

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การผลิตแบบเอ็กซ์ทราซันของถั่วเคี้ยว

EXTRUSION OF JOB'S TEAR'S SEEDS



เลขที่.....
เลข.....
วัน, เดือน, ปี.....

83037

ก.ค. 2551

b. 11๑๕๑๐๓๑
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันของลูกเดือย

EXTRUSION OF JOB'S TEAR'S SEEDS

ผู้จัดทำ

1. นายปณิธาน มณี
2. นางสาวพัชรา โพธิ์ขาว



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันของลูกเคี้ยว

นายปวิธาน มณี
นางสาวพัชรา โพธิ์ขาว

ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์
ปีการศึกษา 2550

อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้ เพื่อศึกษาผลกระทบบของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันจากลูกเคี้ยว ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (14-18% wb.) ความเร็วรอบของสกรู (420-580 rpm) และอุณหภูมิของบารเรล (80-100° C) ที่มีต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย ความชื้นของผลิตภัณฑ์ ความหนาแน่น อัตราส่วนการขยายตัว ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และค่าความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) ลักษณะเนื้อสัมผัส และสี จากผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบจะมีผลทำให้ค่าความหนาแน่น อัตราส่วนการขยายตัว ค่าความสามารถในการละลายน้ำ ค่าความแข็ง และความสว่างของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น แต่ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและความกรอบมีค่าลดลง การเพิ่มความเร็วนรอบของสกรูนั้นจะทำให้ อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิบารเรลจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและค่าความแข็งลดลง แต่ค่าความสามารถในการละลายน้ำและความกรอบจะมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Extrusion of Job's Tear's Seeds

Mr. Panitan Manee

Miss Patchara Pokao

Asst. Prof. Dr. Maradee Phongpipatpong Advisor

2007

Abstract

The objective of this project is to investigate the effect of extrusion conditions 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

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆ ที่มีส่วนทำให้ปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี ดังรายนามต่อไปนี้ ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่ให้ความรู้ อบรมสั่งสอน ตลอดจนบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน รวมทั้งเพื่อนๆและน้องๆในภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และต้องขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่อาจกล่าวได้หมด ณ ที่นี้ ที่มีส่วนทำให้ปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	บทคัดย่อ	iii
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	iv
	กิตติกรรมประกาศ	v
	สารบัญ	vi
	สารบัญรูป	ix
	สารบัญตาราง	xii
1.	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2.	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
	2.1 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion process)	3
	2.1.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน	3
	2.1.2 ชนิดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	5
	2.1.3 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	9
	2.1.4 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	10
	2.1.5 ข้อดีของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	12
	2.2 ลูกเต๋อย	12
	2.2.1 ความรู้ทั่วไป	12
	2.2.2 ประเภทของลูกเต๋อย	13
	2.2.3 การแปรรูป	13
	2.2.4 คุณค่าทางโภชนาการ	14
	2.3 คุณภาพในการแปรรูป	14
	2.3.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของแป้ง	14
	2.3.2 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลายของแป้ง	16
	2.3.3 ความหนืด	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การเกิดเจลาตินในเซซัน (Gelatinization)	19
2.3.5 การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation)	20
2.4 อาหารขบเคี้ยว	20
2.4.1 ชนิดของอาหารขบเคี้ยว	21
2.4.2 การตลาดของขนมขบเคี้ยว	23
2.5 การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวตอบ	23
2.5.1 วัตถุประสงค์ของการทำ RSM	23
2.5.2 วิธีการใช้ RSM	23
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
3. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	26
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	26
3.1.1 วัสดุคิบ	26
3.1.2 อุปกรณ์	26
3.2 การกำหนดตัวแปรที่ศึกษา	27
3.2.1 ตัวแปรอิสระ	27
3.2.2 ตัวแปรตาม	27
3.3 การวางแผนการทดลอง	28
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	29
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุคิบ	29
3.4.2 การทดลองผลิตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์	29
3.5 การวัดค่าคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้	30
3.5.1 ค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต	30
3.5.2 ความหนาแน่น	31
3.5.3 ความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในการละลายน้ำ	32
3.5.4 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	33
3.5.5 ลักษณะเนื้อสัมผัส	33
3.5.6 คุณสมบัติความเหนียว	34
3.5.7 สี	34
3.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	35
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	36
4.1 ผลการทดลอง	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2	วิเคราะห์ผลการทดลอง	38
4.2.1	ความชื้นของผลิตภัณฑ์	38
4.2.2	ความหนาแน่นรวม	42
4.2.3	ความหนาแน่นจริง	46
4.2.4	อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	50
4.2.5	ความสามารถในการดูดซับน้ำ	54
4.2.6	ความสามารถในการละลายน้ำ	58
4.2.7	ค่าความแข็ง	62
4.2.8	ความกรอบ	66
4.2.9	ค่าความสว่างของสี	70
4.2.10	ค่าความเป็นสีเหลือง	74
5.	สรุปผลการทดลอง	78
	เอกสารอ้างอิง	79
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก.	82
	ภาคผนวก ข.	83
	ภาคผนวก ค.	105
		116

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 พารามิเตอร์ต่างๆของการเดินเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่พอง	11
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA	18
รูปที่ 2.3 ระยะในการเกิดเจลลาติในเซชันของเม็คแป้ง	19
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง	30
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของเอ็กซ์ทราคต์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-1)	38
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบาร์เรลที่มีผลต่อค่าความชื้นของเอ็กซ์ทราคต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ	40
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบาร์เรลที่มีผลต่อค่าความชื้นของเอ็กซ์ทราคต์ที่ความเร็วรอบต่างๆ	41
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมของเอ็กซ์ทราคต์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-2)	42
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นรวมที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ	44
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นรวมที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ	45
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นจริงของเอ็กซ์ทราคต์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-3)	46
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นจริงที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ	48
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นจริงที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ	49
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการขยายตัวของเอ็กซ์ทราคต์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-4)	50
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีต่ออัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ	52
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีต่ออัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเอ็กซ์ทรูเดต ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-5)	54
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรู ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์	56
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี ผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์	57
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทรูเดต ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-6)	58
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็ว รอบของสกรูที่มีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์	60
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็ว รอบของสกรูที่มีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์	61
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าแรงแตกหักของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ(4-7)	62
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิที่มี ผลต่อค่าแรงแตกหักของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความเร็วรอบสกรู ต่างๆ	64
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิที่มี ผลต่อค่าแรงแตกหักของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความเร็วรอบสกรู ต่างๆ	65
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าความกรอบของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ(4-8)	66
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี ผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นต่างๆ	68
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี ผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นต่างๆ	69
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าความสว่างของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ(4-9)	70
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี ผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นต่างๆ	72
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี ผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นต่างๆ	73
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าความเป็นสีเหลืองของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการ ทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-10)	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี	76
ผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นต่างๆ	
รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี	77
ผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นต่างๆ	
รูปที่ ค.1 ลูกเดือย	117
รูปที่ ค.2 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว	117
รูปที่ ค.3 เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง	118
รูปที่ ค.4 โถดูดความชื้น	118
รูปที่ ค.5 เครื่อง Texture Analysis รุ่น TA-XT Plus	119
รูปที่ ค.6 เครื่องวัดสี Colorimeter	119
รูปที่ ค.7 เครื่อง Centrifuge	120
รูปที่ ค.8 เครื่องวัดความหนืด	120
รูปที่ ค.9 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 1 (18% 580rpm 90°C)	121
รูปที่ ค.10 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 2 (14% 580rpm 90°C)	121
รูปที่ ค.11 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 3 (18% 420rpm 90°C)	121
รูปที่ ค.12 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 4 (14% 420rpm 90°C)	121
รูปที่ ค.13 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 5 (18% 500rpm 100°C)	121
รูปที่ ค.14 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 6 (14% 500rpm 100°C)	121
รูปที่ ค.15 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 7 (18% 500rpm 80°C)	122
รูปที่ ค.16 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 8 (14% 500rpm 80°C)	122
รูปที่ ค.17 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 9 (16% 580rpm 100°C)	122
รูปที่ ค.18 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 10 (16% 420rpm 100°C)	122
รูปที่ ค.19 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 11 (16% 580rpm 80°C)	122
รูปที่ ค.20 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 12 (16% 420rpm 80°C)	122
รูปที่ ค.21 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 13 (16% 500rpm 90°C)	123
รูปที่ ค.21 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 14 (16% 500rpm 90°C)	123
รูปที่ ค.21 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 15 (16% 500rpm 90°C)	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของลูกเคียว	14
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้ง	16
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	18
ตารางที่ 2.4 ลักษณะการเกิดเจลของแป้งแต่ละชนิด	20
ตารางที่ 3.1 แผนการทดลอง	28
ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design	28
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเอ็กซ์ทรูเดต	36
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเอ็กซ์ทรูเดต	37
ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย	37
ตารางที่ ก.1 ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตแห้งอบ	84
ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)	86
ตารางที่ ก.3 ความหนาแน่นจริง (g/cm^3)	88
ตารางที่ ก.4 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	90
ตารางที่ ก.5 ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำ	92
ตารางที่ ก.6 ค่าสี	95
ตารางที่ ก.7 ค่า Hardness (g/mm^2) โดยใช้หัวกดแบบ Warner-Blatzer Blade	97
ตารางที่ ก.8 ค่า Hardness (g/mm^2) โดยใช้หัวกดแบบ Probe P2	98
ตารางที่ ก.9 ค่า Crispness โดยใช้หัวกดแบบ Warner-Blatzer Blade	99
ตารางที่ ก.10 ค่า Crispness โดยใช้หัวกดแบบ Probe P2	100
ตารางที่ ก.11 ค่า Toughness (g.mm) โดยใช้หัวกดแบบ Warner-Blatzer Blade	101
ตารางที่ ก.12 ค่า Toughness (g.mm) โดยใช้หัวกดแบบ Probe P2	102
ตารางที่ ก.13 ค่าความหนืด (RVU)	103
ตารางที่ ข.1 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต	106
ตารางที่ ข.2 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นรวมของเอ็กซ์ทรูเดต	107
ตารางที่ ข.3 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นจริงของเอ็กซ์ทรูเดต	108
ตารางที่ ข.4 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราส่วนการขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดต	109
ตารางที่ ข.5 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสามารถในการละลายน้ำ	111
ตารางที่ ข.7 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเกต	112
ตารางที่ ข.8 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความกรอบของเอ็กซ์ทรูเกต	113
ตารางที่ ข.9 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสว่างของเอ็กซ์ทรูเกต	114
ตารางที่ ข.10 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความเป็นสีเหลืองของเอ็กซ์ทรูเกต	115



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ลูกเดือยเป็นธัญพืชที่มีคุณประโยชน์สูง มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว มีคุณค่าทางสารอาหารสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน นอกจากนี้ยังพบสารที่มีองค์ประกอบเป็นกรดอะมิโนรวมถึงวิตามินและแร่ธาตุต่างๆ เช่น วิตามินบี 1, วิตามินบี 2, วิตามินอี, แคลเซียม และฟอสฟอรัส เป็นต้น จากการค้นคว้าวิจัยยังพบว่ามีส่วนหลายตัวที่มีสรรพคุณช่วยในการรักษาเกี่ยวกับโรคภูมิคุ้มกันและยับยั้งการก่อมะเร็ง ลดโคเลสเตอรอลในเลือด รักษาอาการปวดเข่า ปวดข้อ บำรุงกำลัง แก้เหน็บชา เป็นต้น (www.kpt.ac.th/etc/herb.htm) การบริโภคลูกเดือยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของลูกเดือยที่ต้มสุก ซึ่งระยะเวลาในการเตรียมลูกเดือยให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมสำหรับการบริโภคนั้นต้องใช้ระยะเวลาไม่สะดวกต่อการบริโภค เสียค่าใช้จ่ายสูง ทำให้เกิดการสิ้นเปลือง ดังนั้นหากมีการแปรรูปลูกเดือยให้อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์อาหารที่สะดวกต่อการบริโภคจะเป็นการช่วยสนับสนุนให้มีการแปรรูปและเพิ่มมูลค่าให้กับลูกเดือย นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มความสะดวกรวดเร็วต่อการนำไปใช้บริโภคอีกด้วย

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันนี้เป็นกรรมวิธีการผลิตที่มีประสิทธิภาพ สามารถดำเนินการผลิตเพื่อให้ได้ลักษณะผลิตภัณฑ์ตามต้องการได้ภายในขั้นตอนเดียว กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่ทำให้วัตถุดิบส่วนใหญ่ที่เป็นธัญพืชเกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทางเคมีและกายภาพภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงภายในระยะเวลาสั้นๆ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายรูปแบบ อาทิเช่น ขนมขบเคี้ยว เป็นต้น ซึ่งสะดวกต่อการบริโภคและสามารถเก็บไว้ได้นาน (รุ่งนภา, 2541) จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นดังนั้นจึงใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันในการเตรียมลูกเดือยให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมแก่การรับประทานเร็วขึ้น อีกทั้งกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันยังสามารถแปรรูปวัตถุดิบให้เป็นขนมขบเคี้ยวได้

ในกระบวนการผลิตโดยใช้กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเพื่อให้ได้ลักษณะผลิตภัณฑ์ลูกเดือยตามต้องการนั้นมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ เช่น อุณหภูมิบาร์เรล ความเร็วรอบของสกรู ขนาดของรูไค ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ เป็นต้น (Fellows, 1988) ดังนั้นความเข้าใจเกี่ยวกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณลักษณะตามต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์สำคัญ คือ

1. เพื่อศึกษากระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน โดยใช้ลูกเดี๋ยเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าตัวแปรประกอบด้วย ค่าความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบของสกรู และอุณหภูมิบาร์เรลต่อกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน
3. เพื่อศึกษาลักษณะของผลิตภัณฑ์ extrudate ที่ใช้ลูกเดี๋ยเป็นวัตถุดิบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันคือ ลูกเดี๋ย
2. กระบวนการผลิตใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว โดยใช้ลูกเดี๋ยบดเป็นวัตถุดิบหลัก
3. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์คือ
 - ความชื้นของวัตถุดิบก่อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์
 - ความเร็วรอบของสกรู
 - ปริมาณของน้ำตาลที่ผสมอยู่ในวัตถุดิบก่อนเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์
4. วิเคราะห์ลักษณะของผลิตภัณฑ์
 - Sectional Expansion Index
 - Extrudates Moisture Content
 - สี
 - ลักษณะเนื้อสัมผัส
 - Bulk Density
 - Water Absorption Index
 - Water Solubility Index
 - คุณสมบัติความหนืด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบหลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว
2. ทราบผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
3. ได้แนวทางในการแปรรูปลูกเดี๋ยด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน
4. ได้ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากลูกเดี๋ยที่มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (Extrusion process)

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่รวมเอาหน่วยปฏิบัติการหลายหน่วยเข้าด้วยกัน ได้แก่ การผสม (mixing) การทำให้สุก (cooking) การนวด การเฉือน (shearing) การขึ้นรูปและการทำให้เกิดรูปร่างโดยการบังคับสารที่อ่อนตัว หรือหลอมเหลวผ่านรูหรือได (die) ด้วยความดัน เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในอาหารจึงเป็นเครื่องมือสำหรับการทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างและรูปร่างของอาหาร โดยมักใช้สำหรับผลิตขนมขบเคี้ยวหรือผลิตภัณฑ์จากธัญพืช

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันหรือเอ็กซ์ทรูเดต (extrudate) คือ สภาพะการทำงาน of เครื่องและคุณสมบัติทางด้านรีโอโลยีของอาหาร โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาพะการทำงาน of เครื่องนั้น ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดของไดและอัตราการเฉือน (shear rate) ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัส และสีของเอ็กซ์ทรูเดต (extrudate) ได้แก่ ความชื้น ขนาด และองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ โดยเฉพาะปริมาณและชนิดของแป้ง โปรตีน ไขมันและน้ำตาลของส่วนผสมที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

สภาพะการทำงาน of เครื่อง คุณสมบัติทางด้านรีโอโลยีของอาหารและส่วนผสมที่เติมเข้าไปในวัตถุดิบเริ่มต้น เช่น น้ำตาลหรือกรดนั้น ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพ และทางเคมี ของอาหารจำพวกที่มีคาร์โบไฮเดรตสูงในระหว่างกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ที่มีใช้อุณหภูมิที่สูงในระยะเวลาสั้นๆ (Badrie et al., 1991; Fan et al., 1996; Sriburi et al., 2000)

2.1.1 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (รุ่งนภา, 2541)

1. เวลา (Time)

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่มีลักษณะเป็น equilibrium process ดังนั้นในการเปลี่ยนแปลงสถานะต่างๆ เช่น อุณหภูมิ จึงต้องใช้เวลาในการปรับตัวให้เข้าสู่สมดุล ตัวแปรที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการตัวหนึ่ง คือ เวลาซึ่งผลิตภัณฑ์ถูกกระทำ หรือ residence time หรือเวลาที่เกิดขึ้นในกระบวนการ โดยขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและขนาดของอุปกรณ์

2. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้าย เนื่องจากปฏิกิริยาหลักของกระบวนการนี้ คือ ปฏิกิริยาการเกิดเจล (gelatinization) โดยที่คุณสมบัติของกลั่น สี รวมทั้งเนื้อสัมผัสล้วนเป็นผลที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ทั้งสิ้น ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนไป คุณสมบัติต่างๆเหล่านี้จะเปลี่ยนไปด้วย หากต้องการให้เกิดการพองตัวของผลิตภัณฑ์จะต้องควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของจุดเดือดของน้ำ เมื่อผลิตภัณฑ์ผ่านแม่พิมพ์ (die) แล้ว น้ำในอาหารจะเกิดการเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์พองตัวคล้ายบอลูนที่ถูกเป่าลม เพื่อให้กระบวนการเป็นไปตามนี้ นอกจากจะต้องควบคุมอุณหภูมิแล้วยังจำเป็นต้องควบคุมความดันให้มีค่าสูงพอที่จะป้องกันไม่ให้น้ำเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์อีกด้วย

3. ความชื้น (Moisture)

ความชื้นเป็นส่วนสำคัญในปฏิกิริยาการเกิดเจล (gelatinization) เมื่อเม็ดแป้งดูดความชื้นจะทำให้เกิดการพองตัว ถ้ามีอุณหภูมิที่สูงเพียงพอในการทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุล เม็ดแป้งจะพองตัวขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การพองตัวเช่นนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียการจัดเรียงตัว ถ้าให้ความร้อนต่อไปจะทำให้โครงสร้างภายในหลวมขึ้น ทำให้น้ำเข้าไปได้มากขึ้น ถ้ามีการกวนที่แรงเพียงพอหรืออุณหภูมิสูงเพียงพอ กรานูล (granule) ที่พองตัวเหล่านี้จะแยกออกจากกัน (ประเสริฐ สุทธิประสิทธิ์, 2543) หากความชื้นไม่สม่ำเสมอ จะทำให้ปฏิกิริยาการเกิดเจลในแต่ละส่วนของอาหารไม่สม่ำเสมอ เป็นผลทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายไม่ได้คุณภาพตามต้องการ

4. อัตราการเฉือน (Shear rate)

อัตราการเฉือนเป็นตัววัดค่าการผสมกันของวัตถุดิบว่าอยู่ในระดับใด (mixing intensity) โดยวัตถุดิบจะสัมผัสกับบาร์เรลที่อยู่กับที่และสกรูที่เคลื่อนที่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เคลื่อนไหลออกจากกัน โดยอัตราเฉือนจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วที่เปลี่ยนไป ซึ่งอัตราการเฉือนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู หรือลดความลึกของร่องเกลียว

5. ความเร็วรอบของสกรู (Screw speed)

ในการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะใช้ความเร็วรอบของสกรูที่เหมาะสมที่แตกต่างกัน หากต้องการให้พองมาก จะปรับความเร็วรอบให้สูง ความเร็วรอบนี้ไม่ส่งผลถึงค่าความชื้น แต่จะส่งผลต่อเวลา อุณหภูมิ และอัตราการเฉือน ดังนี้

- เวลา ในสถานะที่ความเร็วรอบสกรูสูง เป็นผลให้เวลาดักพัก (Residence time) ลดลง
- อัตราการเฉือน ความเร็วรอบของสกรูที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการเฉือนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นหากต้องการปรับเปลี่ยนคุณภาพอาหารเช่น การพองด้วยการเพิ่มแรงทางกล สามารถปรับได้โดยการเพิ่มหรือลดความเร็วรอบสกรู
- อุณหภูมิ อุณหภูมิจะไม่เปลี่ยนแปลงหากค่าความหนืดลดลงและค่าความเร็วรอบสูงมาก แต่โดยปกติที่ค่าความเร็วรอบที่ใช้กันทั่วไปจะทำให้อุณหภูมิมียุคสูงขึ้น

2.1.2 ชนิดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

2.1.2.1 แบ่งโดยอาศัยคุณลักษณะหน้าที่และผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Functional characteristic) ดังนี้

1. Pasta Extruder

เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี เช่น มัคกะโรนี เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้มีร่องเกลียวสกรูเล็ก ผังด้านในของปลอกเหล็กผนังสองชั้นเรียบ และความเร็วของสกรูที่หมุนจะช้า สกรูเกลียวเล็กนี้ทำหน้าที่ผลักแป้งเซโมไลนา (Semolina) ที่ขึ้นนุ่มให้เคลื่อนที่ไปทางข้างหน้า แล้วอัดผ่านรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลนออกมา ซึ่งอาจทำให้แป้งเซโมไลนาสุกบ้างเล็กน้อยหรือไม่สุกเลยก็ได้ ในพาสต้าเอ็กซ์ทรูเดอร์นั้นพลังงานที่ใช้้น้อยมากเพราะมีอัตราเฉือนเกิดขึ้นต่ำมากในตัวผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ถึงกับสุกพอ จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนอย่างอื่นมาช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นสุกพร้อมที่จะรับประทานต่อไป

2. High-Pressure Forming Extruder

เริ่มแรกทีพัฒนาหรือประยุกต์นำเอาเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารนั้นก็เพื่อที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นรูปทรงตามที่ต้องการเท่านั้น โดยใช้วัตถุดิบที่เป็นโด (Dough) ที่เปลี่ยนแปลงเป็นเจลบ้างบางส่วนอัดผ่านรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลนแล้วตัดเป็นชิ้นตามขนาดและรูปทรงที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ยังไม่สุกพอจะต้องนำไปผ่านขั้นตอนการอบแห้งและทำให้สุกพอด้วยวิธีการทอดในน้ำมันหรืออบ คั่วในกระทะหรือลมร้อนเสียก่อน

การทำให้เกิดความดันสูงขึ้นภายในตัวเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นั้น จะต้องออกแบบให้ผนังด้านในของปลอกเหล็กผนังทั้งสองชั้นเป็นร่องเกลียวเพื่อไม่ให้เกิดการไหลลื่นที่ผนัง และตัวสกรูก็ต้องออกแบบให้เป็นชนิดที่ทำให้เกิดแรงอัดมาก ผลคือจะทำให้เอ็กซ์ทรูเดอร์มีความดันสูงที่บริเวณด้านหลังหน้าแปลน และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงมากเกินไปในตัวของโดอาจนำไปสู่การสุกของที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นที่หน้าแปลน ความร้อนที่เกินความจำเป็นนี้สามารถกำจัดออกไปหรือทำให้ลดลงได้ด้วยการใช้น้ำหล่อรอบผนังของบาร์เรลที่เป็นผนังสองชั้น

3. Low-Shear Cooking Extruder

เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ผนังด้านในเรียบและช่องว่างระหว่างผนังสองชั้นของบาร์เรลนั้นมีช่องเหลืออุณหภูมิสูงหรือไอน้ำหรือความร้อนจากขดลวดไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ตลอดเวลา ความร้อนนี้ส่งผ่านไปยังส่วนผสมของวัตถุดิบ โดยการนำ นอกจากนี้การหมุนตัวของสกรูยังทำให้เกิดการขัดสีระหว่างวัตถุดิบกับสกรูเกิดเป็นความร้อน แล้วความร้อนนี้ก็แพร่ไปยังส่วนผสมของวัตถุดิบด้วยวิธีการนำด้วย วิธีการนี้ทำให้ส่วนผสมที่เป็นแป้งเปลี่ยนเป็นโด ซึ่งได้มีการขยายตัวและพองตัวเกิดขึ้นบ้าง ดังนั้นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาของส่วนผสมของวัตถุดิบที่อยู่ภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ซึ่งส่วนมากแล้วเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้จะเป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว เพื่อที่จะทำให้แป้งที่เป็นองค์ประกอบหลักของส่วนผสมวัตถุดิบเปลี่ยนเป็นเจลตามที่ต้องการ แล้วโดนี้ก็จะถูกทำให้เย็นลงด้วยการลดอุณหภูมิที่ปลอกเหล็กผนังสองชั้นอัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายหรือช่วงสุดท้ายที่ติดกับหน้าแปลนลงให้ต่ำกว่า 100°C ซึ่ง โคนี้ถูกแรงหมุนของสกรูและความดันอัดให้ผ่านรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลนออกมาสู่บรรยากาศภายนอกและถูกตัดออกเป็นชิ้นๆ ความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ภายในชิ้นอาหารขบเคี้ยวหรือขนมอบกรอบกึ่งสำเร็จรูปหรือเพลเล็ต (Pellet) นี้จะไม่ระเหยกลายเป็นไอน้ำลอยออกไป อาหารขบเคี้ยวหรือขนมกึ่งอบกรอบสำเร็จรูปชนิดที่ได้นี้มีลักษณะเนื้อแน่นมากกว่าการพองตัวจึงยังต้องมีกรรมวิธีการผลิตอย่างอื่นเพิ่มอีก เช่น การอบแห้ง และก่อนนำไปรับประทานก็ต้องนำไปทอดในน้ำมัน หรือไปคั่ว หรืออบเพื่อทำให้สุกพองเสียก่อน อาหารขบเคี้ยวหรือขนมอบกรอบกึ่งสำเร็จรูปนี้รู้จักกันในชื่อที่เรียกว่า Third generation snacks ที่ผลิตและมีจำหน่ายในบ้านเรา เช่น ปาปริก้า โปเต้ คอนเน่ เป็นต้น

4. Collet Extruder

เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบเรียบง่าย เล็กกะทัดรัด สะดวกต่อการใช้งาน เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่มีความยาวของตัวสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก ประมาณ 3:1 ($L/D = 3:1$ เรียกว่า Short screw แต่ชนิดที่ยาวกว่าขนาด $L/D = 10:1$ ก็มี) ใน Collet Extruder นี้เกิดแรงเฉือนสูงมาก อันเนื่องมาจากสกรูที่มีร่องเกลียวตื้นมากหมุนอยู่ในบาร์เรลที่ผนังด้านในเป็นร่องเกลียวเช่นกัน โดยร่องเกลียวนี้ป้องกันการลื่นที่ผนัง วัตถุประสงค์ที่ใช้กับเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ส่วนมากแห้ง มีความชื้นต่ำ ความร้อนเกือบจะหรือทั้งหมดที่เกิดขึ้นนั้นได้มาจากการเสียดสี (Friction) แล้วทำให้มีความร้อนถึง 175°C อย่างรวดเร็วเพื่อทำให้แป้งกลายเป็นเจลและเป็นคริกซ์ทรินบางส่วน วัตถุประสงค์หรือส่วนผสมของวัตถุดิบ (แป้ง) ที่ได้เปลี่ยนแปลงสภาพไปและยังอยู่ภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นี้เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดต (Extrudate) เอ็กซ์ทรูเดตที่อยู่ในสภาพนี้ก็ถูกดัน โพล์พ่นรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลนออกมา และเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว จากภายในที่มีความดันสูงมากมาสู่ภายนอกที่มีความดันต่ำ (ความดันบรรยากาศ) ทำให้น้ำภายในเอ็กซ์ทรูเดตเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำระเหยตัวออกไป ในขณะเดียวกันก็ถูกตัดด้วยใบมีดแล้วทรงตัวเป็นรูปของผลิตภัณฑ์ที่สุกพองและกรอบ วัตถุประสงค์ที่นิยมใช้กับ Collet Extruder ได้แก่ คอร์นกรีต ข้าวท่อน เป็นต้น

5. High-Shear Cooking Extruder

เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลายลักษณะ เช่น พวกที่สุกเพียงบางส่วน หรือพวกกึ่งสำเร็จรูป หรือพวกที่ผ่านความร้อนสูงแล้วมีการจัดโครงสร้างภายในโมเลกุลใหม่ เช่น พวกโปรตีนเกษตร (Texture vegetable protein) แรกเริ่มนั้นก็ประยุกต์เอาเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีอัตราส่วนของความยาวสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ($L/D = 10-20:1$) เป็นชนิดที่เกิดแรงอัดสูง เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดที่มีบาร์เรลยาว แต่ก็สามารถทำให้ร้อนหรือเย็นได้โดยการใช้แหล่งความร้อนหรือแหล่งความเย็นจากภายนอก โดยการผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างผนังของบาร์เรล เอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ใช้กับวัตถุดิบได้มากมายหลายชนิด และในช่วงความชื้นได้ต่างกันได้ และควบคุมสภาวะต่างๆ ในระหว่างการผลิตได้ เช่น ควบคุมการสุกพอง อุณหภูมิ ความหนาแน่นของเนื้อสัมผัส ฯลฯ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องชนิดนี้ได้แก่ อาหารเลี้ยงสัตว์ อาหารเช้า ซีเรียล อาหารเช้าจากธัญชาติพร้อมรับประทาน (RTE cereals) โปรตีนเกษตร (TVP) และอาหารขนมขบเคี้ยวหรือขนมอบกรอบ (Snack foods)

High-Shear Cooking Extruder (HSCE) ได้ถูกจัดให้อยู่ใน HTST ส่วนมากในการผลิตอาหาร โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ก่อนที่จะป้อนวัตถุดิบเข้าไปในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ควรรุ่นหรือให้ความร้อนเสียก่อน ซึ่งจะเป็นไอน้ำหรือน้ำร้อนก็ได้ แล้วป้อนเข้าไปใน HSCE เพื่อทำให้วัตถุดิบนั้นเปลี่ยนแปลงเป็นเจลหรือปรับ โครงสร้างภายใน โมเลกุลของวัตถุดิบเสียใหม่ และการอุ่นนั้นได้ช่วยทำให้ตัววัตถุดิบที่ป้อนเข้าไบนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วทำให้สุกหรือเย็นตัวเกือบจะทันทีเมื่อผลิตภัณฑ์ไหลพ้นหน้าแปลนออกมา เวลาที่ใช้ในการหุงต้มนี้ต้องสั้นมาก (Short resident time) ด้วยเหตุผลนี้ (เวลาและอุณหภูมิ) จึงได้ตั้งชื่อเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ว่า HTST (High Temperature and Short Time)

2.1.2.2 แบ่งชนิดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของความร้อน (Thermodynamic Characteristics) ดังนี้

1. Autogenous (Adiabatic) Extruder

ความร้อนทั้งหมดที่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ได้รับ (Input to the extruder) นั้นมาจากการเสียดสี (Friction) คือ เปลี่ยนมาจากพลังงานกลและมีปริมาณเล็กน้อยหรือ ไม่มีเลยของความร้อนที่เพิ่มหรือระบายออกไปจากบาร์เรล Collet Extruders และ High-Shear Cooking Extruders บางชนิดที่จัดเป็นพวก Autogenous Extruder ก็เนื่องมาจากอุณหภูมิภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้จะสูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับหรือควบคุม โดยองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปและการจัดรูปแบบของสกรู ดังนั้นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบ Autogenous นี้จึงไม่ค่อยต้องตัวนักในการที่จะใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อาหารในแต่ละชนิดและยังขาดต่อการควบคุมการทำงานของเครื่องอีกด้วย

2. Isothermal Extruder

เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทที่มีระบบการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เท่ากันเป็นระยะตลอดความยาวของบาร์เรล Forming Extruder ก็จัดอยู่ในประเภทนี้ เพื่อคงสภาพความร้อนให้เท่ากันโดยตลอดนั้น ความร้อนก็จะถูกลดหรือระบายผ่านช่องว่าง (Jacket) ระหว่างผนังสองชั้นของบาร์เรลที่อยู่รอบสกรู

3. Polytropic Extruder

ในความเป็นจริงแล้วเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เกือบจะทุกชนิดเป็นประเภท Polytropic ก็จะได้รับความร้อนทั้ง 2 ทาง คือ ความร้อนที่เกิดจากพลังงานกลและความร้อนที่ได้มาจากแหล่งความร้อนภายนอกที่ส่งผ่านมาจากช่องว่างของบาร์เรล

2.1.2.3 แบ่งชนิดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ตามวิธีการสร้างประกอบเครื่อง (รุ่งนภา,2541)

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สามารถแบ่งตามจำนวนสกรูได้เป็น 2 ประเภทคือ เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) และเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งประกอบด้วยบาร์เรลที่มีสกรูหมุนอยู่ภายในจำนวน 1 หรือ 2 อันตามลำดับ เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ทั้งสองชนิดนี้มีหลักการการทำงานที่คล้ายคลึงกัน โดยที่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวนั้นจะมีส่วนประกอบที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและมีราคาถูก แต่จะมีข้อจำกัดในการใช้งานคือ มักมีปัญหาในการส่งผ่านส่วนผสมที่มีความหนืดต่ำ ในอุตสาหกรรมอาหาร มักนิยมใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ เนื่องจากใช้กับวัตถุดิบได้หลายประเภท วัตถุดิบที่มีความชื้นต่างๆ (ร้อยละ 10-90) และวัตถุดิบที่มีปริมาณไขมันมาก นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพในการผสมและการผลักพาวัตถุดิบเป็นอย่างดี

1. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (Single-screw extruder)

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวใช้สำหรับอัดหรือดันให้โดของอาหารผ่านได เพื่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำโดยไม่มี การพอง หรือใช้สำหรับการทำให้สุกและขึ้นรูปด้วยการใช้ความร้อนอย่างรุนแรงแล้วทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัว ในกรณีแรกที่ใช้เพื่อการขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำโดยไม่มี การพอง สกรูต้องมีเกลียวที่ลึกและต้องมีการหมุนอย่างช้าๆ เพื่อให้พลังงานกลถูกปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการให้น้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น กระบวนการผลิตมัคกะโรนีและหมากฝรั่ง ส่วนในกรณีที่เป็นการใช้เพื่อการขึ้นรูปด้วยการใช้ความร้อนอย่างรุนแรงทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัวนั้น จะมีสกรูสำหรับการอัด โดยลดความลึกของร่องเกลียวและต้องมีการหมุนด้วยความเร็วสูง เพื่อเพิ่มแรงเฉือนและพลังงานกลสำหรับการให้ความร้อน โดยส่วนผสมอาจได้รับความร้อนจากการเติมไอน้ำก่อนที่จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการกระบวนการผลิต เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้สามารถแบ่งตามระดับการเฉือนที่กระทำต่ออาหารได้ ดังนี้

- แรงเฉือนที่สูง เช่น อาหารเข้าฉัญพืช ขนมอบเคียว
- แรงเฉือนปานกลาง เช่น ขนมอบต่างๆ อาหารสัตว์ที่ค่อนข้างชื้น
- แรงเฉือนต่ำ เช่น พาสต้า ผลิตภัณฑ์เนื้อต่างๆ

สกรูจะแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ได้แก่ ส่วนที่ฟีดเข้าสู่เครื่อง ส่วนที่นำจนถึงการอัด และส่วนคูกิ่ง การขนถ่ายของส่วนผสมต่างๆผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวขึ้นอยู่กับความเสียดทานที่ผิวของบาร์เรล วัตถุดิบจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เนื่องจากแรงกระทำของสกรู เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวมีราคาและต้นทุนการเดินเครื่องต่ำกว่า และต้องการความชำนาญในการเดินเครื่องและการดูแลรักษาน้อยกว่าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่

