



ผลของอุณหภูมิบาร์เรล ความเร็วรอบ และความชื้น ต่อคุณลักษณะของ
ผลิตภัณฑ์อาหารจากปลายข้าวที่ผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

Effect of barrel temperature , screw speed and moisture content on product
characteristics obtained by extrusion process of broken rice



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 61964
วัน,เดือน,ปี 25 ก.ค. 2549

๖.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอาหาร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

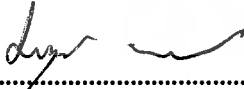
ภาควิชา วิศวกรรมอาหาร

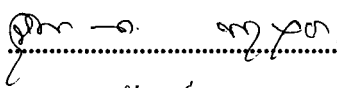
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อปริญญานิพนธ์ ผลของอุณหภูมิบาร์เรด ความเร็วรอบ และความชื้น ต่อคุณลักษณะของ
ผลิตภัณฑ์อาหารจากปลายข้าวที่ผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

ผู้จัดทำ

1. นายเทอดศักดิ์ คุปติมิตร
2. นางสาวปัทมา ศิวบาง
3. นางสาววิภา เจริญวิทย์ขจร


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(นางจุฬาลักษณ์ จารุสุข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของอุณหภูมิบาร์เรล ความเร็วรอบ และความชื้น ต่อคุณลักษณะของ
ผลิตภัณฑ์อาหารจากปลายข้าวที่ผลิตด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

นายเทอดศักดิ์ กุปติมิตร
นางสาวปัทมา ผิวบาง
นางสาววิภา เจริญวิทย์ขจร

ผศ. ดร. มาตุลี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
นางจุฬาลักษณ์ จารุณช อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้ เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแบบเอกซ์ทรูชัน ต่อคุณลักษณะบางประการของเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากปลายข้าวพันธุ์ชัยนาท การผลิตอาศัยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิของบาร์เรล (80-120°C) ความเร็วรอบของสกรู (200-400 rpm) และปริมาณความชื้นของปลายข้าว (16-20%) ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่างๆ เช่น ความชื้นเอกซ์ทรูเดต ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ ค่าแรงแตกหัก อัตราส่วนการขยายตัว ความหนาแน่นของเอกซ์ทรูเดต ผลที่ได้จากการทดลองถูกนำไปสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้อธิบายผลของปัจจัยที่ศึกษา โดยใช้รูปแบบสมการโพลีโนเมียลอันดับที่สอง ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ดี ความสัมพันธ์ที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการวางแผนการผลิต เพื่อให้ได้คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of barrel temperature , screw speed and moisture content on product characteristics obtained by extrusion process of broken rice

Mr. Theadsak Kuptimitr

Miss Pattama Piwbang

Miss Wipha Jaroenwitkajorn

Asst. Prof. Dr. Maradee Phongpipatpong Advisor

Ms. Chulaluck Charunuch Co - advisor

2004

Abstract

The objective of this study is to investigate the effect of processing parameters that related to extrusion process on extrudate characteristics obtained from broken rice (Chainat - variety) by using twin screw extruder. The parameters included barrel temperature (80-120 °C) , screw speed (200-400 rpm) and moisture content of broken rice (16-20%). The extrudate characteristics such as moisture content of extrudate , water absorbtion index , water solubility index , breaking strength , expansion ratio and densities were analyzed. The second order models polynomial were used to describe the relation between the processing parameters and extrudate characteristics. The results show that the coefficients of determination of the models are correlated well and can be used to predict the performance of rice extrusion system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำต้องขอบคุณบุคคลต่างๆ ที่มีส่วนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ดังรายชื่อดังต่อไปนี้ ศศ. ดร. มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ นางจุฬาลักษณ์ จารุ นุช และบุคลากรของสถาบันวิจัยอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการ ทดลองในครั้งนี้ รศ. สาธิป รัตนภาสกร และคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่ให้ ความรู้ อบรมสั่งสอน ตลอดจนบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมอาหารที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน นอกจากนี้ยังมีคุณพ่อ และคุณแม่ที่เป็นบุคคลที่ช่วยสนับสนุนด้านต่างๆ จนประสบความสำเร็จ และต้องขอขอบคุณทุกท่านที่ไม่อาจกล่าวได้หมดที่มีส่วนให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	สารบัญ	ก
	สารบัญตาราง	ง
	สารบัญรูป	จ
1.	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์	2
	1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
	1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
2.	วรรณกรรมปริทัศน์	3
	2.1 หลักการผลิตอาหารแบบเอกซ์ทรูชัน	3
	2.1.1 กระบวนการเอกซ์ทรูชัน	3
	2.1.2 การทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์	4
	2.1.3 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์	6
	2.1.4 ข้อดีของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์	7
	2.1.5 ประเภทของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์	
	2.1.6 การเปรียบเทียบชนิดของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์	13
	2.2 ลักษณะทั่วไปของข้าว	15
	2.2.1 แป้งข้าวเจ้า	16
	2.2.2 องค์ประกอบ และ โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	16
	2.2.3 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลายของแป้ง	18
	2.2.4 ความหนืด	19
	2.2.5 การเกิดเจลลาคีในเซชัน	21
	2.2.6 การเกิดรีโทรกราเดชัน	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3	อาหารขบเคี้ยว	25
2.3.1	ชนิดของอาหารขบเคี้ยว	26
2.3.2	การตลาดของขนมขบเคี้ยว	28
2.4	การหาสถานะที่เหมาะสมโดยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวคอบ	28
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
3.	วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	32
3.1	วัสดุ และอุปกรณ์	32
3.2	การกำหนดตัวแปรที่ศึกษา	33
3.2.1	ตัวแปรอิสระ	33
3.2.2	ตัวแปรตาม	33
3.3	การวางแผนการทดลอง	34
3.4	ขั้นตอนการทดลอง	35
3.5	การวัดค่าคุณลักษณะของเอกซ์ทรูเดตที่ได้	38
3.5.1	ค่าความชื้นเอกซ์ทรูเดต	38
3.5.2	ความหนาแน่น	38
3.5.2.1	ความหนาแน่นเนื้อ	38
3.5.2.2	ความหนาแน่นรวม	39
3.5.3	ความหนืด	39
3.5.4	ความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในการละลายน้ำ	40
3.5.5	แรงแตกหักสูงสุด	40
3.5.6	อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์	41
3.6	การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	42
4.	ผลการทดลองและวิจารณ์	43
4.1	คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ	43
4.1.1	วัตถุดิบปลายข้าวเจ้า	43
4.1.2	คุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวและอาหารเข้าในท้องตลาด	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 คุณสมบัติต่างๆ ของเอกซ์ทรูเดตที่ได้	45
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง	46
4.2.1 ความชื้นของเอกซ์ทรูเดต	46
4.2.2 ความหนาแน่นเนื้อ	49
4.2.3 ความหนาแน่นรวม	52
4.2.4 ความหนืดสูงสุด	55
4.2.5 ความหนืดสุดท้าย	58
4.2.6 ความสามารถในการดูดซับน้ำ	61
4.2.7 ความสามารถในการละลายน้ำ	64
4.2.8 ค่าแรงแตกหัก โดยเครื่อง texture Analyzer ใช้หัวกดแบบ Warner-Blatzler Blade	67
4.2.9 อัตราส่วนการขยายตัว	70
5. สรุปผลการทดลอง	73
บรรณานุกรม	74
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก	78
ภาคผนวก ข	80
ภาคผนวก ค	96
ภาคผนวก ง	125
ภาคผนวก จ	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1	19
ตารางที่ 2.2	21
ตารางที่ 2.3	23
ตารางที่ 3.1	34
ตารางที่ 3.2	35
ตารางที่ 4.1	43
ตารางที่ 4.2	44
ตารางที่ 4.3	45

สารบัญรูป

รูปที่	รายการ	หน้า
2.1	พารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินเครื่องเอกซเรย์ทรูเคเตอร์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่พอง	5
2.2	เครื่องเอกซเรย์ทรูเคเตอร์แบบสกรูคู่	13
2.3	โครงสร้างของอะมิโลสและอะไมโลเพคติน	17
2.4	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA	20
2.5	การเปลี่ยนแปลงของแป้งระหว่างการหุงต้ม	21
2.6	ระยะในการเกิดเจลลิตีในเซชันของเม็ดแป้ง	22
2.7	เปอร์เซ็นต์การเกิดเจลลิตีในเซชันของเม็ดแป้งแต่ละชนิด	23
2.8	การเกิดรีโทรกราเดชัน	24
2.9	กลไกการคืนตัวของแป้ง	25
3.1	ขั้นตอนการทดลอง	37
4.1	นน.ปลายข้าวที่ตกค้างบนตะแกรง ณ ตะแกรงร่อนขนาดต่างๆ	43
4.2	การเปรียบเทียบค่าความชื้นของเอกซเรย์ทรูเคเตอร์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-1)	46
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ, อุณหภูมิและความชื้นวัตถุดิบที่มีผลต่อค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์เอกซเรย์ทรูเคเตอร์ (%)	48
4.4	การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-2)	49
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ, อุณหภูมิและความชื้นวัตถุดิบที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์เอกซเรย์ทรูเคเตอร์ (g/cm^3)	51
4.6	การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-3)	52
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ, อุณหภูมิและความชื้นวัตถุดิบที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์เอกซเรย์ทรูเคเตอร์ (g/cm^3)	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8	การเปรียบเทียบค่าความหนืดสูงสุดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-4)	55
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ, อุณหภูมิและความชื้นวัตถุดิบ ที่มีผลต่อค่าความหนืดสูงสุด(RVU)	57
4.10	เปรียบเทียบค่าความหนืดสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-5)	58
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ, อุณหภูมิและความชื้นวัตถุดิบ ที่มีผลต่อค่าความหนืดสุดท้าย(RVU)	60
4.12	การเปรียบเทียบค่าการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและ ค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-6)	61
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ, อุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความ สามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดต (g/g)	63
4.14	การเปรียบเทียบค่าการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและ ค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-7)	64
4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ, อุณหภูมิและความชื้นวัตถุดิบ ที่มีผลต่อค่าการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดต (%)	66
4.16	การเปรียบเทียบค่าแรงแตกหักที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย จากสมการ (4-8)	67
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ, อุณหภูมิและความชื้นวัตถุดิบ ที่มีผลต่อค่าแรงแตกหักของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดต (g/cm^3)	69
4.18	การเปรียบเทียบอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและ ค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-9)	70
4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ, อุณหภูมิและความชื้นวัตถุดิบ ที่มีผลต่ออัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดต	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ข้าว นับเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย ในปี 2547 ประเทศไทยสามารถผลิตข้าวได้ปริมาณ 9.98 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 108,393.25 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2005) การบริโภคข้าวส่วนใหญ่อยู่ในรูปของข้าวเต็มเมล็ดหรือข้าวสารที่ได้จากโรงสีข้าว ส่วนปลายข้าวหรือข้าวท่อน ซึ่งมีขนาดความยาวของเมล็ดน้อยกว่า 50% จัดเป็นผลพลอยได้และเป็นสินค้าที่มีมูลค่าต่ำ ปลายข้าวที่ได้ในแต่ละปีนั้นคิดเป็นจำนวนถึง 1 – 1.7 ล้านตันหรือประมาณ 10 – 17 % ของผลผลิตข้าวทั้งหมด ดังนั้นการนำปลายข้าวมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอื่นๆ อาทิ เช่น โจ๊ก เส้นหมี่ ก๋วยเตี๋ยว แป้งข้าวเจ้า อาหารขบเคี้ยวหรือผลิตภัณฑ์อาหารเช้า เป็นการช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับปลายข้าว จากข้อมูลการตลาดในปัจจุบันพบว่าอาหารขบเคี้ยว รวมทั้งผลิตภัณฑ์อาหารเช้ามีส่วนแบ่งทางการตลาดที่สูงมากเมื่อเทียบกับอาหารประเภทอื่น ในการผลิตอาหารขบเคี้ยวหรือผลิตภัณฑ์อาหารเช้านั้น โดยมากจะอาศัยกระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชัน ซึ่งเป็นกรรมวิธีการผลิตที่มีประสิทธิภาพสามารถดำเนินการผลิต เพื่อให้ได้ลักษณะผลิตภัณฑ์ตามต้องการภายในขั้นตอนเดียว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการการผลิตแบบเอกซ์ทรูชันนั้นสะดวกต่อการบริโภคและสามารถเก็บรักษาได้นาน

การผลิตผลิตภัณฑ์อาหารด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เพื่อให้ได้ลักษณะของผลิตภัณฑ์ตามต้องการนั้น มีปัจจัยเกี่ยวข้องหลายประการ โดยเฉพาะปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการผลิต เช่น ความเร็วรอบ อุณหภูมิบาร์เรล อัตราการป้อนน้ำ สภาพวัตถุดิบเริ่มต้น เป็นต้น

ถึงแม้ว่าจะได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติปลายข้าว รวมทั้งลักษณะผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการศึกษาผลของสภาวะการผลิต เพื่อใช้อธิบายลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปลายข้าวในเชิงปริมาณยังไม่ได้มีมากนัก

การศึกษากาการผลิตแบบเอกซ์ทรูชันที่ผ่านมา โดยมากจะใช้แป้งข้าวโพด ข้าวบาร์เล่ต์เป็นวัตถุดิบตั้งต้น การส่งเสริมการนำปลายข้าวมาใช้แปรรูปจะช่วยเพิ่มรายได้ให้ประเทศ ดังนั้นความเข้าใจถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารจากปลายข้าว ด้วยกระบวนการเอกซ์ทรูชันย่อมเป็นสิ่งจำเป็น

ดังนั้นในโครงการนี้ จึงสนใจที่จะนำปลายข้าวมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ในการผลิตด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะบางประการของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของสภาวะการผลิต ต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์
2. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการผลิตกับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์
3. เพื่อศึกษาการหาสภาวะผลิตที่เหมาะสมโดยวิธี Response Surface Methodology (RSM)

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แนวทางในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารจากปลายข้าวที่ผลิตจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์
2. เห็นการส่งเสริมให้มีการแปรรูปปลายข้าวให้มีมูลค่าเพิ่มขึ้น
3. ได้ประสบการณ์การใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในอาหาร

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. วัตถุดิบที่ใช้คือ ปลายข้าวเจ้า พันธุ์ชัญนาท
2. กระบวนการผลิตจะผลิตจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ รุ่น Berstorff ZE 25x33D
3. สภาวะการผลิตที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบสกรู (200-400 rpm) อุณหภูมิของบาร์เรล (80-120 °C) ความชื้นของวัตถุดิบ (16-20%)
4. คุณลักษณะบางประการที่ศึกษาได้แก่ ความชื้น ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAD) ความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) อัตราการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ (ER) ความหนืด และลักษณะเนื้อสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการผลิตอาหารแบบเอกซ์ทรูชัน

2.1.1. กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (Extrusion process) (รุ่งนภา, 2541)

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นกระบวนการทำให้เกิดรูปร่าง โดยการบังคับสารที่อ่อนตัว หรือหลอมเหลวผ่านรู หรือหน้าแปลน (die) ด้วยความดัน เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในอาหารจึงเป็น เครื่องมือสำหรับการทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้าง และรูปร่างของอาหาร ปัจจัยหลักที่มีผลต่อลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเอกซ์ทรูชันมากที่สุดคือ สภาวะการเดินเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ และคุณสมบัติทางรีโอโลยีของอาหาร พารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดของการเดินเครื่องคือ อุณหภูมิ ความดัน เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดของหน้าแปลน และอัตราการเฉือน (shear rate) โดยที่ อัตราการเฉือนขึ้นกับการออกแบบภายในของสกรู ความเร็ว และรูปร่างของสกรู ส่วนคุณสมบัติ ของส่วนผสมที่ป้อนเข้าสู่เครื่องก็มีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและสีของเอกซ์ทรูเดต (extrudate คือ ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์) คุณสมบัติของส่วนผสมที่สำคัญที่สุด ได้แก่ ความชื้น ขนาดของสาร และองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉพาะปริมาณ และชนิดของแป้ง โปรตีน ไขมันและ น้ำตาล

สกรูเป็นหัวใจของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน โดยลักษณะของสกรู และความเร็วของการ หมุนมีผลต่อกระบวนการเอกซ์ทรูชัน การเคลื่อนที่ของส่วนผสมของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่เครื่อง เอกซ์ทรูเดอร์ เกิดขึ้นจากเกลียวที่อยู่ตามแนวแกนความยาวของสกรู โดยขณะที่สกรูหมุน เกลียวจะ ผลักให้ส่วนผสมต่างๆ ของอาหารเคลื่อนไปข้างหน้า ผนังของบาร์เรลมักทำเป็นร่อง เพื่อเพิ่มความ ฝืด และลดความลื่น เนื่องจากส่วนผสมที่ถัดจากผนังบาร์เรลมักลื่น และหมุนตามสกรู

สกรูทำหน้าที่ 3 อย่างคือ (1) การขนถ่าย (2) ก่อให้เกิดงานและความร้อน และ (3) การ ผสม สกรูในส่วนที่ทำหน้าที่ป้อนดังในภาพที่ 1 มักจะมีลักษณะสันเกลียวที่ลึกซึ่งจะรับส่วนผสม ของอาหารที่ป้อนเข้าสู่เครื่อง ส่วนผสมของวัตถุดิบมีลักษณะเป็นเม็ดๆ และผ่านการปรับความชื้น แล้ว สกรูจะพาเอาส่วนผสมเหล่านี้เคลื่อนที่ไปตามความยาวของสกรู ขณะที่ส่วนผสมเคลื่อนไป

ตามสกรู ก็จะได้รับอัดเพิ่มขึ้น ทำให้ส่วนผสมของอาหารเหล่านี้บรรจุลงในชั้นเนล (channal) หรือช่องว่างที่มีอยู่ระหว่างเกลียวสกรู

ส่วนที่ 2 ของสกรูจะเป็นช่วงของการอัด หรือการเปลี่ยน โดยสกรูมีความสูงของเกลียว หรือสันเกลียวลดลง หรืออาจใช้วิธีการอื่นที่ทำให้ความสามารถในการขนถ่ายของสกรูลดลง ซึ่งมีผลทำให้เกิดการอัดมากขึ้น ส่วนผสมของอาหารจะหมนอยู่ในชั้นเนลของสกรูขณะที่เคลื่อนไปข้างหน้า และเกิดเป็นมวลที่ต่อเนื่อง พลังงานที่ทำให้ส่วนผสมที่หนืดนี้ไหล ได้จากมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่ หมุนสกรู การเลื่อนระหว่างกระบวนการไหลจะทำให้พลังงานกลหมดไป โดยเพิ่มอุณหภูมิของ ส่วนผสม และเปลี่ยนส่วนผสมของอาหาร ไปเป็นโด

ส่วนต่อมาของสกรูจะออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่ผสมส่วนผสมของอาหารที่หลอมเหลวนี้อันเกลียวที่ตื้นขึ้นจะเพิ่มแรงเฉือน และช่วยให้การผสมดีขึ้นเพื่อให้เกิดโดที่มีอุณหภูมิและความดันสูงสม่ำเสมอ

2.1.2 การทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (extruder operation)

ส่วนผสมที่เป็นวัตถุดิบหลักที่ใช้ในเครื่องคูกึ่งเอกซ์ทรูเดอร์ ประกอบด้วยัญชาติที่ผ่านการบด สตาร์ช และโปรตีนที่ได้จากพืช นอกจากนี้ยังมีส่วนผสมอื่นๆ ที่เป็นวัตถุดิบรอง ได้แก่ ไขมัน น้ำตาล เกลือ กรด หรือด่าง สารอิมัลซิไฟเออร์ สี และกลิ่นรส น้ำจะเติมเข้าไปเพื่อปรับให้ส่วนผสมมีความชื้นอยู่ในระดับ 10 – 40 %

พลังงานต่างๆ ที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นั้น ทำให้อุณหภูมิของฟีดที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่เคลื่อนที่ผ่านไป ในเครื่อง การเพิ่มพลังงานทางกล โดยการหมุนสกรูเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด และคิดเป็น 50 – 100 % ของพลังงานทั้งหมดที่มี นอกจากนั้นพลังงานที่ป้อนเข้าเครื่องอาจได้จากความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังบาร์เรลที่ร้อน หรือเย็น หรือพลังงานที่เกิดจากการส่งไอน้ำเข้าไปและผสมโดยตรงกับอาหารภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เป็นส่วนที่สำคัญน้อยกว่า

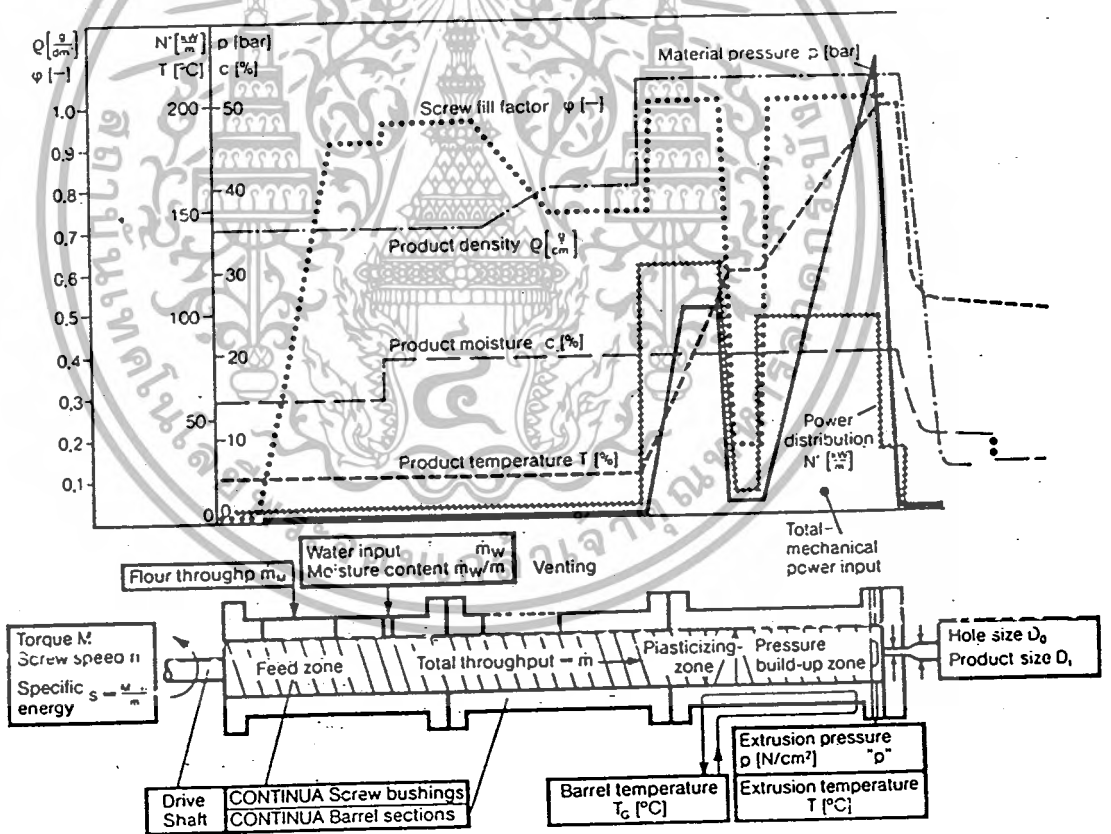
ในกระบวนการคูกึ่งเอกซ์ทรูชัน อุณหภูมิของส่วนผสมอาหารหลังจากที่ถูกอัด จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วไปเป็น 150 – 200 °C อุณหภูมิที่สูงที่สุดนี้จะคงอยู่น้อยกว่า 20 วินาที ไม่เช่นนั้นจะทำให้ไหม้ และเกิดกลิ่นรสแปลกปลอมขึ้น ความดันในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่สูง ทำให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่คล้ายกับของหม้อต้มความดัน (pressure cooker) ซึ่งจะป้องกันการฟุ้งกระจายของไอน้ำ จนกว่าความดันจะถูกปล่อยออกมาเมื่อผลิตภัณฑ์ออกจากหน้าแปลน

เมื่อโดออกจากหน้าแปลน ความดันจะถูกปลดปล่อยออกมา ทำให้เกิดการพองตัว (puffing) อย่างทันทีที่อุณหภูมิสูง การพองตัวนี้ส่วนใหญ่เกิดจากไอน้ำที่ออกจากน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ถูกทำให้

ร้อนขึ้น การสูญเสียความชื้น และความร้อนในผลิตภัณฑ์ร่วมกับการพองตัว ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างรวดเร็วจนมีอุณหภูมิประมาณ 60 °C

เอกซ์ทรูเดอร์ที่ขยายตัวจะมีโครงสร้างของเซลล์เปิด ซึ่งประกอบด้วยเซลล์ที่แต่ละเซลล์ถูกล้อมรอบด้วยเมมเบรนของแป้ง หรือ โปรตีน ขนาดของเซลล์เหล่านี้จะควบคุมลักษณะเฉพาะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ คือ ลักษณะเนื้อสัมผัส และความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ เอกซ์ทรูเดอร์เหล่านี้มักจะถูกตัดที่ผิวหน้าของหน้าแปลนด้วยใบมีดที่หมุน แล้วอบแห้งต่อในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนให้มีความชื้น 2 -12 % ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการอาจเคลือบด้วยสี กลิ่นรส น้ำมัน และ / หรือน้ำตาล

การควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปส่วนใหญ่ขึ้นกับปริมาณความชื้นของส่วนผสมที่ป้อนเข้าไปสู่กระบวนการเอกซ์ทรูชัน อุณหภูมิที่ออกจากเครื่อง ระดับ หรือปริมาณของความเสียหายของส่วนผสมที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการไหล และลักษณะรูปร่างของหน้าแปลน



รูปที่ 2.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ของการเดินเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์สำหรับผลิตภัณฑ์ที่พอง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.1 แบ่งรูปกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้เป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ

1. Feed zone คือ ส่วนที่ทำการป้อนวัตถุดิบกับน้ำเข้าผสมกัน จนแป้งมีลักษณะที่เรียกว่าโด (dough)
2. Plasticizing zone คือ ส่วนที่ทำให้เกิดแรงอัดขึ้นเล็กน้อย จนแป้งมีลักษณะคล้ายกับพลาสติก
3. Pressure build – up zone คือ ช่วงที่วัตถุดิบเกิดแรงอัดสูงมาก ก่อนที่วัตถุดิบจะออกสู่น้ำแปลน (die)

2.1.3 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (วรวิฑู, 2541)

2.1.3.1 Feed Hopper

เป็นส่วนที่รับวัตถุดิบ มีรูปร่างเป็นกรวยแบบง่าย ๆ บางทีอาจเพิ่มระบบการกวนเข้าไปได้ ถ้าวัตถุดิบมีความหนืด ในช่วงนี้จะมีการควบคุมอัตราเร็วในการป้อนวัตถุดิบเพื่อป้องกันการเกิดการติดขัดในเครื่อง

2.1.3.2 บาร์เรล (Barrel)

มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกครอบอยู่ตามความยาวของสกรู สามารถถอดออกเป็นตอนๆ ได้ ผิวด้านในมีการเซาะร่องเป็นแนวเพื่อลดการสิ้นเปลืองของวัตถุดิบ ขณะเคลื่อนที่อยู่ภายในและยังเพิ่มแรงดันและแรงเสียดทานด้วย

2.1.3.3 Jacket

อยู่ล้อมรอบบาร์เรล มีหน้าที่ให้น้ำเย็นหรือน้ำร้อนไหลอยู่ภายในเพื่อควบคุมอุณหภูมิขณะใช้เครื่อง ซึ่งจะแบ่งออกเป็นช่วงๆ บางช่วงอาจใช้น้ำเย็น บางช่วงอาจใช้น้ำร้อนเพื่อทำให้ความร้อน

2.1.3.4 สกรู (Screw)

สกรูมีลักษณะเป็นแกน มีเกลียวอยู่โดยรอบ โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูอาจเท่าเดิมหรือค่อยๆ เพิ่มขึ้นก็ได้ เช่นเดียวกับกับเกลียวบนสกรูอาจมีความลึกคงที่หรือไม่ก็ได้ ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์และหน้าที่ในการทำงาน นอกจากนี้สกรูยังอาจมีทิศทางที่แตกต่างกันหรือเหมือนกันก็ได้ หน้าที่ของสกรูในการทำงานคือ รับและขนถ่ายวัตถุดิบ กดดันและเพิ่มแรงเสียดทานให้แก่วัตถุดิบ ทำให้เกิดการผสมอย่างสม่ำเสมอ

2.1.3.5 น้ำแปลน (Die)

ส่วนนี้อยู่ปลายสุดของเครื่องมือ มีหลายรูปร่างลักษณะอันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ กันไป เมื่อเอกซ์ทรูเดตผ่านออกมาจากช่องนี้ จะเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการระเหยนํ้าอย่างรวดเร็วทันทีที่ออกมาจากน้ำแปลน

2.1.3.6 ใบมีด (Knife)

เป็นส่วนที่กำหนดความยาวของเอกซ์ทราเดคที่ออกมาจากหน้าแปลน ซึ่งมีให้เลือกหลายใบมีด อาจจะเป็นแบบ 2 ใบมีด 3 ใบมีดหรือ เท่าใดก็ตามแล้วแต่ความต้องการทางด้านคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้าย

2.1.4 ข้อดีของเครื่องเอกซ์ทราเดค

เอกซ์ทราเดคเป็นกระบวนการผลิตอาหารสมัยใหม่ ช่วยให้การขยายงานด้านอุตสาหกรรม การผลิตอาหารกว้างขวางยิ่งขึ้น ทั้งนี้ก็เพราะ โดยตัวของระบบหรือเครื่องเอกซ์ทราเดคนั้นมี คุณลักษณะพิเศษหลายประการดังนี้

2.1.4.1 เอนกประสงค์ (versatility) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลากหลาย เพียงแต่เลือกใช้ วัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบและปรับสภาวะของกระบวนการผลิตให้เหมาะสม

2.1.4.2 อัตราการผลิตสูง (high productivity) เป็นเครื่องจักรแบบต่อเนื่อง และมีอัตราการ ผลิตได้มากกว่าระบบอื่นๆ

2.1.4.3 ต้นทุนการผลิตต่ำ (low cost) จำนวนคนงาน และพื้นที่ที่ใช้ในกระบวนการผลิต แบบเอกซ์ทราเดคต่อหนึ่งหน่วยการผลิตนั้นน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตวิธีอื่น

2.1.4.4 รูปทรงของผลิตภัณฑ์ (product shapes) ทำได้มากมายหลายแบบ ทำได้ง่ายเพียง เปลี่ยนแบบรูปทรงของรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลน

2.1.4.5 คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีมาก (high product quality) คุณภาพสูง เนื่องมาจากเป็น ระบบ HTST (High Temperature and Short Time)

2.1.4.6 ประหยัดพลังงาน (energy efficient)

2.1.4.7 ทำผลิตภัณฑ์อาหารใหม่ๆ (production of new foods)

2.1.4.8 ไม่มีน้ำทิ้งหรือสิ่งโสโครกที่ไหลจากโรงงาน (no effluents)

2.1.5 ประเภทของเครื่องเอกซ์ทราเดค

เครื่องเอกซ์ทราเดคที่ใช้กัน ในปัจจุบันนี้มีหลายบริษัทที่ผลิตขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ กัน

2.1.5.1 แบ่งโดยอาศัยคุณลักษณะหน้าที่ และผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Functional characteristics) มี ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Pasta Extruders เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี เช่น พววมักกะโรนี เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้มีร่องเกลียวสกรูลึก ผนังด้านในของปลอกเหล็ก ผนังสองชั้นเรียบ และความเร็วของสกรูที่หมุนจะช้า สกรูเกลียวลึกลึกนี้ทำหน้าที่ผลักพาแป้งเซโมไลนา (semolina) ที่ชื้นนุ่มให้เคลื่อนที่ไปทางข้างหน้า แล้วอัดผ่านรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลนออกมาซึ่งอาจทำให้แป้งเซโมไลนาสุกบ้างเล็กน้อย หรือไม่สุกเลยก็ได้ ในพาสต้า เอกซ์ทรูเดอร์นั้นพลังงานที่ใช้ น้อยมาก เพราะมีอัตราเลื่อนเกิดขึ้นต่ำมากในตัวผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ถึงกับสุกพอ จำเป็นต้องใช้ขั้นตอนอย่างอื่นอีก มาช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นสุกพร้อมที่จะรับประทานต่อไป

2. High – Pressure Forming Extruders เริ่มแรกที่พัฒนาหรือประยุกต์นำเอาเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เข้ามาใช้ในวงการอุตสาหกรรมอาหารนั้น ก็เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นรูปทรง ตามที่ต้องการเท่านั้น โดยที่ใช้วัตถุดิบที่เป็นโด (dough) ที่เปลี่ยนสภาพเป็นเจลบ้างบางส่วน อัดผ่านรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลนแล้วตัดเป็นชิ้นตามขนาด และรูปทรงที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ยังไม่สุกพอ จะต้องนำไปผ่านขั้นตอนการอบแห้ง และทำให้สุกพองด้วยวิธีการทอดในน้ำมัน หรืออบ คั่ว ในกระทะ หรือลมร้อนเสียก่อน

การทำให้เกิดความดันสูงขึ้นภายในตัวเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นั้น จะต้องออกแบบให้ ผนังด้านในของปลอกเหล็กผนังสองชั้นเป็นร่องเกลียว เพื่อมิให้เกิดการไหลลื่นที่ผนัง และตัวสกรูก็ ต้องออกแบบให้เป็นชนิดที่ทำให้เกิดแรงอัดมาก ผลจะทำให้เอกซ์ทรูเดมีความดันสูงที่บริเวณ ด้านหลังหน้าแปลน และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงมากเกินไปในตัวของโด อาจนำไปสู่การสุกพองที่ไม่ ต้องการ ให้เกิดขึ้นที่หน้าแปลน ความร้อนที่เกินความจำเป็นนี้จึงจัดออกไป หรือทำให้ลดลงได้ด้วย การใช้น้ำหล่อรอบผนังของบาร์เรลที่เป็นผนังสองชั้น

3. Low – Shear Cooking Extruders เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ผนังด้านในเรียบ และช่องว่างระหว่างผนังสองชั้นของบาร์เรล นั้นมีของเหลวอุณหภูมิสูง หรือไอน้ำ หรือความร้อน จากขดลวดไฟฟ้าไหลผ่านอยู่ตลอดเวลา ความร้อนนี้ส่งผ่านไปยังส่วนผสมของวัตถุดิบอาหารโดยการ นำ นอกจากนี้การหมุนตัวของสกรูทำให้เกิดการขัดสีระหว่างวัตถุดิบกับสกรู เกิดเป็นความร้อน แล้วความร้อนนี้ก็แพร่ไปยังส่วนผสมของวัตถุดิบด้วยวิธีการนำด้วย วิธีการนี้ทำให้ส่วนผสมที่เป็นแป้งเปลี่ยนเป็นโด ซึ่งโดมีการขยายตัว และพองตัวเกิดขึ้นบ้าง ดังนั้นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ และระยะเวลาของส่วนผสมของวัตถุดิบที่อยู่ภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ซึ่งส่วนมากแล้วใช้ เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว เพื่อที่จะทำให้แป้งที่เป็นองค์ประกอบหลักของส่วนผสมวัตถุดิบอาหารเปลี่ยนเป็นเจลตามที่ต้องการ แล้วโดนี้จะถูกทำให้เย็นตัวลงด้วยการลดอุณหภูมิที่ปลอกเหล็ก

ผนังสองชั้น อันสุดท้ายหรือช่วงสุดท้ายที่ติดกับหน้าแปลนลงให้ต่ำกว่า $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งโดนน้ำถูกแรงหมุนของสกรู และความดันอัดให้ผ่านรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลน ออกมาสู่บรรยากาศภายนอก และถูกตัดออกเป็นชิ้นๆ ความชื้นหรือน้ำที่มีอยู่ภายในชิ้นอาหารขบเคี้ยว หรือขนมอบกรอบกึ่งสำเร็จรูป หรือเพลเลท (pellet) นี้จะไม่ระเหยกลายเป็นไอน้ำลอยออกไป อาหารขบเคี้ยว หรือขนมอบกรอบกึ่งสำเร็จรูป ชนิดที่ได้นี้มีลักษณะเนื้อแน่นมากกว่าการพองตัว จึงยังต้องการกรรมวิธีการผลิตอย่างอื่นเพิ่มอีก เช่น การอบแห้ง และก่อนที่จะรับประทานก็ต้องนำไปทอดในน้ำมัน หรือไปคั่ว หรืออบ เพื่อให้สุกพองเสียก่อน อาหารขบเคี้ยว หรือขนมอบกรอบกึ่งสำเร็จรูปนี้รู้จักกันในชื่อที่เรียกว่า Third generation snacks ที่ผลิต และมีจำหน่ายในบ้านเรา เช่น ปาปริก้า โปเต้ คอนเน่ เป็นต้น

4. Collet Extruders เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบเรียบง่าย เล็กกระทัดรัด สะดวกต่อการใช้งาน เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่มีความยาวของตัวสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก ประมาณ $3:1$ ($L/D = 3:1$ เรียกว่า short screw แต่ชนิดที่ยาวกว่า ขนาด $L/D = 10:1$ ก็มี) ใน Collet Extruder นี้เกิดแรงเฉือนสูงมาก อันเนื่องมาจากสกรูที่มีร่องเกลียวคี่นมากหมุนอยู่ในบาร์เรลที่ผนังด้านในเป็นร่องเกลียวเช่นเดียวกัน ร่องเกลียวนี้ป้องกันการลื่นที่ผนัง วัสดุคิบที่ใช้กับเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ ส่วนมากแห้งมีความชื้นต่ำ ความร้อนเกือบจะหรือทั้งหมดที่เกิดขึ้นนั้นได้มาจากการเสียดสี (friction) แล้วทำให้มีความร้อนถึง $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ อย่างรวดเร็วเพื่อทำให้แป้งกลายเป็นเจล และเป็นเด็กซ์ทรินบางส่วน วัสดุคิบหรือส่วนผสมของวัสดุคิบอาหาร (แป้ง) ที่ได้เปลี่ยนแปลงสภาพไป และยังอยู่ในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นี้ เรียกว่า เอกซ์ทรูเดต เอกซ์ทรูเดตที่อยู่ในสภาพนี้ก็ถูกดันไหลผ่านรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลนออกมา และเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็ว จากภายในที่มีความดันสูงมาก มาสู่ภายนอกซึ่งมีความดันต่ำ (ความดันบรรยากาศ) ทำให้น้ำภายในเอกซ์ทรูเดต เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำ ระเหยลอยตัวออกไป ในขณะที่เดียวกันก็ถูกตัดด้วยใบมีด แล้วทรงตัวเป็นรูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่สุกพองและกรอบ วัสดุคิบที่นิยมใช้กับ Collet Extruder ได้แก่ คอร์นกริด ข้าวท่อน

