

ผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากข้าวโดยใช้  
เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดียว

EFFECT OF PROCESSING VARIABLES ON RICE EXTRUDATE  
CHARACTERISTICS USING A SINGLE SCREW EXTRUDER

สันติ หิรัญอร  
SANTI HIRANON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-220-400

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**ผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากข้าวโดยใช้  
เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว**

**EFFECT OF PROCESSING VARIABLES ON RICE EXTRUDATE  
CHARACTERISTICS USING A SINGLE SCREW EXTRUDER**

**สันติ หิรัญอร**

**SANTI HIRANON**

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....**87061**

วัน,เดือน,ปี.....**3.0.ค.ค. 2552**

**วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต**

**สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี**

**บัณฑิตวิทยาลัย**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**พ.ศ.2551**

**KMITL-2008-EN-M-220-400**

**EFFECT OF PROCESSING VARIABLES ON RICE EXTRUDATE  
CHARACTERISTICS USING A SINGLE SCREW EXTRUDER**

**SANTI HIRANON**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2008**

**KMITL-2008-EN-M-220-400**

**COPYRIGHT 2008**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากข้าวโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว
นักศึกษา	นายสันติ หิรัญอร
รหัสประจำตัว	48060111
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันของข้าว (ปลายข้าวพันธุ์เหลืองประทิว) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยการผลิต ประกอบด้วย ความชื้นของวัตถุดิบ (16-22%), ความเร็วรอบสกรู (400 - 600 rpm), ความเร็วรอบใบมีด (0 - 60 rpm) ต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้ ได้แก่ ความชื้น ความหนาแน่น อัตราส่วนการขยายตัว ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำและลักษณะเนื้อสัมผัส อาศัยแผนการทดลองแบบ Box-Behnken ผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายผลของปัจจัยที่ศึกษา โดยใช้สมการ โพลีโนเมียล อันดับที่ 2 ค่าสหสัมพันธ์ของสมการที่ได้อยู่ในเกณฑ์ดี จากความสัมพันธ์ที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตเพื่อให้ได้คุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทตามต้องการ

<b>Thesis</b>	Effect of processing variables on rice extrudate characteristics using a single screw extruder
<b>Student</b>	Mr. Santi Hiranon
<b>Student ID.</b>	48060111
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2008
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Maradee Phongpipatpong

### **ABSTRACT**

The effect of extrusion conditions on extrudate characteristics from rice (Leung-pa tel varieties) including feed moisture content (16-22%), screw speed (400-600 rpm) and cutter speed (0-60 rpm) on the physicochemical properties of the extrudates was investigated. The extrudate properties consisted of moisture content, bulk density, expansion ratio, water absorption index, water solubility index, and product texture. Box-Behnken design was used to set up the experiment. The second order polynomial models were used to describe the relation between the processing parameters and extrudate characteristics. The coefficients of determination of models were correlated well and can be used to predict the performance of cooking extrusion process.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จได้ เนื่องด้วยอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. มาฤดี ผ่องพิพัฒน์พงศ์ ที่ให้คำชี้แนะ ตลอดทั้งให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ผู้วิจัย

ขอบคุณ เจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่ให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการแก้ไขปัญหา อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

สันติ หิรัญอร

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเอ็กซ์ทรูเดอร์.....	3
2.1.1 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์.....	3
2.1.2 ข้อดีของเอ็กซ์ทรูเดอร์.....	6
2.1.3 ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน.....	7
2.1.4 การลดขนาด.....	8
2.2 ข้าวหอมมะลิและปลายข้าว.....	9
2.3 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....	10
2.4 คุณลักษณะของแป้งข้าว.....	11
2.4.1 การเกิดรีโทรกราเดชัน.....	11
2.4.2 เจลาติไนซ์เซชัน.....	11
2.4.3 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลายของแป้ง.....	12
2.4.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัส.....	12
2.5 ภาชนะบรรจุสำหรับผลิตภัณฑ์จากข้าว.....	12
2.5.1 หน้าที่หลักของภาชนะบรรจุ.....	12

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวพองกรอบ.....	13
2.6 ระดับนัยสำคัญทางสถิติและระดับความเชื่อมั่น.....	14
2.6.1 การทดสอบความมีนัยสำคัญ.....	15
2.6 ระดับนัยสำคัญทางสถิติและระดับความเชื่อมั่น.....	15
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	17
3.1 วัสดุ อุปกรณ์.....	17
3.2 การกำหนดตัวแปร.....	17
3.3 การวางแผนการทดลอง.....	18
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	20
3.4.1 การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบ.....	20
3.4.2 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน.....	20
3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบและเอ็กซ์ทรูเดท.....	21
3.5.1 การหาขนาดอนุภาค.....	21
3.5.2 ความชื้นของผลิตภัณฑ์.....	21
3.5.3 ความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์.....	22
3.5.4 ความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในการละลายน้ำ.....	22
3.5.5 แรงแตกหักสูงสุด.....	23
3.5.6 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์.....	23
3.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	25
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปลายข้าว.....	25
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	25
4.2.1 ความชื้นของผลิตภัณฑ์.....	25
4.2.2 ความหนาแน่นรวม.....	28
4.2.3 ความสามารถในการดูดซับน้ำ.....	29
4.2.4 ความสามารถในการละลายน้ำ.....	31

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.5 ค่าความแข็ง.....	32
4.2.6 อัตราส่วนการขยายตัว.....	34
4.2.7 ความกรอบ.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	38
เอกสารอ้างอิง.....	39
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	43
ภาคผนวก ข.....	45
ภาคผนวก ค.....	55
ภาคผนวก ง.....	63
ภาคผนวก จ.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	71

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ระดับตัวแปร Box-Behnken Design.....	19
3.2 แผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design.....	19
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท.....	26

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่.....	6
4.1 เปรียบเทียบค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.1.....	28
4.2 ผลของค่าความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรู ต่อความชื้น ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท.....	28
4.3 เปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.2.....	29
4.4 ผลของความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบใบมีด ต่อความหนาแน่นรวม ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท.....	30
4.5 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.3.....	31
4.6 ผลของความเร็วรอบสกรู ความชื้นของวัตถุดิบ ต่อความสามารถในการดูดซับน้ำ ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท.....	31
4.7 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.4.....	32
4.8 ผลของความเร็วรอบสกรู ความชื้นของวัตถุดิบ ต่อความสามารถในการละลายน้ำ ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท.....	33
4.9 เปรียบเทียบค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้ จากการทำนายในสมการที่ 4.5.....	34
4.10 ผลของความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรูต่อความแข็ง ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท.....	35
4.11 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้ จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.6.....	36
4.12 ผลของความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรูต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัว ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท.....	37
4.13 เปรียบเทียบค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.7.....	38
4.14 ผลของความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรูต่อความกรอบ ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท.....	38

## รายการสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่หน้าตัดบาร์เรล, ( $m^2$ )
$C_{pif}$	ค่าความจุความร้อนของวัสดุคิบที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ, (J/kg K)
$C_{pof}$	ค่าความจุความร้อนของวัสดุคิบที่ออกจากกระบวนการ, (J/kg K)
$C_{pw}$	ความจุความร้อนของน้ำ, (J/kg K)
$E_z$	อัตราการป้อนพลังงานให้กับมอเตอร์, (W)
$k_b$	ค่าการนำความร้อนบาร์เรล เท่ากับ 40 W/m K
$m$	น้ำหนักเอ็กซ์ทรูเดท
$m_f$	อัตราการป้อนวัสดุคิบ (kg/s)
$m_w$	อัตราการไหล Cooling water (kg/s)
$N$	ความเร็วรอบสกรู, (rpm)
$N_m$	ความเร็วสูงสุดมอเตอร์, (rpm)
$P$	ขนาดมอเตอร์ต้นกำลัง, kw
$Q_a$	ปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากระบบสู่สิ่งแวดล้อม
$Q_f$	อัตราการถ่ายเทความร้อนของวัสดุคิบ
$Q_h$	อัตราการถ่ายเทความร้อนจาก Heater
$Q_l$	อัตราการระเหยของอาหาร
$Q_r$	อัตราการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี, (kJ/kg)
$Q_w$	อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนจาก Cooling water
$T_z$	อุณหภูมิบาร์เรล, ( $^{\circ}C$ )
$T_{if}$	อุณหภูมิทางเข้าวัสดุคิบ, ( $^{\circ}C$ )
$T_{iw}$	อุณหภูมิทางเข้า Cooling water, ( $^{\circ}C$ )
$T_{of}$	อุณหภูมิทางออกวัสดุคิบ, ( $^{\circ}C$ )
$T_{ow}$	อุณหภูมิทางออก Cooling water, ( $^{\circ}C$ )
$\Delta z_1$	ระยะระหว่าง Zone Z และ Zone (Z+1), (m)
$\Delta z_2$	ระยะระหว่าง Zone Z และ Zone (Z-1), (m)
$\tau$	% torque

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกข้าว แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ข้าวคุณภาพสูง ข้าวคุณภาพปานกลางและข้าวคุณภาพต่ำ จากข้อมูลปริมาณการส่งออก พบว่า ไทยส่งออกได้เป็นอันดับ 1 ของโลก ในปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งออกข้าวปริมาณมาก แต่การส่งออกผลิตภัณฑ์จากข้าวมีเพียงเล็กน้อยประมาณ 117,117 ตัน คิดเป็น 1.8 % ของปริมาณส่งออกข้าวเป็นหลักและนำรายได้เข้าประเทศ 2,630 ล้านบาทหรือคิดเป็น 3.0 % ของมูลค่าข้าวส่งออก (ส่งออกข้าวรวมมีมูลค่า 86,805 ล้านบาท) อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนวณเป็นราคาต่อตัน พบว่า ผลิตภัณฑ์ข้าวมีราคาสูงกว่าข้าวอย่างเด่นชัด โดยมีราคา 22,460 บาท/ตัน ในขณะที่ราคาข้าวเท่ากับ 13,270 บาท/ตัน แม้ในกลุ่มข้าวคุณภาพดีก็ยังคงมีราคาต่ำกว่าราคาผลิตภัณฑ์จากข้าว [1] ดังนั้น หากสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ข้าวให้กว้างขวางยิ่งขึ้นย่อมเป็นการเพิ่มมูลค่าของข้าวให้สูงขึ้น โดยเฉพาะปลายข้าวซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสีข้าว ซึ่งจะได้ส่วนของปลายข้าว ประมาณ 15 % ปลายข้าวมีราคาถูกและให้พลังงานสูง ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์แปรรูปจากปลายข้าว หลายประเภทซึ่งอาศัยเทคนิคการผลิตหลายขั้นตอน เช่น ข้าวกึ่งสำเร็จรูปหรือข้าวปรุงรสต่างๆ แป้งข้าวเจ้าและข้าวเหนียว ขนมอบกรอบ เป็นต้น มูลค่าทางการตลาดของผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีมูลค่าที่สูงขึ้นและมีความต้องการทางการตลาดเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทขนมขบเคี้ยว ดังนั้น ทำให้ผู้ประกอบการต่างให้ความสนใจในการพัฒนาการผลิตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ รวมทั้งต้องการหาแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อให้สามารถแข่งขันได้ในเชิงการค้า

การนำเอ็กซ์ทรูเดอร์เข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต ถือเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการผลิตขนมขบเคี้ยวและอาหารเข้าจากรัฐพีช ซึ่งกำลังเป็นที่นิยมในปัจจุบัน การเข้าใจถึงปัจจัยต่างๆของกระบวนการผลิต เช่น ความเร็วรอบของสกรู ความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบใบมีดในการตัดผลิตภัณฑ์บริเวณหน้าแปลน เป็นต้น เหล่านี้ ล้วนส่งผลกระทบต่อคุณภาพสุดท้ายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ดังนั้น การศึกษาถึงปัจจัยพื้นฐานที่เกี่ยวข้องต่อการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่จากปลายข้าว ซึ่งเป็นผลพลอยได้ที่มีมูลค่าต่ำจากโรงสีข้าวโดยใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น ย่อมก่อให้เกิดการสร้างมูลค่าแก่ผลผลิตและเป็นการนำเทคโนโลยีเอ็กซ์ทรูชันมาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับการผลิตอาหาร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาผลของสภาวะตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชัน ได้แก่ ความเร็วรอบของสกรู ความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบใบมีด ต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้

1.2.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตกับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์

1.2.3 ศึกษาการหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมโดยวิธี Response Surface Methodology (RSM)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ คือ ปลายข้าวพันธุ์เหลืองประทิว

1.3.2 เอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้เป็นเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ความยาวช่วงเกลียวสกรู 32.5 เซนติเมตร ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (Length to Diameter Ratio, L/D) เท่ากับ 9:1 เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู 34.6 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบาร์เรล 55 มิลลิเมตร ขนาดมอเตอร์ต้นกำลัง 3.5 กิโลวัตต์ ควบคุมอุณหภูมิโดยใช้น้ำหมุนเวียนภายในผนังบาร์เรล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูหน้าแปลน เท่ากับ 4 มิลลิเมตร

1.3.3 สภาวะการผลิตที่ศึกษา ประกอบด้วย ความเร็วรอบสกรู (400-600 rpm) ความชื้นของวัตถุดิบ (16-22%) ความเร็วรอบใบมีด (0-60 rpm)

1.3.4 การวัดค่าคุณลักษณะทางเคมีกายภาพของวัตถุดิบและเอ็กซ์ทรูเดท ประกอบด้วย ความชื้น ความหนาแน่น ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ อัตราส่วนการขยายตัว ลักษณะเนื้อสัมผัส

## 1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1 เป็นแนวทางในการผลิต ผลิตภัณฑ์ขบเคี้ยวจากปลายข้าว (พันธุ์เหลืองประทิว) จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว

1.4.2 เป็นการส่งเสริมให้มีการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากปลายข้าวเพิ่มขึ้น ถือเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับปลายข้าว

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเอ็กซ์ทรูเดอร์

#### 2.1.1 หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ประกอบด้วย ธัญชาติที่ผ่านการบด สตาร์ชและโปรตีน จากพืช วัตถุดิบรอง ได้แก่ ไขมัน น้ำตาล เกลือ กรดหรือด่าง สารอิมัลซิไฟเออร์ สี กลิ่น รส และน้ำ โดยน้ำจะเติมเข้าไปเพื่อปรับให้ส่วนผสมมีความชื้นอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ คือ สภาวะการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน เส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าแปลนและอัตราการหมุน การออกแบบภายในบาร์เรล ความเร็วรอบสกรู เป็นต้น และคุณสมบัติด้านการไหลของอาหาร หลักการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เมื่อวัตถุดิบถูกป้อนเข้าเครื่องในระหว่างการดันผ่านเกลียวอัด วัตถุดิบจะได้รับแรงเฉือนอย่างรุนแรง เม็ดแป้งวัตถุดิบจะคูดน้ำและกลายเป็นเจลที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างของโมเลกุลแป้งซึ่งเป็น โมเลกุลใหญ่จะเปิดออก ความหนืดจะเพิ่มสูงขึ้นและเกิดคุณสมบัติแบบพลาสติก [2]

อุณหภูมิของส่วนผสมอาหารหลังจากที่ถูกอัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความดันที่สูงภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ทำให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมือนกับหม้อต้มความดัน (Pressure cooking) เมื่อผลิตภัณฑ์ออกจากหน้าแปลน ความดันจะถูกปล่อยออกมา ส่วนผสมของแป้งที่เปลี่ยนสภาพเป็นเจลคล้ายพลาสติกออกจากหน้าแปลน ทำให้เกิดการพองตัว (Puffing) อย่างทันที การพองตัวส่วนใหญ่เกิดจากน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ถูกทำให้ร้อนและเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดท เอ็กซ์ทรูเดทที่ขยายตัวจะมีโครงสร้างของเซลล์เปิด ประกอบด้วยเซลล์ที่แต่ละเซลล์ถูกล้อมรอบด้วยเมมเบรนของแป้งหรือโปรตีน ขนาดของเซลล์จะควบคุมลักษณะเฉพาะที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ คือ ลักษณะเนื้อสัมผัสและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทมักถูกตัดที่ผิวหน้าของหน้าแปลนด้วยใบมีดที่หมุน และอบแห้งในเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนให้มีความชื้นประมาณ 2-12 % ขึ้นอยู่กับความชื้นของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการอาจเคลือบด้วยสี กลิ่น รส เพิ่มเติมได้

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน แบ่งได้เป็น 3 ส่วนสำคัญ คือ

- Feed zone คือ ส่วนที่ทำการป้อนวัตถุดิบกับน้ำเข้าผสมกัน จนแป้งมีลักษณะที่เรียกว่า โด
- Plasticizing คือ ส่วนนี้เกิดแรงอัดขึ้นเล็กน้อย โดยแป้งจะมีคุณลักษณะคล้ายพลาสติก
- Pressure build-up zone คือ ช่วงที่วัตถุดิบเกิดแรงอัดสูงสุด ก่อนที่จะออกสู่หน้าแปลน

### 2.1.1.1 ประเภทของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (โดยอาศัยคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์) ดังนี้

**1. Pasta Extruders** ใช้ทำผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี เช่น มัคกะโรนี เอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้มีร่องเกลียวที่ลึก ความเร็วของสกรูจะช้า สกรูเกลียวลึกทำหน้าที่ผลิตพาแป้งเซโมไลนา (semolina) ที่ขึ้นนุ่มเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และอัดผ่านรูเปิดพิเศษบนหน้าแปลนออกมาซึ่งอาจทำให้แป้งเซโมไลนาสุกบ้างเล็กน้อย พลังงานที่ใช้ในเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้น้อยมาก เนื่องจาก มีอัตราการเนียนเกิดขึ้นต่ำมากในตัวผลิตภัณฑ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่ถึงกับสุกพอง ต้องนำผลิตภัณฑ์ที่ได้เข้าสู่อีกขั้นตอน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์สุกพร้อมจะรับประทานได้

**2. High-Pressure Forming Extruders** เป็นเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ภายในมีความดันสูง ตัวเครื่องต้องออกแบบให้ผนังด้านในของปลอกเหล็กผนังสองชั้นเป็นร่องเกลียว เพื่อมิให้เกิดการไหลลื่นที่ผนัง และสกรูต้องออกแบบให้เป็นชนิดที่ทำให้เกิดแรงอัดมาก ซึ่งจะทำให้เอ็กซ์ทรูเดอร์มีความดันสูงที่บริเวณด้านหลังของหน้าแปลน อุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้เกิดการสุกพองที่ไม่ต้องการ จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิโดยการใช้ น้ำหล่อเย็นรอบผนังของบาร์เรลที่เป็นผนังสองชั้น