ช่องชันแนลของสกรูต้องมีการใส่หรืออัดวัตถุดิบให้เต็ม เพื่อให้เกิดการนวดและการเฉือน การผสม และการอัดส่วนผสม ความดันที่เพิ่มขึ้นหลังใดทำให้ผลผลิตสุทธิที่ออกมาอย่างต่อเนื่อง (throughput) ลดลง เนื่องจากเกิดการไหลของความดันย้อนกลับขึ้นตามแนวชันแนลของสกรูอย่างต่อเนื่อง

ลักษณะเฉพาะในการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ขึ้นกับความดันที่อยู่หลังได ความถี่บนผนังบาร์เรล (ส่วนใหญ่ควบคุมด้วยอุณหภูมิผนังบาร์เรลและการที่มีรอยหยักหรือช่องเจาะที่ผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บาร์เรล) ความยาวของสกรูที่ถูกอัดเต็มไปด้วยผลิตภัณฑ์ (ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตราการป้อนและความเร็วของสกรู) และลักษณะเฉพาะของโคที่ขึ้นกับชนิดของส่วนผสม ความชื้นและอุณหภูมิ (Happer, 1978) อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยเหล่านี้จะจำกัดช่วงและความยืดหยุ่นของการปฏิบัติงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

2. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder)

ลักษณะการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่แตกต่างจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว และมีแนวโน้มว่าจะเป็นที่นิยมมากขึ้นและกว้างขวางขึ้น เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่มีสองสกรูซึ่งวางห่างๆกัน โดยที่มีเกลียวอินเตอร์เมส (Intermeshing) กันและกัน และหมุนในลักษณะตัวเลข “8” ในบาร์เรล เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่มักแบ่งตามทิศทางการหมุนและลักษณะสกรูที่อินเตอร์เมสกัน สกรูที่อินเตอร์เมสแบบหมุนตามกันพบมากในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร การหมุนจะทำให้วัตถุดิบเคลื่อนที่ผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ และการอินเตอร์เมสช่วยให้การผสมของวัตถุดิบในบาร์เรลดีขึ้น

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่จำแนกได้ตามทิศทางการหมุนของสกรู ส่วนต้นของสกรูออกแบบมาเพื่อขนถ่ายส่วนผสมที่เป็นเม็ดๆ ความสามารถในการขนถ่ายของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ที่เพิ่มขึ้นทำให้ใช้ส่วนผสมที่เหนียวได้ดีกว่าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว สกรูคู่ที่ขนานกันนี้จะถูกันเอง (Self-wiping) เมื่อเกลียวที่ข้อนบนสกรูหนึ่งเช็ดหรือถูด้านล่างของช่องชันแนลของอีกสกรูที่อยู่ติดกัน

จานนวด (Kneading disk) จะช่วยกระจายพลังงานกลระหว่างการขนถ่ายมากขึ้น โดยส่วนผสมของวัตถุดิบต่างๆจะเคลื่อนที่จากงานหนึ่งไปยังอีกงานหนึ่งซึ่งทำให้เกิดการผสมกันขึ้น การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังบาร์เรลและการกระจายพลังงานกลจะมากขึ้นเมื่อส่วนต่างๆเหล่านี้มีส่วนผสมของอาหารบรรจุอยู่เต็ม

2.1.3 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (วรวุฒิ, 2541)

1. Feed Hopper

เป็นส่วนที่รับวัตถุดิบ มีรูปร่างเป็นกรวยแบบง่าๆ บางที่อาจเพิ่มระบบการกวนเข้าไปได้ถ้าวัตถุดิบมีความหนืด ในช่วงนี้จะมีการควบคุมอัตราเร็วในการป้อนวัตถุดิบเพื่อป้องกันการเกิดการติดขัดในเครื่อง

2. บาร์เรล (Barrel)

มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกครอบอยู่ตามความยาวของสกรู สามารถถอดออกเป็นตอนๆได้ ผิวด้านในมีการเซาะร่องเป็นแนวเพื่อลดการสิ้นเปลืองของวัตถุดิบ ขณะเคลื่อนที่อยู่ภายในและยังเพิ่มแรงดันและแรงเสียดทานด้วย

3. Jacket

อยู่ล้อมรอบบาร์เรลมีหน้าที่ให้น้ำเย็นหรือน้ำร้อนไหลอยู่ภายในเพื่อควบคุมอุณหภูมิขณะใช้เครื่อง ซึ่งแบ่งออกเป็นช่วงๆ บางช่วงอาจใช้น้ำเย็นบางช่วงอาจใช้น้ำร้อนเพื่อทำให้ความร้อน

4. สกรู (Screw)

สกรูมีลักษณะเป็นแกนมีเกลียวอยู่โดยรอบ โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูอาจเท่าเดิมหรือค่อยๆเพิ่มขึ้นก็ได้ เช่นเดียวกับกับเกลียวบนสกรูอาจมีความถี่คงที่หรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และหน้าที่ในการทำงาน นอกจากนี้สกรูยังอาจมีทิศทางที่แตกต่างกันหรือเหมือนกันก็ได้ หน้าที่ในการทำงานของสกรูคือ รับและขนถ่ายวัตถุดิบ กดดันและเพิ่มแรงเฉือนให้แก่วัตถุดิบทำให้เกิดการผสมอย่างสม่ำเสมอ

5. หน้าแปลน (Die)

ส่วนนี้อยู่ปลายสุดของเครื่อง มีหลายรูปร่างลักษณะอันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆกันออกไป เมื่อเอ็กซ์ทรูเดตผ่านออกมาจากช่องนี้จะเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการระเหินน้ำอย่างรวดเร็วทันทีที่ออกมาจากหน้าแปลน

6. ใบบีม (Knife)

เป็นส่วนที่กำหนดความยาวของเอ็กซ์ทรูเดตที่ออกมาจากหน้าแปลน ซึ่งมีให้เลือกหลายใบบีมอาจจะเป็นแบบ 2 ใบบีมหรือ 3 ใบบีมหรือเท่าใดก็ตามแล้วแต่ความต้องการทางด้านคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้าย

2.1.4 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (รุ่งนภา, 2541)

ส่วนผสมที่เป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในเครื่องคูกกิ้งเอ็กซ์ทรูเดอร์ประกอบด้วยธัญพืชที่ผ่านการบด สตาร์ชและโปรตีนที่ได้จากพืช นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมอื่นๆที่เป็นวัตถุดิบรอง ได้แก่ ไขมัน น้ำตาล เกลือ กรดหรือด่าง สารอิมัลซิไฟเออร์ สี กลิ่นและรส ส่วนน้ำจะถูกเติมเข้าไปเพื่อปรับให้ส่วนผสมมีความชื้นอยู่ในระดับ 10-40%

พลังงานต่างๆที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ตันทำให้อุณหภูมิของฟีดที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่เคลื่อนผ่านไปในเรื่องการเพิ่มพลังงานทางกลโดยการหมุนสกรูเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดและคิดเป็น 50-100% ของพลังงานทั้งหมดที่มี นอกจากนั้นพลังงานที่ป้อนเข้าเครื่องอาจได้จากความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังบาร์เรลที่ร้อนหรือเย็นหรือพลังงานที่เกิดจากการส่งไอน้ำเข้าไปและผสมโดยตรงกับอาหารภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เป็นส่วนที่สำคัญน้อยกว่า

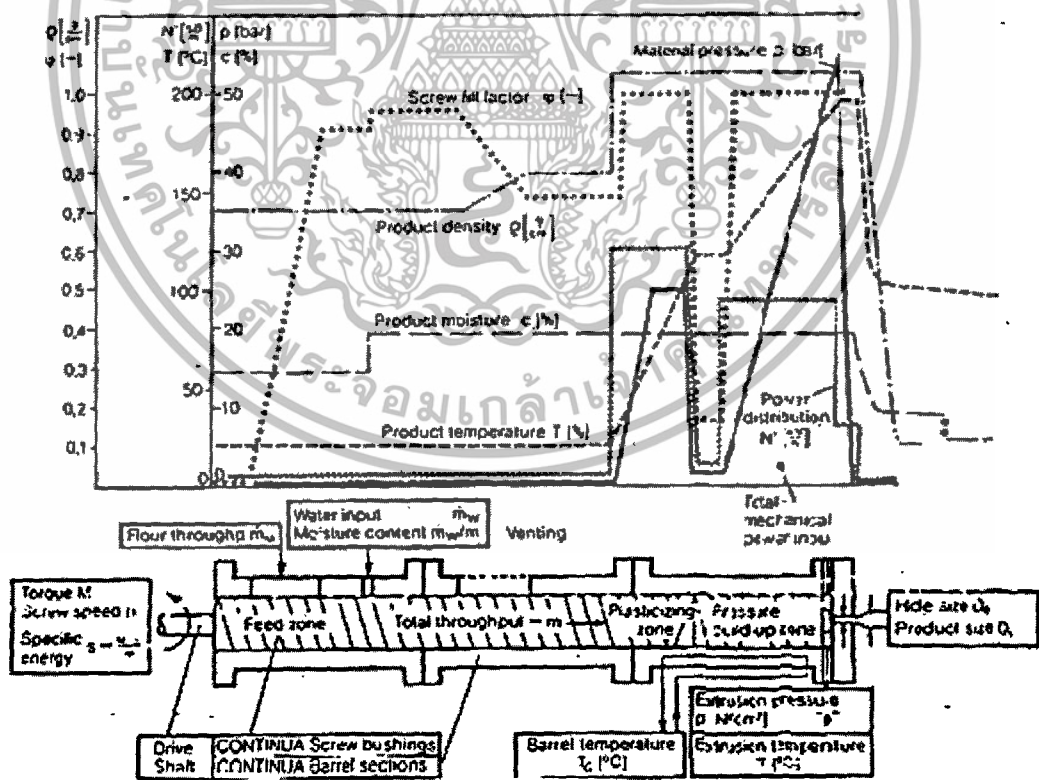
ในกระบวนการคูกกิ้งเอ็กซ์ทรูชัน อุณหภูมิของส่วนผสมอาหารหลังจากที่ถูกอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปเป็น 150-200°C อุณหภูมิที่สูงที่สุดนี้จะคงอยู่น้อยกว่า 20 วินาที ไม่เช่นนั้นจะทำให้เกิดการไหม้และกลิ่นรสแปลกปลอม ความดันภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่สูงทำให้เกิดสภาวะ

แวดล้อมที่คล้ายกับหม้อต้มความดัน (Pressure cooker) ซึ่งจะป้องกันการพุ่งกระจายของไอน้ำ จนกว่าความดันจะถูกปล่อยออกมาเมื่อผลิตภัณฑ์ออกจากหน้าแปลน

เมื่อได้ออกจากหน้าแปลนความดันจะถูกปลดปล่อยออกมา ทำให้เกิดการพองตัว (Puffing) อย่างทันทีที่อุณหภูมิสูง การพองตัวนี้ส่วนใหญ่เกิดจากไอน้ำที่ออกจากน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ถูกทำให้ร้อนขึ้น การสูญเสียความชื้นและความร้อนในผลิตภัณฑ์ร่วมกับการพองตัวทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็วจนมีอุณหภูมิประมาณ 60°C

เอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ขยายตัวจะมีโครงสร้างของเซลล์เปิด ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ที่แต่ละเซลล์ถูกล้อมรอบด้วยเมมเบรนของแป้งหรือ โปรีติน ขนาดของเซลล์เหล่านี้จะควบคุมลักษณะเฉพาะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ คือ ลักษณะเนื้อสัมผัสและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ เอ็กซ์ทรูเดอร์เหล่านี้มักจะถูกตัดที่ผิวหน้าของหน้าแปลนด้วยใบมีดที่หมุน แล้วอบแห้งต่อในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนให้มีความชื้น 2-12% ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการอาจเคลือบด้วยสี กลิ่น รส น้ำมัน และน้ำตาล เป็นต้น

การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปส่วนใหญ่ขึ้นกับปริมาณความชื้นของส่วนผสมที่ป้อนเข้าไปสู่กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน อุณหภูมิที่ออกจากเครื่อง ระดับ หรือปริมาณของความเสียหายของส่วนผสมที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไหลและลักษณะรูปร่างของหน้าแปลน



รูปที่ 2.1 พารามิเตอร์ต่างๆของการเดินเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่พอง

(จาก : รุ่งนภา, 2541; ทีมา : Fellows, 1988)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

2.1.5 ข้อดีของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

เอ็กซ์ทรูชันเป็นกระบวนการผลิตอาหารสมัยใหม่ ช่วยให้การขยายงานด้านอุตสาหกรรม การผลิตอาหารกว้างขวางยิ่งขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะ โดยตัวของระบบหรือเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นั้นมี คุณสมบัติพิเศษหลายประการ ดังนี้

1. เอนกประสงค์ (Versatility) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลากหลาย เพียงแต่เลือกใช้วัตถุดิบ ที่เป็นส่วนประกอบและปรับสภาวะของกระบวนการผลิตให้เหมาะสม
2. อัตราการผลิตสูง (High productivity) เป็นเครื่องจักรแบบต่อเนื่อง และมีอัตราการผลิต ได้มากกว่าระบบอื่นๆ
3. ต้นทุนการผลิตต่ำ (Low cost) จำนวนคนงานและพื้นที่ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแบบ เอ็กซ์ทรูชันต่อหนึ่งหน่วยการผลิตนั้นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตวิธีอื่น
4. รูปร่างของผลิตภัณฑ์ (Products shape) ทำได้มากมายหลายแบบ ทำได้ง่ายเพียงเปลี่ยน แบบรูปทรงของรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลน
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)

2.2 ถูกเดือย

2.2.1 ความรู้ทั่วไป

ชื่อสามัญ	Job's tears, Adley, Millet
ชื่อวิทยาศาสตร์	<i>Coix lachyma-jobi</i> Linn
วงศ์	Gramineae, Poaceae
ชื่ออื่น	ประชาชนในภาคเหนือของไทยเรียกว่า เดือย เดือยหิน มะเดย พายัพเรียกว่า มะเดือย ชาวกะเหรี่ยง-ก่าแพงเพชรเรียกว่า เป๊น ชาวเขมรเรียกว่า สกยู
ถิ่นที่อยู่	เป็นพืชในเขตร้อนทั่วไป เช่น ประเทศไทย อินเดีย จีน แอฟริกา อเมริกา
ส่วนที่ใช้	รากและเมล็ด

(ข้อมูลจาก www.thaiherbclub.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ประเภทของลูกเคี้ยว

เคี้ยวอาจแบ่งตามการใช้ประโยชน์ได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน คือ

1. เคี้ยวหิน ใช้เป็นเครื่องประดับคล้ายลูกปัด เช่น ทำสายสร้อย ตกแต่งเสื้อผ้า ซึ่งเป็นที่นิยมปลูกกันในหมู่ชาวเขทางภาคเหนือ เคี้ยวประเภทนี้มีเปลือกหุ้มเมล็ดเป็นเงา หนา แข็ง และเหนียวมากและมีหลายสี เช่น สีขาวหรือสีเทาอ่อนหรือมีหลายสีอ่อนแก่บนเมล็ดเดียวกัน น้ำหนักทั้งเปลือก 100 เมล็ดอยู่ระหว่าง 10.5-32.8 กรัม ส่วนมากถ้าต้นจะดีกว่าเคี้ยวประเภทอื่น

2. เคี้ยวขบ มักจะปลูกกันตามบ้านในปริมาณน้อย สำหรับเป็นของขบเคี้ยวในครอบครัวหรือจำหน่ายในตลาดท้องถิ่น โคนจะตัดทั้งซ้อแล้วนำมาต้ม มักพบในชนบททั่วไป เมล็ดจะมีขนาดโตค่อนข้างกลม เปลือกค่อนข้างหนาและแข็งปานกลาง ในการบริโภคนั้นต้องใช้ฟันขบจึงเรียกว่า “เคี้ยวขบ” เปลือกมีหลายสีปนกันบนเมล็ดเดียว น้ำหนักทั้งเปลือก 100 เมล็ดอยู่ระหว่าง 18.6 กรัม เคี้ยวขบมีลำต้นสูงประมาณ 2 เมตร

3. เคี้ยวการค้า เป็นเคี้ยวที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและมีการปลูกมากที่สุด เมล็ดที่กะเทาะเอาเปลือกออกแล้วจะใช้บริโภคได้หลายรูปแบบ เคี้ยวการค้าจะมีทั้งเคี้ยวข้าวเจ้าและเคี้ยวข้าวเหนียว เนื่องจากมีทั้งประเภทที่เปลือกหนาอ่อนข้างแข็งและประเภทเปลือกบางเปราะ ถ้าเป็นชนิดแรกผิวเปลือกมักจะเป็นมันเงามีสีขาวปนเทา ส่วนชนิดหลังผิวเปลือกจะด้านและมักมีสีเดียวกันล้วนๆ เช่น มีสีน้ำตาลอมเทา เมล็ดจะยาวรี น้ำหนัก 100 เมล็ดทั้งเปลือกอยู่ระหว่าง 10.8-19.0 กรัม เคี้ยวการค้าจะมีลำต้นสูงพอกับเคี้ยวขบ

2.2.3 การแปรรูป

การแปรรูปลูกเคี้ยวนั้นสามารถที่จะแปรรูปเป็นอาหารได้หลายชนิด เช่น ทำขนม ทำน้ำลูกเคี้ยว ทำแป้งลูกเคี้ยว เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการแปรรูปแป้งเคี้ยวเพียงอย่างเดียวและเมื่อพิจารณาคุณภาพของแป้ง จะแบ่งเคี้ยวได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. เคี้ยวข้าวเจ้า เมื่อนำเคี้ยวประเภทนี้ไปต้มแป้งและน้ำต้มเคี้ยวจะไม่เหนียวลื่นหรือเป็นเมือก เมล็ดทั้งเปลือกของเคี้ยวข้าวเจ้าจะค่อนข้างยาวและมีขนาดเล็ก เปลือกจะมีสีน้ำตาลแก่ค่อนข้างหนาและแข็ง เนื้อแป้งของเมล็ดจะค่อนข้างแข็ง

2. เคี้ยวข้าวเหนียว เนื้อแป้งเมื่อหุงต้มจะนุ่มเป็นเมือกลื่นๆคล้ายกับข้าวเหนียวหรือมีแป้งข้าวเหนียว (อะไมโลเพ็คตินเป็นส่วนใหญ่) มีแป้งอะไมโลสเพียง 2-3% ผู้บริโภคจะนิยมเคี้ยวข้าวเหนียวมากกว่าเคี้ยวข้าวเจ้า เมล็ดทั้งเปลือกมีลักษณะกลมสั้นและโตกว่าเคี้ยวข้าวเจ้า เปลือกของเมล็ดมีสีเทาอ่อน บางและกรอบ บิบแตกง่าย เนื้อแป้งของเมล็ดจะค่อนข้างอ่อนทำให้เมื่อนำมาสีหรือกะเทาะจะได้น้ำหนักน้อยเพราะแตกหักง่าย

2.2.4 คุณค่าทางโภชนาการ

ลูกเดือยมีกรดอะมิโนทุกชนิดที่สูงกว่าความต้องการทางมาตรฐานขององค์การอนามัยโลก ยกเว้น เมทไธโอนีนและไลซีน เช่น มีปริมาณกรดกลูตามิกในปริมาณมากตามด้วยลิซีน อนุลีน โพรลีน วาลีน ฟินนิลอลานีน ไอโซลิวซีนและอาร์จินีนลดหลั่นลงมา นอกจากนี้ลูกเดือยยังมีกรดไขมันจำเป็นชนิดที่ไม่อิ่มตัว เช่น กรดโอเลอิกและกรดลิโนโลอิกรวมแล้วประมาณ 84% และเป็นกรดไขมันชนิดอิ่มตัว คือ ปาล์มิติกและสเตียริกเพียง 16% เท่านั้น ดังนั้นลูกเดือยจึงเป็นอาหารที่ดีที่ให้ทั้งพลังงาน กรดอะมิโนและไขมันที่จำเป็นต่อร่างกาย

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
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

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

2.3 คุณภาพในการแปรรูป

2.3.1 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของแป้ง

แป้ง (Starch) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวต่อกันของน้ำตาลกลูโคส โดยการสูญเสียน้ำ 1 โมเลกุลเป็นเอกลิสาร์ที่สวางไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลต่อ 1 พันธะกลูโคซิดิก (Glucocidic bond) ที่เกิดระหว่างน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุล แป้งจะอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (Starch granule) มีขนาด 1-2 ไมครอนจนถึง 200 ไมครอน มีลักษณะแตกต่างกันทั้งแบบ ทรงกลม ทรงไข่ หลายเหลี่ยม ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยโพลีเมอร์ 2 ชนิด คือ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin)

อะไมโลสมีลักษณะเป็นสายตรงของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะอัลฟา-1,4 กลูโคซิดิกเพียงอย่างเดียว ประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200-2,000 หน่วย สามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ดี เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งจนพองตัวเต็มที่ โมเลกุลของอะไมโลสจะละลายออกจากเม็ดแป้ง ทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดต่ำลงเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการจับเรียงตัวเป็นโครงร่าง 3 มิติ โดยโมเลกุลของอะไมโลสจะเข้ามาจับเรียงตัวใกล้ๆกันได้ดีลักษณะ โครงสร้างใหม่ที่สามารอุ้มน้ำได้ ในกรณีที่สารละลายแป้งมีความเข้มข้นมากจะมีลักษณะเป็นเจลและจะตกตะกอนในกรณีที่สารละลายมีความเข้มข้นของแป้งน้อย อะไมโลสมีน้ำหนักของโมเลกุลในช่วง 10^5 - 10^6 ซึ่งอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักของโมเลกุลแตกต่างกันไป นอกจากนี้แล้วอะไมโลสยังสามารถรวมตัวกันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนให้สีน้ำเงินซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะไมโลส

อะไมโลเพคตินมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ส่วนที่เป็นเส้นตรงประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส 25-30 หน่วย เรียงต่อกันด้วยพันธะอัลฟา-1,6 กลูโคซิดิก อะไมโลเพคตินโมเลกุลหนึ่งๆจะประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200,000 หน่วยขึ้นไป เนื่องจากอะไมโลเพคตินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามาก เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูงแป้งเปียกที่ได้จะไม่ใสและใส มีความหนืดสูง เมื่ออุณหภูมิลดลง โมเลกุลเกิดการรวมตัวกันยาก คั้นตัวน้อย อะไมโลเพคตินจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^7 - 10^8

อะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบในเม็ดแป้ง ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนที่ไม่เป็นผลึกหรือที่เรียกว่าอสัณฐาน (amorphous) โดยส่วนที่เป็นผลึกโมเลกุลจะจัดเรียงตัวกันเป็นกลุ่มๆอย่างหนาแน่นเป็นระเบียบ มีอะไมโลสประกอบอยู่มาก โดยประกอบตามความยาวกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะไมโลเพคตินด้วยด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างภายในโมเลกุลเดียวกันและต่างโมเลกุลขึ้นมาหลาย ทำให้โมเลกุลหนาแน่นและมีแรงยึดเหนี่ยวสูง การดูดน้ำและการพองตัวเกิดขึ้นอย่างจำกัด เนื้อค่อนข้างแข็ง และไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับสารอื่น ส่วนที่ไม่เป็นผลึกโมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบประกอบด้วย อะไมโลเพคตินเป็นส่วนใหญ่ จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้น้อย และดูดน้ำได้ดี ไวต่อปฏิกิริยา ทั้งส่วนที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึกจะเรียงตัวสลับกันทำให้เกิดการหักเห 2 แนวเป็นเงากากบาทเมื่อส่องผ่านแสงโพลาไรส์ (Polarized Light) เรียกว่า ไบรีฟรินเจนท์ (Birefringence) แป้งจากแหล่งที่ต่างกันมีผลต่อการรวมตัวของเม็ดแป้ง ความหนืด ความใส และการรวมตัวกันของแป้งสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลายของแป้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง การตัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิด (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543)

แป้งจากธัญพืชมีรูปแบบการพองตัวและการละลาย 2 ชั้น แสดงถึงแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณเปลือกและบริเวณอณูพื้นฐานของเม็ดแป้ง แป้งจำพวกนี้มีจำนวนพันธะสูงสุดแต่มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำสุด เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูงซึ่งอะไมโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น การพองตัวต่ำ

จำนวนและชนิดพันธะภายในเม็ดแป้งมีผลต่อหลายปัจจัย ได้แก่ ขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบ และการกระจายตัวของร่างแหภายในเม็ดแป้ง อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโมเลกุล จำนวนกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัว และความยาวสาขาในอะไมโลเพคติน

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้งแต่ละชนิดที่ 95°C

แป้ง	กำลังการพองตัว	การละลาย (%)
มันฝรั่ง	>1000	82
สาเก	97	39
มันสำปะหลัง	71	48
Canna	72	37
ท้าวายม่อม	54	28
มันเทศ	46	18
ข้าวโพด	24	25
ข้าวฟ่าง	22	22
ข้าวสาลี	21	41
ข้าวเจ้า	19	18
ข้าวโพดข้าวเหนียว	64	23
ข้าวเจ้าข้าวเหนียว	56	13
ข้าวฟ่างข้าวเหนียว	49	19
Whinkles pea	6	19
High-amylose corn	6	12
Chick pea (Garbanzo)	13	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ความหนืด

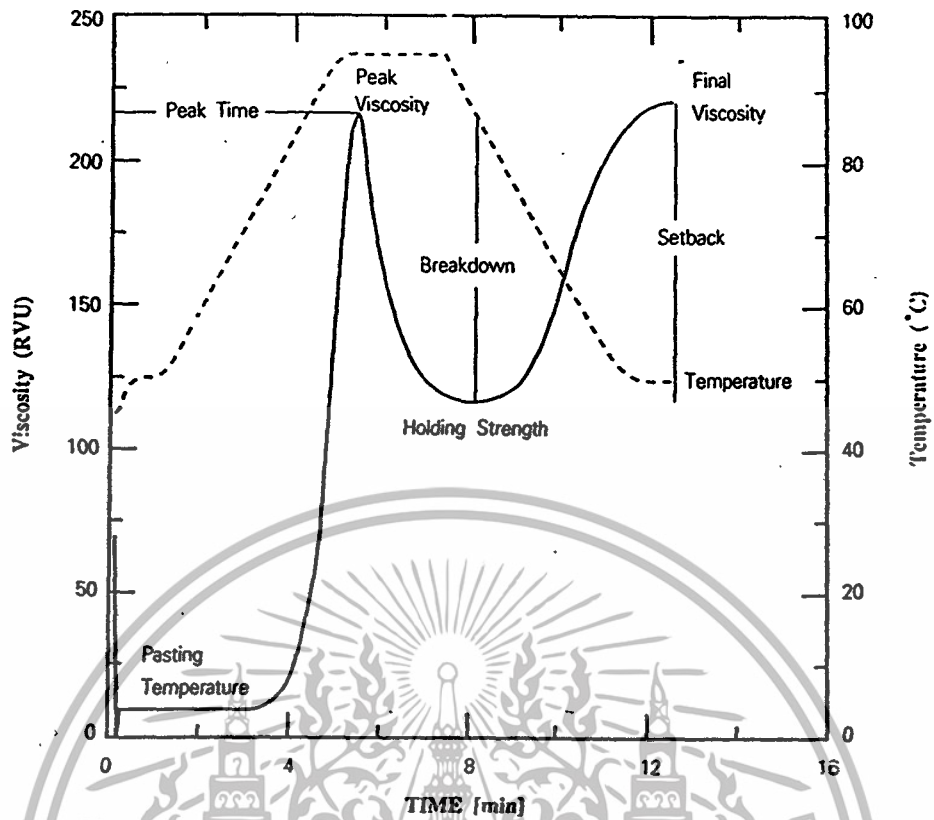
ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้งและการตัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ เมื่อให้ความร้อนแก่แป้ง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืด อุณหภูมิที่กราฟเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (Pasting Temperature) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) ซึ่งเป็นจุดที่เม็ดแป้งเกิดการพองตัวอย่างเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปโดยมีการกวนอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างภายในแตกออก ความหนืดลดลง เกิดการรีโทรกราเดชัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะไมโลสที่หลุดออกจากแป้ง

Rapid Viscosity Analyzer (RVA) เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องพิจารณาความหนืดขณะให้ความร้อน คุณสมบัติพิเศษคือ มีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ สามารถทำให้ร้อนหรือเย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ หา pasting curve ได้ใน 12-13 นาที เนื่องจากมีกลไกส่งผ่านความร้อนที่ดีกว่าและใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า ค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง RVA แสดงผลในหน่วย % หรือ RVU ดังนี้

1. Peak Time คือ เวลาที่เกิดจุดสูงสุด (Peak) ของความหนืด มีหน่วยเป็น RVU
2. Pasting Temperature คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็น °C ซึ่งบอกถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมแป้งที่เริ่มมีความหนืด
3. Peak Temperature คือ อุณหภูมิที่เกิดจุดสูงสุด (Peak) มีหน่วยเป็น °C
4. Peak Viscosity คือ ความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
5. Holding Strength คือ ความหนืดสูงสุดระหว่างการทำเย็น มีหน่วยเป็น RVU
6. Breakdown คือ ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU
7. Final Viscosity คือ ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU
8. Setback from peak คือ ผลต่างของความหนืดที่จุดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
9. Setback from trough คือ ผลต่างของความหนืดที่จุดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU

83037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA
(จาก : กล้านรงค์ 2543 ; ที่มา : Newport Scientific Pty, Ltd., 1995)

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

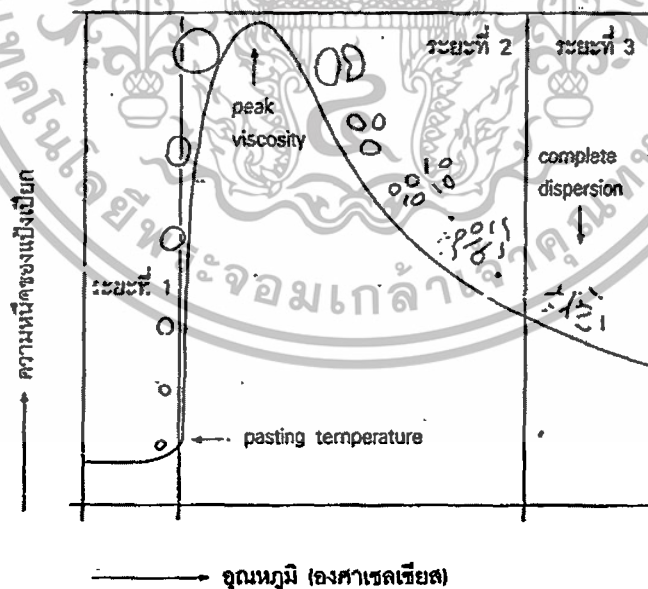
แป้ง	Gel Temp.(°C)	Peak visco.	Breakdown	setback	Paste type	Paste clarity
ข้าวสาลี	52-56	ต่ำ	ต่ำ/ปานกลาง	ปานกลาง/สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวโพด	62-72	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวเหนียว	63-72	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง
ข้าวฟ่าง	68-78	ปานกลาง	ปานกลาง	สูง	สั้น	ทึบแสง
ข้าวเจ้า	61-78	ปานกลาง	ต่ำ/สูง	ปานกลาง/สูง	สั้น	ทึบแสง
มันสำปะหลัง	50-68	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	โปร่งแสง
มันฝรั่ง	56-69	สูง	สูง	ปานกลาง	ยาว	โปร่งแสง
สาธู	60-72	สูง	สูง	ต่ำ	ยาว	ทึบแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

การเกิดเจลาตินในเซชันเกิดจากการให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนคลายตัวลงเนื่องจากน้ำอิสระรอบๆ โมเลกุลแป้งมีน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืด อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาตินในซ์

การเกิดเจลาตินในซ์ของเม็ดแป้งแบ่งได้เป็น 3 ระยะ โดยระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่าง micells ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบ birefringence ได้ เมื่อมีการใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65°C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้าง birefringence ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าห้วงแยกส่วนในและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนถึงระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.3 ระยะในการเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้ง

(จาก : กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543 ; ที่มา : Sanders, 1996)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ลักษณะการเกิดเจลของแป้งแต่ละชนิด

แป้ง	Kofler gelatinization temp. range (°C)	Brabender pasting temp. (8%;°C)	Babender peak viscosity (8%;BU)	Swelling power (ที่ 95°C)	Critical conc. (ที่ 95°C)
แป้งข้าวโพด	62-67-72	75-80	70	24	4.4
แป้งมันฝรั่ง	58-63-68	60-65	3000	1153	0.1
แป้งสาลี	58-61-64	80-85	200	21	5.0
แป้งมันสำปะหลัง	59-64-69	65-70	1200	71	1.4
แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว	63-68-72	65-70	1100	64	1.6
แป้งข้าวฟ่าง	68-74-78	75-80	700	22	4.8
แป้งข้าวเจ้า	68-74-78	70-75	500	19	5.6
แป้งสาสุ	60-66-72	65-70	1100	97	1.0
แป้งท้าวยายม่อม	62-66-70	-	-	54	1.9
แป้ง amylo maize	67-80-92	90-95	-	6	20.2
แป้งมันเทศ	58-65-72	65-70	-	46	2.2

2.3.5 การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation)

รีโทรกราเดชันเกิดจากการที่แป้งได้รับความร้อนจนถึงเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วแตกออก โมเลกุลอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจาย ให้ความความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวขึ้นมาใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นร่างแห 3 มิติ โครงสร้างใหม่ที่อุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีกอ้อมีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดเจลเหวศคล้ายฟิล์มหรือผืน เป็นการคืนตัวของแป้ง เมื่อการคืนตัวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็ว เจลจะขุ่น โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีอะไมโลสต่ำ

2.4 อาหารขบเคี้ยว

อาหารขบเคี้ยว หมายถึง อาหารที่ใช้รับประทานเล่นระหว่างมื้ออาหารหลัก ลักษณะเด่นของอาหารขบเคี้ยวในปัจจุบัน คือ น้ำหนักน้อย เก็บรักษาง่าย นำติดตัวไปในที่ต่างๆ ได้สะดวก อาหารขบเคี้ยวจัดได้ว่าเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง เนื่องจากมีส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรตเป็นจำนวนมากจึงช่วยให้อิ่มท้องได้ (Gordon, 1990) ผลิตภัณฑ์อาจมีลักษณะร้อนหรือเย็น ในรูปของแข็งหรือของเหลว ซึ่งอาศัยการเตรียมเพียงเล็กน้อยอาหารขบเคี้ยวอาจเป็นของหวานหรือเป็นของคาว และอาจใช้เป็นอาหารที่มีคุณลักษณะเฉพาะ เช่น อาหารเพื่อสุขภาพหรืออาหารว่างในงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังสรรค์ หรืออาหารที่ผ่านการแปรรูปพร้อมบริโภคทันที หรือต้องการการเตรียมเพียงเล็กน้อย เช่น การเติมน้ำเคือด เป็นต้น สามารถใช้เป็นอาหารที่บริโภคได้ระหว่างมือ