5. High Shear Cooking Extruders เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ออกแบบมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลายลักษณะ เช่น พวกที่สุกเพียงบางส่วน หรือพวกกึ่งสำเร็จรูป หรือพวกที่ผ่านความร้อนสูง แล้วมีการจัดโครงสร้างภายในโมเลกุลใหม่ เช่น พวกโปรตีนเกษตร (texture vegetable protein) แรกเริ่มนั้นก็ประยุกต์นำเอาเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ทำด้วยพลาสติกที่มีอัตราส่วนของ ความยาวสกรู : เส้นผ่านศูนย์กลาง ($L/D = 10-20:1$) เป็นชนิดที่เกิดแรงอัดสูง เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดที่มีบาร์เรลยาว แต่ก็สามารถทำให้ร้อนหรือเย็นได้ โดยใช่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งความร้อน ความเย็นจากภายนอก โดยผ่านเข้าไปในช่องว่าง ระหว่างผนังของบาร์เรล เอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ใช้กับวัตถุดิบได้มากมายหลายชนิด และในช่วงของความชื้นได้ต่างๆกัน และควบคุมสภาวะต่างๆ ในระหว่างการผลิตได้ เช่น ควบคุมการสุกพอง อุณหภูมิ ความหนาแน่นของเนื้อสัมผัส ฯลฯ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ ได้แก่ อาหารเลี้ยงสัตว์ อาหารเช้า ซีเรียล อาหารเช้าจากธัญชาติพร้อมรับประทาน (RTE cereals) โปรตีนเกษตร (TVP) และอาหารขนมขบเคี้ยว หรือขนมอบกรอบ (snack foods)

High Shear Cooking Extruders (HSCE) ได้ถูกจัดอยู่ใน HTST ส่วนมากในการผลิตอาหาร โดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ วัตถุดิบที่นำมาใช้ก่อนป้อนเข้าไปในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ควรอุ่นหรือให้ความร้อนเสียก่อน ซึ่งจะเป็นไอน้ำหรือน้ำร้อนก็ได้ แล้วป้อนเข้าไปใน HSCE เพื่อทำให้วัตถุดิบนั้นเปลี่ยนแปลงเป็นเจล หรือปรับโครงสร้างภายในโมเลกุลของวัตถุดิบเสียใหม่ และการอุ่นนั้นได้ช่วยทำให้ตัววัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แล้วทำให้สุกและเย็นตัวลงเกือบจะทันที เมื่อผลิตสัมผัสไหลพ้นหน้าแปลนออกมา เวลาที่ใช้ในการหุงต้มนี้ต้องสั้นมาก (short residence time) ด้วยเหตุผลในเรื่องนี้ (เวลาและอุณหภูมิ) จึงได้ตั้งชื่อเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ว่า HTST (High Temperature and Short Time)

2.1.5.2 แบ่งชนิดของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของความร้อน (Thermodynamic characteristics) ได้ดังนี้

1. Autogenous (Adiabatic) Extruders ความร้อนทั้งหมดที่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ได้รับ (input to the extruder) นั้นมาจากการเสียดสี (friction) คือ เปลี่ยนมาจากพลังงานกล และมีเพียงปริมาณเล็กน้อย หรือ ไม่มีเลยของความร้อนที่เพิ่มหรือระบายออกไปจาก barrel Collet Extruders และ High Shear Cooking Extruders บางชนิดที่จัดเป็นพวก autogenous extruders ก็เนื่องมาจากอุณหภูมิภายในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้จะสูง หรือค้ำนั้นขึ้นอยู่กับ(ควบคุมโดย) องค์ประกอบของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไป และการจัดรูปแบบของสกรู ดังนั้นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบ autogenous นี้จึงไม่ค่อยคล่องตัวนัก ในการที่จะใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อาหารในแต่ละชนิด และยังยากต่อการควบคุมการทำงานของเครื่องอีกด้วย

2. Isothermal Extruders เป็นเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ประเภทที่มีระบบการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เท่ากันเป็นระยะตลอดความยาวของบาร์เรล Forming extruders ก็จัดอยู่ในประเภท

นี้ เพื่อคงสภาพความร้อนให้เท่ากันโดยตลอดนั้น ความร้อนก็จะถูกลดหรือระบายผ่านช่องว่าง (jacket) ระหว่างผนังสองชั้นของบาร์เรลที่อยู่รอบสกรู

3. Polytropic Extruders ในความเป็นจริงแล้ว เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เกือบจะทุกชนิด เป็นประเภท polytropic คือจะได้รับความร้อนทั้ง 2 ทาง คือ ความร้อนที่เกิดจากพลังงานกล และ ความร้อนที่ได้มาจากแหล่งความร้อนภายนอกที่ส่งผ่านมาทางช่องว่างของบาร์เรล

2.1.5.3 การแบ่งชนิดของเครื่องตามวิธีการสร้างประกอบเครื่อง (รุ่งนภา, 2541)

1. เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder)

เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ไม่ว่าจะใช้สำหรับการอัด หรือคั้นให้โคของอาหารผ่านหน้าแปลน เพื่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำ โดยไม่มีการพอง หรือใช้สำหรับการทำให้สุก และขึ้นรูปด้วยการให้ความร้อนอย่างรุนแรงแล้วผลิตภัณฑ์เกิดการพองตัว

ในกรณีแรกที่ใช้เพื่อการขึ้นรูป สกรูต้องมีเกลียวที่ถี่และหมุนช้าๆ เพื่อให้ปริมาณพลังงานกลถูกปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการเคลื่อนน้อยที่สุด เช่น การทำมั๊กกะโรนี หรือหมากฝรั่ง

ในส่วนกรณีหลัง เครื่องคูกกึ่งเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวที่ทำให้สุกจะมีสกรูสำหรับการอัด โดยลดความลึกของเกลียวสกรูหมุนด้วยความเร็วสูง เพื่อเพิ่มแรงเฉือน และพลังงานกล สำหรับการให้ความร้อน ส่วนผสมอาจได้รับความร้อนจากการเติมไอน้ำก่อนที่จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถในการผลิต

เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์เหล่านี้สามารถแบ่งตามระดับการเคลื่อนที่กระทำต่ออาหารได้ ดังนี้

1. แรงเฉือนที่สูง เช่น อาหารเข้าชัญชาติ ขนมะขบเคี้ยว
2. แรงเฉือนปานกลาง เช่น ขนบึงต่างๆ อาหารสัตว์ที่ค่อนข้างชื้น
3. แรงเฉือนต่ำ เช่น พาสต้า ผลิตภัณฑ์เนื้อต่างๆ

จากรูปที่ 2.1 ดังกล่าวมาแล้ว สกรูจะแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ได้แก่ ส่วนที่ค้ำเครื่อง ส่วนที่นำวัสดุถึงการอัด และส่วนคูกกึ่ง การขนถ่ายของส่วนผสมต่างๆ ผ่านเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ขึ้นกับความเสียดทานที่ผิวของบาร์เรล วัตถุประสงค์จะเคลื่อนไปข้างหน้า เนื่องจากแรงกระทำของสกรู เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวมีราคาและต้นทุนการเดินเครื่องต่ำกว่า และต้องการความชำนาญในการเดินเครื่อง และดูแลรักษาน้อยกว่าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่

ช่องชั้นเนตของสกรูต้องมีการใส่หรืออัดวัตถุดิบให้เต็ม เพื่อให้เกิดการนวด และการเนียน การผสม และการอัดส่วนผสม ความดันที่เพิ่มขึ้นหลังหน้าแปลน ทำให้ผลผลิตสุทธิที่ออกมาอย่างต่อเนื่อง (throughput) ลดลงเนื่องจากการไหลของความดันย้อนกลับขึ้นตามแนวชั้นเนตของสกรูอย่างต่อเนื่อง

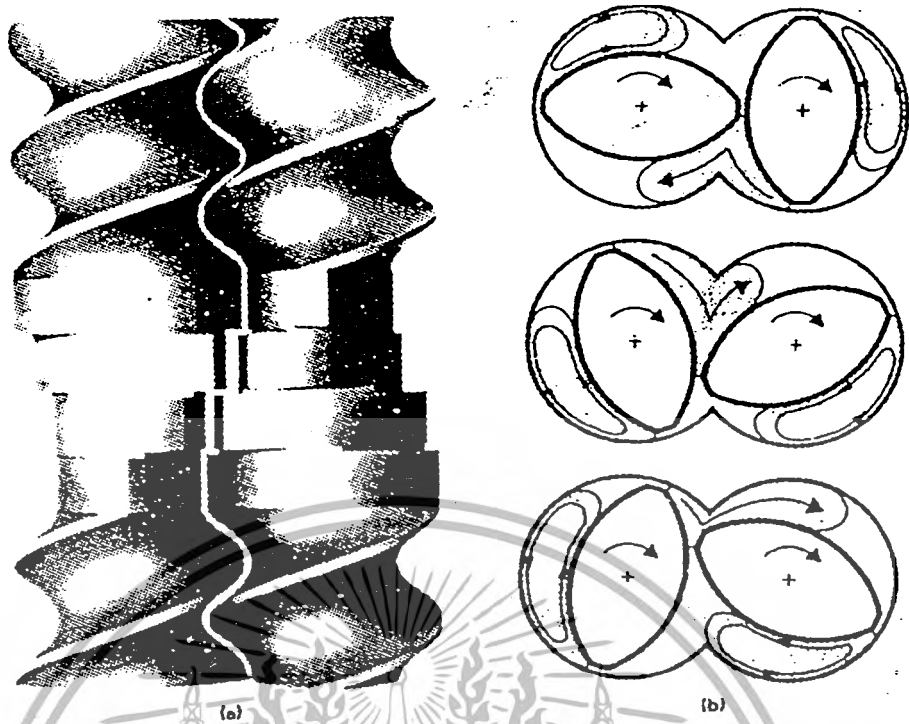
ลักษณะเฉพาะในการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ขึ้นกับความดันที่อยู่หลังหน้าแปลน ความถี่บนผนังบาร์เรล (ส่วนใหญ่ควบคุมด้วยอุณหภูมิผนังบาร์เรล และการที่มีรอยหยักหรือช่องเจาะที่ผนังบาร์เรล) ความยาวของสกรูที่ถูกอัดเต็มไปด้วยผลิตภัณฑ์ (ซึ่งเกี่ยวข้องกับอัตรา การป้อนและความเร็วของสกรู) และลักษณะเฉพาะของโคที่ขึ้นกับชนิดของส่วนผสม ความชื้น และอุณหภูมิ อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยเหล่านี้จะจำกัดช่วง และความยืดหยุ่นของการปฏิบัติงานของ เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

2. เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (twin-screw extruder)

เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่มีสองสกรูซึ่งวางข้างๆ กัน โดยที่มีเกลียวอินเตอร์ เมส (intermeshing) กันและกัน และหมุนในลักษณะ “ตัวเลข 8” ในบาร์เรล เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ แบบสกรูคู่มีแบ่งตามทิศทางการหมุน และลักษณะที่สกรูอินเตอร์เมสกัน สกรูที่อินเตอร์เมสแบบ หมุนตามกันพบมากในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร การหมุนจะทำให้วัตถุดิบเครื่องผ่านเครื่อง เอกซ์ทรูเดอร์ และการอินเตอร์เมสช่วยให้การผสมของวัตถุดิบในบาร์เรลดีขึ้น

เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่จําแนกได้ตามทิศทางการหมุนของสกรู ซึ่งเป็น ลักษณะของสกรูที่หมุนตามกัน ส่วนต้นของสกรูออกแบบมาเพื่อขนถ่ายส่วนผสมที่เป็นเม็ดๆ ความ สามารถในการขนถ่ายของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ที่เพิ่มขึ้นทำให้ใช้กับส่วนผสมที่เหนียวได้ ดีกว่าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว สกรูคู่ที่ขนานกันนี้จะถูกล้างตัวเอง (self-wiping) เมื่อเกลียวที่ ซ้อนบนสกรูหนึ่ง เช็ดหรือถูด้านต่างของช่องชั้นเนตของอีกสกรูที่อยู่ติดกัน

จากการนวด (kneading disks) จะช่วยกระจายพลังงานกลระหว่างการขนถ่ายมาก ขึ้น โดยส่วนผสมของวัตถุดิบต่างๆจะเคลื่อนจากงานหนึ่ง ไปยังอีกงานหนึ่งซึ่งทำให้การผสมเกิดขึ้น การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังบาร์เรล และการกระจายพลังงานกลจะมากขึ้น เมื่อส่วนต่างๆ เหล่านี้ มีส่วนผสมของอาหารบรรจุอยู่เต็ม



รูปที่ 2.2 เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่: (a) ลักษณะของเกลียว; (b) การเคลื่อนที่ของวัตถุดิบ

(จาก : วิไล, 2543 ; ที่มา : Wemer and Pfeiderer Ltd., 1990)

2.1.6 การเปรียบเทียบชนิดของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ (comparison of extruder types) (รุ่งนภา, 2541)

ข้อดีของเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่

1. ผลผลิตที่ได้ออกมาอย่างต่อเนื่อง ส่วนเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวต้องเติมส่วนผสมให้เต็มชั้นเนลของสกรู เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวทำงานโดยใช้แรงเสียดทาน แล้วทำให้เกิดการไหลแบบลาก (drag flow) เนื่องจากการหมุนของสกรูภายในบาร์เรลที่อยู่หนึ่ง ทำให้อัตรากาไหลเป็นสัดส่วนกับความเร็วของสกรู
2. เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่สามารถใช้กับส่วนผสมที่มีน้ำมัน หรือส่วนผสมที่เหนียวหรือแฉะมาก โดยองค์ประกอบของส่วนผสมที่เป็นข้อจำกัดในการใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวกับสกรูคู่ คือ ไขมัน 4 % และ 20 % น้ำตาล 10 % และ 40 % ความชื้น 30 % และ 65 % ตามลำดับ จะเห็นว่าแบบสกรูคู่มีความยืดหยุ่นในการทำงานได้มากกว่า และบางครั้งยังสามารถเติมองค์ประกอบต่างๆ ในระหว่างกระบวนการผลิตได้ด้วย เช่น สารให้กลิ่นรส (flavor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การขนถ่ายทั้งชนิดไปด้านหลังหรือชนิดย้อนกลับจะใช้ในการควบคุมความดันภายในบาร์เรล ตัวอย่างเช่น ในการผลิตกัมผลไม้ (fruit gums) อาหารจะถูกทำให้ร้อนขึ้นและถูกอัดด้วยการขนถ่ายไปด้านหน้า ความดันจะถูกปลดปล่อยออกมา เพื่อระบายความชื้นที่มากเกินไป หรือเพื่อเพิ่มส่วนผสมที่เติมเข้าไปด้วยการขนถ่ายย้อนกลับ แล้วอาหารจึงถูกอัดอีกครั้งสำหรับกระบวนการเอกซ์ทราซัน

4. ส่วนที่ปล่อยออกมา (discharge) ของเครื่องแบบสกรูคู่ ทำให้เกิดความดันที่ต้องใช้เพื่อการเอกซ์ทราซัน และทำให้ส่วนของเครื่องมีการสึกน้อกว่าในเครื่องแบบสกรูเดี่ยว

5. เครื่องแบบสกรูคู่สามารถใช้กับของผสมที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ จากผงละเอียดไปเป็นเม็ดๆ ขณะที่แบบสกรูเดี่ยวใช้ได้กับช่วงของอนุภาคที่เป็นเม็ดๆ ช่วงหนึ่ง

ในการเปรียบเทียบต้นทุนจำเป็นต้องพิจารณาต้นทุนของเครื่องมือสำหรับกระบวนการเอกซ์ทราซันร่วมกับต้นทุนของระบบทั้งหมดเครื่องเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูคู่มีราคาแพงกว่าเนื่องจากการออกแบบสกรูที่ค่อนข้างซับซ้อน รวมทั้งความซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบบาร์เรล และแจ็กเก็ต สำหรับการถ่ายเทความร้อน แต่ต้นทุนของเครื่องมือที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถชดเชยด้วยการที่เครื่องเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูคู่สามารถใช้แปรรูปส่วนผสมที่มีความชื้นต่ำ เพื่อให้การอบแห้งในผลิตภัณฑ์สุดท้ายน้อยลง

ในเครื่องเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ส่วนผสมมีการปรับสภาพด้วยไอน้ำ หรือน้ำก่อนโดยใช้ความร้อนเพื่อทำให้สุก หรือแปรรูปประมาณครึ่งหนึ่ง ส่วนที่เหลือได้มาจากพลังงานกลที่ใส่เข้าไปในเครื่องเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูคู่ ความร้อนที่ได้จากพลังงานกลที่ใส่เข้าไปจะมีสัดส่วนมากกว่า ขณะที่ส่วนที่เหลือได้จากความร้อนที่ถ่ายเทผ่านแจ็กเก็ตของผนังบาร์เรล

ดังที่กล่าวมาแล้ว เครื่องเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูคู่จะให้ข้อได้เปรียบหลายอย่างเนื่องจากลักษณะเฉพาะของสกรู อย่างแรกคือความสามารถในการขนถ่ายส่วนผสมที่สูงกว่าของเครื่องเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ทำให้เครื่องเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูคู่สามารถใช้ได้กับส่วนผสมต่างๆ ที่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องการป้อนเข้าสู่เครื่องที่เกิดขึ้น เมื่อใช้กับเครื่องเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

เครื่องเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ค่อนข้างจะมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนต่ำจากแจ็กเก็ตที่อยู่รอบๆ บาร์เรล เนื่องจากการผสมที่เกิดขึ้นในช่องว่างของเครื่องไม่ดี ส่วนเครื่องเอกซ์ทราเดอร์แบบสกรูคู่มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่ามาก เนื่องจากการปรับปรุงการผสมทางกล ซึ่งทำให้ช่วงของการใช้กว้างขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการให้ความร้อน หรือความเย็นแก่เพศที่เหนียว หรือสารละลายที่เหนียว

นอกจากนี้ ในเครื่องแบบสกรูคู่ อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างพารามิเตอร์ต่างๆ ของการแปรรูปก็น้อยกว่าของเครื่องแบบสกรูเดี่ยว

2.2 ลักษณะทั่วไปของข้าวเจ้า

ข้าวเจ้าเป็นพืชล้มลุกตระกูลหญ้า จัดอยู่ใน Family Gramineae มีต้นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Oryza sativa* L แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ พันธุ์อินดิกา (*O. sativa indica*) ปลูกมากในแถบมรสุม เช่น อินเดีย ลาว พม่า ไทย และพันธุ์ จาปอนิกา (*O. sativa japonica*) ปลูกมากในพื้นที่เขตอบอุ่น เช่น เกาหลี ญี่ปุ่น (สมชาย และกิตติพงษ์, 2541) โดยกลุ่ม Indica แพร่กระจายลงมาจากทางตอนใต้ของอินเดียสู่ศรีลังกา และหมู่เกาะมลายู แล้วแพร่กระจายกลับไปทางเหนือยังภาคกลางและภาคใต้ของจีน มีชื่อว่า “Hsien” สันนิษฐานว่ามีการปลูกข้าวสายพันธุ์นี้ในในภาคกลางของกลุ่มแม่น้ำแยงซีเกียง เมื่อประมาณ ค.ศ. 200 และเชื่อว่าจากสมัยอินเดียโบราณ มนุษย์ได้นำข้าวสายพันธุ์นี้ไปสู่โลกซีกตะวันตก แถวตะวันออกกลาง ยุโรป แอฟริกา อเมริกาใต้และอเมริกากลาง ส่วนอเมริกาเหนือมีรายงานว่า ได้นำข้าวสายพันธุ์นี้มาจากเกาะมะละกาเพื่อไปปลูกในคริสต์ศตวรรษที่ 17 ข้าวสายพันธุ์นี้มีลักษณะเมล็ดยาว ขึ้นได้ในเขตร้อน

กระบวนการแปรรูปข้าวเปลือกให้เป็นข้าวสาร ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้าวหลักที่มีการซื้อขายเพื่อบริโภคเป็นอาหารหลักของประชากรกว่าครึ่งโลกนั้น จะมีผลพลอยได้จากการแปรรูป คือ ข้าวหัก, ปลายข้าว, รำข้าว และแกลบ ในปริมาณแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดของโรงสีข้าว โดยทั่วไปจะได้ข้าวสาร (head rice) ประมาณ 48 %, ปลายข้าว 17%, รำดิบ 10%, แกลบ 25 % ถ้าเป็นโรงสีข้าวขนาดใหญ่จะมีผลผลิตจากผลพลอยได้ดังกล่าวมาก จึงต้องพัฒนาการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้นี้เป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อให้มีมูลค่าเพิ่ม หรือเพื่อการลดต้นทุนการแปรรูปข้าวได้อีกทางหนึ่ง เมื่อนำข้าวเปลือกผ่านการแปรรูปในโรงสีซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน คือ 1. การทำความสะอาดสะอาดข้าวเปลือก เพื่อขจัดสิ่งเจือปนเช่น เศษดิน หิน กรวด ทราย หรือฟางข้าวออกจากข้าวเปลือก 2. การกะเทาะข้าวเปลือกให้เป็นข้าวกล้องและแกลบ 3. การขัดขาว คือการขัดผิวข้าวกล้องให้เป็นข้าวสาร และรำละเอียด 4. การคัดแยกข้าวสารเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหักขนาดต่างๆ (เครือวัลย์, 2536) จากนั้นจึงบรรจุข้าวลงในกระสอบป่าน กระสอบละ 100 กิโลกรัม หรือในกระสอบพลาสติก 50 กิโลกรัม โดยทั่วไป ข้าวเปลือก 1 เกวียน (1,000 กิโลกรัม) เมื่อผ่านการสีแล้วจะได้ข้าวสารและข้าวหักรวมกันประมาณ 650 กิโลกรัม แกลบประมาณ 250 กิโลกรัม รำข้าวประมาณ 100 กิโลกรัม (วันชัย, 2541)

ข้าวหัก คือ ส่วนของข้าวที่หักซึ่งคัดแยกได้จากเครื่องคัดขนาด มีขนาดของส่วนข้าว 2.5 - 4.9 ส่วน จาก 10 ส่วน ตามมาตรฐานข้าวไทย และปลายข้าวคือส่วนของข้าวที่เล็กกว่า 2.5 ส่วน ผลพลอยได้ทั้ง 2 ชนิดนี้นิยมไปเป็นวัตถุดิบในการแปรรูปด้วยการบดให้เป็นแป้งข้าว แล้วจึงนำแป้งข้าวไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอื่นได้อีกมากมาย ทั้งอาหารหลักเช่น อาหารเส้นต่างๆ

ได้แก่ ก๋วยเตี๋ยวเส้นใหญ่ เส้นเล็ก เส้นหมี่ และขนมจีน เป็นต้น อาหารว่างเช่น อาหารขบเคี้ยวแบบกรอบพอง (อรอนงค์, 2535)

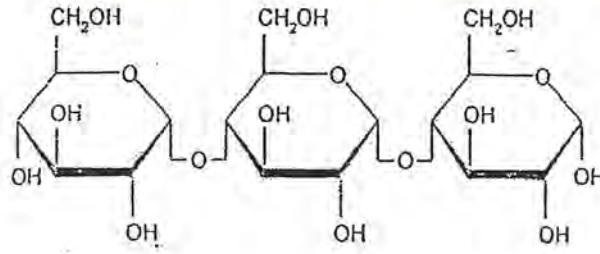
2.2.1 แป้งข้าวเจ้า

การผลิตแป้งข้าวเจ้า จะใช้ ข้าวหัก หรือปลายข้าว นิยมใช้ข้าวประเภทที่มีอะมิโลสสูง โดยผ่านกรรมวิธีการผลิตแบบไม่แห้ง (wet milling process) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในปัจจุบัน แป้งที่ได้มีคุณภาพดี เม็ดแป้งมีความละเอียด และสิ่งเจือปนน้อย ข้าวที่มีจำหน่ายทั่วไปสามารถจัดกลุ่มตามอะมิโลสได้ 3 กลุ่ม คือ ข้าว อะมิโลสต่ำ (10-20%) เป็นข้าวนุ่มค่อนข้างเหนียว ข้าวอะมิโลสปานกลาง (20-25%) เป็นข้าวค่อนข้างนุ่มแต่ไม่เหนียว ข้าวอะมิโลส สูง (25-34%) เป็นข้าวแข็ง ปริมาณอะมิโลสเป็นลักษณะประจำของข้าวแต่ละพันธุ์ เพราะอะมิโลสเป็นปัจจัยสำคัญในการคาดคะเน หรืออธิบายคุณภาพในการหุงต้มข้าว

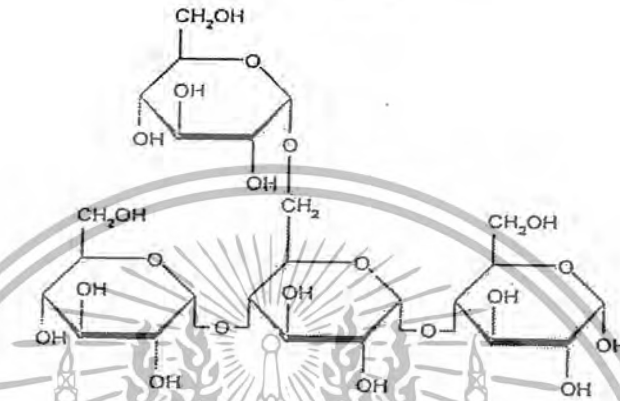
ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งข้าวเจ้า(2529) กำหนดว่าแป้งข้าวเจ้าต้องมีความชื้นไม่เกิน 13.0% ปริมาณแป้งไม่น้อยกว่า 85% เถ้าไม่เกิน 0.5% เถ้าที่ไม่ละลายในกรดไม่เกิน 0.03% และปริมาณอะมิโลสไม่ต่ำกว่า15% เมื่อนำมาต้มด้วยกึ่งสุกหรือสุกกำลังขยาดสูง จะพบเม็ดแป้งขนาดเล็กประมาณ 2 - 9 ไมโครเมตร มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมกระจายตัวอยู่ และบางส่วนจับตัวกันเป็นกลุ่ม เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงมองเห็นวงแหวนและไฮลัมไม่ชัดเจน

2.2.2 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของแป้ง

แป้ง (Starch) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาล แอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose unit) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวต่อกันของน้ำตาลกลูโคสโดย สูญเสีย น้ำ 1 โมเลกุลต่อ 1 พันธะกลูโคซิดิก (Glucosidic bond) ที่เกิดระหว่างน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุล แป้งจะอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (Starch granule) มีขนาด 1-2 ไมครอน จนถึง 200 ไมครอน มีลักษณะแตกต่างกันทั้ง แบบทรงกลม ไข่ หลายเหลี่ยม ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย พอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และ อะไมโลเพคติน (amylopectin) โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.4



Amylose



Amylopectin

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะมิโลสและอะไมโลเพคติน (ที่มา: กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

อะมิโลสมีลักษณะเป็นสายตรงของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก เพียงอย่างเดียว ประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200-2,000 หน่วย สามารถดูดความชื้น และการกระจายตัวในน้ำได้ดี เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งจนแป้งพองตัวอย่างเต็มที่ โมเลกุลของอะมิโลสจะละลายออกมาจากเม็ดแป้งทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดต่ำลง เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการจับเรียงตัวเป็น โครงร่าง 3 มิติ โดยโมเลกุลของอะมิโลส จะเข้ามาจับเรียงตัวใกล้ๆ กัน ได้ลักษณะ โครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำได้ ในกรณีที่สารละลายแป้ง มีความเข้มข้นมากจะได้มีลักษณะเป็นเจล และจะตกตะกอนในกรณีที่สารละลายมีความเข้มข้นของแป้งน้อย อะมิโลสมีน้ำหนักของโมเลกุลในช่วง 10^5 - 10^6 ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิด จะมีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไป นอกจากนี้แล้วอะมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับ ไอโอดีน ให้สีน้ำเงิน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะมิโลส

อะไมโลเพคตินมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ส่วนเป็นเส้นตรงประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส 25-30 หน่วย เรียงต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก อะไมโลเพคตินโมเลกุลหนึ่ง จะประกอบด้วย น้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200,000 หน่วยขึ้นไป เนื่องจากอะไมโลเพค

ดินเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามาก เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง แป้งเปียกที่ได้ไม่มีสีและใส มีความหนืดสูง เมื่ออุณหภูมิลดลงโมเลกุลเกิดการรวมตัวกันยาก ดินคือน้อย อะไมโลเพคตินจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10^7-10^8

อะมิโลส และอะไมโลเพคติน จะเรียงตัวกันอย่างมีระเบียบในเม็ดแป้ง ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และ ส่วนที่ไม่เป็นผลึกหรือ ออสถฐาน (amorphous) โดยส่วนที่เป็นผลึก โมเลกุลจะจัดเรียงกันเป็นกลุ่มๆ อย่างหนาแน่นเป็นระเบียบ มีอะมิโลสประกอบอยู่มาก โดยประกอบตามความยาวกับส่วนที่เป็นเส้นตรงของอะไมโลเพคตินด้วย พันธะไฮโดรเจนระหว่างภายในโมเลกุลเดียวกันและต่างโมเลกุลขึ้นมากมาย ทำให้โมเลกุลหนาแน่น และมีแรงยึดเหนี่ยวสูง การดูดน้ำ และการพองตัวเกิดขึ้น อย่างจำกัด เนื่องจากข้างแข็ง และไม่ยอมทำปฏิกิริยากับสารอื่น ส่วนที่ไม่เป็นผลึกโมเลกุลจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ประกอบด้วย อะไมโลเพคตินเป็นส่วนใหญ่ จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้น้อย และดูดน้ำได้ดี วัตถุประสงค์ทั้งส่วนที่เป็นผลึกและไม่เป็นผลึกจะเรียงตัวสลับกัน ทำให้เกิดการหักเห 2 แนวเป็นเงากากบาท เมื่อส่องผ่านแสงโพลาไรส์ (Polarized Light) เรียกว่าไบรีฟรินเจนท์ (birefringence) แป้งจากแหล่งที่ต่างกัน มีผลต่อการรวมตัวของเม็ดแป้ง ความหนืด ความใส และการรวมตัวกันของแป้งสุก

2.2.3 การดูดซับน้ำ การพองตัว และการละลายของแป้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายคือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง การตัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิด (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)

แป้งจากธัญพืช มีรูปแบบการพองตัวและการละลาย 2 ชั้น แสดงถึงแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณผลึก และบริเวณอสถฐานของเม็ดแป้ง แป้งจำพวกนี้มีจำนวนพันธะสูงสุด แต่มีกำลังการพองตัวและการละลายต่ำสุดเนื่องจากมีปริมาณอะมิโลสสูง ซึ่งอะมิโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น พองตัวต่ำ

จำนวนและชนิดพันธะภายในเม็ดแป้ง มีผลหลายปัจจัยได้แก่ ขนาด รูปร่าง ส่วนประกอบ และการกระจายตัวของร่างแหภายในเม็ดแป้ง อัตราส่วนของอะมิโลส และอะไมโลเพคติน น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโมเลกุล จำนวนกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัว และความยาวสาขาในอะไมโลเพคติน

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติในการพองตัวและความสามารถในการละลายของแป้ง
แต่ละชนิดที่ 95°C

แป้ง	กำลังการพองตัว	การละลาย (%)
มันฝรั่ง	> 1000	82
สาธู	97	39
มันสำปะหลัง	71	48
Canna	72	37
ข้าวขาม่อม(Arrowroot)	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

(จาก : กุสัณรงค์ และเกื้อกูล,2543 ; ที่มา : Leach และคณะ, 1959)

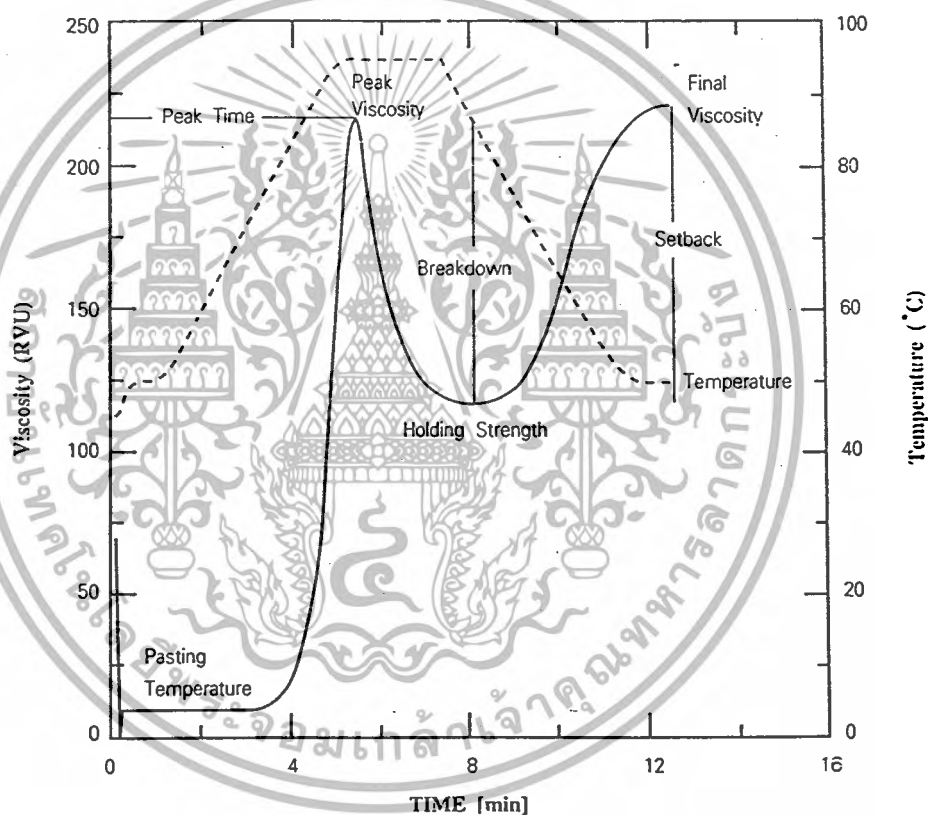
2.2.4 ความหนืด

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของแป้งได้แก่ ชนิดของแป้งและการตัดแปรแป้งด้วยวิธีต่างๆ เมื่อให้ความร้อนแก่แป้ง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น น้ำบริเวณรอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง ทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืด อุณหภูมิที่กราฟเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (pasting temperature) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาต่อไปโดยมีการกวนอย่างต่อเนื่อง จะทำให้โครงสร้างภายในแตกออก ความหนืด

ลดลง เกิดการรีโทรกราเดชัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่หลุดออกจากแป้ง

Rapid Visco Analyser (RVA) เป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะต้องพิจารณาความหนืดขณะให้ความร้อน คุณสมบัติพิเศษคือมีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ สามารถทำให้ร้อนและเย็นได้

อย่างแม่นยำและรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ หา pasting curve ได้ใน 12-13 นาที เนื่องจากมีกลไกส่งผ่านความร้อนที่ดีกว่า และใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA

(จาก : กล้าณรงค์, 2543 ; ที่มา : Newport Scientific Pty, Ltd., 1995)

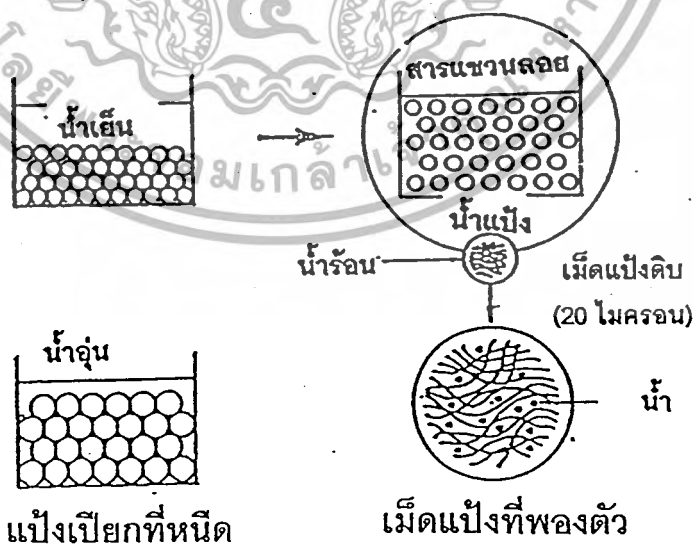
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติความหนืดของแป้งแต่ละชนิดเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

แป้ง	Gel temp(°C)	peak visc.	Breakdown	setback	paste type	paste clarity
ข้าวสาลี	52 - 56	ต่ำ	ต่ำปานกลาง	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

(จาก : กล้าณรงค์ และเกื้อกุล,2543 ; ที่มา : Newport Scienceific Pty.,Ltd., 1995)

2.2.5 การเกิดเจลาตินในแป้ง (Gelatinization)

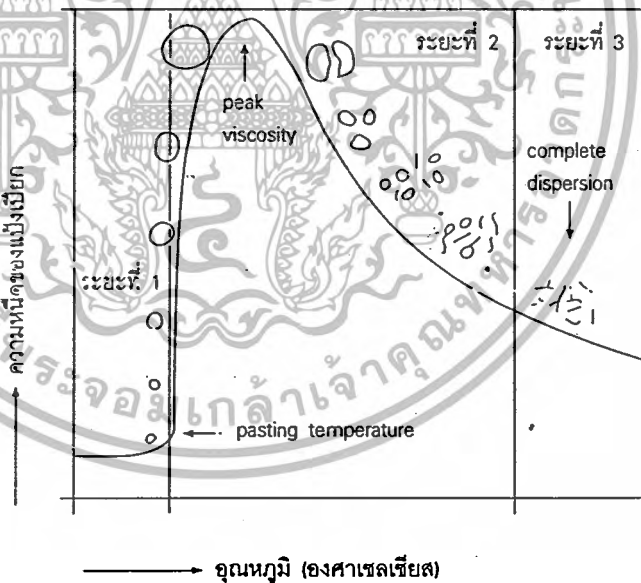
เกิดจากการให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เนื่องจากน้ำอิสระรอบๆโมเลกุลแป้งมีน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืด อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่าอุณหภูมิเริ่มเจลาตินไนซ์



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของแป้งระหว่างการหุงต้ม

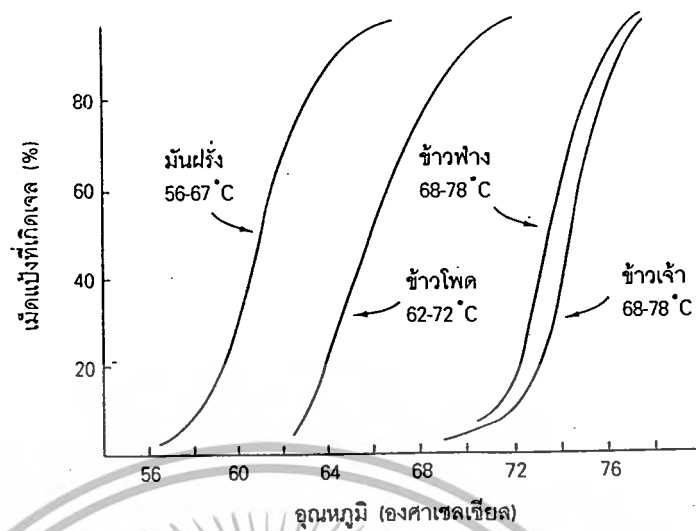
(จาก : กล้าณรงค์ และเกื้อกุล,2543 ; ที่มา : Sanders ,1996)

การเกิดเจลาติไนซ์ของเม็คแป้งแบ่งได้เป็น 3 ระยะ โดยระยะแรก เม็คแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่าง micelles ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นเห็นได้ชัด เม็คแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้าง birefringence ได้ เมื่อมีการใส่สารเคมี หรือเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65°C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็คแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ (micelles) ภายในเม็คแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็คแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เม็คแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้าง birefringence ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมาซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนถึงระยะที่ 3 รูปร่างเม็คแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ดีขึ้น (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)



รูปที่ 2.6 ระยะในการเกิดเจลาติไนซ์ในเซชันของเม็คแป้ง

(จาก : กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543 ; ที่มา : Sanders, 1996)



รูปที่ 2.7 เปอร์เซ็นการเกิดเจลลาคีในชั้นของเม็ดแป้งแต่ละชนิด
(จาก : กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543 ; ที่มา : Sanders, 1996)

