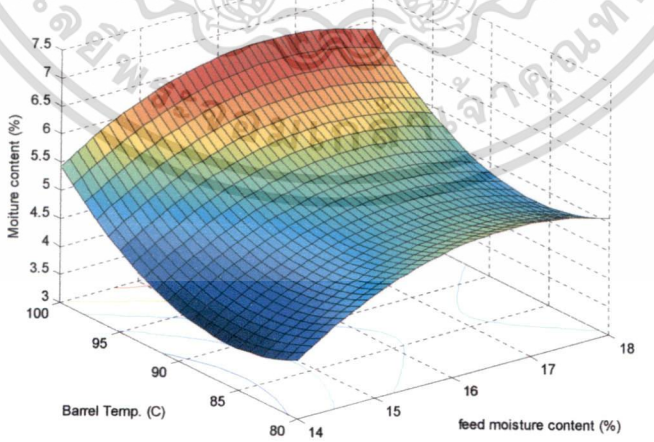
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความเร็วรอบ 420 rpm



ความเร็วรอบ 500 rpm



ความเร็วรอบ 580 rpm

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบาร์เรลที่มีผลต่อค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ความเร็วรอบของสกรูต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ความหนาแน่น (Bulk Density, ρ_{bulk})

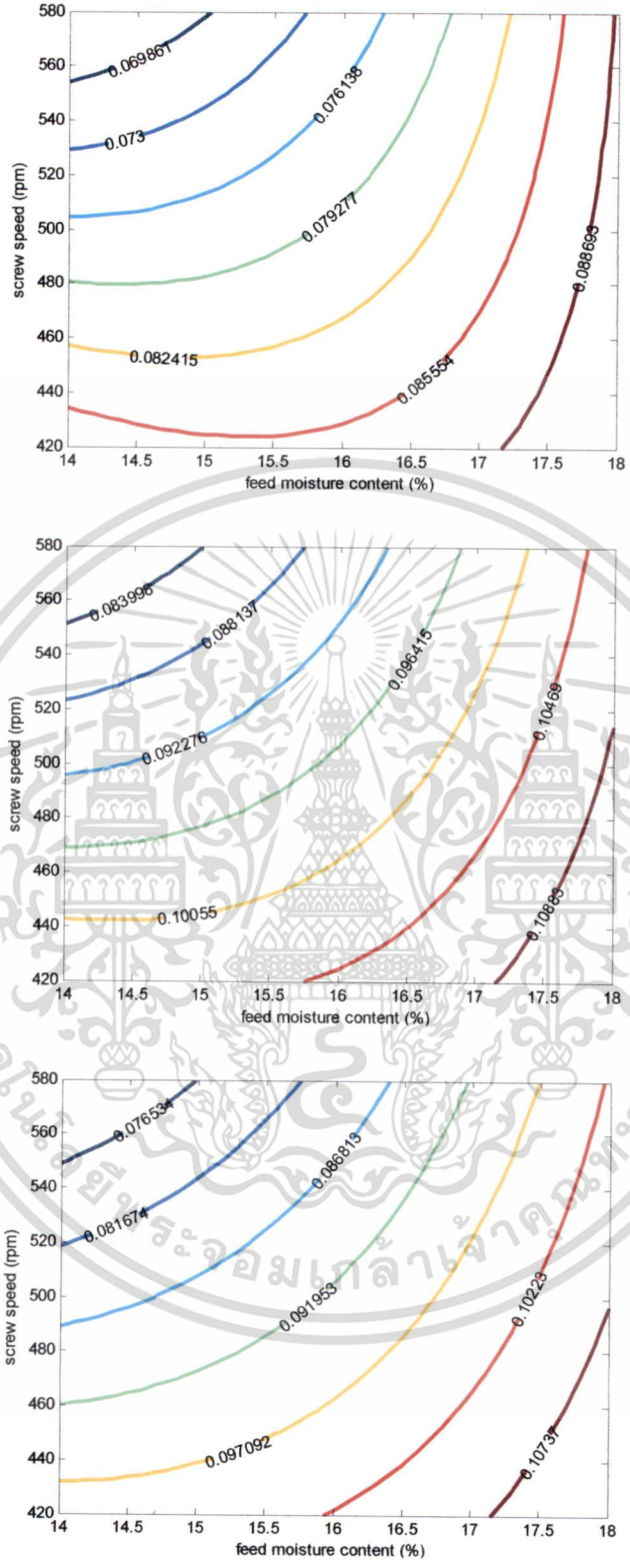
ความหนาแน่นรวมที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 0.07-0.118 (g/cm^3) และเมื่อนำค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\rho_{bulk} = (-0.334422) - (0.047083)\,X_1 - (0.000414)\,X_2 + (0.0193688)\,X_3 + (0.0008542)\,X_1^2 + (0.0000000651)X_2^2 - (0.000108)\,X_3^2 + (0.0000281)\,X_1X_2 + (0.0001125)\,X_1\,X_3 - (0.00000219)\,X_2X_3 \qquad (4\text{-}2)$$

$R^2 = 0.8682$ Standard Error = 0.0077

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-2) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.3 และ 44 จากกราฟจะพบว่าเมื่อใช้วัตถุดิบเริ่มต้นที่มีความชื้นสูงผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุดิบเริ่มต้นที่มีความชื้นสูงนั้นจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าสูงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีมวลมากจึงทำให้มีค่าความหนาแน่นสูง ในขณะที่ในสภาวะการผลิตที่ใช้ความเร็วรอบของสกรูสูงนั้นมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ ทั้งนี้เพราะการเพิ่มความเร็วรอบของสกรูนั้นทำให้วัตถุดิบได้รับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิเนื้อแป้งมีค่าสูงขึ้น เมื่อผ่านออกจากหน้าแปลนจึงเกิดการระเหยน้ำออกอย่างรวดเร็ว เอ็กซ์ทรูเดตเกิดการพองตัวทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



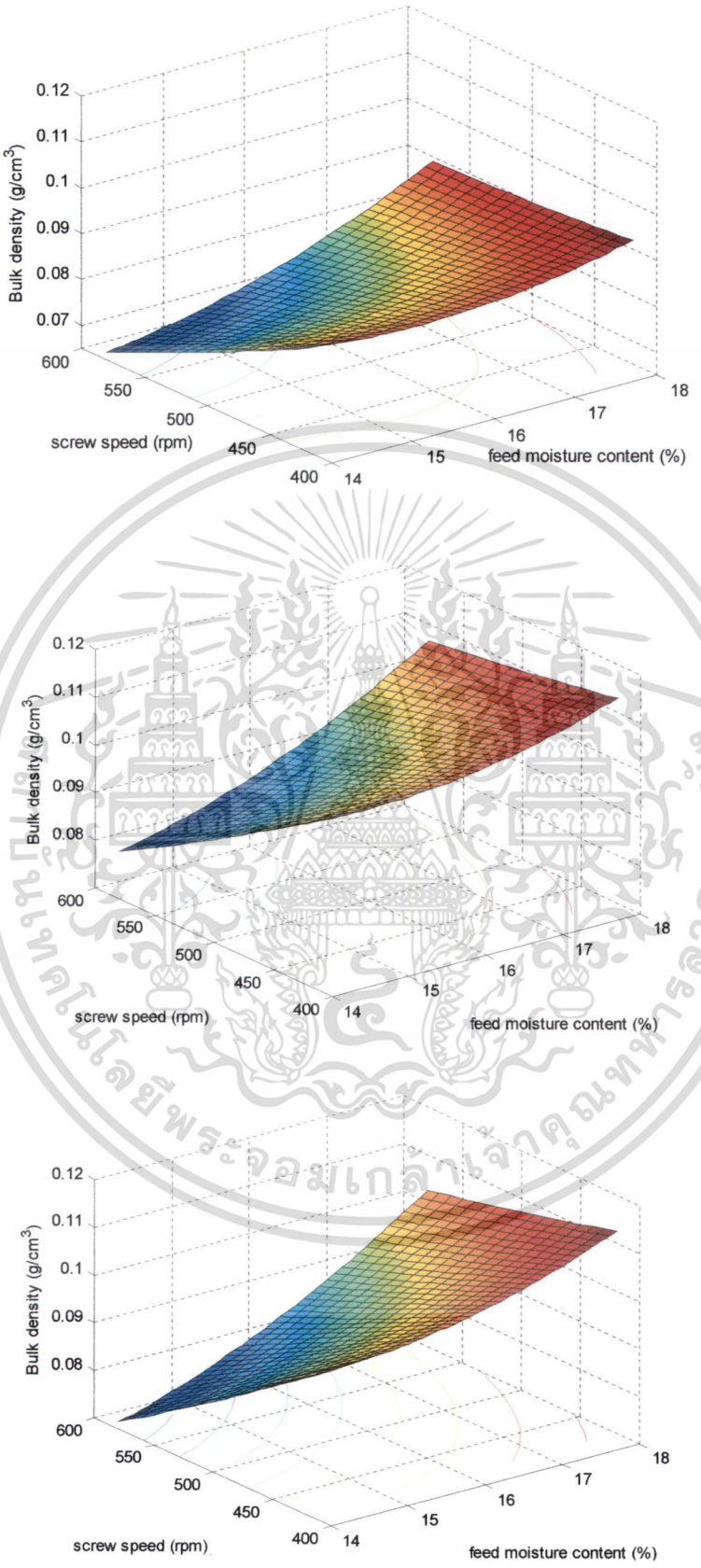
อุณหภูมิ 80 °C

อุณหภูมิ 90 °C

อุณหภูมิ 100 °C

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นรวมที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นรวมที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ (Expansion Ratio, ER)