อาหารขบเคี้ยวนับว่ามีบทบาทในวิถีการดำเนินชีวิตของผู้บริโภครุ่นใหม่เป็นอย่างยิ่ง ดังจะสังเกตเห็นได้ว่า มีการจัดจำหน่ายอาหารขบเคี้ยวในร้านค้าทั่วไปเป็นจำนวนมาก และมีผลิตภัณฑ์ต่างๆ เข้าสู่ท้องตลาดตลอดเวลา การพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารขบเคี้ยวในระดับสากลกล่าวกันว่าได้เริ่มอย่างจริงจังเมื่อหลังสงครามครั้งที่ 2 มีการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต พัฒนาส่วนผสมที่ใช้ปรุงรสและรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ทำให้อาหารขบเคี้ยวน่ารับประทาน และสะดวกมากยิ่งขึ้น มีการพัฒนาการผลิตแบบต่อเนื่อง (batch process) เพื่อช่วยให้การผลิตเป็นไปอย่างรวดเร็วและสามารถผลิตอาหารได้เป็นจำนวนมาก การพัฒนาการบรรจุหีบห่อที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์เก็บรักษาได้นานขึ้นและมีคุณภาพดี (เพ็ญขวัญและทัศนีย์, 2541)

2.4.1 ชนิดของอาหารขบเคี้ยว

อาหารขบเคี้ยวเป็นกลุ่มของผลิตภัณฑ์ที่มีได้หลายชนิด และเป็นกลุ่มที่อยู่ระหว่างการพัฒนาจึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมาตลอดเวลา การให้ความหมายหรือแม้แต่การจัดแบ่งประเภทจึงยังไม่มีมีการกำหนดที่ชัดเจน การจัดแบ่งประเภทของอาหารขบเคี้ยวมีหลายลักษณะ ดังนี้

2.4.1.1 การแบ่งอาหารขบเคี้ยวตามระยะเวลาและชนิดของผลิตภัณฑ์ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท (Harper, 1981) คือ

1. อาหารขบเคี้ยวยุคที่หนึ่ง (First Generation Snacks)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตแบบดั้งเดิม โดยใช้กรรมวิธีการผลิตแบบง่ายๆ เช่น การทอดหรือการอบ ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ เช่น มันฝรั่งทอด แครกเกอร์ชนิดต่างๆ เป็นต้น

2. อาหารขบเคี้ยวยุคที่สอง (Second Generation Snacks)

เป็นอาหารขบเคี้ยวประเภทสุกพองทันที (Direct-expanded Product) ส่วนใหญ่ทำจากวัตถุดิบประเภทธัญชาติ เช่น คอลเลตเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Collet Extruder) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 15) นำมาอบเพื่อลดความชื้นลงให้มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 4 เคลือบด้วยน้ำมันและกลีเซอรอลต่างๆ (กมลวรรณ, 2541) กล่าวว่าการพองของผลิตภัณฑ์เกิดจากการทำให้ส่วนผสมของโด (Dough) ร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่า 100°C และความดันภายในเครื่องสูงกว่าความดันบรรยากาศ เมื่อโดเคลื่อนที่ออกจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ โดยผ่านช่องเปิดของหน้าแปลนจะเกิดการระเหยของน้ำเป็นไอน้ำในขณะที่ความลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการพองตัวของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะพองกรอบ ความหนาแน่นต่ำ มีรูปร่างต่างๆตามแบบพิมพ์หรือช่องเปิดหน้าแปลนของเครื่องทำการผลิต มีการผลิตกลีเซอรอลต่างๆบนผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น ข้าวโพดพองกรอบ (Corn curls) คาราฉ่ำ ขนมอบกรอบรูปร่างเลียนแบบหัวหอม (Onion rings) และชีโคส เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อาหารขบเคี้ยวยุคที่สาม (Third Generation Snacks)

เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีหลายรูปแบบและมีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แรงเฉือนสูง เริ่มจากการผสมธัญชาติและ/หรือสตาร์ชที่คัดแปรหรือไม่ก็ได้ นำมันพืชและอิมัลซิไฟเออร์ (กมลวรรณ, 2541) กล่าวว่า อาหารขบเคี้ยวประเภทสุกแต่ไม่พองทันที (Indirect-expanded product) บางครั้งเรียกว่า เป็นอาหารขบเคี้ยวกึ่งสำเร็จรูปโดยมีชื่อเรียกดังนี้ half product, semi-product หรือ intermediate product อาหารขบเคี้ยวชนิดนี้เมื่อผลิตออกมาครั้งแรกจะมีความชื้นอยู่ค่อนข้างสูง หลังจากนั้นไปอบไล่ความชื้นจนมีความชื้นในผลิตภัณฑ์ประมาณร้อยละ 8-12 จะอยู่ในรูปของกึ่งสำเร็จรูป มีรูปร่างต่างๆตามแบบพิมพ์หรือช่องเปิดของหน้าแปลนของเครื่องที่ทำการผลิต มีลักษณะเนื้อแข็งแน่น โปร่งแสง เป็นมันวาวที่เรียกว่า เพลเลต (Pellet) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทอดหรือการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่พองกรอบและทำการเคลือบกลิ่นรสต่างๆบนผลิตภัณฑ์ ข้อดีของเพลเลต คือ เก็บได้นาน ไม่เสีย ถ้าเก็บภายใต้สภาพที่แห้งจะมีอายุการเก็บประมาณ 1 ปี สะดวกในการขนถ่าย สามารถขนส่งไปยังที่ไกลๆได้ ไม่ต้องกังวลเรื่องผลิตภัณฑ์แตกหัก

2.4.1.2 การแบ่งประเภทอาหารขบเคี้ยวตามกรรมวิธีการผลิต สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท (Matz, 1984) คือ

1. Deep fat fried product

เป็นการทอดในน้ำมัน จะใช้เวลานานในการทอด ลักษณะของผลิตภัณฑ์มีทั้งแบบแผ่นแท่ง วงแหวน และรูปแบบอื่นๆ

2. Quick fried product

ใช้เวลาในการทอดรวดเร็ว ใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 200°C ในระยะเวลาสั้น 10-15 นาที ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเป็นแผ่น

3. Extrusion cooked product

ใช้ธัญชาติทั้งเมล็ดหรือใช้แป้งผสมน้ำแล้วนำเข้าเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นวดจนเกิดโด (Dough) ทำให้สุกภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง ทำให้แห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูปร่างเป็นแผ่นบางสามารถปรับขนาดตามความต้องการได้

4. Roasted product

เป็นการอบ นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทถั่ว

2.4.1.3 การแบ่งประเภทอาหารขบเคี้ยวตามอุณหภูมิของอาหารขณะเสิร์ฟ เช่น เป็นประเภทร้อน (Hot snack) ได้แก่ พืชขนาดเล็ก ปอเปี๊ยะทอด ครัวซองสอดไส้ หรือที่เป็นประเภทเย็น ได้แก่ ลูกก๊าก ผลไม้อัดเป็นแท่ง และช็อคโกแลต เป็นต้น (เพ็ญขวัญและทัศนีย์, 2541)

2.4.2 การตลาดของขนมขบเคี้ยว

เป็นตลาดที่มีแนวโน้มการขยายตัวค่อนข้างสูง เนื่องจากมีรูปแบบและรสชาติที่แปลกใหม่ อยู่เสมอ รวมทั้งการมีกิจกรรมทางการตลาดอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวในตลาดอยู่ตลอดเวลา (Moria, 2001) ตลาดของขนมขบเคี้ยวในปี 2544 (มกราคม-ตุลาคม) มีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 17 แบ่งเป็นตลาดขนมขบเคี้ยวชิ้นรูป (Extrudate snacks) ร้อยละ 38.5 เดิบโตร้อยละ 29.74, มันฝรั่งร้อยละ 28.5 เดิบโตร้อยละ 7.9, ขนมขบเคี้ยวจากปลาร้อยละ 10.4 เดิบโตร้อยละ 8.01, ปลาหมึกร้อยละ 8.9 เดิบโตร้อยละ 7.34, ถั่วร้อยละ 8.8 โตเพิ่มขึ้นจากปีที่ผ่านมาร้อยละ 20.66, ปลาเส้นร้อยละ 3.6 เดิบโตร้อยละ 33.16 และข้าวโพดร้อยละ 1.3 เดิบโตร้อยละ 7.04 (ฐานเศรษฐกิจ 2545)

ในปัจจุบันผู้ผลิตได้หันมาสนใจในตัวสินค้า โดยเฉพาะรสชาติ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การผลิตสินค้าใหม่จะต้องมีความแตกต่างจากสินค้าอื่นในตลาด มีจุดขายที่ชัดเจน มีคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากผู้บริโภคมีแนวโน้มที่จะใส่ใจในสุขภาพของตนเอง ดังนั้น ถ้าอาหารขบเคี้ยวใดมีคุณค่าทางอาหาร หรือมีภาพพจน์ของผลิตภัณฑ์ที่ดีก็จะสามารถทำตลาดได้ดีและเร็วในตลาดสินค้าอาหารขบเคี้ยว (นฤตันส์, 2541)

2.5 การหาสถานะที่เหมาะสมโดยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology, RSM)

เป็นวิธีที่ใช้ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Data) ที่ได้จากการทดลองมาหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง (Factor หรือ Independence variables) กับค่าที่ได้จากการทดลอง (Response หรือ Dependence variables)

2.5.1 วัตถุประสงค์ของการทำ RSM มี 2 ประการ คือ

1. การสร้างฟังก์ชันพื้นผิวตอบสนอง (Response surface function) ที่แสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนอง เมื่อระดับของปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง
2. การหาระดับของปัจจัยเชิงปริมาณที่เหมาะสม (Optimum value) ที่ได้จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด (Khuri and Cornell, 1987)

2.5.2 วิธีการใช้ RSM

1. กำหนดปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการทดลอง 2-3 ปัจจัย
2. กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กำหนดแผนการทดลองที่ใช้ (Experimental Design) และการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

4. รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้และตีความผลที่ได้

2.5.3 แผนการทดลองเพื่อศึกษา RSM

ถ้า X_1, X_2, \dots, X_k เป็นปัจจัยเชิงปริมาณแบบหุ่นของ RSM ที่พบว่าสอดคล้อง (fit) กับข้อมูลในธรรมชาติ โดยทั่วไปมี 2 ลักษณะ ดังนี้

1. แบบหุ่นลำดับที่หนึ่ง (First ordered model) เป็นแบบหุ่นที่ประกอบขึ้นด้วยดีกรีที่ 1 ของปัจจัย

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

2. แบบหุ่นลำดับที่สอง (Second ordered model) เป็นแบบหุ่นที่ประกอบขึ้นด้วยดีกรีที่หนึ่งและดีกรีที่สองของปัจจัย

$$Y_i = \beta_0 X_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \dots + \beta_{kk} X_k^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \dots + \beta_{k-1} X_{k-1} X_k + \sum_i \quad (\text{Cochran and Cox, 1957})$$

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Badrie et.al ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการผลิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ของแป้งมันสำปะหลังพบว่า การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางด้านกายภาพและทางเคมีที่เกิดขึ้นในอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตสูงในระหว่างกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการใช้อุณหภูมิสูงในระยะเวลาสั้นนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะการดำเนินการของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ คุณสมบัติทางด้านรีโอโลยีของอาหารและส่วนผสมต่างๆเช่น น้ำตาลและกรดที่เติมเข้าไป

Onyango et.al ได้ทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการผลิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ของเกล็ดข้าวโพดหมักผสมกับแป้งข้าวฟ่างในการผลิตอาหารพื้นเมืองของชาวแอฟริกาที่ชื่อว่า ยูจิ พบว่าการเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบจะทำให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์, ปริมาตรจำเพาะ และความเป็นที่เหลืองของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง แต่จะทำให้ความชื้นและความหนาแน่นของอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น และทำให้อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้มีสีเข้มขึ้น

Qing-Bo Ding et.al ได้ทำการศึกษาผลของสภาวะการผลิตที่มีต่อคุณลักษณะทางกายภาพของขนมขบเคี้ยวแบบกรอบจากข้าวสาลีที่ผลิตจากกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ พบว่าการเพิ่มอัตราการป้อนของวัตถุดิบจะทำให้อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้มีความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบจะมีผลทำให้อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้มีความหนาแน่น, ความสามารถในการละลายน้ำ และมีความแข็งเพิ่มขึ้น แต่จะให้อัตราส่วนการขยายตัวและความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง ในขณะที่เพิ่มความเร็วยรอบของสกรูนั้นจะทำให้ค่าความหนาแน่น, ความสามารถในการดูดซับน้ำ และความแข็งลดลง แต่จะให้อัตราส่วนการขยายตัวและความสามารถในการละลายน้ำเพิ่มขึ้น

S. Thymi et.al ได้ทำการศึกษาคูณลักษณะของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์จากแป้งข้าวโพดพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นปรากฏ, ค่าความพรุน และอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ, ระยะเวลาของวัตถุดิบที่อยู่ในเครื่อง และอุณหภูมิบาร์เรล ในขณะที่ความเร็วยรอบของสกรูจะไม่มีผลกระทบต่อค่าต่างๆเหล่านี้ ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่าค่าความหนาแน่นปรากฏของผลิตภัณฑ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและระยะเวลาของวัตถุดิบที่อยู่ในเครื่องมากขึ้น ในขณะที่ค่าความพรุนและอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและระยะเวลาของวัตถุดิบที่อยู่ในเครื่องและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของบาร์เรล

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุดิบ

1. ลูกเดือย
2. เกี๊ยวขาว โปดบดละเอียด เบอร์ 3

3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว
2. เครื่อง Tray dry
3. เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT Plus
4. เครื่อง Rapid Visco Analyzer รุ่น RVA-4
5. เครื่อง Fitz Mill
6. เครื่อง Centrifuge + Centrifuge
7. เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์พืช (Ketts)
8. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
9. เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 ตำแหน่ง
10. เครื่อง Hot Plate
11. เครื่อง Magnetic Stirrer
12. เครื่องวัดสี
13. ตู้อบลมร้อน
14. เครื่องปั่น
15. กระบอบกตวงอลูมิเนียมขนาด 1 ลิตร
16. กระบอบกตวงพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร
17. เครื่อง Seal
18. โถดูดความชื้น
19. ปิเปต
20. อลูมิเนียมฟอล์ย
21. บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
22. เวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การกำหนดตัวแปรที่ศึกษา

ในการทดลองนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ซึ่งประกอบด้วย ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบของสกรู และอุณหภูมิบาร์เรล ต่อคุณลักษณะต่างๆของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้

การกำหนดค่าตัวแปรเป็นดังนี้ คือ

3.2.1 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

2.3) 580 รอบต่อนาที

3. อุณหภูมิบาร์เรล ซึ่งแบ่งเป็น 3 ระดับ คือ

3.1) 80°C

3.2) 90°C

3.3) 100°C

3.2.2 ตัวแปรตาม (Dependent variables) ประกอบด้วย

1. ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต

2. ความหนาแน่นรวม

3. ความหนาแน่นจริง

4. อัตราส่วนการขยายตัว

5. ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI)

6. ความสามารถในการละลายน้ำ (WSI)

7. ค่าสี

8. ลักษณะเนื้อสัมผัส

9. ค่าความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวางแผนการทดลอง

ใช้แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design ประกอบด้วย 3 ตัวแปร แบ่งระดับตัวแปร แต่ละตัวเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย 15 การทดลองที่สภาวะต่าง ๆ กัน ดังตารางที่ 3.2

ตาราง 3.1 แผนการทดลอง

สัญลักษณ์	ระดับ ค่าตัวแปร	1	0	-1
		X_1	ความชื้นเริ่มต้น (%)	14
X_2	ความเร็วรอบของสกรู (rpm)	420	500	580
X_3	อุณหภูมิบิวเรต ($^{\circ}\text{C}$)	80	90	100

ตาราง 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบ

1. นำลูกเดือยไปบดหยาบด้วยเครื่องไมล์หัวเหล็ก
2. นำลูกเดือยที่ผ่านการบดหยาบแล้ว ไปบดละเอียดด้วยเครื่อง Fitz Mill โดยใช้ขนาดตะแกรง 40 mesh จำนวน 1 รอบ

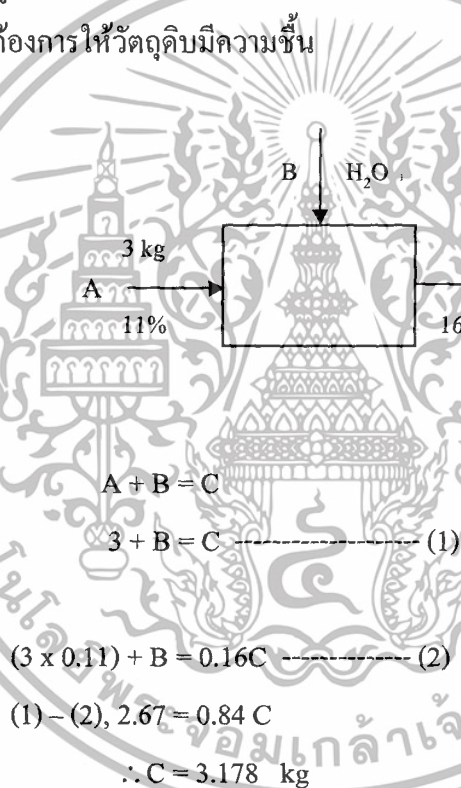
อนึ่งในการกำหนดค่าความชื้นของวัตถุดิบ กระทำโดยการปรับปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปในลูกเดือยบดละเอียด ซึ่งได้จากการทำสมดุลมวลดังนี้

ตัวอย่าง

ลูกเดือยบดละเอียดมีความชื้นเริ่มต้น	=	11%
ใช้ลูกเดือยจำนวน	=	3 kg.
ถ้าต้องการให้วัตถุดิบมีความชื้น	=	16%

สมดุลมวล

สมดุลน้ำ



$$\begin{aligned} \therefore \text{ปริมาณน้ำที่ต้องเติม (B)} &= 3.178 - 3 \\ &= 0.178 \text{ kg} \end{aligned}$$

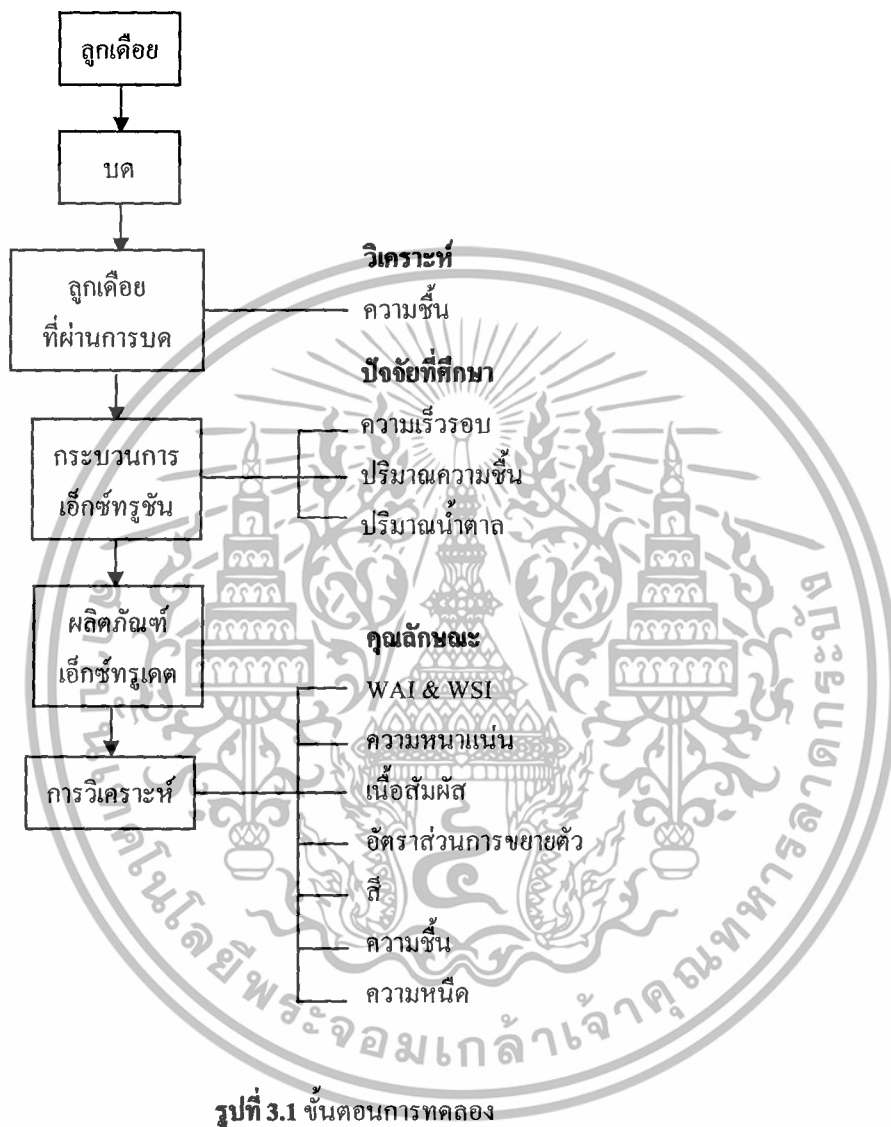
3.4.2 การทดลองผลิตด้วยเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

1. ใช้ตัวอย่างลูกเดือยบดที่ทำการปรับความชื้นแล้วประมาณ 3 kg
2. ตั้งค่าการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่สภาวะการทดลองต่างๆ (ดังแสดงในตารางที่ 3.2)
3. ป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ทำการผลิตจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เก็บตัวอย่างเอ็กซ์ทรูเกตที่ได้แล้วนำไปอบด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 15 นาที

5. นำเอ็กซ์ทรูเกตที่ผ่านการอบแล้วเก็บใส่ถุงพลาสติก ปิดผนึกให้สนิทแล้วนำไปทำการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆดังแสดงในหัวข้อ 3.2.2



3.5 การวัดค่าคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเกตที่ได้

3.5.1 ค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเกต (Moisture Content)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (AOAC, 1990)

- นำภาชนะอลูมิเนียมพร้อมฝาปิดที่ล้างสะอาดแล้วมาอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 20 นาที นำออกมาวางให้เย็นใน โถดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- นำตัวอย่างที่บดแล้วประมาณ 2 กรัมใส่ลงในภาชนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำภาชนะพร้อมฝาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. เปิดฝาแล้วนำเข้าไปวางในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 20 นาที
5. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ
6. คำนวณหาค่าความชื้นมาตรฐานเปียก

การคำนวณ

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

3.5.2 ความหนาแน่น (Density)

3.5.2.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

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

การคำนวณ

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

3.5.2.2 ความหนาแน่นจริง (True Density)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Chinnaswamy และ Hanna, 1988)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

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

3.5.3 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และความสามารถในการละลายน้ำ (WSI)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Anderson, 1969)

1. บดตัวอย่างด้วยเครื่องปั่น
2. นำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมครอน
3. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการบดประมาณ 2.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตรบนที่ก

น้ำหนัก

4. เติมน้ำกลั่นประมาณ 30 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร บนที่กน้ำหนัก

5. ทำการคนอย่างสม่ำเสมอด้วยเครื่อง Magnetic Stirrer เป็นเวลา 30 นาที

6. เทตัวอย่างที่คนเสร็จแล้วลงในหลอด Centrifuge ที่ทราบน้ำหนักเริ่มต้น

7. นำมาเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge โดยใช้ความเร็วที่ 3000 g เป็นเวลา 10 นาที

8. ปิดเครื่อง แยกส่วนใสที่ได้ลงในจานระเหยที่ทราบน้ำหนักและทำการชั่งน้ำหนัก ส่วน

ตะกอนที่กั้นหลอดให้นำมาชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า WAI จากสมการ

การคำนวณ

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

9. ระเหยส่วนใสบนเครื่อง Hot Plate จนแห้งแล้วจึงนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105°C จนน้ำหนักคงที่

10. นำจานระเหยออกมาวางไว้ในโถดูดความชื้นให้เย็นเป็นเวลา 20 นาที แล้วนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาค่า WSI

การคำนวณ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ (Expansion Ratio , ER)

คืออัตราส่วนการพองตัวของเอ็กซ์ทรูเดต

การคำนวณ (Alvarez-Martinez, 1988)

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

โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

3.5.5 ลักษณะเนื้อสัมผัส

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

1. ประกอบหัววัดแบบ P/2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และฐานเข้ากับตัวเครื่อง
2. เปิดเครื่อง TA และ Computer
3. เข้าโปรแกรม Texture Exponent 32
4. ทำการ calibrate force โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน 2000 กรัม
5. ทำการ calibrate height โดยตั้งระยะหัววัดให้สูงกว่าความสูงของตัวอย่างเล็กน้อย
6. ตั้งโปรแกรมโดยเลือกรูปแบบการทดสอบพร้อมทั้งจัดค่าความเร็วของหัววัดเริ่มต้นเท่ากับ 1 mm/s ความเร็วขณะกดเป็น 1 mm/s ความเร็วขณะดึงหัววัดกลับเป็น 10 mm/s ระยะที่ใช้กดเป็น 5 mm แรงกดเริ่มต้นที่ 5 g. และ Acquisition rate เป็น 400 pps. รวมถึงตั้งหน่วยของกราฟที่ต้องการโดยแกน x เป็นเวลา (s) และแกน y เป็นแรง (g.)
7. นำตัวอย่างมา 1 ชิ้น และทำเครื่องหมายตามตำแหน่งที่ต้องการวัด
8. เดินเครื่องโดยควบคุมตำแหน่งกดให้มั่นคง รอจนกระทั่งเครื่องทำงานเสร็จ
9. ทำการวัดค่าแรงกด 5 ซ้ำ
10. บันทึกกราฟที่ได้ อ่านค่าแรงแตกหักสูงสุด (g) จำนวนพีก (Crispness) และพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกดกับเวลา (Toughness, g.sec)
13. คำนวณค่า Hardness จากสมการ

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

14. เปลี่ยนหัววัดเป็นแบบ Warner – Blatzler Blade และทำตามขั้นตอนที่ 1-13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.6 คุณสมบัติความหนืด (Viscosity)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. เปิดเครื่อง RVA, Computer และปั้มน้ำ
2. เข้าโปรแกรม RVA แล้วทำการอุ่นเครื่องเป็นเวลา 30 นาที
3. ทำการ calibrate ใบพาย (paddle)
4. เลือกรูปแบบการวัดความหนืดของข้าว ทำการตั้งชื่อไฟล์และเลือกโพลเดอร์ที่จะทำการจัดเก็บข้อมูลผลการทดลอง
5. ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดประมาณ 3 กรัม บันทึกน้ำหนัก
6. เตรียมน้ำกลั่น 25 กรัม บันทึกน้ำหนัก
7. รอจนเครื่องขึ้นคำว่า run ready จึงใส่ตัวอย่างและน้ำกลั่นลงใน aluminium can ใส่ใบพายและทำการคน 10 ครั้ง
8. นำ aluminium can และใบพายใส่เข้าเครื่อง RVA กดลงเพื่อให้เครื่องทำงานโดยอัตโนมัติ
9. จากกราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดต่อเวลาที่ได้ อ่านและบันทึกค่าต่างๆดังนี้ ค่าความหนืดเมื่อตัวอย่างพองตัวสูงสุด (Peak viscosity), ความหนืดเมื่อตัวอย่างยุบตัว (Breakdown), ความหนืดต่ำสุดของตัวอย่างระหว่างการทำเย็น (Hold Strength), ความหนืดเมื่อตัวอย่างเย็นตัว (Final viscosity), ความหนืดเมื่อตัวอย่างคืนตัว (Setback) และเวลาที่ตัวอย่างพองตัวสูงสุด (Peak time)
10. นำ aluminium can และใบพายออกจากเครื่อง

3.5.7 สี (Color)

ขั้นตอนการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Colorimeter

1. เปิดแผ่นดำบังแสงออกแล้วเอากล่องดำครอบที่วัสดุ
2. เลือก Measurement แล้วกด enter
3. ปิดแผ่นบังแสงโดยครอบกล่องดำไว้เหมือนเดิม
4. กด F1
5. เปิดแผ่นบังแสงออกแล้วใส่แผ่นมาตรฐานแป้งสีขาวลงไปในตลับเพื่อทำการ calibrate แล้วครอบกล่องดำไว้เหมือนเดิม และกด F1
6. ตรวจวัดค่าที่ได้จากการวัดให้ตรงกับค่าที่ข้างกล่องแผ่นมาตรฐานแป้ง (ถ้าไม่ตรงต้องเริ่มทำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ใหม่)
7. ใส่ตัวอย่างที่บดแล้วลงในตลับ ครอบกล่องดำและทำการวัดค่า
8. เวลาวัดให้กด F1 ตลอดเมื่อเริ่มการวัดค่าใหม่ทุกครั้ง
9. ถ้าต้องการออกจากโปรแกรมให้กด F10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ผลการทดลองใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) เลือกใช้รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบพหุนามเมียบลอันดับที่ 2 ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับคุณลักษณะบางประการของผลิตภัณฑ์ที่ได้ รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_i = a_0X_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 \quad (3-3)$$

เมื่อ Y_i = ตัวแปรตาม ได้แก่ ความชื้นของเอ็กซ์ทราคต ความหนาแน่น อัตราส่วนการขยายตัว สี ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำ ลักษณะเนื้อสัมผัส

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

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

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากสภาวะการผลิตตามแผนการทดลอง แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเอ็กซ์ทราคต์ที่สภาวะการทดลองต่างๆ

ตัวอย่าง	ความชื้น (%)	Bulk density (g/cm ³)	True density (g/cm ³)	ER (เท่า)	WAI (g/g)	WSI (%)	L*	a*	b*	ΔE
1	5.11	0.104	0.557	3.57	1.629	58.672	84.473	4.63	16.117	4.540
2	3.86	0.07	0.291	3.59	1.728	62.557	90.907	4.387	13.94	7.144
3	5.06	0.118	0.656	3.82	1.177	62.096	78.967	1.59	18.75	8.540
4	4.4	0.102	0.565	3.67	1.437	63.709	81.603	1.823	18.403	6.863
5	6.67	0.103	0.578	3.43	1.502	59.731	76.747	5.46	18.593	10.356
6	6.36	0.088	0.442	3.29	1.498	61.875	81.473	4.69	16.717	5.812
7	5.53	0.082	0.619	4.58	1.488	59.212	82.9	4.917	16.617	5.290
8	5.12	0.076	0.372	3.42	1.847	51.278	80.957	4.933	17.867	7.068
9	6.3	0.082	0.487	3.23	1.385	60.774	79.997	4.9	18.98	8.433
10	6.53	0.093	0.509	3.32	1.483	60.724	80.743	4.697	17.51	6.808
11	5.36	0.079	0.444	3.55	1.601	61.351	80.46	4.353	17.773	7.066
12	6.58	0.083	0.546	4.16	1.199	64.716	79.123	4.623	19.873	9.547
13	5.29	0.091	0.477	3.78	1.656	61.637	85.72	4.31	14.37	3.239
14	5.07	0.098	0.507	3.56	1.858	58.744	85.623	4.407	13.923	2.960
15	6.96	0.095	0.512	3.95	1.613	59.638	86.06	3.96	14.633	3.422

ผลการทดลองที่ได้ เมื่อนำไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (สมการ 3-3) ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเอ็กซ์ทราคต์ที่สภาวะการทดลองต่างๆ

ตัวอย่าง	Hardness(g/mm ²)		Crispness		Toughness (g.mm)	
	P2	Blade	P2	Blade	P2	Blade
1	224.2	15.54	17.4	49.9	1515.43	2497.66
2	176.94	15.69	16.9	38.7	1149.95	2222.51
3	219.87	15.02	13.4	20.2	925.49	2461.39
4	193.54	9.56	18.2	31.2	934.83	2442.11
5	165.97	9.09	20.8	28.9	756.72	2952.39
6	287.6	16.74	26.8	36.6	939.83	3388.17
7	353.56	11.07	13.4	41.2	735.80	2531.27
8	198.22	10.99	16.3	45.3	1314.03	2127.74
9	179.02	10.90	30.9	26.3	782.31	2805.99
10	190.45	11.45	38.3	25.5	1261.97	2294.14
11	204.44	11.54	13.8	55.3	874.70	2199.03
12	198.81	11.74	13.6	44.7	640.70	2558.57
13	134.43	10.45	13.8	45.3	919.82	3863.00
14	144.18	11.44	8.2	50.5	578.87	4023.36
15	159.56	15.06	20.3	38.6	1079.90	3405.81

ตารางที่ 4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย

ส.ป.ส. สมการ (3-3)	ค่าคุณลักษณะต่างๆของเอ็กซ์ทราคต์								
	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 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2.1 ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Extrudate's Moisture Content, MC)

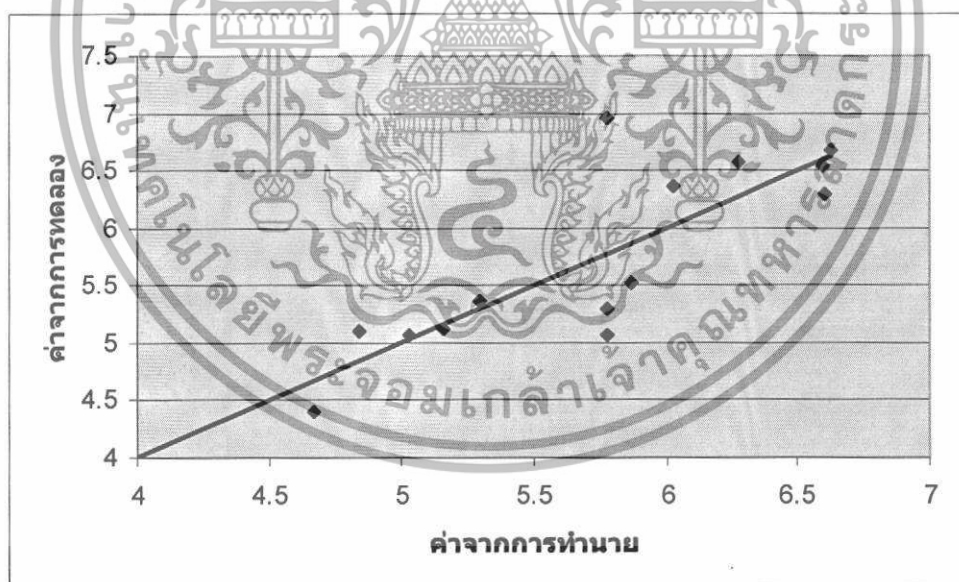
ความชื้นที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสถานะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 3.86-6.96% และเมื่อนำค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสถานะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} MC = & (27.135) + (5.5692708) X_1 + (0.0241667) X_2 - (1.652313) X_3 - (0.179792) X_1^2 \\ & - (0.0000698) X_2^2 + (0.0086583) X_3^2 + (0.0009219) X_1 X_2 - (0.00125) X_1 X_3 \\ & + (0.0003094) X_2 X_3 \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$R^2 = 0.7658 \quad \text{Standard Error} = 0.7357$$

(ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยแสดงในตารางที่ ข.1)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (4-1) แสดงในรูปที่ 4.1



