

อิทธิพลของเมล็ดลินินและพลังงานจำเพาะในการนวด  
ต่อการขึ้นฟูและสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโด

INFLUENCES OF FLAXSEED AND SPECIFIC MECHANICAL ENERGY OF  
KNEADING PROCESS ON EXPANSION ABILITY AND TEXTURAL  
CHARACTERISTICS OF BREAD DOUGH

บรรณาธิการ	วงศ์รัตน์มนตรี
อธิการบดี	วรวิทย์
ผู้อำนวยการ	ศักดิ์วัฒน์กุล
วิจิตร	ก่อตรงนิสาร

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

อิทธิพลของเมล็ดลินินและพลังงานจำเพาะในการนวด  
ต่อการขึ้นฟูและสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโด

INFLUENCES OF FLAXSEED AND SPECIFIC MECHANICAL ENERGY OF  
KNEADING PROCESS ON EXPANSION ABILITY AND TEXTURAL  
CHARACTERISTICS OF BREAD DOUGH

ธรรมชาติ วงศ์รัตน์มนตรี  
ชิติภูมิจุฑ์ วรวิมล  
ยูวภัทร์ สักดาวัฒนกุล  
วิจิตรา ต่อตรงนิสาร

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

**INFLUENCES OF FLAXSEED AND SPECIFIC MECHANICAL ENERGY OF  
KNEADING PROCESS ON EXPANSION ABILITY AND TEXTURAL  
CHARACTERISTICS OF BREAD DOUGH**

<b>TUMMACHAT</b>	<b>WONGRATANAMONTREE</b>
<b>TITID</b>	<b>WORAWUT</b>
<b>YUWAPAT</b>	<b>SAKDAWATTANAKUL</b>
<b>WIJITTRA</b>	<b>TOTRONGNISAN</b>

**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN FOOD ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014**

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อิทธิพลของเมล็ดลินินและพลังงานจำเพาะในการนวดต่อการขึ้นฟูและสมบัติทางเนื้อสัมผัส  
ของแป้งโด

INFLUENCES OF FLAXSEED AND SPECIFIC MECHANICAL ENERGY OF KNEADING  
PROCESS ON EXPANSION ABILITY AND TEXTURAL CHARACTERISTICS OF BREAD  
DOUGH

ผู้จัดทำ

- |                  |                |                       |
|------------------|----------------|-----------------------|
| 1. นายธรรมชาติ   | วงศ์รัตนมนตรี  | รหัสนักศึกษา 54010598 |
| 2. นายธิตินันท์  | วรวิฑู         | รหัสนักศึกษา 54010623 |
| 3. นายยุวภัทร์   | ศักดิ์วัฒน์กุล | รหัสนักศึกษา 54011052 |
| 4. นางสาววิจิตรา | ต่อตรงนิสาร    | รหัสนักศึกษา 54011188 |



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.เอกสิทธิ์ ศรีธรรม)

หัวข้อโครงการ	อิทธิพลของเมล็ดลินินและพลังงานจำเพาะในการนวดต่อการขึ้นฟูและสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโด	
นักศึกษา	นายธรรมชาติ	วงศ์รัตน์มนตรี
	นายธิตินันท์	วรวิมล
	นายยุวภัทร์	ศักดิ์วัฒน์กุล
	นางสาววิจิตรรา	ต่อตรงนิสาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.เอกสิทธิ์	ศรีธรรม
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
ภาควิชา	วิศวกรรมอาหาร	
ปีการศึกษา	2557	

## บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาผลเมล็ดลินินและพลังงานจำเพาะต่อการขึ้นฟู และสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโด ชุดทดลองนวดแป้งโดแบบเน้นการเคี้ยวได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้หลักการของทรงกระบอกศูนย์กลางร่วม (Co-concentric cylinders) มีมอเตอร์กระแสสลับขนาดเล็กเป็นต้นกำลัง นอกจากนี้ชุดทดลองยังได้รับการออกแบบให้สามารถปรับเอียงศูนย์กลางได้ ทำการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของแป้งโดโดยเทคนิค Texture Profile Analysis (TPA) ด้วยเครื่อง Texture Analyzer แป้งโดสูตรควบคุมประกอบด้วย แป้งสาลี เนยจืด ยีสต์ เกลือ น้ำตาล น้ำ ถั่วแดง ถั่วเขียว ถั่วดำ แป้งโดที่ผสมเมล็ดลินินมี 3 สูตร โดยมีส่วนผสมเช่นเดียวกับสูตรควบคุม และมีการผสมเมล็ดลินินในปริมาณ 10 % 20 % และ 40 % ของน้ำหนักแป้ง จากการทดลองพบว่า ค่าพลังงานจำเพาะ (SME) ที่ใช้ในการนวดในช่วงที่ทำการศึกษามีผลต่อการขึ้นฟูและค่าความเหนียว (Adhesiveness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) และค่าความเกาะติด (Cohesiveness) ของแป้งโด แต่มีผลให้ค่าความแข็ง (Hardness) ลดลง การผสมเมล็ดลินินลงในแป้งโด มีผลให้แป้งโดมีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น แต่ค่าความเกาะติดลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อมีการผสมเมล็ดลินินในปริมาณ 20 % ของน้ำหนักแป้งขึ้นไป นอกจากนี้เมล็ดลินินยังมีผลให้แป้งโดมีค่าความยืดหยุ่นลดลง การนวดแป้งโดแบบเอียงศูนย์กลาง มีผลให้ค่าความแข็ง และการขึ้นฟูของแป้งโดที่ผสมเมล็ดลินินในปริมาณ 40 % ของน้ำหนักแป้ง ลดลง

Project Title	INFLUENCES OF FLAXSEED AND SPECIFIC MECHANICAL ENERGY OF KNEADING PROCESS ON EXPANSION ABILITY AND TEXTURAL CHARACTERISTICS OF BREAD DOUGH	
Students	Mr. Tummachat	Wongratanamontree
	Mr. Titid	Worawut
	Mr. Yuwapat	Sakdawattanakul
	Miss Wijittra	Totrongnisan
Project Advisor	Dr.Eakasit	Sritham
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Food Engineering	
Academic year	2014	

## ABSTRACT

This project was aimed to study the effects of flaxseed and specific mechanical energy (SME) on expansion ability and textural characteristics of bread dough. The experimental kneading device was designed and constructed based on the principle of co-concentric cylinders. A small AC motor was used as a power source. The kneading device was also designed to work eccentrically. Textural characteristics of dough were obtained with the texture profile analysis (TPA) technique using the Texture Analyser. There were four treatments in this experiment. The controlled treatment was prepared from wheat flour, butter, yeast, salt, sugar, water, red bean, mung bean and black bean. Other three treatments were basically formulated from the same ingredients as the controlled treatment with flaxseed added for three levels of concentration, 10%, 20% and 40% of flour (w/w). It was found that the SME in the range of this study did not affect the expansion ability, adhesiveness, springiness, and cohesiveness; but it did cause the hardness to decrease. The inclusion of flaxseed in dough resulted in the increase of hardness and the decrease of cohesiveness, which were clearly observed when the concentration of flaxseed was at least 20%. The inclusion of flaxseed also led to the decrease of springiness. There was also found that kneading bread dough eccentrically resulted in the decrease of the expansion ability and the hardness of dough.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เอกสิทธิ์ ศรีธรรม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดลอง การเรียบเรียงเนื้อหา และตรวจแก้ไขรายงาน ตลอดจนเนื้อที่เพื่อสถานที่ในการจัดทำงานวิจัย รวมทั้งสนับสนุน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมาจนรายงานฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณะอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.นวกัษรา หนูนาคน และ รศ.ดร.ทวีพล ซื่อสัตย์ สำหรับคำแนะนำในส่วนของวงจรไฟฟ้าและวงจรสื่อสารกับคอมพิวเตอร์

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมอาหาร ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและคอยจัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยตลอดมา

ตลอดระยะเวลาในการจัดทำโครงงานวิจัยเล่มนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งให้ความรัก ความเมตตา ความหวังใย ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาร่วมสถาบันและตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยโครงงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ท้ายสุดนี้คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้บริหารสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุมัติโครงงาน และสนับสนุนการดำเนินงานจนสำเร็จ และได้ผลงานตามความต้องการ จนกระทั่งสำเร็จหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะผู้วิจัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
รายการสัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร	3
2.1 ไขมัน	3
2.1.1 เมล็ดลินิน	3
2.1.2 ไขมันประเภทถั่ว	4
2.2 แป้งโด	7
2.2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของแป้งโด	8
2.2.2 การเกิดแป้งโดและสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโด	11
2.2.3 คุณลักษณะทางเคมีของแป้งโด	12
2.2.4 กระบวนการผลิตแป้งโด	14
2.2.5 ผลของส่วนผสมต่อสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโด	15
2.3 เนื้อสัมผัสของอาหารและการวิเคราะห์	16
2.3.1 เนื้อสัมผัส	16
2.3.2 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส	16
2.3.3 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสโดยเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer)	17
2.3.4 การทดสอบแบบ Texture Profile Analysis (TPA)	18
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	22
3.1 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง	22
3.1.1 หลักการทำงานและการออกแบบเบื้องต้น	22
3.1.2 ชุดทดลองขนาดแบ่งโดแบบเน้นการเลื่อน	23
3.2 การดำเนินการทดลอง	31
3.2.1 วัตถุประสงค์	31
3.2.2 อุปกรณ์	31
3.2.3 การเตรียมตัวอย่าง	32
3.2.4 การขนาดแบ่งโดด้วยชุดทดลอง	33
3.3 การคำนวณค่าพลังงานจำเพาะ (SME) ในการขนาด	34
3.4 การทดสอบสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแบ่งโด	34
3.5 การวิเคราะห์การขึ้นฟูของแบ่งโด	35
3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	35
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	36
4.1 ค่าพลังงานจำเพาะในการขนาดแบ่งโด	36
4.2 ผลของค่าพลังงานจำเพาะต่อสมบัติทางเนื้อสัมผัสและการขึ้นฟูของแบ่งโด	36
4.3 อิทธิพลของเมล็ดลินินต่อเนื้อสัมผัสของแบ่งโด	38
4.4 การขึ้นฟูของแบ่งโด	44
4.5 การเปรียบเทียบสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแบ่งโดจากการขนาดด้วยชุดทดลองกับเครื่องปั่นอเนกประสงค์	48
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	49
5.1 สรุปผลการทดลอง	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	50
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	55
การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของแป้งโด	
การวิเคราะห์การขึ้นฟูของแป้งโด	
ภาคผนวก ข	59
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	
ภาคผนวก ค	61
กราฟของแรงบิดในระหว่างการนวด	
ภาคผนวก ง	65
ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สารอาหารในธัญพืช (100 g)	7
2.2 องค์ประกอบของแป้งสาลี	9
2.3 พันธะทางเคมีที่สำคัญในแป้งโด	13
4.1 ค่าพลังงานจำเพาะ (SME) ในการนวดแป้งโด	38
4.2 ค่าความแข็งของแป้งโด	44
4.3 ค่าความเหนียว ความยืดหยุ่น และความเกาะติด ของแป้งโด	44
4.4 ค่าการขึ้นฟูของแป้งโด	47
4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าการขึ้นฟูของแป้งโดเมื่อตัดข้อมูลที่มีความแปรปรวนสูงออก	47

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เมล็ดลินิน	3
2.2 ถั่วเขียว	4
2.3 ถั่วแดง	5
2.4 ถั่วดำ	6
2.5 แป้งโด	7
2.6 ลักษณะการผันกลับของขบวนการพัฒนาของแป้งโด	11
2.7 ลักษณะการเกิดพันธะของกลูเทน	12
2.8 เครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัส	18
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลา จากการทดสอบโดยเทคนิค Texture Profile Analysis	19
3.1 มุมมองด้านบน (Top view) ของชุดทดลอง	23
3.2 มุมมอง 3 มิติ (Isometric) ของชุดทดลอง	23
3.3 มุมมองด้านหน้า (Front view) ของชุดทดลอง	23
3.4 มุมมองด้านข้าง (Side view) ของชุดทดลอง	23
3.5 ภาพตัด (Section view) มุมมองด้านบน (Top view) ของชุดทดลอง	24
3.6 ภาพตัด (Section view) มุมมองด้านหน้า (Front view) ของชุดทดลอง	24
3.7 ชุดทดลองนวดแป้งโดแบบเน้นการเนียน (มุมมองด้านบน)	25
3.8 ทรงกระบอกภายในชุดทดลอง (พื้นที่การเนียน)	25
3.9 ชุดทดลองนวดแป้งโดแบบเน้นการเนียน	26
3.10 หน้าจอแสดงผลและชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์	27
3.11 กลไกการปรับเอียงศูนย์	28
3.12 มอเตอร์ และสเตรนเกจ (Strain gage)	29
3.13 เทอร์โมคัปเปิ้ล	30
3.14 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแป้งโด	32
3.15 การเตรียมแป้งโดให้เป็นแผ่นบางก่อนบรรจุลงชุดทดลอง	33
3.16 การบรรจุแป้งโดลงชุดทดลอง	33
3.17 แผ่นเทปลอน	33
3.18 ก่อนติดแผ่นเทปลอน	34
3.19 หลังติดแผ่นเทปลอน	34
4.1 รูปแบบโดยทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลาในระหว่างการนวด	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ผลของเมล็ดลินินต่อค่าความแข็ง (Hardness) ของแป้งโด	40
4.3 ผลของเมล็ดลินินต่อค่าความเหนียว (Adhesiveness) ของแป้งโด	41
4.4 ผลของเมล็ดลินินต่อค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ของแป้งโด	42
4.5 ผลของเมล็ดลินินต่อค่าความเกาะติด (Cohesiveness) ของแป้งโด	43
4.6 ผลของเมล็ดลินินต่อการขึ้นฟู (Expansion ability) ของแป้งโด	46