**3. Low-Shear Cooking Extruders** เป็นเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ผนังด้านในเรียบและช่องว่างระหว่างผนังสองชั้นของบาร์เรลมีของเหลวอุณหภูมิสูง ไอน้ำหรือความร้อนจากขดลวดไฟฟ้า ไหลผ่านอยู่ตลอดเวลา ความร้อนจะส่งผ่านไปยังวัตถุดิบ โดยการนำความร้อน นอกจากนี้ การหมุนตัวของสกรูทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างวัตถุดิบกับสกรู เกิดเป็นความร้อน และความร้อนนี้จะแพร่ไปยังส่วนผสมของวัตถุดิบด้วยวิธีการนำความร้อนเช่นเดียวกัน วิธีการนี้ทำให้ส่วนผสมจากแป้งเปลี่ยนเป็น โด และมีการพองตัวเกิดขึ้นเล็กน้อย ดังนั้น ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและระยะเวลาที่วัตถุดิบอยู่ภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ส่วนมากนิยมใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว เพื่อที่จะทำให้แป้งที่เป็นองค์ประกอบหลักของส่วนผสมวัตถุดิบเปลี่ยนเป็นเจลตามต้องการ โดจะถูกทำให้เย็นตัวลงในช่วงสุดท้ายที่ติดกับหน้าแปลน อัดผ่านหน้าแปลนออกมาสู่บรรยากาศภายนอก และถูกตัดออกเป็นชิ้นๆ ความชื้นที่อยู่ภายในเพลเลต (pellet) จะไม่ระเหยออกไป โดยเพลเลตที่ได้นี้จะมีลักษณะเนื้อแน่นมากกว่าการพองตัว จึงต้องนำไปผ่านกรรมวิธีการผลิตอื่นอีก เช่น อบแห้ง ทอด คั่ว เป็นต้น

**4. Collet extruders** เป็นเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบเรียบง่าย มีขนาดกะทัดรัด มีความยาวของตัวสกรูต่อเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยมาก ประมาณ 3:1 ใน Collet Extruder มีแรงเฉือนสูงมาก เนื่องจาก สกรูมีร่องเกลียวที่ตื้นมากหมุนอยู่ภายในบาร์เรลที่ผนังด้านในเป็นร่องเกลียวเช่นเดียวกัน วัตถุดิบที่ใช้ส่วนมาก จะเป็นวัตถุดิบที่มีความชื้นต่ำ ความร้อนเกือบทั้งหมดจะมาจากการเสียดสี (friction) และทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้แป้งเปลี่ยนเป็นเจลและเปลี่ยนเป็นเด็กซ์ทรินบางส่วน วัตถุดิบหรือส่วนผสมของวัตถุดิบอาหารที่เปลี่ยนสภาพและยังอยู่ภายในเอ็กซ์ทรูเดอร์ เรียกว่า เอ็กซ์ทรูเดท เอ็กซ์ทรูเดทจะถูกดัน โผล่ผ่านรูเปิดหน้าแปลนออกมาและเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จากภายในที่มีความดันสูง ออกสู่ภายนอกซึ่งมีความดันต่ำ (ความดัน

บรรยากาศ) ทำให้น้ำภายในเอ็กซ์ทรูเดอร์เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำและระเหยลอยตัวออกไป ในขณะที่เดียวกันก็ถูกตัดด้วยใบมีด วัตถุดิบที่นิยมใช้กับ Collet Extruder ได้แก่ คอร์นกรีท ข้าวท่อน เป็นต้น

**5. High Shear Cooking Extruders** เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ออกแบบมาใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลายลักษณะ เช่น พวกที่สุกเพียงบางส่วนหรือพวกที่สำเร็จรูป เอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้มีบาร์เรลที่ยาว แต่สามารถทำให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้โดยใช้แหล่งความร้อน ความเย็นจากภายนอก เอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ใช้กับวัตถุดิบได้มากมายหลายชนิด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดนี้ ได้แก่ อาหารสัตว์ อาหารเข้าชีเรียล โปรตีนเกษตร ขนมขบเคี้ยว เป็นต้น

### 2.1.1.2 ประเภทของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของความร้อน) ดังนี้

**1. Autogenous (Adiabatic) Extruders** ความร้อนทั้งหมดที่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ได้รับ มาจากการเสียดสี (friction) คือ เปลี่ยนมาจากพลังงานกล มีเพียงปริมาณเล็กน้อยหรือไม่มีความร้อนที่ป้อนหรือระบายออกจากบาร์เรล อุณหภูมิภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้จะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไป ดังนั้น เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ประเภทนี้จึงไม่ค่อยคล่องตัวนักสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์อาหาร ในบางชนิดและยากต่อการควบคุมการทำงานของเครื่องด้วย

**2. Isothermal Extruder** เป็นเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่มีระบบควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เท่ากันตลอดความยาวของบาร์เรล โดยความร้อนจะถูกลดหรือระบายผ่านช่องว่าง (Jacket) ระหว่างผนังสองชั้นของบาร์เรล

**3. Polytropic Extruders** เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่พบในปัจจุบัน เกือบทุกชนิดจัดอยู่ในประเภท Polytropic Extruders คือ จะได้รับความร้อนทั้งสองทาง คือ ความร้อนจากพลังงานกลและความร้อนที่ได้จากแหล่งความร้อนภายนอกที่ส่งผ่านมาจากช่องว่างของบาร์เรล

### 2.1.1.3 ประเภทของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ (ตามวิธีการสร้างประกอบเครื่อง) ดังนี้

#### 1. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder)

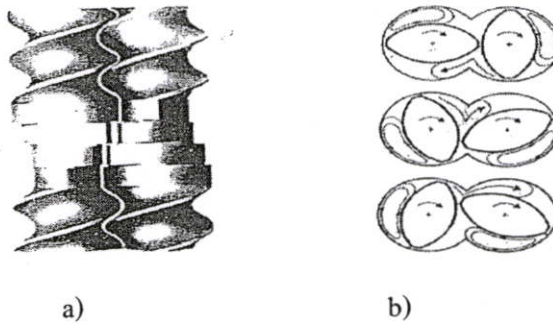
กรณีที่ใช้เพื่อการขึ้นรูป สกรูต้องมีเกลียวที่ลึกและหมุนช้าๆ เพื่อให้ปริมาณพลังงานกลถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการเคลื่อนที่น้อยที่สุด เช่น การทำมักกะโรนี หมากฝรั่ง กรณีที่ใช้ทำให้สุก จะมีสกรูสำหรับการอัด โดยการลดความลึกของเกลียวสกรูและหมุนด้วยความเร็วสูง เพื่อเพิ่มแรงเฉือนและพลังงานกล ส่วนผสมอาจได้รับความร้อนจากการเติมไอน้ำก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) แยกตามระดับการเคลื่อนที่กระทำต่ออาหารได้ ดังนี้

- แรงเฉือนสูง เช่น อาหารเข้ารัชชาติ เป็นต้น
- แรงเฉือนปานกลาง เช่น ขนบปังต่างๆ อาหารสัตว์ที่ค่อนข้างชื้น เป็นต้น
- แรงเฉือนต่ำ เช่น พาสต้า เป็นต้น

## 2. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ (twin-screw extruder)

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ มีสองสกรูซึ่งวางข้างๆกัน โดยมีเกลียวอินเตอร์เมส (Intermeshing) ระหว่างสกรูสองอัน เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบนี้มักจะแบ่งตามทิศทางการหมุนและลักษณะของสกรูที่อินเตอร์เมสกัน โดยสกรูที่อินเตอร์เมสแบบหมุนตามกัน จะพบมากในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร



รูปที่ 2.1 เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่

- a) ลักษณะของเกลียว
- b) การเคลื่อนที่ของวัตถุดิบ

### 2.1.2 ข้อดีของเอ็กซ์ทรูเดอร์

เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์นั้นมีคุณลักษณะพิเศษหลายประการ ดังนี้

- 2.1.2.1 อัตราการผลิตสูง (high production) เนื่องจาก เป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง และมีกำลังการผลิตสูงกว่าระบบอื่น
- 2.1.2.2 ต้นทุนการผลิตต่ำ (low cost) เนื่องจากอัตราส่วนของผู้ปฏิบัติงานและพื้นที่ที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่อหนึ่งหน่วยการผลิตน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตด้วยวิธีอื่น
- 2.1.2.3 รูปร่างของผลิตภัณฑ์ (product shapes) ทำได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับรูปร่างของรูเปิดบนรูน้าแปลน
- 2.1.2.4 คุณภาพของผลิตภัณฑ์สูง (high product quality) เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตแบบอื่นเนื่องจาก เป็นระบบ HTST (high temperature and short time)
- 2.1.2.5 ประหยัดพลังงาน (energy efficient)

### 2.1.3 ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

#### 2.1.3.1 เวลา (time)

กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน มีลักษณะเป็น equilibrium process ในการเปลี่ยนแปลงสภาวะต่างๆ เช่น อุณหภูมิ จึงต้องการเวลาในการปรับตัวให้เข้าสู่สมดุลโดยค่า residence time เป็นเวลาที่วัตถุดิบ อยู่ภายในเอ็กซ์ทรูเดอร์ โดยขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและขนาดของอุปกรณ์ ดังสมการ

$$\text{Residence time} = Tr = \frac{Vf}{Q} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $Tr$  = residence time in process (s)

$Vf$  = filled volume of process ( $m^3$ )

$Q$  = volumetric flow rate of product through the process ( $m^3/s$ )

#### 2.1.3.2 อุณหภูมิ (temperature)

อุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ เนื่องจาก ปฏิกิริยาหลักของกระบวนการ คือ ปฏิกิริยาการเกิดเจล (gelatinization) โดยที่ลักษณะของกลีนิ์ สี่ รวมทั้งเนื้อสัมผัสล้วนเป็นผลที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ทั้งสิ้น ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนไป คุณสมบัติต่างๆเหล่านี้จะเปลี่ยนไปด้วย หากต้องการให้เกิดการพองตัวของผลิตภัณฑ์จะต้องควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ นอกจากควบคุมอุณหภูมิแล้วต้องควบคุมความดันให้สูงพอที่จะป้องกันไม่ให้น้ำเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอภายในเอ็กซ์ทรูเดอร์

#### 2.1.3.3 ความชื้น (moisture)

ความชื้นเป็นตัวแปรสำคัญในปฏิกิริยาการเกิดเจล (gelatinization) เมื่อเม็ดแป้งขาดความชื้นจะทำให้เกิดการพองตัว เม็ดแป้งจะมีค่าการพองตัวสูง ในกรณีที่พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเม็ดแป้งถูกทำลาย การพองตัวในลักษณะนี้ทำให้โมเลกุลสูญเสียการจัดเรียงตัว หากความชื้นไม่สม่ำเสมอ ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดเจลในแต่ละส่วนของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ

#### 2.1.3.4 อัตราการเฉือน (shear rate)

เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการผสมของวัตถุดิบ (mixing intensity) ภายในเอ็กซ์ทรูเดอร์โดยวัตถุดิบจะสัมผัสกับบาร์เรลที่อยู่กับที่และสกรูเคลื่อนที่ตลอดเวลา อัตราการเฉือนจะเปลี่ยนแปลงตามความเร็วที่เปลี่ยนไป โดยอัตราการเฉือนจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของสกรู เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูและความลึกของร่องเกลียว (Channel depth) ลดลง

### 2.1.3.5 ความเร็วรอบของสกรู (screw speed)

กระบวนการผลิตสำหรับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะใช้ความเร็วรอบของสกรูที่แตกต่างกัน ความเร็วรอบของสกรู เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อเวลา อุณหภูมิและอัตราการเนียน ดังนี้

1. เวลา (time) ในสภาวะที่ความเร็วรอบของสกรูมีค่าสูง ทำให้ residence time ลดลง
2. อัตราการเนียน (shear rate) ความเร็วรอบของสกรูที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเนียนเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น ถ้าต้องการปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ เช่น การเกิด puffing ด้วยการเพิ่มแรงทางกล สามารถปรับเพิ่มหรือลดความเร็วรอบของสกรูได้

### 2.1.4 การลดขนาด (Size Reduction)

เป็นการให้พลังงานเพื่อทำลายแรงยึดเหนี่ยวของสาร พลังงานที่ให้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารนั้น เช่น ความแข็ง ความพรุน เป็นต้น การลดขนาดเป็นการทำให้พื้นที่ผิวของสารนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการถ่ายเทมวลสารในกระบวนการต่างๆ เช่น การทำแห้ง การสกัด การดูดซึม เป็นผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตนั้นดีขึ้น ช่วยลดเวลาในการผลิตรวมทั้ง Cooking & Blanching ช่วยทำให้การผสมเกิดได้ดียิ่งขึ้น

2.1.4.1 พลังงานและกำลังงานที่ต้องการในการบด พลังงานที่ต้องใช้ในการบดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. เพื่อเอาชนะความฝืดและทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนของเครื่องบด
2. เป็นพลังงานในการบด

#### 2.1.4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการบด [2]

1. Crushing Rolls ประกอบด้วยลูกกลิ้งตั้งแต่ 2 ลูกขึ้นไป หมุนเข้าหากัน ความเร็วรอบของลูกกลิ้งโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 50-300 รอบต่อนาที

2. Hammer mill เป็นเครื่องบดที่มีแกนหมุนในแนวตั้งหรือแนวนอนที่แกนหมุนจะมีแรงที่ใช้เป็นแรงกระแทกและเกิดมีแรงเสียดสีควบคู่ไปด้วย โดยทั่วไปเครื่องบดแบบนี้มักมีตะแกรงไว้คัดขนาดให้ได้ตามต้องการ อัตราการบดขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของการหมุน ปริมาณวัสดุที่จะบดและขนาดของตะแกรง

3. Disc Attrition Mill เครื่องบดแบบนี้มักใช้ในงานบดละเอียด มี 3 ประเภท คือ

- Single Disc Mill ภายในจะมี disc ถูกยึดติดอยู่กับที่ ส่วนอีก disc จะหมุนด้วยความเร็วสูง โดยช่องว่างระหว่าง disc ทั้งสองสามารถปรับได้ วัสดุจะถูกแรงเนียน แรงเสียดสี ทำให้มีขนาดเล็กลงและถูกเหวี่ยงออกจากเครื่อง

- Double Disc Mill ภายใน disc ทั้งสองจะหมุนเข้าหากัน ทำให้เกิดแรงกระทำต่อวัสดุมากกว่าแบบ single disc mill

- Buhr Mill เป็นลักษณะของแผ่นผนังวางประกบกัน ด้านบนมีช่องสำหรับใส่ วัสดุ แผ่นล่างจะหมุน วัสดุจะถูกป้อนเข้ามาอยู่ในช่องว่างระหว่าง upper และ lower stones ส่วน ใหญ่ใช้ในลักษณะของการบดเปียก

4. Ball Mill มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกที่หมุนในแนวนอน ภายในบรรจุลูกบอล ทำจากเหล็กหรือหิน ประมาณ 20-50 % ของปริมาตรภายในทรงกระบอก

## 2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว [3]

ข้าวที่นำมาปลูกเป็นอาหารนั้นแบ่งได้ 2 ชนิด คือ *Oryza sativa* ปลูกในทวีปเอเชีย และ *Oryza glaberrima* ปลูกในทวีปแอฟริกา แต่ข้าวที่ค้าขายกันในตลาดโลกเกือบทั้งหมด เป็นข้าวที่ปลูกจาก แถบเอเชีย ซึ่งแบ่งได้ตามแหล่งที่ปลูกได้เป็น ข้าวอินดิกา (*Indica*) มีลักษณะเมล็ดยาวรี ต้นสูง เป็น ข้าวที่ปลูกในเอเชียเขตร้อน ข้าวจาปอนิกา (*Japonica*) เป็นข้าวที่ปลูกในเขตอบอุ่นและข้าวจาวา นิกา (*Javanica*) ปลูกในอินโดนีเซียและฟิลิปปินส์ เมล็ดป้อมใหญ่ ไม่ได้รับความนิยมเพราะให้ผล ผลิตต่ำ ข้าวหอมมะลิไทย (Thai Hom Mali Rice) หมายถึง ข้าวกล้องและข้าวขาวที่แปรรูปมาจาก ข้าวเปลือกเจ้า พันธุ์ข้าวหอมที่ผลิตในประเทศไทยที่กรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตรและ สหกรณ์ ประกาศรับรองมีกลิ่นตามธรรมชาติขึ้นอยู่กับว่าเป็นข้าวเก่าหรือข้าวใหม่ เมื่อหุงเป็นข้าว สวยแล้ว เมล็ดข้าวจะอ่อนนุ่ม [4] ข้าวหอมมะลิจัดเป็นข้าวที่อยู่ในกลุ่ม *indica* type เป็นพันธุ์ที่ไวต่อ แสง เจริญเติบโตได้ดีในสภาพภูมิอากาศทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย เป็นสายพันธุ์ที่มี ความโดดเด่นในด้านของกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะเมื่อผ่านการทำให้สุกจะได้ข้าวสวยที่หอม นุ่ม และเหนียว เป็นข้าวที่ได้รับความนิยมในการบริโภคมาก ทำให้เป็นที่ต้องการ ทั้งจากภายใน ประเทศและต่างประเทศ ในปี 2550 ประเทศไทยมีปริมาณการส่งออกรวม 5,340,535.65 ตัน คิด เป็นมูลค่า 69,550.71 ล้านบาท [1] ลักษณะโดยทั่วไปของเมล็ดข้าวหอมมะลิไทย เป็นข้าวเมล็ดยาว ความยาวเฉลี่ยของข้าวเต็มเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหัก ต้องไม่ต่ำกว่า 7.0 มิลลิเมตร อัตราส่วนความยาว เฉลี่ยต่อความกว้างเฉลี่ยของข้าวเต็มเมล็ดที่ไม่มีส่วนใดหักต้องไม่ต่ำกว่า 3.0 มีปริมาณ อมิโลส 12.0 % - 19.0 % ที่ระดับความชื้น 14 % ข้าวหอมมะลิไทย แบ่ง เป็น 3 ชั้น ตามอัตราส่วนของข้าว เจ้าพันธุ์อื่นที่ไม่ใช่ข้าวหอมมะลิปน ดังนี้ ข้าวหอมมะลิไทยชั้นดีเลิศ (Prime Quality) < 10.0 % โดย น้ำหนัก ข้าวหอมมะลิไทยชั้นดีพิเศษ (Super Quality) < 20.0 % โดยน้ำหนักและข้าวหอมมะลิชั้นดี (Premium Quality) < 30.0 % โดยน้ำหนัก [4] ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นพันธุ์ข้าวที่ได้รับการรับรอง เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2502 สาเหตุที่มีชื่อขาวดอกมะลิ 105 เพราะกรมการข้าวได้มีการรวบรวม ข้าวขาวหอมมะลิ ทั้งสิ้น 199 รวง โดยนำมาจากอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทราไปปลูก พบว่า ข้าวหอมมะลิรวงที่ 105 เป็นสายพันธุ์ที่ดีที่สุดในเรื่องความชอบและคุณภาพของเมล็ด กรมการค้า ข้าวจึงได้ ส่งเสริมให้เกษตรกรปลูก สำหรับชื่อที่เรียกกันว่า ข้าวหอมมะลินั้น ไม่ได้หมายถึง ข้าวมี