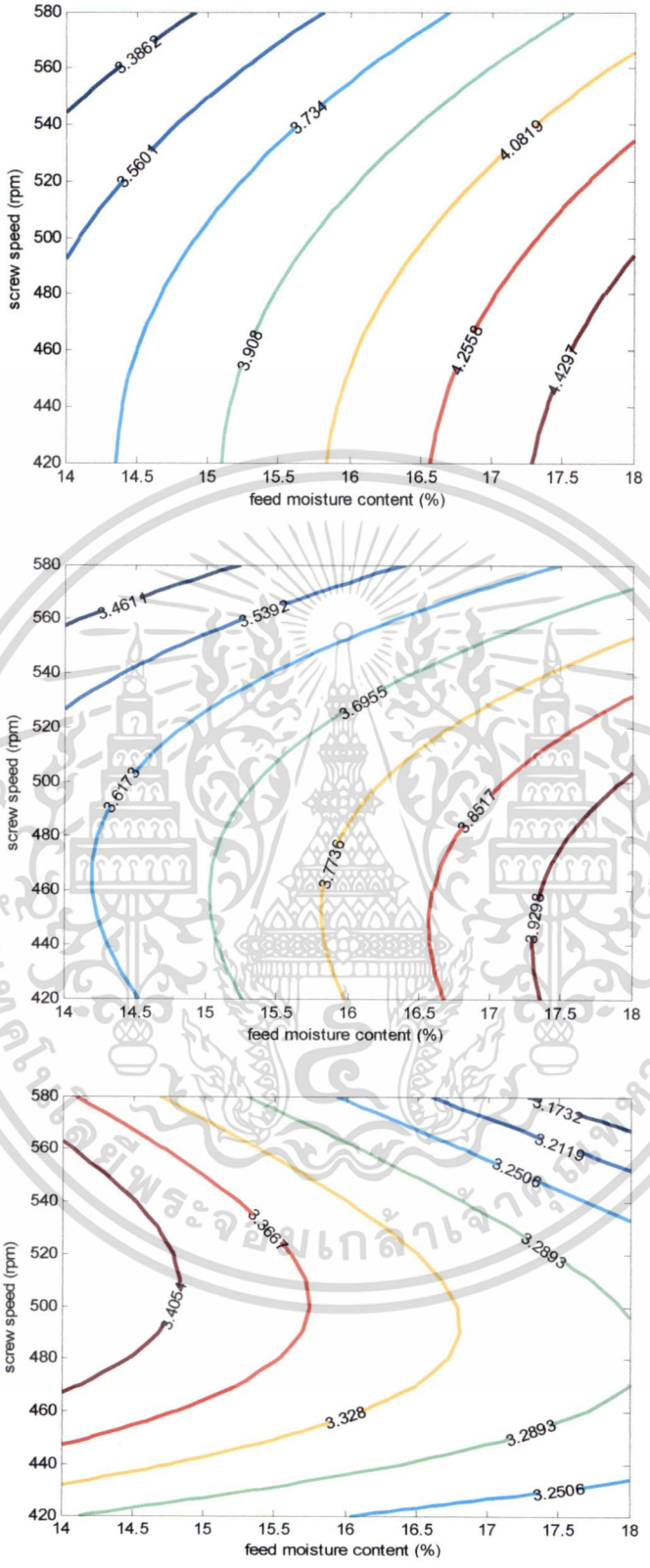
อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 3.23-4.58 และเมื่อนำค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$ER = (-18.37539) + (1.3130208)\ X_1 + (0.0048776)\ X_2 + (0.255)\ X_3 + (0.0017708)\ X_1^2 - (0.0000169)X_2^2 - (0.000904)\ X_3^2 - (0.000206)\ X_1X_2 - (0.01275)\ X_1\ X_3 + (0.0001625)\ X_2X_3 \quad (4\text{-}3)$$

$R^2 = 0.9290$ Standard Error = 0.0415

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-3) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบเริ่มต้นในช่วง 14-18% จะทำให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Qing-Bo Ding (2005) ที่ได้ศึกษาผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์จากข้าวสาลีที่ผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นจะทำให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากในวัตถุดิบมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มาก เมื่อวัตถุดิบผ่านออกจากหน้าแปลนเกิดการระเหยตัวของน้ำสูงทำให้เอ็กซ์ทรูเดตมีการพองตัวมาก การเพิ่มความเร็วรอบนั้นทำให้อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มความเร็วรอบทำให้วัตถุดิบมีระยะเวลาในกระบวนการสั้นลงไม่เพียงพอต่อการทำให้เม็ดแป้งสุกเต็มที่ ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลนั้นทำให้อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



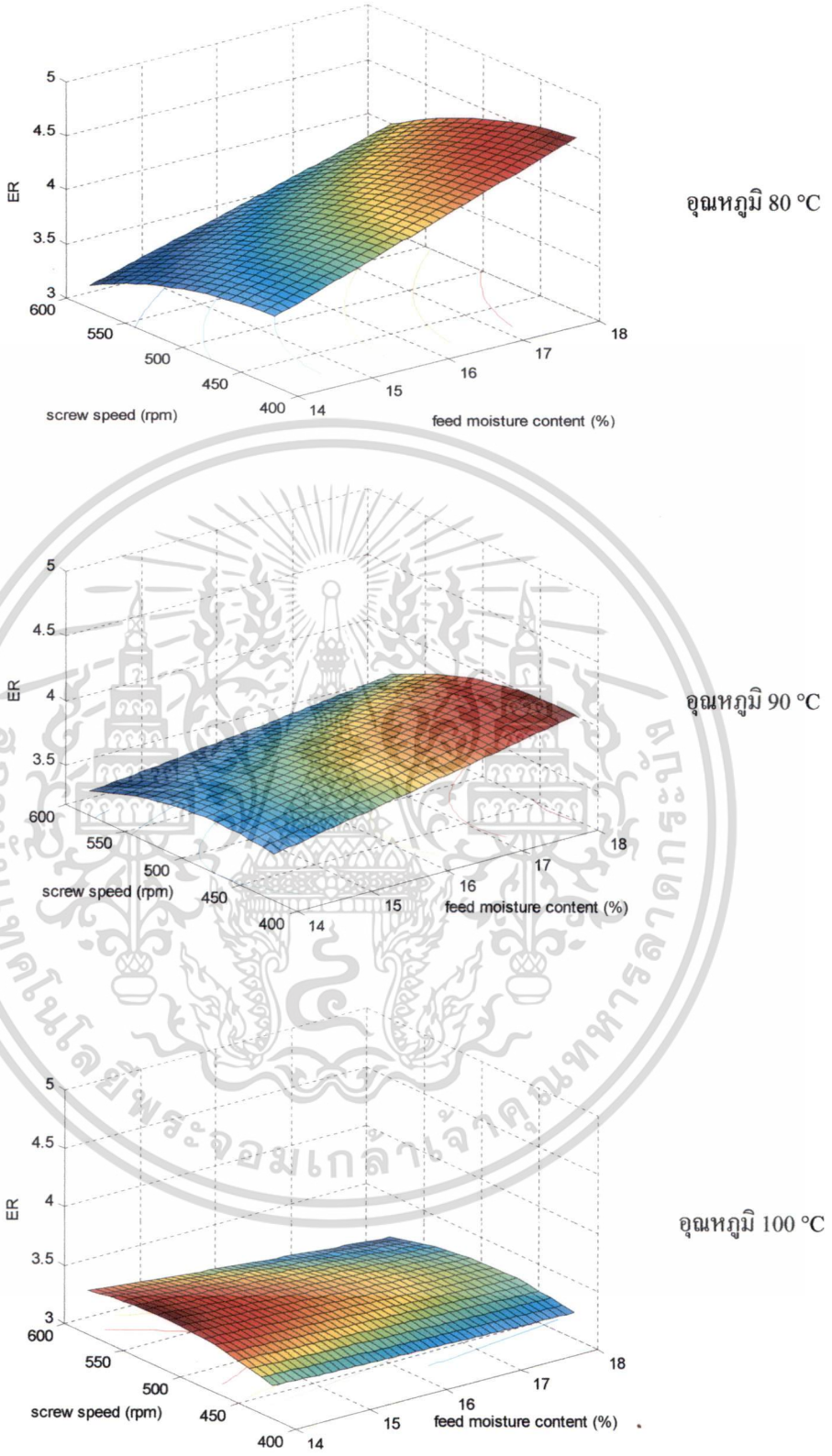
อุณหภูมิ 80 °C

อุณหภูมิ 90 °C

อุณหภูมิ 100 °C

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่ออัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่ออัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index, WAI) และความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility Index, WSI)