## รายการสัญลักษณ์

$e$	=	อัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง
$l$	=	ระยะห่างมากที่สุดระหว่างโลหะทรงกระบอก
$R_{out}$	=	รัศมีของโลหะทรงกระบอกนอก (m)
$R_{in}$	=	รัศมีของโลหะทรงกระบอกใน (m)
$\sigma_{in}$	=	ความเค้น ( $N/m^2$ )
$M_{in}$	=	ทอร์ก หรือแรงบิด (Nm)
$H$	=	ความสูงของทรวงกระบอก (m)
$\Omega_{in}$	=	ความเร็วของโลหะทรงกระบอกภายใน (rad/s)
$m$	=	น้ำหนักของโดที่ใส่เข้าไป (kg)
$M_{in}$	=	ค่าทอร์กที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆ
$t_f$	=	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการทั้งหมด

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แป้งสาลี (wheat flour) นับเป็นวัตถุดิบหลักของผลิตภัณฑ์เบเกอรี่หลายชนิด คุณสมบัติเฉพาะของโปรตีนกลูเทินในแป้งสาลี มีผลต่อการดูดซับน้ำของโมเลกุลแป้ง การเกิดเจล และความหนืด (สวรัักษ์, 2551) ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ขนมปังได้รับความนิยมในการบริโภคอย่างแพร่หลายทั่วโลก ผลิตภัณฑ์ขนมปังได้รับการพัฒนาปรับปรุงส่วนผสมอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีหลากหลายรูปแบบ ปัจจุบันกระแสการรักสุขภาพนับว่ามีอิทธิพลอย่างมากต่อการพัฒนาสูตรอาหารรวมทั้งขนมปัง ผลิตภัณฑ์ขนมปังได้รับการปรับปรุงส่วนผสมหลากหลายรูปแบบเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการหรือเพิ่มคุณสมบัติอื่น เช่น ขนมปังโฮลวีท (whole wheat bread) หรือขนมปังโฮลเกรน (whole grains bread) ที่มีการเพิ่มธัญพืชที่ไม่ผ่านการขัดสี ซึ่งอุดมไปด้วย วิตามิน แร่ธาตุ และเส้นใยอาหาร ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อระบบทางเดินอาหาร และการขับถ่าย อย่างไรก็ตามการปรับปรุงส่วนผสมของขนมปังอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติ และเนื้อสัมผัสของแป้งขนมปังหรือแป้งโด (dough) (Saha *et al.*, 2010; Sivam *et al.*, 2010) ซึ่งย่อมมีผลโดยตรงกับการออกแบบกระบวนการผลิต และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขนมปัง

แป้งโดเกิดจากการผสมแป้งข้าวสาลีกับน้ำ และส่วนผสมอื่น ๆ ซึ่งถูกผนวให้เข้ากัน ทำให้เม็ดแป้ง (starch granule) ขัดสีกันจนแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลง กลูเทิน (gluten) เป็นไกลโคโปรตีนที่พบในเอนโดสเปิร์มของข้าวสาลี ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของโปรตีนกลูเตนิน (glutenin) และไกลอะดีน (gliadin) จะสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) ทำให้แป้งโดมีลักษณะเหนียว และยืดหยุ่น