กลิ่นหอมดอกมะลิ แต่เป็นเพราะข้าวที่ได้มีสีขาวเหมือนดอกมะลิ แต่มีกลิ่นหอมเหมือนใบเตย เนื่องจาก มีสารบางอย่างเป็นตัวเดียวกับสารในใบเตย [3] ค่าปริมาณอมิโลส (Apparent amylose content) เป็นสาเหตุทำให้ข้าวสุกมีความเหนียวลดลงหรือร่วนมากขึ้นและทำให้ข้าวนุ่มน้อยลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจาก คุณสมบัติการคืนตัวของอมิโลสที่สูงแล้ว (Retrogradation) ข้าวที่มีอมิโลสสูงจะดูดน้ำได้มากในระหว่างการหุงต้ม ดังนั้น ปริมาณน้ำที่ใช้ในการหุงต้มจึงมีผล ต่อคุณภาพข้าวสุก เช่น ข้าวที่มีอมิโลสต่ำต้องการน้ำน้อย หากใส่น้ำมากเกินไปจะได้ข้าวสุกแฉะ แต่สำหรับข้าวที่มีอมิโลสสูง หากใส่น้ำปริมาณเท่ากับการหุงต้มข้าวอมิโลสต่ำ จะได้ข้าวสวยที่แข็งกระด้างมาก เนื่องจาก การหุงต้มข้าวอมิโลสสูงต้องการน้ำมากและเมื่อสุกแล้วจะได้ข้าวสวย ร่วนฟู ไม่เหนียวติดกัน จึงทำให้ข้าวสุกขยายปริมาตรมากหรือข้าวขึ้นหม้อดีกว่าข้าวอมิโลสต่ำ ในขณะที่ข้าวอมิโลสต่ำ ข้าวสวยมีลักษณะเหนียว เกาะติดกันเป็นก้อน จึงไม่ขึ้นหม้อ ในการวิเคราะห์หาปริมาณอมิโลส สามารถตรวจวิเคราะห์ จากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างแป้งที่ละลายในสารละลาย โดยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างพอเหมาะ โดยอมิโลสเมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนจะได้สารละลายสีน้ำเงิน ซึ่งสามารถหาปริมาณอมิโลสในแป้งได้โดยการวัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ช่วงคลื่นแสง 610 - 620 นาโนเมตร และเปรียบ เทียบกับสารละลายมาตรฐาน

### 2.3 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของแป้ง

แป้ง มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ  $(C_6H_{12}O_5)_n$  จัดเป็น โพลีเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose unit) มีขนาด 1-2 ไมครอน มีลักษณะแตกต่างกัน ทั้งแบบทรงกลมและแบบหลายเหลี่ยม ภายในเม็ดแป้ง ประกอบด้วยโพลีเมอร์ 2 ชนิด คือ อมิโลส (Amylose) และอไมโลเพคติน (Amylopectin) อมิโลสมีลักษณะเป็นสายโซ่ตรงของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิก เพียงอย่างเดียว ประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส ประมาณ 200-2,000 หน่วย เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ โมเลกุลของอมิโลส จะละลายออกมาจากเม็ดแป้ง ทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดต่ำลง เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงร่าง 3 มิติ โดยโมเลกุลของอมิโลสจะเข้ามาจัดเรียงตัวใกล้ๆกัน ได้ลักษณะโครงร่างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำได้ อมิโลสนี้มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง  $10^5$ - $10^6$  อมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้ อมิโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนให้สีน้ำเงินเกิดขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอมิโลส

อไมโลเพคตินมีลักษณะโครงร่างเป็นกิ่งก้าน ประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส 25-30 หน่วย เรียงต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิก อไมโลเพคติน หนึ่งโมเลกุล ประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส ประมาณ 200,000 หน่วยขึ้นไป เนื่องจาก อไมโลเพคติน เป็น โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และมีโครงร่าง กิ่งก้านสาขามาก ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นผลึก

(Crystalline) และส่วนที่ไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐาน (Amorphous) โดยส่วนที่เป็นผลึกโมเลกุลจะจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ มีอิมโอสประกอบอยู่มาก ส่วนที่ไม่เป็นผลึกโมเลกุลจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ประกอบด้วยอิมโอสเฟคตินเป็นส่วนใหญ่ จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลได้น้อย

## 2.4 คุณลักษณะของแป้งข้าว

### 2.4.1 การเกิดรีโทรกราเดชัน (Retrogradation)

เกิดจากแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิเจลาติไนซ์เซชันและเพิ่มความร้อนต่อไป ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วแตกตัวออก โมเลกุลของอิมโอสขนาดเล็กระจัดกระจาย ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว อิมโอสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวขึ้นมาใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน เป็นร่างแห 3 มิติ มีความหนืดคงตัวมากขึ้น การคืนตัวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เกิดการตกตะกอน เมื่อตกตะกอนอย่างรวดเร็ว เจลจะขุ่น แป้งที่มีปริมาณอิมโอสสูง จะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอิมโอสเฟคตินสูง [5]

### 2.4.2 เจลาติไนซ์เซชัน (Gelatinization)

เป็นการให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เนื่องจาก โมเลกุลของน้ำอิสระรอบๆ โมเลกุลของแป้งมีน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก เกิดความหนืด อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์เซชัน คือ อุณหภูมิซึ่งเม็ดแป้ง (starch granule) เริ่มพองตัวในน้ำร้อน ค่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์เซชัน แบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ ( $69.5^{\circ}\text{C}$ ) หรือต่ำกว่า ช่วงอุณหภูมิปานกลาง ( $70-74^{\circ}\text{C}$ ) และช่วงอุณหภูมิสูง ( $74^{\circ}\text{C}$ ) [6] โดยวัดได้จาก ระดับการแตกตัวของเมล็ดข้าว 6 เมล็ดใน 1.7 % KOH 10 ml ที่  $30^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 23 ชั่วโมง โดยแป้งระดับคะแนนเป็น 1-7 โดยข้าวที่มีค่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์เซชันสูง จะใช้เวลาในการหุงต้มที่สูงกว่าข้าวที่มีอุณหภูมิเจลาติไนซ์เซชันปานกลาง [7] ข้าวไทยส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิเจลาติไนซ์เซชันต่ำถึงปานกลาง ยกเว้น ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 4 ซึ่งมีอุณหภูมิแป้งสูงมาก ทำให้ไม่สามารถหุงหรือนึ่งให้สุกได้ด้วยวิธีการปกติ [8]

### 2.4.3 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลายของแป้ง

แป้งจากธัญพืช มีรูปแบบการพองตัวและการละลาย 2 ชั้น แสดงถึงแรงของพันธะภายในเม็ดแป้งที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ พันธะบริเวณเปลือกและบริเวณอณูพื้นฐานของเม็ดแป้ง แป้งจำพวกนี้มีจำนวนพันธะสูงสุด แต่มีกำลังการพองตัวและกำลังการละลายต่ำสุด เนื่องจาก มีปริมาณอมิโลสสูงซึ่งอมิโลสจะทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น การพองตัวต่ำ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและการละลายน้ำของแป้ง มีหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำที่มีในเม็ดแป้ง [5]

### 2.4.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

การวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากข้าว สำหรับในแต่ละประเทศจะมีความนิยมลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน โดยลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารที่ทำจากข้าวเป็นผลมาจากหลายปัจจัย ได้แก่ พันธุ์ข้าว คุณสมบัติทางเคมีและเคมีเชิงฟิสิกส์ การปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยว วิธีการแปรรูป [9] ปัจจุบันมีเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัส เพื่อใช้ประเมินและเปรียบเทียบกับผลทางประสาทสัมผัสหลายชนิด

## 2.5 ภาวะบรรจุสำหรับผลิตภัณฑ์จากข้าว

### 2.5.1 หน้าที่หลักของภาวะบรรจุ สามารถแบ่งได้ 4 ประการดังนี้

2.5.1.1 บรรจุผลิตภัณฑ์ ห่อหุ้มและรวบรวมผลิตภัณฑ์เพื่อการใช้และขนส่ง

2.5.1.2 รักษาและคุ้มครองผลิตภัณฑ์ ภาวะบรรจุมีหน้าที่รักษาและคุ้มครองผลิตภัณฑ์ในช่วงระยะเวลาตั้งแต่การผลิตจนถึงมือผู้บริโภค จากปัจจัยภายนอกที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค สาเหตุต่างๆ ของการเสื่อมคุณภาพ ได้แก่ ปฏิกิริยาเคมี การเสื่อมคุณภาพจากเอนไซม์ การเน่าเสียจากจุลินทรีย์ และความเสียหายทางกายภาพ เช่น การแตก หักหรือบวม ตัวอย่างของบรรจุภัณฑ์ที่ทำหน้าที่ดังกล่าว ได้แก่ ขวดสีชาบรรจุวิตามินซี เพื่อป้องกันแสงแดด การใช้ก๊าซไนโตรเจนเพื่อแทนที่ก๊าซออกซิเจนในถุงบรรจุมันฝรั่งทอดเพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นเหม็นหืนและการแตกหักของสินค้า เป็นต้น

2.5.1.3 สื่อสารข้อมูลและเอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ ภาวะบรรจุสามารถแสดงข้อมูลของผลิตภัณฑ์ต่อผู้บริโภคโดยการพิมพ์โดยตรงหรือใช้ฉลาก รวมถึงการทำให้ฉลากหรือรูปร่างของภาวะบรรจุ มีลักษณะเฉพาะที่ดึงดูดใจและมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่ทำให้ผู้บริโภคจดจำและแยก

ประเภทผลิตภัณฑ์จากคู่แข่งได้ เนื่องจาก ภาษนะบรรจุเป็นเสมือนตัวแทนเจ้าของสินค้า หมายถึง ผู้ผลิตหรือผู้จัดจำหน่าย เพื่อประชาสัมพันธ์และกระตุ้นการตัดสินใจในการซื้อ โดยใช้รูปแบบ ภาษนะบรรจุ สีของตัวอักษรหรือรูปประกอบที่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์คู่แข่ง แสดงรายละเอียดของ สินค้า สร้างความเชื่อมั่นในสินค้าให้ผู้บริโภคโดยใช้เครื่องหมายรับรองคุณภาพต่างๆ และแสดง หลักฐานเพื่อการดำเนินคดีตามกฎหมาย ดังนั้น การใช้ภาษนะบรรจุจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนด และกฎหมายต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อคุ้มครองและป้องกันสิทธิของผู้บริโภค

2.5.1.4 สะดวกต่อการใช้งาน ภาษนะบรรจุต้องอำนวยความสะดวกต่อผู้บริโภคในการใช้งานและการนำผลิตภัณฑ์มาใช้ โดยทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณลักษณะตามต้องการ รวมไปถึงความสะดวกต่อผู้ผลิต ผู้ขนส่ง ผู้จัดจำหน่าย และสอดคล้องกับการทำงานของเครื่องจักรด้วย

## 2.5.2 การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ข้าวพองกรอบ

ปัจจุบัน การแข่งขันของอุตสาหกรรมอาหารมีมาก ผู้ผลิตจำเป็นต้องมีการพัฒนาการผลิตอาหาร ให้มีคุณภาพและตรงกับความต้องการของผู้บริโภคอยู่ตลอดเวลา ปัจจัยหนึ่งที่มีผู้ประกอบการไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้คือ บรรจุภัณฑ์อาหาร การเลือกใช้บรรจุภัณฑ์อาหารควรจะต้องเหมาะสมกับ อาหารแต่ละชนิด เพื่อป้องกันคุณภาพและคุณลักษณะโดยรวมของตัวผลิตภัณฑ์อาหารให้ดี และเป็นไปตามที่ผู้บริโภคต้องการด้วย อย่างไรก็ตาม ยังมีผู้ประกอบการและผู้บริโภคจำนวนมากที่ เข้าใจผิดเกี่ยวกับบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยที่คนเหล่านั้นให้ความสำคัญกับบรรจุภัณฑ์ในแง่ของความ สวยงามและการออกแบบรูปปลั๊กอินเพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงหน้าที่อีกประการที่สำคัญของ บรรจุภัณฑ์อาหาร คือ การรักษาคุณภาพและคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารภายในไว้ได้ เพื่อให้ผู้บริโภคกลับมาซื้อสินค้า นั้นอีกต่อไป ผู้ประกอบการจึงควรมองในภาพรวมของเรื่องบรรจุภัณฑ์ อาหารให้ชัดเจนโดยคำนึงถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์ของอาหารประเภทนั้นๆให้ สอดคล้องกับหน้าที่หลักของบรรจุภัณฑ์ที่กล่าวถึงในข้างต้น โดยพิจารณาจากชนิดของวัสดุที่จะใช้ ราคา และประสิทธิภาพของบรรจุภัณฑ์ในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์ที่ ขึ้นรูปด้วยพลาสติก ได้รับความนิยมอย่างสูง เนื่องจาก ประโยชน์ในการใช้งานของพลาสติกมี มากมายและพลาสติกแต่ละชนิดยังสามารถนำมาใช้ร่วมกัน เพื่อให้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและผู้ผลิตได้อีกด้วย โดยเฉพาะภาษนะบรรจุแบบอ่อนตัว (Flexible packaging) ข้อดีของพลาสติก คือ น้ำหนักเบา วัตถุดิบมีมาก ราคาถูก ทนทานต่อสภาวะต่าง ๆ ประหยัดค่าขนส่งและเก็บรักษา สามารถผลิต เป็นรูปร่างและสีตามต้องการ และสามารถนำมา ประยุกต์ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดได้มากมาย อย่างไรก็ตาม พลาสติกก็ยังมีข้อเสีย คือ ไม่สามารถย่อยสลายได้เอง จึงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดสูง ไม่คงตัวทางเคมี ก๊าซและไอน้ำ สามารถซึมผ่านได้ แต่ก็ขึ้นกับชนิดของพลาสติกแต่ละประเภท สามารถทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่

บรรจุได้จึงต้องระวังในการเลือกใช้ และรวมถึงข้อจำกัดในการพิมพ์สำหรับพลาสติกบางประเภท พลาสติกในปัจจุบันนั้นสามารถแบ่งได้หลายประเภท ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะประเภทหลักๆ ที่เกี่ยวข้องกับภาชนะบรรจุของผลิตภัณฑ์จากข้าวพองกรอบ ดังนี้

#### 2.5.2.1 โพลีเอทิลีน (PE)

คุณลักษณะของโพลีเอทิลีนนั้นเปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาแน่น โดย เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะสามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำได้มากขึ้น ทนความร้อนมากขึ้น มีสีขาว ขุ่นกว่าปกติและความต้านทานแรงต่างๆเพิ่มขึ้น ความโปร่งแสงถึงโปร่งใสขึ้นอยู่กับความหนาและความหนาแน่นด้วย นอกจากนี้ โพลีเอทิลีนยังมีความยืดตัวสูง ฉีกขาดยาก สามารถปิดผนึกด้วยความร้อนได้ดี ยกเว้น ชนิดที่มีความหนาแน่นสูง เนื่องจาก มีความสามารถในการทนความร้อนได้สูง ป้องกันการซึมผ่านของไขมันและน้ำมันได้ดี ป้องกันกลิ่นได้น้อย อีกทั้งส่วนพื้นผิวมันติดภาชนะและหมึกพิมพ์ได้ยาก โพลีเอทิลีน นิยมใช้ห่ออาหารได้เกือบทุกชนิด บรรจุผลไม้สดหรือขนมปัง ขวดน้ำพลาสติกแบบขุ่น ถุงบรรจุข้าวสาร ใช้ทำฟิล์มห่อประเภทยืดตัว (Stretch film) หรือหดตัว (Shrink film) หรือใช้เป็นชั้นปิดผนึกด้วยความร้อน เป็นต้น

#### 2.5.2.2 โพลีโพรพิลีน (PP)

ข้อดีของโพลีโพรพิลีน คือ มีความโปร่งใส ใช้กับเครื่องจักรได้ดี ด้านทานไขมันได้ดี ด้านทานแรงดึงได้ดีกว่าโพลีเอทิลีน แต่ไม่ทนต่อแรงทิ่มทะลุและแรงยืดตัว ป้องกันการซึมผ่านของความชื้น ก๊าซและกลิ่นได้ดีกว่าโพลีเอทิลีน สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 121 °C จึงทำถุงที่ผ่านการฆ่าเชื้อได้ หรือถุงร้อนบรรจุอาหาร มีความเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ไม่เหมาะกับการแช่แข็งและปิดผนึกด้วยความร้อนยาก ทั้งนี้โพลีโพรพิลีน นิยมนำมาใช้กับอาหารที่ผ่านความร้อนได้ดีใช้ทำฝาเกลียว ถุงขนมปัง ถุงบรรจุผักผลไม้ หรือถุงห่อเสื้อผ้า ทำขวดบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เป็นต้น

#### 2.5.2.3 โพลีเอทิลีน เทอเรพเทเลท, PET

พลาสติกชนิดนี้ สามารถป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี ป้องกันไขมันและน้ำมันได้ดี ป้องกันกลิ่นได้ดีมาก ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี มีความใสมาก สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ จึงนิยมนำมาทำเป็นฟิล์มหดตัว ถุงสำหรับอาหารแช่แข็ง ถุงที่ผ่านการฆ่าเชื้อแบบหม้อความดันได้ ขวดบรรจุเครื่องดื่มต่างๆ ถาดขึ้นรูปเทอร์โมฟอร์ม ขวดน้ำมัน ขวดน้ำดื่มแบบใส บรรจุภัณฑ์เครื่องสำอางค์

## 2.6 ระดับนัยสำคัญทางสถิติและระดับความเชื่อมั่น

ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (Level of Significant หรือ  $\alpha$ ) เป็นการกำหนดขอบเขตความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้เกิดขึ้นในการทดสอบ โดยระบุเป็นทศนิยม โดยทั่วไป นิยมทดสอบสมมติฐาน ณ ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 (ยอมรับให้เกิดความคลาดเคลื่อน 5 % หรือมีความเชื่อมั่น 95 %)

ระดับความเชื่อมั่น (Confidence Level)	ระดับนัยสำคัญทางสถิติ (Level of Significant)
0.95	$\alpha = 0.05$
0.99	$\alpha = 0.01$

ระดับความเชื่อมั่น (Level of Confidence) จะระบุเป็นเปอร์เซ็นต์และใช้อธิบายความน่าเชื่อถือของผลที่ได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเชื่อมั่นและระดับนัยสำคัญ เป็นดังนี้

$$\text{ระดับความเชื่อมั่น} = (1 - \text{ระดับนัยสำคัญ}) \times 100$$

### 2.6.1 การทดสอบความมีนัยสำคัญ

ในทางสถิติคำว่านัยสำคัญและความมีนัยสำคัญมีความหมายเฉพาะ ความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ หมายถึง ความแตกต่างที่ไม่ควรเกิดขึ้นจากความเป็นไปได้ การทดสอบความมีนัยสำคัญ จะแสดงความแตกต่างที่ไม่ควรเกิดจากการแปรปรวนของการสุ่มตามธรรมชาติ