ตารางที่ 2.3 ลักษณะการเกิดเจลของแป้งแต่ละชนิด

แป้ง	Kofler gelatinization temp. range (°C) ^a	brabender pasting temp. (8%: °C) ^b	brabender peak viscosity (8%: BU) ^{b,c}	swelling power ที่ 95 °C	critical conc. ที่ 95 °C
แป้งข้าวโพด	62-67-72	75-80	700	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
แป้งสาธู	60-66-72	65-70	1100	97	1.0
แป้งท้าวขาม่อม	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

(จาก : กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543 ; ที่มา : Swinkels, 1985)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation)

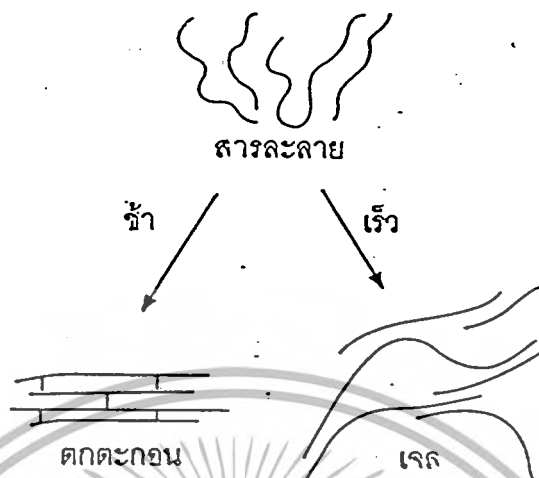
เกิดจากการที่แป้งได้รับความร้อนจนถึงเจลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วแตกออก โมเลกุลอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจาย กระจาย ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว อะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวขึ้นมาใหม่ ด้วยพันธะไฮโดรเจน เป็นร่างแห 3 มิติ โครงสร้างใหม่ที่อุ้มน้ำและ และไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดเจลเหลวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เป็นการคืนตัวของแป้ง เมื่อการคืนตัวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อตกตะกอนอย่างรวดเร็ว เจลจะขุ่น แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มาก และเร็วกว่าแป้งที่มีอะมิโลเพคตินสูง (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543)



รูปที่ 2.8 การเกิดรีโทรกราเดชัน

(จาก : กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543 ; ที่มา : Fruton and Simmonds, 1958)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กลไกการเคลื่อนตัวของแป้ง
(จาก : กัด้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543 ; ที่มา : Fruton and Simmonds, 1958)

2.3 อาหารขบเคี้ยว

อาหารขบเคี้ยว หมายถึง อาหารที่รับประทานเล่นระหว่างมื้ออาหารหลัก ลักษณะเด่นของอาหารขบเคี้ยวในปัจจุบันคือ น้ำหนักน้อย เก็บรักษาง่าย นำติดตัวไปในที่ต่างๆ ได้สะดวก อาหารขบเคี้ยวจัดว่าเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูง เนื่องจากมีส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรตเป็นจำนวนมากจึงช่วยให้อิ่มท้องได้ (Gordon, 1990) ผลิตภัณฑ์อาจมีลักษณะร้อนหรือเย็น ในรูปของแข็งหรือของเหลว ซึ่งอาศัยการเตรียมเพียงเล็กน้อย อาหารขบเคี้ยวอาจเป็นของหวาน หรือเป็นของคาว และอาจใช้เป็นอาหารที่มีคุณลักษณะเฉพาะ เช่น อาหารเพื่อสุขภาพหรืออาหารว่างในงานสังสรรค์ หรืออาหารที่ผ่านการแปรรูป พร้อมบริโภคทันที หรือต้องการเตรียมเพียงเล็กน้อยเช่น การเติมน้ำเคือดเป็นต้น ใช้เป็นอาหารที่บริโภคได้ระหว่างมื้อ

อาหารขบเคี้ยวนับว่ามีบทบาทในวิถีการดำรงชีวิตของผู้บริโภครุ่นใหม่เป็นอย่างยิ่ง ดังจะสังเกตเห็นได้ว่า มีการจัดวางจำหน่ายอาหารขบเคี้ยวในร้านค้าทั่วไปจำนวนมาก และมีผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เข้าสู่ท้องตลาดตลอดเวลา การพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารขบเคี้ยวในระดับสากลกล่าวกันว่า ได้เริ่มอย่างจริงจังเมื่อหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 มีการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต พัฒนาระบบผสมที่ใช้ปรุงรส และรูปแบบของผลิตภัณฑ์ ทำให้อาหารขบเคี้ยวมารับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประทาน และสะดวกมากยิ่งขึ้น มีการพัฒนาการผลิตแบบต่อเนื่อง (batch process) เพื่อช่วยให้การผลิตเป็นไปอย่างรวดเร็วและสามารถผลิตอาหารได้จำนวนมาก การพัฒนาการบรรจุหีบห่อที่ช่วยให้ผลิตภัณฑ์เก็บรักษาได้นานขึ้น และมีคุณภาพดี (เพ็ญขวัญ และทัศนีย์, 2541)

2.3.1 ชนิดของอาหารขบเคี้ยว

อาหารขบเคี้ยวเป็นกลุ่มของผลิตภัณฑ์ที่มีหลายชนิด และเป็นกลุ่มที่อยู่ระหว่างการพัฒนา จึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมาตลอดเวลา การให้ความหมายหรือแม้แต่การจัดแบ่งประเภทจึงยังไม่มีการกำหนดที่ชัดเจน การจัดแบ่งประเภทของอาหารขบเคี้ยวมีหลายลักษณะดังนี้

2.3.1.1 การแบ่งอาหารขบเคี้ยวตามระยะเวลาและชนิดของผลิตภัณฑ์แบ่งได้เป็น 3 ประเภท (Harper, 1981) คือ

1. อาหารขบเคี้ยวยุคที่หนึ่ง (first generation snacks) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตแบบดั้งเดิม โดยใช้กรรมวิธีแบบง่ายๆ เช่น การทอด หรือ การอบ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์เช่น มันฝรั่งทอด แคนเกอร์ ชนิดต่างๆ
2. อาหารขบเคี้ยวยุคที่สอง (second generation snacks) เป็นอาหารขบเคี้ยวประเภทลูกพองทันที (direct-expanded product) ส่วนใหญ่ทำจากวัตถุดิบประเภทธัญชาติเช่น คอลเลคเตอร์ (collect extruder) ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 15) นำมาอบเพื่อลดความชื้นลงให้ต่ำกว่าร้อยละ 4 เคลือบด้วยน้ำมันและกลิ่นรสต่างๆ (กมลวรรณ, 2541) กล่าวว่าการพองของผลิตภัณฑ์เกิดจากการทำให้ส่วนผสมของโด (dough) ร้อนจนอุณหภูมิสูงกว่า 100 °C และความดันภายในเครื่องสูงกว่าความดันบรรยากาศ เมื่อโดเคลื่อนที่ออกจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์โดยผ่านช่องเปิดของหน้าแปลนจะเกิดการระเหยของน้ำเป็นไอน้ำในขณะที่ความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการพองตัวของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์มีลักษณะพองกรอบ ความหนาแน่นต่ำ มีรูปร่างต่างๆ ตามแบบพิมพ์ หรือช่องเปิดของหน้าแปลนของเครื่องทำการผลิต มีการผลิตกลิ่นรสต่างๆบนผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น ข้าวโพดพองกรอบ (corn curls) คาราฉ่ำ ขนมอบกรอบรูปร่างเลียนแบบหัวหอม (onion rings) และซีโต้ส เป็นต้น

3. อาหารขบเคี้ยวยุคที่สาม (third generation snacks) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีหลายรูปแบบ และมีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แรงเฉือนสูง เริ่มจากการผสม ธัญชาติ และ/หรือ สตาร์ชที่ดัดแปรหรือไม่ก็ได้ น้ำมันพืช และอิมัลซิไฟเออร์ (กมลวรรณ, 2541) กล่าวว่า อาหารขบเคี้ยวประเภทสุกแต่ไม่พองทันที (indirect-expanded product) บางครั้งเรียกว่า เป็นอาหารขบเคี้ยวกึ่งสำเร็จรูปโดยมีชื่อเรียกดังนี้ half product , semi-product หรือ intermediate product อาหารขบเคี้ยวชนิดนี้เมื่อผลิตออกมามีความชื้นอยู่ค่อนข้างสูง หลังจากนั้นไปอบไล่ความชื้นจนมีความชื้นในผลิตภัณฑ์ประมาณร้อยละ 8 – 12 จะอยู่ในรูปของกึ่งสำเร็จรูปมีรูปร่างต่างๆตามแบบพิมพ์หรือช่องเปิดของหน้าแปลนของเครื่องที่ทำการผลิต มีลักษณะเนื้อแข็ง แน่น โปร่งแสง เป็นมันวาวที่เรียกว่า เพลเลต (pellet) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทอด หรือการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่พองกรอบและทำการเคลือบกลิ่นรสต่างๆบนผลิตภัณฑ์ ข้อดีของเพลเลตคือ เก็บได้นาน ไม่เสีย ถ้าเก็บภายใต้สภาพที่แห้งจะมีอายุการเก็บประมาณ 1 ปี สะดวกในการขนถ่าย สามารถขนส่งยังไปทั่วโลกได้ไม่ต้องกังวลเรื่องผลิตภัณฑ์แตกหัก

2.3.1.2 การแบ่งประเภทอาหารขบเคี้ยวตามกรรมวิธีการผลิต สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท (Matz, 1984) คือ

1. Deep fat fried product เป็นการทอดในน้ำมัน จะใช้เวลานานในการทอด ลักษณะของผลิตภัณฑ์มีทั้งแบบแผ่น แท่ง วงแหวน และรูปแบบอื่นๆ
2. Quick fried product ใช้เวลาในการทอดรวดเร็ว ใช้อุณหภูมิสูงประมาณ 200 °C ในระยะเวลาสั้น 10 – 15 นาที ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเป็นแผ่น
3. Extrusion cooked product ใช้ธัญชาติทั้งเมล็ด หรือใช้แป้งผสมน้ำ แล้วนำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ นวดจนเกิดโด(Dough) ทำให้สุกภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูง ทำให้แห้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูปร่างเป็นแผ่นบาง สามารถปรับขนาดตามความต้องการได้
4. Roasted product เป็นการอบนิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ประเภทถั่ว

2.3.1.3 การแบ่งประเภทอาหารขบเคี้ยวตามอุณหภูมิของอาหารขณะเสิร์ฟ เช่น เป็นประเภทร้อน (hot snack) ได้แก่ พิซซาขนาดเล็ก ปอเปี๊ยะทอด ครัวซองสอดไส้ หรือที่เป็นประเภทเย็น ได้แก่ คูกี้ ผลไม้อัดเป็นแท่ง และชีสโกแลต เป็นต้น (เพ็ญขวัญ และทัศนีย์, 2541)

2.3.2 การตลาดของขนมขบเคี้ยว

เป็นตลาดที่มีแนวโน้มการขยายตัวค่อนข้างสูง เนื่องจากมีรูปแบบและรสชาติที่แปลกใหม่ อยู่เสมอ รวมทั้งการมีกิจกรรมทางการตลาดอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวในตลาดอยู่ตลอดเวลา (Morita, 2001) ตลาดของขนมขบเคี้ยวในปี 2544 (มกราคมถึงตุลาคม ปี 2544) มีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 17 แบ่งเป็นตลาดขนมขบเคี้ยวขึ้นรูป (extruded snacks) ร้อยละ 38.5 เติบโตร้อยละ 29.74 , มันฝรั่งร้อยละ 28.5 เติบโตร้อยละ 7.9 , ขนมขบเคี้ยวจากปลาร้อยละ 10.4 เติบโตร้อยละ 8.01 , ปลาหมึกร้อยละ 8.9 เติบโตร้อยละ 7.34 , ถั่วร้อยละ 8.8 เติบโตจากปีที่ผ่านมา ร้อยละ 20.66 , ปลาเส้นร้อยละ 3.6 อัตราการเติบโตร้อยละ 33.16 และข้าวโพดร้อยละ 1.3 เติบโตเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.04 (ฐานเศรษฐกิจ, 2545)

ในปัจจุบันผู้ผลิตได้หันมาสนใจในควิลินค้าโดยเฉพาะรสชาติ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การผลิตสินค้าใหม่ จะต้องมีความแตกต่างจากสินค้าอื่นในตลาด มีจุดขายที่ชัดเจน มีคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากผู้บริโภคมีแนวโน้มที่จะใส่ใจในคุณภาพของตนเอง ดังนั้นถ้าอาหารขบเคี้ยวใดมีคุณค่าทางอาหาร หรือมีภาพพจน์ของผลิตภัณฑ์ที่ดีจะสามารถทำตลาดได้ดี และเร็วในตลาดสินค้าอาหารขบเคี้ยว (นฤศันต์, 2541)

2.4 การหาสถานะที่เหมาะสมโดยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology , RSM)

เป็นวิธีที่ใช้ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative data) ที่ได้จากการทดลองมาหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง (Factor หรือ independent variables) กับค่าที่ได้จากการทดลอง (Response หรือ dependent variables)

2.4.1 RSM มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ

1. การสร้างฟังก์ชันพื้นผิวตอบสนอง (response surface function) ที่แสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนอง เมื่อระดับของปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การหาระดับของปัจจัยเชิงปริมาณที่เหมาะสม (optimum value) ที่ได้จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด (Khuri and Cornell , 1987)

2.4.2 วิธีการใช้ RSM

1. กำหนดปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการทดลอง 2 หรือ 3 ปัจจัย
2. กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง
3. กำหนดแผนการทดลองที่ใช้ (Experimental Design) และการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

4. รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แล้วทำการวิเคราะห์ผลที่ได้และตีความผลที่ได้

2.4.3 แผนการทดลองเพื่อศึกษา RSM

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

1. แบบหุ่นลำดับที่หนึ่ง (first ordered model) เป็นแบบหุ่นที่ประกอบขึ้นด้วยดีกรีที่หนึ่งของปัจจัย

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

2. แบบหุ่นลำดับที่สอง (second ordered model) เป็นแบบหุ่นที่ประกอบขึ้นด้วยดีกรีที่หนึ่ง และดีกรีที่สองของปัจจัย

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

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ประชา บุญญศิริกุล และคณะ(2539) ได้ทำการศึกษาคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากถั่วเขียว โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ทราเคอร์แบบสกรูคู่ ลักษณะที่มีผลต่อคะแนนความชอบคือ ความหนาแน่นปรากฏ อัตราการพองตัว และแรงตัด โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คะแนนต่ำ มักเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความพองมากเกินไป เนื่องจากเนื้อผลิตภัณฑ์มักเป็นโพรงอากาศใหญ่ ผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการพองตัวสูง มักมีความหนาแน่นปรากฏต่ำ และแรงตัดต่ำ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการพองตัวต่ำจะมีความหนาแน่นปรากฏสูง และแรงตัดสูง สำหรับคุณภาพทางด้านความสามารถในการดูดซับน้ำนั้น ให้ผลต่อความชอบเนื้อสัมผัสไม่ชัดเจนนัก

นิตา และสุภาพร (2537) ได้ศึกษาถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ของปลายข้าวต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์ทราเคอร์ โดยใช้วัสดุคิบที่มีปริมาณอะมิโลสต่างกันพบว่า ปริมาณของอะมิโลสมีผลให้ความสามารถการดูดซับน้ำ และค่าปริมาตรของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นก็มีค่าต่ำลง

รุจิรัตน์ และศิริรินทร์ (2539) ได้รายงานผลของอุณหภูมิ ต่อการพองตัวของผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์ทราเคอร์ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการเอกซเรย์ชันมีผลให้ความดัน และค่า Degree of gelatinization ของอาหารสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้การพองตัวของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ในขณะที่มีความหนาแน่นลดลง และจากการรายงานของ Case และคณะ (1992) พบว่า เมื่ออุณหภูมิผ่านเข้าเครื่องเอกซเรย์ทราเคอร์ แบบสกรูคู่ การ gelatinization เพิ่มขึ้น ปริมาณการพองตัวของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และค่า bulk density จะลดลง ค่า bulk density ที่น้อยที่สุดเกิดเมื่อการ gelatinization ได้ 75% สำหรับทุกๆผลิตภัณฑ์ ยกเว้นแป้งข้าวโพดที่แยกโปรตีนออก ซึ่งจะมีค่า bulk density ที่น้อยที่สุด เมื่อการ gelatinization ได้ 55% แป้งสาลีจะเกิดการพองตัวสูงสุดเมื่อ degree of gelatinization ไม่น้อยกว่า 75% ค่า bulk density จะลดลงเมื่อการ gelatinization เพิ่มขึ้น และค่า bulk density น้อยที่สุดที่เกิดขึ้น เมื่อการ gelatinization อยู่ระหว่าง 55 – 75 % ขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์

รุ่งนภา และประชา (2541) ศึกษาข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 พบว่าเมื่อจำนวนเที่ยวของการบดตบมากขึ้น ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยทั้งในข้าวเจ้า และข้าวเหนียวลดลง แต่ปริมาณอะมิโลสที่มีอยู่ในข้าวจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การเตรียมส่วนผสมข้าวเจ้า และ

ข้าวเหนียวที่ศึกษาให้มีปริมาณความชื้นที่ 15% จะให้เอกซ์ทรูคตที่มีความพองมากที่สุด ในขณะที่ bulk density น้อยที่สุด และแรงกดทะลุต่ำสุด ส่วนอิทธิพลของขนาดอนุภาคในข้าวทั้ง 2 ชนิดพบว่า ขนาดของอนุภาคในช่วง 50-70 เมส และ 70-100 เมส ให้เอกซ์ทรูคตที่มีความพองที่ดีกว่า และมี bulk density ที่ต่ำกว่าเอกซ์ทรูคตที่เตรียมจากอนุภาคในช่วง 30-50 เมส

วรวิฐิ (2541) ศึกษาผลของความชื้นของวัตถุดิบตั้งต้นต่ออุณหภูมิที่เกิดการพองตัวของเอกซ์ทรูคต โดยเมื่อเปรียบเทียบกับระยะห่างของหน้าแปลนเท่ากัน พบว่าเมื่อเพิ่มความชื้นของแป้งข้าวโพดก่อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเคอร์ ทำให้อุณหภูมิที่เกิดการพองตัวของเอกซ์ทรูคตมีค่าลดลง และถ้าระยะห่างของหน้าแปลนลดลง มีผลทำให้อุณหภูมิที่เกิดการพองตัวของเอกซ์ทรูคตเพิ่มสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบ

1. ปลายข้าวหัก พันธุ์ชัยนาท
2. ปลายข้าวที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด
3. ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยวที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่อง Extruder รุ่น Berstorff ZE 25x33D ชนิดสกรูคู่
2. เครื่อง Rapid Visco Analyzer รุ่น RVA - 4
3. เครื่อง Texture Analyzer รุ่น TA.XT.Plus
4. ตู้อบลมร้อน รุ่น UM 400
5. เครื่อง Centrifuge
6. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งรุ่น Yamato HB - 120
7. เครื่องปั่นรุ่น HR 1721
8. ภาชนะอลูมิเนียมเปล่า พร้อมฝาปิด
9. กระป๋องอลูมิเนียมขนาด 1 ลิตร
10. กระบอกตวงขนาด 50 มล.
11. โดคูดความชื้น
12. หลอดทดลอง
13. ช้อนตวงสาร
14. แท่งแก้วคน
15. ฟอยล์

3.2 การกำหนดตัวแปรที่ศึกษา

ในการทดลองนี้ต้องการศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการผลิต ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วรอบของสกรู อุณหภูมิบาร์เรล และปริมาณความชื้นของปลายข้าว ต่อคุณลักษณะต่างๆ ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดตที่ได้

การกำหนดค่าตัวแปรเป็นดังนี้

3.2.1 ตัวแปรอิสระ (Independent variables)

คือ

1. ความเร็วรอบของสกรู 3 ระดับ

1.1) 200 รอบต่อนาที

1.2) 300 รอบต่อนาที

1.3) 400 รอบต่อนาที

2. อุณหภูมิบาร์เรล 3 ระดับ

2.1) 80 °C

2.2) 100 °C

2.3) 120 °C

3. ปริมาณความชื้นของปลายข้าว 3 ระดับ

3.1) 16 %

3.2) 18 %

3.3) 20 %

3.2.2 ตัวแปรตาม (Dependent Variables)

คือ

1. ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดต (%MC)

2. ความหนาแน่น

3. ความหนืด (Viscosity)

4. ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความสามารถในการละลายน้ำ (WS)
6. ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture)
7. อัตราส่วนการขยายตัว (ER)

3.3 การวางแผนการทดลอง

ใช้แผนการทดลองแบบ Box - Behnken Design แบ่ง เป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย 15 การทดลองที่สภาวะต่างๆกัน ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลอง

สัญลักษณ์	ค่าตัวแปร	ระดับ		
		1	0	-1
V_1	ความเร็วรอบสกรู (rpm)	200	300	400
V_2	ความชื้น (%)	16	18	20
V_3	อุณหภูมิบาร์เรล (°C)	80	100	120

ตารางที่ 3.2 แผนการทดลองแบบ Box - Behken Design

no.	V_1	V_2	V_3
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

3.4 ขั้นตอนการทดลอง [ดังแสดงในตารางที่ 3.2]

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบ

1. นำปลายข้าวพันธุ์ชัยนาทไปบดด้วยเครื่องบดแบบ Hammer Mill ใช้ขนาดตะแกรง 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 1 เทียว
2. แบ่งตัวอย่างปลายข้าวที่ผ่านการบดไปวิเคราะห์หาขนาด ค่าความชื้น และความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนึ่งในการกำหนดค่าความชื้นของวัตถุดิบ กระทำโดยการปรับอัตราการป้อนน้ำที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ ซึ่งได้จากการทำสมดุลมวลดังนี้

$$\text{ปลายข้าวเริ่มต้นมีความชื้น} = 11.25 \%$$

$$\text{อัตราการป้อนปลายข้าว} = 12 \text{ kg/hr}$$

$$\therefore \text{ปริมาณน้ำที่มีในวัตถุดิบ} = 1.35 \text{ kg/hr}$$

$$\text{ปริมาณปลายข้าวแห้งที่ปราศจากน้ำ} = 10.65 \text{ kg/hr}$$

$$\text{เมื่อต้องการให้วัตถุดิบปลายข้าวที่ป้อนมีความชื้น} = 16 \%$$

$$\therefore \text{กำหนดอัตราการป้อนน้ำเข้าสู่เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์} = x \text{ kg/hr}$$

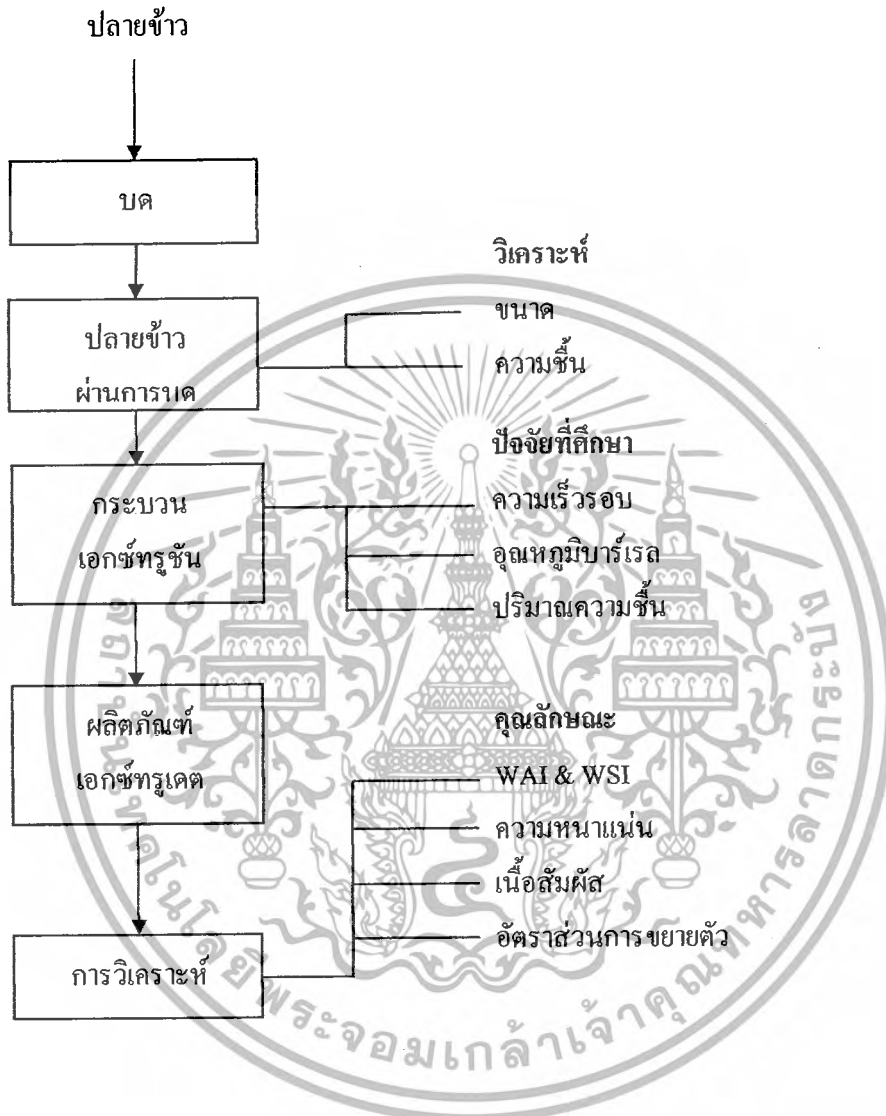
$$\text{เมื่อ } 16 = \frac{1.35 + x}{12 + x} \times 100$$

$$\therefore x = 0.6786 \text{ kg/hr}$$

เมื่อทราบค่า x ที่ต้องการนำค่าที่ได้ไปปรับที่ป้อนน้ำเข้า

3.4.2 การทดลองผลิตด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

1. นำตัวอย่างปลายข้าวที่ผ่านการบดประมาณ 10 กิโลกรัม
2. ปรับค่าการทำงานเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์รุ่น Berstorff ZE 25x33D ที่สภาวะการทดลองต่างๆ (ดังแสดงในตารางที่ 3.2)
3. ดำเนินการผลิตจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล
4. เก็บตัวอย่างเอกซ์ทรูเดตที่ได้ไปอบด้วยตู้อบลมร้อนจนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 10 นาที
5. นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตที่ผ่านการอบ ไปทำการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่างๆ ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2.2



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวัดค่าคุณลักษณะของเอกซ์ทราคต์ที่ได้

3.5.1 ค่าความชื้นของเอกซ์ทราคต์ (Moisture Contain)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (AOAC, 1990)

1. ชั่งภาชนะอลูมิเนียมพร้อมฝาเปล่า บันทึกน้ำหนัก
2. นำตัวอย่างที่บดแล้ว ใส่ลงในภาชนะ ประมาณ 2 กรัม
3. นำกระปุกพร้อมฝาเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ปิดฝา แล้วนำไปวางในโถดูดความชื้น ประมาณ 20 นาที
5. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหลังอบ
6. คำนวณค่าความชื้นมาตรฐานเปียก

การคำนวณ

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

3.5.2 ความหนาแน่น (Density)

3.5.2.1 ความหนาแน่นเนื้อ (True density)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Chinnaswamy และ Hanna, 1988)

1. อบเอกซ์ทราคต์ให้แห้ง
2. บดเอกซ์ทราคต์ด้วยเครื่อง Blender
3. ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 -30 mesh
4. ล่อยๆเทเอกซ์ทราคต์นี้ ลงกระบอกตวงที่ทราบค่าแน่นอน (ขนาดปริมาตร 10 มิลลิลิตร) จนล้น แล้วเขย่า 3 ครั้ง
5. ปาดส่วนที่เกินออก
6. ชั่งน้ำหนักเอกซ์ทราคต์ และกระบอกตวง
7. คำนวณค่าความหนาแน่นเนื้อ

การคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่นเนื้อ} = \frac{\text{น.น.ของเอกซ์ทราคต์ในกระบอกตวง}10 \text{ ml}}{\text{ปริมาตรของกระบอกตวง (10 ml)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. นำผลิตภัณฑ์เอกซทรูเดตใส่ในภาชนะทรงกระบอกที่ทราบปริมาตรแน่นอน (1 ลิตร) จนล้น แล้วเขย่า 3 ครั้ง
2. ปาดส่วนที่เกินออก
3. ชั่งน้ำหนักเอกซทรูเดตในภาชนะทรงกระบอก บันทึกค่าที่ได้
4. คำนวณหาค่า Bulk Density

การคำนวณ

$$\text{ความหนาแน่นรวม} = \frac{\text{น้ำหนักของเอกซทรูเดตในทรงกระบอก}}{\text{ปริมาตรทรงกระบอก (1 ลิตร)}}$$

3.5.3 ความหนืด (Viscosity)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. เปิดเครื่อง RVA และ Computer ทำการอุ่นเครื่องเป็นเวลา 30 นาที
2. เข้าโปรแกรม RVA เลือกรูปแบบ การวัดความหนืดของข้าว ทำการตั้งชื่อไฟล์ และเลือก Folder ที่จะทำการจัดเก็บข้อมูลผลการทดลอง
3. ชั่งสารตัวอย่างที่บดละเอียดประมาณ 3.0 กรัม ใส่ลงใน aluminium can ที่มีน้ำ 25 กรัม บันทึกน้ำหนักของสารตัวอย่างและน้ำ
4. คนสารตัวอย่างให้ละลาย นำไปติดตั้งกับเครื่องกวนพร้อมกับใบกวน
5. เปิดเครื่องตามโปรแกรม รอจนกระทั่งหน้าจอ แสดงแถบ Runaway สีเขียว ด้านล่างจอ กดส่วนหัวที่ติดตั้ง aluminium can ลงไปในเครื่อง เครื่องจะเริ่มทำการกวนโดย ณ เวลาเริ่มต้นจะมีอุณหภูมิ 50 °C ความเร็วรอบ 960 rpm เมื่อผ่านไป 10 วินาที จะเปลี่ยนความเร็วรอบเป็น 160 rpm ต่อมาที่ 1 นาที เครื่องจะค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิ จนเป็น 95 °C ณ เวลา 4.48 นาที และอุณหภูมิจะคงที่จนกระทั่งถึง 7.18 นาที จากนั้นจะค่อยๆลดอุณหภูมิลงจนกระทั่งเหลือ 50 °C ณ เวลา 11.06 นาที และจะสิ้นสุดกระบวนการที่เวลา 12.30 นาที ความเสถียรของอุณหภูมิมิอยู่ที่ 50 ± 1 °C และเวลาในการอ่านค่า 4 วินาที
6. บันทึกกราฟที่ได้ อ่านค่าความหนืด Peak Viscosity , Hold Strength และ Final Viscosity นำ aluminium can และใบพัดออกจากตัวเครื่อง

3.5.4 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) และ ความสามารถในการละลายน้ำ (WSI)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Anderson, 1969)

1. บดตัวอย่างโดยใช้ตะแกรงขนาด 60 mesh
2. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการบดประมาณ 2.5 กรัม บันทึกน้ำหนัก
3. เติมน้ำกลั่นประมาณ 30 กรัม ลงในหลอด Centrifuge ขนาด 50 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนัก
4. เทตัวอย่างลงในหลอด Centrifuge ทำการคนอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 30 นาที
5. ใส่หลอดลงในเครื่อง Centrifuge เปิดเครื่อง โดยใช้ความเร็วที่ 3000 g เป็นเวลา 10 นาที
6. ปิดเครื่อง แยกของเหลวใสที่อยู่ส่วนบนออก เหลือส่วนที่ตกตะกอนด้านล่างที่มีลักษณะเป็นเจล นำไปชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณหาค่า WAI

การคำนวณ

$$\text{WAI (กรัม/กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอน}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

7. ส่วนที่อยู่ในชั้นของเหลวนำมาทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 105° C เป็นเวลา 2 ชม. เพื่อหาค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้

การคำนวณ

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

3.5.5 แรงแตกหักสูงสุด (Breaking Strength)

ทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Texture Analyser (TA) เพื่อหาค่าแรงกดสูงสุด

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ต่อหัวกดชนิด P/2 2 mm. Cylinder probe – Stainless Steel และฐานเข้ากับตัวเครื่องเปิดเครื่อง TA และ Computer เปิดโปรแกรม Texture Exponent
2. นำตัวอย่าง 1 ชิ้นมาห่าน้ำหนัก บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้

3. สุ่มตำแหน่งที่แตกต่างกันประมาณ 3 จุด ทำเครื่องหมาย
4. นำไปตั้งไว้ที่ฐาน
5. เปิดเครื่อง
6. ตั้งโปรแกรม โดยเลือกรูปแบบการทดสอบพร้อม ทั้งจัดค่าความเร็วของหัววัด เริ่มต้นเท่ากับ 1 mm./s. ความเร็วขณะกดเป็น 1 mm./s. ความเร็วขณะดึงหัวกลับ เป็น 10 mm./s. ระยะที่ใช้กดเป็น 1 mm. แรงกดเริ่มต้นที่ 5 g. และ Acquisition Rate เป็น 400 pps. รวมถึงตั้งหน่วยของกราฟที่ต้องการ โดยแกน X เป็นเวลา (s.) และแกน Y เป็น แรง (g.)
7. เดินเครื่อง โดยควบคุมตำแหน่งกดให้มั่นคง รอจนกระทั่งเครื่องทำงานเสร็จ
8. ทำการวัดค่าแรงกด 3 ซ้ำ
9. บันทึกกราฟที่ได้
10. เปลี่ยนหัววัดเป็นแบบ Warner - Blatzler Blade และเปลี่ยนระยะกดเป็น 5 mm. และ ทำตามขั้นตอนที่ 7-9 อีกครั้ง

3.5.6 อัตราการส่วนขยายตัวของผลิตภัณฑ์ (Expansion Ratio, ER)

คือ ค่าอัตราส่วนการพองตัวของเอกซ์ทรูเดต

การคำนวณ (Chinnaswamy และ Hanna, 1988)

$$ER = \frac{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเอกซ์ทรูเดต (cm)}}{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าแปลน (cm)}}$$

โดยทำการทดลองตัวอย่างละ 10 ซ้ำ

3.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ผลการทดลองใช้วิธี Response Surface Methodology (RSM) เลือกใช้รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบพหุนามอันดับที่ 2 ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับคุณลักษณะบางประการของผลิตภัณฑ์ที่ได้ รูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_i = a_0 X_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_1^2 + a_5 X_2^2 + a_6 X_3^2 + a_7 X_1 X_2 + a_8 X_2 X_3 + a_9 X_1 X_3$$

เมื่อ Y_i = ตัวแปรตาม ได้แก่ ความชื้นของเอกซ์ทราคต ความสามารถในการดูดซับน้ำความสามารถในการละลายน้ำ อัตราส่วนการขยายตัว ความหนาแน่น ความหนืด ลักษณะเนื้อสัมผัส

X_i = ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเร็วรอบของสกรู อุณหภูมิบาร์เรล ปริมาณความชื้นของปลายข้าว

a_0, a_1, a_2, a_3 = ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร

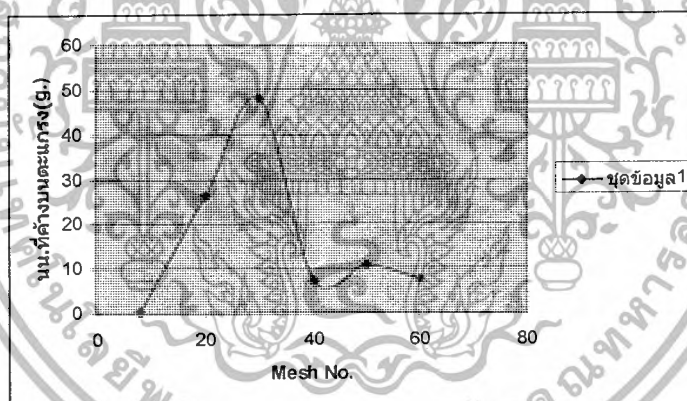
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ

4.1.1 วัตถุดิบปลายข้าวเจ้า

เริ่มต้นเมื่อวัตถุดิบปลายข้าวมีขนาดเฉลี่ย 2 มิลลิเมตร หลังจากนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบ Hammer Mill ของสถาบันอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ขนาดรูตะแกรง 1.5 มิลลิเมตรได้ตัวอย่างที่มีขนาดเล็กลง การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคโดยวิธี Screen Analysis ผลที่ได้แสดงในภาคผนวก ที่ ก.



รูปที่ 4.1 น้ำหนักปลายข้าวที่ตกค้างบนตะแกรง ณ ตะแกรงร่อนขนาดต่างๆ

มีขนาดเฉลี่ยของปลายข้าวหลังบดเท่ากับ 0.57 มิลลิเมตรและมีค่าความชื้นของปลายข้าวเจ้ามีค่า 11.25 % ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของปลายข้าวที่เป็นวัตถุดิบแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติของปลายข้าวที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	Size (mm.)	ความหนืด RVA (RVU)			MC (%)	WAI (g/g)	WSI (%)
		peak	hold	final			
ปลายข้าวเจ้า	0.57	274	282	528	11.25	1.8197	0.1252

4.1.2 คุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวในท้องตลาด

ในการทดลองนี้ได้ทำการสำรวจคุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายกับเอกซ์ทรูเดตที่มีจำหน่ายในท้องตลาด สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว และกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารเช้า (Breakfast Cereal) ในกลุ่มขนมขบเคี้ยวใช้จำนวนตัวอย่าง 7 ยี่ห้อ ส่วนกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารเช้ามี 4 ตัวอย่าง ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวและผลิตภัณฑ์อาหารเช้าในท้องตลาด

คุณสมบัติ	ขนมขบเคี้ยว	ผลิตภัณฑ์อาหารเช้า
ความชื้นผลิตภัณฑ์	3.398-5.841 %	2.902-6.845 %
ความหนาแน่นเนื้อ	0.085-0.271 g / cm ³	0.436-0.597 g / cm ³
ความหนาแน่นรวม	0.063-0.152 g / cm ³	0.114-0.224 g / cm ³
ความหนาแน่นขึ้น	0.132-0.338 g / cm ³	0.137-0.378 g / cm ³
ความหนืด (RVA)		
- peak viscosity	44-309 RVU	33-210 RVU
- holding	2-258 RVU	7-201 RVU
- final viscosity	3-386 RVU	11-274 RVU
WAI	3.283-6.261 g / g	3.699-5.710 g / g
WSI	12.836-50.919 %	12.888-24.474 %
ค่าแรงแตกหัก	1977.367-7265.367 g / cm ²	769.233-848.133 g / cm ²
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย	0.803-3.17 cm.	0.507-3.245 cm.