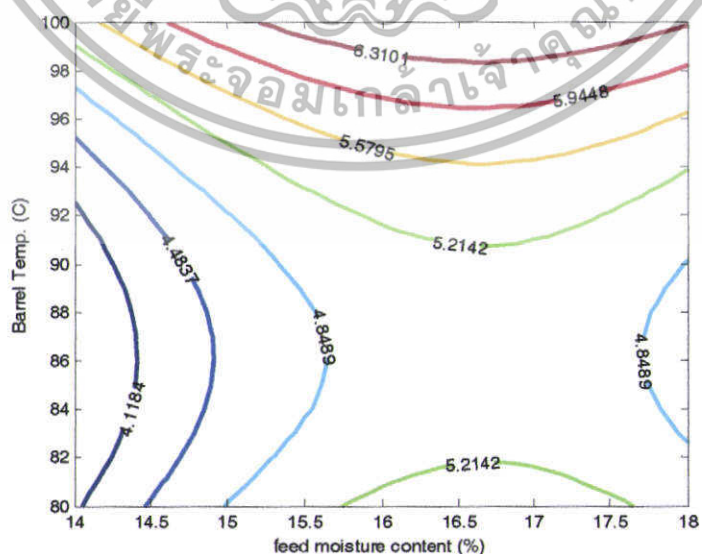
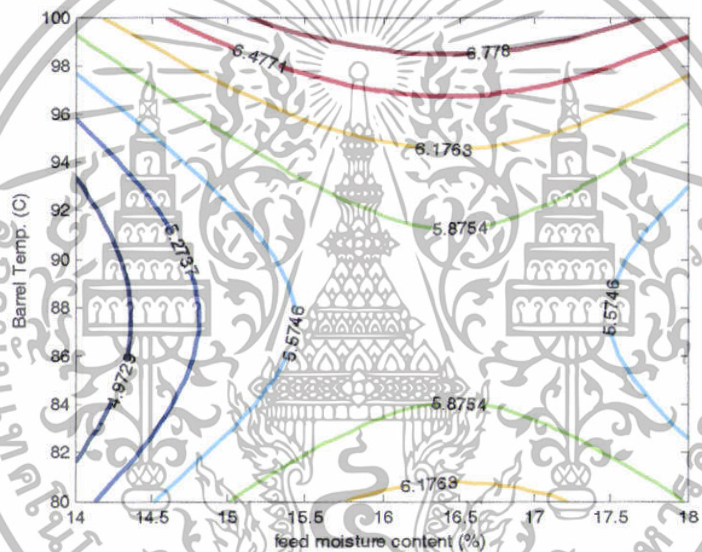
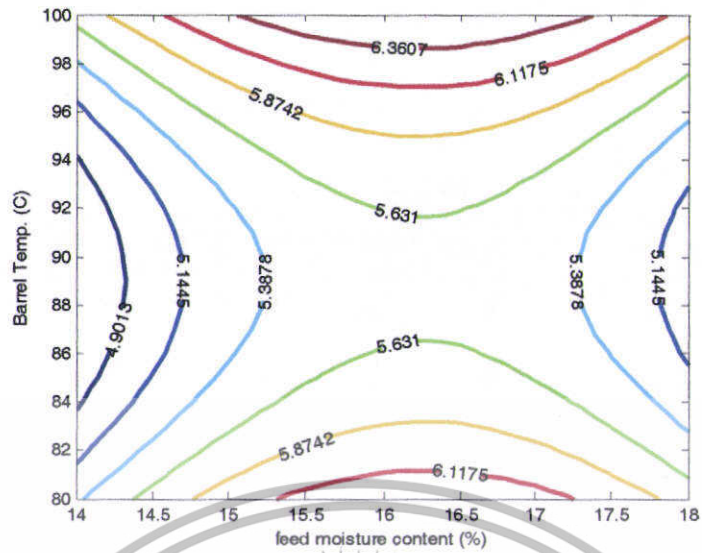
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

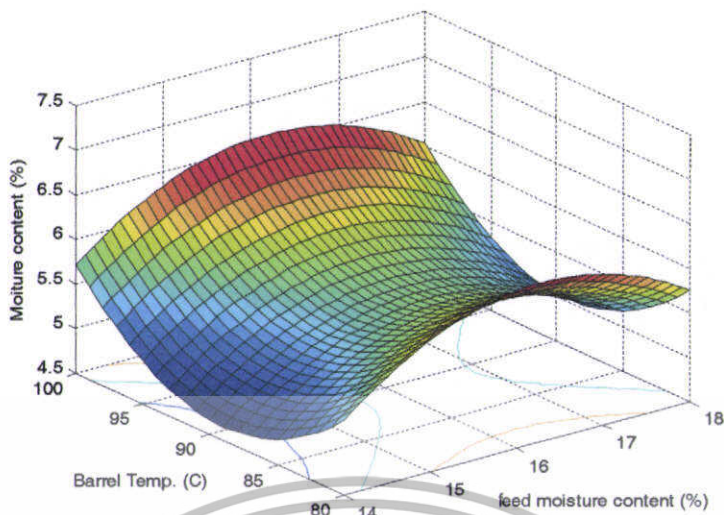
เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-1) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.2 และ 4.3 จากกราฟจะพบว่าการเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบให้สูงขึ้นจนถึงค่าประมาณ 16.5% ทำให้ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าสูงขึ้นด้วย ส่วนที่ค่าความชื้นเริ่มต้นมีค่าสูงกว่า 16.5% จะทำให้ค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าลดลง การเพิ่มความเร็วยอบที่สถานะอุณหภูมิบาร์เรล 80-90°C ทำให้ค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าลดลง สาเหตุอาจเกิดได้จาก การเพิ่มความเร็วยอบเหมือนเป็นการเพิ่มแรงเฉือนเข้าไป ทำให้ความร้อนภายในมากขึ้นจึงทำให้น้ำสามารถระเหยได้ดี ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จึงมีค่าลดลง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลนั้นจะทำให้ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าลดลง แต่ในสถานะการผลิตที่อุณหภูมิบาร์เรล 100°C นั้นกลับทำให้ค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น สันนิษฐานว่าอาจเป็นเพราะว่าที่สถานะการผลิตที่อุณหภูมิบาร์เรล 100°C เป็นการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไปทำให้ผนังเซลล์เกิดการไหม้และทำให้น้ำระเหยออกมาได้น้อย ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จึงมีค่าสูง



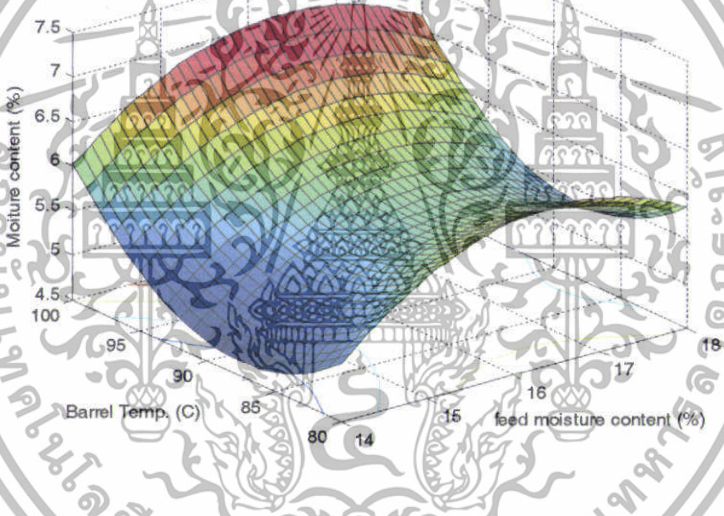
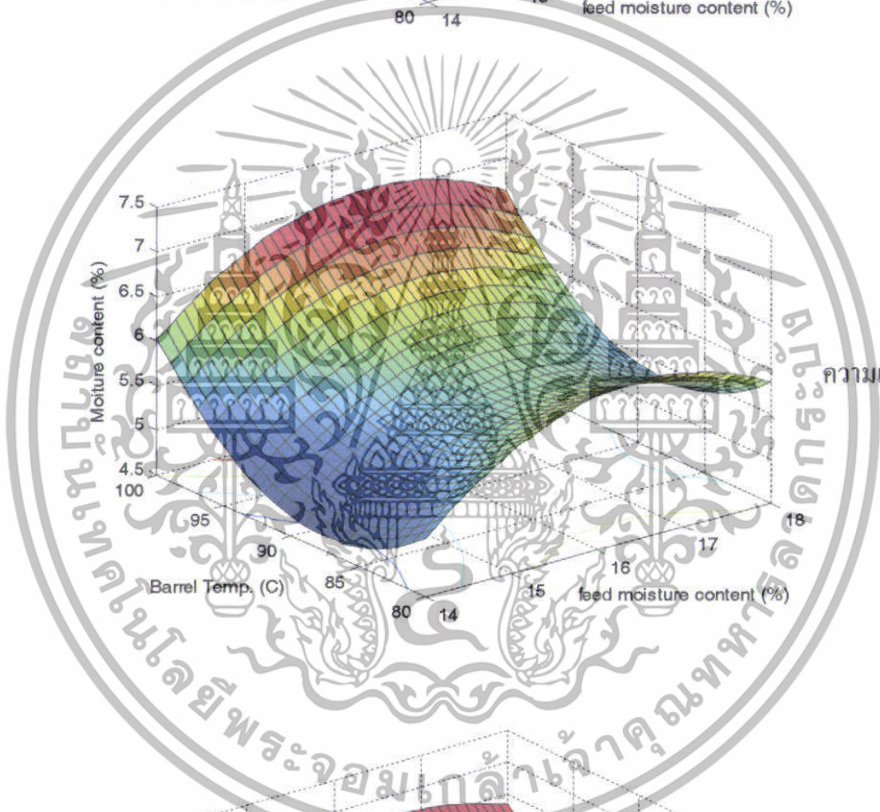
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



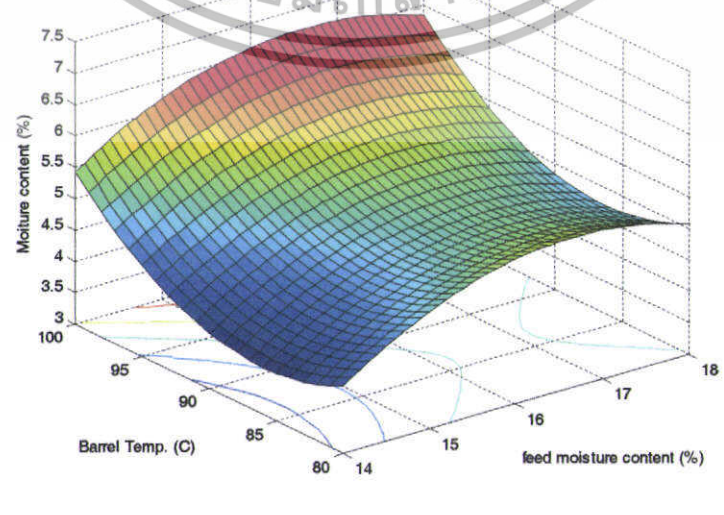
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบาร์เรลที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ผลต่อค่าความชื้นของเอ็กซ์ทราคท์ที่ความเร็วยรอบต่างๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความเร็วรอบ 420 rpm



ความเร็วรอบ 500 rpm



ความเร็วรอบ 580 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิของบาร์เรลที่มี
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ผลต่อค่าความชื้นของเอ็กซ์ทราคต์ที่ความเร็วรอบของสกรูต่างๆ

4.2.2 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density, ρ_{bulk})

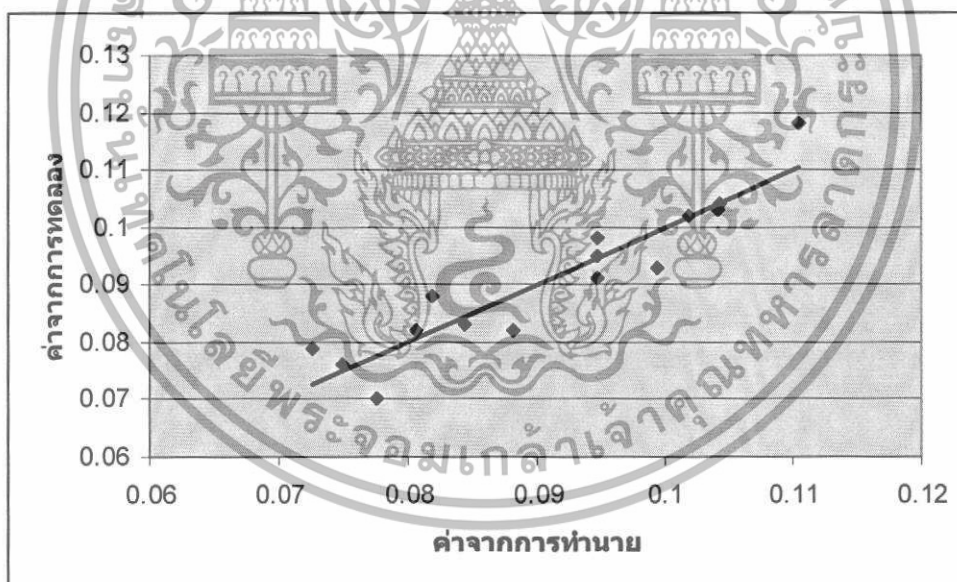
ความหนาแน่นรวมที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 0.07-0.118 (g/cm³) และเมื่อนำค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \rho_{\text{bulk}} = & (-0.334422) - (0.047083) X_1 - (0.000414) X_2 + (0.0193688) X_3 + (0.0008542) X_1^2 \\ & + (0.0000000651) X_2^2 - (0.000108) X_3^2 + (0.0000281) X_1 X_2 + (0.0001125) X_1 X_3 \\ & - (0.00000219) X_2 X_3 \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$R^2 = 0.8682 \quad \text{Standard Error} = 0.0077$$

(ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยแสดงในตารางที่ ข.2)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (4-2) แสดงในรูปที่ 4.4



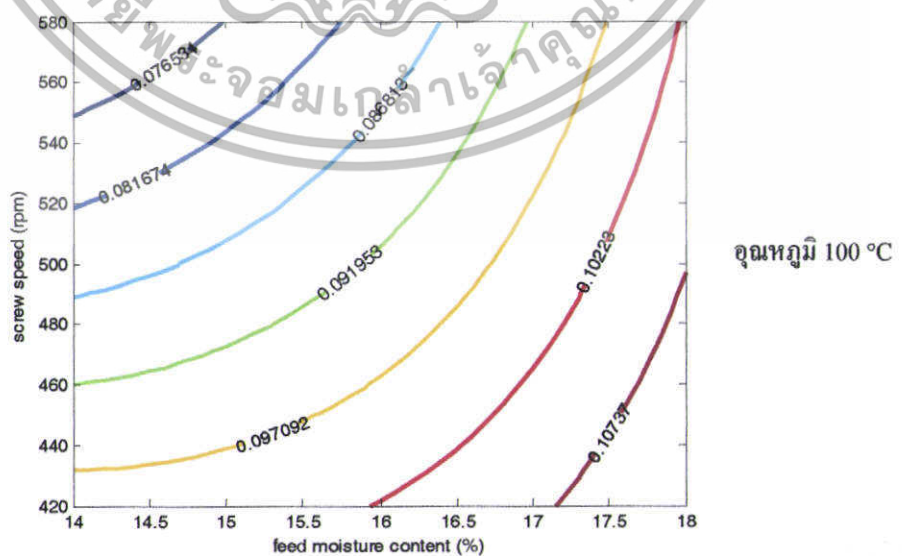
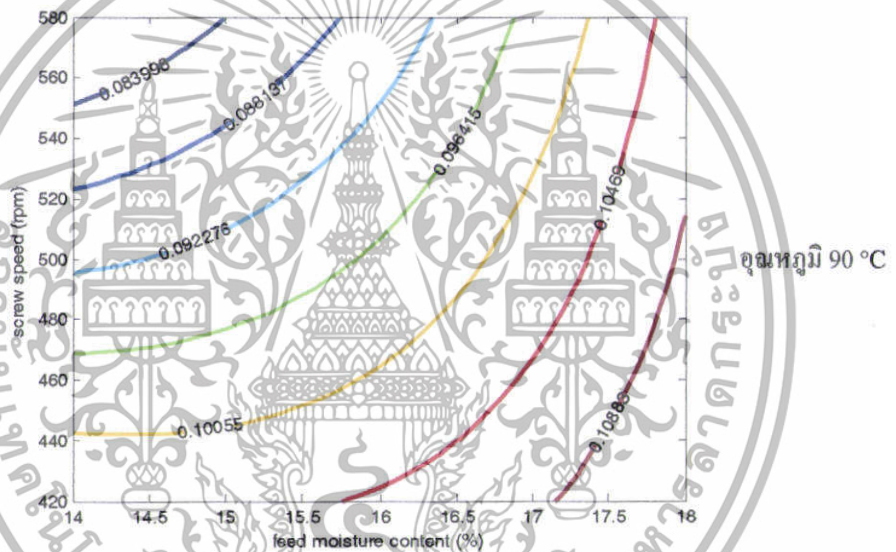
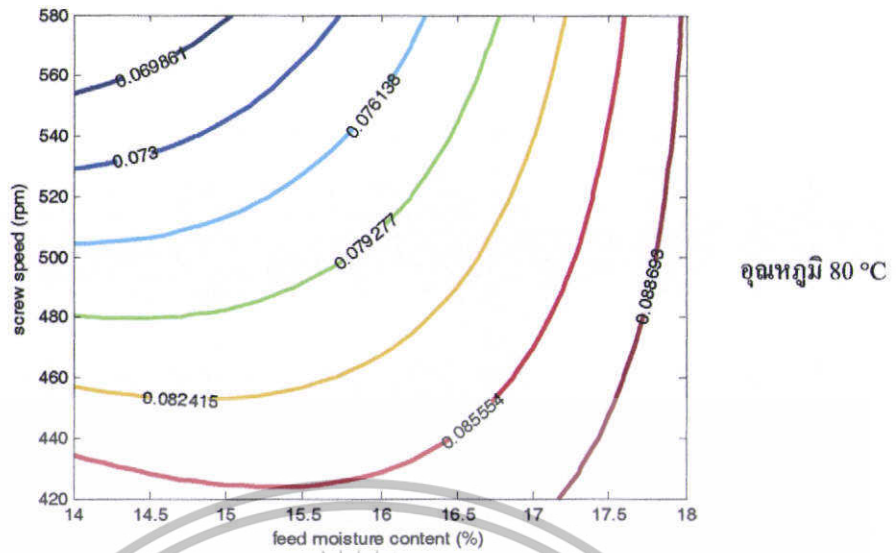
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

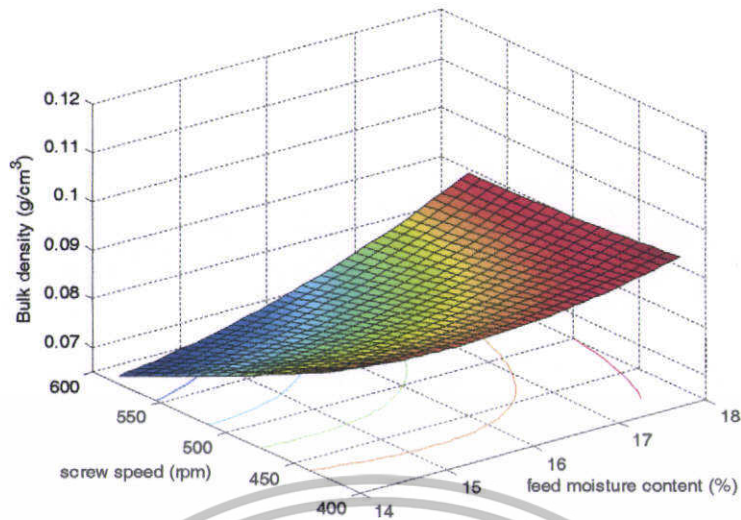
เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-2) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.5 และ 4.6 จากกราฟจะพบว่าเมื่อใช้วัตุดิบเริ่มต้นที่มีความชื้นสูงผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากวัตุดิบเริ่มต้นที่มีความชื้นสูงนั้นจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าสูงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีมวลมากจึงทำให้มีค่าความหนาแน่นสูง ในขณะที่ในสภาวะการผลิตที่ใช้ความเร็วรอบของสกรูสูงนั้นมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ ทั้งนี้เพราะการเพิ่มความเร็วยรอบของสกรูนั้นทำให้วัตุดิบได้รับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นเป็นผลให้อุณหภูมิเนื้อแป้งมีค่าสูงขึ้น เมื่อผ่านออกจากหน้าแปลนจึงเกิดการระเหยน้ำออกอย่างรวดเร็ว เอ็กซ์ทรูเดตเกิดการพองตัวทำให้ค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าต่ำ



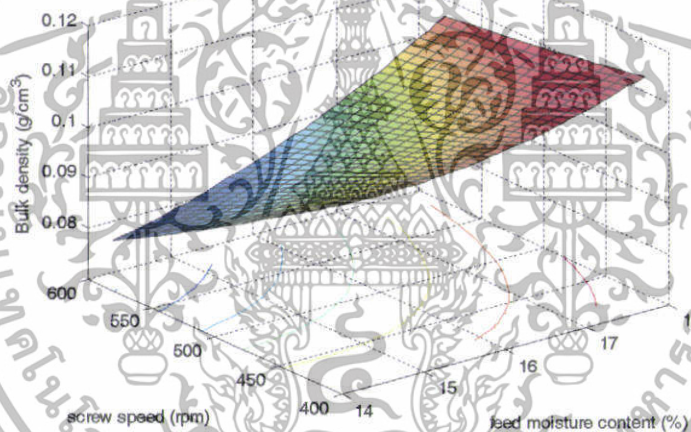
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



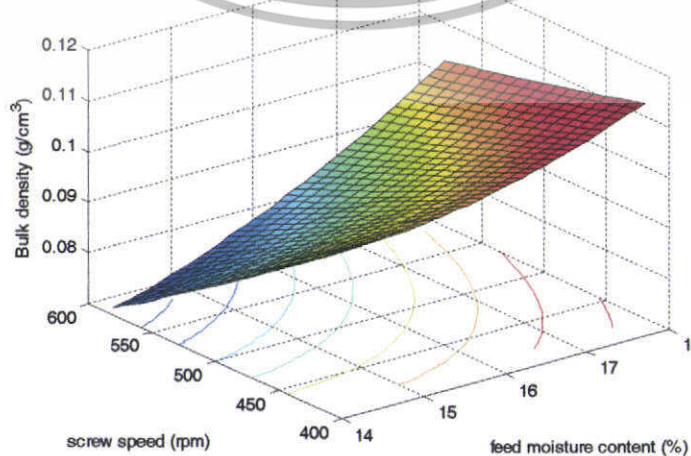
เอกสารนี้เป็นสิทธิสงวนลิขสิทธิ์ของเจ้าของทรัพย์สินทางปัญญาและข้อมูลที่ได้มาจากการดำเนินการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุณหภูมิ 80 °C



อุณหภูมิ 90 °C



อุณหภูมิ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มี
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะสิ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ผลต่อค่าความหนาแน่นรวมที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

4.2.3 ความหนาแน่นจริง (True Density, ρ_{true})

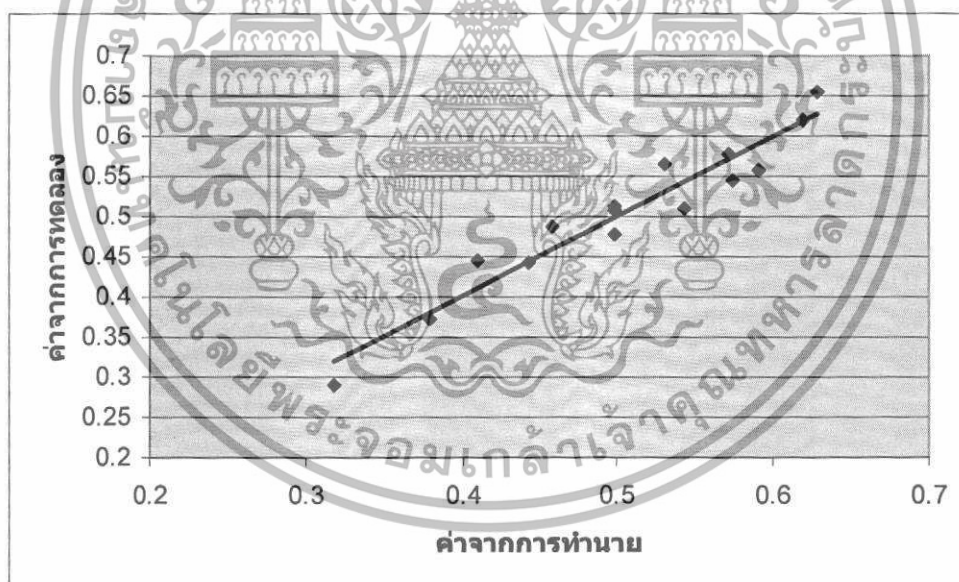
ความหนาแน่นจริงที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 0.291-0.656 (g/cm^3) และเมื่อนำค่าความหนาแน่นจริงของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \rho_{\text{true}} = & (1.782625) - (0.064927) X_1 - (0.008365) X_2 + (0.0251375) X_3 + (0.0031042) X_1^2 \\ & + (0.0000009635) X_2^2 - (0.0000833) X_3^2 + (0.0002734) X_1 X_2 - (0.001388) X_1 X_3 \\ & + (0.000025) X_2 X_3 \end{aligned} \quad (4-3)$$

$$R^2 = 0.9290 \quad \text{Standard Error} = 0.0415 \quad (p < 0.05)$$

(ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยแสดงในตารางที่ ข.3)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (4-3) แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นจริงของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-3)

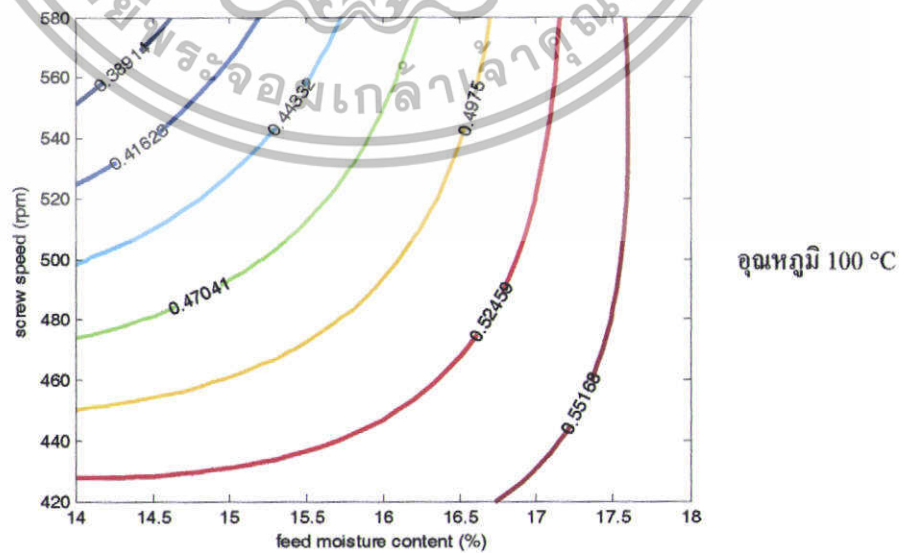
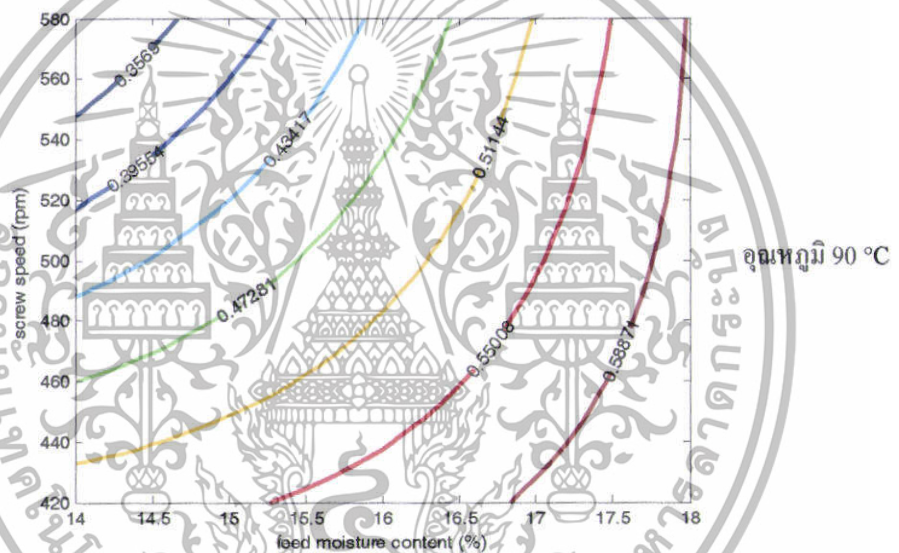
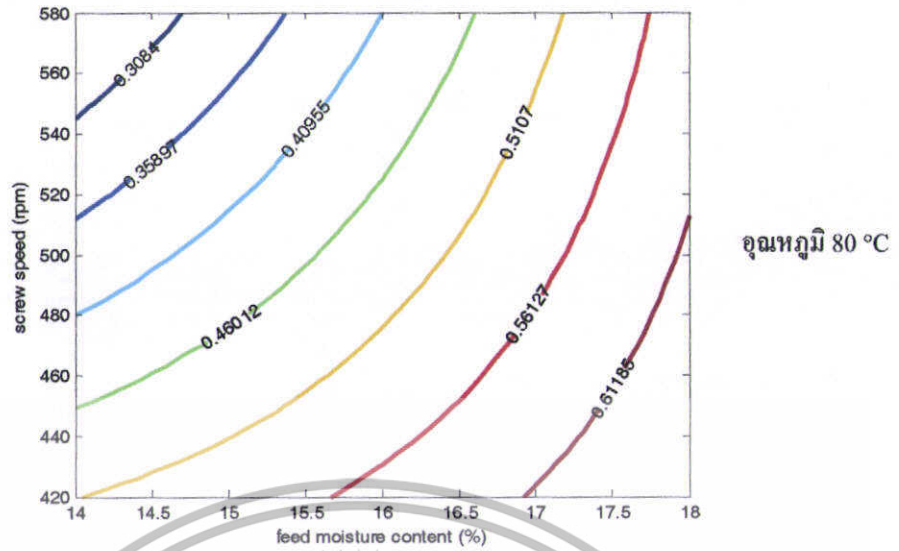
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-3) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.8 และ 4.9 จากกราฟจะพบว่าเมื่อวัตถุดิบเริ่มต้นมีค่าความชื้นสูง ค่าความหนาแน่นจริงก็จะมีค่าสูงเช่นกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะวัตถุดิบเริ่มต้นที่มีความชื้นสูงนั้นจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มากจึงทำให้เมื่อกลายเป็นเอ็กซ์ทรูเดตก็ยังมีค่าความชื้นสูงอยู่ ทำเอ็กซ์ทรูเดตมีมวลมากเพราะฉะนั้นค่าความหนาแน่นจริงจึงมีค่าสูง

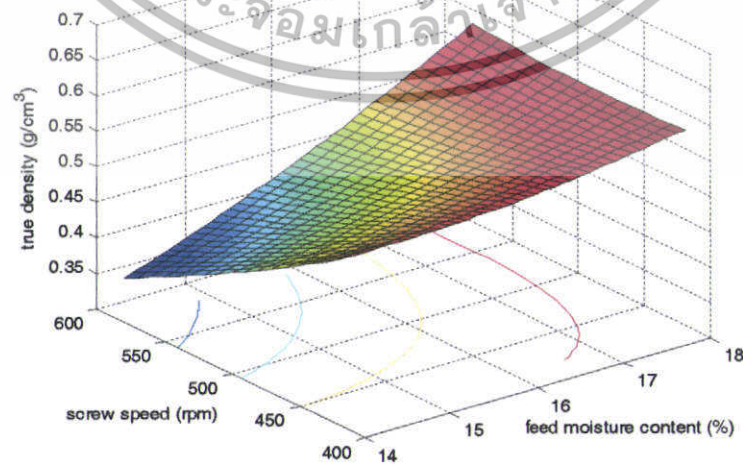
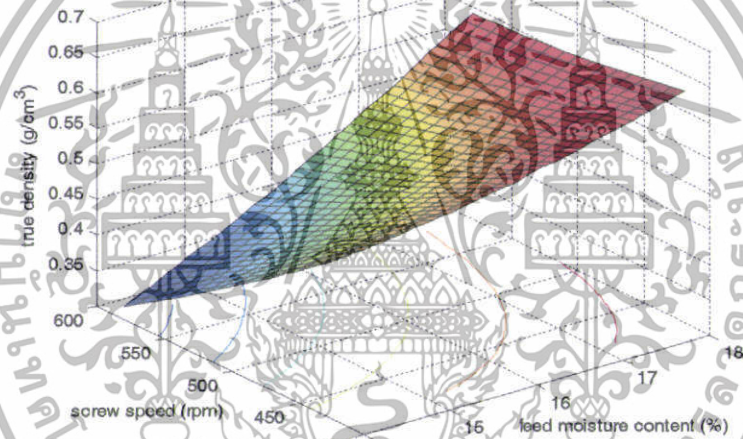
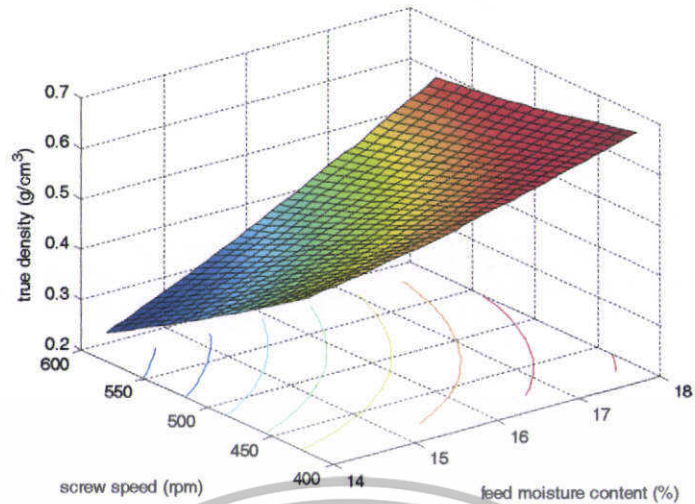
เมื่อใช้ความเร็วรอบของสกรูสูงขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นจริงของเอ็กซ์ทรูเดตมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มความเร็วรอบนั้นเป็นการเพิ่มแรงเฉือนให้กับวัตถุดิบทำให้วัตถุดิบแตกตัวได้มากทำให้น้ำระเหยออกได้มากจึงทำให้เอ็กซ์ทรูเดตที่ออกมาที่มีความชื้นต่ำ เอ็กซ์ทรูเดตมีมวลน้อยจึงทำให้ความหนาแน่นจริงมีค่าน้อย

เมื่อใช้อุณหภูมิของบาร์เรลสูงทำให้ค่าความหนาแน่นจริงของเอ็กซ์ทรูเดตมีค่าต่ำ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่ออุณหภูมิบาร์เรลมีค่าสูงทำให้น้ำสามารถระเหยได้มากขึ้นดังนั้นค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตจึงลดลงทำให้มวลของเอ็กซ์ทรูเดตมีค่าน้อยทำให้ค่าความหนาแน่นจริงมีค่าน้อยด้วยเช่นกัน





รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มี
 เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ผลต่อค่าความหนาแน่นจริงที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นจริงที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ (Expansion Ratio, ER)