การตัดสินใจว่าข้อมูลชุดหนึ่งจะมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับข้อมูลอีกชุดหนึ่งนั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับขนาดของความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยแล้ว ยังขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลที่มีและความแปรปรวนของข้อมูลด้วย ครรชนิชีวัตการยอมรับความแตกต่าง คือ t-value สำหรับความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ย และ F-value สำหรับความแตกต่างระหว่างความแปรปรวนของชุดข้อมูล

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**Gregory Tucker et al. [10]** ศึกษาผลของสภาวะการผลิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ต่อคุณลักษณะทางเคมีกายภาพและทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขบเคี้ยวแบบพองกรอบจากข้าวสาลี พบว่า อัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการแปรผัน โดยตรงกับค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ ขณะที่ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ ที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการมีค่าแปรผัน โดยตรงกับความหนาแน่น ความสามารถในการละลายน้ำและค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ และมีค่าแปรผกผันกับค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและอัตราส่วนการพองตัวของผลิตภัณฑ์

**Suwendu et al. [11]** ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตแบบอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้วัตถุดิบข้าวกับแป้งถั่ว เอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้เป็นเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว วิเคราะห์ผลการทดลอง

โดยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวดมบ วัตถุประสงค์มีปริมาณความชื้นเริ่มต้น 20 % ปัจจัยที่ศึกษา ประกอบด้วย อัตราส่วนผสมของวัตถุประสงค์ และอุณหภูมิของหน้าแปลน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนการขยายตัว ความหนาแน่น และ Shear strength ผลที่ได้จากการทดลอง ถูกนำไปสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้อธิบายผลของปัจจัยที่ศึกษาโดยใช้รูปแบบสมการโพลิโนเมียล อันดับที่สอง ซึ่งค่าสหสัมพันธ์ที่ได้ส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์ดี

**ขวลิต และคณะ [12]** ศึกษาเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก โดยใช้วัตถุประสงค์เป็นข้าวโพดละเอียดเบอร์ 3 ที่ระดับความชื้น (18-20 %) ความเร็วรอบสกรู (540-620 rpm) อุณหภูมิบาร์เรล (60-100 °C) อัตราการป้อนวัตถุประสงค์ (0.167 kg/min, 0.500 kg/min) พบว่าสถานะ ความชื้นของวัตถุประสงค์ 18 % ผลิตภัณฑ์มีอัตราส่วนการขยายตัวสูงกว่าที่ระดับความชื้นของวัตถุประสงค์ 20 % โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดทและอัตราส่วนการขยายตัวมากที่สุด คือ อุณหภูมิของบาร์เรลและปริมาณความชื้นของวัตถุประสงค์เริ่มต้น

**รุจิรัตน์ และคณะ [13]** ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบาร์เรลต่ออัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของบาร์เรลส่งผลให้ความดันและค่า Degree of Gelatinization ของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทสูงขึ้น นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิมีก่าแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ และมีค่าแปรผกผันกับความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์

**ปัทมา และคณะ [14]** ศึกษาผลของสถานะการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้ จากปลายข้าวพันธุ์ชัยนาท โดยใช้เอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิบาร์เรล (80-120 °C) ความเร็วรอบสกรู (200-400 rpm) และปริมาณความชื้นของปลายข้าว (16-20 %) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ นำไปวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะต่างๆ พบว่า การเพิ่มความเร็วรอบสกรูทำให้เอ็กซ์ทรูเดทมีความชื้นลดลง ขณะที่ความเร็วรอบมากกว่า 300 rpm อุณหภูมิในช่วง 80-120 °C ไม่ค่อยส่งผลต่อปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดทมากนัก ขณะเดียวกันที่ความชื้นต่ำ การเพิ่มความเร็วรอบส่งผลให้ความหนาแน่นเนื้อของเอ็กซ์ทรูเดทมีค่าลดลง เมื่อวัตถุประสงค์มีความชื้นสูง เอ็กซ์ทรูเดทจะมีความหนาแน่นรวมสูง การเพิ่มความเร็วรอบสกรู ส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของเอ็กซ์ทรูเดทมีค่าลดลง เนื่องจาก การผลิตที่ความเร็วรอบสูง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานกล ไปเป็นพลังงานความร้อนมากขึ้น ส่งผลให้แป้งเกิดการเจลาคิไนซ์ได้ดีขึ้น น้ำที่อยู่ในเนื้อผลิตภัณฑ์มีอุณหภูมิสูงและสามารถเคลื่อนที่ออกสู่บรรยากาศมากขึ้น ทำให้ความชื้นเอ็กซ์ทรูเดทมีค่าลดลง

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์

3.1.1 วัตถุดิบ

1. วัตถุดิบปลายข้าวที่ใช้ คือ ปลายข้าวพันธุ์เหลืองประทิว

3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว
2. เครื่อง Texture analyzer รุ่น TA.XT.Plus
3. เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพันธุ์พืช
4. เครื่องวัดความเร็วรอบ
5. เครื่อง Centrifuge
6. เครื่องปั่น รุ่น HR 1721
7. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง รุ่น Yamato HB -120
8. ภาชนะอลูมิเนียม
9. โถคูคความชื้น
10. ตู้อบลมร้อน รุ่น UM 400
11. Single disc mill
12. กระจบ้องอลูมิเนียมขนาด 1 ลิตร
13. หลอดทดลอง
14. กระจบอกดวง ขนาด 50 มิลลิลิตร

3.2 การกำหนดตัวแปร

การทดลองศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรกระบวนการผลิต ประกอบด้วย ความเร็วรอบสกรู ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ และความเร็วรอบโม่ มีด ต่อคุณลักษณะต่างๆของเอ็กซ์ทรูเดท การกำหนดค่าตัวแปร เป็นดังนี้

### 3.2.1 ตัวแปรอิสระ (Independent variables) ประกอบด้วย

1. ความเร็วรอบของสกรู 3 ระดับ
  1. 400 รอบต่อนาที
  2. 500 รอบต่อนาที
  3. 600 รอบต่อนาที
  
2. ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ 3 ระดับ
  1. 16 %
  2. 19 %
  3. 22 %
  
3. ความเร็วรอบใบมีด 3 ระดับ
  1. ไม่มีการตัด
  2. 30 รอบต่อนาที
  3. 60 รอบต่อนาที

### 3.2.2 ตัวแปรตาม (Dependent variables) ประกอบด้วย

1. ความชื้นของเอ็กซ์ทราแคท
2. ความหนาแน่นรวม
3. ความสามารถในการดูดซับน้ำ
4. ความสามารถในการละลายน้ำ
5. ลักษณะเนื้อสัมผัส
6. อัตราส่วนการขยายตัว

### 3.3 การวางแผนการทดลอง

การหาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวตอบ เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ จากการทดลองและหาสมการแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างปัจจัยที่ใช้ในการทดลองกับค่าที่ได้จากการทดลอง การวิเคราะห์พื้นผิวตอบ มีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ สร้างฟังก์ชันพื้นผิวตอบสนอง และหาระดับของปัจจัยเชิงปริมาณที่เหมาะสม ที่ทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด [15] การวางแผน

การทดลองใช้แบบ Box-Behnken Design โดยแบ่งเป็น 3 ระดับ ประกอบด้วย 15 การทดลอง ที่สภาวะต่าง ๆ กัน ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงระดับตัวแปร Box-Behnken Design

Variable	Level		
	1	0	-1
ความเร็วรอบสกรู(rpm), $X_1$	400	500	600
ความชื้นวัตถุดิบ(%), $X_2$	16	19	22
ความเร็วรอบใบมีด(rpm), $X_3$	0	30	60

ตารางที่ 3.2 แสดงแผนการทดลองแบบ Box-Behnken Design

Run no.	Coded value		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

$X_1$ , ความเร็วรอบสกรู (rpm)

$X_2$ , ความชื้นวัตถุดิบ (%)

$X_3$ , ความเร็วรอบใบมีด (rpm)

### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.4.1 การเตรียมตัวอย่างวัตถุดิบ

1. นำตัวอย่างปลายข้าวพันธุ์เหลืองประทิวไปบดด้วยเครื่องบดแบบ Single disc mill และหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบโดยใช้วิธี Screen Analysis ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบ เท่ากับ 0.576 มิลลิเมตร ตัวอย่างที่ผ่านการบดถูกเก็บในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีน ที่อุณหภูมิ  $5 \pm 1^{\circ}\text{C}$

2. ปรับค่าความชื้นของวัตถุดิบจากการทำสมดุลมวลสาร โดยปรับอัตราการป้อนของน้ำที่ป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ดังนี้

การปรับความชื้นของวัตถุดิบ จากการทำสมดุลมวลสาร ดังนี้

ปลายข้าวมีความชื้นเริ่มต้น = 11.50 %

อัตราการป้อนวัตถุดิบ = 0.487 kg/min

ปริมาณน้ำในวัตถุดิบ = 0.0548 kg/min

การปรับความชื้นของวัตถุดิบ เท่ากับ 19 %

กำหนดให้อัตราการป้อนน้ำเข้าสู่กระบวนการ = w kg/min

$$19 = \frac{(0.0548 + w)}{(0.4870 + w)} \times 100 \quad (3.1)$$

$$w = 0.0466 \text{ kg/min}$$

ดังนั้น ในการป้อนน้ำเข้าสู่กระบวนการที่ 0.0466 kg/min ทำให้วัตถุดิบในกระบวนการมีความชื้น เท่ากับ 19 %

#### 3.4.2 กระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน

1. เตรียมตัวอย่างปลายข้าวที่ผ่านการบด 20 กิโลกรัม

2. ปรับสภาวะการทำงานของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ ที่สภาวะการทดลองต่างๆดังตารางที่ 3.2 โดยเอ็กซ์ทรูเดอร์ที่ใช้ เป็นเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ค่า L/D เท่ากับ 9:1 เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู 34.6 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูหน้าแปลนเท่ากับ 4 มิลลิเมตร อัตราการป้อนวัตถุดิบ เท่ากับ 0.487 kg/min. อุณหภูมิเอ็กซ์ทรูเดอร์  $124 \pm 3^{\circ}\text{C}$

3. เมื่อระบบอยู่ในสภาวะที่กำหนด เริ่มป้อนวัตถุดิบที่เตรียมไว้ข้างต้นเข้าสู่กระบวนการ

4. ดำเนินการผลิตกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล

5. นำผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ดังแสดงในหัวข้อ 3.2.2

### 3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

#### 3.5.1 การหาขนาดอนุภาค

ขั้นตอนการวิเคราะห์วิธี Screen Analysis

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ต้องการหาขนาด 100 กรัม
2. จัดเรียงตะแกรงคัดขนาด (sieve) โดยให้ตะแกรงที่มีขนาด mesh no. น้อยที่สุด อยู่ชั้น

บนสุด

3. นำตัวอย่างที่ชั่งน้ำหนักข้างต้น เทลงบนตะแกรงคัดขนาดชั้นบนสุด ปิดฝาครอบ
4. นำตะแกรงทั้งหมดเข้าเครื่องคัดขนาด (Sieve Shaker)
5. เปิดเครื่องเขย่า (ปรับให้การสั่นเป็นลักษณะ 3 มิติ) ตั้งเวลาการเขย่า 20 นาที
6. บันทึกน้ำหนักตัวอย่างบนตะแกรงแต่ละชั้นหลังการเขย่า
7. คำนวณหาขนาดอนุภาค โดย

$$Ds = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (Xi / Dpi)} \quad (3.2)$$

#### 3.5.2 ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture content, MC)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ [16]

1. ชั่งภาชนะอลูมิเนียมพร้อมฝาเปล่า บันทึกน้ำหนัก
2. นำตัวอย่างปลายข้าวที่ผ่านการบด 2 กรัม (ผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh) บรรจุลงในภาชนะอลูมิเนียมที่เตรียมไว้
3. นำภาชนะอลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างข้างต้น เข้าตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. นำภาชนะอลูมิเนียมพร้อมตัวอย่าง วางในโถดูดความชื้น เป็นเวลา 20 นาที
5. ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง หลังผ่านการอบ
6. คำนวณ ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์

$$MC (\%) = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100 \quad (3.3)$$

### 3.5.3 ค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ (Bulk density, BD)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ [17]

1. นำผลิตภัณฑ์ใส่ในภาชนะทรงกระบอกที่ทราบปริมาตรที่แน่นอน (เกลี่ยส่วนที่เกินของผลิตภัณฑ์ออก)
2. ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ในภาชนะทรงกระบอก
3. คำนวณค่า Bulk density โดย

$$BD (\text{g/cm}^3) = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ในภาชนะทรงกระบอก}}{\text{ปริมาตรทรงกระบอก}} \quad (3.4)$$

### 3.5.4 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water absorption index, WAI) และความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility index, WSI)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ [18]

1. ชั่งตัวอย่างที่ผ่านการบด 2.5 กรัม (ผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh)
2. เติมน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ลงในหลอดเซนตริฟิวส์ (Centrifuge) ขนาด 50 มิลลิลิตร บนที่ก้นน้ำหนัก
3. เทตัวอย่างลงในหลอดเซนตริฟิวส์ (Centrifuge) ที่เติมน้ำกลั่นแล้วข้างต้น พร้อมทั้งกวนอย่างสม่ำเสมอ 30 นาที
4. เปิดเครื่องเซนตริฟิวส์พร้อมทั้งบรรจุหลอดเซนตริฟิวส์ลงในตัวเครื่อง ตั้งค่าความเร็ว เท่ากับ  $3000 \times g$  ปั่นเหวี่ยงแยกเป็นเวลา 10 นาที
5. แยกของเหลวใสส่วนบนและตะกอนที่อยู่ด้านล่างของหลอดเซนตริฟิวส์ ชั่งน้ำหนัก คำนวณค่า WAI

$$WAI (\text{g/g}) = \frac{\text{น้ำหนักตะกอน}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \quad (3.5)$$

6. นำของเหลวส่วนใสมาทำให้แห้ง โดยอบที่อุณหภูมิ  $105^\circ\text{C}$  2 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณของแข็งที่ละลายได้

$$WSI (\%) = \frac{\text{น้ำหนักของแข็งที่ละลายในส่วนใส}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \times 100 \quad (3.6)$$

### 3.5.5 แรงแตกหักสูงสุด (Breaking Strength)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ติดตั้งหัวกดชนิด P/2 2 mm. Cylinder probe- Stainless steel และฐานรองเข้ากับตัว Texture Analyzer เปิดโปรแกรม Texture Exponent
2. นำตัวอย่างผลิตภัณฑ์มา 1 ชิ้น ชั่งน้ำหนัก กำหนดตำแหน่งบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ 3 จุด พร้อมทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่ง
3. นำชิ้นตัวอย่าง วางในตำแหน่งที่กำหนดคบริเวณฐานเครื่อง Texture Analyzer
4. ปรับตั้งค่าการทำงาน โดยตั้งค่าความเร็วของหัววัดเริ่มต้นเท่ากับ 5 mm/s ความเร็วขณะกดเป็น 1 mm. แรงกดเริ่มต้นที่ 5 g. Acquisition rate เป็น 400 pps. ปรับตั้งการแสดงผลกราฟ โดยแกน X เป็นเวลา (S) และแกน Y เป็นแรงกด (g)
5. วัดค่าแรงกดตัวสูงสุดของผลิตภัณฑ์ 3 ครั้ง บันทึกผล

### 3.5.6 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์ (Expansion ratio, ER)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ [19]

$$ER = \frac{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์}}{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าแปลน}} \quad (3.7)$$

การทดลอง วัดค่าเฉลี่ยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลิตภัณฑ์ 10 ตัวอย่าง

## 3.6 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ผลการทดลองใช้วิธี Response Surface Methodology โดยสมการโพลีโนเมียลอันดับที่ 2 ถูกนำมาใช้อธิบายผลของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตาม ดังนี้

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i=1}^3 b_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j=1}^3 b_{ij} X_i X_j \quad (3.8)$$

เมื่อ	$Y$	=	ตัวแปรตาม ได้แก่ ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดท ความหนาแน่นรวม ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการละลายน้ำ อัตราส่วนการขยายตัว ลักษณะเนื้อสัมผัส
	$X_i, X_j$	=	ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ความเร็วรอบสกรู ปริมาณความชื้นวัตถุดิบ ความเร็วรอบใบมีด
	$b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปร

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของปลายข้าว

วัตถุดิบปลายข้าวพันธุ์เหลืองประทิว มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2 มิลลิเมตร หลังจากนำไปบดด้วยเครื่อง Single disc mill และหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบโดยใช้วิธี Screen Analysis พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบ มีค่าเท่ากับ 0.576 มิลลิเมตร ความชื้นเริ่มต้นของปลายข้าว เท่ากับ 11.50 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างที่ผ่านการบดถูกเก็บในถุงพลาสติกโพลีเอทิลีนที่อุณหภูมิ  $5 \pm 1$  องศาเซลเซียส

#### 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

##### 4.2.1 ความชื้นของผลิตภัณฑ์ (Moisture Content, MC)

ความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 8.20-15.0 % ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท ถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ผลิตภัณฑ์มีความชื้นอยู่ระหว่าง 6.68-14.60 % เมื่อนำความชื้นของผลิตภัณฑ์มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการ โพลีโนเมียล อันดับที่ 2 กับที่สภาวะการผลิตต่างๆ ที่ความเร็วรอบสกรู ( $X_1$ ), ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ( $X_2$ ) และความเร็วรอบใบมีด ( $X_3$ ) พบว่า มีความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$\begin{aligned} MC = & -45.87400369 + (0.03092593)X_1 + (4.640348343)X_2 - (0.085381067)X_3 - \\ & (0.000041072)X_1^2 - (0.09314615)X_2^2 + (0.000749319)X_3^2 - (0.000207536)X_1X_2 + \\ & (0.000208992)X_1X_3 - (0.003557064)X_2X_3 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0.9110 \quad \text{Standard Error} = 1.1635 \quad p \leq 0.05$$

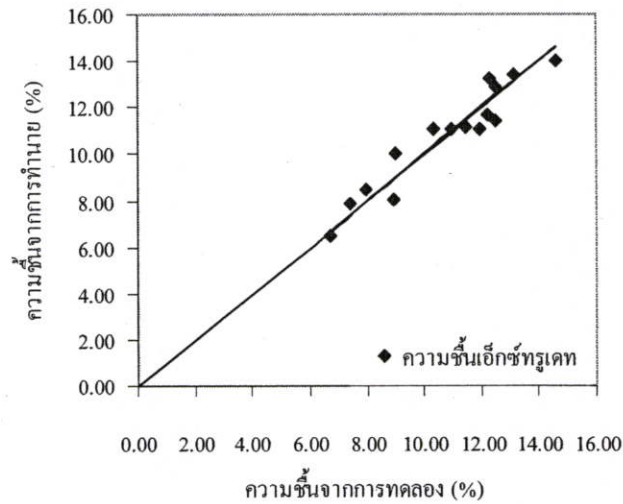
จากข้อมูล พบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดี(แสดงดังสมการที่ 4.1) โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4.1 แสดงดังรูปที่ 4.1