4.5.1 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index, WAI)

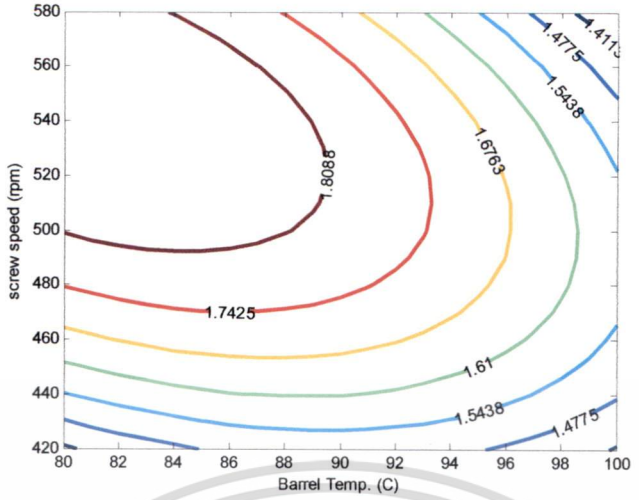
ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 1.177-1.858 g/g และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} WAI = {} & (-13.78431) - (0.380781)\,X_1 + (0.0415953)\,X_2 + (0.1830875)\,X_3 - (0.006188)\,X_1^2 \\ & - (0.0000299)X_2^2 - (0.001005)\,X_3^2 + (0.0002516)\,X_1X_2 + (0.0045375)\,X_1\,X_3 \\ & - (0.000156)\,X_2X_3 \end{aligned} \qquad (4\text{-}4)$$

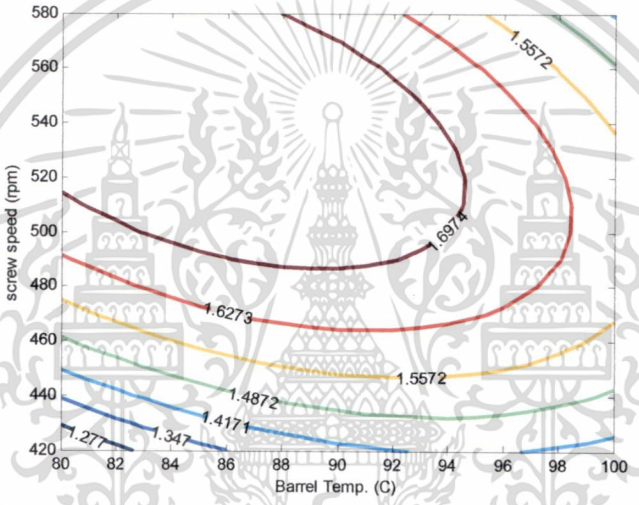
$R^2 = 0.8578$ SE. = 0.1254

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-4) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.7 และ 4.8 จากกราฟจะพบว่าการเพิ่มความเร็วรอบของสกรูมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงปริมาณน้ำที่เม็ดแป้งดูดซับไว้เพื่อการเกิดเจลาติไนเซชัน ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิของบาร์เรลจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อแป้งได้รับความร้อนจะเกิดการพองเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วแตกออกเป็นโครงสร้างใหม่ที่ไม่ดูดน้ำเข้ามาอีก (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2543) ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง

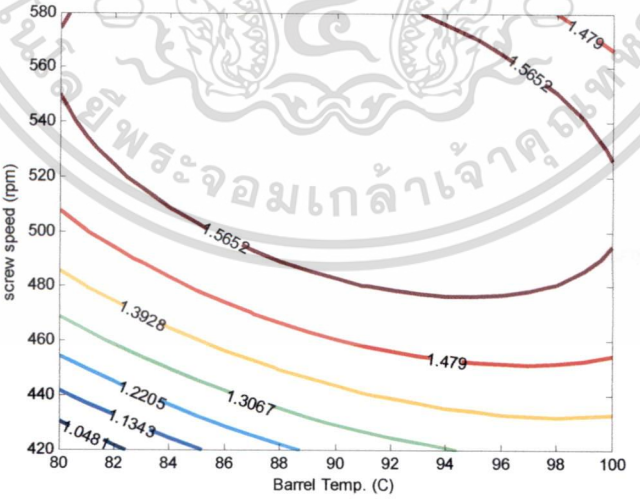
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความชื้นเริ่มต้น 14%



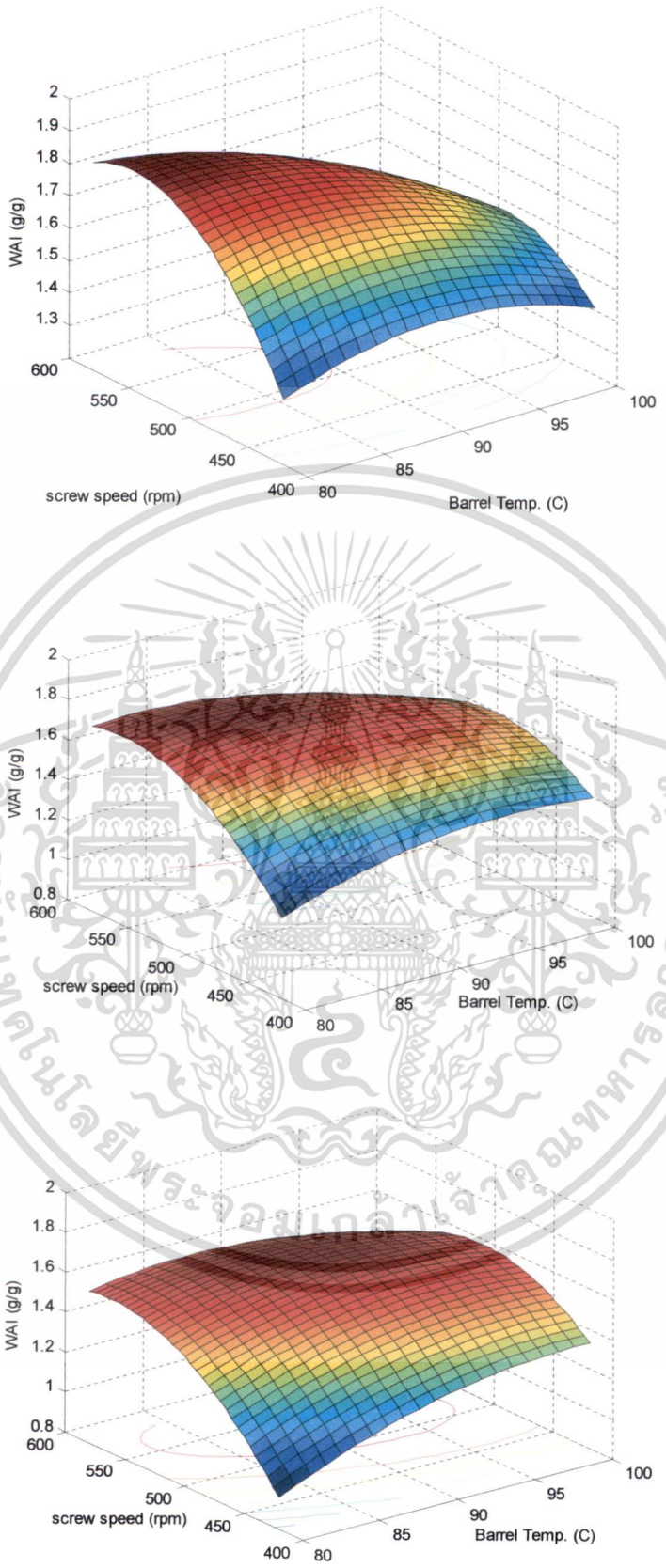
ความชื้นเริ่มต้น 16%



ความชื้นเริ่มต้น 18%

รูปที่ 4.7 ความสมพนธระหวางอุณหภูมบารเรลและความเรวรอบของสกรูทมผลตอความสามารถ เนการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility Index, WSI)