เป็นที่น่าสังเกตว่า ผลิตภัณฑ์อาหารเช้ามีค่าความหนาแน่นมากกว่าขนมขบเคี้ยว ในทุกลักษณะ ส่วนค่าความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่สำหรับค่าความสามารถในการละลายน้ำนั้นพบว่าผลิตภัณฑ์อาหารเช้าจะมีค่าความสามารถในการละลายต่ำกว่าประมาณ 1/3 – 1/2 เท่าของกลุ่มอาหารขบเคี้ยวเนื่องจากจะเห็นว่าผลิตภัณฑ์อาหารเช้ามักใช้บริโกลร่วมกับนม ดังนั้นจึงมีค่าความหนาแน่นเนื้อหรือความหนาแน่นรวมที่สูง ในขณะที่ความสามารถในการละลายที่ต่ำ

อนึ่ง รายละเอียดของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดแสดงในภาคผนวกที่ ข.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 คุณสมบัติต่างๆ ของเอกซทรีเดที่ได้

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเอกซทรีเดที่สภาวะการทดลองต่างๆ

รหัส	สภาวะการผลิต			ความชื้นเอกซทรีเด		ความหนาแน่น		ความหนืด (RVU)			WAI (g/g)	WSI (%)	Breaking Strength		ER
	rpm	อุณหภูมิ บาร์เรล (°C)	MC (%)	ก่อนอบ	หลังอบ	True Density (g/cm ³)	Bulk Density (g/cm ³)	Peak Viscosity	Hold	Final Viscosity			Probe(P/2) (g/cm ²)	Blade (g/cm ²)	
E1	400	100	16	8.34	5.838	0.686	0.111	160.5	6.0	38.0	4.909	47.776	1341.70	2385.95	4.080
E2	400	100	20	12.28	7.899	0.711	0.151	491.5	36.0	103.0	5.565	20.874	1623.10	3086.60	3.590
E3	300	100	18	10.70	8.175	0.713	0.144	429.0	26.0	85.5	7.058	26.551	3016.80	4151.00	3.723
E4	200	100	16	9.85	7.921	0.720	0.150	510.0	35.5	100.0	6.903	29.665	4286.25	3523.45	3.760
E5	200	100	20	13.26	11.804	0.709	0.391	197.5	50.0	131.5	5.657	30.877	8453.55	15025.15	2.427
E6	300	100	18	11.09	8.486	0.722	0.151	394.0	51.5	111.5	6.215	35.872	3302.50	4939.05	3.670
E7	300	80	20	12.64	10.553	0.731	0.242	210.0	38.5	100.0	3.867	52.329	6528.65	9752.40	3.047
E8	300	80	16	9.74	7.574	0.717	0.130	317.0	24.5	72.5	6.611	32.067	1823.15	3112.85	4.220
E9	400	80	18	10.38	7.662	0.710	0.124	313.5	49.0	97.0	6.391	34.156	2026.75	2687.15	3.860
E10	200	80	18	11.15	9.040	0.754	0.257	256.0	51.0	117.5	5.643	37.476	3957.35	7616.95	3.060
E11	300	101	18	11.40	8.411	0.732	0.165	348.0	52.0	115.5	6.393	32.441	1857.15	5445.90	3.730
E12	300	121	16	9.63	7.601	0.712	0.135	319.0	30.5	69.0	6.704	31.495	2375.75	3892.25	3.973
E13	300	121	20	12.79	11.497	0.724	0.307	205.5	39.5	89.5	4.853	43.891	6002.30	9654.40	2.943
E14	400	120	18	10.84	7.796	0.711	0.122	202.5	19.0	58.0	5.692	39.312	8158.80	9245.35	4.270
E15	200	120	18	11.76	10.405	0.719	0.300	230.5	32.0	87.0	4.744	41.167	6238.75	10506.30	3.113

หมายเหตุ Blade ที่ใช้คือ Warner - Blazer Blade

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

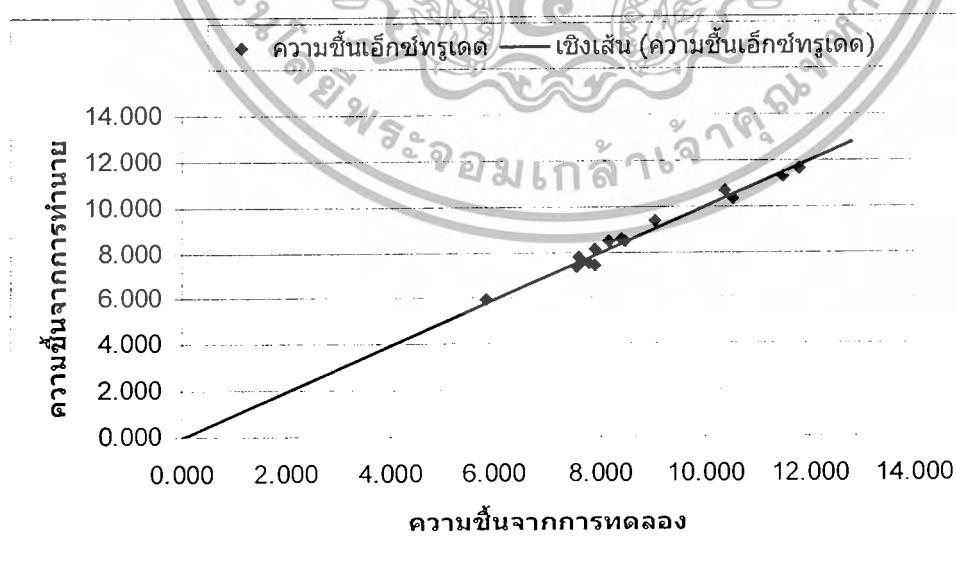
4.2.1 ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture Contain, MC)

ค่าความชื้นที่ได้จากเครื่องที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 8.3-12.8 % หลังจากอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อนเป็นเวลาที่ถูกอุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 10 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความชื้น 5.9-11.8 % และเมื่อนำค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ความเร็วรอบ(X_1), อุณหภูมิ(X_2) และความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ(X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$MC = (0.06966622)X_1 + (-0.272342455)X_2 + (0.61846985)X_3 + (-0.0000306594)X_1^2 + (0.001405834)X_2^2 + (0.01792369)X_3^2 + (-0.00017113)X_1X_2 + (0.00318413)X_2X_3 + (-0.00258834)X_1X_3 \quad (4-1)$$

$$R^2 = 0.9751 \quad \text{Standard Error} = 0.39745612 \quad (\text{แสดงรายละเอียดในตารางที่ ง.1})$$

ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ดี ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-1 แสดงในรูปที่ 4.2



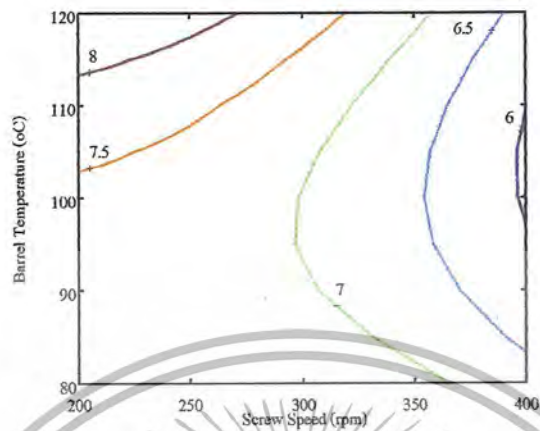
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าความชื้นของเอกซ์ทรูเดอร์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่นายในสมการ (4-1) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

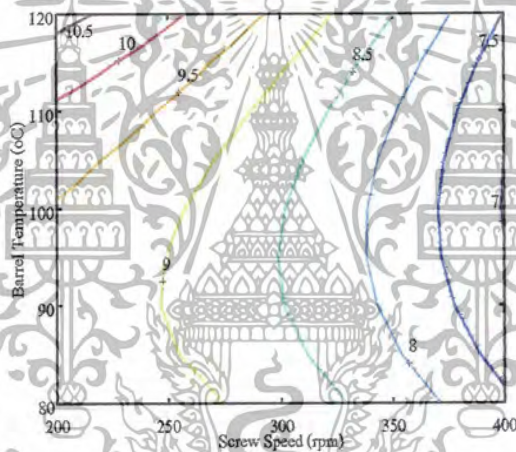
เมื่อนำผลที่ได้มาพลอตกราฟ ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.3 จากกราฟจะเห็นว่า ความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้น ความชื้นของเอกซ์ทรูเดตที่ได้จะมีค่าลดลง และในขณะที่ความเร็วรอบมากกว่า 300 rpm การเพิ่มของอุณหภูมิในช่วง 80 – 120 °C จะไม่ค่อยมีผลต่อค่าความชื้นของเอกซ์ทรูเดตมากนัก แต่เมื่อใช้ความเร็วรอบที่ต่ำกว่า 300 rpm การเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลจาก 100 °C ขึ้นไปกลับมีผลให้เอกซ์ทรูเดตมีค่าความชื้นเพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะการในการเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลนั้นทำโดยการเพิ่มอุณหภูมิที่ตำแหน่งหัวที่ 5 ของบาร์เรล บาร์เรลที่อยู่ถัดออกมาจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 105 °C จึงทำให้อาหารเหลวก่อนที่จะถูกดันผ่านรูหน้าแปลนมีอุณหภูมิและความดันที่ต่ำลง ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากเนื้ออาหารจึงมีค่าลดลง ส่วนผลของความชื้นของวัตถุดิบเริ่มต้นพบว่า เมื่อความชื้นของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น จะมีผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความชื้นเพิ่มขึ้นด้วย หากเปรียบเทียบค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้กับผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดนั้น ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าความชื้นที่สูงกว่า



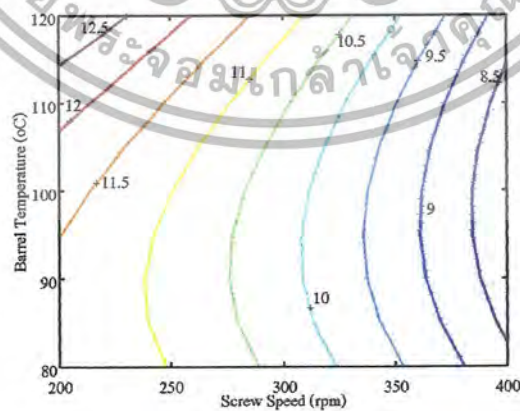
ความชื้นวัตถุดิบ 16%



ความชื้นวัตถุดิบ 18%



ความชื้นวัตถุดิบ 20%



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอุณหภูมิที่มีผลต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดต (%) ที่ความชื้นวัตถุดิบ ณ ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

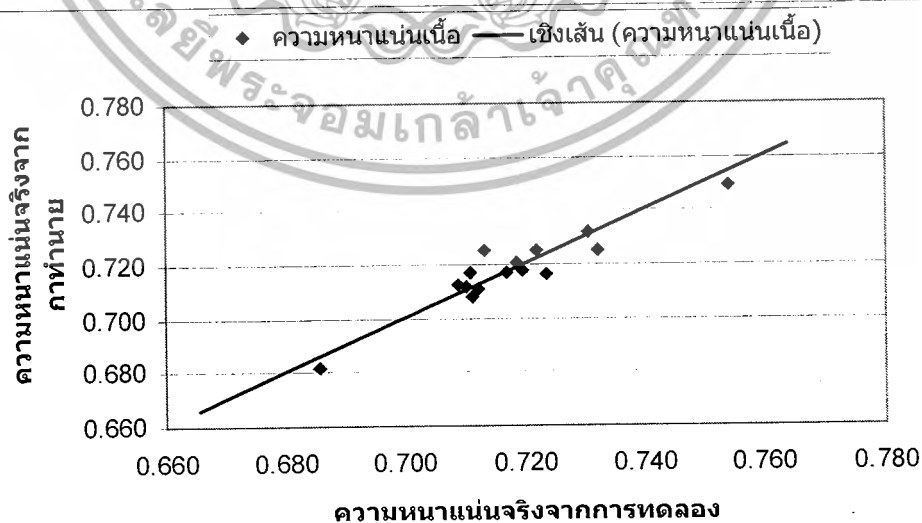
4.2.2 ความหนาแน่นเนื้อ (True Density, TD)

ค่าความหนาแน่นเนื้อของเอกซัทรูเดคที่ได้จากเครื่องที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 0.683-0.748 g/cm³ ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาด เนื่องจากในการทดลองนี้ได้ใช้เพียงปลายข้าวเป็นวัตถุดิบในขณะที่ผลิตภัณฑ์เอกซัทรูเดคที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ประกอบด้วยวัตถุดิบหลายชนิดผสมกัน เช่น ข้าวโพด หรือแป้งมันฝรั่งซึ่งมีกำลังการพองตัวที่สูงกว่าข้าว และเมื่อนำค่าความหนาแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซัทรูเดอร์ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ กับสภาวะการผลิต ความเร็วรอบ(X_1), อุณหภูมิ(X_2) และความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ(X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} TD = & (-0.00079245834)X_1 + (-0.003689677778)X_2 + (0.1150448)X_3 + \\ & (-0.000000745766)X_1^2 + (0.000015958544)X_2^2 + (-0.00329318171)X_3^2 + \\ & (0.000004204939)X_1X_2 + (-0.00005830989)X_2X_3 + (0.000039778852)X_1X_3 \end{aligned} \quad (4-2)$$

$$R^2 = 0.8727 \quad \text{Standard Error} = 0.0080 \quad (\text{แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-2 มีความสัมพันธ์ในเกณฑ์ดี แสดงในรูปที่ 4.4



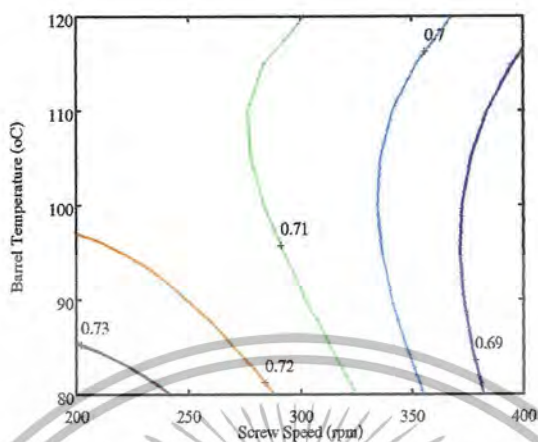
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเนื้อของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการ (4-2) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ จะถือว่าผิดกฎหมาย

จากการทดลองที่สภาวะการผลิตต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นเนื้อของเอกซ์ทรูเดตที่ได้อยู่ในช่วง $0.686-0.754 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีขายตามท้องตลาด เนื่องจากในการทดลองนี้ได้ใช้เพียงปลายข้าวเป็นวัตถุดิบใน ขณะที่ผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดตที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ประกอบด้วยวัตถุดิบหลายชนิดผสมกัน เช่น ข้าวโพด หรือแป้งมันฝรั่งซึ่งมีกำลังการพองตัวที่สูงกว่าข้าว (อรอนงค์, 2535)

พบว่าที่ความชื้นต่ำ การเพิ่มความเร็วยรอบจะทำให้ความหนาแน่นเนื้อของเอกซ์ทรูเดตมีค่าลดลง ในขณะที่เมื่อวัตถุดิบมีความชื้นสูงขึ้น การเพิ่มความเร็วยรอบจะไม่ค่อยมีผลต่อค่าความหนาแน่นเนื้อมากนัก ส่วนผลของอุณหภูมิพบว่าที่ความเร็วยรอบต่ำการเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีค่าความหนาแน่นเนื้อลดลง แต่ถ้าความเร็วยรอบมากกว่า 300 rpm ขึ้นไป การเพิ่มอุณหภูมิจะไม่ค่อยมีผลต่อความหนาแน่นเนื้อมากนัก ค่าความชื้นวัตถุดิบ เป็นปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นเนื้ออย่างมีนัยสำคัญ คือเมื่อความชื้นวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นเนื้อของเอกซ์ทรูเดตมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



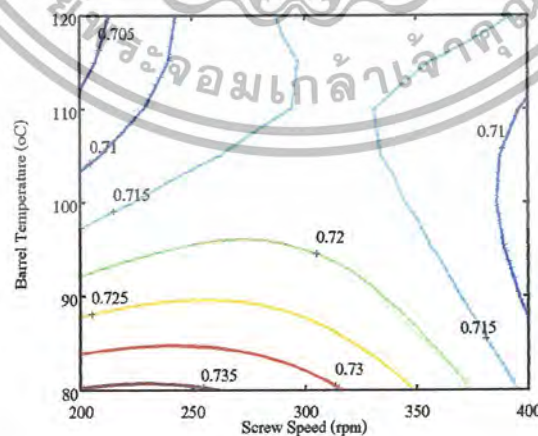
ความชื้นวัตถุดิบ 16%



ความชื้นวัตถุดิบ 18%



ความชื้นวัตถุดิบ 20%



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนาแน่น

เนื้อของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเกต (g/cm^3) ที่ความชื้นวัตถุดิบ ณ ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

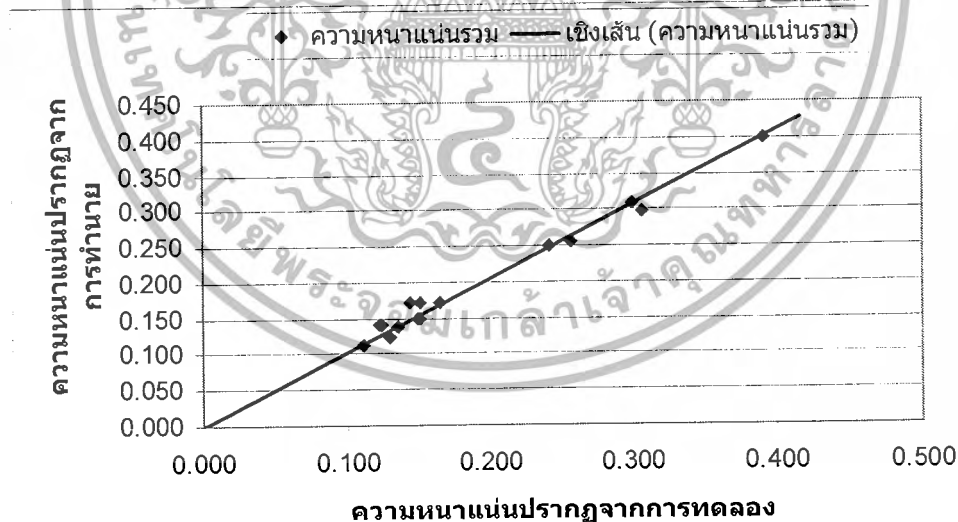
4.2.3 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density, BD)

ค่าความหนาแน่นรวมของเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากเครื่องที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 0.1-0.5 g/cm³ ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาด และเมื่อนำค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ความเร็วรอบ(X_1), อุณหภูมิ(X_2) และความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ(X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$BD = (0.00358036)X_1 + (-0.01114157)X_2 + (-0.00667971)X_3 + (0.00000207)X_1^2 + (0.000050261)X_2^2 + (0.002846)X_3^2 + (-0.0000067557)X_1X_2 + (0.00021117)X_2X_3 + (-0.00027)X_1X_3 \quad \text{----- (4-3)}$$

$$R^2 = 0.9867 \quad \text{Standard Error} = 0.0150 \quad (\text{แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.4})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-3 มีความสัมพันธ์ในเกณฑ์ดี แสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการ (4-3)

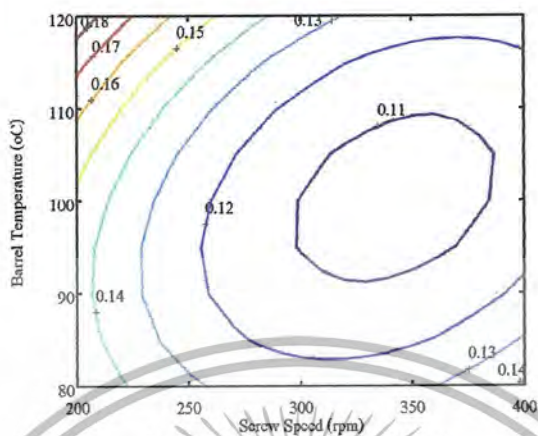
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อวัตถุดิบมีความชื้นสูง เอกซ์ทรูเดตที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นรวมสูง ในขณะที่การเพิ่มความเร็วรอบสกรูมีผลให้เอกซ์ทรูเดตที่ได้มีความหนาแน่นรวมลดลง ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิบารเรลที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นรวมของเอกซ์ทรูเดต เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อเอกซ์ทรูเดตที่มีค่าอัตราส่วนการขยายตัวสูงจะมีค่าความชื้นต่ำ และในขณะเดียวกันมีค่าความหนาแน่นรวมก็มีค่าต่ำด้วย การผลิตที่ความเร็วรอบสูงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานความร้อนมากขึ้น เป็นผลให้แป้งข้าวเกิดการเจลาติไนซ์ได้ดีขึ้น น้ำที่อยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูง และสามารถเคลื่อนที่ออกสู่บรรยากาศได้มากขึ้น ทำให้ค่าความชื้นเอกซ์ทรูเดตมีค่าลดลง เมื่อสภาวะการผลิตมีค่าความเร็วรอบ ประมาณ 340 rpm และมีอุณหภูมิบารเรล 100 °C ความชื้นวัตถุดิบเท่ากับ 16 % จะให้ค่าความหนาแน่นรวมต่ำสุดประมาณ 0.1 g/cm³

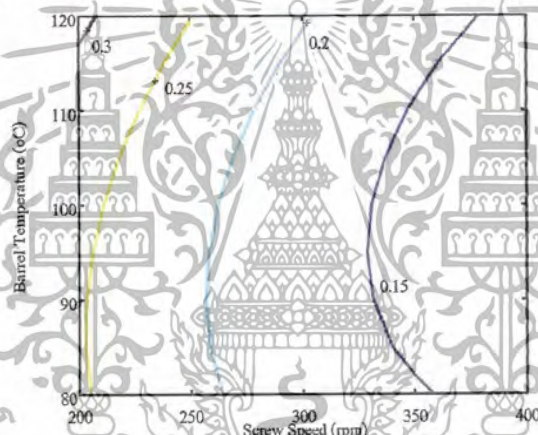


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

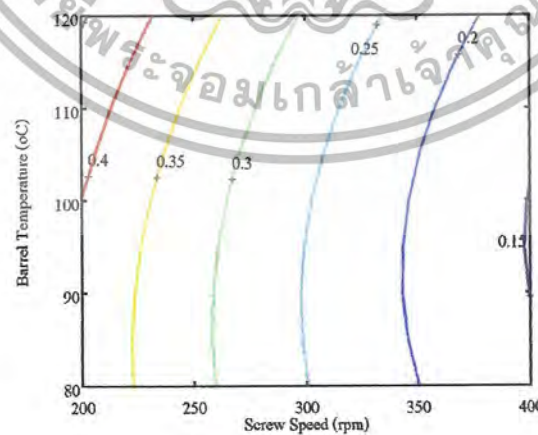
ความชื้นวัตถุดิบ 16%



ความชื้นวัตถุดิบ 18%



ความชื้นวัตถุดิบ 20%



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเกต (g/cm^3) ที่ความชื้นวัตถุดิบ ณ ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

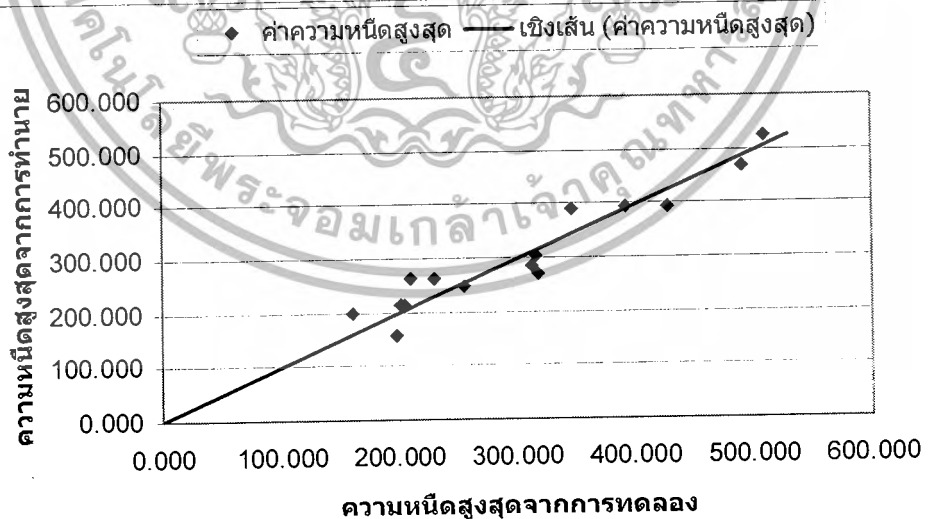
4.2.4 ความหนืดสูงสุด (Peak Viscosity, Peak)

ค่าความหนืดสูงสุดของเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากเครื่องที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 50 - 550 RVU ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาด และเมื่อนำค่าความหนืดสูงสุดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ความเร็วรอบ(X_1), อุณหภูมิ(X_2) และความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ(X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{Peak} = & (-11.23897309)X_1 + (57.07635043)X_2 + (-69.09809492)X_3 + \\ & (-0.003492553)X_1^2 + (-0.264144626)X_2^2 + (-4.833463015)X_3^2 + \\ & (-0.01094101)X_1X_2 + (-0.093663127)X_2X_3 + (0.799811817)X_1X_3 \end{aligned} \quad (4-4)$$

$$R^2 = 0.9164 \quad \text{Standard Error} = 48.9572 \quad (\text{แสดงรายละเอียดในตารางที่ ง.6})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-4 มีความสัมพันธ์ในเกณฑ์ดี แสดงในรูปที่ 4.8



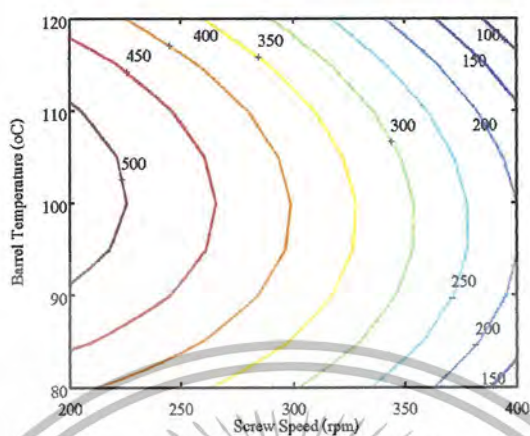
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าความหนืดสูงสุดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

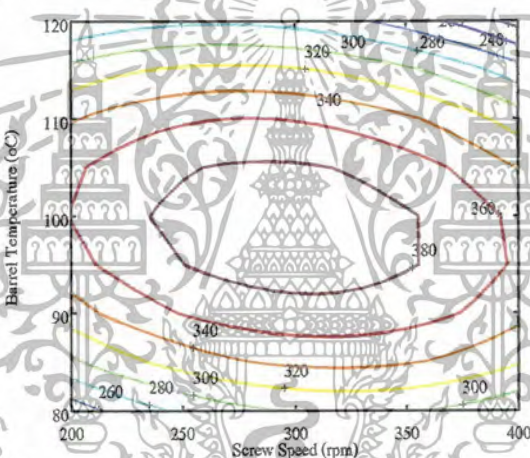
เมื่อนำผลที่ได้มาพลอตกราฟ ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.9 จากกราฟจะเห็นว่า ที่ความชื้นวัตถุดิบเป็น 16 % เมื่อความเร็วรอบสกรูเพิ่มขึ้น ความหนืดสูงสุดของผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลงส่วนการเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลในช่วง 80-100 °C จะมีผลให้ค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่การเพิ่มอุณหภูมิจาก 100 °C ถึง 120 °C กลับทำให้ค่าความหนืดสูงสุดมีค่าลดลง ที่ความชื้นวัตถุดิบเป็น 20 % การเพิ่มความเร็วรอบสกรูมีผลให้ ค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกันที่อุณหภูมิบาร์เรล 100 °C จะทำให้ค่าความหนืดสูงสุดเช่นกัน ที่ความชื้นวัตถุดิบที่ 18 % ความเร็วรอบสกรู ที่ 300 rpm อุณหภูมิบาร์เรล 100 °C จะได้ค่าความหนืดสูงสุดประมาณ 410 RVU และความหนืดสูงสุดของผลิตภัณฑ์จะค่อยๆลดลงเมื่ออุณหภูมิบาร์เรลเพิ่มขึ้นหรือลดลงกว่า 100 °C



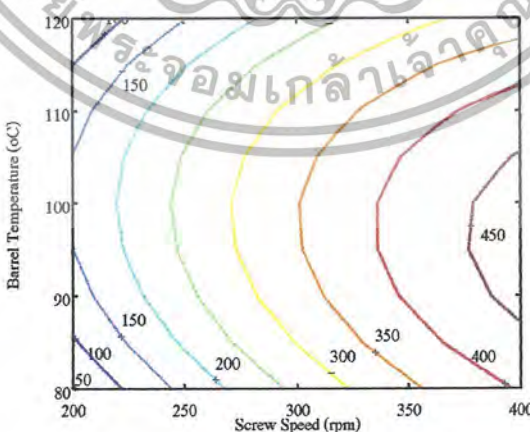
ความชื้นวัตถุดิบ 16%



ความชื้นวัตถุดิบ 18%



ความชื้นวัตถุดิบ 20%



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนืด

สูงสุดของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดต (RVU) ที่ความชื้นวัตถุดิบ ณ ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

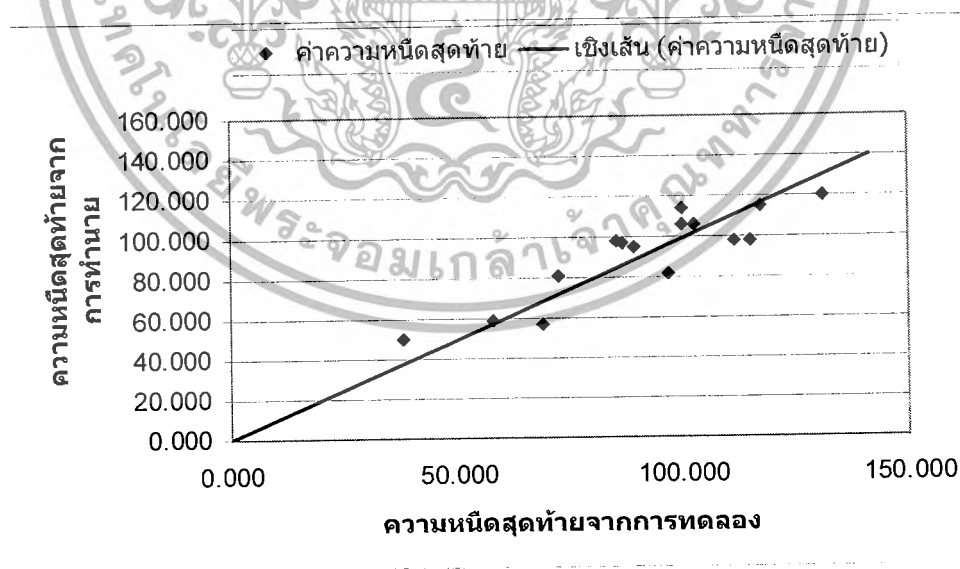
4.2.5 ความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity, Final)

ค่าความหนืดสุดท้ายของเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากเครื่องที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 29-125 RVU ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาด และเมื่อนำค่าความหนืดสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ความเร็วรอบ(X_1), อุณหภูมิ(X_2) และความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ(X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{Final} = & (-1.01383602)X_1 + (3.55222526)X_2 + (4.987366299)X_3 + \\ & (-0.0000987685)X_1^2 + (-0.022989807)X_2^2 + (-0.43529829)X_3^2 + \\ & (-0.000474244)X_1X_2 + (0.037895882)X_2X_3 + (0.05246361)X_1X_3 \end{aligned} \quad \text{-----(4-5)}$$

$$R^2 = 0.7934 \quad \text{Standard Error} = 17.0768 \quad (\text{แสดงรายละเอียดในตารางที่ ง.7})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-5 มีความสัมพันธ์ในเกณฑ์ดี แสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าความหนืดสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-5)

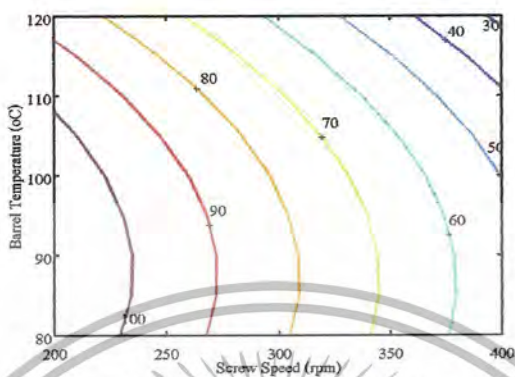
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลที่ได้มาพลอตกราฟ ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.11 จากกราฟจะเห็นว่า เมื่อความเร็วรอบและอุณหภูมิบาร์เรลเพิ่มขึ้น ความหนืดสุดท้ายจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มความชื้นวัตถุดิบ มีผลให้ค่าความหนืดสุดท้ายมีค่าเพิ่มขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

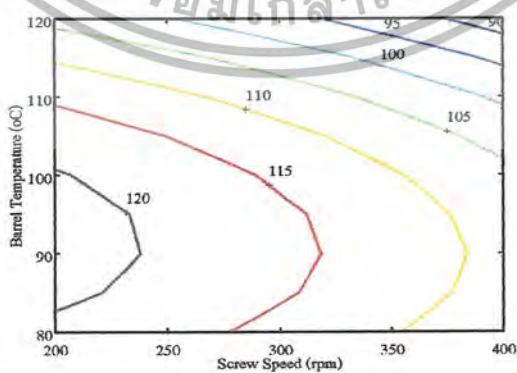
ความชื้นวัตถุดิบ 16%



ความชื้นวัตถุดิบ 18%



ความชื้นวัตถุดิบ 20%



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการศึกษา (RVU) ที่ความชื้นวัตถุดิบ ณ ตำแหน่งต่างๆ ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

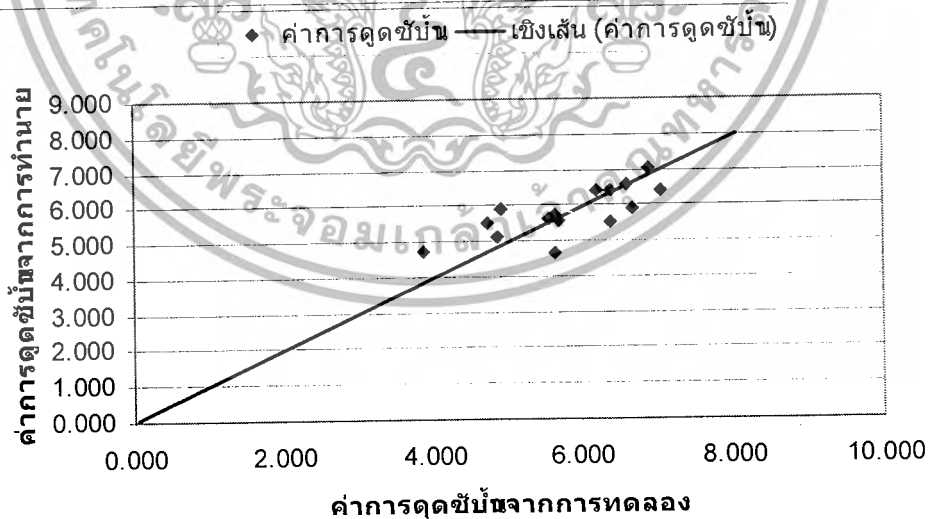
4.2.6 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index, WAI)

ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของเอกซ์ทรูเกตที่ได้จากเครื่องที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 4.3-7.5 g/g ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงก่อนไปทางด้านมากกว่ากับผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาด และเมื่อนำค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ความเร็วรอบ(X_1), อุณหภูมิ(X_2) และความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ(X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{WAI} = & (-0.03094248)X_1 + (0.120573328)X_2 + (0.912501)X_3 + (-0.0000329643)X_1^2 + \\ & (-0.001283243)X_2^2 + (-0.0749432)X_3^2 + (0.00003663)X_1X_2 + \\ & (0.006805201)X_2X_3 + (0.002586)X_1X_3 \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$R^2 = 0.5514 \quad \text{Standard Error} = 0.9391 \quad (\text{แสดงรายละเอียดในตารางที่ ๓.8})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-6 มีความสัมพันธ์ในเกณฑ์ที่ไม่ดี แสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า การลดค่าความชื้นของปลายข้าวมีผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของเอกซ์ทรูเดตมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลในช่วง $80 - 100^{\circ}\text{C}$ มีผลให้เอกซ์ทรูเดตมีความสามารถในการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิบาร์เรลจาก 100°C ขึ้นไปกลับทำให้เอกซ์ทรูเดตมีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำลง การเพิ่มความเร็วยรอบที่อุณหภูมิบาร์เรลต่ำกว่า 100°C จะไม่ค่อยมีผลต่อความสามารถในการดูดซับน้ำมากนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

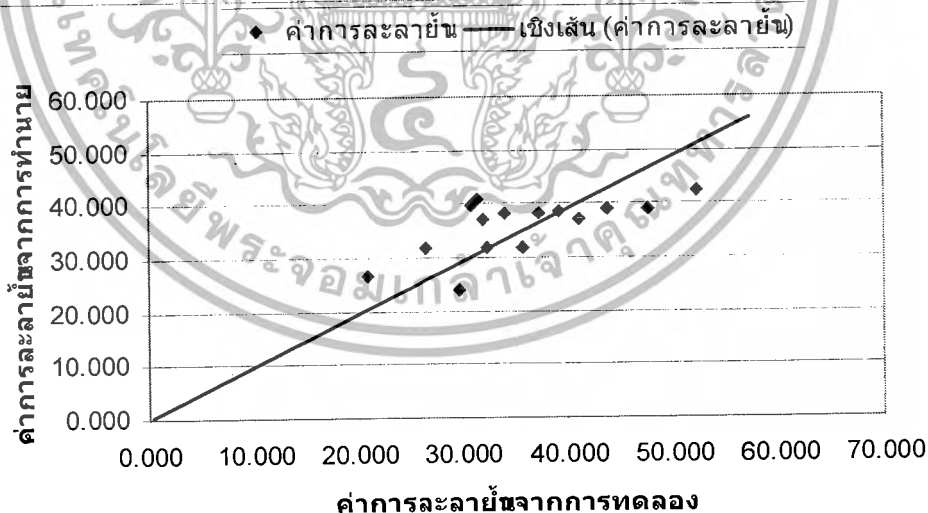
4.2.7 ความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility Index, WSI)

ค่าความสามารถในการละลายน้ำของเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากเครื่องที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 23-49 % ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาด และเมื่อนำค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ความเร็วรอบ(X_1), อุณหภูมิ(X_2) และความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ(X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$WSI = (0.651572555)X_1 + (-2.5932046242)X_2 + (6.62763)X_3 + (-0.0000485593)X_1^2 + (0.016716603)X_2^2 + (0.24821)X_3^2 + (0.00017254)X_1X_2 + (-0.04513185)X_2X_3 + (-0.0353354)X_1X_3 \quad \text{----- (4-7)}$$

$R^2 = 0.4260$ Standard Error = 9.4957 (แสดงรายละเอียดในตารางที่ ง.9)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-7 มีความสัมพันธ์ในเกณฑ์ที่ไม่ดี แสดงในรูปที่ 4.14

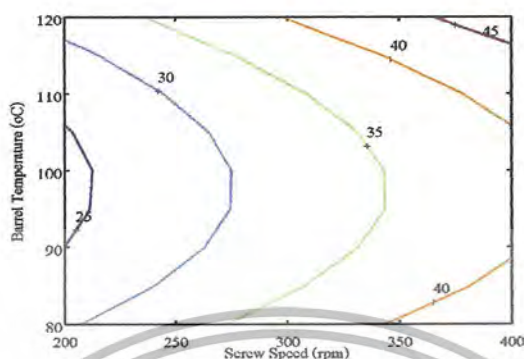


รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-7)