จากการวิเคราะห์ข้อมูล ความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดทแปรผกผันกับความเร็วรอบสกรู เมื่อเพิ่มความเร็วยิ่งทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างวัตถุดิบกับผนังบาร์เรลเพิ่มมากขึ้น มีผลให้อุณหภูมิ

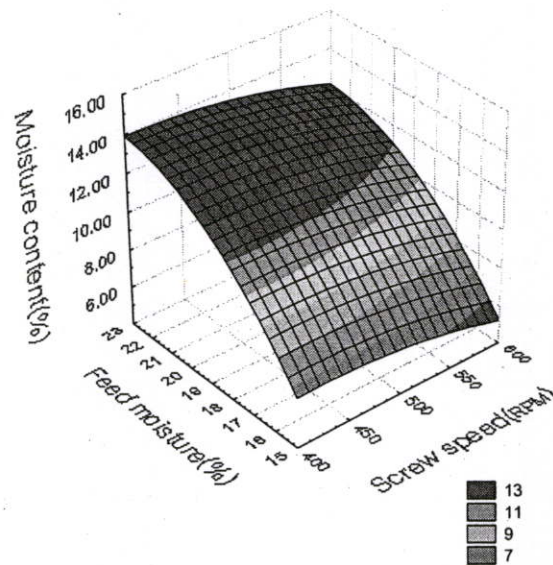
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เอ็กซัทรูเดท

Run no.	สภาวะการผลิต			Moisture content, (%)	Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	WAI (g/g)	WSI (%)	Breaking strength, P/2 Probe,(g/cm <sup>2</sup> )	Expansion ratio	crispness	Hardness, g/mm <sup>2</sup>
	Screw speed,rpm	Cutter speed,rpm	Feed moisture,%								
1	400	30	16	7.381	0.073	4.427	47.152	1624.200	2.138	71.000	2000.681
2	600	30	16	6.678	0.071	4.998	32.702	2049.850	2.573	88.000	3112.684
3	400	30	22	13.169	0.143	6.457	32.643	2330.950	2.243	42.000	3433.550
4	600	30	22	12.218	0.131	6.446	32.688	2285.800	3.121	79.000	1486.362
5	400	0	19	12.536	0.171	5.573	27.057	2296.500	2.204	56.330	2421.743
6	600	0	19	8.981	0.140	5.847	33.061	1791.950	3.564	64.000	2735.239
7	400	60	19	12.513	0.134	3.155	42.099	1575.200	2.786	128.330	1330.789
8	600	60	19	11.467	0.126	5.861	24.149	1996.850	4.016	54.660	2478.487
9	500	0	16	8.943	0.079	5.270	32.515	1780.650	2.276	55.660	2825.534
10	500	0	22	14.603	0.132	4.916	40.993	1896.950	1.947	42.660	3519.921
11	500	60	16	7.931	0.092	6.225	31.825	1483.400	2.558	134.000	1788.152
12	500	60	22	12.310	0.122	6.385	32.400	1884.750	2.776	81.500	1991.542
13	500	30	19	10.995	0.124	5.392	44.912	1765.550	3.488	118.000	2142.291
14	500	30	19	10.363	0.130	5.403	36.650	1955.650	3.534	131.000	2016.384
15	500	30	19	11.973	0.124	5.578	39.573	1896.000	3.508	134.000	2104.393

และความดันภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์เพิ่มสูงขึ้น โมเลกุลของน้ำในเม็ดแป้งถูกทำให้ร้อนและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอออกสู่บรรยากาศ ทำให้เอ็กซ์ทรูเดทมีความชื้นลดลง ส่วนความเร็วรอบใบมีดในการตัดชิ้นเอ็กซ์ทรูเดท ส่งผลกระทบน้อยมากต่อปริมาณความชื้นของเอ็กซ์ทรูเดท และเมื่อนำผลการทดลองมาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรอยู่ในเกณฑ์ที่ดี ( $p < 0.05$ )



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายนในสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.2 ผลของค่าความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรู ต่อความชื้นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

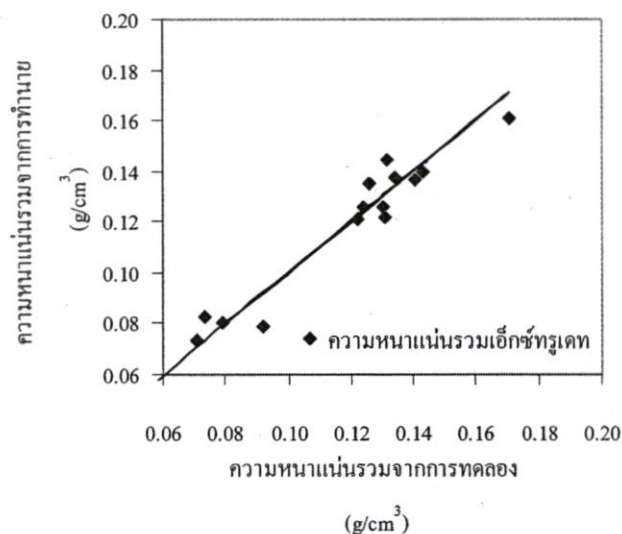
#### 4.2.2 ความหนาแน่นรวม (Bulk Density, BD)

ค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท ที่ได้จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.071-0.143 g/cm<sup>3</sup> จากการนำค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการ โพลีโนเมียล อันดับที่ 2 กับสภาวะการผลิตต่างๆ ที่ความเร็วรอบสกรู (X<sub>1</sub>), ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ (X<sub>2</sub>) และความเร็วรอบใบมีด (X<sub>3</sub>) ได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$BD = -1.051601034 - (0.000725439)X_1 + (0.137102485)X_2 - (0.00052594)X_3 + (0.000000750153)X_1^2 - (0.003224367)X_2^2 + (0.0000101304)X_3^2 - (0.00000767222)X_1X_2 + (0.00000182111)X_1X_3 - (0.0000629537)X_2X_3 \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0.9330 \quad \text{Standard Error} = 0.0122 \quad p \leq 0.05$$

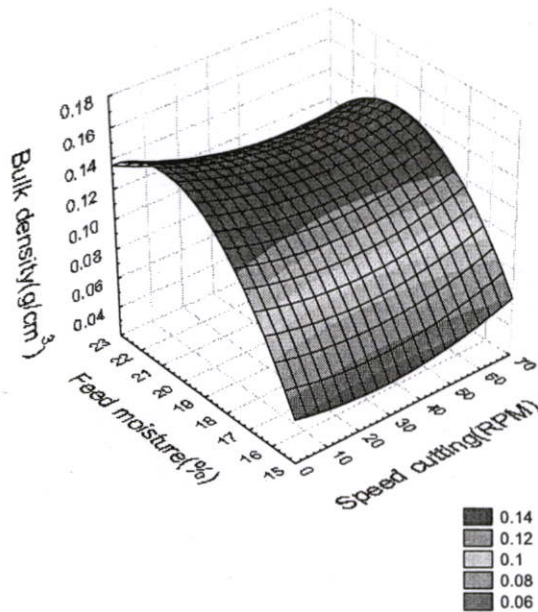
จากข้อมูล พบว่า ค่าความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดี (แสดงดังสมการที่ 4.2) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4.2 แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.2

จากการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่า ค่าความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทแปรผกผันกับความเร็วยรอบสกรูและแปรผัน โดยตรงกับปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ[20] เนื่องจาก ในสภาวะที่ความเร็วยรอบของสกรูมีค่าสูง เกิดการส่งผ่านพลังงานความร้อนไปยังวัตถุดิบ ทำให้วัตถุดิบมี

อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เมื่อวัตถุดิบถูกอัดผ่านหน้าแปลน ปริมาณน้ำที่อยู่ภายในเนื้อวัตถุดิบ ระเหยสู่บรรยากาศอย่างรวดเร็ว ได้เอ็กซ์ทราเกตที่มีความชื้นต่ำ ลักษณะโครงสร้างโปร่งพรุน ความหนาแน่นรวมจึงมีค่าต่ำ ทำนองเดียวกับความชื้นเอ็กซ์ทราเกตและอัตราส่วนการขยายตัว พบว่าความเร็รรอบโม่ไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นรวมมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงผลของความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็รรอบโม่มีด ต่อความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเกต

#### 4.2.3 ความสามารถในการดูดซับน้ำ (Water Absorption Index, WAI)

ความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเกต จากเครื่องเอ็กซ์ทราเกตเตอร์แบบสกรูเดี่ยว ที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.15-6.46 g/g เมื่อนำความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราเกต มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการ โพลีโนเมียล อันดับที่ 2 กับสภาวะการผลิตต่างๆ ที่ความเร็รรอบสกรู ( $X_1$ ), ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ( $X_2$ ) และความเร็รรอบโม่มีด ( $X_3$ ) ได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ

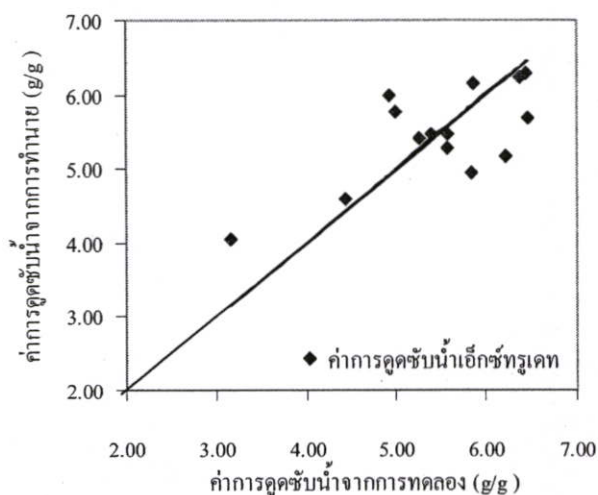
$$\begin{aligned} \text{WAI} = & 8.26951193 + (0.030860518)X_1 - (1.171026991)X_2 - (0.120608694)X_3 - \\ & (0.0000232927)X_1^2 + (0.039674828)X_2^2 - (0.000128857)X_3^2 - \\ & (0.000485311)X_1X_2 + (0.000202604)X_1X_3 + (0.001427808)X_2X_3 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0.4986$$

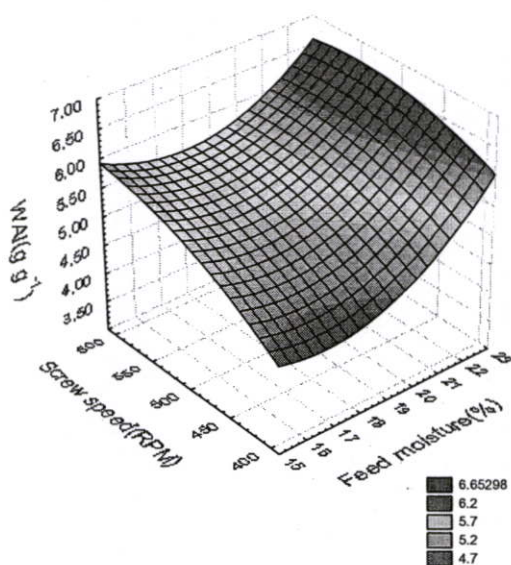
$$\text{Standard Error} = 1.0346$$

$$p \geq 0.05$$

จากการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ (แสดงดังสมการที่ 4.3) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4.3 แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.3



รูปที่ 4.6 ผลของความเร็วยรอบสกรู ความชื้นของวัตถุดิบ ต่อความสามารถในดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเกต

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า ค่าความสามารถในดูดซับน้ำสูงสุด เกิดขึ้นที่ระดับความชื้นของวัตถุดิบ 22 % ความเร็วยรอบสกรู 600 rpm ความเร็วใบมีด 30 rpm ส่วนความเร็วยรอบใบมีดมีผล

กระทบเพียงเล็กน้อยต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของเอ็กซ์ทรูเดท แต่อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการโพลีโนเมียล อันดับที่ 2 มีค่าสหสัมพันธ์ของค่าตัวแปรกับความสามารถในการดูดซับน้ำอยู่ในเกณฑ์ต่ำ ( $p \geq 0.05$ )

#### 4.2.4 ความสามารถในการละลายน้ำ (Water Solubility Index, WSI)

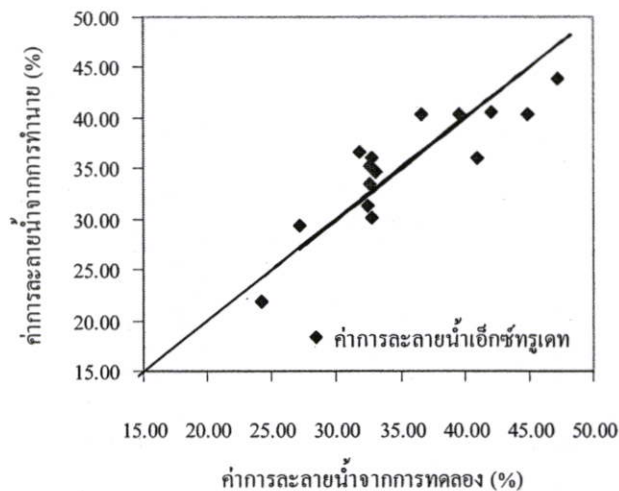
ค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท จากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวที่สถานะต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 24.15-47.15 % เมื่อนำค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการโพลีโนเมียลอันดับที่ 2 กับสถานะการผลิตต่างๆ ที่ความเร็วรอบสกรู ( $X_1$ ), ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ( $X_2$ ) และความเร็วรอบใบมีด ( $X_3$ ) ได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{WSI} = & 17.1298431 + (0.143604685)X_1 - (2.990656662)X_2 + (1.757023321)X_3 - \\ & (0.000346169)X_1^2 - (0.068900998)X_2^2 - (0.005916607)X_3^2 + (0.012079272)X_1X_2 - \\ & (0.001996036)X_1X_3 - (0.021954939)X_2X_3 \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$R^2 = 0.7663$$

$$\text{Standard Error} = 5.1966$$

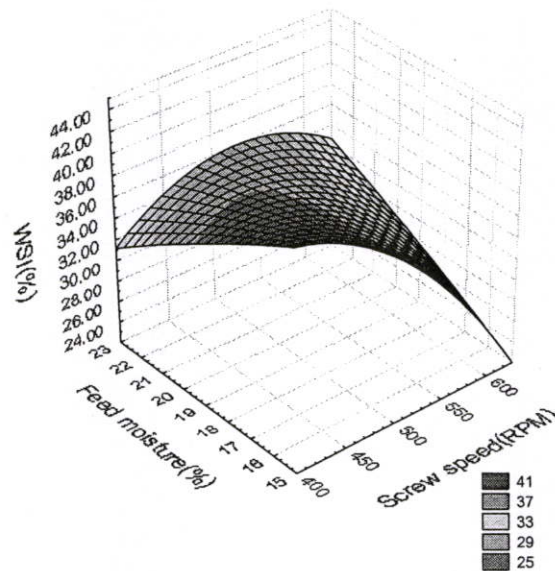
$$p \geq 0.1$$



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.4

จากการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง

(แสดงดังสมการที่ 4.4) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4.4 แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 แสดงผลของความเร็วยรอบสกรู ความชื้นของวัตถุดิบ ต่อความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

จากการศึกษา พบว่า การเพิ่มความเร็วยรอบสกรู และความชื้นวัตถุดิบจะมีผลให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำของเอ็กซ์ทรูเดทมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 [22] เนื่องจาก ความสามารถในการละลายน้ำเป็นปริมาณของสาร โพลีแซคคาไรด์ ที่ละลายออกจากเนื้อแป้งหลังจากผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน เป็นการเปลี่ยนแปลงสภาพของวัตถุดิบไปเป็นแป้งสุก ที่สามารถย่อยได้ เรียกว่า การเกิดเจลาติไนซ์เซชัน กระบวนการผลิตแบบเอ็กซ์ทรูชันทำให้เกิดการเจลาติไนซ์เซชันในเนื้อแป้งที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ [23]

อุณหภูมิของเอ็กซ์ทรูเดอร์และค่าความชื้นของวัตถุดิบ เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดเจลาติไนซ์เซชัน ทำให้แป้งเกิดการเจลาติไนซ์เพิ่มขึ้น เมื่อระดับความชื้นของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการลดลง ทำให้ปริมาณแป้งที่ละลายได้มีค่าสูงขึ้น[23] ความเร็วยรอบของใบมีดในการตัดเอ็กซ์ทรูเดทบริเวณหน้าแปลนมีผลเล็กน้อยต่อความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

#### 4.2.5 ค่าความแข็ง (Hardness)

ค่าความแข็งจะแสดงถึงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท โดยวัดจากค่าแรงที่ใช้ในการกดทะลุผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท ด้วยเครื่อง Texture Analyzer ค่าความแข็งที่ได้ มีค่าอยู่ระหว่าง

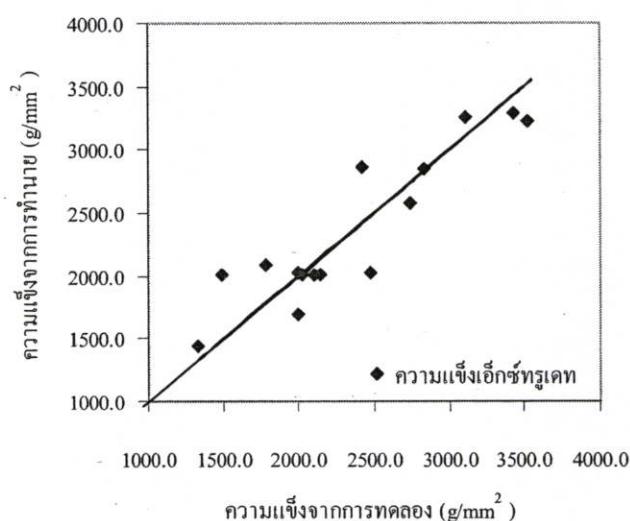
1330.7 - 2330.9 g/mm<sup>2</sup> เมื่อนำค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้ มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการ โพลีโนเมียล อันดับที่ 2 กับสภาวะการผลิตต่างๆ ที่ความเร็วรอบสกรู ( $X_1$ ), ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ( $X_2$ ) และความเร็วรอบใบมีด ( $X_3$ ) ได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{Hardness} = & (31.6823074)X_1 - (586.8597292)X_2 - (35.57642317)X_3 + (0.011793211)X_1^2 \\ & + (48.24755103)X_2^2 + (0.109661976)X_3^2 - (2.363705263)X_1X_2 + \\ & (0.072447659)X_1X_3 - (1.240133786)X_2X_3 \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$R^2 = 0.9883$$

$$\text{Standard Error} = 417.6348$$

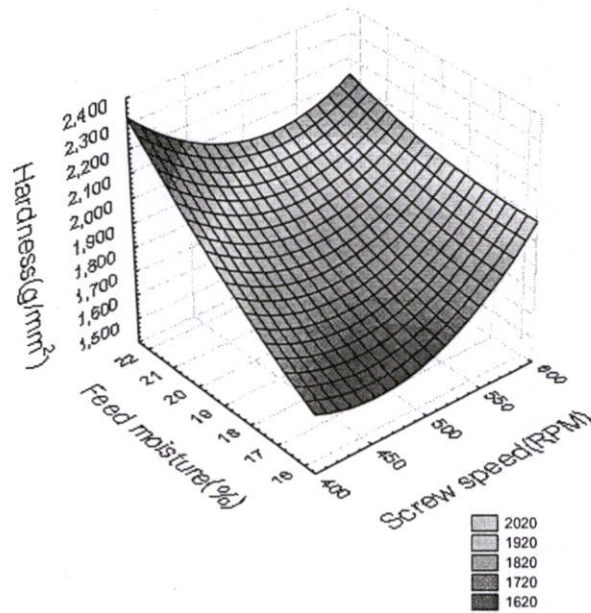
$$p \leq 0.01$$



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายนในสมการที่ 4.5

จากการเปรียบเทียบค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายน พบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดี (แสดงดังสมการที่ 4.5) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4.5 แสดงดังรูปที่ 4.9