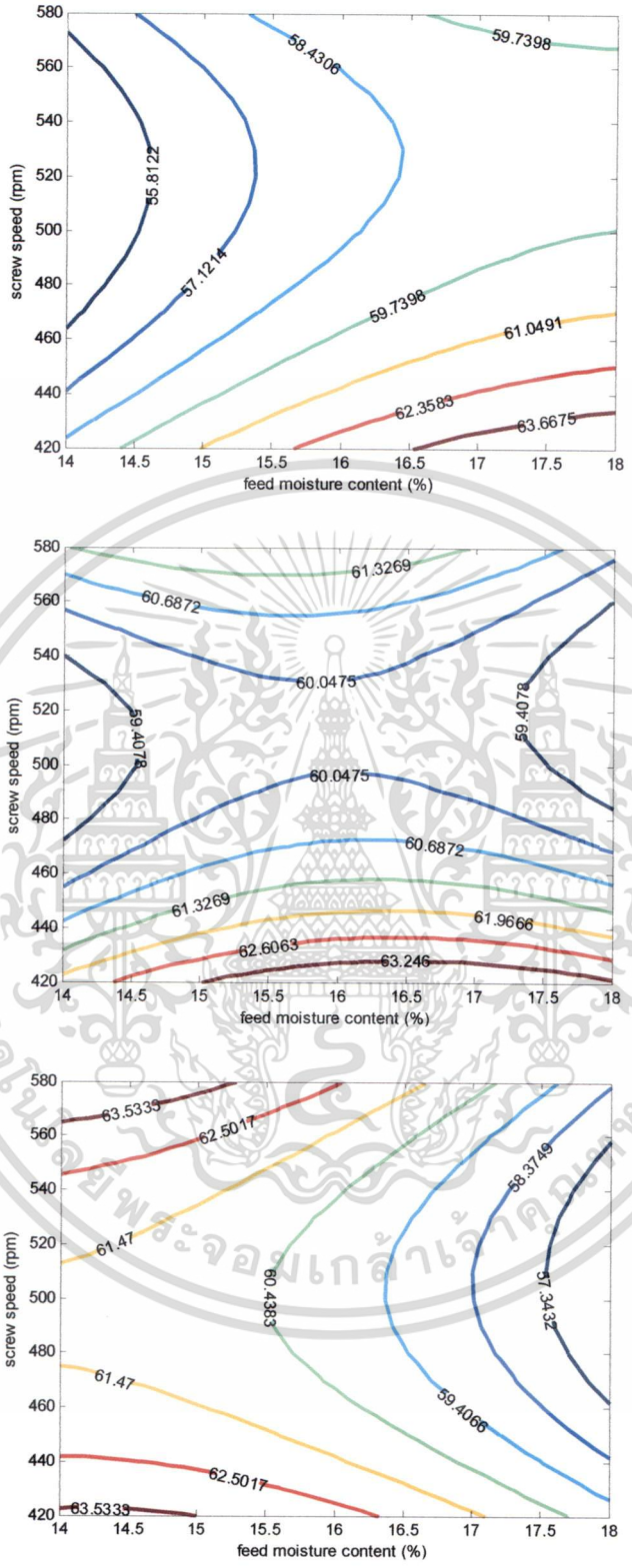
ค่าความสามารถในการละลายน้ำที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 51.278-64.716% และเมื่อนำค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} WSI = {} & (-136.1033) + (21.591333)\,X_1 - (0.490593)\,X_2 + (3.2284688)\,X_3 - (0.264385)\,X_1^2 \\ & + (0.000439)X_2^2 - (0.009248)\,X_3^2 - (0.00355)\,X_1X_2 - (0.125975)\,X_1\,X_3 \\ & + (0.0010672)\,X_2X_3 \end{aligned} \qquad (4\text{-}5)$$

$R^2 = 0.6154$ SE. = 3.2021

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-5) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.9 และ 4.10 จากกราฟจะพบว่าการผลิตที่สภาวะความเร็วรอบของสกรูประมาณ 520 rpm ความชื้น 14% อุณหภูมิ 80°C มีผลทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำมีค่าต่ำสุด การเพิ่มหรือลดความเร็วรอบของสกรูจากตำแหน่งนี้มีผลทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิและความชื้นของวัตถุดิบมีผลให้ความสามารถในการละลายน้ำมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าโมเลกุลของแป้งลูกเดือยถูกทำลายแตกออกเป็นส่วนประกอบที่สามารถละลายน้ำเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



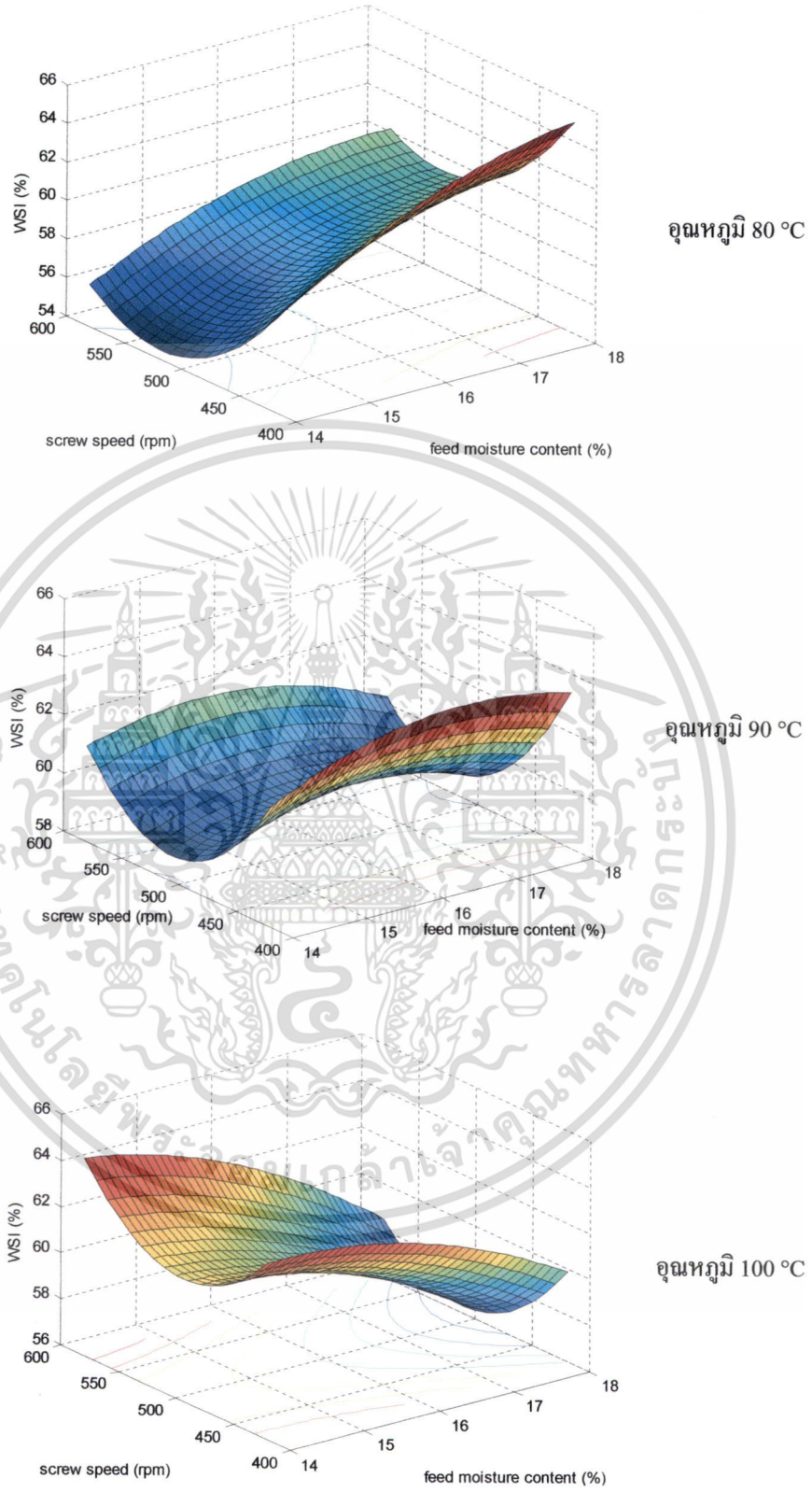
อุณหภูมิ 80 °C

อุณหภูมิ 90 °C

อุณหภูมิ 100 °C

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ลักษณะเนื้อสัมผัส

4.6.1 ค่าความแข็ง (Hardness)