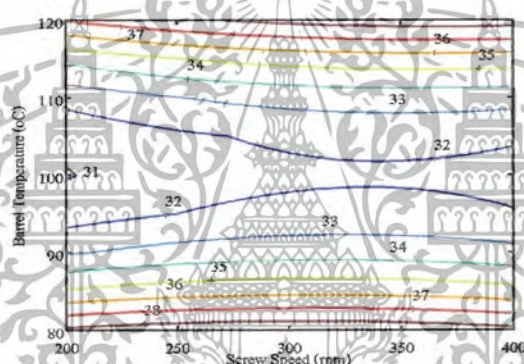
เมื่อนำผลที่ได้มาพลอตกราฟ ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.15 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าที่ความชื้นวัตถุดิบเป็น 16% การเพิ่มความเร็วยอบจะมีผลให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำมีค่ามากขึ้น ในขณะที่ความชื้นวัตถุดิบมีค่าสูง การเพิ่มความเร็วยอบสกรูกลับมีผลให้ค่าความสามารถในการละลายมีค่าต่ำลง ส่วนผลของอุณหภูมิบารเรลพบว่าที่อุณหภูมิบารเรลประมาณ 100 °C จะให้ค่า WSI ต่ำสุด การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิจากตำแหน่งนี้จะมีผลให้ค่า WSI มีค่าสูงขึ้น ส่วนความเร็วยอบไม่ค่อยมีผลต่อ WSI โดยเฉพาะที่ความชื้นวัตถุดิบเท่ากับ 18 % ความสามารถในการละลายน้ำเกิดจากการเจลาติไนซ์ของแป้ง พืชไฮโดรเจนจะถูกทำลาย ทำให้การละลายเพิ่มขึ้นโดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิบารเรลมีค่าสูงและความชื้นวัตถุดิบต่ำจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของเอกซ์ทรูเดตเพิ่มขึ้น



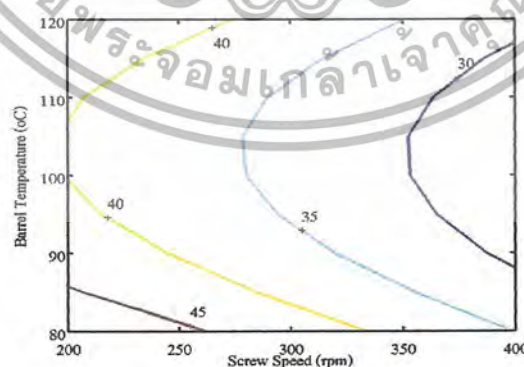
ความชื้นวัตถุดิบ 16%



ความชื้นวัตถุดิบ 18%



ความชื้นวัตถุดิบ 20%



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเกต (%) ที่ความชื้นวัตถุดิบ ณ ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

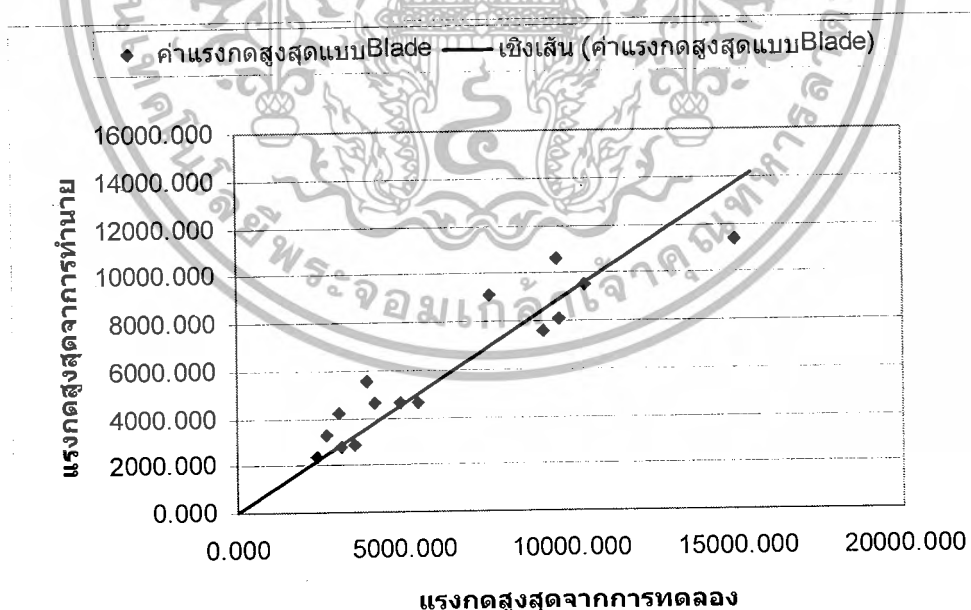
2.4.8 ค่าการแตกหัก(Breaking Strength) โดยเครื่อง texture Analyzer ใช้หัวกดแบบ Warner-Blatzler Blade

ค่าการแตกหักของเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากเครื่องที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 2800-11500 g/cm² ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีขายในท้องตลาด และเมื่อนำค่าการแตกหักของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ความเร็วรอบ(X_1), อุณหภูมิ(X_2) และความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ(X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$BS = (38.60578099)X_1 + (-1116.60653)X_2 + (4776.063398)X_3 + (0.0693352)X_1^2 + (5.261083062)X_2^2 + (-24.8339648)X_3^2 + (0.485227375)X_1X_2 + (-1.239243893)X_2X_3 + (-8.2261323)X_1X_3 \quad (4-8)$$

$$R^2 = 0.8971 \quad \text{Standard Error} = 1720.9724 \quad (\text{แสดงรายละเอียดในตารางที่ ง.11})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-8 มีสหสัมพันธ์ในเกณฑ์ที่ดี แสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าแรงการแตกหักโดยBladeที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-8)

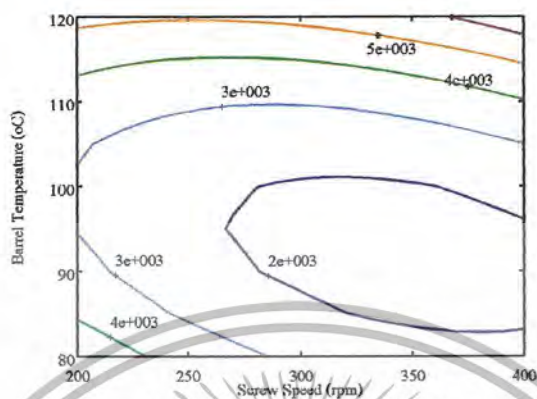
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลที่ได้มาพลอตกราฟ ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.17 จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ยิ่งเพิ่มความเร็วรอบสกรูมากขึ้น ค่าแรงแตกหักสูงสุดจะมีค่าลดลง การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิบาร์เรล จาก 100°C มีผลให้ค่าแรงแตกหักสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น ณ ความเร็วรอบสกรู 350 rpm อุณหภูมิบาร์เรล 95°C ความชื้นวัตถุดิบเป็น 16 % พบว่าจะได้ค่าการแตกหักต่ำสุดที่ 1000 g/cm^2 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และความชื้นจะทำให้ค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักมีค่าสูงขึ้น จากการทดลองพบว่าค่าแรงสูงสุดที่ทำให้เกิดการแตกหักของเอกซ์ทรูเดตที่ได้อยู่ในช่วง $2,800-11,500 \text{ g/cm}^2$ เนื้อสัมผัสที่ได้มีลักษณะค่อนข้างแข็ง เนื่องจากปลายข้าวที่นำมาใช้เป็นข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง

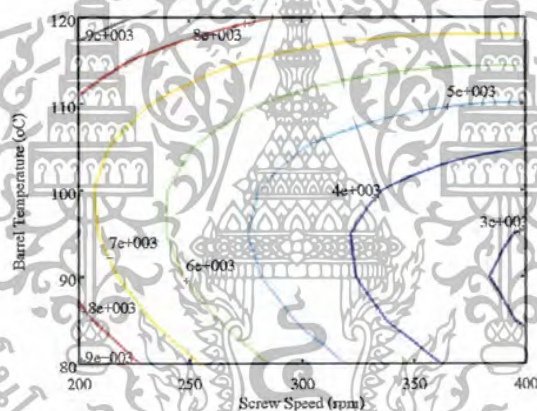
และได้ทำการทดลองโดยใช้หัวกดแบบ Probe ชนิด P/2 ร่วมด้วย ค่าการวิเคราะห์ที่ได้ดังแสดงในตารางที่ ค.10 และ ง.10 พบว่าค่าแรงแตกหักมีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าแรงแตกหักที่ใช้หัวกดแบบ Warner- Blatzler Blade แต่หัวกดแบบ Warner- Blatzler Blade ให้ค่าสหสัมพันธ์ที่ดีกว่า จึงเลือกใช้เพียงการวิเคราะห์โดยหัวกดแบบ Warner- Blatzler Blade



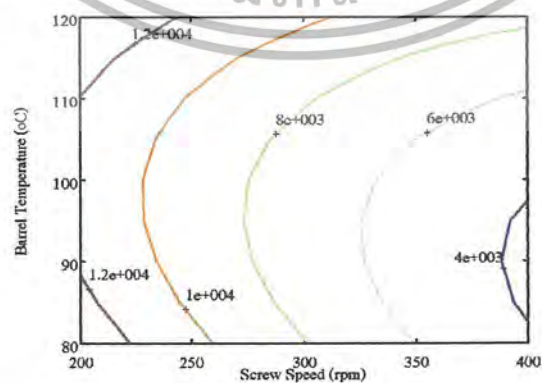
ความชื้นวัตถุดิบ 16%



ความชื้นวัตถุดิบ 18%



ความชื้นวัตถุดิบ 20%



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าแรงแตกหัก

ของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทรูเดด (g/cm^2) ที่ความชื้นวัตถุดิบ ณ ตำแหน่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

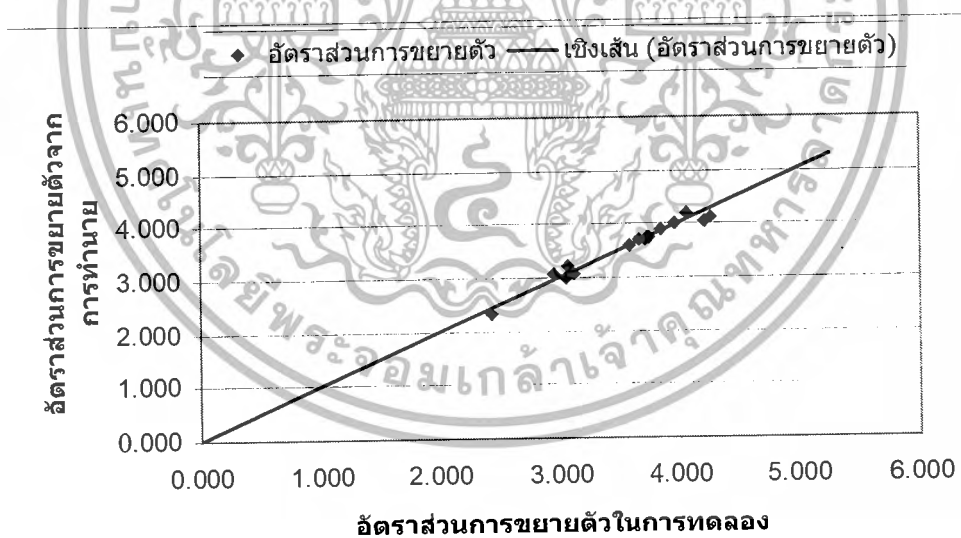
4.2.9 อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion Ration, ER)

ค่าอัตราส่วนการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดตที่ได้จากเครื่องหลังผ่านรูน้าแปลน ที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 2.3-4.25 เมื่อนำค่าของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับสภาวะการผลิต ความเร็วรอบ(X_1), อุณหภูมิ(X_2) และความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ(X_3) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$ER = (-0.01163019)X_1 + (-0.004024194)X_2 + (0.80602)X_3 + (-0.0000112176)X_1^2 + (-0.0000931549)X_2^2 + (-0.03951)X_3^2 + 0.0000427698X_1X_2 + 0.00058598X_2X_3 + (0.001022)X_1X_3 \quad \text{-----(4-9)}$$

$$R^2 = 0.9664 \quad \text{Standard Error} = 0.1488 \quad (\text{แสดงรายละเอียดในตารางที่ ง.12})$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4-9 มีสหสัมพันธ์ในเกณฑ์ที่ดี แสดงในรูปที่ 4.18

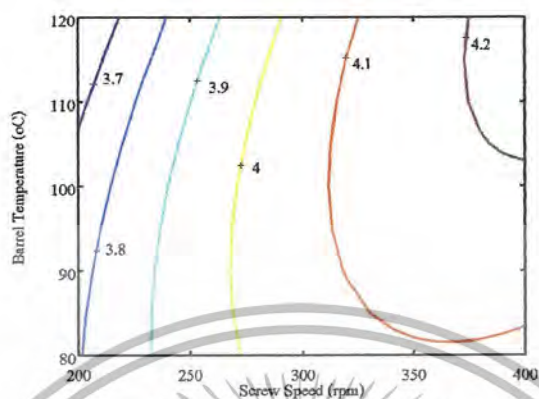


รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายจากสมการ (4-9)

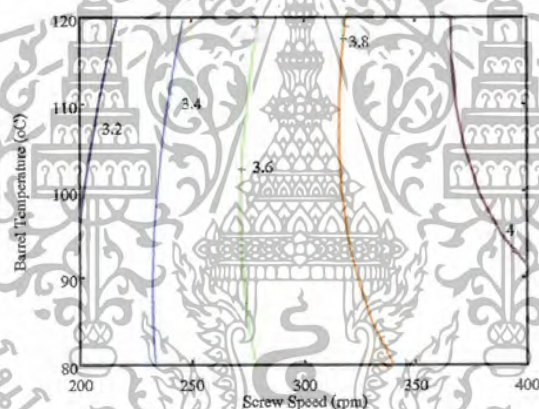
เมื่อนำผลที่ได้มาพลอตกราฟ ซึ่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.19 จากกราฟแสดงให้เห็นว่า ความเร็วรอบและความชื้นของวัตถุดิบมีผลต่อการพองตัวของเอกซ์ทรูเดตมากที่สุด เมื่อเพิ่มความ เร็วรอบหรือทำการลดความชื้นของวัตถุดิบจะทำให้เอกซ์ทรูเดตมีการพองตัวมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่ม อุณหภูมิไม่ค่อยมีผลต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัวมากนัก โดยเฉพาะวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง ผลการ ทดลองที่ได้สอดคล้องกับกับการศึกษาของ Ding และคณะ (2005) การพองตัวของเอกซ์ทรูเดตเกิด จากการขยายตัวของฟองอากาศในเนื้อเอกซ์ทรูเดตเป็นผลจากความแตกต่างของความดันในเนื้อ อาหารกับความดันบรรยากาศ การเพิ่มความเร็วนำเข้าทำให้แรงอัดในเนื้ออาหารมีค่าสูง เมื่อถูกดัน ผ่านรูหน้าแปลน น้ำในเนื้อเอกซ์ทรูเดตเคลื่อนสู่ภายนอกได้เร็วขึ้น



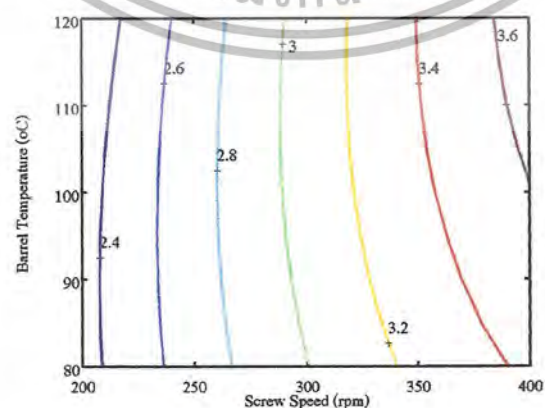
ความชื้นวัตถุดิบ 16%



ความชื้นวัตถุดิบ 18%



ความชื้นวัตถุดิบ 20%



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราส่วนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอกซ์ทราแคต (g/cm^3) ที่ความชื้นวัตถุดิบ ณ ตำแหน่งต่างๆ ระเบียบขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษากระบวนการผลิตแบบเอกซ์ทรูชันโดยใช้วัตถุดิบจากปลายข้าวในการศึกษา อาศัยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยความเร็วรอบของสกรูที่ 200 – 400 รอบต่อนาที ,อุณหภูมิบาร์เรลที่ 80 – 120 °C และปริมาณความชื้นของปลายข้าวที่ 16 – 20 % ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความเร็วรอบ อุณหภูมิบาร์เรล และความชื้นของวัตถุดิบเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะของเอกซ์ทรูเดตที่ได้
2. เอกซ์ทรูเดตที่มีความชื้นต่ำ จะมีค่าอัตราส่วนการขยายตัวที่สูงและมีความหนาแน่นรวมที่ต่ำ
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการโพลีโนเมียลอันดับที่ 2 สามารถนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษา กับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ดี เช่น ความชื้น ความหนาแน่น ความหนืด ค่าแรงแตกหักและอัตราส่วนการขยายตัว ในขณะที่ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและค่าความสามารถในการละลายน้ำ ค่าสหสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์ต่ำ
4. การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสามารถนำไปใช้ในการกำหนดแนวทางการผลิตเพื่อให้ได้เอกซ์ทรูเดตที่มีคุณลักษณะตามต้องการได้

บรรณานุกรม

กมลวรรณ แจ่มชัด.2541.กระบวนการแปรรูปอาหาร โดยวิธีเอกซ์ทรูชัน.วารสารอุตสาหกรรม
เกษตร(2)9.:น8-4

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

เครือวัลย์ อัดตะวีริยะสุข.2536.คุณภาพเมล็ดข้าวทางกายภาพและการแปรสภาพเมล็ด.53-1.

นฤพันธ์ วาสกคติก.2541.การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากปลายข้าวหอมมะลิ.วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.105.

นิรนาม.2545.ฟรีเมียร์ฯ ใช้ไฮเทคสร้างแต้มต่อ.ในหนังสือพิมพ์ฐานเศรษฐกิจ ฉบับวันที่ 13 มกราคม
.2545.18

นิตา ศรีภัทรชยากร และ สุภาพร จิตรประภาภรณ์.2537.การศึกษาคุณสมบัติของข้าวเจ้าและข้าว
เหนียวเพื่อใช้ในการผลิตขนมขบเคี้ยวจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่.ปัญหาพิเศษ
คณะเทคโนโลยีการเกษตร.สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง-19.
.20

ประชา บุญญศิริกุล , จุฬาลักษณ์ และมาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์.2539.การผลิตอาหารขบเคี้ยวจากถั่ว
เขียวโดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ . อาหาร26 (1):14 - 31.

เพ็ญขวัญ ชมปริดาและทัศนีย์ ลิ้มสุวรรณ.2541.ผลิตภัณฑ์อาหารขบเคี้ยว.น 215.- 269 ในเอกสาร
การสอนชุดวิชา.71433 มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช,กรุงเทพฯ.

รุจิรัตน์ แก้วเรืองฤทธิ์ และศิริรินทร์ เมฆอรุณวิทยา.2539.การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของข้าวเจ้า
กับแป้งสาลี และข้าวเจ้ากับคอร์นกรีทในการผลิตเอกซ์ทรูเคต . ปัญหาพิเศษ คณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่หน่วยงานผู้สงเคราะห์การโดยไม่มีลิขสิทธิ์และสงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
เทคโนโลยีการเกษตร.สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.28.
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต.2541.วิศวกรรมอาหาร:หน่วยปฏิบัติการในอุตสาหกรรม.พิมพ์ครั้งที่ 1.
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.250-239.

รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และประชา บุญญสิริกุล.2541.การศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมของข้าวเจ้า
และข้าวเหนียวในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่.
รายงานการวิจัยคณะอุตสาหกรรมเกษตร.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.22.

วรวิมล บุญญสิริ.2541.การศึกษาเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ .ปริญญาานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์.มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์.6-3.

วันชัย ตันติวิทยาพิทักษ์.2541.ข้าวไทย,รสชาติ,เมล็ดพันธุ์ และการเดินทาง.นิตยสารสารคดี.14(163)
:114-132.

วิไล รังสาดทอง.2543.เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร.พิมพ์ครั้งที่.1 สำนักพิมพ์เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล
พับลิเคชั่น จำกัด,กรุงเทพฯ.222.

สมชาย สุริยะศิริบุตร และกิตติพงษ์ ห่วงรักษ์.2541 .การผลิตอนุพันธ์ไซริลของแป้งข้าวเจ้าโดยใช้
เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ .ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร .คณะเทคโนโลยีการเกษตร.สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์.2529.ก.มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแป้งข้าวเจ้า มอก2529-638.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร โดยความร่วมมือของ กรมศุลกากร, ข้าวรวมทั้งหมด : ปริมาณและ
มูลค่าการส่งออกรายเดือน.

<http://www.oae.go.th/statistic/export/1301RI.xls> (28/03/2005)

อรอนงค์ วินัยกุล.2535.ผลิตภัณฑ์จากข้าวและคุณค่าทางโภชนาการ(ต่อ).วารสารอุตสาหกรรม
เกษตร3.(1):44.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Anderson , R.A. , Conway,H.F. , Pfeifer , V.F.&Griffin , E.L. , Jr(1969), Gelatinization of corn grits by roll – and extrusion – cooking , Cereal Sci. Today , 14 , 4 –12.

Case S.E , Hamann D.D and Schwartz S.J.(1992) , Effect of Starch Gelatinization on Physical Property of Extruded Wheat – and Corn – Based Products , Cereal Chemistry ,59:401 – 404.

Chinnawamy , R and Hanna , M.A.(1988) , A Die – nozzle dimension effect on the expansion of extrusion – cooks corn starch , J. Food Sci.

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 Chemists , Inc. Volume II , P.777

Khuri , A.I.and J.A.Cornell.(1987) , Response Surfaces:Designs and Analyses. Marcel Dekker Inc. , New York.505p.

Matz , S.A.(1984) , Snack food Technology. 2nd ed.AVI publishing CO.Westport , Connecticut.415 p.

Moria ,H.(2001) , Have a Snack. The World of Food Intgredients Sep. 12 – 14.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของวัตถุดิบเริ่มต้น (ปลายข้าวที่ผ่านการบด)

- การหาอนุภาคเฉลี่ย โดยวิธี Screen Analysis (ASTM)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก การหาอนุภาคเฉลี่ยโดยวิธี Screen Analysis (ASTM)

Mesh no.	Dpi (mm.)	W (g)	Xi	Dpi (mm.)	Xi / Dpi
8	2.360	0.18	0.0018	2.680	0.00067
20	0.850	26.40	0.2640	1.605	0.16449
30	0.600	48.11	0.4811	0.725	0.66359
40	0.425	7.28	0.0728	0.513	0.14205
50	0.300	10.71	0.1071	0.363	0.29545
P / C	0.000	7.32	0.0732	0.150	0.48800
รวม	-	100	-	-	1.75357

D_w (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงมวล) = 1.75357 mm.

D_s (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงปริมาตร/พื้นที่ผิว) = $1 / 1.75357$
= 0.57026 mm.

ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์อาหารเข้าประเภทซีเรียลใน
ท้องตลาด

- ส่วนผสมต่างๆ
- คุณสมบัติต่างๆ
- ความชื้น
- True Density
- Bulk Density
- Piece Density
- RVA
- WAI, WSI
- ค่าแรงแตกหัก
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย



ตารางที่ ข.1 ส่วนผสมต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์อาหารเข้าประเภทซีเรียลในท้องตลาด

ตัวอย่าง	ชื่อผลิตภัณฑ์	รหัส	Ingredient (%)											
			ข้าวเจ้า	แป้งข้าวเจ้า	ข้าวโพด	แป้งข้าวโพด	ข้าวสาลี	แป้งสาลี	น้ำตาล	เกลือ	น้ำมันพืช	น้ำมันปาล์ม	เครื่องปรุงรส	อื่นๆ
Snack	ขนมอบกรอบ รสปลาหมึก ตราคาราด้า	S1	68						20	0.8			0.2	ปลาหมึก 11 %
	ข้าวอบกรอบ รสสาหร่ายกุ้ง ตราบิกก้า เทமாகิ	S2	50		17				10	1		5	10	สาหร่าย 7 %
	ข้าวกรอบ รสสาหร่าย ตราทวิสดี	S3	69									25	6	
	ขนมอบกรอบ รสสาหร่ายเซซามิ ตราคาราด้านักเกต	S4	30		50				5	0.8	4.2		5	สาหร่าย 5 %
	ข้าวเกรียบ รสกุ้งเผา ตราปังปัง	S5		20		20		50					5	แป้งมันฝรั่ง 5 %
	ขนมอบกรอบ รสบาร์บีคิว ตราคร็อกโค	S6		15	50			12					9	
	ธัญพืช ข้าวหอมมะลิ ผสมข้าวโพดและโสม ตรานิวทรี	S7		มี		มี								
Cereal	ข้าวพองอบกรอบ ตราเคลล็อกส์ ไรซ์ คริสป์ส์	C1	88						8	3				ข้าวมอลต์สกัด 0.5 %, วิตามิน 0.05 %, เกลือ 0.006 %
	อาหารเข้าซีเรียล รสสตอเบอร์รี่ ตราโคเน่	C2		45		7		10	30	0.5			0.5	เนย 3 %, มอลต์ 3 %, วิตามิน 1 %
	ข้าวสาลีผสมข้าวเจ้าอบกรอบ ตราเนสฟิต	C3	32				49		12					มอลต์สกัด 2.4 %
	ข้าวและข้าวสาลีอบกรอบ ตรา เคลล็อกส์	C4		มี			มี	มี	มี	มี				wheat gluten, minerals, malt extract, vitamins

หมายเหตุ ช่องที่ใช้คำว่า มี แปลว่า มีปริมาณของส่วนผสมนั้นแต่ไม่ได้บอกเปอร์เซ็นต์ไว้

ตารางที่ ข.2 คุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว และอาหารเข้าประเภทซีเรียลในท้องตลาด

รหัส	ความชื้น (%)	True Density (g/cm ³)	Bulk Density (g/cm ³)	WAI (g/g)	WSI (%)	แรงแตกหัก (g/cm ²)
S1	5.147	0.271	0.076	3.284	50.919	2596.100
S2	4.563	0.175	0.103	4.376	35.061	4164.533
S3	4.141	0.181	0.149	4.413	27.022	2200.133
S4	5.841	0.068	0.077	3.885	41.825	2580.367
S5	4.749	0.155	0.069	6.261	20.123	1977.367
S6	3.594	0.085	0.063	4.294	24.126	2019.167
S7	3.398	0.348	0.152	5.627	12.836	7265.367
C1	6.845	0.436	0.114	5.711	12.888	-
C2	2.902	0.524	0.224	4.026	22.281	-
C3	4.225	0.597	0.163	4.028	21.361	769.233
C4	3.645	0.505	0.140	3.699	24.475	848.133

หมายเหตุ C1 และ C2 ไม่สามารถวัดค่าแรงแตกหักได้เนื่องจากตัวอย่างมีขนาดเล็กเกินไป

ตารางที่ ข.3 ความชื้นของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวในท้องตลาด

รหัส	ครั้งที่	น.น. ภาชนะ	น.น. ภาชนะ + ตัวอย่าง (ก่อนอบ)	น.น. ภาชนะ + ตัวอย่าง (หลังอบ)	ความชื้น (%)
S 1	1	0.5563	2.5570	2.4529	5.2032
	2	0.5311	2.5324	2.4305	5.0917
	เฉลี่ย	0.5437	2.5447	2.4417	5.1474
S 2	1	0.4706	2.4709	2.3777	4.6593
	2	0.6604	2.6601	2.5708	4.4657
	เฉลี่ย	0.5655	2.5655	2.4743	4.5625
S 3	1	0.4334	2.4322	2.3481	4.2075
	2	0.4717	2.4716	2.3901	4.0752
	เฉลี่ย	0.4526	2.4519	2.3691	4.1413
S 4	1	0.5300	2.5294	2.4115	5.8968
	2	0.4322	2.4320	2.3163	5.7856
	เฉลี่ย	0.4811	2.4807	2.3639	5.8412
S 5	1	0.4295	2.4269	2.3340	4.6510
	2	0.4357	2.4308	2.3341	4.8469
	เฉลี่ย	0.4326	2.4289	2.3341	4.7489
S 6	1	0.5160	2.5166	2.4453	3.5639
	2	0.5016	2.5017	2.4292	3.6248
	เฉลี่ย	0.5088	2.5092	2.4373	3.5944
S 7	1	0.4735	2.4727	2.4082	3.2263
	2	0.4301	2.4335	2.3620	3.5689
	เฉลี่ย	0.4518	2.4531	2.3851	3.3978

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ความชื้นของผลิตภัณฑ์อาหารเข้าประเภทซีเรียลในท้องตลาด

รหัส	ครั้งที่	น.น. ภาชนะ	น.น. ภาชนะ + ตัวอย่าง (ก่อนอบ)	น.น. ภาชนะ + ตัวอย่าง (หลังอบ)	ความชื้น (%)
C 1	1	12.6657	14.6657	14.5296	6.8050
	2	12.6338	14.6336	14.4959	6.8857
	เฉลี่ย	12.6498	14.6497	14.5128	6.8453
C 2	1	12.6584	14.6586	14.5997	2.9447
	2	12.7289	14.7289	14.6717	2.8600
	เฉลี่ย	12.6937	14.6938	14.6357	2.9024
C 3	1	12.7200	14.7218	14.6378	4.1962
	2	12.6069	14.6073	14.5222	4.2541
	เฉลี่ย	12.6635	14.6646	14.5800	4.2252
C 4	1	12.6866	14.6861	14.6126	3.6759
	2	12.7859	14.7870	14.7147	3.6130
	เฉลี่ย	12.7363	14.7366	14.6637	3.6445

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ค่า True Density ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวและอาหารเข้าประเภทซีเรียลในท้องตลาด

รหัส	ครั้งที่						เฉลี่ย	TD (g/cm ³)
	1		2		3			
	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)		
S1	21.98	14.05	21.46	13.53	21.77	13.84	13.8067	0.2707
S2	16.76	8.83	17.26	9.33	16.55	8.62	8.9267	0.1750
S3	17.03	9.10	17.33	9.40	17.09	9.16	9.2200	0.1808
S4	11.41	3.48	11.41	3.48	11.30	3.37	3.4433	0.0675
S5	15.95	8.02	15.67	7.74	15.82	7.89	7.8833	0.1546
S6	12.32	4.39	12.30	4.37	12.23	4.30	4.3533	0.0854
S7	25.95	18.02	26.26	18.33	24.84	16.91	17.7533	0.3481
C1	30.12	22.19	30.09	22.16	30.23	22.30	22.2167	0.4356
C2	34.98	27.05	34.75	26.82	34.24	26.31	26.7267	0.5241
C3	38.58	30.65	38.78	30.85	37.77	29.84	30.4467	0.5970
C4	33.79	25.86	33.95	26.02	33.30	25.37	25.7500	0.5049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ค่า Bulk Density ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว และอาหารเข้าประเภทซีเรียล
ในท้องตลาด

รหัส	ครั้งที่						เฉลี่ย	BD (g/cm ³)
	1		2		3			
	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ(g)	น.น.ตัวอย่าง (g)	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)		
S1	99.20	75.00	99.37	75.16	101.58	77.38	75.85	0.076
S2	127.01	102.80	124.33	100.13	129.87	105.67	102.87	0.103
S3	173.88	149.67	170.69	146.49	175.44	151.24	149.13	0.149
S4	101.47	77.27	102.11	77.91	99.98	75.78	76.99	0.077
S5	93.41	69.21	91.55	67.35	95.02	70.82	69.13	0.069
S6	87.02	62.82	88.69	64.49	85.92	61.72	63.01	0.063
S7	176.74	152.54	173.51	149.31	178.33	154.13	151.99	0.152
C1	138.20	114.00	136.25	112.05	138.71	114.51	113.52	0.114
C2	260.96	224.66	261.63	225.33	259.11	222.81	224.26	0.224
C3	187.68	163.48	189.14	164.94	184.96	160.76	163.06	0.163
C4	165.26	141.06	161.33	137.13	166.87	142.67	140.29	0.140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ค่า piece density ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว และอาหารเข้าประเภทซีเรียลในท้องตลาด

รหัส	นน.ตัวอย่าง (g)	นน.งา+ถั่ว (g)	นน.งา (g)	ปริมาตรงา (cm ³)	ปริมาตรงาที่ ถูกแทนที่(cm ³)	ความหนาแน่น ตัวอย่าง(g/cm ³)	จำนวนชิ้น	หมายเหตุ
S1	5.576	92.381	77.810	119.104	42.097	0.132	5	นน.ถั่ว 14.5704 g
S2	9.445	86.499	71.938	110.100	51.100	0.185	4	
S3	7.643	100.172	85.602	131.030	30.170	0.253	10	
S4	5.013	101.161	86.591	132.544	28.656	0.175	2	
S5	5.220	95.000	80.429	123.112	38.088	0.137	10	ปริมาตรถั่ว 161.2 cm ³
S6	7.556	92.047	77.477	118.593	42.607	0.177	10	
S7	9.755	103.047	88.476	135.430	25.770	0.379	6	
C1	-	-	-	-	-	-	-	ความหนาแน่น
C2	3.180	112.250	97.680	149.518	11.682	0.272	20	ของงาขาว 0.6533 g/cm ²
C3	-	-	-	-	-	-	-	
C4	10.002	100.548	85.978	131.605	29.595	0.338	10	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ค่า RVA ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวและ อาหารเข้าประเภทซีเรียลในห้องตลาด

รหัส	RVA (RVU)		
	peak viscosity	holding	final viscosity
S1	46	0	3
S2	60	17	25
S3	158	49	79
S4	52	2	6
S5	978	419	711
S6	44	17	27
S7	64	54	69
C1	210	201	274
C2	33	7	11
C3	53	37	73
C4	34	-12	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ค่า WAI และ WSI ของปลายข้าว และผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวในห้องตลาด

รหัส	ครั้งที่	น.น. ของแข็งแห้ง (g)	น.น.น้ำ (g)	น.น.หลอดแก้ว (g)	น.น.หลอดแก้ว + ตะกอน (g)	น.น.ตะกอน (g)	น.น.ฟอย (g)	น.น.ฟอย + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	น.น. เกล (g)	น.น. ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
Rice	1	2.5113	30.0377	61.3865	65.7777	4.3912	16.4913	16.4934	28.1578	0.0021	1.7486	0.0836
	2	2.5992	30.0405	61.1135	66.0217	4.9082	15.5496	15.5539	27.7315	0.0043	1.8884	0.1654
	เฉลี่ย	2.5553	30.0391	61.2500	65.8997	4.6497	16.0205	16.0237	27.9447	0.0032	1.8197	0.1252
S1	1	2.5089	30.0243	61.3864	69.6431	8.2567	25.7404	27.0202	24.2765	1.2798	3.2910	51.0104
	2	2.5091	30.0193	59.7803	68.0019	8.2216	27.1544	28.4297	24.3068	1.2753	3.2767	50.8270
	เฉลี่ย	2.5090	30.0218	60.5834	68.8225	8.2392	26.4474	27.7250	24.2917	1.2776	3.2838	50.9187
S2	1	2.5025	30.0209	61.3568	72.2920	10.9352	23.1578	24.0451	21.5882	0.8873	4.3697	35.4565
	2	2.5030	30.0530	61.1114	72.0779	10.9665	24.1720	25.0397	21.5895	0.8677	4.3813	34.6664
	เฉลี่ย	2.5028	30.0370	61.2341	72.1850	10.9509	23.6649	24.5424	21.5889	0.8775	4.3755	35.0614
S3	1	2.5018	30.0117	59.7788	70.9723	11.1935	14.6229	15.2996	21.3200	0.6767	4.4742	27.0485
	2	2.5031	30.0289	61.1108	72.0022	10.8914	20.2802	20.9559	21.6406	0.6757	4.3512	26.9945
	เฉลี่ย	2.5025	30.0203	60.4448	71.4873	11.0425	17.4516	18.1278	21.4803	0.6762	4.4127	27.0215
S4	1	2.5048	30.0495	61.2828	71.0404	9.7576	16.4625	17.5117	22.7967	1.0492	3.8956	41.8876
	2	2.5059	30.0282	61.3562	71.0653	9.7091	15.5216	16.5681	22.8250	1.0465	3.8745	41.7614
	เฉลี่ย	2.5054	30.0389	61.3195	71.0529	9.7334	15.9921	17.0399	22.8109	1.0479	3.8850	41.8245

รหัส	ครั้งที่	น.น. ของแข็งแห้ง (g)	น.น.น้ำ (g)	น.น.หลอดแก้ว (g)	น.น.หลอดแก้ว + ตะกอน (g)	น.น.ตะกอน (g)	น.น.ฟอย (g)	น.น.ฟอย + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	น.น. เถล (g)	น.น. ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
S5	1	2.5043	30.0093	59.7817	75.7791	15.9974	20.3133	20.7805	16.5162	0.4672	6.3880	18.6559
	2	2.5034	30.0069	61.3581	76.7129	15.3548	14.6481	15.1886	17.1555	0.5405	6.1336	21.5906
	เฉลี่ย	2.5039	30.0081	60.5699	76.2460	15.6761	17.4807	17.9846	16.8359	0.5039	6.2608	20.1230
S6	1	2.5007	30.0020	61.1126	71.8705	10.7579	27.1815	27.7887	21.7448	0.6072	4.3020	24.2812
	2	2.5018	30.0137	61.3873	72.1092	10.7219	24.2011	24.8008	21.7936	0.5997	4.2857	23.9707
	เฉลี่ย	2.5013	30.0079	61.2500	71.9899	10.7399	25.6913	26.2948	21.7692	0.6034	4.2938	24.1260
S7	1	2.5066	30.0281	59.7807	74.1992	14.4185	25.7689	26.0955	18.1162	0.3266	5.7522	13.0296
	2	2.5018	30.0004	61.3584	75.1230	13.7646	23.1831	23.4994	18.7376	0.3163	5.5019	12.6429
	เฉลี่ย	2.5042	30.0143	60.5696	74.6611	14.0916	24.4760	24.7975	18.4269	0.3215	5.6270	12.8362