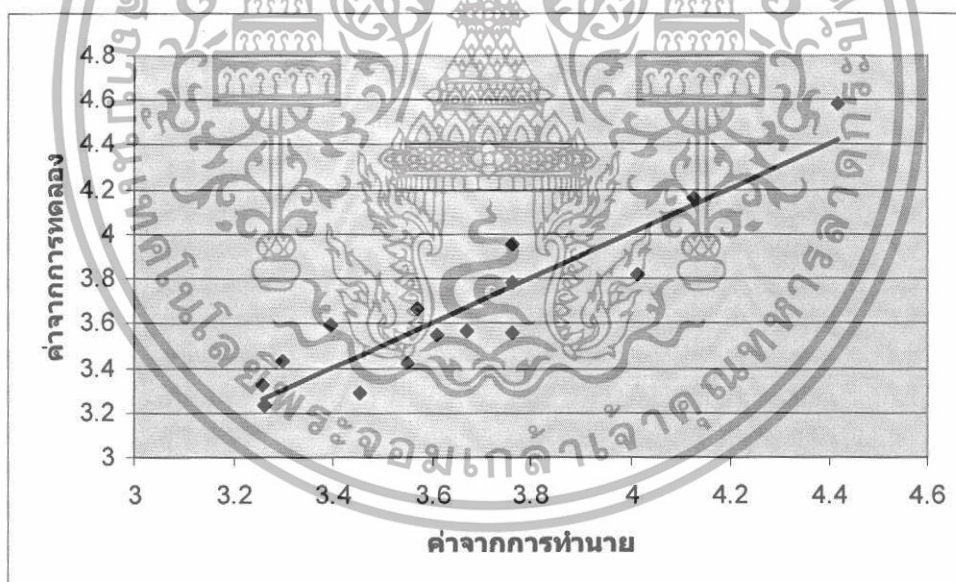
อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเอ็กซ์ทราเคดในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้ว มีค่าอยู่ในช่วง 3.23-4.58 และเมื่อนำค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทราเตอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} ER = & (-18.37539) + (1.3130208) X_1 + (0.0048776) X_2 + (0.255) X_3 + (0.0017708) X_1^2 \\ & - (0.0000169) X_2^2 - (0.000904) X_3^2 - (0.000206) X_1 X_2 - (0.01275) X_1 X_3 \\ & + (0.0001625) X_2 X_3 \end{aligned} \quad (4-4)$$

$$R^2 = 0.9290 \quad \text{Standard Error} = 0.0415$$

(ผลการวิเคราะห์ที่แบบถดถอยแสดงในตารางที่ ข.4)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (4-4) แสดงในรูปที่ 4.10



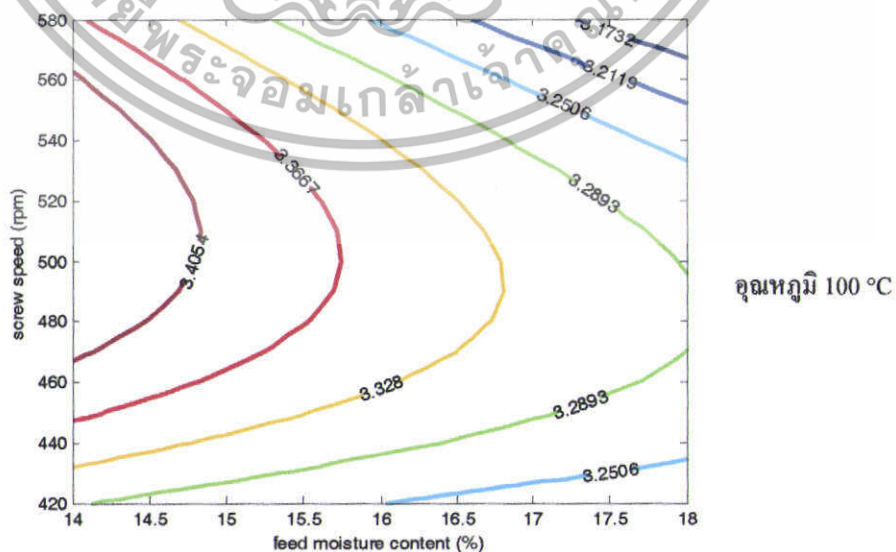
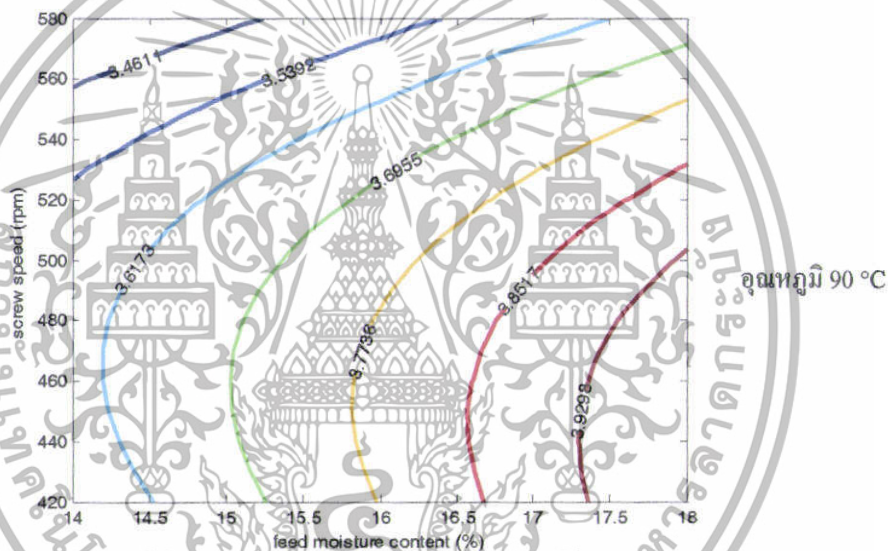
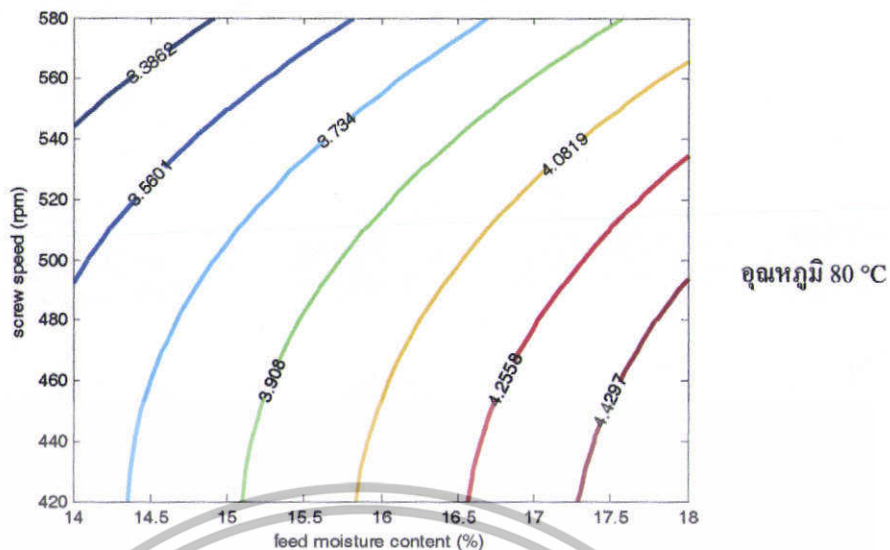
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการขยายตัวของเอ็กซ์ทราเคดที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

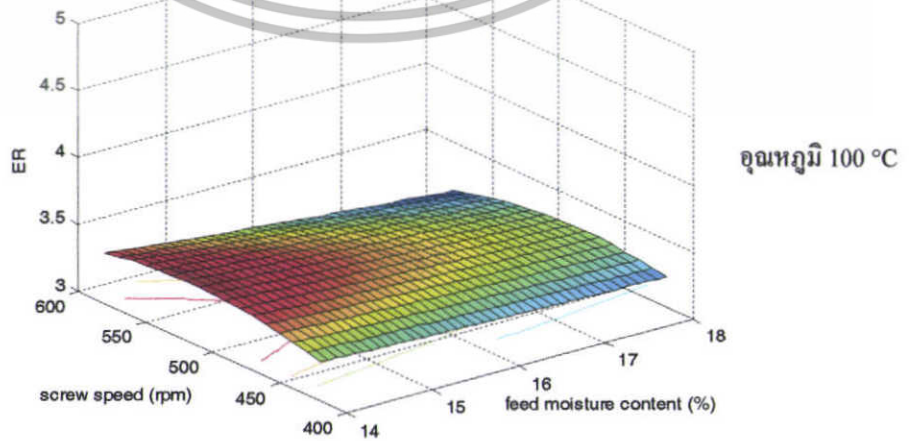
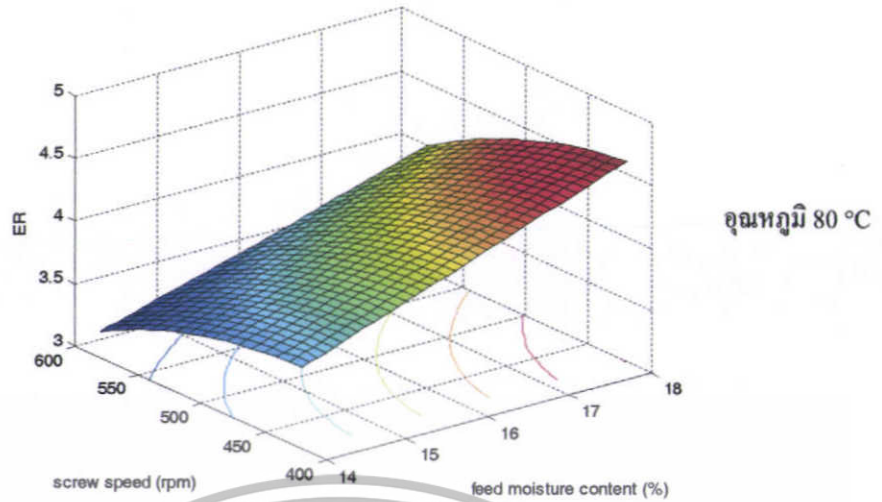
เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-4) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 จากกราฟจะพบว่าเมื่อเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบเริ่มต้นในช่วง 14-18% จะทำให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Qing-Bo Ding et.al. ที่ได้ศึกษาผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์จากข้าวสาลีที่ผลิตด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณความชื้นจะทำให้ค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากในวัตถุดิบมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มาก เมื่อวัตถุดิบผ่านออกจากหน้าแปลนเกิดการระเหยตัวของน้ำสูงทำให้เอ็กซ์ทรูเคตมีการพองตัวมาก การเพิ่มความเร็วยรอบนั้นทำให้อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเคตที่ได้มีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มความเร็วยรอบทำให้วัตถุดิบมีระยะเวลาในกระบวนการสั้นลงไม่เพียงพอต่อการทำให้เม็ดแป้งสุกเต็มที่ ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลนั้นทำให้อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่ออัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเทคนิคแบบละเอียดที่ และเที่ยงยัง ของสิ่งพิมพ์เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มี
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้า
ผลต่ออัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index, WAI)

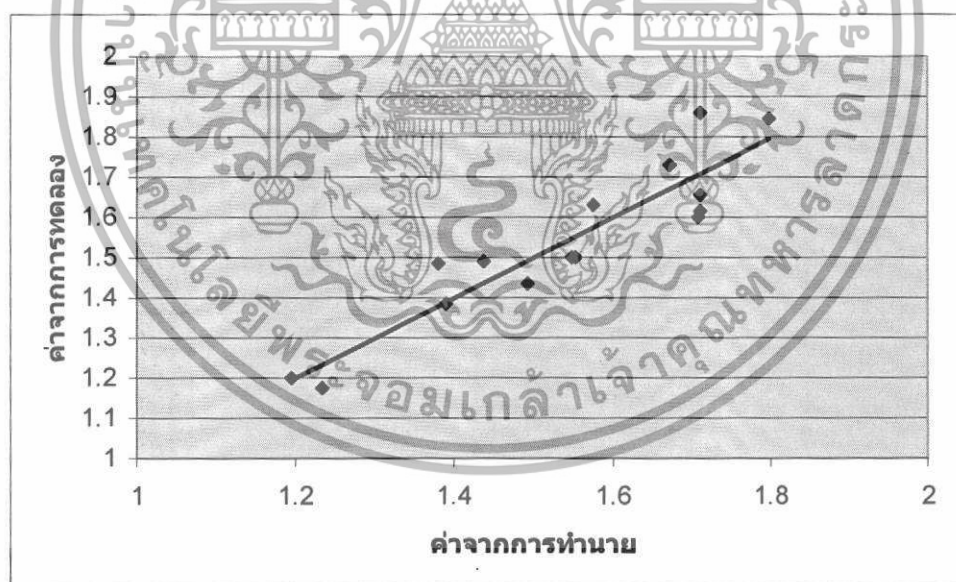
ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสถานะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 1.177-1.858 g/g และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2)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

$$\begin{aligned} \text{WAI} = & (-13.78431) - (0.380781) X_1 + (0.0415953) X_2 + (0.1830875) X_3 - (0.006188) X_1^2 \\ & - (0.0000299) X_2^2 - (0.001005) X_3^2 + (0.0002516) X_1 X_2 + (0.0045375) X_1 X_3 \\ & - (0.000156) X_2 X_3 \end{aligned} \quad (4-5)$$

$$R^2 = 0.8578 \quad \text{Standard Error} = 0.1253948$$

(ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยแสดงในตารางที่ ข.5)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (4-5) แสดงในรูปที่ 4.13



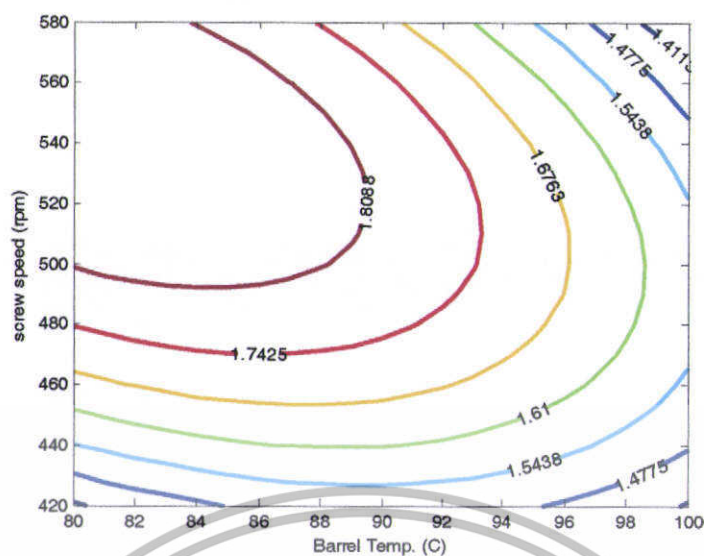
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-5) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.14 และ 4.15 จากกราฟจะพบว่าการเพิ่มความเร็วรอบของสกรูมีผลทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทูเรตที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงปริมาณน้ำที่เม็ดแป้งดูดซับไว้เพื่อการเกิดเจลลิตีในเซชัน ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิของบารเรลจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อแป้งได้รับความร้อนจะเกิดการพองเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วแตกออกเป็นโครงสร้างใหม่ที่ไม่ดูดน้ำเข้ามาอีก (กล้าณรงค์และเกื้อกุล, 2543) ทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง



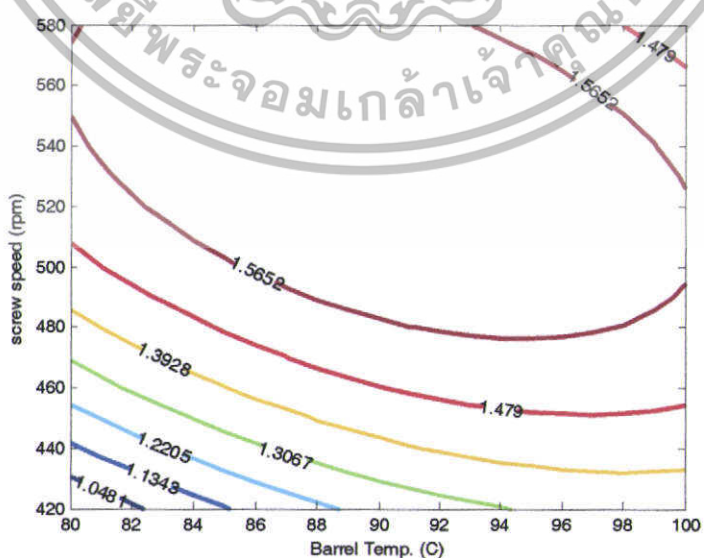
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความชื้นเริ่มต้น 14%



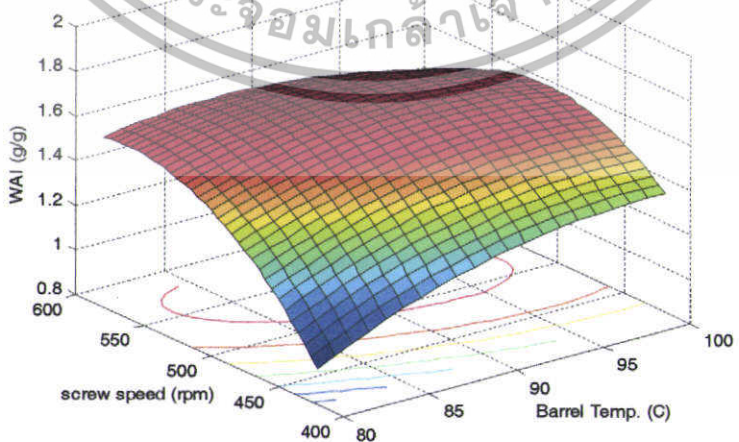
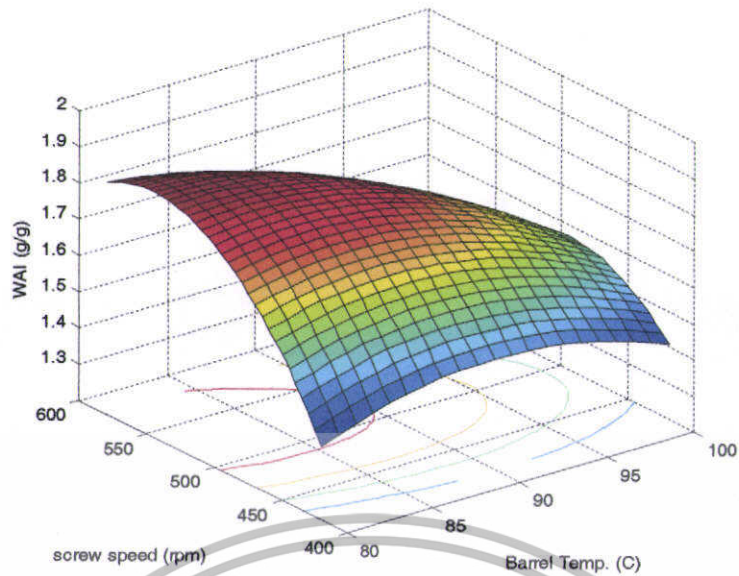
ความชื้นเริ่มต้น 16%



ความชื้นเริ่มต้น 18%

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ส่วนหนึ่งของการดำเนินงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ซึ่งผู้วิจัยขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและผลการวิจัยไว้เป็นประโยชน์แก่ศูนย์วิจัยและอาจารย์ผู้สอนเท่านั้น ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี

ผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility Index, WSI)

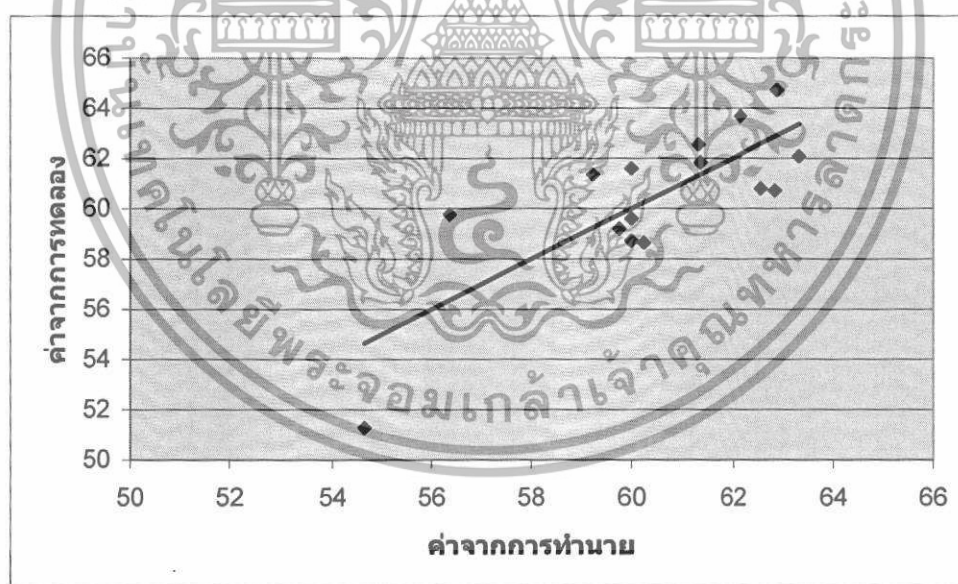
ค่าความสามารถในการละลายน้ำที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสถานะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 51.278-64.716% และเมื่อนำค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสถานะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{WSI} = & (-136.1033) + (21.591333) X_1 - (0.490593) X_2 + (3.2284688) X_3 - (0.264385) X_1^2 \\ & + (0.000439) X_2^2 - (0.009248) X_3^2 - (0.00355) X_1 X_2 - (0.125975) X_1 X_3 \\ & + (0.0010672) X_2 X_3 \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$R^2 = 0.6154 \quad \text{Standard Error} = 3.2021$$

(ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยแสดงในตารางที่ ข.6)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (4-6) แสดงในรูปที่ 4.16



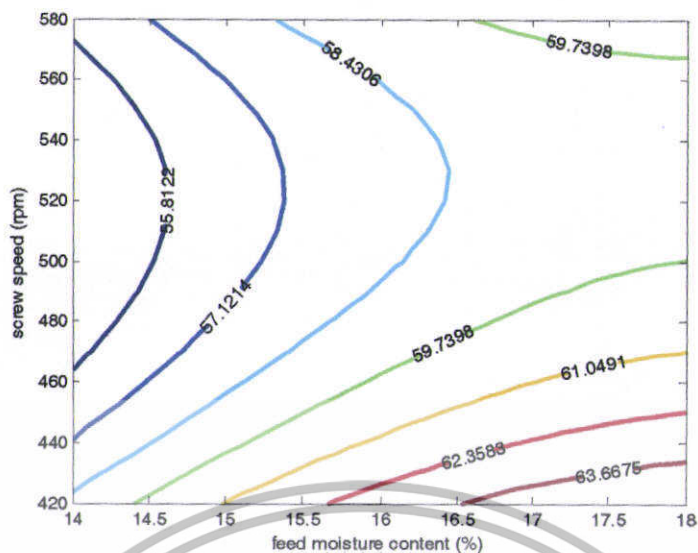
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

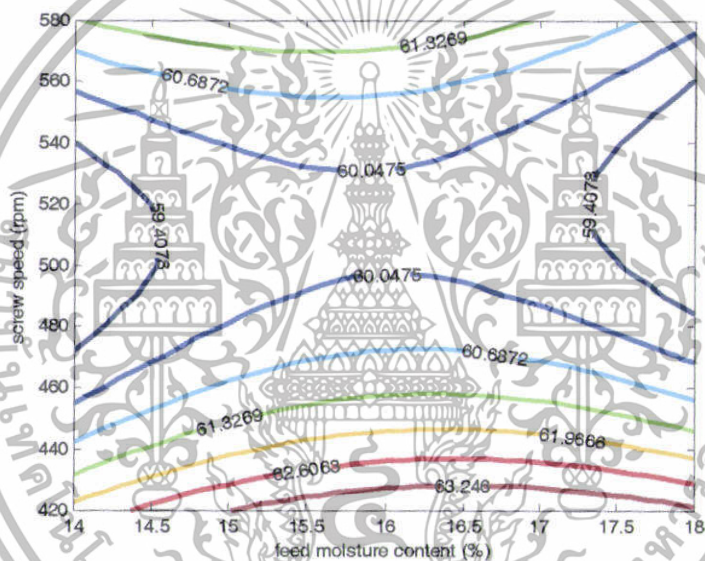
เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-6) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.17 และ 4.18 จากกราฟจะพบว่าการผลิตที่สภาวะความเร็วรอบของสกรูประมาณ 520 rpm ความชื้น 14% อุณหภูมิ 80°C มีผลทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำมีค่าต่ำสุด การเพิ่มหรือลดความเร็วรอบของสกรูจากตำแหน่งนี้มีผลทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิและความชื้นของวัตถุดิบมีผลให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าโมเลกุลของแป้งถูกเคี้ยวถูกทำลายแตกออกเป็นส่วนประกอบที่สามารถละลายน้ำเพิ่มขึ้น



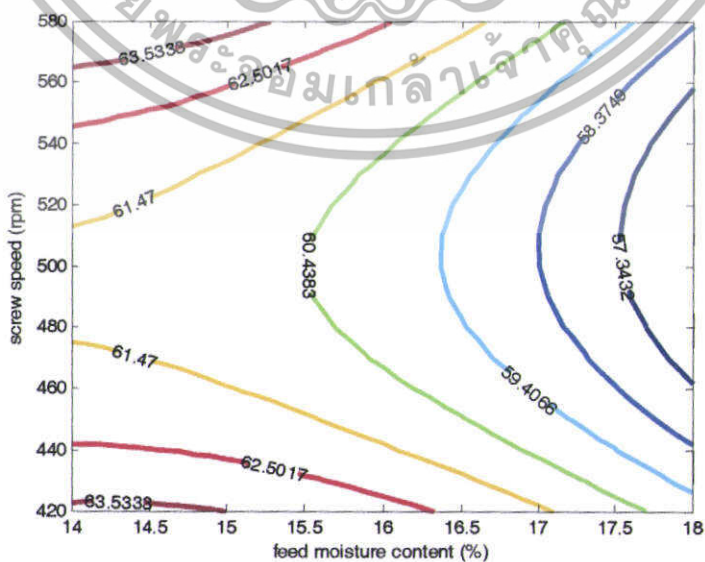
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อุณหภูมิ 80 °C

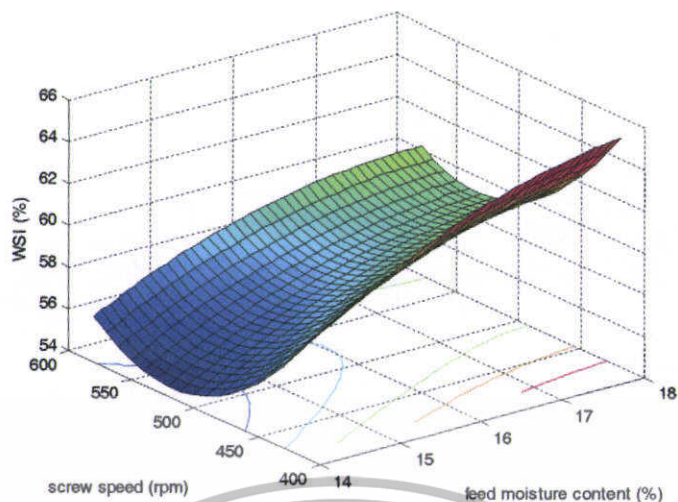


อุณหภูมิ 90 °C

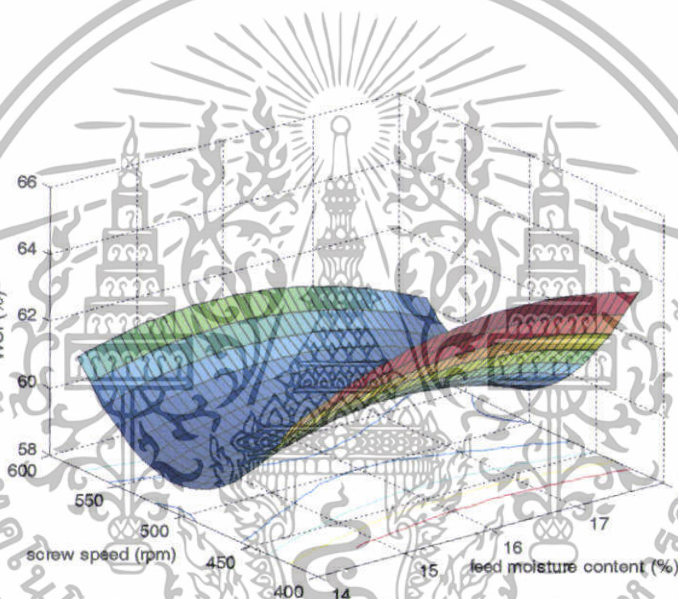


อุณหภูมิ 100 °C

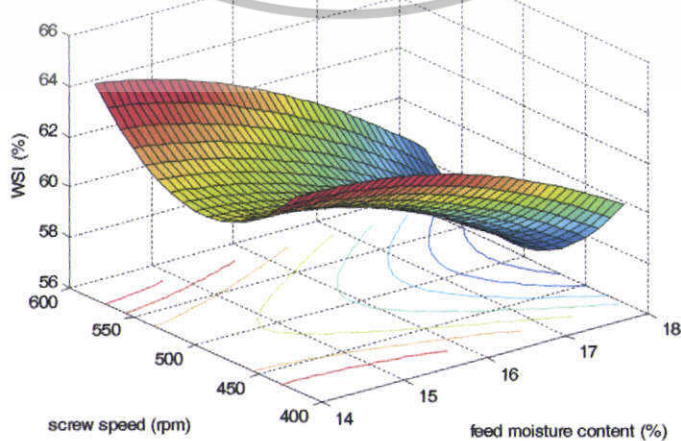
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่สถานะอุณหภูมิต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีผลต่อต้นทุนวัตถุดิบและพลังงานที่ใช้ในการดำเนินการค้า



อุณหภูมิ 80 °C



อุณหภูมิ 90 °C



อุณหภูมิ 100 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรูที่มี
 ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม นอกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ผลคือความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ

4.2.7 ค่าความแข็ง (Hardness)

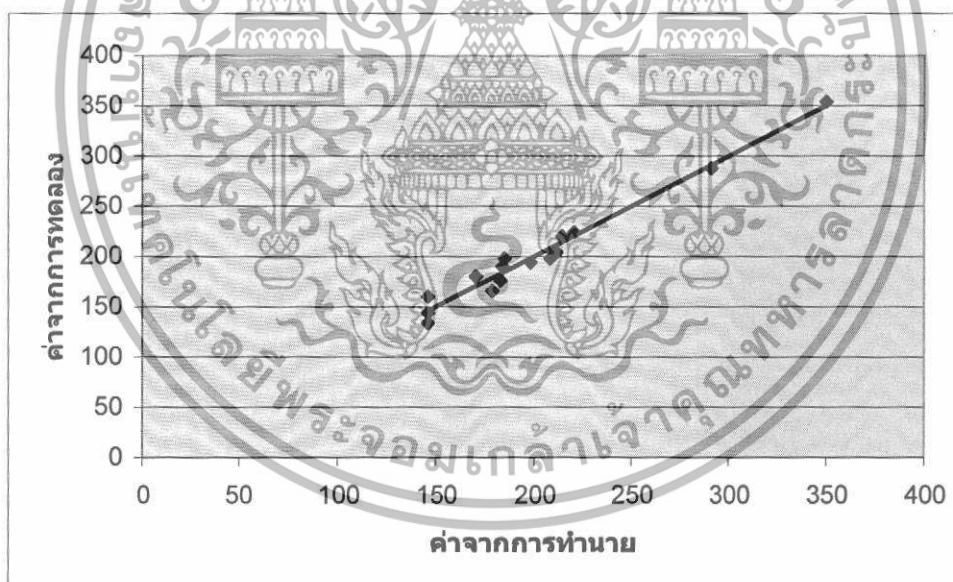
ค่าความแข็งที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 134.43-353.56 g/mm² และเมื่อนำค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{Hardness} = & (2770.553309) - (161.0242179) X_1 - (0.026223264) X_2 - (28.93522411) X_3 \\ & + (14.46768168) X_1^2 - (0.0000455705) X_2^2 + (0.474134512) X_3^2 \\ & + (0.032706341) X_1 X_2 - (3.462097477) X_1 X_3 - (0.005330696) X_2 X_3 \quad (4-7) \end{aligned}$$

$$R^2 = 0.6154 \quad \text{Standard Error} = 3.2021 \quad (p < 0.01)$$

(ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยแสดงในตารางที่ ข.7)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (4-7) แสดงในรูปที่ 4.19



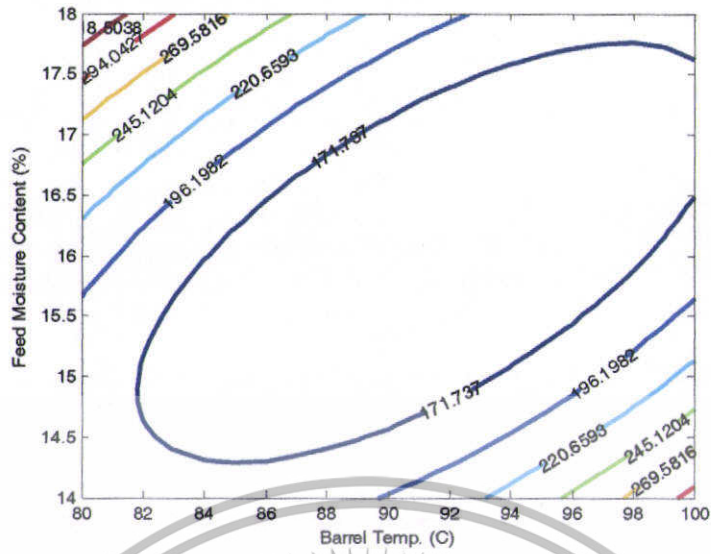
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าแรงแตกหักของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-7) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.20 และ 4.21 จากกราฟจะพบว่าความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบเป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าความแข็งสูงสุดของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดต รองลงมาคืออุณหภูมิบาร์เรล ที่สภาวะการผลิตที่ใช้อุณหภูมิบาร์เรลต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งสูง ขณะที่การเพิ่มหรือลดความเร็วรอบของสกรูไม่ค่อยมีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มากนัก ในขณะที่เมื่อเพิ่มความชื้นของวัตถุดิบเริ่มต้นจะทำให้ค่าความแข็งที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากในวัตถุดิบมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มาก



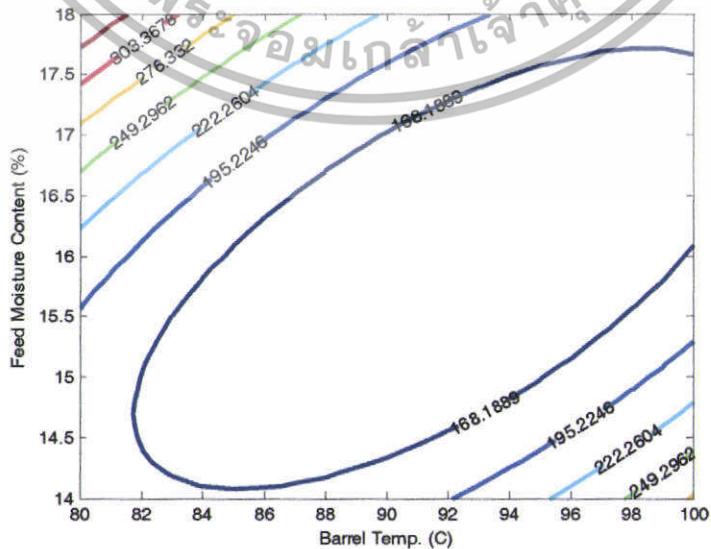
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความเร็วรอบสกรู 420 rpm