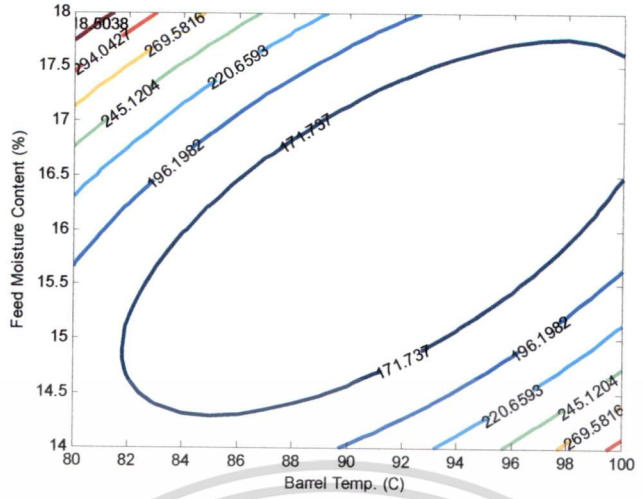
ค่าความแข็งที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 134.43-353.56 g/mm^2 และเมื่อนำค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned}\text{Hardness} = {} & (2770.553309) - (161.0242179)\,X_1 - (0.026223264)\,X_2 - (28.93522411)\,X_3 \\ & + (14.46768168)\,X_1^2 - (0.0000455705)X_2^2 + (0.474134512)\,X_3^2 \\ & + (0.032706341)\,X_1X_2 - (3.462097477)\,X_1X_3 - (0.005330696)\,X_2X_3 \end{aligned} \quad (4\text{-}6)$$

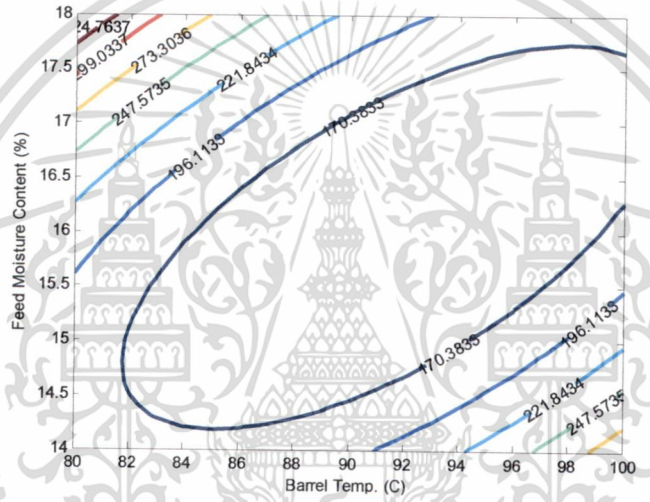
$R^2 = 0.6154$ SE. = 3.2021 ($p < 0.01$)

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-7) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 จากกราฟจะพบว่าความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบเป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าความแข็งสูงสุดของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตรองลงมาคืออุณหภูมิบาร์เรล ที่สภาวะการผลิตที่ใช้อุณหภูมิบาร์เรลต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งสูง ขณะที่การเพิ่มหรือลดความเร็วรอบของสกรูไม่ค่อยมีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มากนัก ในขณะที่เมื่อเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบเริ่มต้นจะทำให้ค่าความแข็งที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในวัตถุดิบมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มาก

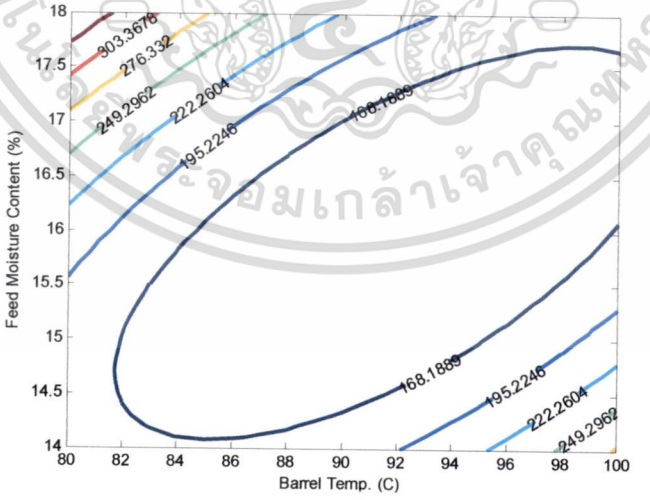
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความเร็วรอบสกรู 420 rpm



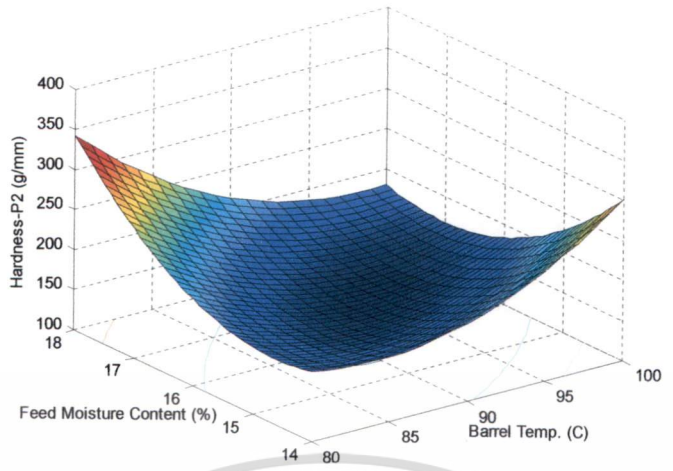
ความเร็วรอบสกรู 500 rpm



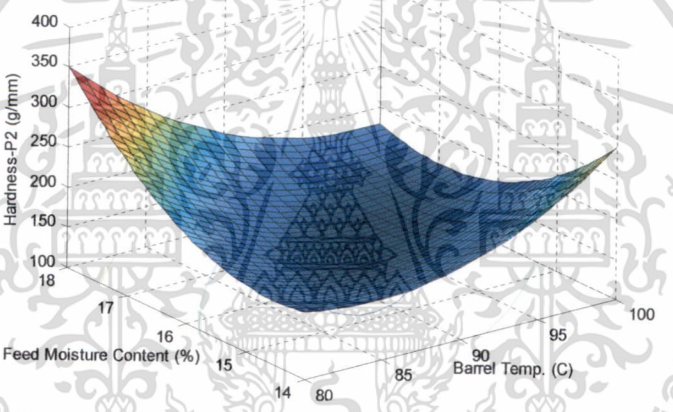
ความเร็วรอบสกรู 580 rpm

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าแรงแตกหักของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความเร็วรอบสกรู ต่างๆกัน

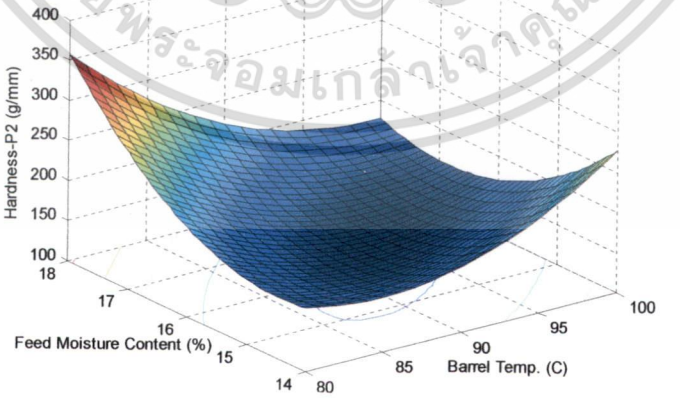
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความเร็วรอบสกรู 420 rpm



ความเร็วรอบสกรู 500 rpm



ความเร็วรอบสกรู 580 rpm

รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าแรงแตกหักของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความเร็วรอบสกรู ต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 ความกรอบ (Crispness)

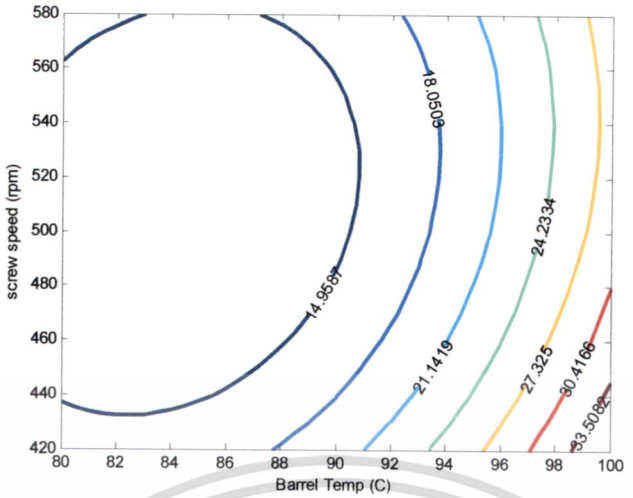
ค่าความกรอบที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 8.2-38.3 และเมื่อนำค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\text{Crispness} = (451.90312) + (8.321875)\,X_1 - (0.488281)\,X_2 - (9.05625)\,X_3 - (0.30625)\,X_1^2 + (0.0005625)X_2^2 + (0.0645)\,X_3^2 + (0.0082812)\,X_1X_2 - (0.03875)\,X_1X_3 - (0.002375)\,X_2X_3 \qquad (4\text{-}7)$$