เมล็ดลีนินับเป็นธัญพืชที่มีปริมาณใยอาหารในสูง และสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย เช่น เส้นใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble fiber) ช่วยป้องกันท้องผูก และโรคลำไส้อักเสบ นอกจากนี้ประโยชน์ข้างต้นแล้วเส้นใยอาหารชนิดละลายน้ำได้ (soluble fiber) สามารถช่วยลดระดับคอเลสเตอรอล ซึ่งจะช่วยลดอัตราเสี่ยงต่อโรคหัวใจ โรคเบาหวาน ด้วยคุณค่าทางโภชนาการเหล่านี้ เมล็ดลีนินจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการเพิ่มคุณค่าทางด้านเส้นใยอาหารให้กับขนมปัง

ในกระบวนการผลิตขนมปัง การนวดถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญยิ่งต่อกระบวนการผลิตแป้งโดที่ได้รับการนวดอย่างเหมาะสม จะมีลักษณะเหนียว นุ่ม มีความยืดหยุ่น และสามารถยึดเป็นแผ่นบางได้ๆ แต่หากการนวดยังคงดำเนินต่อไปหลังจากที่โดเกิดความยืดหยุ่นสูงสุด แป้งโดจะมีลักษณะนิ่ม และเหนียวติดมือหรือที่เรียกว่า แป้งโดเกิดการแตกสลาย (broken down) ทำให้แรงงานทานการนวดน้อยลง อย่างไรก็ตามถ้าแป้งโดถูกนวดน้อยเกินไป จะทำให้แป้งโดที่ได้มีเนื้อสัมผัส

หยาบ ความยืดหยุ่นน้อย ขนาดของผลิตภัณฑ์จะลดลง โดยเครื่องวัดแบ่งโดในท้องตลาด ทำให้เกิดลักษณะของแรงประเภทต่าง ๆ ที่กระทำต่อแบ่งโด เช่น แรงเฉือน แรงดึง และแรงอัด อย่างไรก็ตาม การวัดปริมาณของแรงแต่ละประเภทที่กระทำต่อแบ่งโดไม่สามารถทำได้ ทำให้การวิเคราะห์ผลของกลไกการนวดต่อแบ่งโด และการอธิบายในเชิงวิศวกรรมเป็นไปได้ยาก

ดังนั้นคณะผู้จัดทำโครงการนี้จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบ และสร้างชุดทดลองนวดแบ่งโดที่สามารถกำหนดกลไกการนวด และวัดค่าพลังงานจำเพาะได้ โดยชุดทดลองดังกล่าวได้รับการออกแบบเพื่อให้เกิดการนวดโดยเน้นการเฉือน เนื่องจากการเฉือนเป็นกลไกหลักที่ทำให้โครงสร้างของโปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลง (Don *et al.*, 2005) เกิดเป็นโครงร่าง (network) ของกลูเทินในแบ่งโด (Gravel, 1984; Weegels *et al.*, 1996) พร้อมทั้งศึกษาผลของเมล็ดลินิน และพลังงานจำเพาะในระหว่างการนวดต่อการขึ้นฟู และสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแบ่งโด

## 1.2 วัตถุประสงค์

โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลเมล็ดลินิน และพลังงานจำเพาะต่อการขึ้นฟู และสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแบ่งโดขนมปังธัญพืช โดยมีวัตถุประสงค์จำเพาะดังนี้

- 1) เพื่อออกแบบ และสร้างชุดทดลองนวดแบ่งโดแบบเน้นการเฉือน
- 2) เพื่อศึกษาผลของพลังงานจำเพาะในการนวดแบบเน้นการเฉือนต่อการขึ้นฟู และสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแบ่งโด
- 3) เพื่อศึกษาผลของการผสมเมล็ดลินินต่อการขึ้นฟู และสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแบ่งโด