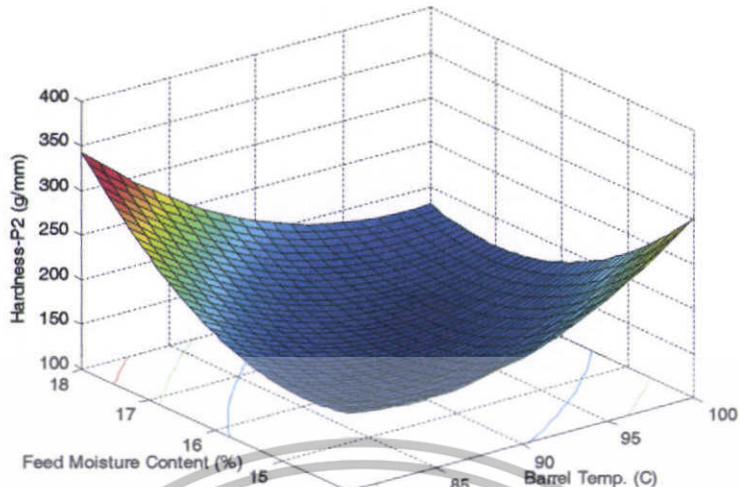


ความเร็วรอบสกรู 500 rpm

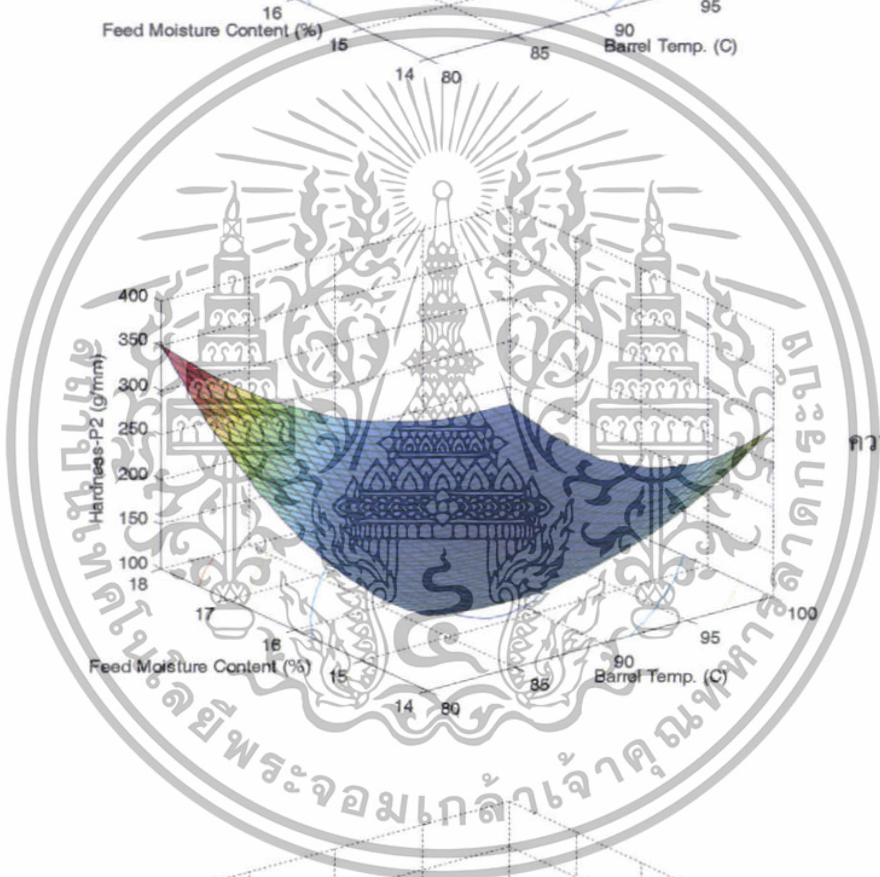


ความเร็วรอบสกรู 580 rpm

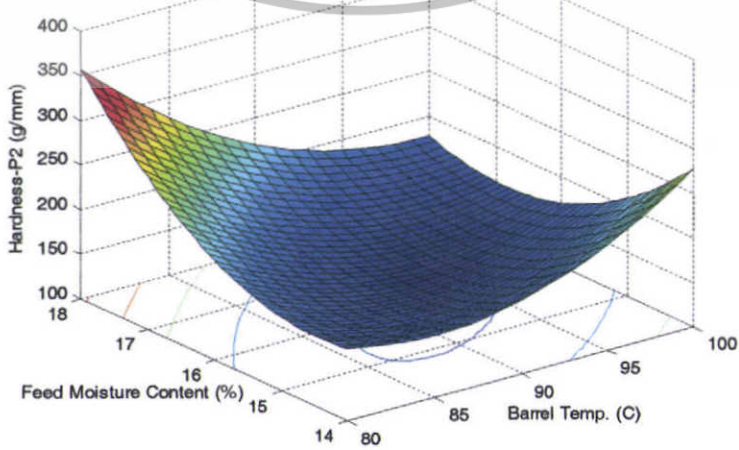
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาค้นคว้าวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิที่มี
ผลต่อค่าแรงแตกหักของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความเร็วรอบสกรูต่างๆ



ความเร็วรอบสกรู 420 rpm



ความเร็วรอบสกรู 500 rpm



ความเร็วรอบสกรู 580 rpm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบและอุณหภูมิที่มี
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ผลต่อค่าแรงแตกหักของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความเร็วรอบสกรู ต่างๆ

4.2.8 ความกรอบ (Crispness)

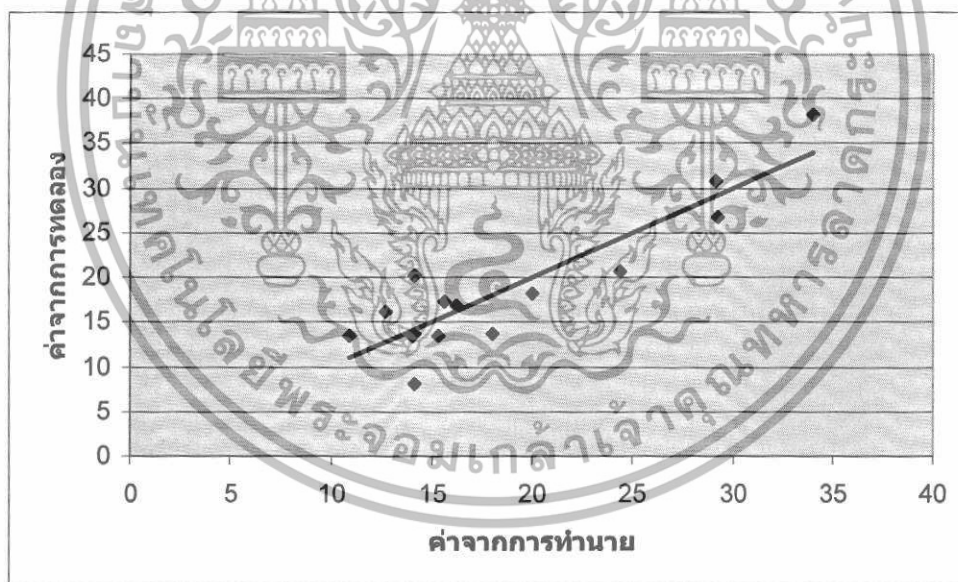
ค่าความกรอบที่ได้จากเอ็กซ์ทรูคตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 8.2-38.3 และเมื่อนำค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{Crispness} = & (451.90312) + (8.321875) X_1 - (0.488281) X_2 - (9.05625) X_3 \\ & - (0.30625) X_1^2 + (0.0005625) X_2^2 + (0.0645) X_3^2 \\ & + (0.0082812) X_1 X_2 - (0.03875) X_1 X_3 - (0.002375) X_2 X_3 \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$R^2 = 0.8137 \quad \text{Standard Error} = 5.6504$$

(ผลการวิเคราะห์ที่แบบจำลองแสดงในตารางที่ ข.8)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (4-8) แสดงในรูปที่ 4.22



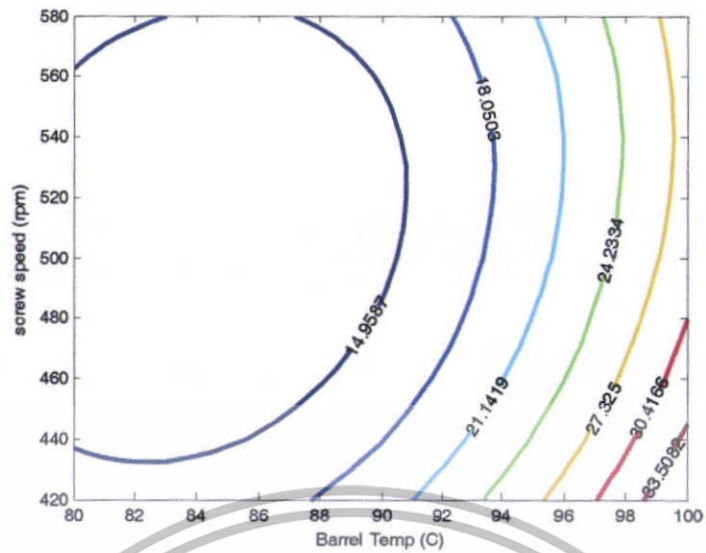
รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าความกรอบของเอ็กซ์ทรูคตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

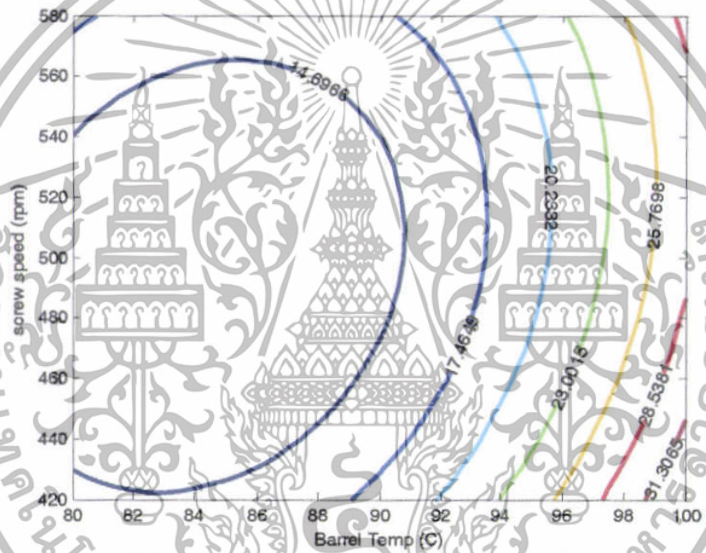
เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-8) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.23 และ 4.24 จากกราฟจะพบว่าเมื่อทำการผลิตโดยใช้อุณหภูมิของบารเรลสูงนั้นจะทำให้ค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่มีค่าสูงและจะมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบต่ำคือที่ 420 rpm อุณหภูมิบารเรล 100°C ความชื้นเริ่มต้น 14% นอกจากนี้ยังพบว่าในการผลิตที่สภาวะการผลิตที่มีความชื้นเริ่มต้นสูงนั้นจะทำให้ค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลง เนื่องจากในวัตถุดิบมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่มากจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสูงทำให้มีค่าความกรอบน้อยและมีความแข็งมาก



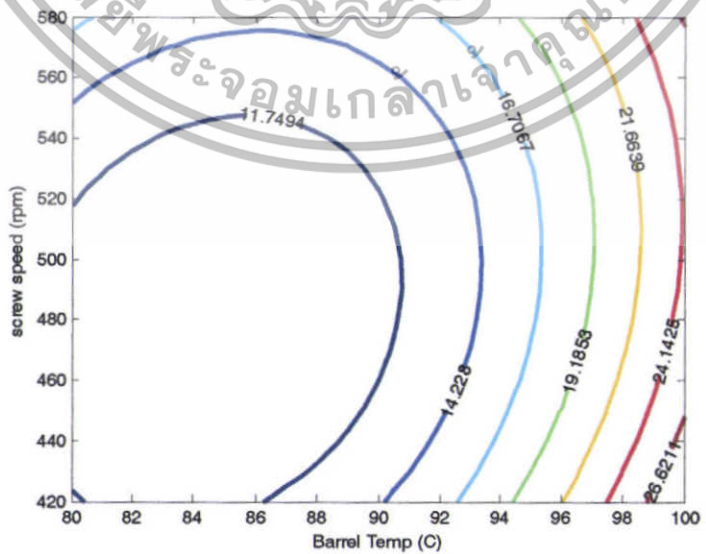
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความชื้นเริ่มต้น 14 %



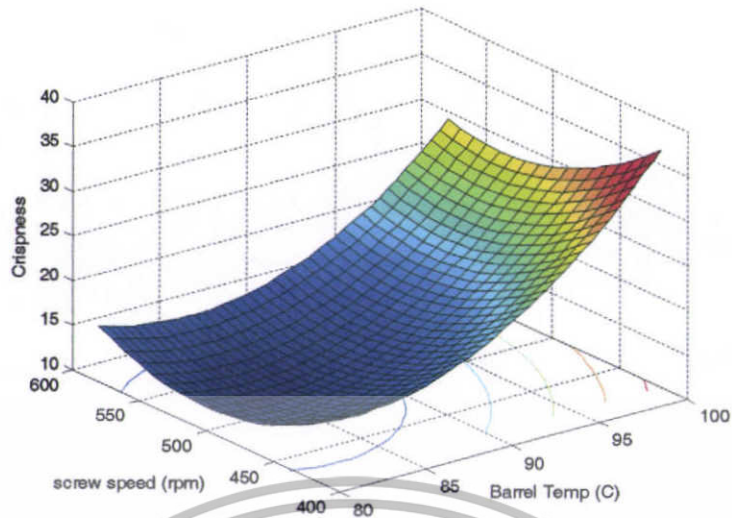
ความชื้นเริ่มต้น 16 %



ความชื้นเริ่มต้น 18 %

รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี

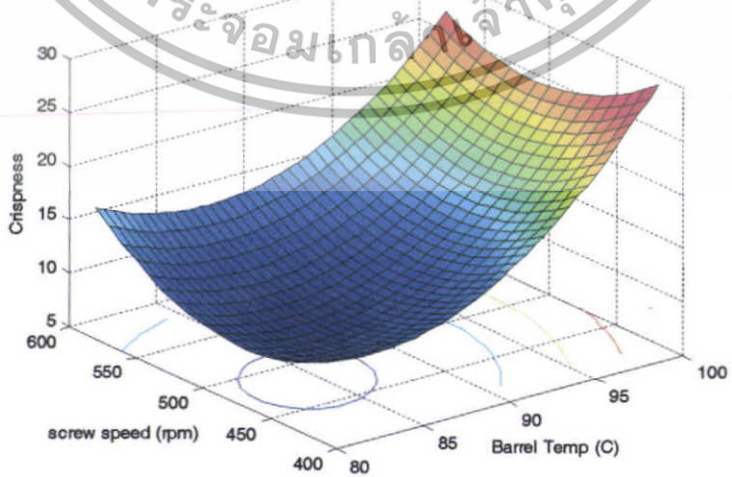
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่สถานะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความชื้นเริ่มต้น 14 %



ความชื้นเริ่มต้น 16 %



ความชื้นเริ่มต้น 18 %

รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สผลิตต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆ ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.9 ค่าความสว่างของสี (L*)

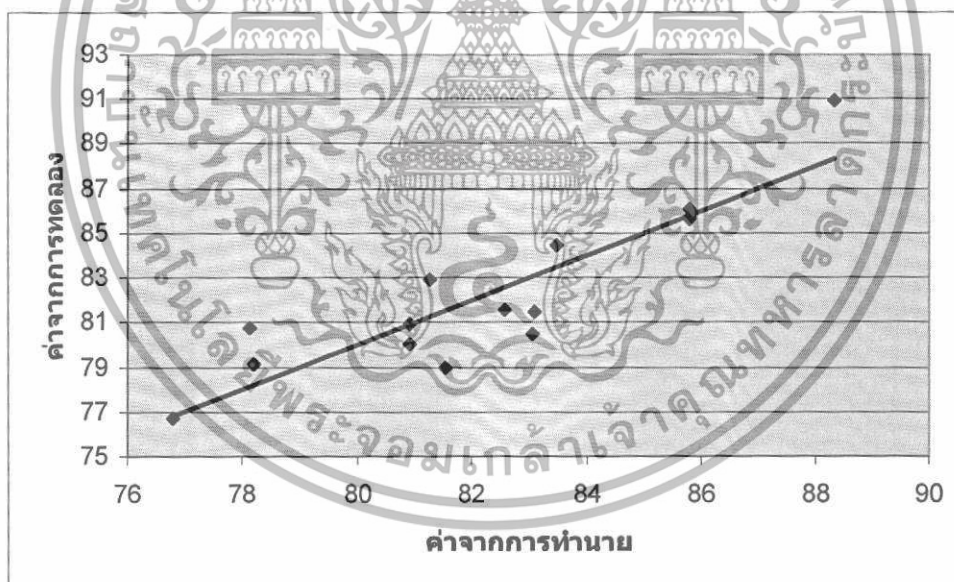
ค่าความสว่างของสีที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 76.75–90.91 และเมื่อนำค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็วรอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$L^* = - (566.2658438) + (15.229) X_1 + (0.353535937) X_2 + (9.87291875) X_3 - (0.171875) X_1^2 - (0.000175938) X_2^2 - (0.0459425) X_3^2 - (0.005934375) X_1 X_2 - (0.0833625) X_1 X_3 - (0.000650937) X_2 X_3 \quad (4-9)$$

$$R^2 = 0.8018 \quad \text{Standard Error} = 2.6866$$

(ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยแสดงในตารางที่ ๓.9)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (4-9) แสดงในรูปที่ 4.25



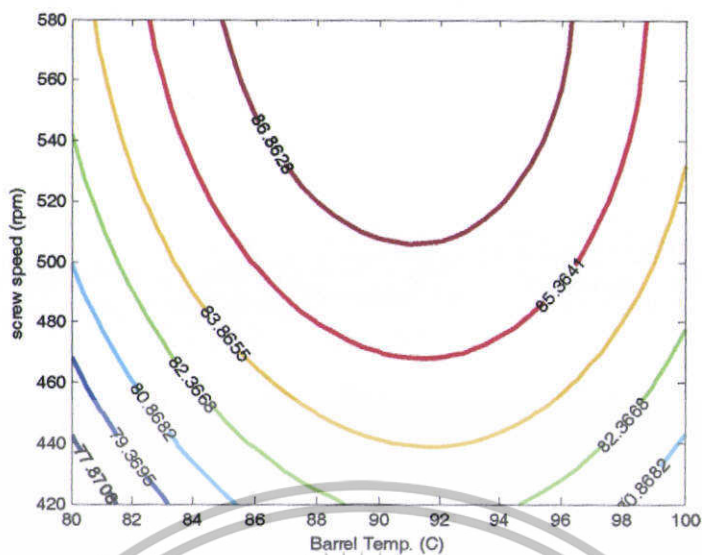
รูปที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าความสว่างของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

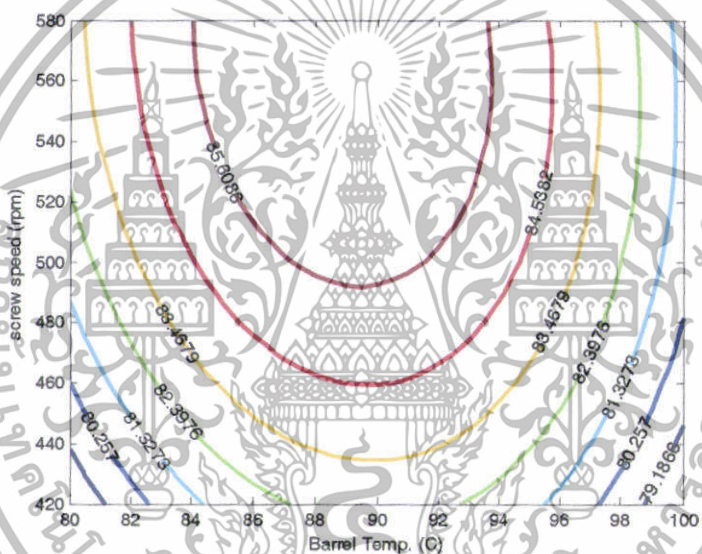
เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-9) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.26 และ 4.27 จากกราฟจะพบว่าการเพิ่มความเร็วรอบของสกรูจะทำให้ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราแคตสูงขึ้น ในขณะที่สภาวะการผลิตที่อุณหภูมิบาร์เรล 90°C จะให้ค่าความสว่างสูงสุด การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มหรือลดลงจากนี้ทำให้ความสว่างของผลิตภัณฑ์ลดลง



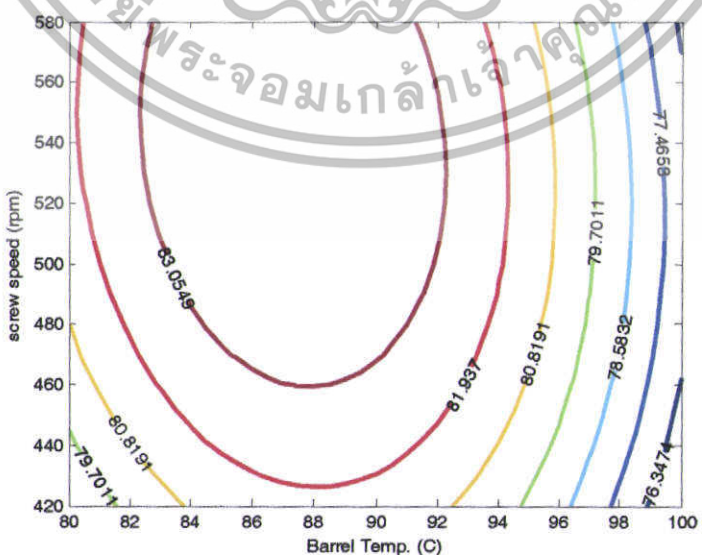
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความชื้นเริ่มต้น 14 %



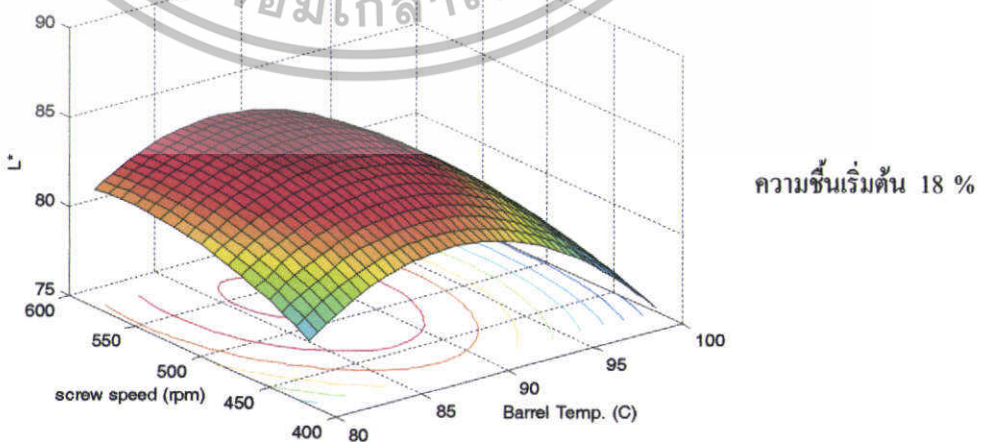
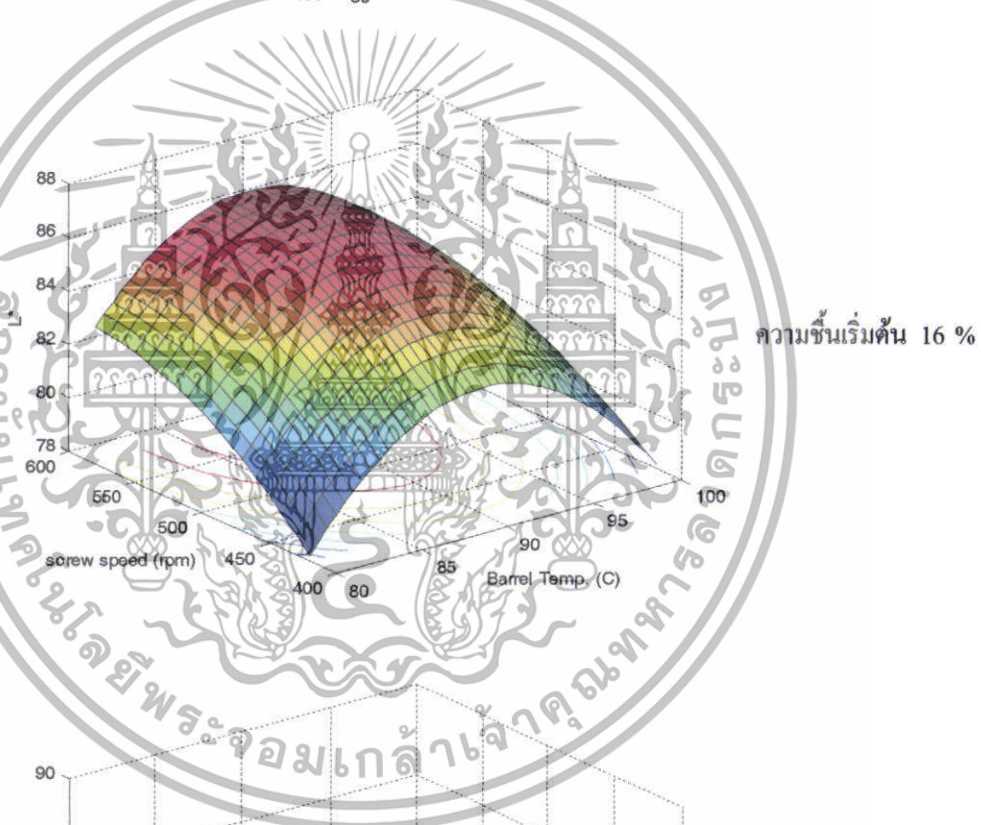
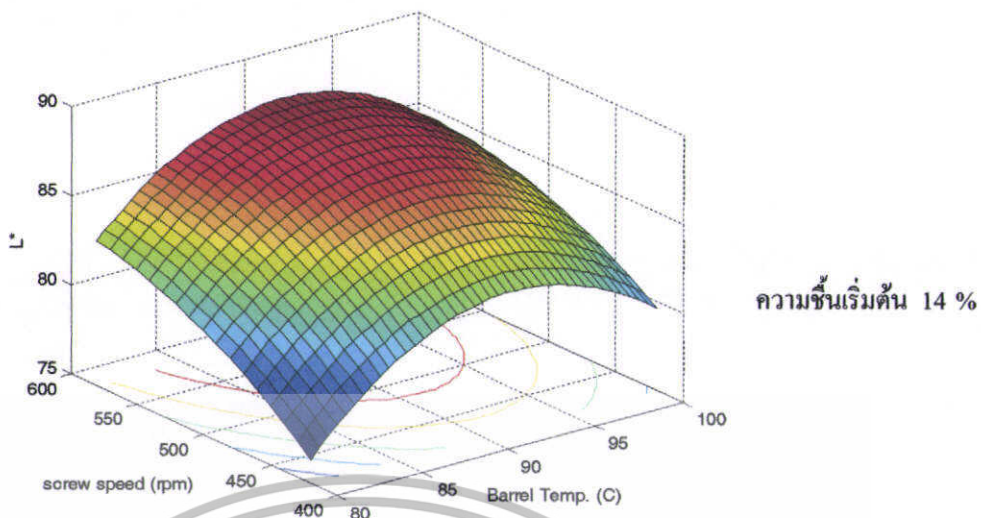
ความชื้นเริ่มต้น 16 %



ความชื้นเริ่มต้น 18 %

รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรตและความเร็วรอบของสกรูที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ห้ามใช้เพื่อการค้าหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย ผู้ที่ฝ่าฝืนจะถูกลงโทษตามกฎหมาย



รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สถานะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.10 ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม (b*)

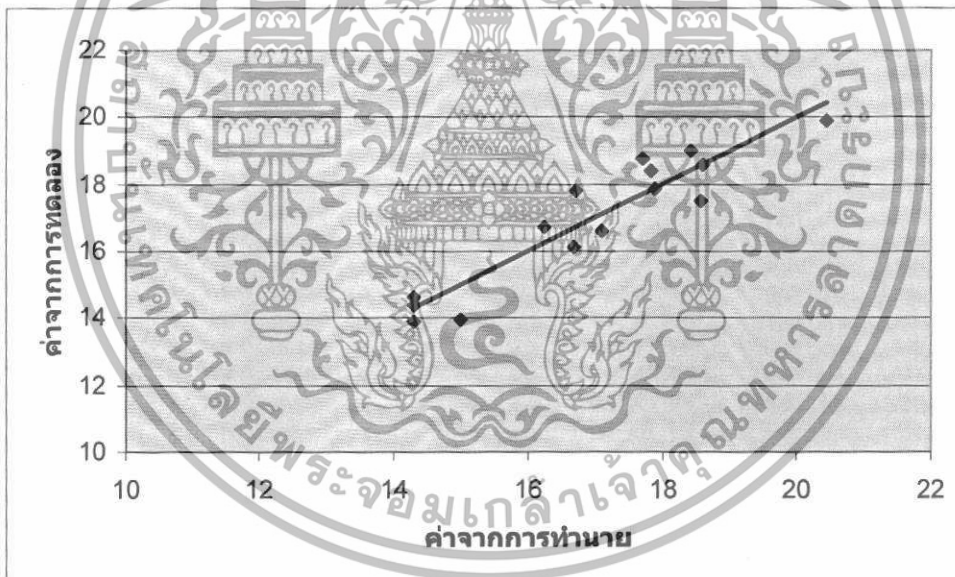
ค่าความเป็นสี่เหลี่ยม ที่ได้จากเอ็กซ์ทรูเดตในสภาวะต่างๆที่ผ่านการอบแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 13.923-19.873 และเมื่อนำค่าความเป็นสี่เหลี่ยม ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์มาสร้าง ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ได้แก่ ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X_1), ความเร็ว รอบของสกรู (X_2) และอุณหภูมิบาร์เรล (X_3) จะ ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned}
 b^* = & 459.1765 - (10.38289) X_1 - (0.437863) X_2 - (5.5713375) X_3 \\
 & + (0.1760416) X_1^2 + (0.0002796) X_2^2 + (0.0243566) X_3^2 + (0.0028593) X_1 X_2 \\
 & + (0.039075) X_1 X_3 + (0.001115625) X_2 X_3
 \end{aligned} \quad (4-10)$$

$$R^2 = 0.88024 \quad \text{Standard Error} = 1.13359 \quad (p < 0.1)$$

(ผลการวิเคราะห์แบบถดถอยแสดงในตารางที่ ข.10)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการ (4-10) แสดงในรูปที่ 4.28



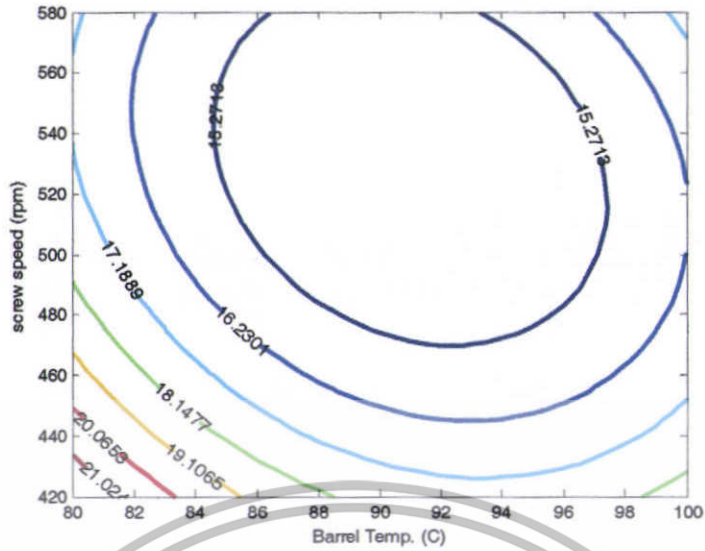
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าความเป็นสี่เหลี่ยมของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

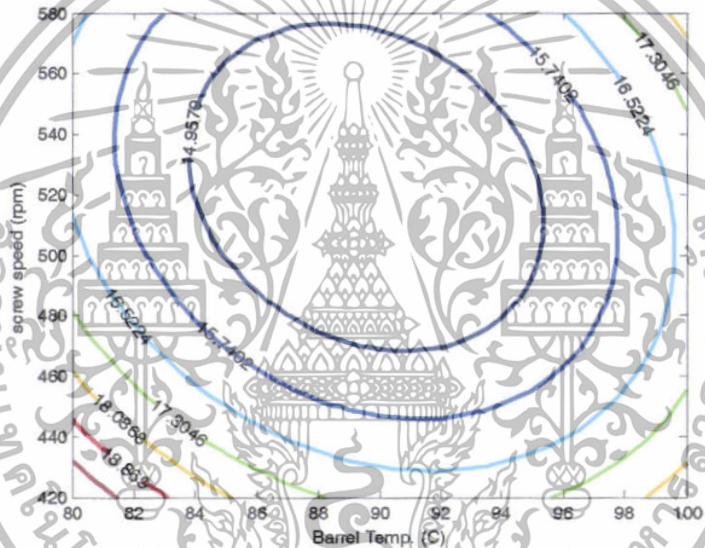
เมื่อนำผลที่ได้จากสมการ (4-10) มาพลอตกราฟแสดงได้ในรูปที่ 4.29 และ 4.30 จากกราฟ จะพบว่าที่สภาวะการผลิตที่อุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูตัวผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตจะ มีความเป็นสีเหลืองมาก ในขณะที่การเพิ่มความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบนั้นจะทำให้ค่าความเป็นสี เหลืองของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Onyang , 2004



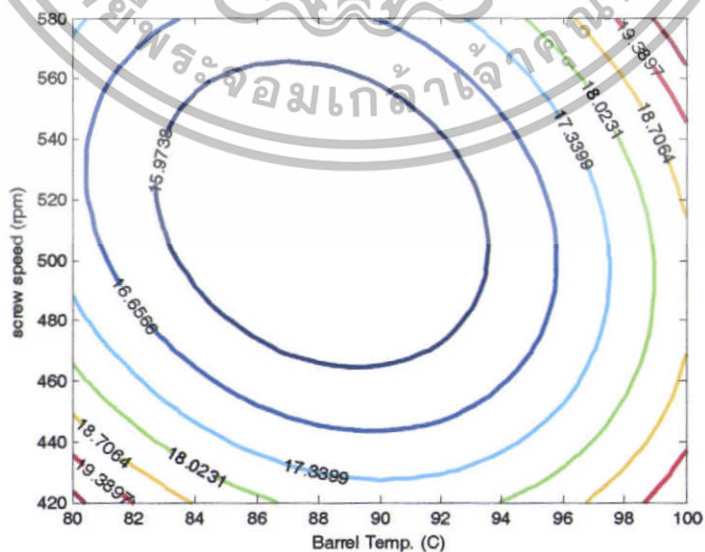
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