จากการศึกษา พบว่า ความเร็วรอบสกรู ความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบใบมีดในช่วงที่ศึกษามีผลต่อค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า ที่ระดับความชื้นของวัตถุดิบ 22 % ความเร็วรอบสกรู 600 rpm ความเร็วใบมีด 30 rpm ความแข็งของผลิตภัณฑ์จะมีค่าสูงที่สุด ความชื้นของวัตถุดิบมีผลให้ความหนืดของแป้งมีค่าลดลงได้เอ็กซ์ทรูเดทที่มีการขยายตัวต่ำ [24] เนื่องจาก ลักษณะ โครงสร้างของเอ็กซ์ทรูเดทที่มีความโปร่งพรุนน้อยลง ทำให้ความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น [25]



รูปที่ 4.10 ผลของความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรูต่อความแข็งของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

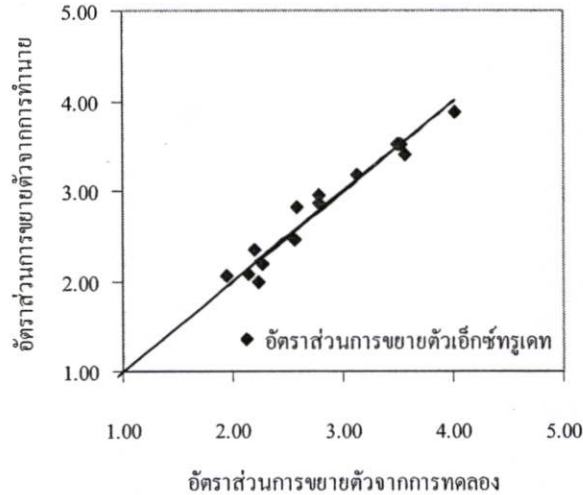
#### 4.2.6 อัตราส่วนการขยายตัว (Expansion Ratio, ER)

อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยวที่สภาวะต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 1.95-4.02 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูหน้าแปลน เมื่อนำค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการโพลีโนเมียล อันดับที่ 2 กับสภาวะการผลิตต่างๆ ที่ความเร็วรอบสกรู ( $X_1$ ), ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ( $X_2$ ) และความเร็วรอบใบมีด ( $X_3$ ) ได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$ER = -33.6307338 + (0.010080208)X_1 + (3.475988426)X_2 + (0.002058333)X_3 - (0.00001189792)X_1^2 - (0.09694213)X_2^2 - (0.000276227)X_3^2 + (0.000369583)X_1X_2 - (0.000010833)X_1X_3 + (0.001519444)X_2X_3 \quad (4.6)$$

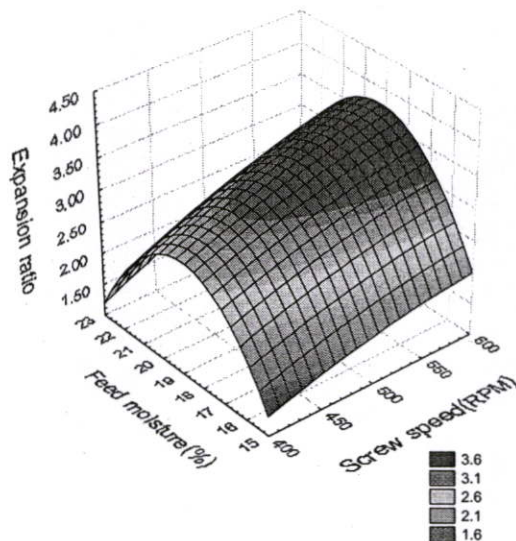
$$R^2 = 0.9524 \quad \text{Standard Error} = 0.2362 \quad p \leq 0.01$$

จากการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากการทดลอง และจากการทำนาย พบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ดี ( $p \leq 0.01$ ) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4.6 แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.6

จากการศึกษา พบว่า เมื่อความเร็วรอบสกรูสูงขึ้นเอ็กซ์ทรูเดทมีการขยายตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยังทำให้แรงดันในเนื้อวัตถุดิบเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออัดผ่านรูหน้าแปลน น้ำในเนื้อวัตถุดิบที่หลอมละลายจะเคลื่อนสู่บรรยากาศได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการพองตัวของเอ็กซ์ทรูเดทเพิ่มขึ้น สำหรับความชื้นของวัตถุดิบ นับเป็นตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อค่าการขยายตัวของเอ็กซ์ทรูเดท เนื่องจากการเพิ่มความชื้นมีผลกระทบต่อโครงสร้าง โมเลกุลของแป้งข้าวและทำให้ความยืดหยุ่น



รูปที่ 4.12 แสดงผลของความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรูต่อค่าอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

ของแป้งข้าวมีค่าลดลง จึงทำให้การพองตัวของเอ็กซ์ทรูเดทมีค่าลดลง [26] ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Faubion [27] และ Ding [22] ขณะที่ค่าความเร็วรอบใบมีด มีผลต่อค่าการอัดราขยายตัวเพียงเล็กน้อย โดยรูปที่ 4.12 แสดงสถานะที่เอ็กซ์ทรูเดทเกิดการขยายตัวสูงสุด คือ ที่ตำแหน่งความชื้นของวัตถุดิบ 19 % ความเร็วรอบสกรู 600 rpm ความเร็วใบมีด 60 rpm

#### 4.2.7 ความกรอบ (Crispness)

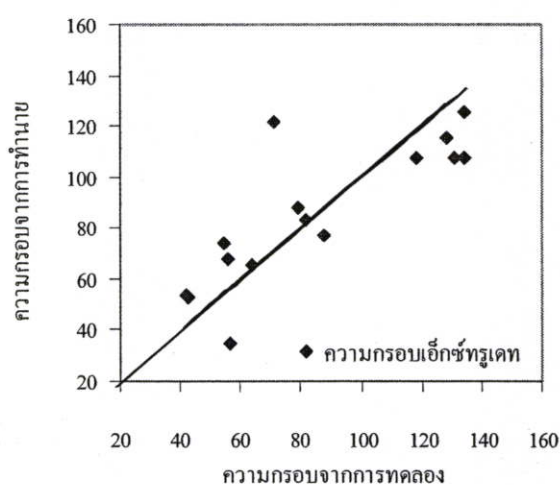
ความกรอบ คือ จำนวนฟิคถึงฟิคสูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture analyzer โดยความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทจากเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว ที่สถานะต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 42 - 134 เมื่อนำค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท มาสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการ โพลีโนเมียล อันดับที่ 2 กับสถานะการผลิตต่างๆ ที่ความเร็วรอบสกรู ( $X_1$ ), ความชื้นเริ่มต้นของวัตถุดิบ ( $X_2$ ) และความเร็วรอบใบมีด ( $X_3$ ) ได้ความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$\begin{aligned} \text{Crispness} = & (0.516656471)X_1 + (-8.130523857)X_2 + (6.463823426)X_3 - (0.001618376)X_1^2 \\ & - (0.720990927)X_2^2 - (0.021063705)X_3^2 + (0.066051596)X_1X_2 - \\ & (0.005998571)X_1X_3 - (0.076798936)X_2X_3 \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0.9557$$

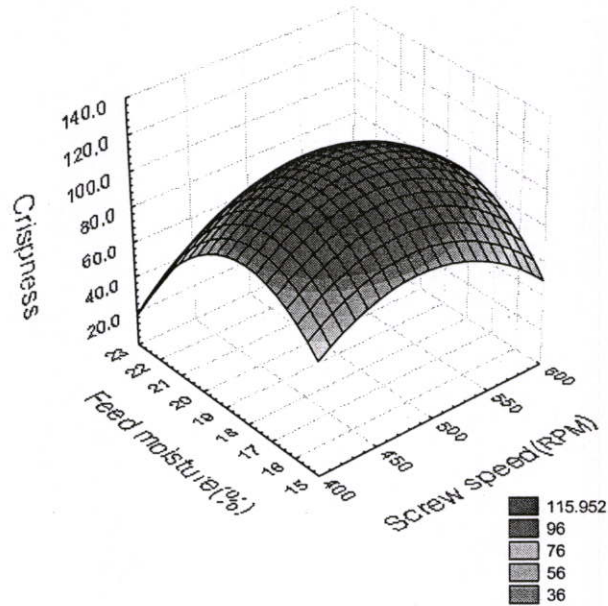
$$\text{Standard Error} = 30.4805$$

$$p \leq 0.05$$



รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนายในสมการที่ 4.7

จากการเปรียบเทียบค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้มีค่าสหสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดี (แสดงดังสมการที่ 4.7) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากสมการที่ 4.7 แสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.14 ผลของความชื้นของวัตถุดิบ ความเร็วรอบสกรูต่อความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่า ที่ระดับความชื้นของวัตถุดิบ 19 % ความเร็วรอบสกรู 500 rpm ความเร็วใบมีด 30 rpm ให้ค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดทที่สูงสุด โดยความชื้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบของสกรู เป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท ขณะที่ความเร็วรอบใบมีด มีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความกรอบของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การศึกษากระบวนการผลิตแบบอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้วัตถุดิบจากปลายข้าว(พันธุ์เหลืองประทิว) อาศัยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบสกรูเดี่ยว ปัจจัยที่ศึกษา ประกอบด้วย ความเร็วรอบของสกรู ปริมาณ ความชื้นของวัตถุดิบและความเร็วรอบใบมีด ผลการทดลองสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ความเร็วรอบของสกรู ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ ขณะที่มีความเร็วรอบใบมีดเป็นปัจจัยที่ส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบสมการ โพลีโนเมียลอันดับที่ 2 สามารถนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ดี เช่น ความชื้น ความหนาแน่นรวม ความสามารถในการละลายน้ำ อัตราส่วนการขยายตัว ลักษณะเนื้อสัมผัส ขณะที่ความสามารถในการดูดซับน้ำมีค่าสัมพันธ์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ

3. การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองสามารถใช้กำหนดเป็นแนวทางการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณลักษณะตามต้องการได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สภาหอการค้าแห่งประเทศไทย. “ข้อมูลการส่งออกข้าวไทย.” [Online]. 2549
- [2] Mercier, C., Charbonniere, R., Grebaut, J. “Formation of amylose lipid complexes by twin-screw extrusion cooking of manioc starch.” **Cereal Chemistry**, 1980. pp. 4-9
- [3] กระทรวงอุตสาหกรรม. “ข้าวหอมมะลิไทย หนึ่งในเดียวในโลก.” [Online]. [www.smethai.net](http://www.smethai.net). 2
- [4] กรมวิชาการเกษตร. “คุณภาพข้าวและการตรวจสอบข้าวปนในข้าวหอมมะลิไทย.” 2545
- [5] กล้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ.เทคโนโลยีแปรรูป.พิมพ์ครั้งที่ 3 : กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2546
- [6] Juliano, B.O. 1979. **The Chemical Basis of Rice Grain Quality**. Proc.Workshop on Chemical Aspects of Rice Grain Quality. 1979. pp. 69-90
- [7] Halick, J.V. “A Note on the Determination of Gelatinization Temperatures of rice Varies.” **Cereal Chem.**, 1960. pp. 670-672
- [8] วิโรจน์ ณ ระนองและอัมมาร สยามวาลา. **ประมวลความรู้เรื่องข้าว**. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. 2533
- [9] อรอนงค์ นัยวิกุล. **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2547
- [10] Gregory Tucker., Harley Marson. “The Effect of Extrusion Conditions on the Functional and Physical Properties of Wheat-based Expanded Snack.” **Carbohydrate Polymers.**, Volume 20. Issue 1. 2004. pp. 17-23
- [11] Suwendu Bhattacharya., Maya Prakash. “Extrusion Blends of rice and Chick Pea Flours : A Response Surface Analysis.” **Journal of Food Engineering.**, Volume 21. Issue 3. 12006. pp. 315-330
- [12] ชวลิต โชติวิจิต,นิวัฒน์ ถนอมรอด และลออ พุทธทอง.2549.การศึกษาเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ สำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก. คณะวิศวกรรมศาสตร์.สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [13] รุจิรัตน์ แก้วเรืองฤทธิ์ และศิรินทร์ เมฆอรุณวิทยา.2539. “การศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของข้าวเจ้ากับแป้งสาลีและข้าวเจ้ากับคอร์นกรีทในการผลิตเอ็กซ์ทรูเดท” ปัญหาพิเศษ.คณะเทคโนโลยีเกษตร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [14] ปัทมา ผิวบาง,เทิดศักดิ์ กุปติมิตร, วิภา เจริญวิทย์ขจร. “ผลของอุณหภูมิบาร์เรล ความเร็วรอบและความชื้นต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์อาหารจากปลายข้าวที่ผลิตด้วยกระบวนการ

เอ็กซ์ทรูชัน” ปรินซิปลินพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547

- [15] Khuri, A. I., J.A.Cornell. **Response Surface Designs and Analyses**. New York : Marcel Dekker ,Inc. 1987
- [16] AOAC. **Official methods of analysis**. 14th ED. Washington : Association of Official Analytical Chemists. 1990
- [17] Harper, J.M. **Extrusion of foods**. Vol.II. Boca Raton. : CRC Press. 1981
- [18] Anderson, R.A. “Water absorption and solubility and amylograph characteristics of roll-cooked small grain products.” **Cereal Chemistry**., 1982. pp. 265-269
- [19] Pan, Z., Zhang, S.,Jane, J. “Effects of extrusion variables and chemicals on the properties of starch-based binders and processing conditions.” **Cereal Chemistry**., 1998. pp. 541-546
- [20] Anastase Hagenimana., Xiaolin Ding., Tao Fang. “Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking.” **Cereal Science**., 2006. pp. 38-46
- [21] Anderson,R.A., Conway,H.F., Pfeifer,V.F., Griffin ,E.L. “Gelatinization of corn grits by roll and extrusion cooking.” **Cereal Science Today**., 1969. pp. 14 -12
- [22] Qing-Bo Ding., Paul Ainsworth., Gregory Tucker., Hayley Marson. “The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks.” **Food engineering**., 2005. pp. 66-74
- [23] Kirby, A.R., Ollett, A.L., Parker, R., Smith, A.C. “An experimental study of screw configuration effects in the twin-screw extrusion-cooking of maize grits.” **Journal of Food Engineering**.,1988. pp. 247-272
- [24] Liu, Y., Hsieh, F., Heymann, H., Huff, H.E. “Effect of process conditions on the physical and sensory properties of extruded oat-corn puff.” **Journal of Food Science**.,2000. pp. 1253-1259
- [25] Badrie, N., Mellowes, W.A. “Texture and microstructure of cassava flour extrudate.” **Journal of Food Science**.,1991. pp. 1319-1322.
- [26] Ilo, S., Liu, Y., Berghofer, E. “Extrusion cooking of rice flour and amaranth blends. **Journal of Food Engineering**.,1999. pp. 79-88
- [27] Faubion, J. M., Hosney, R.C. “High-temperature short-time extrusion cooking of wheat starch and flour.” **Cereal Chemistry**., 1982. pp. 529-533

- [28] S . Godavarti ; M . V . Karwe. "Determination of Specific Mechanical Energy Distribution on a Twin-Screw Extruder" **J. agric. Engng Res.**, 1997. pp. 277-287

**ภาคผนวก**

**ภาคผนวก ก**

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองของวัตถุบิเริ่มต้น(ปลายข้าวที่ผ่านการบด)

- ขนาดอนุภาคโดยวิธี Screen Analysis(ASTM)

ตารางที่ ก.1 การหาอนุภาคเฉลี่ยโดยวิธี Screen Analysis (ASTM)

Mesh no.	Dpi (mm.)	W (g)	Xi	Dpi (mm.)	Xi / Dpi
8	2.3600	0.8600	0.0086	2.6800	0.0032
20	0.8500	8.8500	0.0885	1.6050	0.0551
30	0.6000	58.6300	0.5863	0.7250	0.8087
40	0.4250	20.2600	0.2026	0.5130	0.3949
50	0.3000	7.3100	0.0731	0.3630	0.2014
P/C	0.0000	4.0850	0.0409	0.1500	0.2723
รวม	-	99.9950	-	-	1.7357

$D_w$  (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงมวล) = 1.7357 mm.

$D_s$  (เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเชิงปริมาตร/พื้นที่ผิว) = 0.5761 mm.

## ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการทดลองของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

- ปริมาณความชื้น
- ความหนาแน่นรวม
- ความสามารถในการดูดซับน้ำ
- ความสามารถในการละลายน้ำ
- อัตราส่วนการขยายตัว
- ค่าแรงแตกหักของผลิตภัณฑ์
- Profile ของเครื่อง Texture Analyzer

ตารางที่ ข.1 ความชื้นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทราแคท

Run no.	ครั้งที่	น.น.ภาชนะ, g	น.น.ตัวอย่าง(ก่อนอบ),g	น.น.ตัวอย่าง(หลังอบ),g	ความชื้น, %	SD
1	1	18.0213	2.0132	1.8656	7.3316	0.0695
	2	17.9936	2.0054	1.8564	7.4299	
	เฉลี่ย	18.0075	2.0093	1.8610	7.3807	
2	1	17.8082	1.9942	1.8612	6.6693	0.0124
	2	17.8188	2.0069	1.8727	6.6869	
	เฉลี่ย	17.8135	2.0006	1.8670	6.6782	
3	1	17.8623	2.0139	1.7565	12.7812	0.2293
	2	17.5569	2.0068	1.7438	13.1054	
	เฉลี่ย	17.7096	2.0104	1.7456	13.1693	
4	1	17.8516	1.9986	1.7456	12.6589	0.6180
	2	18.0234	2.0365	1.7965	11.7849	
	เฉลี่ย	17.9375	2.0176	1.7711	12.2178	
5	1	17.8567	2.0098	1.7569	12.5833	0.0673
	2	17.9865	2.0075	1.7568	12.4882	
	เฉลี่ย	17.9216	2.0087	1.7569	12.5358	
6	1	18.2242	2.0068	1.8268	8.9695	0.0162
	2	17.9432	2.0317	1.8490	8.9925	
	เฉลี่ย	18.0837	2.0193	1.8379	8.9811	
7	1	18.0235	2.0109	1.7587	12.5416	0.0400
	2	18.1365	2.0048	1.7545	12.4850	
	เฉลี่ย	18.0800	2.0079	1.7566	12.5134	
8	1	18.2236	2.0134	1.7861	11.2894	0.2508
	2	18.0315	2.0096	1.7756	11.6441	
	เฉลี่ย	18.1276	2.0115	1.7809	11.4666	
9	1	17.6936	2.0132	1.8456	8.3251	0.8766
	2	18.0231	2.0011	1.8097	9.5647	
	เฉลี่ย	17.8584	2.0072	1.8277	8.9430	
10	1	18.2365	2.0069	1.7193	14.3306	0.3857
	2	18.1132	2.0012	1.7035	14.8761	
	เฉลี่ย	18.1749	2.0041	1.7114	14.6029	

ตารางที่ ข.1 (ต่อ) ความชื้นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

Run no.	ครั้งที่	น.น.ภาชนะ, g	น.น.ตัวอย่าง(ก่อนอบ),g	น.น.ตัวอย่าง(หลังอบ),g	ความชื้น, %	SD
	1	17.9865	2.0016	1.8497	7.5889	0.4832
11	2	17.8645	2.0012	1.8357	8.2722	
	เฉลี่ย	17.9255	2.0014	1.8427	7.9305	
	1	18.3564	2.0211	1.7752	12.1666	0.2032
12	2	17.9956	2.0098	1.7595	12.4540	
	เฉลี่ย	18.1760	2.0155	1.7674	12.3099	
	1	18.0961	2.0083	1.7852	11.1089	0.1602
13	2	18.2240	2.0152	1.7959	10.8823	
	เฉลี่ย	18.1601	2.0118	1.7906	10.9954	
	1	18.0950	2.0089	1.8034	10.2295	0.1889
14	2	18.0633	2.0073	1.7966	10.4967	
	เฉลี่ย	18.0792	2.0081	1.8000	10.3630	
	1	17.8865	2.0102	1.7730	11.7998	0.2449
15	2	17.8082	2.0138	1.7692	12.1462	
	เฉลี่ย	17.8474	2.0120	1.7711	11.9732	

ตารางที่ ข.2 ความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

Run no.	ตัวอย่าง										Bulk density, (g/cm <sup>3</sup> )	SD
	1		2		3		ค่าเฉลี่ย, (g)	Bulk density, (g/cm <sup>3</sup> )	SD			
	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)						
1	231.52	74.38	229.27	72.13	230.70	73.56	73.3567	0.0734	1.1387			
2	227.83	70.69	228.83	71.69	227.02	69.88	70.7533	0.0708	0.9067			
3	299.90	142.76	297.49	140.35	302.80	145.66	142.9233	0.1429	2.6588			
4	288.68	131.54	286.49	129.35	289.59	132.45	131.1133	0.1311	1.5934			
5	329.25	172.11	328.16	171.02	326.13	168.99	170.7067	0.1707	1.5834			
6	298.45	141.31	298.12	140.98	296.10	138.96	140.4167	0.1404	1.2723			
7	289.62	132.48	292.76	135.62	291.05	133.91	134.0033	0.1340	1.5721			
8	284.04	126.90	281.46	124.32	282.62	125.48	125.5667	0.1256	1.2922			
9	236.28	79.14	235.79	78.65	236.92	79.78	79.1900	0.0792	0.5667			
10	289.95	132.81	287.83	130.69	288.98	131.84	131.7800	0.1318	1.0613			
11	248.60	91.46	247.80	90.66	250.59	93.45	91.8567	0.0919	1.4367			
12	277.56	120.42	280.70	123.56	278.51	121.37	121.7833	0.1218	1.6103			
13	281.68	124.54	279.70	122.56	281.12	123.98	123.6933	0.1237	1.4001			
14	287.30	130.16	289.42	132.28	285.79	128.65	130.3633	0.1304	1.8235			
15	282.44	125.30	281.25	124.11	280.05	122.91	124.1067	0.1241	1.1950			



ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ความสามารถในการละลายน้ำและความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซัทูเคท

Run no.	ครั้งที่	น.น.ของแข็งแห้ง, (g)	น.น.น้ำ, (g)	น.น.หลอด centrifuge, (g)	น.น.ตะกอน, (g)	น.น.แก้วอะลูมิเนียม, (g)	น.น.ของแข็งแห้ง, (g)	WAI (g/g)	WSI (%)	SD, WAI	SD, WSI
7	1	2.5026	30.0114	13.1600	7.8541	10.3683	1.1834	3.1384	47.2868		
	2	2.5012	30.0091	13.0800	7.9352	9.3452	0.9232	3.1726	36.9103		
	เฉลี่ย	2.5019	30.0103	13.1200	7.8947	9.8568	1.0533	3.1555	42.0986	0.0242	7.3373
8	1	2.4983	30.0126	13.0900	14.3652	9.1935	0.5382	5.7500	21.5426		
	2	2.5011	30.0191	13.1700	14.9361	8.6501	0.6692	5.9718	26.7562		
	เฉลี่ย	2.4997	30.0159	13.1300	14.6507	8.9218	0.6037	5.8609	24.1494	0.1569	3.6866
9	1	2.5008	30.0208	13.1400	13.2311	9.1638	0.8416	5.2907	33.6532		
	2	2.4984	30.0045	13.1400	13.1139	9.1010	0.7839	5.2489	31.3761		
	เฉลี่ย	2.4996	30.0127	13.1400	13.1725	9.1324	0.8128	5.2698	32.5147	0.0296	1.6102
10	1	2.5006	30.0184	13.1900	12.2684	9.4436	1.0634	4.9062	42.5258		
	2	2.5018	30.0316	13.0800	12.3219	9.1845	0.9872	4.9252	39.4596		
	เฉลี่ย	2.5012	30.0250	13.1350	12.2952	9.3141	1.0253	4.9157	40.9927	0.0135	2.1681
11	1	2.5029	30.0432	13.0400	15.1839	10.7518	0.7815	6.0665	31.2238		
	2	2.5007	30.0651	13.1600	15.9648	9.1866	0.8109	6.3841	32.4269		
	เฉลี่ย	2.5018	30.0542	13.1000	15.5744	9.9692	0.7962	6.2253	31.8254	0.2246	0.8507
12	1	2.5003	30.0231	13.1400	16.0311	10.1032	0.8158	6.4117	32.6281		
	2	2.5010	30.0098	13.1000	15.9032	9.7536	0.8046	6.3587	32.1711		
	เฉลี่ย	2.5007	30.0165	13.1200	15.9672	9.9284	0.8102	6.3852	32.3996	0.0374	0.3231

ตารางที่ ข.3 (ต่อ) ความสามารถในการละลายน้ำและความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เนื้อไก่ที่สุกเทศ

Run no.	ครั้งที่	น.น. ของแข็งแห้ง, (g)	น.น. น้ำ, (g)	น.น. หลอด centrifuge, (g)	น.น. ตะกอน, (g)	น.น. ไขมัน, (g)	น.น. ของแข็งแห้ง, (g)	น.น. ของแข็งแห้ง, (g)	WAI (g/g)	WSI (%)	SD, WAI	SD, WSI
13	1	2.5032	30.0384	13.1200	13.1538	10.1132	1.1632	5.2548	46.4685			
	2	2.5021	30.0473	13.0800	13.8352	10.0214	1.0848	5.5294	43.3556			
	เฉลี่ย	2.5027	30.0429	13.1000	13.4945	10.0673	1.1240	5.3921	44.9121	0.1942	2.2012	
14	1	2.4968	30.0482	13.0700	13.2638	9.4465	0.8966	5.3123	35.9100			
	2	2.5018	30.0510	13.1600	13.7452	9.8656	0.9354	5.4941	37.3891			
	เฉลี่ย	2.4993	30.0496	13.1150	13.5045	9.6561	0.9160	5.4032	36.6495	0.1286	1.0459	
15	1	2.5026	30.0232	13.2100	14.0216	9.8956	0.9816	5.6028	39.2232			
	2	2.5011	30.0119	13.1600	13.8911	9.5628	0.9985	5.5540	39.9224			
	เฉลี่ย	2.5019	30.0176	13.1850	13.9564	9.7292	0.9901	5.5784	39.5728	0.0345	0.4944	

ตารางที่ ข.4 อัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์เอ็กซีทรูเดท

Run no.	เส้นผ่านศูนย์กลางผลิตภัณฑ์, (mm)										ค่าเฉลี่ย, (mm)	Expansion ratio	SD
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	8.69	8.67	8.86	8.7	8.35	8.56	8.45	8.56	8.39	8.27	8.55	2.138	0.1846
2	10.26	10.68	10.12	10.24	10.29	10.48	10.48	10.21	9.96	10.18	10.29	2.573	0.2066
3	8.86	8.89	8.84	8.86	8.92	9.02	8.94	9.06	9.18	9.14	8.971	2.243	0.1222
4	12.56	12.02	12.86	12.42	12.56	12.48	12.44	12.61	12.56	12.32	12.483	3.121	0.2167
5	9.1	8.56	8.08	8.88	8.92	8.72	9.06	8.82	8.96	9.06	8.816	2.204	0.3077
6	14.52	14.21	14.26	14.21	14.11	14.52	14.28	14.06	14.11	14.27	14.255	3.564	0.1583
7	11.08	11.12	10.86	10.94	11.06	11.08	11.22	11.34	11.28	11.46	11.144	2.786	0.1828
8	15.29	16.84	16.02	16.21	16.18	16.09	15.97	15.86	15.66	16.52	16.064	4.016	0.4295
9	9.22	9.08	9.12	9.26	8.98	9.02	9.09	9.11	9.06	9.08	9.102	2.276	0.0842
10	7.12	8.06	7.68	7.86	7.82	7.92	7.92	7.86	7.98	7.64	7.786	1.947	0.2660
11	10.08	9.92	10.11	10.06	9.94	10.24	10.22	10.02	10.78	10.94	10.231	2.558	0.3491
12	11.32	11.06	10.94	11.08	10.98	11.18	10.86	10.96	11.12	11.52	11.102	2.776	0.1974
13	14.06	13.86	13.87	13.96	13.81	13.92	13.99	14.19	13.96	13.89	13.951	3.488	0.1106
14	14.09	14.21	14.18	13.97	14.02	14.28	14.01	14.12	14.26	14.22	14.136	3.534	0.1105
15	13.96	13.84	14.08	13.82	14.26	14.11	14.02	14.18	13.98	14.06	14.031	3.508	0.1386

ตารางที่ ข.5 แรงแตกหักของผลิตภัณฑ์โดยใช้หัวกด P/2 2 mm. Cylinder probe- Stainless steel

Run no.	ครั้งที่	แรงแตกหัก, (g/cm <sup>2</sup> )	SD
1	1	1659.3	49.6389
	2	1589.1	
	เฉลี่ย	1624.2	
2	1	2012.1	53.3866
	2	2087.6	
	เฉลี่ย	2049.85	
3	1	2342.9	16.8999
	2	2319	
	เฉลี่ย	2330.95	
4	1	2290.7	6.9296
	2	2280.9	
	เฉลี่ย	2285.8	
5	1	2265.4	43.9820
	2	2327.6	
	เฉลี่ย	2296.5	
6	1	1738.8	75.1655
	2	1845.1	
	เฉลี่ย	1791.95	
7	1	1526.5	68.8722
	2	1623.9	
	เฉลี่ย	1575.2	
8	1	2031.4	48.8611
	2	1962.3	
	เฉลี่ย	1996.85	

Run no.	ครั้งที่	แรงแตกหัก, (g/cm <sup>2</sup> )	SD
9	1	1761.6	26.9408
	2	1799.7	
	เฉลี่ย	1780.65	
10	1	1835.2	87.3277
	2	1958.7	
	เฉลี่ย	1896.95	
11	1	1468.6	20.9304
	2	1498.2	
	เฉลี่ย	1483.4	
12	1	1919.3	48.8611
	2	1850.2	
	เฉลี่ย	1884.75	
13	1	1800.3	49.1439
	2	1730.8	
	เฉลี่ย	1765.55	
14	1	1974.2	26.2337
	2	1937.1	
	เฉลี่ย	1955.65	
15	1	1869.6	37.3352
	2	1922.4	
	เฉลี่ย	1896	

ตารางที่ ๖.6 Profile ของเครื่อง Texture Analyzer

Texture Analyzer Profile	Pre-test speed, mm./s	Test speed , mm./s	Post test speed, mm./s	Distance ,, mm.	Trigger type	Trigger force, g.	Tare mode,	Acquisition rate, pps.
P/2-2mm.Diameter stanless steel cylinder probe	1	1	10	1	Auto (Force)	5	Auto	400

## ภาคผนวก ค

ข้อมูลแสดงการวิเคราะห์ทางสถิติของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์ทรูเดท

- ปริมาณความชื้น
- ความหนาแน่นรวม
- ความสามารถในการดูดซับน้ำ
- ความสามารถในการละลายน้ำ
- ความแข็ง
- อัตราส่วนการขยายตัว
- ความกรอบ

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ทางสถิติของความชื้นของผลิตภัณฑ์เอ็กซัทรูเดท

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.954448081
R Square	0.91097114
Adjusted R Square	0.750719192
Standard Error	1.163563994
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	69.26667779	7.696297533	5.6846182	0.03506315
Residual	5	6.769405844	1.353881169		
Total	14	76.03608364			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	-45.87400369	34.97111917	-1.311768247	0.246596158	-135.7701274	44.02211999	-135.7701274	44.02211999
X Variable 1	0.03092593	0.071240255	0.434107511	0.682303937	-0.152202976	0.214054836	-0.152202976	0.214054836
X Variable 2	4.640348343	2.744704273	1.690655124	0.15169331	-2.415138602	11.69583529	-2.415138602	11.69583529
X Variable 3	-0.085381067	0.162186849	-0.526436441	0.621093232	-0.502295635	0.3315335	-0.502295635	0.3315335
X Variable 4	-4.1072E-05	6.05538E-05	-0.678273585	0.527712957	-0.000196731	0.000114586	-0.000196731	0.000114586
X Variable 5	-0.09314615	0.067281989	-1.384414327	0.224832374	-0.266100008	0.079807709	-0.266100008	0.079807709
X Variable 6	0.000749319	0.00067282	1.113699906	0.316061292	-0.000980219	0.002478858	-0.000980219	0.002478858
X Variable 7	-0.000207536	0.001939273	-0.107017485	0.918936488	-0.005192597	0.004777525	-0.005192597	0.004777525
X Variable 8	0.000208992	0.000193927	1.07768361	0.330399562	-0.000289514	0.000707498	-0.000289514	0.000707498
X Variable 9	-0.003557064	0.006464244	-0.550267558	0.605814464	-0.020173933	0.013059805	-0.020173933	0.013059805

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์ทางสถิติของความหนาแน่นรวมของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ทูเดท

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.965915797
R Square	0.932993326
Adjusted R Square	0.812381313
Standard Error	0.012249998
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	0.010447262	0.001160807	7.735492539	0.018250967
Residual	5	0.000750312	0.000150062		
Total	14	0.011197575			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	-1.051601034	0.368175824	-2.856246843	0.03556244	-1.998027118	-0.10517495	-1.998027118	-0.10517495
X Variable 1	-0.000725439	0.000750017	-0.967229713	0.377852141	-0.002653419	0.001202542	-0.002653419	0.001202542
X Variable 2	0.137102485	0.028896237	4.744648358	0.005128844	0.062822342	0.211382627	0.062822342	0.211382627
X Variable 3	-0.00052594	0.001707503	-0.308016993	0.770487864	-0.004915215	0.003863335	-0.004915215	0.003863335
X Variable 4	7.50153E-07	6.3751E-07	1.176691604	0.292281387	-8.88619E-07	2.38892E-06	-8.88619E-07	2.38892E-06
X Variable 5	-0.003224367	0.000708345	-4.551975839	0.006101475	-0.005045225	-0.00140351	-0.005045225	-0.00140351
X Variable 6	1.01304E-05	7.08345E-06	1.430151642	0.212069854	-8.07818E-06	2.8339E-05	-8.07818E-06	2.8339E-05
X Variable 7	-7.67222E-06	2.04167E-06	-0.375782381	0.72249435	-6.01549E-05	4.48105E-05	-6.01549E-05	4.48105E-05
X Variable 8	1.82111E-06	2.04167E-06	0.891972951	0.413269892	-3.42716E-06	7.06938E-06	-3.42716E-06	7.06938E-06
X Variable 9	-6.29537E-05	6.80555E-05	-0.925034182	0.397398205	-0.000237896	0.000111989	-0.000237896	0.000111989

ตารางที่ ค.3 การวิเคราะห์ทางสถิติของความสามารถในการดูดซับน้ำของผลิตภัณฑ์เอ็กซทราเตท

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.706133713
R Square	0.49862482
Adjusted R Square	-0.403850503
Standard Error	1.034658837
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	5.323232189	0.591470243	0.552507983	0.793021742
Residual	5	5.35259455	1.07051891		
Total	14	10.67582674			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	8.26951193	31.09685216	0.265927621	0.800912044	-71.66749135	88.20651521	-71.66749135	88.20651521
X Variable 1	0.030860518	0.063347921	0.487159137	0.646751117	-0.131980496	0.193701533	-0.131980496	0.193701533
X Variable 2	-1.171026991	2.440632871	-0.479804646	0.65161951	-7.444873514	5.102819532	-7.444873514	5.102819532
X Variable 3	-0.120608694	0.144219018	-0.836288414	0.441115087	-0.491335481	0.250118094	-0.491335481	0.250118094
X Variable 4	-2.32927E-05	5.38454E-05	-0.432585603	0.683338401	-0.000161707	0.000115121	-0.000161707	0.000115121
X Variable 5	0.039674828	0.05982817	0.663146271	0.536582067	-0.114118379	0.193468035	-0.114118379	0.193468035
X Variable 6	-0.000128857	0.000598282	-0.21537897	0.837981763	-0.001666789	0.001409075	-0.001666789	0.001409075
X Variable 7	-0.000485311	0.001724431	-0.281432653	0.789654094	-0.004918103	0.003947481	-0.004918103	0.003947481
X Variable 8	0.000202604	0.000172443	1.174904334	0.292933753	-0.000240675	0.000645883	-0.000240675	0.000645883
X Variable 9	0.001427808	0.005748105	0.248396307	0.813707414	-0.013348165	0.016203781	-0.013348165	0.016203781

ตารางที่ ค.4 การวิเคราะห์ทางสถิติของความสามารถในการละลายนำของผลิตภัณฑ์เอ็กซัทรูเดท