## บทที่ 2

### ตรวจเอกสาร

#### 2.1 ธัญพืช

ธัญพืช (Cereal grains) จัดเป็นอาหารที่ได้รับความนิยมจากประชากรทั่วโลก การบริโภค เมล็ดธัญพืชจะแตกต่างกันไปตามภูมิภาค เมล็ดธัญพืชบางชนิดมีเปลือกแข็งจึงต้องผ่านการขัดสีหรือ การแปรรูปก่อนนำมาบริโภค บางชนิดสามารถรับประทานได้โดยไม่ต้องผ่านการแปรรูป ขัดสี หรือ ผ่านการขัดสีที่น้อยมาก เช่น ถั่วเมล็ดแห้งซึ่งมีโปรตีนสูง อาทิ ถั่วเขียว ถั่วดำ ถั่วแดง และธัญพืชมีกาบ ใยเป็นส่วนประกอบสูง เช่น เมล็ดลินิน (Flaxseed) เป็นต้น การที่ธัญพืชเหล่านี้ผ่านการขัดสีที่น้อย มากทำให้อุดมไปด้วยคุณค่าทางโภชนาการ จึงเหมาะแก่การนำมาบริโภคทั้งโดยตรงหรือเพิ่มคุณค่า ให้แก่อาหารประเภทอื่น

##### 2.1.1 เมล็ดลินิน

เมล็ดแฟลกซ์หรือเมล็ดลินิน (Flaxseed) เป็นพืชในตระกูล *Linaceae* มี 2 สายพันธุ์คือ สาย พันธุ์สีน้ำตาล และสายพันธุ์สีทอง เป็นอาหารที่มีใยอาหารสูง อุดมไปด้วยแร่ธาตุ และกรดไขมันชนิด omega-3 ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อร่างกายเช่นเดียวกับที่มีอยู่ในน้ำมันปลา น้ำมันคาโนลา วอลนัท ปลาทู น่า ปลาซาร์ดีน และสัตว์ทะเลอื่น ๆ โดยช่วยยับยั้งการแข็งตัว และขยายหลอดเลือด ลด cell damage จากการอักเสบที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ จึงมีประโยชน์อย่างมากต่อร่างกาย เมล็ดลินินมี ลักษณะคล้ายงา แต่ผิวนอกเป็นสีน้ำตาล และมีลักษณะมันเงา ดังรูปที่ 2.1 คุณค่าทางโภชนาการของ เมล็ดลินินแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ผลวิจัยของมหาวิทยาลัย Duke แนะนำเมล็ดแฟลกซ์น่าจะมีผลดีต่อ การหยุดยั้งการเติบโตของมะเร็งต่อมลูกหมาก ลดความรุนแรงของเบาหวาน ทำให้ระดับน้ำตาลใน เลือดคงที่



รูปที่ 2.1 เมล็ดลินิน (ประกอบ, 2556)

นอกจากนี้เมล็ดลีนินยังอุดมไปด้วยวิตามินเอ วิตามินบี และบี 2 วิตามินซี ดี และวิตามินอี รวมไปถึงแร่ธาตุต่าง ๆ แถมยังมีโปรตีนเกือบทุกชนิดที่ร่างกายต้องการ มีกรดอะมิโน (Amino acid) ที่ช่วยยับยั้งความหิว ช่วยให้เส้นผม และเล็บแข็งแรง ช่วยให้ผิวพรรณสุขภาพดี เปล่งปลั่ง

เมล็ดลีนินมีไฟเบอร์ 2 ชนิด คือ ที่ละลายน้ำได้ จะช่วยลดระดับโคเรสเตอรอล และปรับระดับกลูโคสในร่างกาย ทำให้อายุการรับประทานอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตน้อยลง ส่วนไฟเบอร์ที่ไม่ละลายน้ำจะช่วยทำความสะอาดลำไส้ ช่วยไม่ให้ของเสียสะสมอยู่ในร่างกายนาน เมล็ดลีนินมีผลเป็นยาระบายท้องผูก เพราะมีความเป็นเยื่อสูง ช่วยในระบบขับถ่ายให้เป็นไปตามธรรมชาติ ลดความเสี่ยงต่อการเป็นมะเร็งในระบบทางเดินอาหาร แต่การบริโภคปริมาณมากโดยไม่บริโภคน้ำเพียงพอจะทำให้ไปอุดตันในลำไส้เล็กได้

ทางอุตสาหกรรมอาหารสามารถสกัดน้ำมันจากเมล็ดลีนินได้ เช่น โอเมก้า 3 โอเมก้า 6 ซึ่งจำเป็นต่อร่างกาย แต่ร่างกายไม่สามารถผลิตเองได้ โอเมก้าทั้งสองตัวนี้มีส่วนช่วยให้ฮอร์โมนโปรสตาแกลนดิน (Prostaglandins) และเอโคซานอยด์ (Eicosanoids) ไปเลี้ยงสมอง ระบบประสาท ผิวหนัง และระบบสืบพันธุ์ นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยป้องกันเลือดข้น และจับกันเป็นก้อนนั่นคือ ช่วยควบคุมความดันในเลือด ในแถบยุโรปเมล็ดลีนินถือเป็นอาหารที่ใช้ในการบำรุงกำลัง มีการนำเมล็ดลีนินมาใช้เป็นส่วนผสมของขนมปัง ซึ่งน้ำมันในเมล็ดลีนินจะทำให้ขนมปังมีความชุ่มฉ่ำ และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาให้นานขึ้น (Ebadi, 2006)