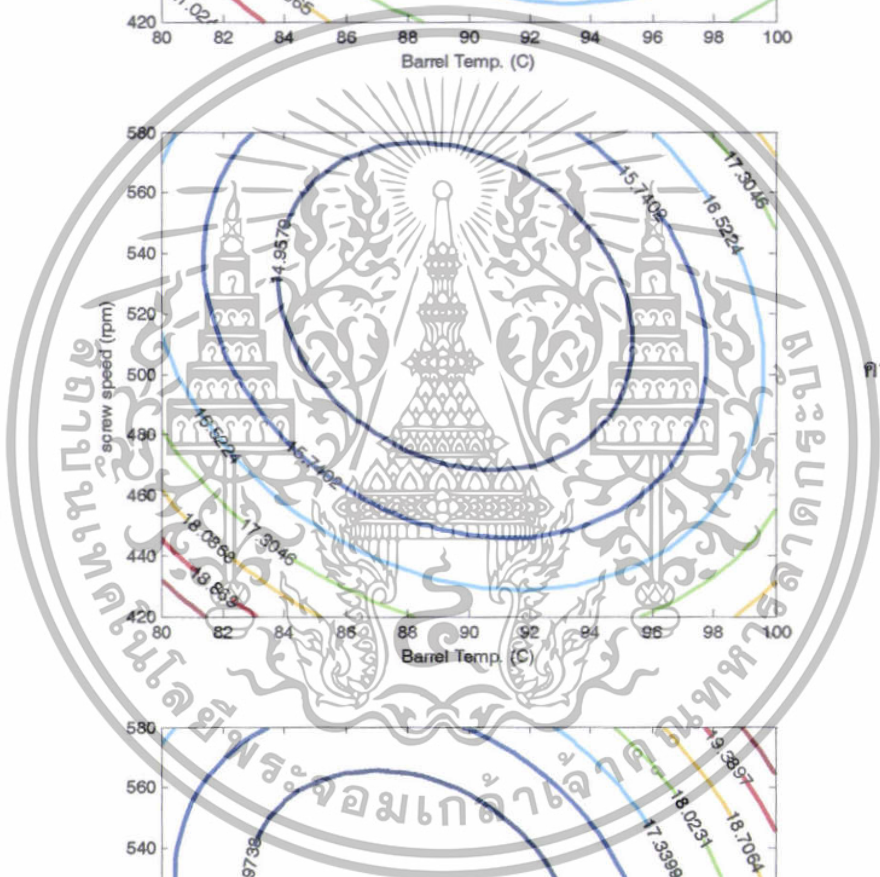
ความชื้นเริ่มต้น 14 %



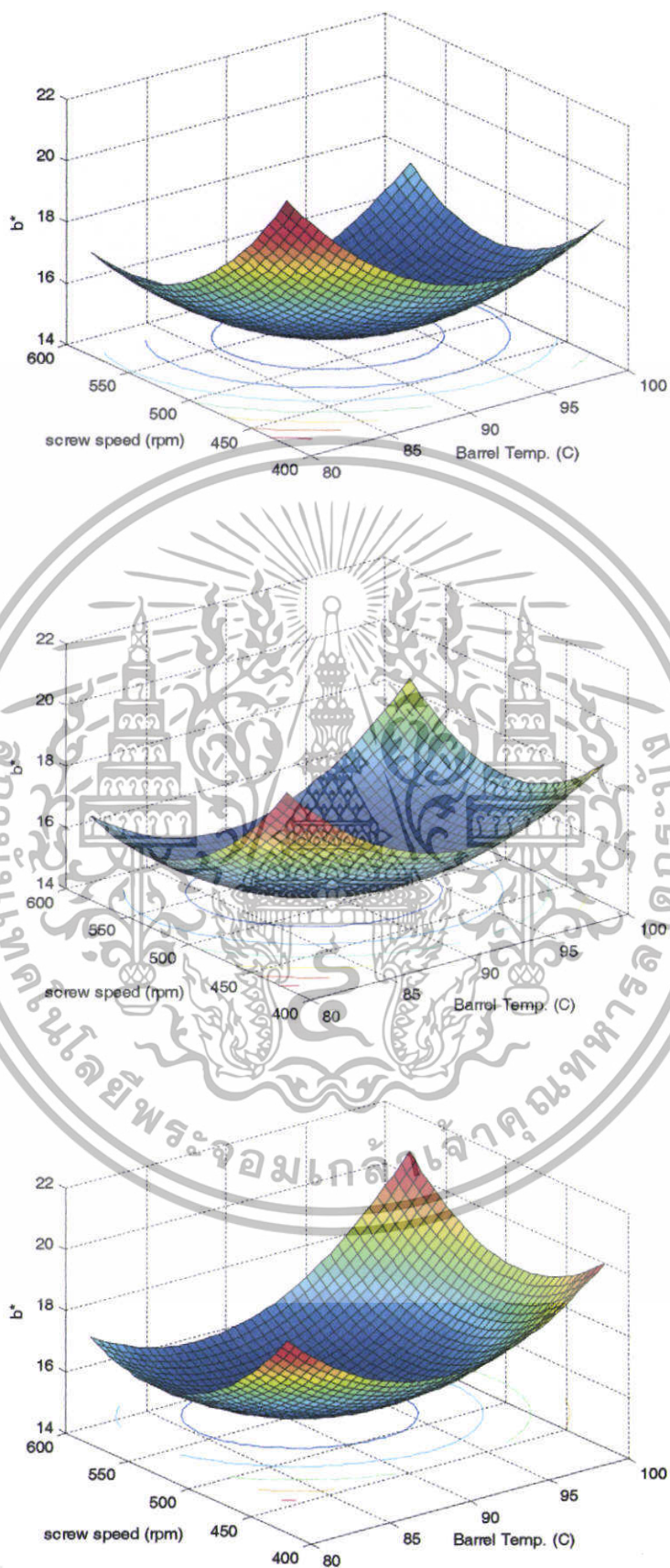
ความชื้นเริ่มต้น 16 %



ความชื้นเริ่มต้น 18 %



รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ผลคือค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิบาร์เรลและความเร็วรอบของสกรูที่มี

ผลต่อค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ที่สถานะความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นเป็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษากระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันโดยใช้วัตถุดิบจากลูกเดี๋ยในการศึกษา 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. ในสภาวะการผลิตที่ความเร็วรอบของสกรูดำเนินทำให้ความหนาแน่นรวมและความหนาแน่นจริงสูง, ความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำ, ความสว่างของผลิตภัณฑ์น้อย, มีความเป็นสีเหลืองสูง ในขณะที่ในสภาวะความเร็วรอบสูงนั้นจะให้ผลในทางตรงกันข้าม
4. ในสภาวะการผลิตที่อุณหภูมิบาร์เรลดำเนินมีผลทำให้ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดตที่ได้มีค่ามาก, ความหนาแน่นรวมต่ำ, ความหนาแน่นจริงสูง, อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์สูง, ความสามารถในการดูดซับน้ำสูง, ความสว่างน้อย, มีความกรอบน้อย ในขณะที่ในสภาวะการที่อุณหภูมิบาร์เรลสูงนั้นจะให้ผลในทางตรงกันข้าม
5. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการ โพลีโนเมียลลำดับที่สอง สามารถนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ดี เช่น ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต, ความหนาแน่น, อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ และความสามารถในการดูดซับน้ำ ในขณะที่ค่าความสามารถในการละลายน้ำมีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ
6. การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสามารถนำไปใช้ในการกำหนดแนวทางการผลิตเพื่อให้ได้เอ็กซ์ทรูเดตที่มีคุณลักษณะตามต้องการได้

เอกสารอ้างอิง

กมลวรรณ แจ่มชัด.2541. กระบวนการแปรรูปอาหารโดยวิธีเอ็กซ์ทรูชัน. วารสาร
อุตสาหกรรมเกษตร (2) 9.: น.8-4

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ.เทคโนโลยีของแป้ง.พิมพ์ครั้งที่ 2.สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.2543

นฤศันต์ วาสกคิลก. 2541. การพัฒนาขนมขบเคี้ยวจากปลายข้าวหอมมะลิ. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.105

เพ็ญขวัญ ชมปรีดา และทัศนีย์ ถิ่นสุวรรณ.2541. ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว. น.215-269 ใน
เอกสารการสอนชุดวิชา. 71433 มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, กรุงเทพฯ

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต. วิศวกรรมอาหาร : หน่วยปฏิบัติการในอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่
1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.2541

วรวิทย์ บุญลี.2541.การศึกษาเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์. วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 6-3

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.

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

Calvin Onyango, Thomas Henle, Anette Ziems, Thea Hofmann, Thomas
Bley.(2004).Effect of extrusion variables on fermented maize-finger millet blend in the
production of uji. *Journal of Food Science*, 37, 409-415

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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). Starch-based extruded foods.ch.12 In *Extrusion of foods V.II*, J.M.Harper (Ed). P.61-884. CRC Press Inc., Boca Raton, Fl.

Kenneth Helrich, AOAC, *Official Methods 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

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, Connecicut.415 p.

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

Park, J., Rhee, K.S., Kim, B.K. and Rhee, K.C.(1993)., Effect of extrusion parameters on the quality of buckwheat flour mixes. *Cereal Chemistry* 75

P.J.Fellows.(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

S. Thymi, M.K. Krokida, A. Pappa and Z.B. Maroulis.(2004). Structural properties of extruded corn starch. *Journal of Food Engineering*, 68, 519-526

<http://www.thaiherbclub.com>

<http://www.kpt.ac.th/etc/herb.htm>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของเอ็กซ์ทริคเตด

- ความชื้นหลังอบ
- ความหนาแน่นรวม
- ความหนาแน่นจริง
- อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์
- ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำ
- ค่าสี
- ลักษณะเนื้อสัมผัส
- ความหนืด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ความชื้นของเอ็กซ์ทรูคเตดหลังอบ

Sample	ครั้งที่	นน. ภาชนะ	นน.ฝา	นน.ตัวอย่าง ก่อนอบ	นน.ภาชนะ+นน.ฝา +นน.ตัวอย่าง (หลังอบ)	นน.ตัวอย่าง หลังอบ	ความชื้น (%)
1	1	13.1078	4.9132	2.2921	20.1989	2.1779	4.98
	2	13.0712	4.937	2.2246	20.1186	2.1104	5.13
	3	13.1275	4.965	2.2419	20.2173	2.1248	5.22
	เฉลี่ย						5.11
2	1	13.1203	4.982	1.8015	19.8347	1.7324	3.84
	2	13.0236	4.9049	1.8252	19.6858	1.7573	3.72
	3	12.7972	4.9193	1.7316	19.3785	1.662	4.02
	เฉลี่ย						3.86
3	1	13.0224	4.9706	1.1631	19.0669	1.1039	5.09
	2	12.8281	4.9765	1.1868	18.934	1.1294	4.84
	3	12.9051	4.9793	1.1218	18.9472	1.0628	5.26
	เฉลี่ย						5.0633
4	1	13.0183	4.9403	1.1404	19.0467	1.0874	4.65
	2	13.2113	4.9697	1.1047	19.2377	1.0567	4.35
	3	13.0532	5.0287	1.0968	19.1327	1.0508	4.19
	เฉลี่ย						4.4
5	1	12.8261	4.9396	1.1504	18.8384	1.0727	6.75
	2	12.9516	4.9809	1.267	19.1148	1.1823	6.69
	3	12.8686	4.9706	1.1978	18.9582	1.119	6.58
	เฉลี่ย						6.67
6	1	12.6982	4.9246	1.106	18.6556	1.0328	6.62
	2	12.9294	4.9653	1.1845	19.005	1.1103	6.26
	3	12.6045	4.9788	1.0899	18.6056	1.0223	6.2
	เฉลี่ย						6.36
7	1	12.784	4.972	1.833	19.4851	1.7291	5.67
	2	12.8616	4.9795	1.9928	19.7302	1.8891	5.2
	3	12.7913	5.1425	2.2874	20.0902	2.1564	5.72
	เฉลี่ย						5.53
8	1	12.681	4.9335	2.1634	19.6698	2.0553	4.99
	2	12.675	5.1347	2.0156	19.7229	1.9132	5.08
	3	12.6868	4.9835	2.0217	19.5849	1.9146	5.29
	เฉลี่ย						5.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	ครั้งที่	นน. ภาษา	นน.ฝา	นน.ตัวอย่าง ก่อนอบ	นน.ภาษา+นน.ฝา +นน.ตัวอย่าง (หลังอบ)	นน.ตัวอย่าง หลังอบ	ความชื้น (%)
9	1	12.8527	5.0445	1.1291	18.9547	1.0575	6.34
	2	13.0367	4.9648	1.0989	19.0305	1.029	6.36
	3	13.1275	4.9463	1.068	19.0755	1.0017	6.21
	เฉลี่ย						6.3
10	1	12.5611	4.987	1.2451	18.7136	1.1655	6.39
	2	12.4971	5.0079	1.1229	18.553	1.048	6.67
	3	12.7903	4.942	1.1981	18.852	1.1197	6.54
	เฉลี่ย						6.53
11	1	12.8343	4.9788	2.3463	20.0384	2.2253	5.18
	2	12.9165	4.9383	2.008	19.7546	1.8998	5.39
	3	12.4707	4.9863	2.0677	19.4098	1.9528	5.55
	เฉลี่ย						5.36
12	1	12.7564	4.996	2.165	19.7746	2.0222	6.6
	2	12.5616	4.9403	2.1096	19.4719	1.97	6.62
	3	12.93	4.9066	2.151	19.8474	2.0108	6.52
	เฉลี่ย						6.58
13	1	13.2338	4.9389	2.679	20.71	2.5373	5.29
	2	13.2338	4.9389	2.679	20.71	2.5373	5.29
	3	13.2338	4.9389	2.679	20.71	2.5373	5.29
	เฉลี่ย						5.29
14	1	13.0693	5.138	2.6942	20.765	2.5577	5.07
	2	13.0693	5.138	2.6942	20.765	2.5577	5.07
	3	13.0693	5.138	2.6942	20.765	2.5577	5.07
	เฉลี่ย						5.07
15	1	12.895	4.9355	2.7876	20.424	2.5935	6.96
	2	12.895	4.9355	2.7876	20.424	2.5935	6.96
	3	12.895	4.9355	2.7876	20.424	2.5935	6.96
	เฉลี่ย						6.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)

Sample	ครั้งที่	ปริมาตร (cm^3)	นน.ภาชนะ (g)	นน.ภาชนะ +นน.ตัวอย่าง (g)	นน.ตัวอย่าง (g)	ความหนาแน่นรวม (g/cm^3)
1	1	1000	157.14	261.4	104.26	0.104
	2	1000	157.13	261.22	104.09	0.104
	3	1000	157.12	261.16	104.04	0.104
	เฉลี่ย					0.104
2	1	1000	157.14	227.42	70.28	0.07
	2	1000	157.16	227.39	70.23	0.07
	3	1000	157.14	227.06	69.92	0.07
	เฉลี่ย					0.07
3	1	1000	157.13	276.12	118.99	0.119
	2	1000	157.11	275.61	118.5	0.119
	3	1000	157.16	271.74	114.58	0.115
	เฉลี่ย					0.118
4	1	1000	157.1	260.14	103.04	0.103
	2	1000	157.13	259.04	101.91	0.102
	3	1000	157.13	259.52	102.39	0.102
	เฉลี่ย					0.102
5	1	1000	157.11	261.25	104.14	0.104
	2	1000	157.12	260.2	103.08	0.103
	3	1000	157.12	260.81	103.69	0.103
	เฉลี่ย					0.103
6	1	1000	157.12	244.42	87.3	0.087
	2	1000	157.12	245.69	88.57	0.089
	3	1000	157.12	245.65	88.53	0.088
	เฉลี่ย					0.088
7	1	1000	157.13	239.01	81.88	0.082
	2	1000	157.11	238.69	81.58	0.082
	3	1000	157.14	238.61	81.47	0.081
	เฉลี่ย					0.082
8	1	1000	157.13	234.25	77.12	0.077
	2	1000	157.13	234.11	76.98	0.077
	3	1000	157.12	230.95	73.83	0.074
	เฉลี่ย					0.076

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	ครั้งที่	ปริมาตร (cm ³)	นน.ภาชนะ (g)	นน.ภาชนะ +นน.ตัวอย่าง (g)	นน.ตัวอย่าง (g)	ความหนาแน่นรวม (g/cm ³)
9	1	1000	157.12	239.79	82.67	0.083
	2	1000	157.16	239.32	82.16	0.082
	3	1000	157.13	240.44	83.31	0.083
	เฉลี่ย					0.082
10	1	1000	157.11	248.6	91.94	0.091
	2	1000	157.13	250.37	93.24	0.093
	3	1000	157.13	252.03	94.9	0.095
	เฉลี่ย					0.093
11	1	1000	157.14	237.14	80	0.08
	2	1000	157.13	236.95	79.82	0.08
	3	1000	157.14	234.6	77.46	0.077
	เฉลี่ย					0.079
12	1	1000	157.13	240.83	83.7	0.084
	2	1000	157.12	239.83	82.71	0.083
	3	1000	157.11	240.08	82.97	0.083
	เฉลี่ย					0.083
13	1	1000	157.12	248.35	91.23	0.091
	2	1000	157.12	248.28	91.16	0.091
	3	1000	157.11	249.5	92.39	0.092
	เฉลี่ย					0.091
14	1	1000	157.12	256.48	99.36	0.099
	2	1000	157.14	24.35	97.21	0.097
	3	1000	157.12	253.68	96.56	0.097
	เฉลี่ย					0.098
15	1	1000	157.13	252.05	94.92	0.095
	2	1000	157.13	251.7	94.57	0.095
	3	1000	157.1	251.64	94.54	0.095
	เฉลี่ย					0.095

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ความหนาแน่นจริง (g/cm^3)

Sample	ครั้งที่	ปริมาตร (cm^3)	นน.ภาชนะ (g)	นน.ภาชนะ +นน.ตัวอย่าง (g)	นน.ตัวอย่าง (g)	ความหนาแน่นจริง (g/cm^3)
1	1	100	35.53	92.04	56.51	0.565
	2	100	35.46	91.98	56.52	0.565
	3	100	35.49	89.47	53.98	0.54
	เฉลี่ย					0.557
2	1	100	35.39	65.71	30.32	0.303
	2	100	35.4	63.21	27.81	0.278
	3	100	35.42	64.56	29.14	0.291
	เฉลี่ย					0.291
3	1	100	35.38	101.51	66.13	0.661
	2	100	35.43	100.88	65.45	0.655
	3	100	35.41	100.59	65.18	0.652
	เฉลี่ย					0.656
4	1	100	35.4	91.15	55.75	0.558
	2	100	35.4	92.72	57.32	0.573
	3	100	35.4	91.9	56.5	0.565
	เฉลี่ย					0.565
5	1	100	35.42	92.84	57.42	0.544
	2	100	35.42	93.55	58.13	0.581
	3	100	35.42	93.23	57.81	0.578
	เฉลี่ย					0.578
6	1	100	35.42	79.34	43.92	0.439
	2	100	35.42	79.58	44.16	0.442
	3	100	35.42	80.03	44.61	0.446
	เฉลี่ย					0.442
7	1	100	35.43	97.96	62.53	0.625
	2	100	35.43	96.8	61.37	0.614
	3	100	35.45	97.11	61.66	0.617
	เฉลี่ย					0.619
8	1	100	35.47	72.45	36.98	0.37
	2	100	35.49	73.03	37.54	0.375
	3	100	35.47	72.52	37.05	0.371
	เฉลี่ย					0.372

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	ครั้งที่	ปริมาตร (cm ³)	นน.ภาชนะ (g)	นน.ภาชนะ+นน. ตัวอย่าง (g)	นน.ตัวอย่าง (g)	ความหนาแน่นจริง (g/cm ³)
9	1	100	35.4	83.22	47.82	0.478
	2	100	35.4	84.51	49.11	0.491
	3	100	35.4	84.6	49.2	0.492
	เฉลี่ย					0.487
10	1	100	35.42	86.03	50.61	0.506
	2	100	35.4	85.89	50.49	0.505
	3	100	35.4	86.85	51.45	0.515
	เฉลี่ย					0.509
11	1	100	35.54	79.56	44.02	0.44
	2	100	35.46	78.82	43.36	0.434
	3	100	35.46	81.17	45.71	0.457
	เฉลี่ย					0.444
12	1	100	35.5	90.38	54.88	0.549
	2	100	35.51	89.92	54.41	0.544
	3	100	35.49	89.88	54.39	0.544
	เฉลี่ย					0.546
13	1	100	35.34	83.62	48.28	0.483
	2	100	35.33	83.04	47.71	0.477
	3	100	35.35	82.53	47.18	0.472
	เฉลี่ย					0.477
14	1	100	35.34	86.2	50.86	0.509
	2	100	35.35	85.73	50.38	0.504
	3	100	35.34	86.03	50.69	0.507
	เฉลี่ย					0.507
15	1	100	35.33	86.82	51.49	0.515
	2	100	35.36	85.38	50.02	0.5
	3	100	35.34	80.3	51.96	0.52
	เฉลี่ย					0.512

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์

Sample	ครั้งที่	D_e	D_d	D_e / D_d
1	1	1.08	0.3	3.6
	2	1.07	0.3	3.57
	3	1.06	0.3	3.53
	เฉลี่ย			3.57
2	1	1.05	0.3	3.5
	2	1.18	0.3	3.93
	3	1	0.3	3.33
	เฉลี่ย			3.59
3	1	1.15	0.3	3.83
	2	1.15	0.3	3.83
	3	1.14	0.3	3.8
	เฉลี่ย			3.82
4	1	1.11	0.3	3.7
	2	1.13	0.3	3.77
	3	1.06	0.3	3.53
	เฉลี่ย			3.67
5	1	1.04	0.3	3.47
	2	0.99	0.3	3.3
	3	1.06	0.3	3.53
	เฉลี่ย			3.43
6	1	1.02	0.3	3.4
	2	0.99	0.3	3.3
	3	0.95	0.3	3.17
	เฉลี่ย			3.29
7	1	1.36	0.3	4.53
	2	1.35	0.3	4.5
	3	1.41	0.3	4.7
	เฉลี่ย			4.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	ครั้งที่	D_e	D_d	D_e / D_d
8	1	1	0.3	3.33
	2	1.03	0.3	3.43
	3	1.05	0.3	3.5
	เฉลี่ย			3.42
9	1	1.05	0.3	3.5
	2	0.94	0.3	3.13
	3	0.92	0.3	3.07
	เฉลี่ย			3.23
10	1	0.94	0.3	3.13
	2	1.1	0.3	3.67
	3	0.95	0.3	3.17
	เฉลี่ย			3.32
11	1	1.05	0.3	3.5
	2	1.1	0.3	3.67
	3	1.04	0.3	3.47
	เฉลี่ย			3.55
12	1	1.37	0.3	4.57
	2	1.23	0.3	4.1
	3	1.14	0.3	3.8
	เฉลี่ย			4.16
13	1	1.14	0.3	3.8
	2	1.08	0.3	3.6
	3	1.18	0.3	3.93
	เฉลี่ย			3.78
14	1	1.16	0.3	3.87
	2	1.01	0.3	3.37
	3	1.03	0.3	3.43
	เฉลี่ย			3.56
15	1	1.2	0.3	4.7
	2	1.16	0.3	3.87
	3	1.19	0.3	3.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ความสามารถในการดูดซับและละลายน้ำ

Sample	ของแข็งแห้ง	น้ำกลั่น	หลอด	บีกเกอร์	บีกเกอร์ +ของแข็ง+น้ำกลั่น	ฟอล์ย	ตะกอน +หลอด	ของเหลวใส +ฟอล์ย	ตะกอน	ของเหลวใส ระเหยแล้ว	WAI (g/g)	WSI (%)
1.1	2.5025	30.1447	13.0855	47.07	79.2125	1.519	17.1811	28.6117	4.0956	1.4524	1.637	58.038
1.2	2.5003	29.9952	13.0896	42.92	75.1213	1.4797	17.1420	28.6414	4.0524	1.4828	1.621	59.305
เฉลี่ย											1.629	58.672
2.1	2.5008	30.0061	13.085	47.07	79.4618	1.4737	17.3699	28.7156	4.2849	1.5769	1.713	63.056
2.2	2.5017	29.9772	13.0855	42.92	75.1933	1.5558	17.4460	28.4735	4.3605	1.5525	1.743	62.058
เฉลี่ย											1.728	62.557
3.1	2.5017	30.0418	13.1606	47.07	79.2996	2.2256	16.1156	30.4336	2.955	1.5407	1.181	61.586
3.2	2.5015	29.9928	13.0946	42.92	75.1462	2.0395	16.0290	30.3388	2.9344	1.5661	1.173	62.606
เฉลี่ย											1.177	62.096
4.1	2.5014	30.0421	13.0853	47.07	79.1939	2.6601	15.9145	30.7722	2.8292	1.578	1.131	63.085
4.2	2.5042	30.0298	13.0917	42.92	75.1673	1.8166	15.8431	-	2.7514	1.611	1.099	64.332
เฉลี่ย											1.115	63.709
5.1	2.5041	30.0252	13.0949	47.07	79.6344	1.9992	16.8889	29.6225	3.794	1.5051	1.515	60.105
5.2	2.5013	30.0224	13.1601	42.92	75.3384	1.8665	16.8832	29.7360	3.7231	1.4847	1.488	59.357
เฉลี่ย											1.502	59.731

Sample	ของแข็งแห้ง	น้ำกลั่น	หาคอด	บีกเกอร์	บีกเกอร์+ของแข็ง +น้ำกลั่น	ฟอสฟอรัส	ตะกอน +หาคอด	ของเหลวใส +ฟอสฟอรัส	ตะกอน	ของเหลวใส ระเหยแล้ว	WAI (g/g)	WSI (%)
6.1	2.5042	30.0016	13.0891	47.07	79.3859	2.2213	16.6988	30.2035	3.6097	1.5757	1.441	62.922
6.2	2.3836	30.0602	13.0887	42.92	75.5119	2.0980	16.7955	29.9431	3.7068	1.4499	1.555	60.828
เฉลี่ย											1.498	61.875
7.1	2.5014	30.0096	13.0842	47.07	79.2	1.7165	16.8177	29.3025	3.7335	1.4812	1.943	59.215
7.2	2.5040	30.0620	13.0854	42.92	75.1033	1.6613	16.7965	29.2514	3.7111	1.4826	1.482	59.209
เฉลี่ย											1.488	59.212
8.1	2.5029	30.0394	13.1623	47.07	79.3665	1.6090	17.7417	28.4942	4.5794	1.5287	1.830	61.077
8.2	2.5008	30.0223	13.0947	42.92	75.2358	1.9894	17.7534	27.2974	4.6587	1.0373	1.863	41.479
เฉลี่ย											1.847	51.278
9.1	2.5032	30.0537	13.1594	47.07	79.2758	1.5923	16.6237	29.3223	3.4643	1.5191	1.384	60.686
9.2	2.5116	30.0702	13.1111	42.92	75.2013	1.8314	16.5915	29.5979	3.4804	1.5286	1.386	60.862
เฉลี่ย											1.385	6.774
10.1	2.5013	30.0091	13.1764	47.07	79.4131	1.6723	16.9594	29.3605	3.783	1.5072	1.512	60.257
10.2	2.5012	30.0290	13.1169	42.92	75.2260	1.9949	16.7546	29.6904	3.6377	1.5305	1.454	61.191
เฉลี่ย											1.483	60.724

Sample	ของแข็งแห้ง	น้ำกลั่น	หลดอด	บีกเกอร์	บีกเกอร์+ของแข็ง +น้ำกลั่น	ฟอสฟอรัส	ตะกอน +หลดอด	ของเหลวใส +ฟอสฟอรัส	ตะกอน	ของเหลวใส ระเหยแล้ว	WAI (g/g)	WSI (%)
11.1	2.4996	29.9906	13.0833	47.07	79.1661	1.7142	17.0201	29.0206	3.9368	1.5201	1.575	60.814
11.2	2.5029	30.0065	13.0833	42.92	75.2362	1.4855	17.1542	28.7597	4.0709	1.5490	1.626	61.888
เฉลี่ย											1.601	61.351
12.1	2.5032	30.0749	13.0936	47.07	79.4571	2.0061	16.1182	30.5080	3.0246	1.6017	1.208	63.986
12.2	2.5012	30.0652	13.1585	42.92	75.3806	1.7162	16.1334	30.2385	2.9749	1.6369	1.189	65.445
เฉลี่ย											1.199	64.716
13.1	2.5046	30.0502	13.0959	47.07	79.5842	2.0290	17.3223	29.2323	4.2264	1.5437	1.687	61.635
13.2	2.5077	30.0050	13.1674	42.92	75.2492	1.9531	17.2405	28.7440	4.0731	1.5457	1.624	61.638
เฉลี่ย											1.656	61.637
14.1	2.5097	30.0137	13.1049	47.07	79.2117	1.8720	17.7139	28.4521	4.609	1.4755	1.836	58.792
14.2	2.4932	30.0341	13.0841	42.92	75.2029	1.7972	17.7693	28.3970	4.6852	1.4634	1.879	58.696
เฉลี่ย											1.858	58.744
15.1	2.5020	30.0361	13.094	47.07	79.0424	1.9357	17.1047	28.9240	4.0107	1.5085	1.603	60.292
15.2	2.5002	30.0081	13.1594	42.92	74.7201	1.3575	17.2177	28.1139	4.0583	1.4747	1.623	58.983
เฉลี่ย											1.613	59.638

ตารางที่ ก.6 ค่าสี

Sample	ครั้งที่	L*	a*	b*
ลูกเคียวคียบ	1	84.34	2.54	12.26
	2	84.3	2.44	12.2
	3	84.15	2.52	11.88
	เฉลี่ย	84.263333	2.5	12.113333
1	1	84	4.64	16.57
	2	84.64	4.55	16.01
	3	84.78	4.7	15.77
	เฉลี่ย	84.473333	4.63	16.116667
2	1	90.94	4.34	13.83
	2	90.94	4.48	14.03
	3	90.84	4.34	13.96
	เฉลี่ย	90.906667	4.386667	13.94
3	1	79.06	1.59	18.85
	2	78.86	1.58	18.63
	3	78.98	1.6	18.77
	เฉลี่ย	78.966667	1.59	18.75
4	1	81.51	1.9	18.46
	2	81.63	1.85	18.42
	3	81.67	1.72	18.33
	เฉลี่ย	81.603333	1.823333	18.403333
5	1	77.03	5.37	18.72
	2	76.58	5.54	18.65
	3	76.63	5.47	18.41
	เฉลี่ย	76.746667	5.46	18.593333
6	1	81.45	4.66	16.83
	2	81.37	4.72	16.82
	3	81.6	4.69	16.5
	เฉลี่ย	81.473333	4.69	16.716667
7	1	82.79	4.86	16.61
	2	83.33	4.94	16.71
	3	82.58	4.95	16.53
	เฉลี่ย	82.9	4.916667	16.616667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	ครั้งที่	L*	a*	b*
8	1	80.79	4.89	18.1
	2	80.88	5.03	17.92
	3	81.2	4.88	17.58
	เฉลี่ย	80.956667	4.9333333	17.866667
9	1	79.99	4.92	19.04
	2	80.05	4.95	19.14
	3	79.95	4.83	18.76
	เฉลี่ย	79.996667	4.9	18.98
10	1	80.75	4.66	17.7
	2	80.92	4.69	17.44
	3	80.56	4.74	17.39
	เฉลี่ย	80.743333	4.6966667	17.51
11	1	80.29	4.44	17.75
	2	80.71	4.3	17.84
	3	80.38	4.32	17.73
	เฉลี่ย	80.46	4.3533333	17.773333
12	1	79.88	4.44	19.51
	2	78.99	4.73	19.9
	3	78.5	4.7	20.21
	เฉลี่ย	79.123333	4.6233333	19.873333
13	1	85.94	4.18	14.54
	2	85.62	4.36	14.37
	3	85.6	4.39	14.2
	เฉลี่ย	85.72	4.31	14.37
14	1	85.42	4.4	14.12
	2	85.32	4.5	14.11
	3	86.13	4.32	13.54
	เฉลี่ย	85.623333	4.4066667	13.923333
15	1	85.96	4.06	14.91
	2	85.36	4.02	14.86
	3	86.86	3.8	14.13
	เฉลี่ย	86.06	3.96	14.633333

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงแก้ไข และต้องแจ้งชื่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ค่า Hardness (g/mm²) โดยใช้หัวกดแบบ Warner-Blatzer Blade

ครั้งที่ Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
1	13.122275	12.052351	12.509038	18.033156	18.395116	13.29777	16.28219	17.606383	16.663095	17.437868	15.539924
2	15.716815	18.446967	16.985169	12.805186	10.293407	18.507792	10.705223	20.13611	18.339276	14.996885	15.693283
3	15.142467	14.724668	20.896923	10.187711	11.379286	17.869626	19.225728	13.674686	18.139849	8.922349	15.016329
4	3.7203044	10.859779	8.2801951	6.8991655	14.856289	4.5778391	16.048861	7.0607011	10.333293	12.955753	9.5592181
5	5.6716944	3.4460928	17.503678	6.454444	8.0877484	10.709212	10.91861	8.5095358	13.228968	6.3856418	9.0915625
6	15.682913	15.172381	23.818524	17.938429	0	25.489719	11.634552	12.13611	15.490466	13.298767	16.740207
7	11.818024	9.6003997	10.681292	9.7768923	11.055217	11.188833	14.496324	12.841083	15.233206	4.03141	11.072268
8	8.742865	8.8236328	10.1568	5.8771038	10.258508	11.833978	15.444598	10.387138	16.179485	12.164029	10.986814
9	14.563132	11.354357	16.407829	0	8.1435879	11.828993	7.6031416	8.3489973	7.0507298	12.767295	10.896451
10	13.368567	10.792971	7.9022816	7.860402	12.650631	12.990653	11.477005	9.3840217	15.307991	12.805186	11.453971
11	17.152687	10.552662	13.64577	10.966472	15.756701	11.087125	10.293407	8.2831865	9.8257518	7.8324823	11.539625
12	15.084633	9.909511	9.7031044	9.0360222	16.091738	10.917613	14.391625	15.747727	8.0408831	8.4487107	11.737157
13	12.486104	8.5922979	15.934191	5.482239	6.3397737	7.6480126	8.6730657	12.53596	10.691264	16.082763	10.446567
14	8.1884589	15.167395	9.3501192	11.884832	7.6310613	15.190329	11.124019	11.67344	15.358845	8.8196443	11.438814
15	19.46504	11.173876	16.816654	19.327435	16.223359	17.935437	20.231835	12.162035	7.7726543	9.5036777	15.0612

ตารางที่ ก.8 ค่า Hardness (g/mm^2) โดยใช้หัวกดแบบ Probe P2

ครั้งที่ Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
1	714.8525	606.9685	184.6625	230.2605	546.136	111.4905	494.639	257.0695	227.308	575.315	394.8702
2	40.8615	33.6845	243.9985	147.7165	89.1135	74.471	117.5395	74.43	64.9805	214.8145	110.161
3	319.286	657.84	423.0635	356.8005	574.3945	727.8285	503.243	140.2645	87.6215	278.3645	406.87065
4	234.4925	134.908	478.93	722.076	160.514	55.585	122.456	97.5385	182.511	167.5215	235.65325
5	143.4635	89.806	82.4245	257.238	620.0465	67.133	91.985	230.5465	50.878	70.1975	170.37185
6	197.9065	36.7625	151.402	366.6665	144.9925	38.8325	224.908	112.368	71.1525	65.5225	141.05135
7	283.61	545.9875	793.6435	74.503	43.2465	124.4715	855.096	145.571	134.8245	272.1715	327.3125
8	95.3935	83.1555	215.4045	135.3595	147.236	187.779	97.622	80.075	334.1105	151.007	152.71425
9	44.59	33.7645	114.67	231.6685	71.1005	39.2685	72.27	375.9965	71.269	328.041	138.26385
10	126.7545	92.2545	223.1455	68.046	100.468	80.615	135.588	161.2685	65.7805	231.1075	128.5028
11	82.539	84.5665	76.089	85.8285	182.069	105.4135	166.375	133.9815	264.906	294.2715	147.60395
12	322.6915	134.904	442.4835	252.592	550.356	258.503	500.1225	48.4145	168.237	241.688	291.9992
13	52.6845	559.8505	285.1	74.054	114.074	118.1615	286.3765	273.2115	364.747	147.3855	227.5645
14	183.965	304.87	322.796	357.657	101.7735	372.3015	260.046	326.4345	290.012	356.692	287.65475
15	223.1475	91.1865	352.7995	233.715	120.2325	257.4565	101.3065	99.359	49.8295	273.0255	180.2058

ตารางที่ ก.9 ค่า Crispness โดยใช้หัวกดแบบ Warner-Blatzer Blade

ครั้งที่ Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
1	47	48	29	46	37	39	44	72	62	75	49.9
2	43	27	52	41	44	44	26	28	44	38	38.7
3	9	25	58	9	4	18	22	45	4	8	20.2
4	16	7	50	47	72	10	42	4	33	31	31.2
5	22	13	26	48	25	69	39	27	8	12	28.9
6	11	41	19	36	38	37	40	42	53	49	36.6
7	42	10	25	65	52	30	73	20	30	65	41.2
8	51	52	36	25	27	55	49	49	44	65	45.3
9	26	15	40	7	27	41	10	29	19	49	26.3
10	8	23	41	14	47	28	9	13	63	9	25.5
11	73	65	58	0	114	47	33	65	49	49	55.3
12	21	20	20	63	68	48	38	52	65	52	44.7
13	38	46	26	61	48	32	40	51	50	61	45.3
14	68	35	60	36	64	56	38	50	59	39	50.5
15	30	37	57	22	25	67	54	31	57	6	38.6