ตารางที่ ข.10 ค่า WAI และ WSI ของผลิตภัณฑ์อาหารเข้าประเภทซีเรียลในท้องถิ่น

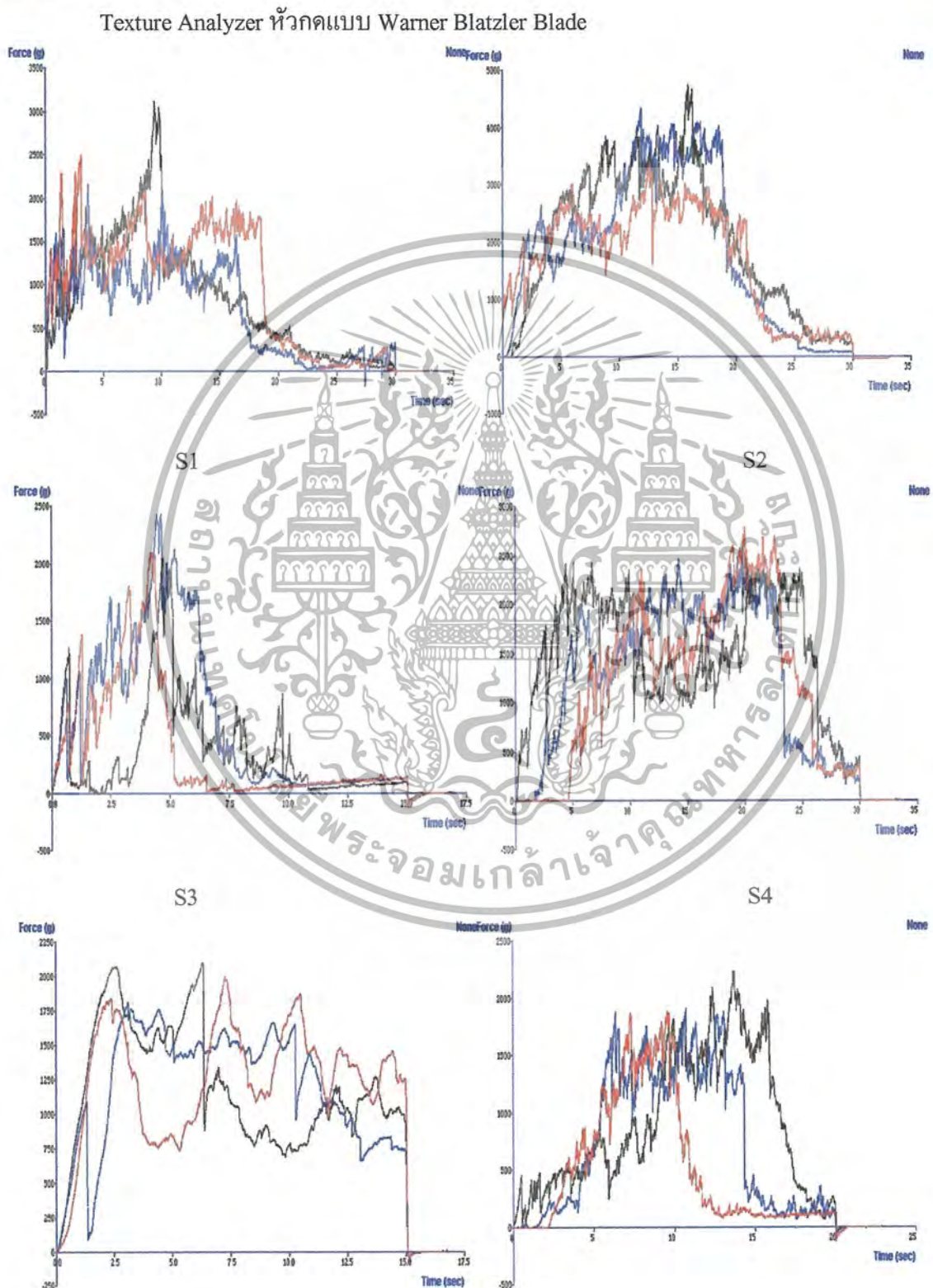
รหัส	ครั้งที่	น.น. ของแข็งแห้ง (g)	น.น.น้ำ (g)	น.น.หลอดแก้ว (g)	น.น.หลอดแก้ว + ตะกอน (g)	น.น.ตะกอน (g)	น.น.ฟอย (g)	น.น.ฟอย + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	น.น. เฉล (g)	น.น. ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
C1	1	2.5047	30.0016	59.7794	74.0190	14.2396	25.6997	26.0198	18.2667	0.3201	5.6852	12.7800
	2	2.5015	30.0052	61.1115	75.4597	14.3482	24.1235	24.4486	18.1585	0.3251	5.7358	12.9962
	เฉลี่ย	2.5031	30.0034	60.4455	74.7394	14.2939	24.9116	25.2342	18.2126	0.3226	5.7105	12.8880
C2	1	2.5082	30.0205	61.3854	71.4849	10.0995	27.1425	27.7038	22.4292	0.5613	4.0266	22.3786
	2	2.5051	30.0745	61.3560	71.4391	10.0831	14.5951	15.1508	22.4965	0.5557	4.0250	22.1827
	เฉลี่ย	2.5067	30.0475	61.3707	71.4620	10.0913	20.8688	21.4273	22.4629	0.5585	4.0258	22.2807
C3	1	2.5083	30.0033	61.3577	71.2229	9.8652	24.1523	24.6955	22.6464	0.5432	3.9330	21.6561
	2	2.5087	30.0038	61.3857	71.7291	10.3434	25.7208	26.2493	22.1691	0.5285	4.1230	21.0667
	เฉลี่ย	2.5085	30.0036	61.3717	71.4760	10.1043	24.9366	25.4724	22.4078	0.5359	4.0280	21.3614
C4	1	2.5011	30.0681	59.7806	68.9560	9.1754	23.1369	23.7489	23.3938	0.6120	3.6685	24.4692
	2	2.5057	30.0374	61.1130	70.4582	9.3452	27.1383	27.7517	23.1979	0.6134	3.7296	24.4802
	เฉลี่ย	2.5034	30.0528	60.4468	69.7071	9.2603	25.1376	25.7503	23.2959	0.6127	3.6991	24.4747

ตารางที่ ข.11 ค่าแรงแตกหักของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว และอาหารเข้าประเภทซีเรียล
ในท้องตลาด ใช้หัวกดแบบ Warner Blatzler Blade

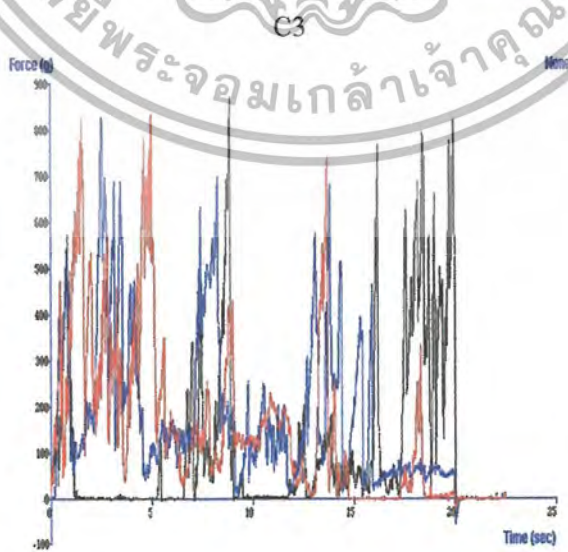
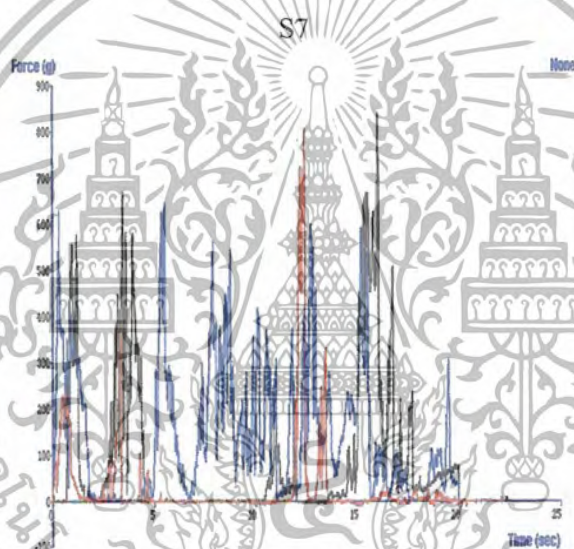
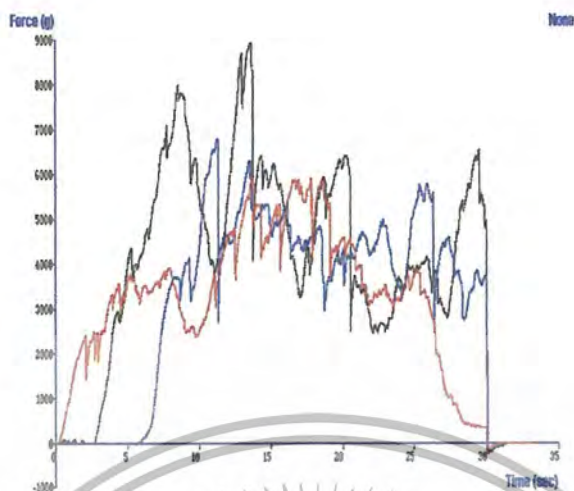
รหัส	ครั้งที่ 1 (g/cm ²)	ครั้งที่ 2 (g/cm ²)	ครั้งที่ 3 (g/cm ²)	ค่าเฉลี่ย (g/cm ²)
S1	3125.4	2160.3	2502.6	2596.100
S2	4761.8	4357.8	3374.0	4164.533
S3	2064.5	2438.5	2097.4	2200.133
S4	2442.8	2498.2	2800.1	2580.367
S5	2105.7	1818.4	2008.0	1977.367
S6	2251.9	1917.5	1888.1	2019.167
S7	8976.6	6839.6	5979.9	7265.367
C1	ไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากมีขนาดเล็เกินไป			-
C2	ไม่สามารถวัดได้ เนื่องจากมีขนาดเล็เกินไป			-
C3	845.9	649.7	812.1	769.233
C4	873.6	832.3	838.5	848.133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.1 ค่าแรงแตกหักสูงสุดของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวและอาหารเข้าประเภทซีเรียล โดยใช้เครื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



C4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับราชการใช้เฉพาะที่ควรสืบค้นเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปยังผู้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หมายเหตุ เนื่องจากตัวอย่างที่ C1 และ C2 มีขนาดเล็กมากเกินไปจึงไม่สามารถทำการวัดค่าแรงแตกหักได้
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวและ อาหารเข้าประเภท
ซีเรียลในท้องตลาด

รหัส	ครั้งที่ 1 (cm)	ครั้งที่ 2 (cm)	ครั้งที่ 3 (cm)	ค่าเฉลี่ย (cm)
S1	2.770	2.550	2.700	2.673
S2	2.560	2.660	2.720	2.647
S3	0.720	0.860	0.830	0.803
S4	3.360	2.980	3.170	3.170
S5	1.720	1.770	1.770	1.753
S6	1.240	1.300	1.310	1.283
S7	3.070	3.110	3.270	3.150
C1	0.510	0.520	0.490	0.507
C2	1.100	1.200	1.180	1.160
C3	2.785	2.075	2.465	2.442
C4	2.770	3.500	3.465	3.245

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของเอกซ์ทรูเดต

- ค่าการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์
- ความชื้น
- True Density
- Bulk Density
- Piece Density
- RVA
- WAI, WSI
- Profile ของเครื่อง Texture Analyzer
- ค่าแรงแตกหัก
- อัตราส่วนการขยายตัว
- ส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ค่าการทำงานของเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ แบบสกรูคู่

TWIN SCREW EXTRUDER ZE25*33D

No	TIME	RPM	AMP	VOLTS	POWER	Water		Knife(%)
						0	Moisture(%)	
E1	10.55	400	20	220	2	17.2	16	20
E2	11.13	400	9.5	220	2	32.6	20	20
E3	11.28	300	12	170	2	24.7	18	20
E4	11.47	200	16	120	2	17.2	16	20
E5	12.09	200	12.5	120	2	32.6	20	20
E6	12.25	300	12	165	2	24.7	18	20
E7	13.14	300	10	165	2	32.6	20	20
E8	13.31	300	12.5	165	2	17.2	16	20
E9	13.46	400	10	219	2	24.7	18	20
E10	14.05	200	14	119	2	24.7	18	20
E11	14.39	300	11	165	2	24.7	18	20
E12	15.15	300	12	165	2	17.2	16	20
E13	15.50	300	12	165	2	32.6	20	20
E14	16.09	400	12.5	215	2	24.7	18	20
E15	16.29	200	18	120	2	24.7	18	20

TEMPERATURES

No	TEMPERATURES										MELTTEMP
	1c	2c	3c	4c	5c	6c	7c	8c	9c	10c	c
E1		40	55	90	100	105	131		100		150
E2		41	55	89	100	104	117		99		140
E3		41	55	90	100	106	117		100		141
E4		42	55	90	100	106	114		100		137
E5		41	55	89	100	104	103		100		125
E6		41	55	91	100	105	115		101		140
E7		42	55	90	80	105	109		100		133
E8		42	55	91	80	106	122		102		143
E9		43	55	90	80	105	121		100		140
E10		42	55	90	80	105	107		99		128
E11		43	55	91	101	105	115		100		137
E12		43	55	90	121	104	123		100		141
E13		44	59	91	121	105	110		100		131
E14		46	80	90	120	106	124		101		143
E15		44	51	90	120	106	109		100		130

หมายเหตุ 5c คือ อุณหภูมิของบาร์เรล

ตารางที่ ค.2 ความชื้นของเอกซัทเรต (ผ่านการอบ)

รหัส	ครั้งที่	น.น. ภาชนะ (g)	น.น. ภาชนะ+ตัวอย่าง (ก่อนอบ) (g)	น.น. ภาชนะ+ตัวอย่าง (หลังอบ) (g)	ความชื้น (%)
E1	1	0.5211	2.5221	2.4056	5.8221
	2	0.4601	2.4608	2.3437	5.8530
	เฉลี่ย	0.4906	2.4915	2.3747	5.8375
E2	1	0.3919	2.3929	2.2333	7.9760
	2	0.5107	2.5127	2.3561	7.8222
	เฉลี่ย	0.4513	2.4528	2.2947	7.8991
E3	1	0.4453	2.4459	2.2813	8.2275
	2	0.5993	2.6012	2.4386	8.1223
	เฉลี่ย	0.5223	2.5236	2.3600	8.1749
E4	1	0.4476	2.4481	2.2908	7.8630
	2	0.7046	2.7051	2.5455	7.9780
	เฉลี่ย	0.5761	2.5766	2.4182	7.9205
E5	1	0.4367	2.4386	2.2056	11.6389
	2	0.5870	2.5872	2.3478	11.9688
	เฉลี่ย	0.5119	2.5129	2.2767	11.8039
E6	1	0.4176	2.4180	2.2486	8.4683
	2	0.5184	2.5189	2.3488	8.5029
	เฉลี่ย	0.4680	2.4685	2.2987	8.4856
E7	1	0.4173	2.4203	2.2058	10.7089
	2	0.6501	2.6502	2.4420	10.4095
	เฉลี่ย	0.5337	2.5353	2.3239	10.5592

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัส	ครั้งที่	น.น. ภาชนะ (g)	น.น. ภาชนะ+ตัวอย่าง (ก่อนอบ) (g)	น.น. ภาชนะ+ตัวอย่าง (หลังอบ) (g)	ความชื้น (%)
E8	1	0.5745	2.5751	2.4208	7.7127
	2	0.5306	2.5306	2.3819	7.4350
	เฉลี่ย	0.5526	2.5529	2.4014	7.5738
E9	1	0.4569	2.4583	2.3033	7.7446
	2	0.6747	2.6761	2.5244	7.5797
	เฉลี่ย	0.5658	2.5672	2.4139	7.6621
E10	1	0.4572	2.4584	2.2762	9.1045
	2	0.4992	2.4992	2.3197	8.9750
	เฉลี่ย	0.4782	2.4788	2.2980	9.0398
E11	1	0.3703	2.3696	2.2010	8.4330
	2	0.4121	2.4134	2.2455	8.3895
	เฉลี่ย	0.3912	2.3915	2.2233	8.4112
E12	1	0.5292	2.5287	2.3753	7.6719
	2	0.4232	2.4244	2.2737	7.5305
	เฉลี่ย	0.4762	2.4766	2.3245	7.6012
E13	1	0.4625	2.4616	2.2306	11.5552
	2	0.5272	2.5274	2.2986	11.4389
	เฉลี่ย	0.4949	2.4945	2.2646	11.4970
E14	1	0.4154	2.4167	2.2574	7.9598
	2	0.4495	2.4500	2.2901	7.9930
	เฉลี่ย	0.4325	2.4334	2.2738	7.9764
E15	1	0.6385	2.6395	2.4302	10.4598
	2	0.5438	2.5438	2.3368	10.3500
	เฉลี่ย	0.5912	2.5917	2.3835	10.4049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.3 ความชื้นของเอกซ์ทราคเตด

รหัส	สภาวะการผลิต			น.น.ตัวอย่าง (g)	ความชื้น (%)	เวลา (min)
	ความเร็วรอบ (rpm)	อุณหภูมิบาร์เรล (oC)	ความชื้น(%)			
E1	400	100	16	5.019	8.34	16.4
E2	400	100	20	5.005	12.28	20.0
E3	300	100	18	5.020	10.70	18.8
E4	200	100	16	5.005	9.85	20.0
E5	200	100	20	5.006	13.26	24.4
E6	300	80	18	5.056	11.09	20.8
E7	300	80	20	5.038	12.64	23.6
E8	300	80	16	5.003	9.74	20.8
E9	400	80	18	5.023	10.38	16.8
E10	200	80	18	5.004	11.15	18.8
E11	300	101	18	5.001	11.40	22.8
E12	300	121	16	5.038	9.63	22.4
E13	300	121	20	5.057	12.79	22.4
E14	400	120	18	5.042	10.84	18.0
E15	200	120	18	5.042	11.76	24.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ค่า True Density ของเอกซ์ทรูเดต

รหัส	ครั้งที่						เฉลี่ย (g)	TD (g/cm ³)
	1		2		3			
	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)		
E1	44.779	36.6735	45.5832	37.4777	45.0594	36.9539	37.0350	0.6858
E2	47.1974	39.0919	46.4723	38.3668	45.8523	37.7468	38.4018	0.7111
E3	46.5676	38.4621	46.5979	38.4924	46.6928	38.5873	38.5139	0.7132
E4	47.3265	39.221	46.7551	38.6496	46.8348	38.7293	38.8666	0.7198
E5	46.0075	37.902	46.7227	38.6172	46.4156	38.3101	38.2764	0.7088
E6	46.5424	38.4369	47.6306	39.5251	47.1204	39.0149	38.9923	0.7221
E7	47.4848	39.3793	47.3409	39.2354	47.8748	39.7693	39.4613	0.7308
E8	46.7107	38.6052	46.5557	38.4502	47.1743	39.0688	38.7081	0.7168
E9	46.3825	38.277	46.5931	38.4876	46.3935	38.288	38.3509	0.7102
E10	49.4407	41.3352	48.0838	39.9783	48.9493	40.8438	40.7191	0.7541
E11	47.7993	39.6938	47.9501	39.8446	47.211	39.1055	39.5480	0.7324
E12	46.4007	38.2952	46.9446	38.8391	46.3404	38.2349	38.4564	0.7122
E13	47.1275	39.022	46.8563	38.7508	47.5569	39.4514	39.0747	0.7236
E14	46.6069	38.5014	46.5368	38.4313	46.3277	38.2222	38.3850	0.7108
E15	47.1545	39.049	47.2791	39.1736	46.2953	38.1898	38.8041	0.7186

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.5 ค่า Bulk Density ของเอกซ์ทรูเดต

รหัส	ครั้งที่						เฉลี่ย (g)	BD (g/cm ³)
	1		2		3			
	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)	น.น.ตัวอย่าง + ภาชนะ (g)	น.น.ตัวอย่าง (g)		
E1	293.44	111.56	293.32	111.44	292.86	110.98	111.327	0.111
E2	333.96	152.08	332.90	151.02	332.42	150.54	151.213	0.151
E3	326.35	144.47	325.63	143.75	324.76	142.88	143.700	0.144
E4	331.16	149.28	332.48	150.60	332.22	150.34	150.073	0.150
E5	573.07	391.19	573.13	391.25	572.58	390.70	391.047	0.391
E6	332.99	151.11	333.90	152.02	332.78	150.90	151.343	0.151
E7	422.60	240.72	424.19	242.31	423.97	242.09	241.707	0.242
E8	311.58	129.70	312.18	130.30	312.59	130.71	130.237	0.130
E9	306.74	124.86	305.88	124.00	306.34	124.46	124.440	0.124
E10	439.65	257.77	438.81	256.93	438.34	256.46	257.053	0.257
E11	346.62	164.74	347.70	165.82	346.52	164.64	165.067	0.165
E12	317.83	135.95	315.84	133.96	317.63	135.75	135.220	0.135
E13	488.85	306.97	488.75	306.87	489.31	307.43	307.090	0.307
E14	304.81	122.93	303.42	121.54	304.08	122.20	122.223	0.122
E15	481.72	299.84	482.43	300.55	481.77	299.89	300.093	0.300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.๖ ค่า piece density ของเอกซ์ทรูเดต

รหัส	นน.ตัวอย่าง (g)	นน.งา+ถั่ว (g)	นน.งา (g)	ปริมาตรงา (cm ³)	ปริมาตรงาที่ ถูกแทนที่(cm ³)	ความหนาแน่น ตัวอย่าง(g/cm ³)	จำนวนชิ้น	หมายเหตุ
E2	10.167	103.288	88.717	135.803	25.397	0.400	10	นน.ถั่ว 14.5704 g
E3	10.263	101.797	87.226	135.520	25.680	0.400	10	
E4	10.020	101.325	86.755	132.799	28.402	0.353	10	
E5	10.120	110.179	95.609	146.352	14.848	0.682	10	
E6	10.225	103.814	89.244	136.608	24.592	0.416	10	
E7	9.914	114.645	100.075	153.188	8.012	1.238	10	
E8	10.012	100.958	86.388	132.237	28.963	0.346	10	
E9	10.005	100.395	85.825	131.375	29.825	0.335	10	
E10	10.293	116.402	101.832	155.878	5.322	1.934	10	ความหนาแน่น ของงาขาว 0.6533 g/cm ²
E11	10.207	106.646	92.076	140.944	20.256	0.504	10	
E12	10.179	101.495	86.889	133.004	28.196	0.361	10	
E13	9.935	118.845	104.274	159.612	1.588	6.255	10	
E14	10.193	97.721	83.151	127.282	33.918	0.301	10	
E15	10.052	118.272	103.702	158.740	2.460	4.086	10	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓.7 ค่า RVA ของเอกซ์ทรูคเตด

รหัส	RVA (RVU)		
	peak viscosity	holding	final viscosity
E1-1	156.0	5.0	38.0
E1-2	165.0	7.0	38.0
เฉลี่ย	160.5	6.0	38.0
E2-1	503.0	36.0	101.0
E2-2	480.0	36.0	105.0
เฉลี่ย	491.5	36.0	103.0
E3-1	396.0	28.0	86.0
E3-2	462.0	24.0	85.0
เฉลี่ย	429.0	26.0	85.5
E4-1	544.0	33.0	96.0
E4-2	476.0	38.0	104.0
เฉลี่ย	510.0	35.5	100.0
E5-1	199.0	49.0	132.0
E5-2	196.0	51.0	131.0
เฉลี่ย	197.5	50.0	131.5
E6-1	410.0	51.0	108.0
E6-2	378.0	52.0	115.0
เฉลี่ย	394.0	51.5	111.5
E7-1	219.0	37.0	102.0
E7-2	201.0	40.0	98.0
เฉลี่ย	210.0	38.5	100.0
E8-1	319.0	24.0	76.0
E8-2	315.0	25.0	69.0
เฉลี่ย	317.0	24.5	72.5

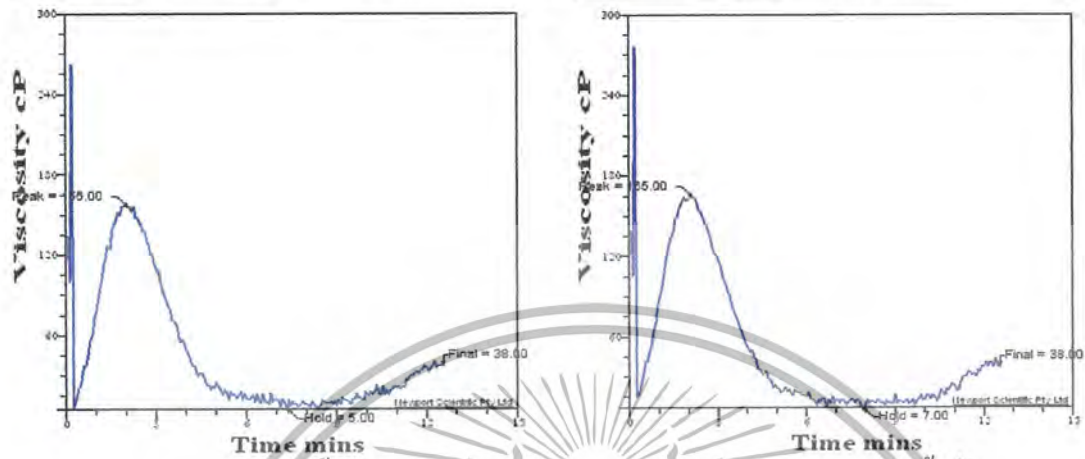
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัส	RVA (RVU)		
	peak viscosity	holding	final viscosity
E9-1	326.0	55.0	102.0
E9-2	301.0	43.0	92.0
เฉลี่ย	313.5	49.0	97.0
E10-1	253.0	52.0	118.0
E10-2	259.0	50.0	117.0
เฉลี่ย	256.0	51.0	117.5
E11-1	342.0	49.0	114.0
E11-2	354.0	55.0	117.0
เฉลี่ย	348.0	52.0	115.5
E12-1	317.0	30.0	71.0
E12-2	321.0	31.0	67.0
เฉลี่ย	319.0	30.5	69.0
E13-1	218.0	47.0	98.0
E13-2	193.0	32.0	81.0
เฉลี่ย	205.5	39.5	89.5
E14-1	198.0	20.0	59.0
E14-2	207.0	18.0	57.0
เฉลี่ย	202.5	19.0	58.0
E15-1	229.0	34.0	88.0
E15-2	232.0	30.0	86.0
เฉลี่ย	230.5	32.0	87.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.1 ค่าความหนืดของเอกซัทเรคต โดยใช้เครื่อง Rapid Visco Analyzer

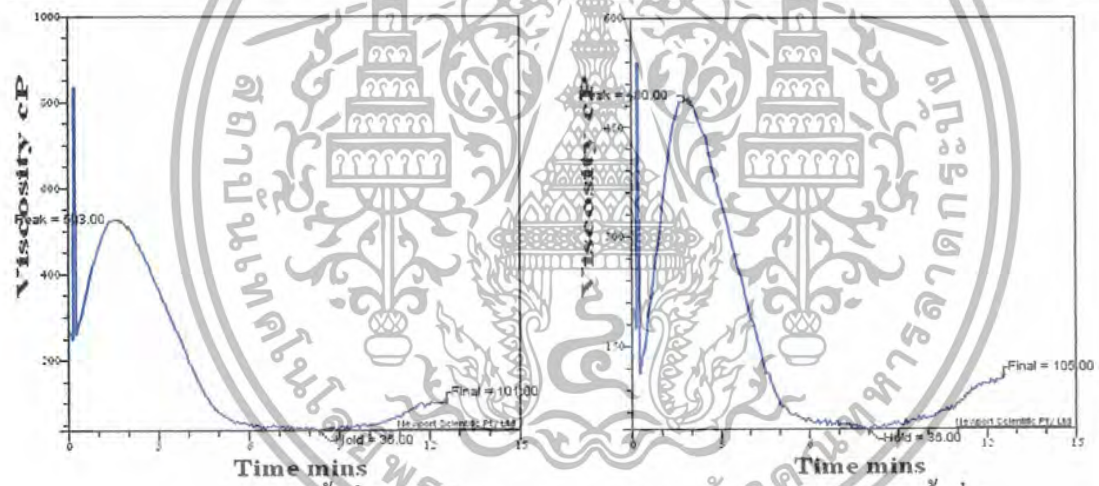
c:\ricepr~1\15-11~1\s1-1.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\s1-2.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\s



E1 ครั้งที่ 1

E1 ครั้งที่ 2

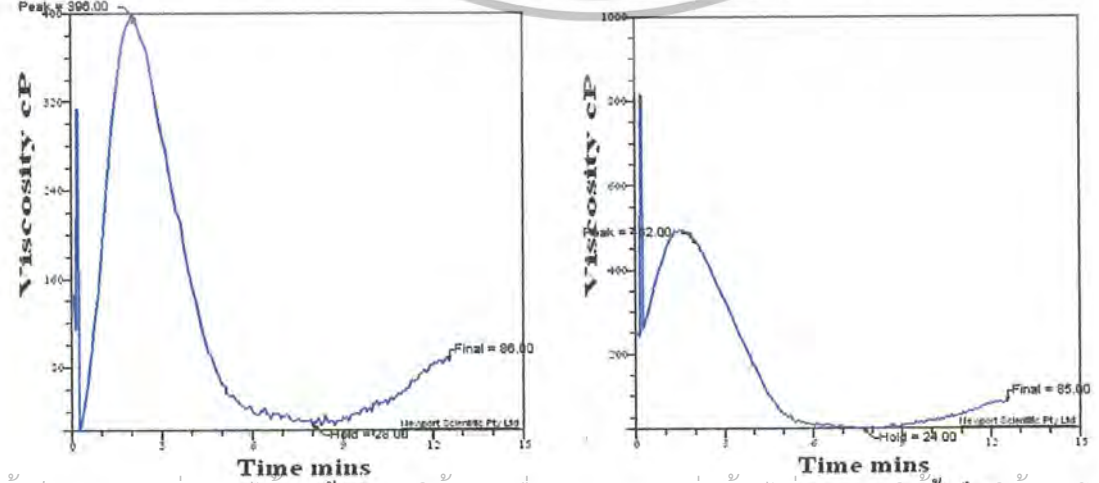
c:\ricepr~1\19-11-2~1\s2-1.dat - c:\ricepr~1\19-11-2~1\s2-2.dat - c:\ricepr~1\19-11-2~1\s



E2 ครั้งที่ 1

E2 ครั้งที่ 2

c:\ricepr~1\19-11-2~1\s3-1.dat - c:\ricepr~1\19-11-2~1\s3-2.dat - c:\ricepr~1\19-11-2~1\s

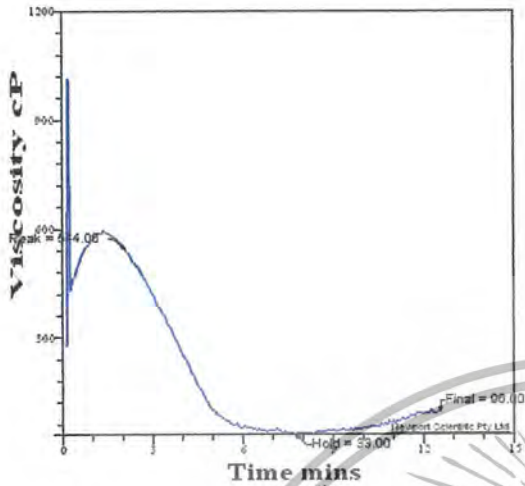


E3 ครั้งที่ 1

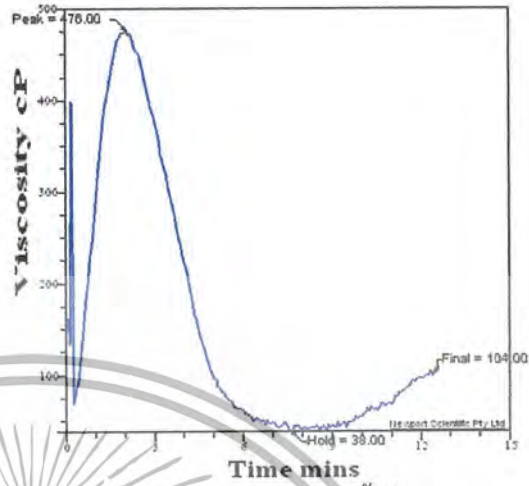
E3 ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c:\ricepr~1\9-11-2~1\s4-1.dat - c:\ricepr~1\9-11-2~1\s:c:\ricepr~1\9-11-2~1\s4-2.dat - c:\ricepr~1\9-11-2~1\s:

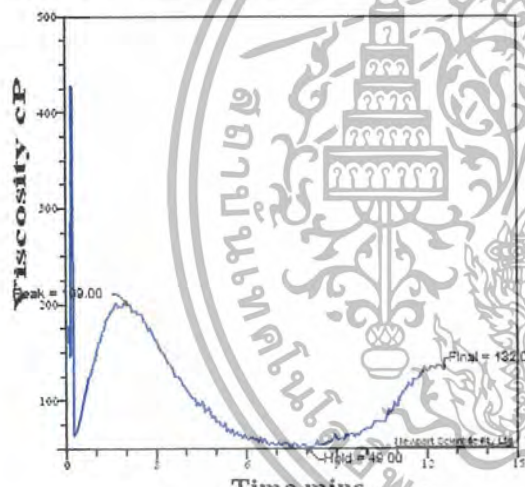


Time mins
E4 ครั้งที่ 1

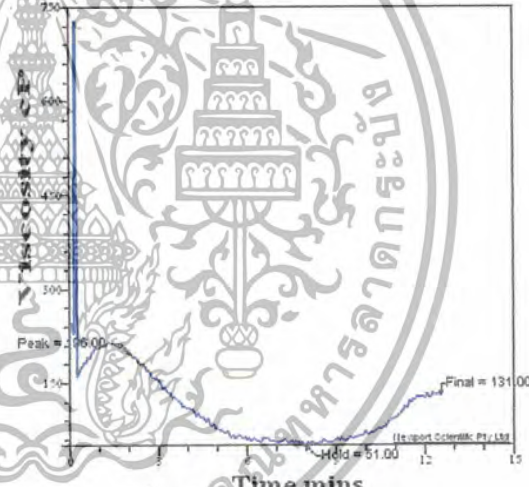


Time mins
E4 ครั้งที่ 2

c:\ricepr~1\15-11~1\s5-1.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\s:c:\ricepr~1\15-11~1\s5-2.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\s:

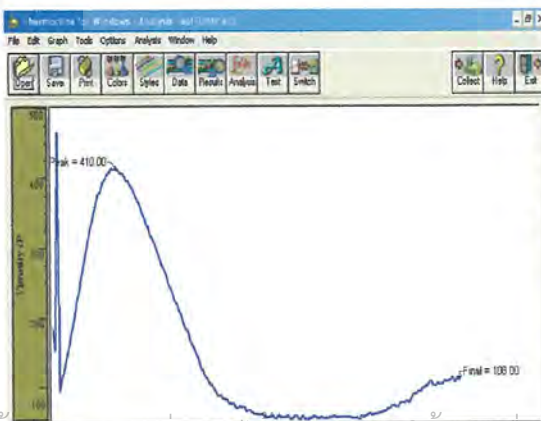


Time mins
E5 ครั้งที่ 1

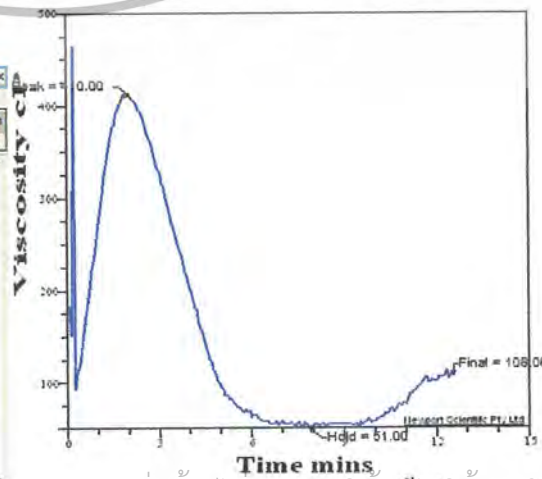


Time mins
E5 ครั้งที่ 2

c:\ricepr~1\12-11~1\s6-2.dat - c:\ricepr~1\12-11~1\s:



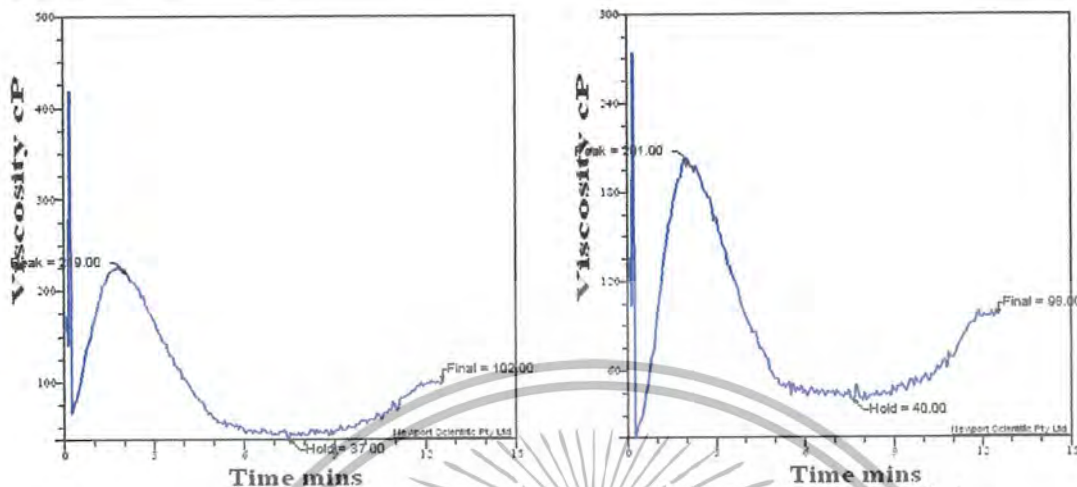
E6 ครั้งที่ 1



E6 ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นได้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c:\ricepr~1\12-11~1\s7-1.dat - c:\ricepr~1\12-11~1\s7-2.dat - c:\ricepr~1\12-11~1\s7



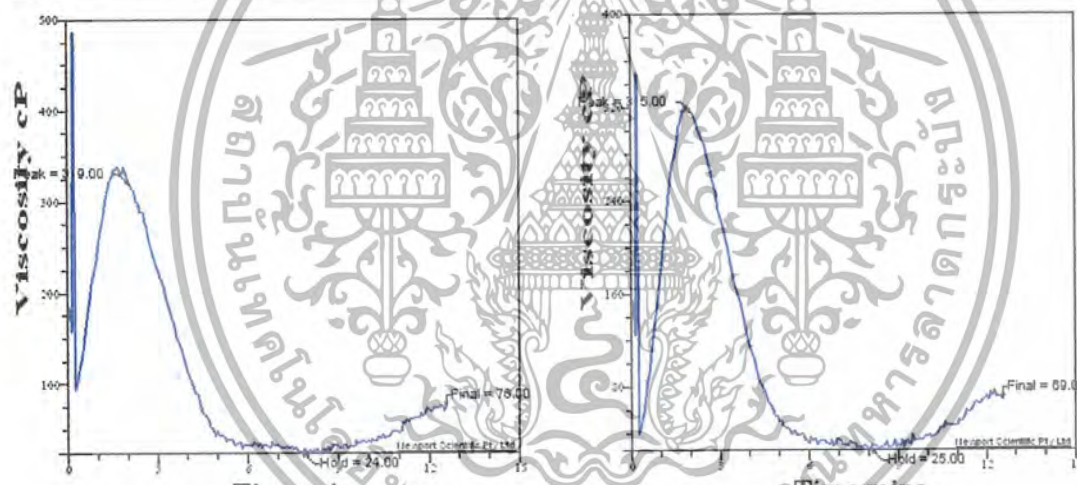
Time mins

E7 ครั้งที่ 1

Time mins

E7 ครั้งที่ 2

c:\ricepr~1\12-11~1\s8-1.dat - c:\ricepr~1\12-11~1\s8-2.dat - c:\ricepr~1\12-11~1\s8



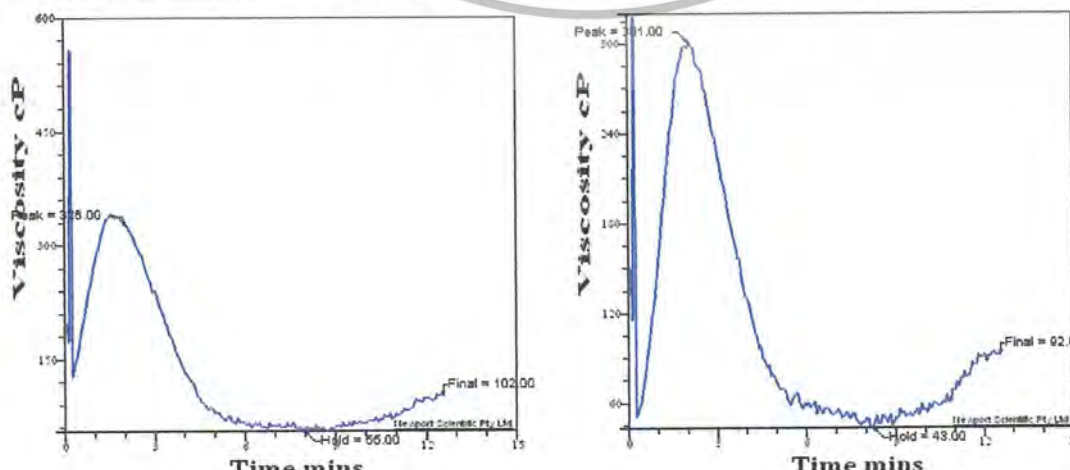
Time mins

E8 ครั้งที่ 1

Time mins

E8 ครั้งที่ 2

c:\ricepr~1\15-11~1\s9-1.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\s9-2.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\s9