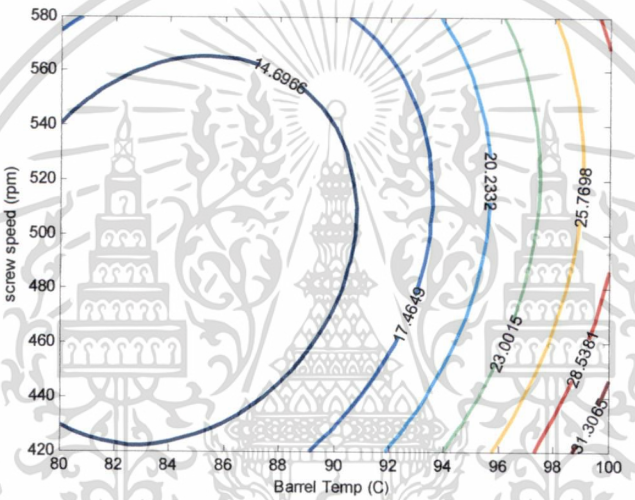
$R^2 = 0.8137$ SE. = 5.6504

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-7) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 จากกราฟจะพบว่าเมื่อทำการผลิตโดยใช้อุณหภูมิของบาร์เรลสูงนั้นจะทำให้ค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าสูงและจะมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบต่ำคือที่ 420 rpm อุณหภูมิบาร์เรล 100°C ความชื้นเริ่มต้น14% นอกจากนี้ยังพบว่าในการผลิตที่สภาวะการผลิตที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงนั้นจะทำให้ค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลง เนื่องจากในวัตถุดิบมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มากจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสูงทำให้มีค่าความกรอบน้อยและมีความแข็งมาก

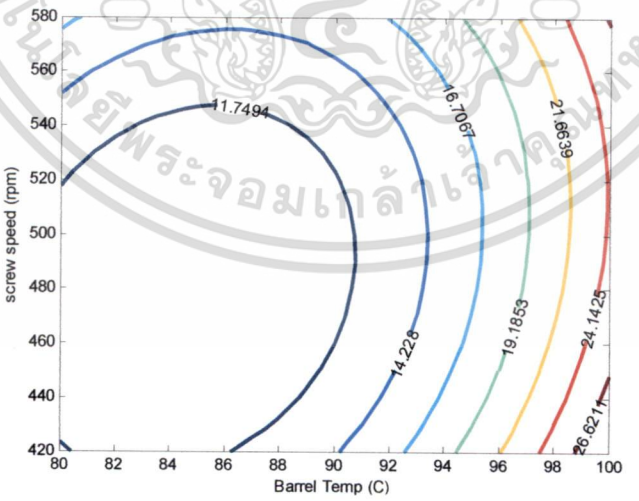
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความชื้นเริ่มต้น 14 %



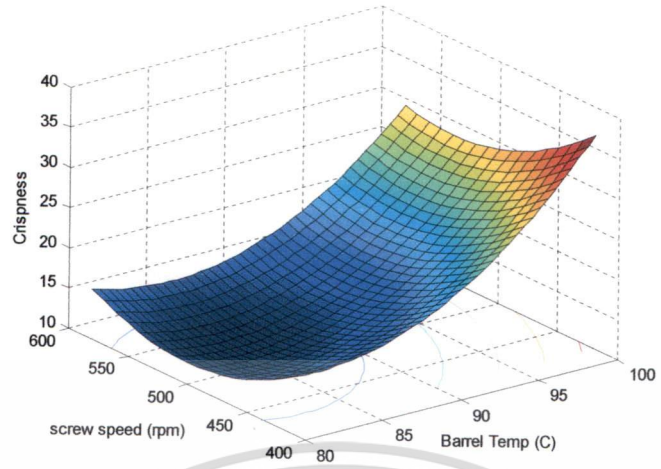
ความชื้นเริ่มต้น 16 %



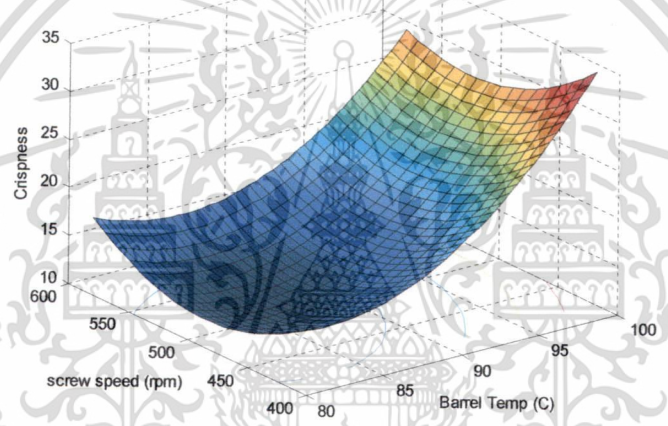
ความชื้นเริ่มต้น 18 %

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆกัน

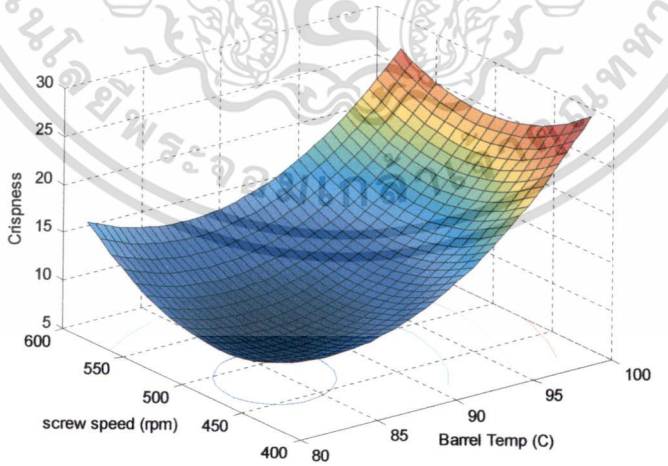
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความชื้นเริ่มต้น 14 %



ความชื้นเริ่มต้น 16 %



ความชื้นเริ่มต้น 18 %

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ค่าสี

4.7.1 ค่าความสว่างของสี (L*)

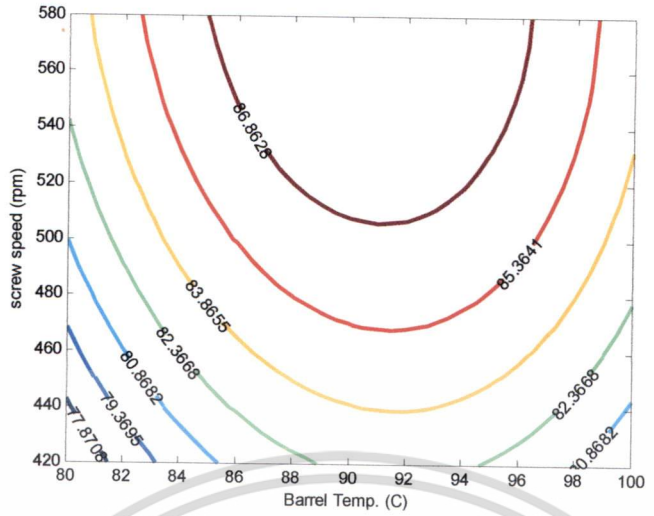
ค่าความสว่างของสีที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 76.75–90.91และเมื่อนำค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$L^* = -(566.2658438) + (15.229)X_1 + (0.353535937)X_2 + (9.87291875)X_3 - (0.171875)X_1^2 - (0.000175938)X_2^2 - (0.0459425)X_3^2 - (0.005934375)X_1X_2 - (0.0833625)X_1X_3 - (0.000650937)X_2X_3 \quad (4\text{-}8)$$

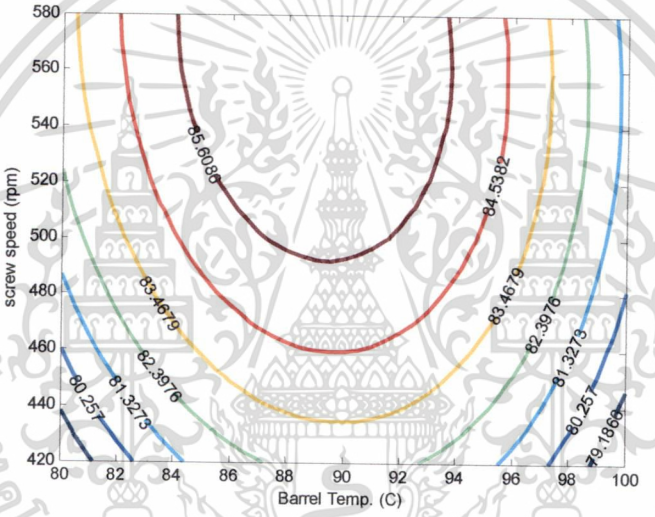
$R^2 = 0.8018$ SE. = 2.6866

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-9) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 จากกราฟจะพบว่าการเพิ่มความเร็วรอบของสกรูจะทำให้ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตสูงขึ้น ในขณะที่สภาวะการผลิตที่อุณหภูมิบาร์เรล 90°C จะให้ค่าความสว่างสูงสุด การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มหรือลดลงจากนี้ทำให้ความสว่างของผลิตภัณฑ์ลดลง