ตารางที่ ก.10 ค่า Crispness โดยใช้หัวกดแบบ Probe P2

ครั้งที่ Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
1	9	2	24	21	10	58	8	25	12	5	17.4
2	36	20	2	6	7	16	19	32	22	9	16.9
3	3	5	6	25	3	2	6	37	34	13	13.4
4	6	35	8	0	26	23	24	31	18	11	18.2
5	9	13	31	3	3	30	23	25	35	36	20.8
6	10	49	18	1	17	46	11	23	49	44	26.8
7	4	2	1	54	35	9	0	4	16	9	13.4
8	33	20	4	17	3	3	27	35	2	19	16.3
9	51	37	18	12	31	59	46	1	50	4	30.9
10	45	58	16	50	26	56	40	18	62	12	38.3
11	15	38	18	8	7	12	8	22	6	4	13.8
12	14	24	4	4	2	14	3	46	15	10	13.6
13	14	5	11	37	37	3	4	4	9	14	13.8
14	1	3	2	6	51	3	2	2	11	1	8.2
15	16	37	10	10	25	17	20	36	31	1	20.3

ตารางที่ ก.11 ค่า Toughness (g.mm) โดยใช้หัวกดแบบ Warner-Blatzer Blade

ครั้งที่ Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
1	1193.218	2121.95	2166.626	1102.442	1245.372	1981.622	2131.416	5744.412	7066.558	222.932	2497.6548
2	1327.118	346.602	5261.444	1462.954	1326.524	2940.194	2375.214	1485.922	4186.476	1512.628	2222.5076
3	1215.628	2835.624	5951.968	1890.126	317.026	5351.762	1592.418	3318.666	1170.126	970.568	2461.3912
4	616.604	933.904	2755.168	2160.758	7791.956	422.082	4030.114	508.356	2352.168	2849.982	2442.1092
5	3604.046	1366.204	2589.722	5152.106	2967.576	6594.462	3651.484	2196.242	580.696	821.32	2952.3858
6	906.558	5519.872	2554.56	3262.886	2352.8	4807.524	3207.498	2888.852	5720.77	2660.394	3388.1714
7	4047.854	994.48	1380.004	2422.44	4559.58	2364.774	3983.61	1367.08	1780.874	2412.016	2531.2712
8	2237.288	1669.906	1011.864	1020.798	2114.004	2326.186	2446.308	1829.002	3589.098	3032.912	2127.7366
9	2582.184	1095.756	6315.336	559.894	1742.852	2990.026	831.652	3241.264	1677.218	7023.7	2805.9882
10	1792.862	2432.278	1890.06	1270.594	5028.428	2136.838	2032.236	2337.128	2990.734	1030.284	2294.1442
11	3531.456	2369.222	2862.892	0	5745.834	977.962	614.468	2037.028	912.136	2939.288	2199.0286
12	1084.7	1277.488	1573.344	1769.94	3425.81	2390.754	3344.11	3070.068	4977.032	2672.486	2558.5732
13	2405.678	2078.028	2397.908	4484.096	5074.034	1846.33	4240.808	3454.772	7091.954	5556.392	3863
14	4841.408	3006.684	5457.986	2354.098	1934.172	4227.918	2001.502	5771.822	7490.73	3147.318	4023.3638
15	2874.31	1898.9	5853.088	2076.7	2296.684	6415.504	3624.988	2678.022	5505.236	834.704	3405.8136

ตารางที่ ก.12 ค่า Toughness (g.mm) โดยใช้หัวกดแบบ Probe P2

ครั้งที่ Sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย
1	945.78	369.584	1017.554	2557.922	957.032	3558.854	533.596	2614.658	1396.068	1203.278	1515.4326
2	1179.122	1134.16	327.454	633.412	349.794	1568.18	1791.758	1745.204	1152.546	1617.824	1149.9454
3	193.232	505.692	633.368	1698.696	553.058	547.304	447.702	2391.362	1588.502	695.946	925.4862
4	141.144	1891.012	491.47	220.426	1155.424	379.558	1255.876	2130.622	902.868	779.872	934.8272
5	404.154	296.406	735.826	253.034	156.866	710.922	1366.574	1416.604	936.688	1290.136	756.721
6	616.356	1150.448	669.52	197.45	395.358	1377.938	326.778	997.67	2267.588	1399.172	939.8278
7	561.28	655.79	188.452	1789.762	865.328	515.544	248.322	312.594	1362.14	858.786	735.7998
8	1824.766	1874.154	641.8	1554.21	393.336	606.738	1496.696	2237.046	529.228	1982.284	1314.0258
9	1382.164	417.416	412.352	621.848	1111.864	817.6	1412.806	222.54	1248.92	175.612	782.3122
10	1533.928	1103.398	713.942	1068.926	1013.682	1978.91	1964.542	685.876	2041.596	514.892	1261.9692
11	710.84	1568.914	929	704.9	731.778	743.834	840.82	1177.78	331.222	1007.874	874.6962
12	1033.994	1063.356	270.242	325.014	263.162	729.334	218.026	824.974	960.35	718.552	640.7004
13	358.52	1000.31	494.748	1514.344	1850.046	501.428	761.982	637.594	1268.728	810.518	919.8218
14	111.328	299.39	173.368	399.13	1961.19	506.46	162.6	97.144	1600.642	477.434	578.8686
15	968.6	3531.178	773.54	972.284	715.366	1378.292	393.03	952.266	811.658	302.8	1079.9014

ตารางที่ ก.13 ค่าความหนืด (RVU)

Sample	ครั้งที่	Peak viscosity (RVU)	Holding strength (RVU)	Final viscosity (RVU)
ลูกเดือยดิบ	1	24.08	15.17	64.83
	2	20.83	12.75	58.42
	3	23.92	15.17	64.08
	เฉลี่ย	22.94333333	14.36333333	62.44333333
1	1	2.83	0.17	1.17
	2	1.83	-0.5	0.5
	3	0.83	-1.67	-0.17
	เฉลี่ย	1.83	-0.666666667	0.5
2	1	4.75	1.58	2.42
	2	3.25	0.33	0.75
	3	3.75	0.17	0.83
	เฉลี่ย	3.916666667	0.693333333	1.333333333
3	1	1.42	0.33	1.25
	2	3.67	0.17	0.5
	3	2.58	-0.08	0.75
	เฉลี่ย	2.556666667	0.14	0.833333333
4	1	7.83	1.92	2.33
	2	5.08	0.83	1.75
	3	6.17	1.08	2.17
	เฉลี่ย	6.36	1.276666667	2.083333333
5	1	-0.75	-2.58	-0.92
	2	-0.92	-2.75	-1.67
	3	-1.17	-3	-1.83
	เฉลี่ย	-0.946666667	-2.776666667	-1.473333333
6	1	1.5	-1.58	-0.83
	2	2.83	-1.75	-1.08
	3	0.33	-2.33	-0.92
	เฉลี่ย	1.553333333	-1.886666667	-0.943333333
7	1	0.17	-2	-1.17
	2	-0.75	-2	-1.33
	3	-1	-2.25	-1
	เฉลี่ย	-0.526666667	-2.083333333	-1.166666667

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sample	ครั้งที่	Peak viscosity (RVU)	Holding strength (RVU)	Final viscosity (RVU)
8	1	-0.25	-3.08	-1.92
	2	0.5	-2.58	-1.08
	3	1.25	-1.83	-0.75
	เฉลี่ย	0.5	-2.496666667	-1.25
9	1	1.25	-0.92	-0.08
	2	5.42	1.5	1.33
	3	3.5	-0.75	-0.08
	เฉลี่ย	3.39	-0.056666667	0.39
10	1	3.67	-0.17	0.83
	2	1.92	-0.83	0.25
	3	1.08	-1.5	-0.5
	เฉลี่ย	2.223333333	-0.833333333	0.193333333
11	1	0.67	-1.92	-0.67
	2	-0.17	-2.5	-1.08
	3	3.92	-2.42	-1.83
	เฉลี่ย	1.473333333	-2.28	-1.193333333
12	1	-0.92	-2.92	-2
	2	-1.83	-3.58	-2.92
	3	-0.25	-3.42	-2.75
	เฉลี่ย	-1	-3.306666667	-2.556666667
13	1	10.58	3.33	4.5
	2	6.42	2.83	3.83
	3	10.5	1.83	1.92
	เฉลี่ย	9.166666667	2.663333333	3.416666667
14	1	7	2.08	3.5
	2	10.58	1.25	2.67
	3	9.17	0.67	1.58
	เฉลี่ย	8.916666667	1.333333333	2.583333333
15	1	1.33	-0.17	0.67
	2	3.25	0.42	1.92
	3	2.58	0.33	0.92
	เฉลี่ย	2.386666667	0.193333333	1.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

- ข้อมูลแสดงค่าวิเคราะห์ทางสถิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความขึ้นของเอ็กซ์ทรูเดต

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.875087113
R Square	0.765777455
Adjusted R Square	0.144176875
Standard Error	0.735689019
Observations	15

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	8.847741667	0.884774	1.816358	0.296757312
Residual	5	2.706191667	0.541238		
Total	15	11.55393333			

	<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	27.135	58.97241564	0.46013	0.66474	-124.4584204	178.72842	-124.45842	178.7284204
X Variable 1	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
X Variable 2	5.569270833	3.668757263	1.518027	0.189464	-3.861569943	15.000112	-3.86156994	15.00011161
X Variable 3	0.024166667	0.081577714	0.296241	0.778956	-0.185535524	0.2338689	-0.18553552	0.233868857
X Variable 4	-1.6523125	0.784261834	-2.10684	0.088978	-3.668321725	0.3636967	-3.66832172	0.363696725
X Variable 5	-0.179791667	0.095716176	-1.87838	0.119124	-0.42583793	0.0662546	-0.42583793	0.066254597
X Variable 6	-6.97917E-05	5.98226E-05	-1.16664	0.295966	-0.000223571	8.399E-05	-0.00022357	8.39872E-05
X Variable 7	0.008658333	0.003828647	2.26146	0.073218	-0.001183517	0.0185002	-0.00118352	0.018500184
X Variable 8	0.000921875	0.002299028	0.400985	0.704993	-0.004987965	0.0068317	-0.00498797	0.006831715
X Variable 9	-0.00125	0.018392225	-0.06796	0.948449	-0.048528721	0.0460287	-0.04852872	0.046028721
X Variable 10	0.000309375	0.000459806	0.672839	0.530888	-0.000872593	0.0014913	-0.00087259	0.001491343

ตารางที่ ข.2 คำวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นรวมของเอ็กซ์ทรูคต

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.931815666
R Square	0.868280436
Adjusted R Square	0.43118522
Standard Error	0.007744891
Observations	15

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	0.001977017	0.000197702	3.662159242	0.111265993
Residual	5	0.000299917	5.99833E-05		
Total	15	0.002276933			

	<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	-0.334421875	0.620826065	-0.53867241	0.613220647	-1.93030607	1.261462329	-1.9303061	1.261462329
X Variable 1	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
X Variable 2	-0.047083333	0.038622466	-1.21906594	0.277188497	-0.14636554	0.052198877	-0.1463655	0.052198877
X Variable 3	-0.000413542	0.000858801	-0.48153373	0.650473138	-0.00262116	0.001794077	-0.0026211	0.001794077
X Variable 4	0.01936875	0.008256236	2.345953981	0.065890609	-0.00185458	0.040592081	-0.0018545	0.040592081
X Variable 5	0.000854167	0.001007642	0.847688429	0.435300595	-0.00173606	0.003444394	-0.0017360	0.003444394
X Variable 6	6.51042E-08	6.29776E-07	0.103376638	0.921682394	-1.5538E-06	1.684E-06	-1.554E-06	1.684E-06
X Variable 7	-0.000108333	4.03057E-05	-2.68779258	0.043413195	-0.00021194	-4.7243E-06	-0.0002119	-4.7242E-06
X Variable 8	2.8125E-05	2.42028E-05	1.162056412	0.297661374	-3.4090E-05	9.03402E-05	-3.409E-05	9.03402E-05
X Variable 9	0.0001125	0.000193622	0.581028206	0.586426383	-0.00038522	0.000610222	-0.0003852	0.000610222
X Variable 10	-2.1875E-06	4.84056E-06	-0.45191082	0.670261947	-1.4631E-05	1.02555E-05	-1.463E-05	1.02555E-05

ตารางที่ ข.3 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นจริงของเอ็กซ์ทรูเดต

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.963870621
R Square	0.929046573
Adjusted R Square	0.601330405
Standard Error	0.041514857
Observations	15

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	0.112834317	0.0112834	7.27430666	0.035409498
Residual	5	0.008617417	0.0017235		
Total	15	0.121451733			

	<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	1.782625	3.327807436	0.5356755	0.61514344	-6.771776343	10.33703	-6.77178	10.33703
X Variable 1	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
X Variable 2	-0.064927083	0.2070276	-0.3136156	0.76647449	-0.597108472	0.467254	-0.59711	0.467254
X Variable 3	-0.008365104	0.004603422	-1.817149	0.12888113	-0.020198578	0.003468	-0.0202	0.003468
X Variable 4	0.0251375	0.044255816	0.5680044	0.59458864	-0.088625696	0.138901	-0.08863	0.138901
X Variable 5	0.003104167	0.005401254	0.5747122	0.59037616	-0.010780199	0.016989	-0.01078	0.016989
X Variable 6	9.63542E-07	3.37578E-06	0.2854275	0.78676274	-7.71419E-06	9.64E-06	-7.7E-06	9.64E-06
X Variable 7	-8.33333E-05	0.00021605	-0.3857129	0.71557452	-0.000638708	0.000472	-0.00064	0.000472
X Variable 8	0.000273438	0.000129734	2.1076792	0.08888311	-6.00542E-05	0.000607	-6E-05	0.000607
X Variable 9	-0.0013875	0.001037871	-1.3368708	0.23886305	-0.004055433	0.00128	-0.00406	0.00128
X Variable 10	0.000025	2.59468E-05	0.9635105	0.37954311	-4.16983E-05	9.17E-05	-4.2E-05	9.17E-05

ตารางที่ ข.4 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราส่วนการขยายตัวของเอ็กซ์ทราเคต

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.92317
R Square	0.852242
Adjusted R Square	0.386279
Standard Error	0.230864
Observations	15

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	1.537082	0.153708	3.204356	0.136498
Residual	5	0.266492	0.053298		
Total	15	1.803573			

	<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>Upper95.0%</i>
Intercept	-18.3754	18.50595	-0.99294	0.366328	-65.9465	29.19568	-65.9465	29.19568
X Variable 1	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
X Variable 2	1.313021	1.151281	1.140486	0.30575	-1.64644	4.272484	-1.64644	4.272484
X Variable 3	0.004878	0.0256	0.190534	0.856385	-0.06093	0.070684	-0.06093	0.070684
X Variable 4	0.255	0.246107	1.036136	0.347627	-0.37764	0.887638	-0.37764	0.887638
X Variable 5	0.001771	0.030036	0.058956	0.955271	-0.07544	0.078982	-0.07544	0.078982
X Variable 6	-1.7E-05	1.88E-05	-0.89822	0.410235	-6.5E-05	3.14E-05	-6.5E-05	3.14E-05
X Variable 7	-0.0009	0.001201	-0.75256	0.485615	-0.00399	0.002184	-0.00399	0.002184
X Variable 8	-0.00027	0.000721	-0.36818	0.727811	-0.00212	0.001589	-0.00212	0.001589
X Variable 9	-0.01275	0.005772	-2.20909	0.078194	-0.02759	0.002086	-0.02759	0.002086
X Variable 10	0.000163	0.000144	1.126203	0.311211	-0.00021	0.000533	-0.00021	0.000533

ตารางที่ ข.5 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเอ็กซ์ทราคต (WAI)

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.92619
R Square	0.857829
Adjusted R Square	0.40192
Standard Error	0.125395
Observations	15

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	0.47437	0.047437	3.352089	0.127502
Residual	5	0.078619	0.015724		
Total	15	0.552989			

	<i>Coefficients</i>	<i>StandardError</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	-13.7843	10.05157	-1.37136	0.228606	-39.6227	12.05408	-39.6227	12.05408
X Variable 1	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
X Variable 2	-0.38078	0.625323	-0.60894	0.56917	-1.98822	1.226662	-1.98822	1.226662
X Variable 3	0.041595	0.013905	2.991491	0.030395	0.005853	0.077338	0.005853	0.077338
X Variable 4	0.183088	0.133674	1.369659	0.229102	-0.16053	0.526707	-0.16053	0.526707
X Variable 5	-0.00619	0.016314	-0.37927	0.720063	-0.04812	0.03575	-0.04812	0.03575
X Variable 6	-3E-05	1.02E-05	-2.93453	0.032462	-5.6E-05	-3.7E-06	-5.6E-05	-3.7E-06
X Variable 7	-0.00101	0.000653	-1.54005	0.184174	-0.00268	0.000672	-0.00268	0.000672
X Variable 8	0.000252	0.000392	0.641973	0.549162	-0.00076	0.001259	-0.00076	0.001259
X Variable 9	0.004538	0.003135	1.447429	0.20743	-0.00352	0.012596	-0.00352	0.012596
X Variable 10	-0.00016	7.84E-05	-1.9937	0.102763	-0.00036	4.52E-05	-0.00036	4.52E-05

ตารางที่ ข.6 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทรูเกต (WSI)

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.784488
R Square	0.615421
Adjusted R Square	-0.27682
Standard Error	3.202086
Observations	15

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	82.03945	8.203945	0.889026	0.601829
Residual	5	51.26676	10.25335		
Total	15	133.3062			

	<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	-136.103	256.6774	-0.53025	0.618633	-795.914	523.7069	-795.914	523.7069
X Variable 1	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
X Variable 2	21.59133	15.96826	1.35214	0.23427	-19.4564	62.63906	-19.4564	62.63906
X Variable 3	-0.49059	0.355067	-1.38169	0.225614	-1.40332	0.422135	-1.40332	0.422135
X Variable 4	3.228469	3.413499	0.945795	0.387682	-5.54621	12.00315	-5.54621	12.00315
X Variable 5	-0.26439	0.416605	-0.63462	0.553575	-1.3353	0.806531	-1.3353	0.806531
X Variable 6	0.000439	0.00026	1.686076	0.152591	-0.00023	0.001108	-0.00023	0.001108
X Variable 7	-0.00925	0.016664	-0.55496	0.602834	-0.05208	0.033589	-0.05208	0.033589
X Variable 8	-0.00355	0.010007	-0.35477	0.737236	-0.02927	0.022173	-0.02927	0.022173
X Variable 9	-0.12598	0.080052	-1.57366	0.176378	-0.33176	0.079806	-0.33176	0.079806
X Variable 10	0.001067	0.002001	0.533246	0.616705	-0.00408	0.006212	-0.00408	0.006212

ตารางที่ ข.7 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความแข็งของเอ็กซ์ทรูเดต

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.987933112
R Square	0.976011834
Adjusted R Square	0.732833136
Standard Error	14.44809543
Observations	15

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	42466.77193	4246.677193	22.60401	0.004329
Residual	5	1043.737307	208.7474615		
Total	15	43510.50923			

	<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	2770.553309	1158.151157	2.392220819	0.062216	-206.569	5747.676	-206.569	5747.676
X Variable 1	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
X Variable 2	-161.0242179	72.05021909	-2.234888664	0.075699	-346.235	24.18677	-346.235	24.18677
X Variable 3	-0.026223264	1.602093508	-0.016368123	0.987574	-4.14454	4.092089	-4.14454	4.092089
X Variable 4	-28.93522411	15.40201025	-1.878665423	0.119081	-68.5274	10.6569	-68.5274	10.6569
X Variable 5	14.46768168	1.879756813	7.696570952	0.000591	9.635613	19.29975	9.635613	19.29975
X Variable 6	-4.55705E-05	0.001174848	-0.038788453	0.97056	-0.00307	0.002974	-0.00307	0.002974
X Variable 7	0.474134512	0.075190273	6.305795898	0.001476	0.280852	0.667417	0.280852	0.667417
X Variable 8	0.032706341	0.045150298	0.724388146	0.501292	-0.08336	0.148769	-0.08336	0.148769
X Variable 9	-3.462097477	0.361202386	-9.58492417	0.000209	-4.3906	-2.5336	-4.3906	-2.5336
X Variable 10	-0.005330696	0.00903006	-0.59032787	0.58064	-0.02854	0.017882	-0.02854	0.017882

ตารางที่ ข.8 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความกรอบของเอ็กซ์ทุเรต

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.902044
R Square	0.813684
Adjusted R Square	0.278315
Standard Error	5.650442
Observations	15

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	697.1718	69.71718	2.426232	0.203798
Residual	5	159.6375	31.9275		
Total	15	856.8093			

	<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	451.9031	452.9363	0.997719	0.364221	-712.407	1616.213	-712.407	1616.213
X Variable 1	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
X Variable 2	8.321875	28.17781	0.295334	0.779609	-64.1115	80.75523	-64.1115	80.75523
X Variable 3	-0.48828	0.626556	-0.77931	0.471055	-2.09889	1.122332	-2.09889	1.122332
X Variable 4	-9.05625	6.023505	-1.50349	0.193038	-24.5402	6.427662	-24.5402	6.427662
X Variable 5	-0.30625	0.735146	-0.41658	0.694262	-2.196	1.583503	-2.196	1.583503
X Variable 6	0.000563	0.000459	1.224247	0.275392	-0.00062	0.001744	-0.00062	0.001744
X Variable 7	0.0645	0.029406	2.193442	0.07975	-0.01109	0.14009	-0.01109	0.14009
X Variable 8	0.008281	0.017658	0.46899	0.658814	-0.03711	0.053672	-0.03711	0.053672
X Variable 9	-0.03875	0.141261	-0.27431	0.794815	-0.40187	0.324373	-0.40187	0.324373
X Variable 10	-0.00238	0.003532	-0.67251	0.531078	-0.01145	0.006703	-0.01145	0.006703

ตารางที่ ข.๑ ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความสว่างของเอ็กซ์ทราเดค

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.89541965
R Square	0.801776349
Adjusted R Square	0.244973778
Standard Error	2.686574836
Observations	15

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	145.97069	14.597069	2.247114832	0.226121026
Residual	5	36.08842175	7.21768435		
Total	15	182.0591117			

	<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	-566.2658438	215.3543191	-2.62946128	0.046563484	-1119.851745	-12.67994293	-1119.851745	-12.67994293
X Variable 1	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
X Variable 2	15.229	13.39749634	1.13670492	0.307187401	-19.21036071	49.66836071	-19.21036071	49.66836071
X Variable 3	0.353535937	0.297903909	1.186744876	0.28863583	-0.412250439	1.119322314	-0.412250439	1.119322314
X Variable 4	9.87291875	2.863952096	3.447305828	0.018290676	2.510895518	17.23494198	2.510895518	17.23494198
X Variable 5	-0.171875	0.349534468	-0.491725468	0.643738402	-1.070381955	0.726631955	-1.070381955	0.726631955
X Variable 6	-0.000175938	0.000218459	-0.805356912	0.457186846	-0.000737504	0.000385629	-0.000737504	0.000385629
X Variable 7	-0.0459425	0.013981379	-3.285977792	0.021810096	-0.081882778	-0.010002222	-0.081882778	-0.010002222
X Variable 8	-0.005934375	0.008395546	-0.706847981	0.511231717	-0.027515814	0.015647064	-0.027515814	0.015647064
X Variable 9	-0.0833625	0.067164371	-1.241171456	0.269595735	-0.256014012	0.089289012	-0.256014012	0.089289012
X Variable 10	-0.000650937	0.001679109	-0.387668337	0.714215525	-0.004967225	0.00366535	-0.004967225	0.00366535

ตารางที่ ข.10 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าความเป็นสีเหลืองของเอ็กซ์ทรูคต

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.938212706
R Square	0.880243082
Adjusted R Square	0.464680629
Standard Error	1.133594122
Observations	15

ANOVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	10	47.22665477	4.722665477	4.083471267	0.093706708
Residual	5	6.425178167	1.285035633		
Total	15	53.65183293			

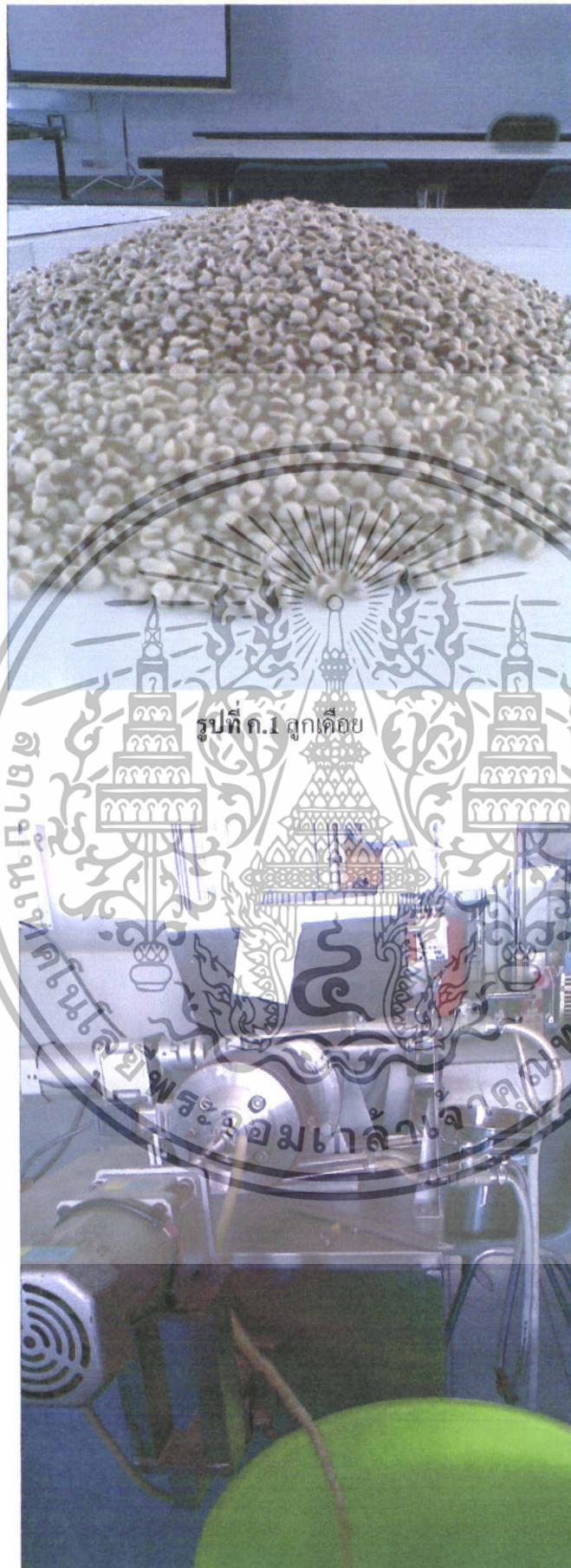
	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95.0%</i>	<i>Upper 95.0%</i>
Intercept	459.1765	90.86826358	5.0532109	0.003922564	225.5921923	692.7608077	225.5921923	692.7608077
X Variable 1	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
X Variable 2	-10.38289583	5.653043009	-1.836691463	0.125681247	-24.9145055	4.148713836	-24.9145055	4.148713836
X Variable 3	-0.437863542	0.125699875	-3.48340476	0.017594379	-0.760985356	-0.114741727	-0.760985356	-0.114741727
X Variable 4	-5.5713375	1.208438052	-4.610362518	0.00578569	-8.677726404	-2.464948596	-8.677726404	-2.464948596
X Variable 5	0.176041667	0.147485271	1.193622015	0.286165356	-0.203081293	0.555164626	-0.203081293	0.555164626
X Variable 6	0.000279635	9.21783E-05	3.033636259	0.028960702	4.26836E-05	0.000516587	4.26836E-05	0.000516587
X Variable 7	0.024356667	0.005899411	4.128660857	0.009096833	0.009191748	0.039521585	0.009191748	0.039521585
X Variable 8	0.002859375	0.003542482	0.807167206	0.456234348	-0.006246864	0.011965614	-0.006246864	0.011965614
X Variable 9	0.039075	0.028339853	1.378800375	0.226447952	-0.033774911	0.111924911	-0.033774911	0.111924911
X Variable 10	0.001115625	0.000708496	1.574637664	0.176156291	-0.000705623	0.002936873	-0.000705623	0.002936873

ภาคผนวก ค

- รูปวัสดุ อุปกรณ์
- รูปผลิตภัณฑ์ที่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.1 ลูกเดือย

รูปที่ ๑.๒ เครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์แบบสกรูเดี่ยว

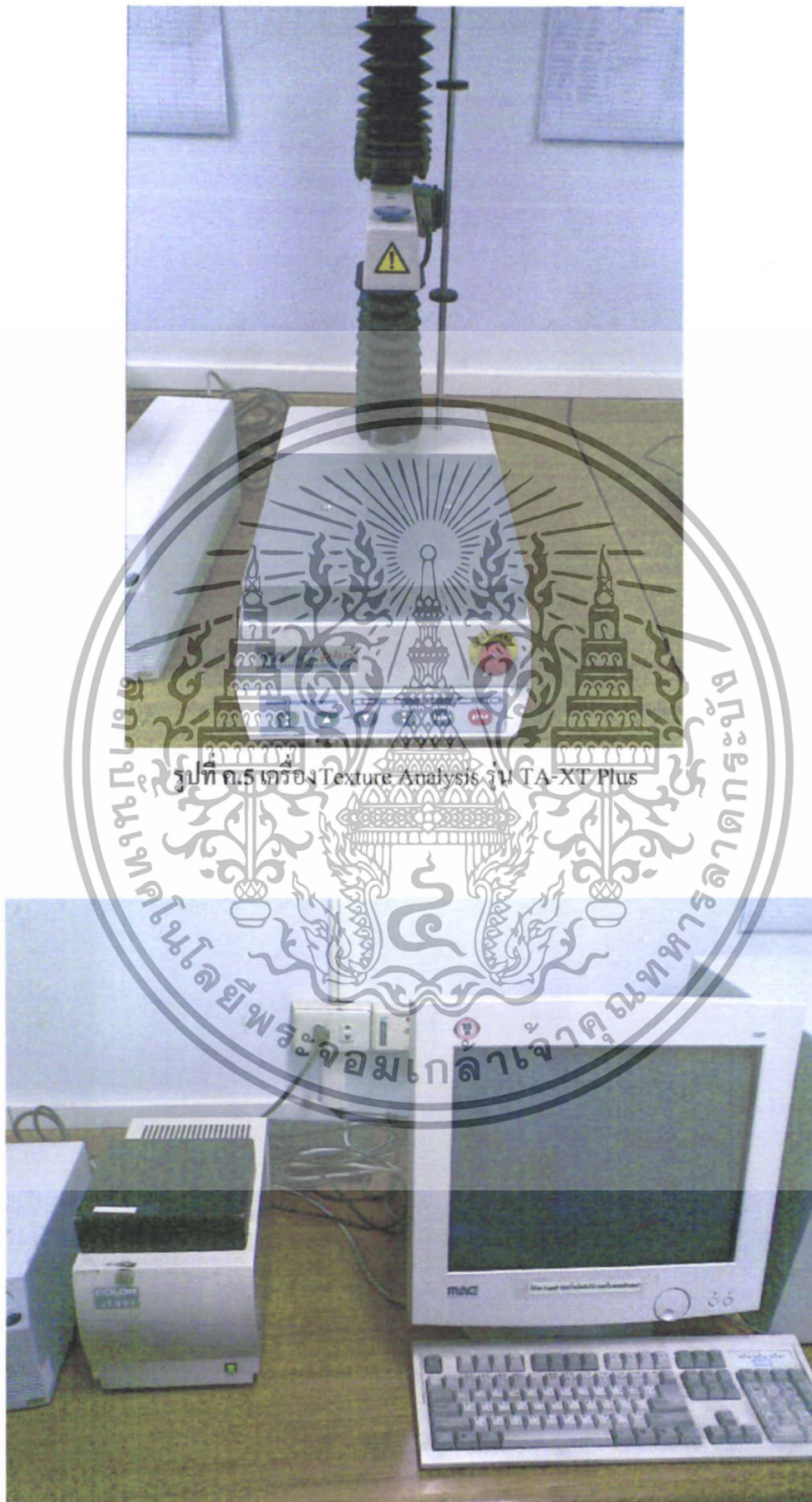
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 เครื่องตั้ง 4 ด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.4 โถคู่ความขึ้น



รูปที่ ก.5 เครื่อง Texture Analysis รุ่น TA-XT Plus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเมื่อคุณกรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ ก.6 เครื่องวัดสี Colorimeter
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.7 เครื่อง Centrifuge

รูปที่ ก.8 เครื่องวัดความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะสิ่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๙. เอ็กซ์ทรูเดดการทดลองที่ 1
18% 580rpm 90°C

รูปที่ ๑๐. เอ็กซ์ทรูเดดการทดลองที่ 2
14% 580rpm 90°C



รูปที่ ๑๑. เอ็กซ์ทรูเดดการทดลองที่ 3
18% 420rpm 90°C

รูปที่ ๑๒. เอ็กซ์ทรูเดดการทดลองที่ 4
14% 420rpm 90°C



รูปที่ ๑๓. เอ็กซ์ทรูเดดการทดลองที่ 5
18% 500rpm 100°C

รูปที่ ๑๔. เอ็กซ์ทรูเดดการทดลองที่ 6
14% 500rpm 100°C

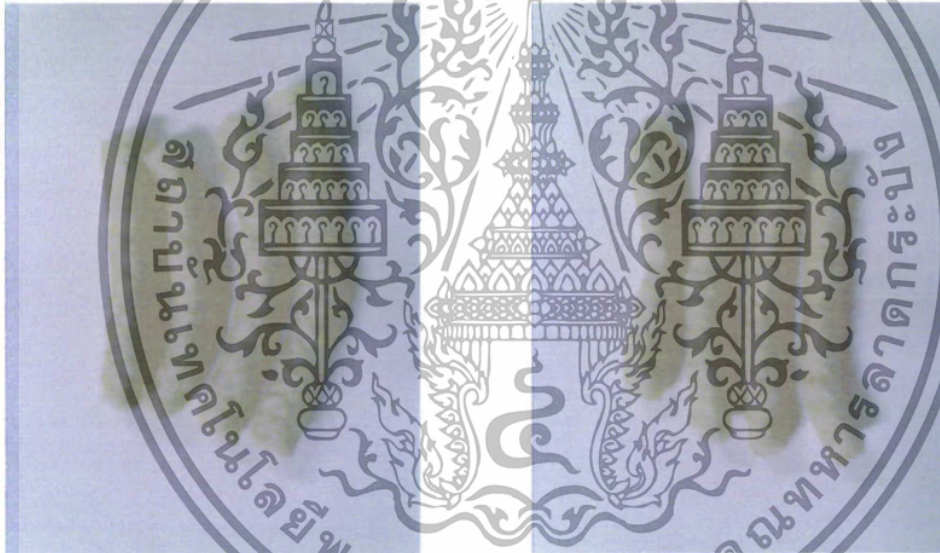
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.15 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 7
18% 500rpm 80°C



รูปที่ ค.16 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 8
14% 500rpm 80°C



รูปที่ ค.17 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 9
16% 580rpm 100°C

รูปที่ ค.18 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 10
16% 420rpm 100°C



รูปที่ ค.19 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 11
16% 580rpm 80°C



รูปที่ ค.20 เอ็กซ์ทรูเดตการทดลองที่ 12
16% 420rpm 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.21 เอ็กซ์ทราเคตการทดลองที่ 13
16% 500rpm 90°C



รูปที่ ค.22 เอ็กซ์ทราเคตการทดลองที่ 14
16% 500rpm 90°C



รูปที่ ค.23 เอ็กซ์ทราเคตการทดลองที่ 15
16% 500rpm 90°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้