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.875363683
R Square	0.766261578
Adjusted R Square	0.345532418
Standard Error	5.196640684
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	442.6518914	49.18354349	1.821270431	0.263728213
Residual	5	135.025372	27.0050744		
Total	14	577.6772634			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	17.1298431	156.1859438	0.109675959	0.91693229	-384.358907	418.6185932	-384.358907	418.6185932
X Variable 1	0.143604685	0.318169015	0.451347173	0.670641509	-0.674274804	0.961484175	-0.674274804	0.961484175
X Variable 2	-2.99065662	12.25823587	-0.243971209	0.81694774	-34.50145507	28.52014183	-34.50145507	28.52014183
X Variable 3	1.757023321	0.724349311	2.425657477	0.05969939	-0.104975859	3.619022502	-0.104975859	3.619022502
X Variable 4	-0.000346169	0.000270442	-1.28001389	0.256709492	-0.001041362	0.000349023	-0.001041362	0.000349023
X Variable 5	-0.068900998	0.30049084	-0.229294838	0.827724008	-0.841337292	0.703535295	-0.841337292	0.703535295
X Variable 6	-0.005916607	0.003004908	-1.968980685	0.10606221	-0.01364097	0.001807756	-0.01364097	0.001807756
X Variable 7	0.012079272	0.008661068	1.394663142	0.22191094	-0.010184712	0.034343256	-0.010184712	0.034343256
X Variable 8	-0.001996036	0.000866107	-2.304607314	0.0693724	-0.004222434	0.000230362	-0.004222434	0.000230362
X Variable 9	-0.021954939	0.028870226	-0.760469932	0.481275637	-0.096168217	0.05225834	-0.096168217	0.05225834

ตารางที่ ๓.5 การวิเคราะห์ทางสถิติของความแข็งของผลิตภัณฑ์เหล็กขลุ่ยเดก

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.994141043
R Square	0.988316414
Adjusted R Square	0.806071633
Adjusted R Square	417.6348274
Observations	15

ANOVA				
	df	SS	MS	Significance F
Regression	9	88524711.48	9836079.053	56.39344088
Residual	6	1046513.094	174418.8491	0.000170842
Total	15	89571224.57		

	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							
X Variable 1	31.6823074	18.55414129	1.707559886	0.138585477	-13.71804073	77.08265553	-13.71804073	77.08265553
X Variable 2	-586.8597292	491.632118	-1.193696888	0.277647764	-1789.840183	616.1207243	-1789.840183	616.1207243
X Variable 3	-35.57642317	57.52105458	-0.618493931	0.558982372	-176.325373	105.1725267	-176.325373	105.1725267
X Variable 4	0.011793211	0.019102598	0.61736163	0.559680777	-0.034949162	0.058535584	-0.034949162	0.058535584
X Variable 5	48.24755103	16.79616992	2.872532921	0.028333043	7.148803892	89.34629817	7.148803892	89.34629817
X Variable 6	0.109661976	0.240438095	0.45609235	0.664366278	-0.478668847	0.697992798	-0.478668847	0.697992798
X Variable 7	-2.363705263	0.591638034	-3.99518815	0.007158118	-3.811391377	-0.916019148	-3.811391377	-0.916019148
X Variable 8	0.072447659	0.069364586	1.044447365	0.336520346	-0.097281369	0.242176687	-0.097281369	0.242176687
X Variable 9	-1.240133786	2.30727919	-0.537487527	0.610270239	-6.885842569	4.405574996	-6.885842569	4.405574996

ตารางที่ ๑.๖ การวิเคราะห์ทางสถิติของอัตราส่วนการขยายตัวของผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ชุด

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.975912621
R Square	0.952405443
Adjusted R Square	0.866735241
Standard Error	0.236226207
Observations	15

ANOVA					
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	9	5.583297129	0.620366348	11.11711448	0.008159081
Residual	5	0.279014104	0.055802821		
Total	14	5.862311233			

	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	-33.6307338	7.099819928	-4.736843207	0.00516456	-51.88140193	-15.38006566	-51.88140193	-15.38006566
X Variable 1	0.010080208	0.014463163	0.696957406	0.516896	-0.027098535	0.047258952	-0.027098535	0.047258952
X Variable 2	3.475988426	0.557228552	6.237994114	0.001550115	2.043586833	4.908390019	2.043586833	4.908390019
X Variable 3	0.002058333	0.032927097	0.062511838	0.952577233	-0.082583463	0.08670013	-0.082583463	0.08670013
X Variable 4	-1.18979E-05	1.22936E-05	-0.967813752	0.377587161	-4.34996E-05	1.97038E-05	-4.34996E-05	1.97038E-05
X Variable 5	-0.09694213	0.013659557	-7.097018405	0.00086042	-0.13205514	-0.06182912	-0.13205514	-0.06182912
X Variable 6	-0.000276227	0.000136596	-2.022224041	0.099088801	-0.000627357	7.49032E-05	-0.000627357	7.49032E-05
X Variable 7	0.000369583	0.00039371	0.938718878	0.39097204	-0.000642481	0.001381648	-0.000642481	0.001381648
X Variable 8	-1.08333E-05	3.9371E-05	-0.275159987	0.79420176	-0.00011204	9.03731E-05	-0.00011204	9.03731E-05
X Variable 9	0.001519444	0.001312368	1.15778856	0.299246641	-0.001854104	0.004892993	-0.001854104	0.004892993

ตารางที่ ค.7 การวิเคราะห์ทางสถิติของความสัมพันธ์ที่เอ็กซ์ทราเคท

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.977642245
R Square	0.955784358
Adjusted R Square	0.730163503
Standard Error	30.48053477
Observations	15

ANOVA				
	df	SS	MS	Significance F
Regression	9	120498.1566	13388.68407	14.4109539
Residual	6	5574.378001	929.0630001	0.004502034
Total	15	126072.5346		

	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	0.516656471	1.354149874	0.381535664	0.715951778	-2.796828897	3.83014184	-2.796828897	3.83014184
X Variable 2	-8.130523857	35.8811308	-0.226596088	0.828260441	-95.92848787	79.66744015	-95.92848787	79.66744015
X Variable 3	6.463823426	4.198099367	1.539702342	0.174559681	-3.808555647	16.7362025	-3.808555647	16.7362025
X Variable 4	-0.001618376	0.001394178	-1.160810013	0.289811672	-0.005029807	0.001793055	-0.005029807	0.001793055
X Variable 5	-0.720990927	1.225846619	-0.588157536	0.577877683	-3.720529541	2.278547687	-3.720529541	2.278547687
X Variable 6	-0.021063705	0.017548062	-1.200343664	0.275243283	-0.064002265	0.021874855	-0.064002265	0.021874855
X Variable 7	0.066051596	0.043179933	1.5296827	0.176966512	-0.039605893	0.171709084	-0.039605893	0.171709084
X Variable 8	-0.005998571	0.005062484	-1.184906686	0.280855369	-0.018386024	0.006388881	-0.018386024	0.006388881
X Variable 9	-0.076798936	0.168393771	-0.456067559	0.66438312	-0.48884365	0.335245778	-0.48884365	0.335245778

**ภาคผนวก ง**

ตัวอย่างสมดุลมวลสารและพลังงาน (Mass balance and Energy balance)

## สมดุลมวลสารและพลังงาน (Mass balance and Energy balance)

หลักการที่ใช้ในการทำสมดุลมวลสารและพลังงาน ได้แก่

กฎการคงตัวของมวลสาร (the law of conservation of mass)

“มวลสารของระบบหนึ่งๆต้องคงที่เสมอ ไม่ว่าภายในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม”

กฎการคงตัวของพลังงาน (the law of conservation of energy)

“พลังงานของระบบหนึ่งๆ จะต้องคงที่เสมอ ไม่มีการสูญหายไป แต่จะเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้” คือ กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

ระบบ หมายถึง สิ่งที่เรากำลังสนใจทำการศึกษาหรือทำการวิเคราะห์ อาจจะเป็นกระบวนการผลิตทั้งกระบวนการหรือเพียงส่วนหนึ่งส่วนใดของกระบวนการ

### สมดุลมวลสาร

จากกฎการคงตัวของมวลสาร สามารถเขียนในรูปของสมการทั่วไปได้ ดังนี้

มวลสารที่เข้าสู่ระบบ + มวลสารที่เกิดในระบบ = มวลสารที่ออกจากระบบ + มวลสารที่ใช้ในระบบ + มวลสารที่สะสมในระบบ

ระบบเปิดภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state) หมายถึง ระบบที่มีคุณสมบัติต่างๆ คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ไม่มีการสะสมเกิดขึ้นในระบบ และถ้าในระบบไม่มีสารเกิดใหม่ไม่มีการใช้สาร สามารถเขียนในรูปของสมการทั่วไป ดังนี้

มวลสารที่เกิดในระบบ = มวลสารที่ใช้ในระบบ

การทำสมดุลมวลสารแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ การทำสมดุลแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมีกับการทำสมดุลมวลสารแบบมีปฏิกิริยาเคมี ในการทำสมดุลมวลสารจะต้องมีขั้นตอนดังนี้

1. อ่านและวิเคราะห์โจทย์โดยละเอียด เพื่อจะได้ทราบสิ่งที่โจทย์ต้องการและสิ่งที่โจทย์กำหนดมาให้
2. เขียนแผนภูมิแสดงกระบวนการ กำหนดขอบเขตของระบบให้ชัดเจนด้วยเส้นประใส่ปริมาณหรือข้อมูลของสารทุกตัวที่ทราบลงในแผนภูมิ
3. ถ้ามีปฏิกิริยาเกี่ยวข้อง ต้องแสดงสมการเคมีให้ชัดเจน
4. เลือกฐานการคำนวณ (basis of calculation) ให้เหมาะสม

### 5. ทำสมดุลซึ่งอาจจะเป็น

สมดุลมวลสารรวม (Over – all material balance)

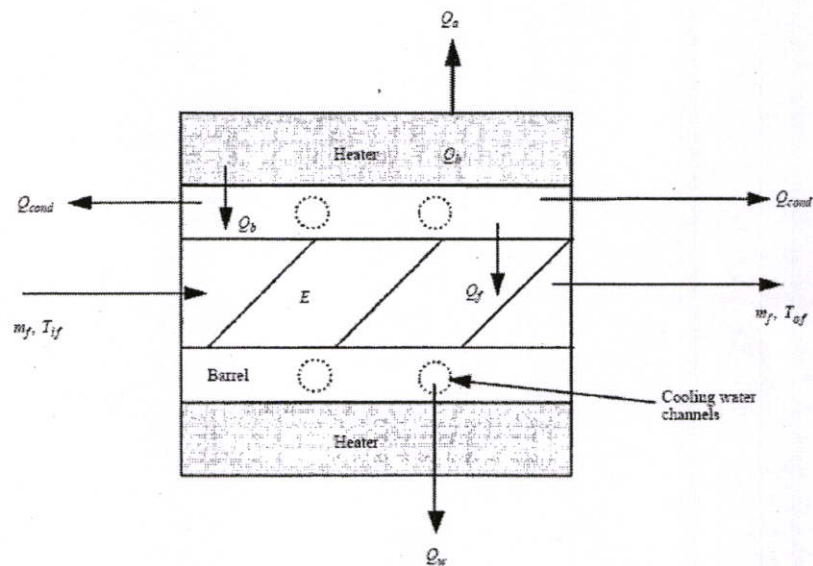
สมดุลมวลสารของส่วนประกอบย่อย (Component material balance)

### สมดุลพลังงาน

จากหลักการของกฎการคงตัวของพลังงาน ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการ ดังนี้

พลังงานที่เข้าสู่ระบบ = พลังงานที่ออกจากระบบ + พลังงานที่สะสมในระบบ

ตัวอย่าง การคำนวณปริมาณความร้อนที่สูญเสีย, ( $Q_{cond}$ ) [28]



$$Q_h = Q_b + Q_a \quad (1)$$

$$Q_b = Q_f + Q_w + Q_{cond} \quad (2)$$

$$Q_f = Q_h - Q_w - Q_{con} - Q_a \quad (3)$$

$$Q_{con} = k_b A \frac{T_z - T(z+1)}{\Delta z_1} + k_b A \frac{T_z - T(z-1)}{\Delta z_2} \quad (4)$$

$$Q_w = m_w C_{pw} (T_{ow} - T_{iw}) \quad (5)$$

Energy balance for food ;

$$m_f C_{pif} T_{if} + Q_f + E_z = m_f C_{pof} T_{of} + Q_r + Q_l \quad (6)$$

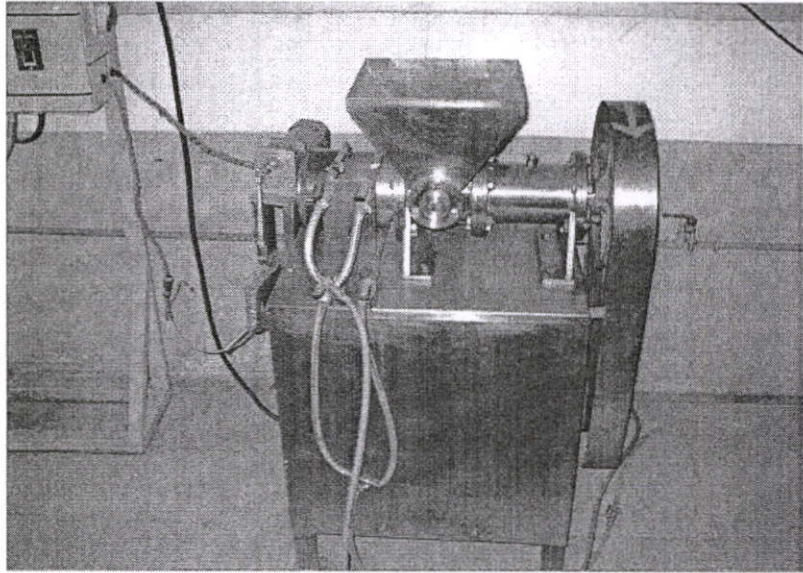
$$E_z = \text{SME} \times m_f \quad (7)$$

$$\text{SME} = \frac{(P \times N \times \tau) \times t}{Nm \times m} \quad (8)$$

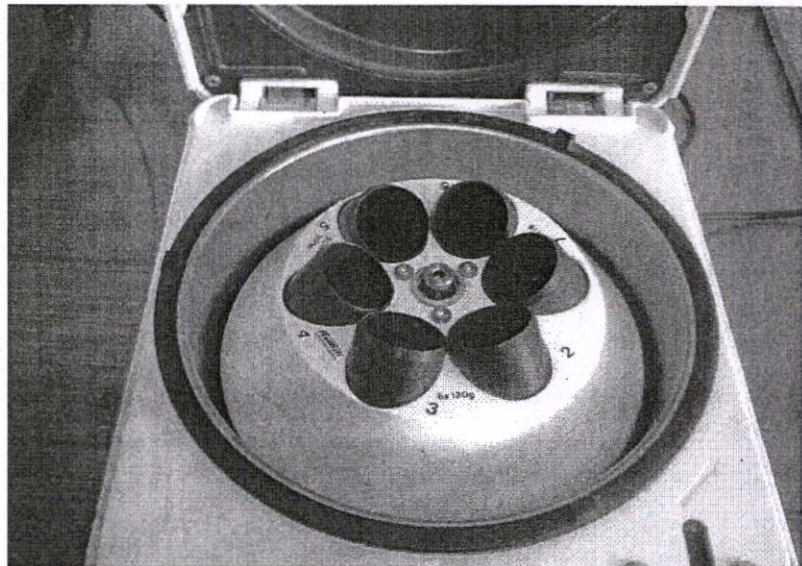
## ภาคผนวก จ

## รูปแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

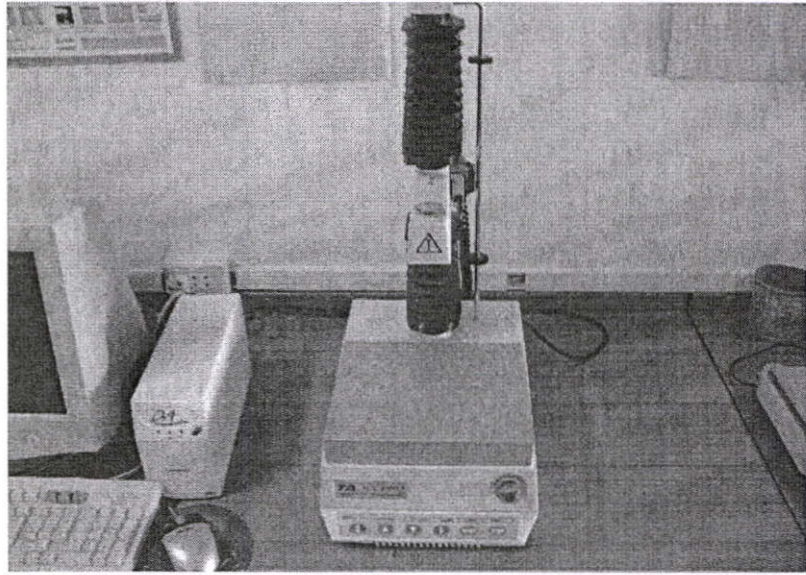
- Single Screw Extruder
- Centrifuge
- Texture Analyzer
- Grain Moisture
- Hot air oven
- Disc mill



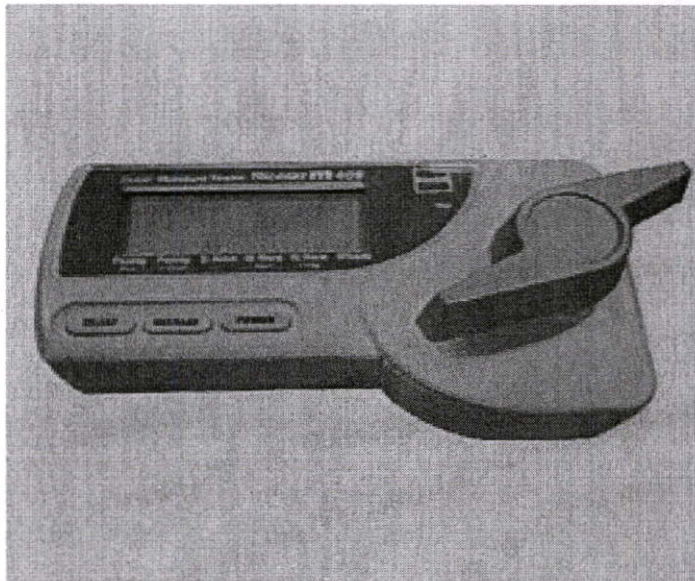
รูปที่ จ.1 Single Screw Extruder



รูปที่ จ.2 Centrifuge



รูปที่ จ.3 Texture Analyzer



รูปที่ จ.4 Grain Moisture



รูปที่ จ.5 Hot air oven



รูปที่ จ.6 Single disc mill

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสันติ หิริณูอร
วัน เดือน ปีเกิด	6 มีนาคม 2524
ที่อยู่	101/101 ม.โชคดีวิลเลจ ต.เนินพระ อ.เมือง จ.ระยอง 21000
ประวัติการศึกษา	2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ความชำนาญเฉพาะด้าน	วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป
ผลงานวิจัย	
พ.ศ.2550	“ผลของสภาวะการผลิตต่อคุณลักษณะของเอ็กซ์ทรูเดทที่ได้จากปลายข้าว โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์แบบสกรูเดี่ยว” ปีที่ 24, ฉบับที่ 4, หน้า 37-42, 2550