Time mins

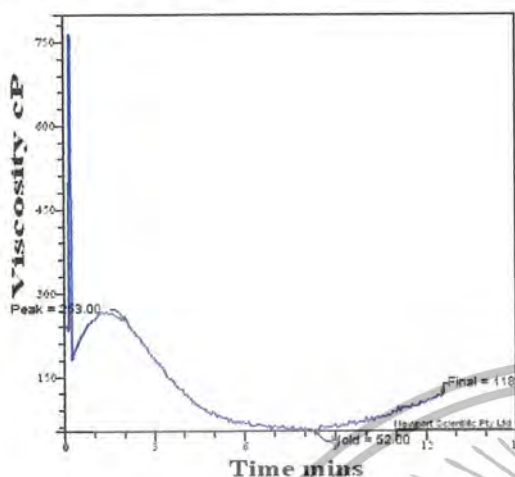
E9 ครั้งที่ 1

Time mins

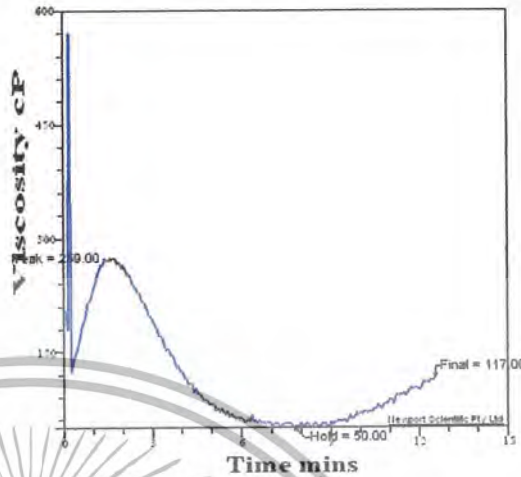
E9 ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

c:\ricepr~1\15-11~1\s10-1.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\c:\ricepr~1\15-11~1\s10-2.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\

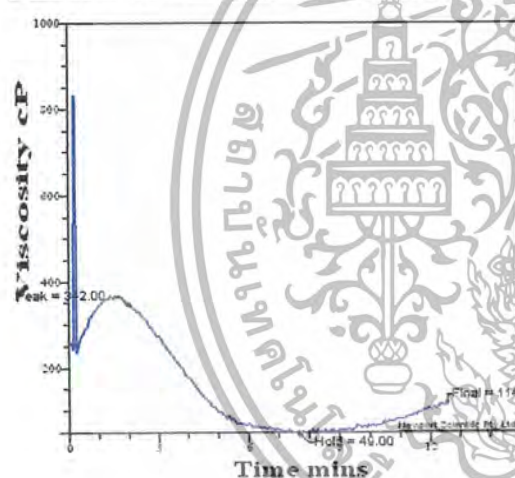


E10 ครั้งที่ 1

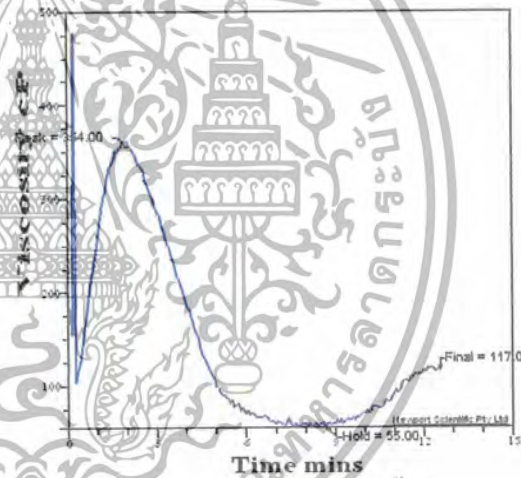


E10 ครั้งที่ 2

c:\ricepr~1\15-11~1\s11-1.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\c:\ricepr~1\15-11~1\s11-2.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\

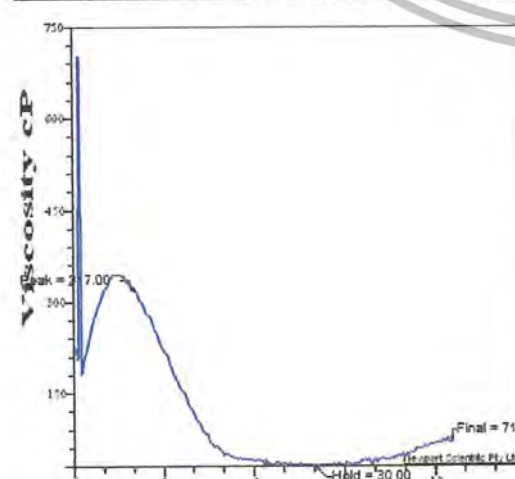


E11 ครั้งที่ 1

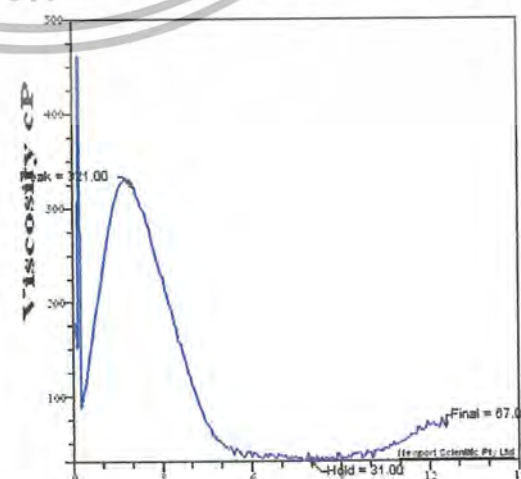


E11 ครั้งที่ 2

c:\ricepr~1\15-11~1\s12-1.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\c:\ricepr~1\15-11~1\s12-2.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\



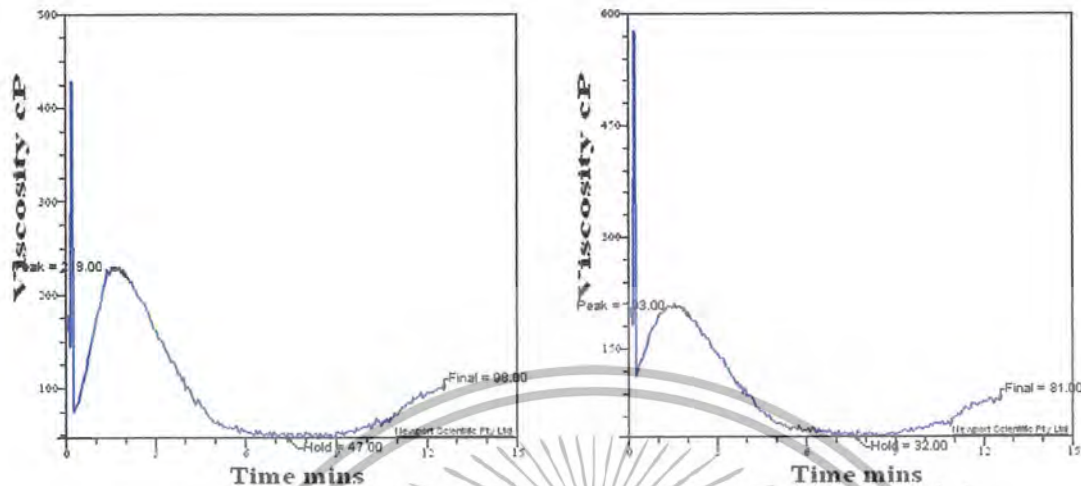
E12 ครั้งที่ 1



E12 ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ผู้อื่นใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

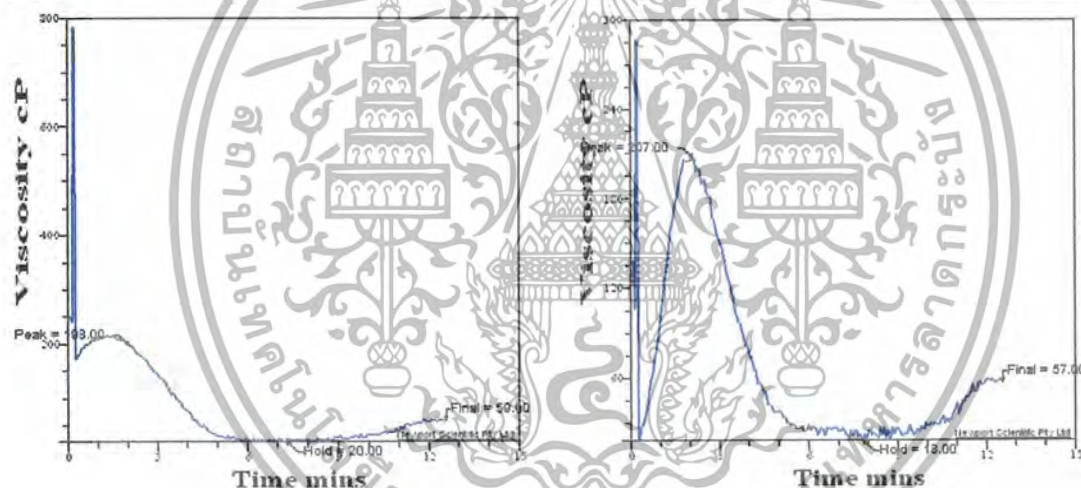
c:\ricepr~1\15-11~1\s13-1.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\c:\ricepr~1\15-11~1\s13-2.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\



E14 ครั้งที่ 1

E14 ครั้งที่ 2

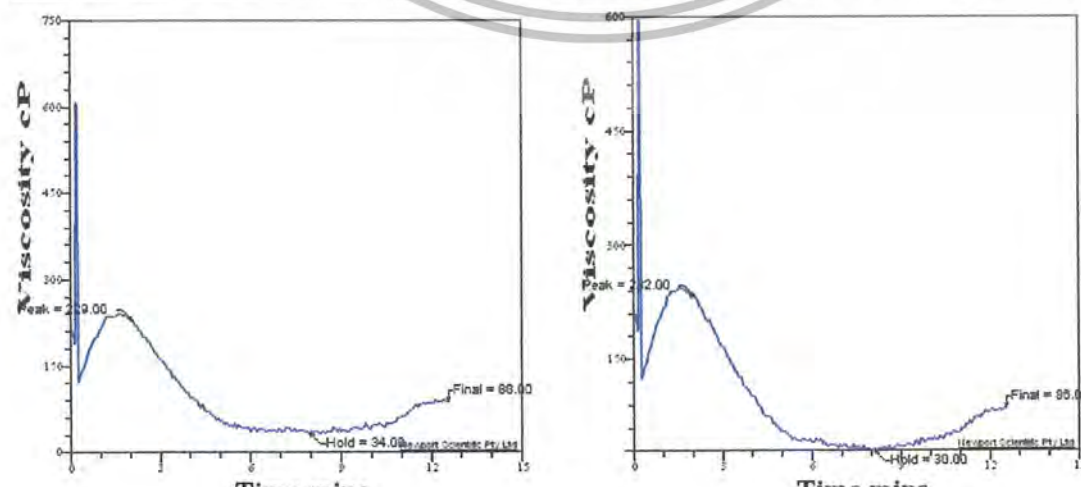
c:\ricepr~1\15-11~1\s14-1.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\c:\ricepr~1\15-11~1\s14-2.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\



E14 ครั้งที่ 1

E14 ครั้งที่ 2

c:\ricepr~1\15-11~1\s15-1.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\c:\ricepr~1\15-11~1\s15-2.dat - c:\ricepr~1\15-11~1\



E15 ครั้งที่ 1

E15 ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ค่า WAI และ WSI ของเอกซโทลูเคน

รหัส	ครั้งที่	น.น. ของแข็งแห้ง (g)	น.น.น้ำ (g)	น.น.หลอดแก้ว (g)	น.น.หลอดแก้ว + ตะกอน (g)	น.น.ตะกอน (g)	น.น.ฟอย (g)	น.น.ฟอย + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	น.น. เจล (g)	น.น. ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
E1	1	2.5011	30.0079	61.1097	73.4244	12.3147	3.8526	5.0246	20.1943	1.1720	4.9237	46.8594
	2	2.5033	29.9995	61.3566	73.6071	12.2505	3.9191	5.1380	20.2523	1.2189	4.8937	48.6917
	เฉลี่ย	2.5022	30.0037	61.2332	73.5158	12.2826	3.8859	5.0813	20.2233	1.1955	4.9087	47.7760
E2	1	2.5019	30.0442	61.1100	75.9800	14.8700	3.8870	4.4330	17.6761	0.5460	5.9435	21.8234
	2	2.5009	29.9954	59.7700	72.7400	12.9700	3.8314	4.3297	19.5263	0.4983	5.1861	19.9248
	เฉลี่ย	2.5014	30.0198	60.4400	74.3600	13.9200	3.8592	4.3814	18.6012	0.5222	5.5649	20.8743
E3	1	2.5016	29.9994	61.1100	78.7747	17.6647	23.0908	23.7526	14.8363	0.6618	7.0614	26.4551
	2	2.5016	29.9997	59.7700	77.4158	17.6458	16.3819	17.0485	14.8555	0.6666	7.0538	26.6469
	เฉลี่ย	2.5016	29.9996	60.4400	78.0953	17.6553	19.7364	20.4006	14.8459	0.6642	7.0576	26.5510
E4	1	2.5068	30.0055	61.3851	78.4874	17.1023	4.0495	4.8081	15.4100	0.7586	6.8224	30.2617
	2	2.5032	30.0297	59.7795	77.2605	17.4810	3.9117	4.6393	15.0519	0.7276	6.9835	29.0668
	เฉลี่ย	2.5050	30.0176	60.5823	77.8740	17.2917	3.9806	4.7237	15.2310	0.7431	6.9029	29.6647

รหัส	ครั้งที่	น.น. ของแข็งแห้ง (g)	น.น.น้ำ (g)	น.น.หลอดแก้ว (g)	น.น.หลอดแก้ว + ตะกอน (g)	น.น.ตะกอน (g)	น.น.ฟอย (g)	น.น.ฟอย + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	น.น. เกล (g)	น.น. ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
E5	1	2.5039	30.0378	61.3580	75.5544	14.1964	25.6791	26.4462	18.3453	0.7671	5.6697	30.6362
	2	2.5011	30.0591	61.1127	75.2299	14.1172	14.5507	15.3290	18.4430	0.7783	5.6444	31.1183
	เฉลี่ย	2.5025	30.0485	61.2354	75.3922	14.1568	20.1149	20.8876	18.3942	0.7727	5.6571	30.8771
E6	1	2.5019	29.9964	61.0977	76.6145	15.5168	16.3963	17.2869	16.9815	0.8906	6.2020	35.5969
	2	2.5004	29.9973	59.7663	75.3387	15.5724	14.6039	15.5077	16.9253	0.9038	6.2280	36.1462
	เฉลี่ย	2.5012	29.9969	60.4320	75.9766	15.5446	15.5001	16.3973	16.9534	0.8972	6.2150	35.8715
E7	1	2.5044	30.0128	59.7750	69.7000	9.9250	24.1022	25.3962	22.5922	1.2940	3.9630	51.6691
	2	2.5045	30.0159	61.3790	70.8240	9.4450	23.1132	24.4403	23.0754	1.3271	3.7712	52.9886
	เฉลี่ย	2.5045	30.0144	60.5770	70.2620	9.6850	23.6077	24.9183	22.8338	1.3106	3.8671	52.3289
E8	1	2.5021	30.0010	59.7821	77.0403	17.2582	3.9083	4.6481	15.2449	0.7398	6.8975	29.5672
	2	2.5049	30.0088	61.3880	77.2303	15.8423	3.8714	4.7372	16.6714	0.8658	6.3245	34.5643
	เฉลี่ย	2.5035	30.0049	60.5851	77.1353	16.5503	3.8899	4.6927	15.9582	0.8028	6.6108	32.0671

รหัส	ครั้งที่	น.น. ของแข็งแห้ง (g)	น.น.น้ำ (g)	น.น.หลอดแก้ว (g)	น.น.หลอดแก้ว + ตะกอน (g)	น.น.ตะกอน (g)	น.น.ฟอย (g)	น.น.ฟอย + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	น.น. เกล็ด (g)	น.น. ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
E9	1	2.5013	30.0088	61.3870	77.3274	15.9404	16.4099	17.2597	16.5697	0.8498	6.3728	33.9743
	2	2.5028	30.0035	61.1144	77.1564	16.0420	14.5476	15.4070	16.4643	0.8594	6.4096	34.3375
	เฉลี่ย	2.5021	30.0062	61.2507	77.2419	15.9912	15.4788	16.3334	16.5170	0.8546	6.3912	34.1560
E10	1	2.5052	30.0678	59.7805	74.2598	14.4793	16.4289	17.3415	18.0937	0.9126	5.7797	36.4282
	2	2.5081	30.0706	61.3857	75.1983	13.8126	27.1353	28.1015	18.7661	0.9662	5.5072	38.5232
	เฉลี่ย	2.5067	30.0692	60.5831	74.7291	14.1460	21.7821	22.7215	18.4299	0.9394	5.6434	37.4763
E11	1	2.5025	30.0179	61.3592	77.3755	16.0163	3.9167	4.7205	16.5041	0.8038	6.4001	32.1199
	2	2.5029	30.0072	61.1128	77.0973	15.9845	3.8454	4.6654	16.5256	0.8200	6.3864	32.7620
	เฉลี่ย	2.5027	30.0126	61.2360	77.2364	16.0004	3.8811	4.6930	16.5149	0.8119	6.3933	32.4410
E12	1	2.5062	30.0197	61.3603	78.0082	16.6479	25.6575	26.4537	15.8780	0.7962	6.6427	31.7692
	2	2.5025	30.0019	59.7823	76.7111	16.9288	27.1080	27.8893	15.5756	0.7813	6.7648	31.2208
	เฉลี่ย	2.5044	30.0108	60.5713	77.3597	16.7884	26.3828	27.1715	15.7268	0.7888	6.7037	31.4952

รหัส	ครั้งที่	น.น. ของแข็งแห้ง (g)	น.น.น้ำ (g)	น.น.หลดคแก้ว (g)	น.น.หลดคแก้ว + ตะกอน (g)	น.น.ตะกอน (g)	น.น.ฟอย (g)	น.น.ฟอย + ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	น.น. เกล (g)	น.น. ของแข็งแห้ง (หลังอบ) (g)	WAI (g/g)	WSI (%)
E13	1	2.5046	30.0106	61.3486	74.0638	12.7152	16.4518	17.5111	19.8000	1.0593	5.0767	42.2942
	2	2.5049	30.0128	61.1030	72.7010	11.5980	14.5998	15.7392	20.9197	1.1394	4.6301	45.4868
	เฉลี่ย	2.5048	30.0117	61.2258	73.3824	12.1566	15.5258	16.6252	20.3599	1.0994	4.8534	43.8906
E14	1	2.5012	30.0005	61.3580	75.1714	13.8134	16.4253	17.4509	18.6883	1.0256	5.5227	41.0043
	2	2.5006	30.0002	61.1124	75.7699	14.6575	25.6753	26.6160	17.8433	0.9407	5.8616	37.6190
	เฉลี่ย	2.5009	30.0004	61.2352	75.4707	14.2355	21.0503	22.0335	18.2658	0.9832	5.6921	39.3118
E15	1	2.4992	30.0028	59.7805	72.6589	12.8784	14.5584	15.5883	19.6236	1.0299	5.1530	41.2092
	2	2.5002	30.0003	61.3866	72.2247	10.8381	27.1135	28.1417	21.6624	1.0282	4.3349	41.1247
	เฉลี่ย	2.4997	30.0016	60.5836	72.4418	11.8583	20.8360	21.8650	20.6430	1.0291	4.7439	41.1669

ตารางที่ ๑.๑ Profile ของเครื่อง Texture Analyzer

Texture Analyzer Profile					
P/2 -2mm. Diameter Stainless steel cylinder probe			Warner Blatzler Blade		
Pre-test Speed	1	mm./s	Pre-test Speed	1	mm./s
Test Speed	1	mm./s	Test Speed	1	mm./s
Post Test Speed	10	mm./s	Post Test Speed	10	mm./s
Distance	1	mm.	Distance	5	mm.
Trigger Type	Auto(Force)		Trigger Type	Auto(Force)	
Trigger Force	5	g.	Trigger Force	5	g.
Tare Mode	Auto		Tare Mode	Auto	
Acquisition Rate	400	pps.	Acquisition Rate	400	pps.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

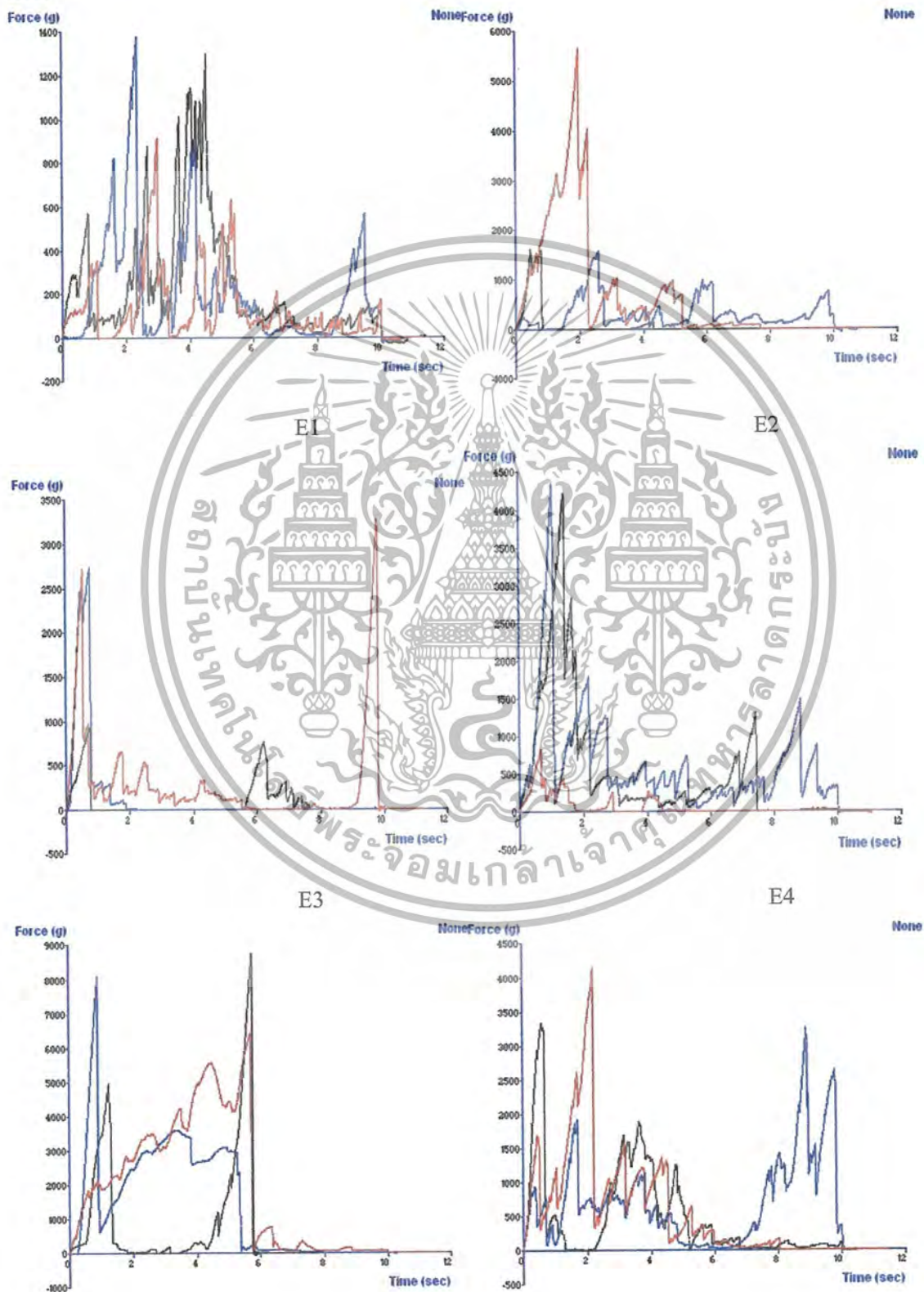
ตารางที่ ก.10 ค่าแรงแตกหักของเอกซัทรูเคต

รหัส	ครั้งที่	แรงแตกหัก (g/cm ²)		รหัส	ครั้งที่	แรงแตกหัก (g/cm ²)	
		Probe (P/2)	Blade			Probe (P/2)	Blade
E1	1	1301.70	2588.90	E9	1	2036.50	3142.30
	2	1381.70	2183.00		2	2017.00	2232.00
	เฉลี่ย	1341.70	2385.95		เฉลี่ย	2026.75	2687.15
E2	1	1659.40	3396.00	E10	1	3382.00	7458.80
	2	1586.80	2777.20		2	3744.70	7775.10
	เฉลี่ย	1623.10	3086.60		เฉลี่ย	3563.35	7616.95
E3	1	2754.50	3650.20	E11	1	1388.10	5425.60
	2	3279.10	4651.80		2	2326.20	5466.20
	เฉลี่ย	3016.80	4151.00		เฉลี่ย	1857.15	5445.90
E4	1	4219.00	3342.70	E12	1	2507.70	6398.90
	2	4353.50	3704.20		2	2243.80	4919.70
	เฉลี่ย	4286.25	3523.45		เฉลี่ย	2375.75	5659.30
E5	1	8796.90	13119.90	E13	1	5894.40	10121.00
	2	8110.20	16930.40		2	6110.20	9187.80
	เฉลี่ย	8453.55	15025.15		เฉลี่ย	6002.30	9654.40
E6	1	3340.70	5097.50	E14	1	8221.40	9486.30
	2	3264.30	4780.60		2	8096.20	9004.40
	เฉลี่ย	3302.50	4939.05		เฉลี่ย	8158.80	9245.35
E7	1	6706.90	9704.80	E15	1	6009.60	11738.40
	2	6350.40	9800.00		2	6467.90	14053.60
	เฉลี่ย	6528.65	9752.40		เฉลี่ย	6238.75	12896.00
E8	1	2163.60	3251.20				
	2	1482.70	2974.50				
	เฉลี่ย	1823.15	3112.85				

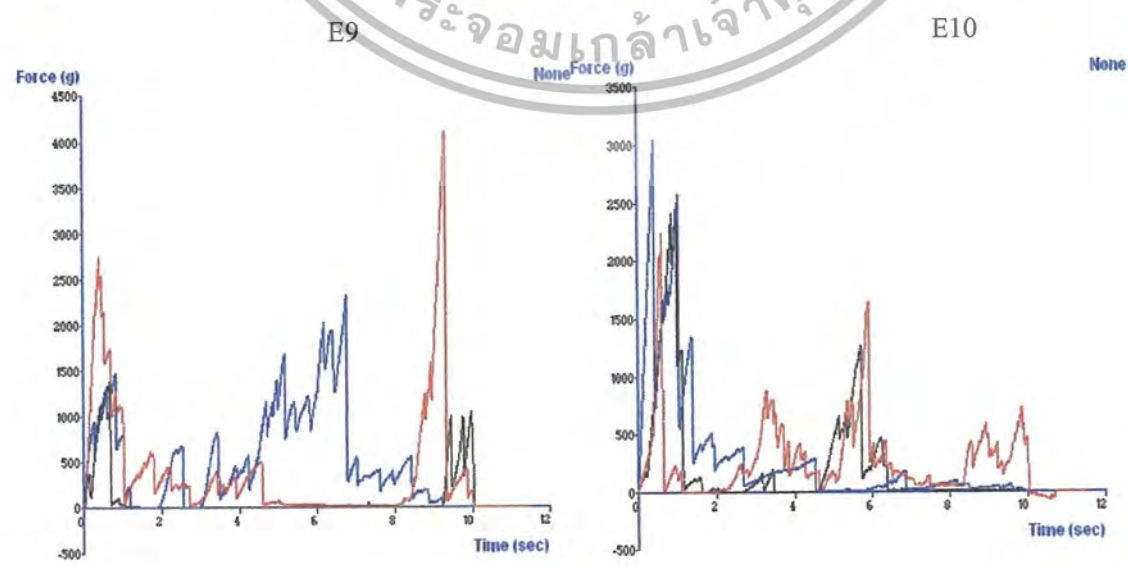
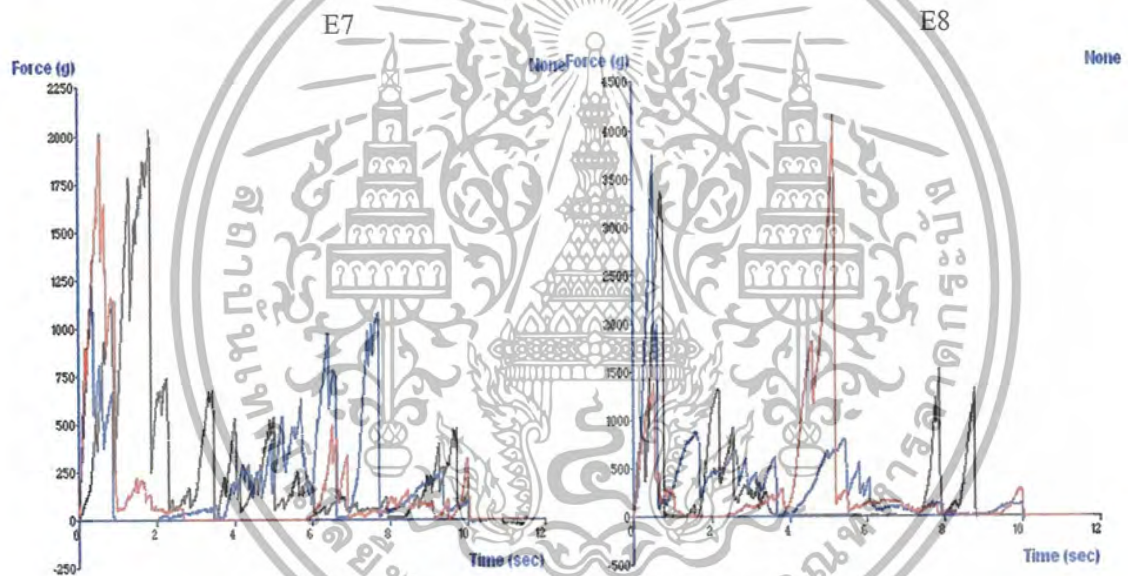
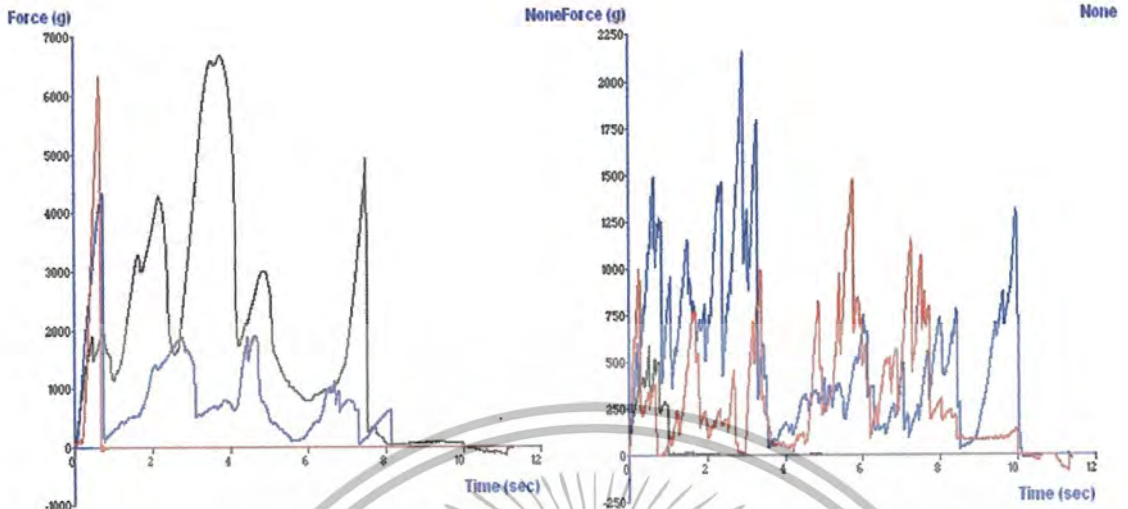
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.2 ค่าแรงแตกหักของเอกซ์ทรูเดต โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer หัวกดแบบ Probe P/2 2

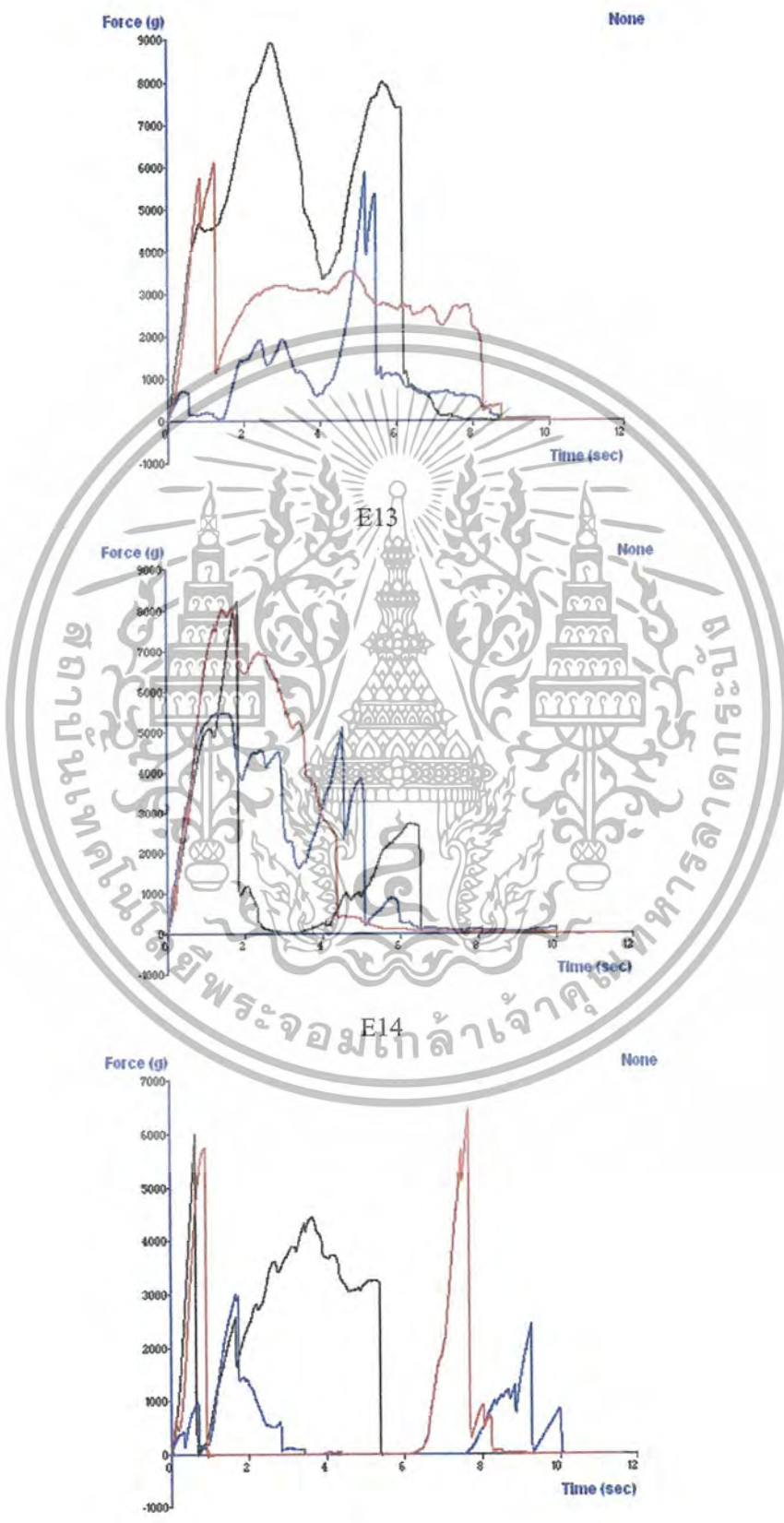
mm.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



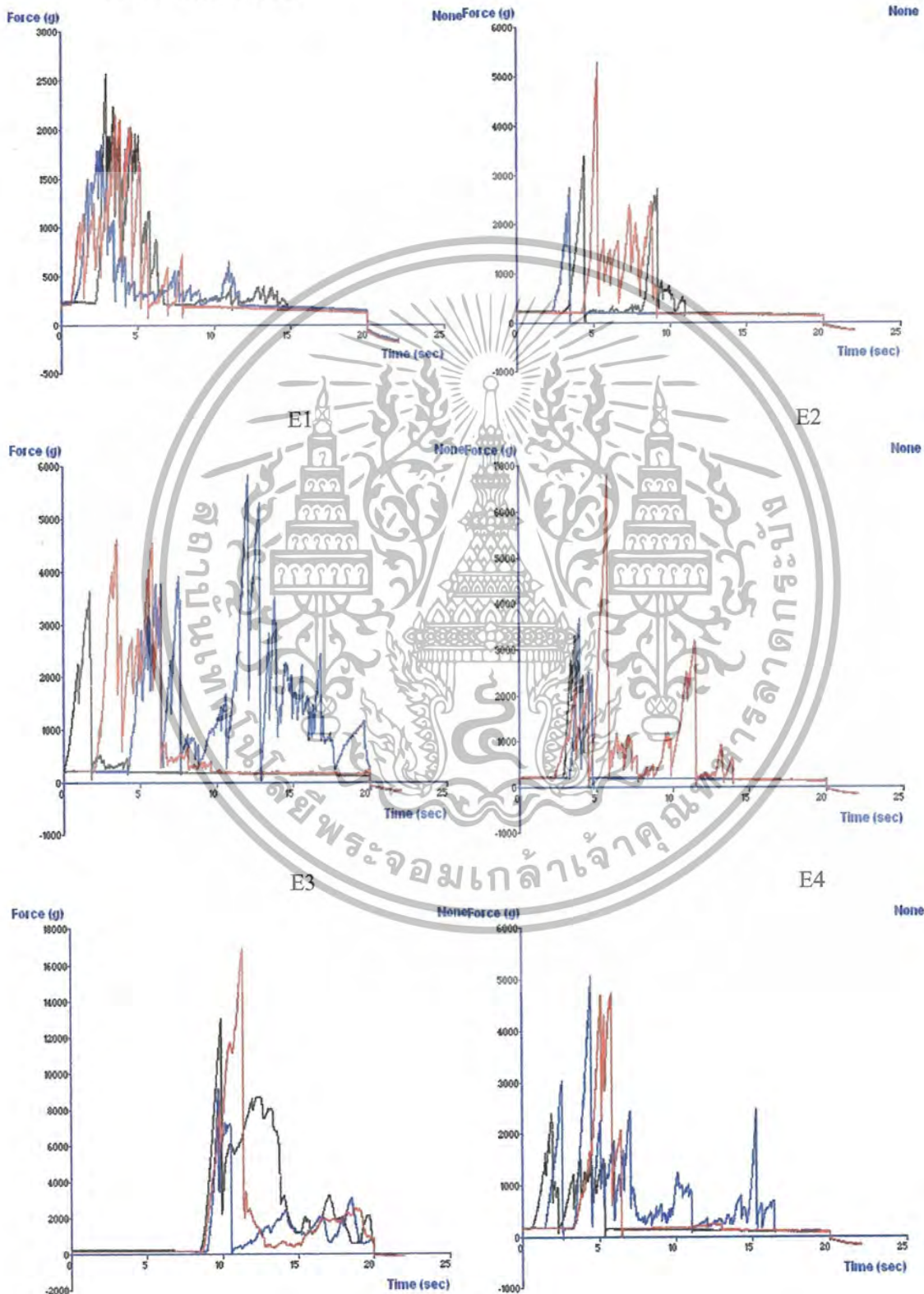
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