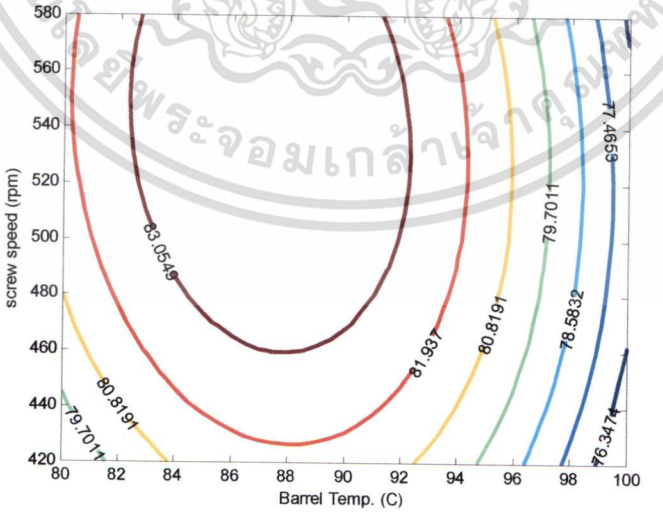
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความชื้นเริ่มต้น 14 %



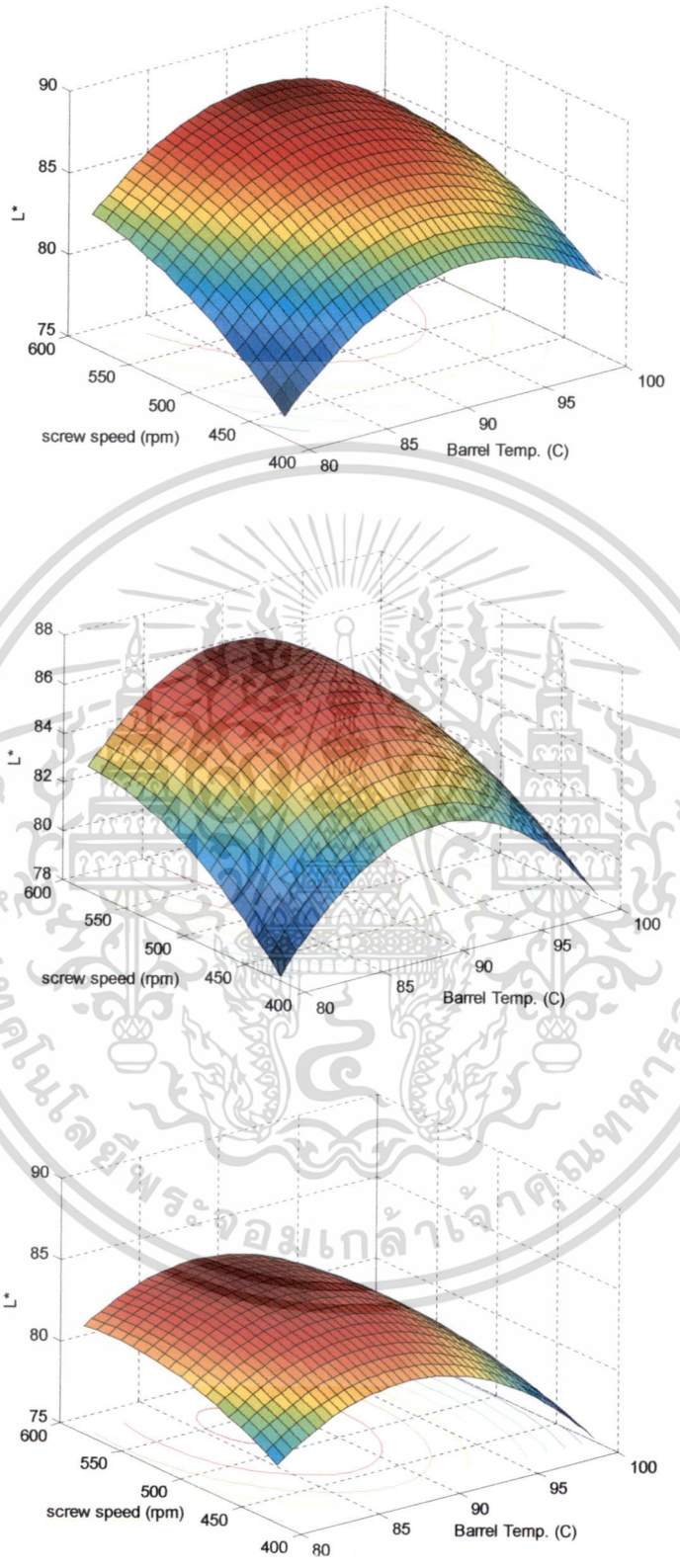
อุณหภูมิ 90 °C
ความชื้นเริ่มต้น 16 %



ความชื้นเริ่มต้น 18 %

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อค่า
ความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูทีมิ ผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2 ค่าความเป็นสีเหลือง (b*)

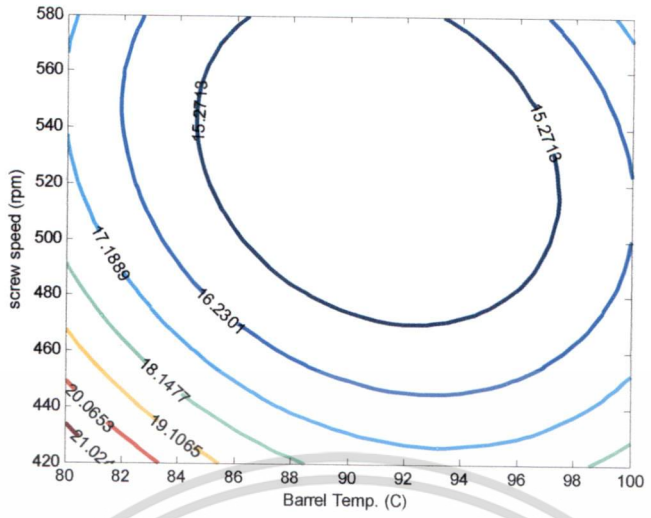
ค่าความเป็นสีเหลือง ที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 13.923-19.873 และเมื่อนำค่าความเป็นสีเหลือง ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$b^* = 459.1765 - (10.38289)X_1 - (0.437863)X_2 - (5.5713375)X_3 + (0.1760416)X_1^2 + (0.0002796)X_2^2 + (0.0243566)X_3^2 + (0.0028593)X_1X_2 + (0.039075)X_1X_3 + (0.001115625)X_2X_3 \quad (4\text{-}9)$$

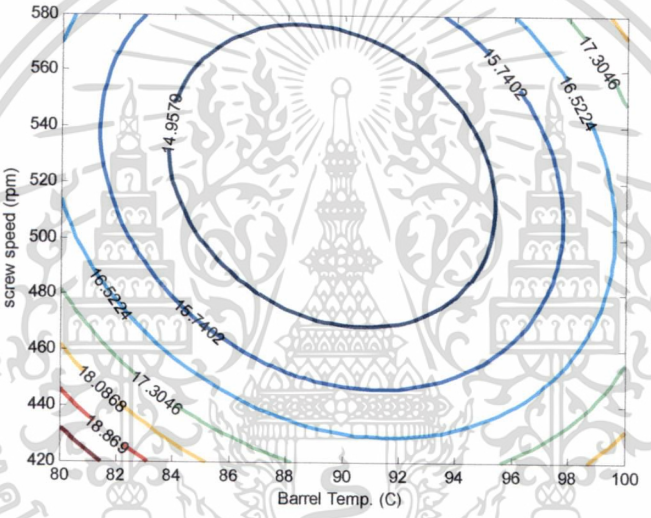
$R^2 = 0.88024$ SE. = 1.1337 ($p < 0.1$)

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-10) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 จากกราฟจะ พบว่าที่สภาวะการผลิตที่อุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูต่ำผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตจะมีความเป็นสีเหลืองมาก ในขณะที่การเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบนั้นจะทำให้ค่าความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Onyango (2004)

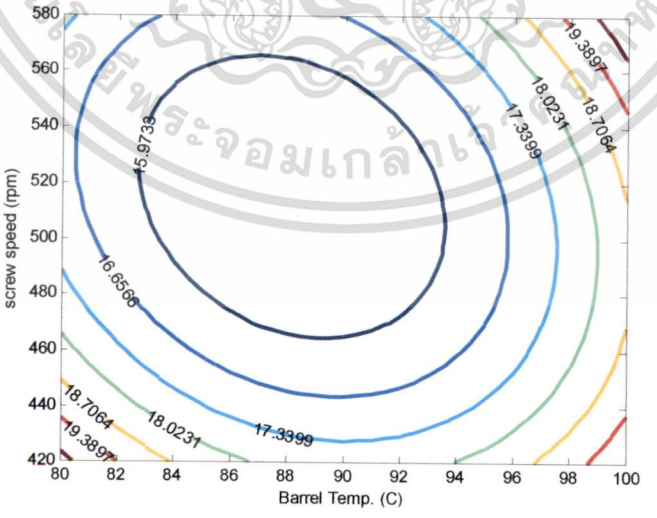
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความชื้นเริ่มต้น 14 %



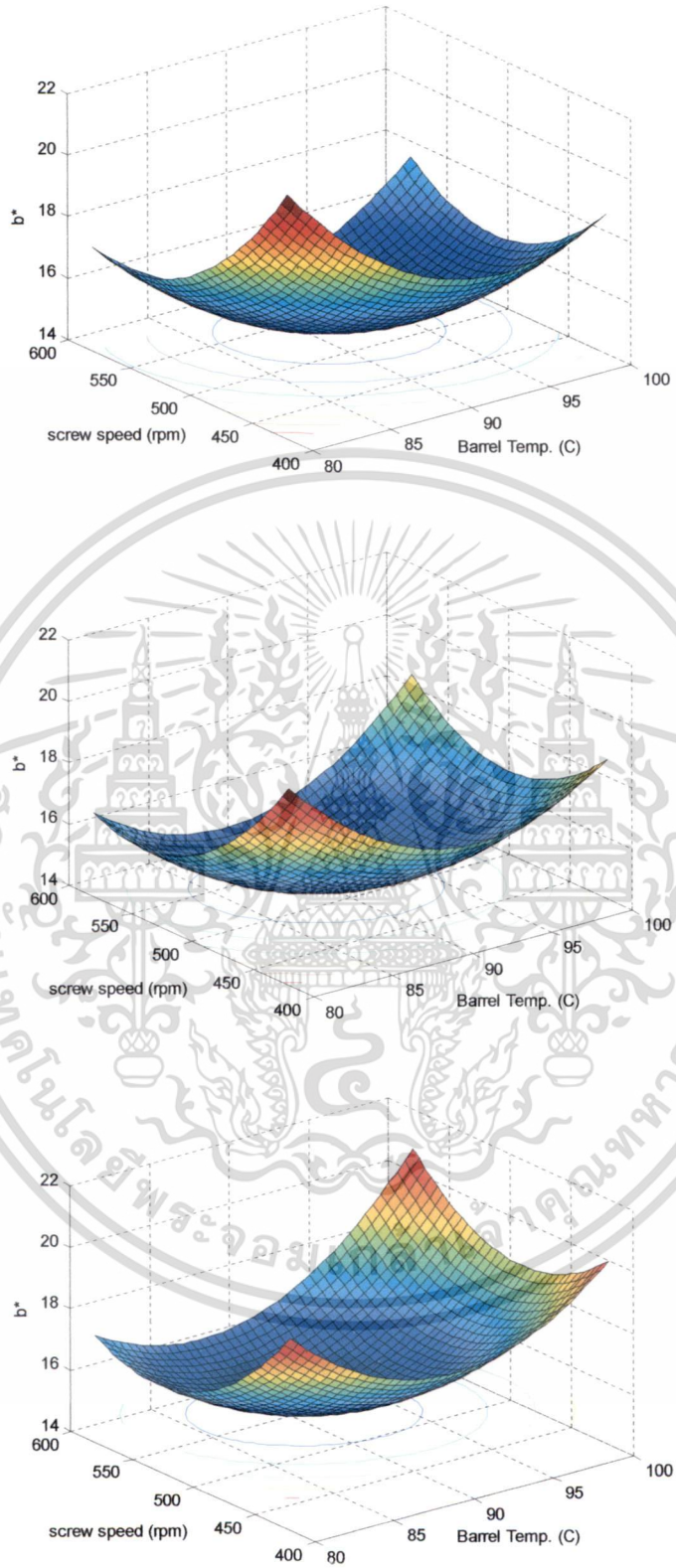
ความชื้นเริ่มต้น 16 %



ความชื้นเริ่มต้น 18 %

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูทีมี ผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อค่า
ความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุปผล

การศึกษากระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้วัตถุดิบจากลูกเดือยในการศึกษา โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบที่ 14-18% , ความเร็วรอบของสกรูที่ 420-580 rpm และอุณหภูมิบาร์เรลที่ 80-100°C ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ, ความเร็วรอบของสกรู และอุณหภูมิของบาร์เรลมีเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้

2. ที่ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่ำทำให้เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าความชื้นน้อย, ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นจริงน้อย, อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์น้อย, มีความกรอบสูง ในขณะที่สภาวะความชื้นของวัตถุดิบมีค่าสูงจะให้ผลในทางตรงกันข้าม

3. ในสภาวะการผลิตที่ความเร็วรอบของสกรูต่ำนั้นทำให้ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นจริงสูง, ความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำ, ความสว่างของผลิตภัณฑ์น้อย, มีความเป็นสีเหลืองสูง ในขณะที่ในสภาวะความเร็วรอบสูงนั้นจะให้ผลในทางตรงกันข้าม

4. ในสภาวะการผลิตที่อุณหภูมิบาร์เรลต่ำนั้นมีผลทำให้ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่ามาก, ความหนาแน่นรวมต่ำ, ความหนาแน่นจริงสูง, อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์สูง, ความสามารถในการดูดซับน้ำสูง, ความสว่างน้อย, มีความกรอบน้อย ในขณะที่ในสภาวะการที่อุณหภูมิบาร์เรลสูงนั้นจะให้ผลในทางตรงกันข้าม

5. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการโพลีโนเมียลลำดับที่สอง สามารถนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ดี เช่น ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต, ความหนาแน่น, อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ และความสามารถในการดูดซับน้ำในขณะที่ค่าความสามารถในการละลายน้ำมีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ

6. การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสามารถนำไปใช้ในการกำหนดแนวทางการผลิตเพื่อให้ได้เอ็กซ์ทรูเดตที่มีคุณลักษณะตามต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอต และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ.เทคโนโลยีของแป้ง.พิมพ์ครั้งที่ 2.สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.2543

- เพ็ญขวัญ ชมปรีดา และทัศนีย์ ลิ้มสุวรรณ 2541. ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, กรุงเทพฯ

- Alvarez-Martinez L., Kondury K.P. and Harper J.M., 1988, A general model for expansion of extruded products, *Journal of Food Science*, 53

- 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, Official Methods of Analysis of Analysis of the Association of official Analytical Chemists, 1990, Fifteenth Edition, Published by the Association of Official Analytical Chemist, Inc. Volume II, P.777

- Badrie, N., & Mellowes, W.A., 1991, Effect of extrusion variables on cassava extrudates. *Journal of Food Science*, 56

- Chinnaswamy, R and Hanna, M.A., 1988, Optimum extrusion cooking conditions for maximum expansion of corn starch. *Journal of Food Science*, 53, pp.834-837

- Cochran, W.G. and G.M. Cox., 1957, Experimental Designs, 2d ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, 611p.

- Gordon, L.R., 1990, Food Packaging : Principle and Practice, Marcel Dekker, Inc., New York U.S.A 676p.

- Harper, J.M., 1981, Extrusion of foods V.II, CRC Press Inc., Boca Raton, Fl.

- Khuri, A.I. and J.A. Cornell., 1987, Response surface : Design and analyses. Marcel Dekker Inc., New York. 505p.

- Matz, S.A., 1984, Snack food Technology. 2nd ed.A VI publishing CO. Westport, Connenclicut.415 p.

- Moria, H.(2001). Have a snack. The world of food ingredients. Sep: 12-14

- Fellows. P.J., 1988, Food Processing Technology: Principles and Practice. Ellis Horwood, Singapore, 267-276

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Qing-Bo Ding, Paul Ainsworth, Andrew Plunkett, Gregory Tucker, Heyley Marson., 2005, The effect of extrusion conditions on the functional and physical properties of wheat-based expanded snacks. *Journal of Food Engineering*, 73, 142-148

- http://www.thaiherbclub.com

- http://www.kpt.ac.th/etc/herb.htm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้