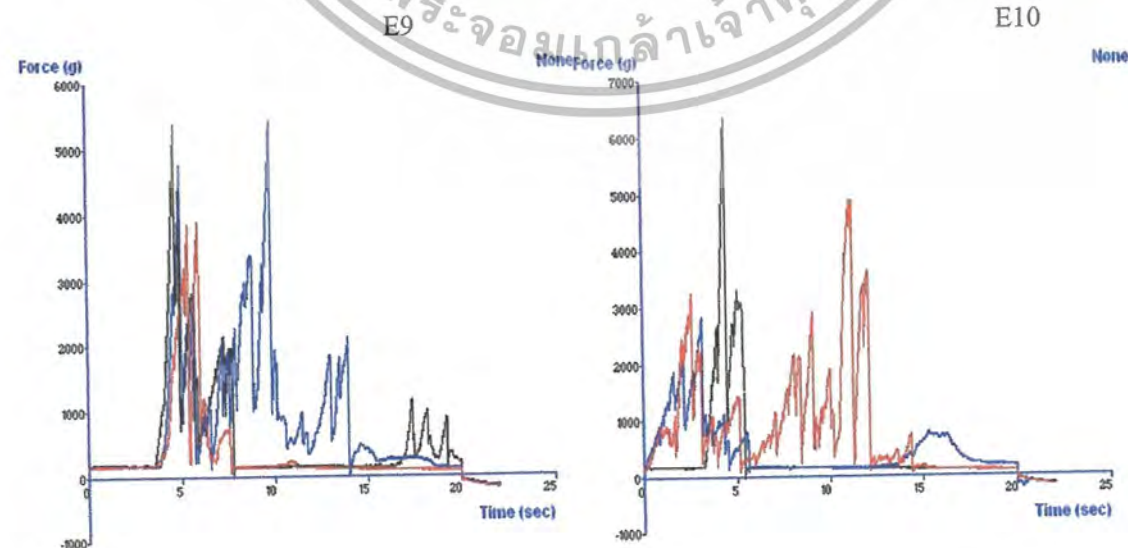
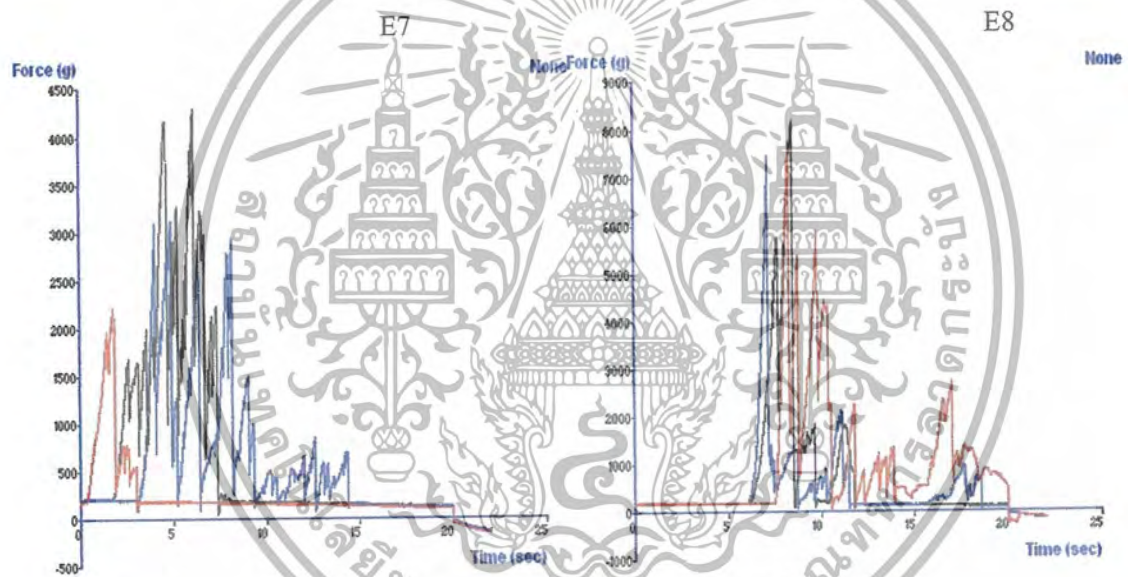
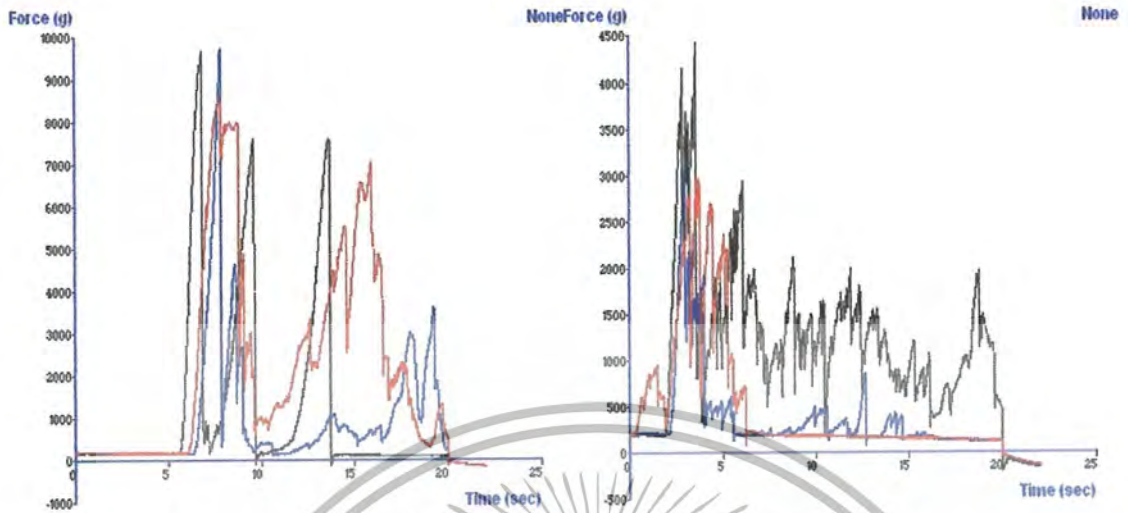
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ๓.3 ค่าแรงแตกหักของเอกซ์ทรูเดต โดยใช้เครื่อง Texture Analyzer หัวกดแบบ

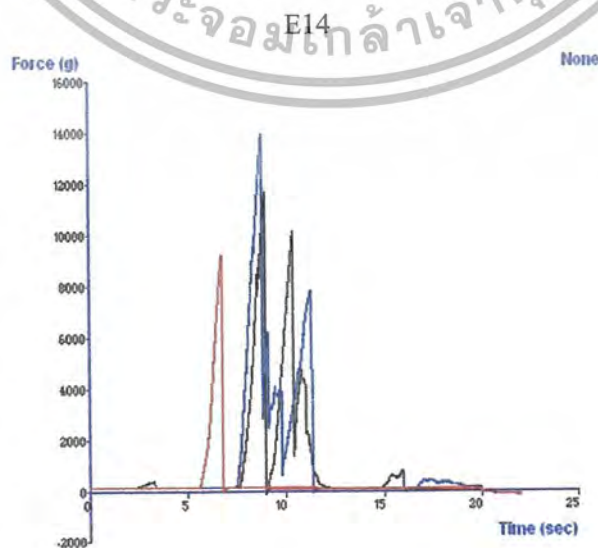
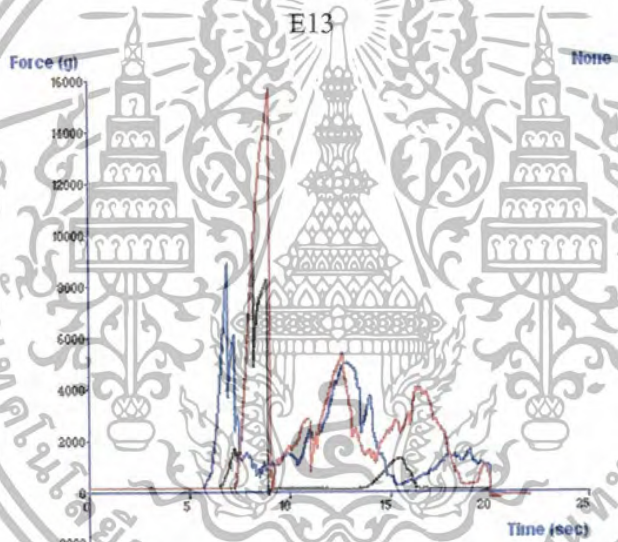
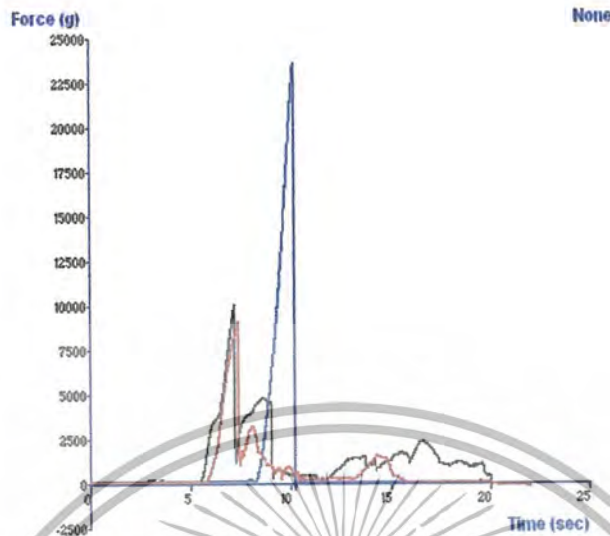
Warner Blatzler Blade



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ E11 งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป E12
 ใช้อะไรก็ได้ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 อัตราส่วนการขยายตัวของเอกซ์ทรูเดต

รหัส	ครั้งที่ (mm)					ค่าเฉลี่ย (mm)	ER
	1	2	3	4	5		
E1	11.80	11.45	12.80	13.05	12.10	12.24	4.080
E2	10.20	10.90	10.55	10.65	11.55	10.77	3.590
E3	12.10	11.35	10.05	11.50	10.85	11.17	3.723
E4	12.10	11.40	10.55	11.30	11.05	11.28	3.760
E5	7.45	7.45	7.25	6.75	7.50	7.28	2.427
E6	10.90	11.80	10.90	10.55	10.90	11.01	3.670
E7	9.40	9.10	9.25	9.15	8.80	9.14	3.047
E8	12.90	12.45	12.70	12.20	13.05	12.66	4.220
E9	11.35	11.80	12.00	11.20	11.55	11.58	3.860
E10	9.55	9.10	9.05	8.80	9.40	9.18	3.060
E11	11.45	10.90	11.35	11.30	10.95	11.19	3.730
E12	11.10	12.45	11.95	12.30	11.80	11.92	3.973
E13	8.45	8.90	8.95	8.90	8.95	8.83	2.943
E14	12.00	13.55	12.30	13.10	13.10	12.81	4.270
E15	8.50	9.50	9.70	9.10	9.90	9.34	3.113

หมายเหตุ รูหน้าแปลนมีขนาด 3 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.12 ค่าสีของเอกซ์ทราแคต

รหัส	L	a	b	L*	a*	b*
E1	83.59	4.84	18.48	86.94	4.84	21.09
E2	91.96	-2.14	11.38	93.70	-2.11	11.88
E3	91.15	-1.53	13.00	93.05	-1.51	13.75
E4	91.70	-2.11	10.95	93.49	-2.08	11.41
E5	85.27	-2.47	8.05	88.31	-2.49	8.48
E6	92.46	-2.26	11.71	94.09	-2.22	12.22
E7	89.56	-2.58	10.17	91.78	-2.57	10.64
E8	89.00	-1.18	13.61	91.40	-1.17	14.58
E9	90.40	-2.12	12.53	92.45	-2.10	13.26
E10	91.51	-2.69	10.21	93.34	-2.65	10.60
E11	90.56	-2.44	11.52	92.58	-2.42	12.11
E12	89.02	-0.81	15.01	91.34	-0.80	16.25
E13	89.10	-2.36	9.57	91.41	-2.35	10.00
E14	89.48	-1.88	12.11	91.72	-1.86	12.83
E15	88.88	-2.25	9.67	91.23	-2.24	10.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ข้อมูลแสดงคำวิเคราะห์ทางสถิติของเอกซเรย์เตต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความขึ้นของเอกซ์ทรูคต (ผ่านการอบ)

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.987492405
R Square	0.97514125
Adjusted R Square	0.775329583
Standard Error	0.397456118
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	37.18072607	4.131192	26.15152284	3.001103186
Residual	6	0.947828196	0.157971		
Total	15	38.12855426			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	0.069666219	0.022560717	3.087944	0.021444123	0.014462094	0.12487	0.014462094	0.124870345
X Variable 2	-0.27234246	0.117646694	-2.314918	0.059864159	-0.560213755	0.015529	-0.560213755	0.015528845
X Variable 3	0.618469854	0.736467947	0.839778	0.433213552	-1.183603612	2.420543	-1.183603612	2.420543319
X Variable 4	-3.0659E-05	2.04355E-05	-1.500301	0.184205147	-8.06634E-05	1.93E-05	-8.06634E-05	1.93445E-05
X Variable 5	0.001405834	0.000482744	2.912172	0.02690417	0.000224601	0.002587	0.000224601	0.002587068
X Variable 6	0.017923691	0.029872186	0.600013	0.570448341	-0.055170968	0.091018	-0.055170968	0.09101835
X Variable 7	-0.00017113	9.83442E-05	-1.740143	0.132484177	-0.000411773	6.95E-05	-0.000411773	6.95068E-05
X Variable 8	0.003184132	0.00439985	0.723691	0.496489134	-0.007581921	0.01395	-0.007581921	0.013950185
X Variable 9	-0.00258834	0.000960206	-2.695614	0.035784211	-0.004937885	-0.000239	-0.004937885	-0.0002388

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
MC	0.069666219	-0.272342455	0.61847	-3.06594E-05	0.001405834	0.017924	-0.000171133	0.003184132	-0.002588

ตารางที่ ง.2 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความชื้นของเอกซ์ทรูคิต

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.986631274
R Square	0.97344127
Adjusted R Square	0.771362963
Standard Error	0.337429624
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	25.03918083	2.782131	24.43493513	0.001297799
Residual	6	0.683152508	0.113859		
Total	15	25.72233333			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	-0.0046172	0.019153446	-0.241064	0.817532029	-0.051484031	0.04225	-0.051484031	0.042249623
X Variable 2	-0.05111356	0.0998789	-0.511755	0.627105537	-0.2955086	0.193281	-0.2955086	0.193281484
X Variable 3	0.804411058	0.625241608	1.28656	0.245655807	-0.725501163	2.334323	-0.725501163	2.334323278
X Variable 4	-1.5272E-05	1.73492E-05	-0.88027	0.412579124	-5.7724E-05	2.72E-05	-5.7724E-05	2.718E-05
X Variable 5	0.000234198	0.000409837	0.571441	0.588450608	-0.000768638	0.001237	-0.000768638	0.001237033
X Variable 6	-0.00677731	0.025360687	-0.267237	0.798235162	-0.068832719	0.055278	-0.068832719	0.055278106
X Variable 7	-2.2258E-05	8.34916E-05	-0.266595	0.798706384	-0.000226555	0.000182	-0.000226555	0.000182038
X Variable 8	0.000986985	0.003735355	0.264228	0.800445979	-0.008153107	0.010127	-0.008153107	0.010127076
X Variable 9	0.000599348	0.000815189	0.735226	0.489931244	-0.001395349	0.002594	-0.001395349	0.002594045

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
MC	-0.0046172	-0.051113558	0.804411	-1.5272E-05	0.000234198	-0.006777	-2.22585E-05	0.000986985	0.000599

ตารางที่ ง.3 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่า True Density ของเอกซ์ทรูเกต

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.93420138
R Square	0.87273221
Adjusted R Square	0.53637516
Standard Error	8.05320634
Observations	15

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	2668.402979	296.4892	4.571632	0.05444824
Residual	6	389.1247943	64.85413		
Total	15	3057.527773			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	-0.79245834	0.457122429	-1.73358	0.133692	-1.910997446	0.326081	-1.910997446	0.326080768
X Variable 2	-3.68967778	2.383742653	-1.547851	0.172625	-9.522490191	2.143135	-9.522490191	2.143134634
X Variable 3	115.044826	14.92222177	7.709631	0.00025	78.53143812	151.5582	78.53143812	151.5582141
X Variable 4	-0.00074577	0.000414062	-1.801099	0.121767	-0.00175894	0.000267	-0.00175894	0.000267407
X Variable 5	0.01595854	0.009781303	1.631536	0.153898	-0.00797546	0.039893	-0.00797546	0.039892548
X Variable 6	-3.29318171	0.605266505	-5.440879	0.001601	-4.774216578	-1.812147	-4.774216578	-1.81214684
X Variable 7	0.00420494	0.001992638	2.110237	0.079347	-0.000670875	0.009081	-0.000670875	0.009080753
X Variable 8	-0.05830989	0.089149211	-0.654071	0.537314	-0.276450314	0.159831	-0.276450314	0.159830526
X Variable 9	0.03977885	0.019455568	2.0446	0.086889	-0.007827243	0.087385	-0.007827243	0.087384947

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
TD	-0.79245834	-3.689677778	115.0448	-0.000746	0.015958544	-3.293182	0.004204939	-0.05830989	0.039779

ตารางที่ ง.4 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่า Bulk Density ของเอกซ์ทรูคิต

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.99223507
R Square	0.98453042
Adjusted R Square	0.79723766
Standard Error	16.245752
Observations	15

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	100781.6917	11197.97	42.42868	0.000342432
Residual	6	1583.546747	263.9245		
Total	15	102365.2384			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	3.65187122	0.922154145	3.960153	0.00745	1.395439661	5.908303	1.39543966	5.908302774
X Variable 2	-10.5291308	4.808729629	-2.189587	0.071115	-22.29567694	1.237415	-22.2956769	1.23741531
X Variable 3	9.0094404	30.10263289	0.299291	0.774815	-64.64910264	82.66798	-64.6491026	82.66798344
X Variable 4	0.00203847	0.000835288	2.440444	0.050441	-5.40422E-06	0.004082	-5.4042E-06	0.00408235
X Variable 5	0.04899377	0.019731846	2.482979	0.047613	0.000711646	0.097276	0.00071165	0.097275891
X Variable 6	2.47891087	1.221005537	2.030221	0.088637	-0.508784234	5.466606	-0.50878423	5.466605971
X Variable 7	-0.00687999	0.004019754	-1.711545	0.137825	-0.01671598	0.002956	-0.01671598	0.002956003
X Variable 8	0.19344591	0.179840912	1.07565	0.323423	-0.246609273	0.633501	-0.24660927	0.633501087
X Variable 9	-0.27337979	0.039247763	-6.965487	0.000435	-0.369415677	-0.177344	-0.36941568	-0.17734391

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
BD	3.65187122	-10.52913081	9.00944	0.002038	0.048993768	2.478911	-0.00687999	0.193445907	-0.27338

ตารางที่ ง.5 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่า Piece Density ของเอกซ์ทรุเดค

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.854315471
R Square	0.729854924
Adjusted R Square	0.202994822
Standard Error	1369.00423
Observations	15

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	30380877.69	3375653	1.801143	0.267872701
Residual	6	11245035.5	1874173		
Total	15	41625913.18			

	<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	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	65.22485745	77.7084943	0.839353	0.433434	-124.9211172	255.3708	-124.921117	255.370832
X Variable 2	-856.831267	405.2241601	-2.114462	0.078885	-1848.379791	134.7173	-1848.37979	134.717258
X Variable 3	3190.628037	2536.702013	1.257786	0.255205	-3016.462719	9397.719	-3016.46272	9397.71879
X Variable 4	-0.02769103	0.070388408	-0.393403	0.70762	-0.199925388	0.144543	-0.19992539	0.14454333
X Variable 5	2.939047475	1.662771934	1.767559	0.127554	-1.129611851	7.007707	-1.12961185	7.0077068
X Variable 6	-128.766527	102.8922358	-1.25147	0.257344	-380.5349429	123.0019	-380.534943	123.001888
X Variable 7	-0.32962812	0.338738428	-0.973105	0.368082	-1.158491805	0.499236	-1.1584918	0.49923555
X Variable 8	22.87167939	15.15491367	1.509192	0.181986	-14.21108558	59.95444	-14.2110856	59.9544444
X Variable 9	-1.2621669	3.307347871	-0.381625	0.715889	-9.354961519	6.830628	-9.35496152	6.83062772

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
PD	65.22485745	-856.8312665	3190.628	-0.027691	2.939047475	-128.7665	-0.32962812	22.8716794	-1.262167

ตารางที่ ง.6 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดสูงสุดของเอ็กซ์ทรูเดต

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.957328159
R Square	0.916477204
Adjusted R Square	0.63844681
Standard Error	48.95720783
Observations	15

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	9	157797.8841	17533.1	7.315186	0.020593693
Residual	6	14380.84919	2396.808		
Total	15	172178.7333			

	<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	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	-11.2389731	2.778947516	-4.044327	0.006769	-18.03881767	-4.439129	-18.0388177	-4.43912851
X Variable 2	57.07635043	14.49129446	3.938665	0.007636	21.61740434	92.5353	21.61740434	92.5352965
X Variable 3	-69.0980949	90.71545937	-0.761701	0.475103	-291.0709899	152.8748	-291.07099	152.8748
X Variable 4	-0.00349255	0.002517173	-1.38749	0.214629	-0.009651857	0.002667	-0.00965186	0.00266675
X Variable 5	-0.26414463	0.059462688	-4.442191	0.004366	-0.409644688	-0.118645	-0.40964469	-0.11864456
X Variable 6	-4.83346301	3.679547851	-1.313602	0.236972	-13.83699884	4.170073	-13.8369988	4.17007281
X Variable 7	-0.01094101	0.012113686	-0.903194	0.401228	-0.040582154	0.0187	-0.04058215	0.01870013
X Variable 8	-0.09366313	0.541957608	-0.172824	0.868473	-1.419786591	1.23246	-1.41978659	1.23246034
X Variable 9	0.799811817	0.118274665	6.762326	0.00051	0.510403925	1.08922	0.510403925	1.08921971

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
PD	-11.2389731	57.07635043	-69.09809	-0.003493	-0.264144626	-4.833463	-0.01094101	-0.09366313	0.799812

ตารางที่ ๗.7 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความหนืดสุดท้ายของเอกซ์ทรูเดต

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.890747779
R Square	0.793431606
Adjusted R Square	0.351340413
Standard Error	17.07686996
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	6720.683074	746.7426	2.560674424	0.156477398
Residual	6	1749.716926	291.6195		
Total	15	8470.4			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	-1.01383602	0.969330717	-1.045913	0.335895413	-3.385704575	1.358033	-3.38570457	1.35803253
X Variable 2	3.552225261	5.054739886	0.702751	0.508544956	-8.816286715	15.92074	-8.81628672	15.9207372
X Variable 3	4.987366299	31.64265635	0.157615	0.879930486	-72.43948115	82.41421	-72.4394811	82.4142137
X Variable 4	-9.8768E-05	0.00087802	-0.11249	0.914104075	-0.002247209	0.00205	-0.00224721	0.00204967
X Variable 5	-0.02298981	0.020741309	-1.108407	0.31012825	-0.073742	0.027762	-0.073742	0.02776239
X Variable 6	-0.43529829	1.283471075	-0.339157	0.746046975	-3.575841171	2.705245	-3.57584117	2.70524459
X Variable 7	-0.00047424	0.004225401	-0.112236	0.914296736	-0.010813436	0.009865	-0.01081344	0.00986495
X Variable 8	0.037895882	0.18904141	0.200463	0.847740454	-0.424672123	0.500464	-0.42467212	0.50046389
X Variable 9	0.05246361	0.041255643	1.271671	0.250556661	-0.048485385	0.153413	-0.04848538	0.15341261

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
PD	-1.01383602	3.552225261	4.987366	-9.87685E-05	-0.022989807	-0.435298	-0.00047424	0.03789588	0.052464

ตารางที่ ๖.8 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความสามารถในการดูดซับน้ำของเอกซ์ทราคต

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.74257745
R Square	0.55142128
Adjusted R Square	-0.21335036
Standard Error	0.93912763
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	6.504970492	0.722774	0.819508737	0.626192196
Residual	6	5.291764197	0.881961		
Total	15	11.79673469			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	-0.03094248	0.053307501	-0.58045	0.582736962	-0.161381328	0.0994964	-0.16138133	0.099496372
X Variable 2	0.12057333	0.277981028	0.433747	0.679633972	-0.559622242	0.8007689	-0.55962224	0.800768898
X Variable 3	0.91250142	1.740160394	0.524378	0.618815628	-3.34552079	5.1705236	-3.34552079	5.17052362
X Variable 4	-3.2964E-05	4.8286E-05	-0.68269	0.520276162	-0.000151116	8.519E-05	-0.00015112	8.51873E-05
X Variable 5	-0.00128324	0.00114065	-1.12501	0.303565575	-0.004074315	0.0015078	-0.00407432	0.00150783
X Variable 6	-0.07494316	0.070583377	-1.06177	0.329197515	-0.247654585	0.0977683	-0.24765459	0.097768269
X Variable 7	3.663E-05	0.000232372	0.157635	0.879915664	-0.000531965	0.0006052	-0.00053196	0.000605225
X Variable 8	0.0068052	0.010396168	0.654587	0.537003179	-0.018633325	0.0322437	-0.01863333	0.032243726
X Variable 9	0.00258594	0.002268818	1.139774	0.297828058	-0.002965663	0.0081375	-0.00296566	0.008137542

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
WAI	-0.03094248	0.120573328	0.912501	-3.29643E-05	-0.001283243	-0.0749432	3.663E-05	0.006805201	0.002586

ตารางที่ ๙.๑ ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของความสามารถในการละลายน้ำของเอกซ์ทรูคิต

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.652726206
R Square	0.4260515
Adjusted R Square	-0.505879834
Standard Error	9.495714757
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	401.6018862	44.62243	0.494877734	0.830608578
Residual	6	541.0115924	90.1686		
Total	15	942.6134786			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	0.651572555	0.539003226	1.208847	0.272193312	-0.66732179	1.970467	-0.66732179	1.9704669
X Variable 2	-2.59320464	2.810723993	-0.922611	0.391800231	-9.47080352	4.284394	-9.47080352	4.284394235
X Variable 3	6.627629553	17.59512367	0.376674	0.719377164	-36.42611856	49.68138	-36.4261186	49.68137766
X Variable 4	-4.8559E-05	0.000488229	-0.09946	0.924012909	-0.001243215	0.001146	-0.00124321	0.001146096
X Variable 5	0.016716603	0.011533352	1.449414	0.197399026	-0.011504514	0.044938	-0.01150451	0.04493772
X Variable 6	0.248210442	0.713683202	0.347788	0.739875571	-1.498110719	1.994532	-1.49811072	1.994531603
X Variable 7	0.000172544	0.002349564	0.073436	0.943845837	-0.005576637	0.005922	-0.00557664	0.005921725
X Variable 8	-0.04513185	0.105117818	-0.429345	0.68266117	-0.302346068	0.212082	-0.30234607	0.212082377
X Variable 9	-0.03533354	0.022940493	-1.540226	0.174434772	-0.091466946	0.0208	-0.09146695	0.020799864

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
WSI	0.651572555	-2.593204642	6.62763	-4.85593E-05	0.016716603	0.24821	0.000172544	-0.04513185	-0.035334

ตารางที่ ง.10 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าแรงแตกหักเอกซ์ทรูเดต โดยใช้ห้วกดแบบ Probe

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.824153453
R Square	0.679228915
Adjusted R Square	0.084867467
Standard Error	2104.282457
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	56257479.58	6250831	1.411659	0.367958479
Residual	6	26568027.94	4428005		
Total	15	82825507.52			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	-25.6199021	119.444935	-0.214491	0.837268	-317.8913427	266.6515	-317.891343	266.651539
X Variable 2	-503.972452	622.8659284	-0.809119	0.449334	-2028.071589	1020.127	-2028.07159	1020.12668
X Variable 3	2643.192175	3899.138823	0.677891	0.523108	-6897.663796	12184.05	-6897.6638	12184.0481
X Variable 4	0.103270124	0.108193306	0.954496	0.376689	-0.161469551	0.36801	-0.16146955	0.3680098
X Variable 5	2.829299467	2.5558298	1.106998	0.31069	-3.424595335	9.083194	-3.42459534	9.08319427
X Variable 6	11.79730879	158.1546075	0.074594	0.942963	-375.1933577	398.788	-375.193358	398.787975
X Variable 7	0.423027295	0.520671387	0.812465	0.447553	-0.851010624	1.697065	-0.85101062	1.69706521
X Variable 8	-7.58382417	23.29446342	-0.325563	0.755809	-64.58336446	49.41572	-64.5833645	49.4157161
X Variable 9	-5.02034619	5.083690721	-0.98754	0.361513	-17.45969836	7.419006	-17.4596984	7.41900598

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
PD	-25.6199021	-503.972452	2643.192	0.10327	2.829299467	11.79731	0.423027295	-7.58382417	-5.020346

ตารางที่ ง.11 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของค่าแรงแตกหักเอกซ์ทรูเคต โดยใช้หัวกดแบบ Blade

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.945148819
R Square	0.89330629
Adjusted R Square	0.584381344
Standard Error	1600.207381
Observations	15

ANOVA

	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	128636840.7	14292982	5.581749	0.036407902
Residual	6	15363981.98	2560664		
Total	15	144000822.7			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	38.60578099	90.8322293	0.425023	0.68564	-183.6528399	260.8644	-183.65284	260.864402
X Variable 2	-1116.60653	473.6601083	-2.3574	0.056484	-2275.61191	42.39885	-2275.61191	42.3988498
X Variable 3	4776.063398	2965.110841	1.610754	0.158359	-2479.306765	12031.43	-2479.30676	12031.4336
X Variable 4	0.0693352	0.082275897	0.842716	0.431692	-0.131986814	0.270657	-0.13198681	0.27065721
X Variable 5	5.261083062	1.943587801	2.706892	0.035251	0.50529156	10.01687	0.50529156	10.0168746
X Variable 6	-24.8339648	120.2691063	-0.206487	0.84324	-319.1220815	269.4542	-319.122081	269.454152
X Variable 7	0.485227375	0.395945988	1.225489	0.266309	-0.483618264	1.454073	-0.48361826	1.45407301
X Variable 8	-1.2392439	17.71433877	-0.069957	0.946501	-44.58470107	42.10621	-44.5847011	42.1062133
X Variable 9	-8.22613225	3.86590659	-2.127866	0.077437	-17.68567182	1.233407	-17.6856718	1.23340732

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
PD	38.60578099	-1116.60653	4776.063	0.069335	5.261083062	-24.83396	0.485227375	-1.2392439	-8.226132

ตารางที่ ง.12 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราส่วนการขยายตัวของเอกซ์ทราเดต

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.983058331
R Square	0.966403681
Adjusted R Square	0.754941923
Standard Error	0.148850953
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	3.824030733	0.424892	19.17677724	0.002307682
Residual	6	0.132939638	0.022157		
Total	15	3.95697037			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
		#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
X Variable 1	-0.01163019	0.008449195	-1.376485	0.217831645	-0.032304641	0.009044	-0.032304641	0.00904426
X Variable 2	-0.00402419	0.044059763	-0.091335	0.930199479	-0.11183463	0.103786	-0.11183463	0.10378624
X Variable 3	0.806020438	0.275813985	2.922333	0.026550547	0.131127435	1.480913	0.131127435	1.48091344
X Variable 4	-1.1218E-05	7.65329E-06	-1.465725	0.193077281	-2.99445E-05	7.51E-06	-2.99445E-05	7.5093E-06
X Variable 5	-9.3155E-05	0.000180792	-0.51526	0.624797817	-0.000535538	0.000349	-0.000535538	0.00034923
X Variable 6	-0.03950957	0.011187407	-3.531611	0.012343615	-0.066884186	-0.012135	-0.066884186	-0.01213495
X Variable 7	4.27698E-05	3.68308E-05	1.16125	0.289645953	-4.7352E-05	0.000133	-4.7352E-05	0.00013289
X Variable 8	0.000585981	0.001647784	0.355617	0.734295538	-0.003446005	0.004618	-0.003446005	0.00461797
X Variable 9	0.001021523	0.000359606	2.840674	0.029540823	0.000141598	0.001901	0.000141598	0.00190145

Model Y	RPM a1	Temp a2	MC a3	X1^2 a11	X2^2 a12	X3^2 a12	X1X2 a21	X2X3 a22	X1X3 a23
PD	-0.01163019	-0.004024194	0.80602	-1.12176E-05	-9.31549E-05	-0.03951	4.27698E-05	0.00058598	0.001022

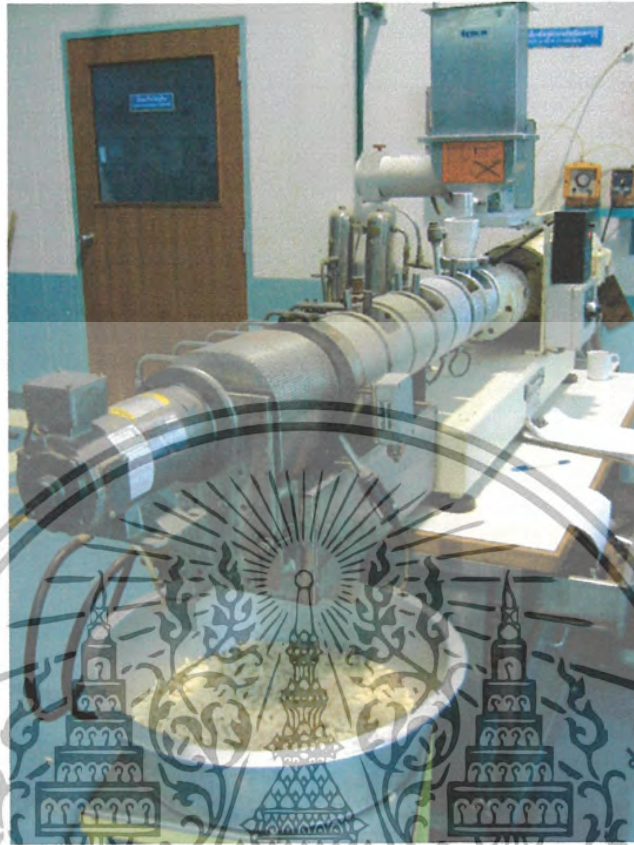
ภาคผนวก จ

รูปเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์

- เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์
- เครื่อง Centifuge
- เครื่อง Rapid Visco Analyzer
- เครื่อง Texture Analyzer และหั่วกด
- ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวในท้องตลาด
- ผลิตภัณฑ์อาหารเซ้าประเภทซีเรียลในท้องตลาด
- เอกซ์ทรูเดต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.1 เครื่องเอกซทรูเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ จ.2 เครื่อง Centrifuge ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.3 เครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ๑.4 เครื่อง Texture Analyzer หัวกดแบบ Probe P/2 ขนาด 2mm. ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.5 เครื่อง Texture Analyzer หัวกดแบบ Warner Blatzler Blade ที่ใช้ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.6 S1 ขนมอบกรอบ รสปลาหมึก
ตราคาราตัก



รูปที่ จ.7 S2 ข้าวอบกรอบ รสสาหร่ายกุ้ง
ตราบิ๊กก้า เทมากิ



รูปที่ จ.8 S3 ข้าวกรอบ รสสาหร่าย ตราทวิสตี



รูปที่ จ.9 S4 ขนมอบกรอบ รสสาหร่ายเซซามิ
ตราคาราค้านักเกต



รูปที่ จ.10 S5 ข้าวเกรียบ รสกุ้งเผา ตราปังปัง



รูปที่ จ.11 S6 ขนมอบกรอบ รสบาร์บีคิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.12 S7 ธัญพืช ข้าวหอมมะลิ ผสมข้าวโพดและ โสม ตรานิวฮอร์



รูปที่ จ.13 C1 ข้าวพองอบกรอบ ตราเคลดีอาก์
ไรซ์ คริสปี้ส์



รูปที่ จ.14 C2 อาหารเช้าซีเรียลรสตรอบเบอร์
ตราโคเน่

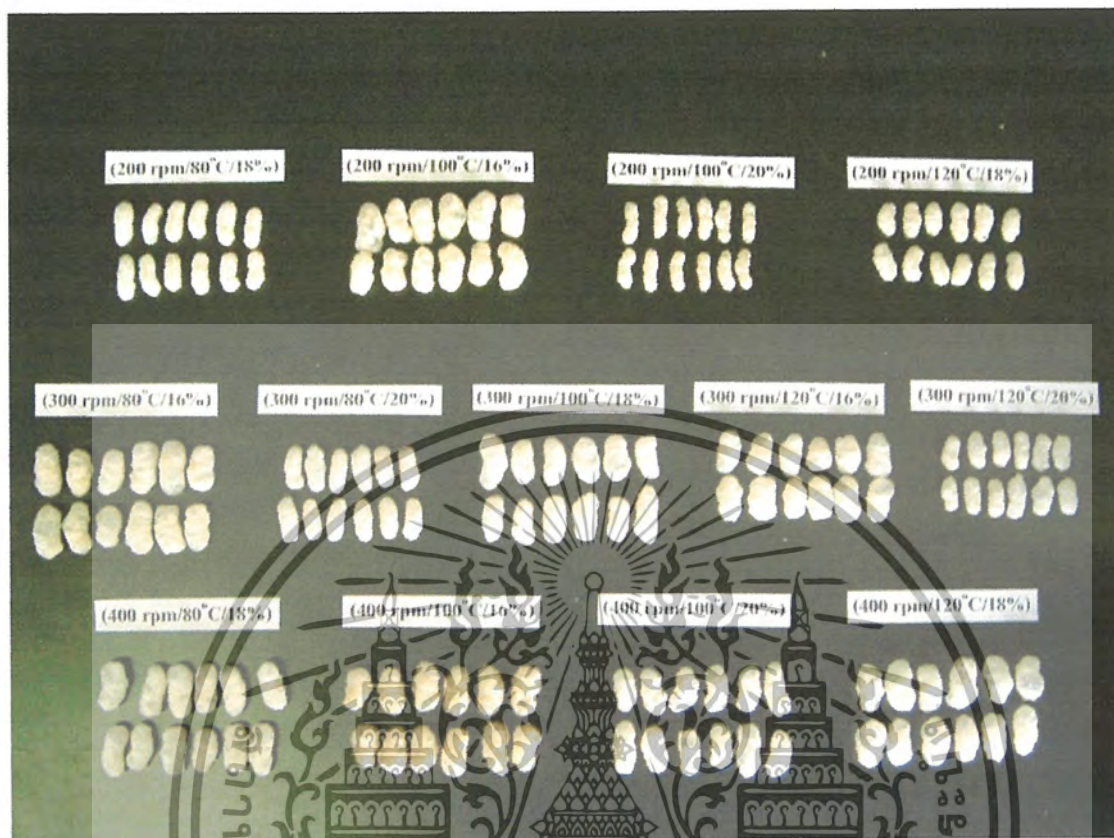


รูปที่ จ.15 C3 ข้าวสาลีผสมข้าวเจ้าอบกรอบ
ตราเนสฟิต



รูปที่ จ.16 C4 ข้าวและข้าวสาลีอบกรอบ
ตราเคลดีอาก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.17 ตัวอย่างเอกซทรูคตที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้