### 2.1.2 ธัญพืชประเภทถั่ว

#### - ถั่วเขียว

ถั่วเขียว (Mung bean) เป็นพืชล้มลุกในตระกูลถั่ว *Leguminosae* มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek ถือเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยเนื่องจากมีอายุสั้น จึงใช้น้ำน้อยกว่าพืชไร่อื่นหลายชนิด และงอกได้เร็ว จึงนิยมปลูกกันอย่างแพร่หลายทุกภูมิภาคโดยปลูกหมุนเวียนสลับกับการปลูกพืชไร่อื่น ๆ เพื่อตัดวงจรการระบาดของศัตรูพืช ส่วนที่นำมาบริโภคคือใบเลี้ยง (Cotyledons) สีเปลือกนอกส่วนใหญ่เป็นสีเขียว ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ถั่วเขียว (นิรนาม1, 2556)

ถั่วเขียวมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ แป้ง 62.7% โปรตีน 21.7% ความชื้น 10.2% ไขมัน 1.5% และเส้นใย 3.5 - 4.5% นอกจากนี้ยังมีวิตามินบี 1 (Thiamine) วิตามินบี 2 (Riboflavin) วิตามินบี 3 (Niacin) และวิตามินซี (Ascorbic acid) คุณค่าทางโภชนาการของถั่วเขียวแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

นอกจากนี้ถั่วเขียวยังมีสรรพคุณทางยา คือ ช่วยขับของเหลวในร่างกาย ช่วยลดความดันโลหิต ช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคหัวใจ ช่วยขับร้อน แก้อาการร้อนใน และยังช่วยบำรุงสายตา

ถั่วเขียวยังใช้ประโยชน์ในการประกอบอาหาร เช่น นำมาทำขนมชนิดต่าง ๆ ทำแป้ง ทำวุ้นเส้น (ศรีชาติ, 2542) มีรายงานวิจัยว่าวุ้นเส้นที่ทำจากถั่วเขียวให้ค่าการตอบสนองต่อน้ำตาลในเลือด (Glycemic index) ต่ำ เมื่อเทียบกับอาหารคาร์โบไฮเดรตอื่น ๆ เช่น ข้าวเหนียว ข้าวเจ้า จึงเหมาะสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวานมากกว่าอาหารจำพวกแป้ง (Starch) เพราะแป้งจะมีผลต่อระดับไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ในเลือด โดยคาร์โบไฮเดรตที่บริโภคเข้าไปจะถูกเปลี่ยนเป็นไตรกลีเซอไรด์ ยามที่ร่างกายมีการสะสมของไกลโคเจนเพียงพอ ซึ่งระดับคอเลสเตอรอล (Cholesterol) และไตรกลีเซอไรด์ในเลือดมีความสัมพันธ์กับโรคที่เกี่ยวข้องกับหัวใจ และหลอดเลือด (นิรนาม 2, 2556) อย่างไรก็ตาม การบริโภคถั่วเขียว และผลิตภัณฑ์จากถั่วเขียว ควรอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะ เพราะถ้ากินมากเกินไปก็ทำให้ร่างกายได้รับพลังงานจากคาร์โบไฮเดรตเกินกว่าที่ร่างกายต้องการใช้ และถูกเปลี่ยนเป็นไขมันสะสมตามส่วนต่างๆ ของร่างกาย

#### - ถั่วแดง

ถั่วแดง (Red bean) หรือถั่วแดงหลวง ชื่อสามัญ Red Kidney bean ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ปัจจุบันถั่วแดงหลวงได้กลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของชาวไทยภูเขา และเป็นพืชที่สนใจของเกษตรกรในพื้นที่ราบทั่วไปในเขตภาคเหนือ ถั่วแดงเป็นพืชที่มีโปรตีน และคุณค่าทางอาหารสูง องค์ประกอบที่สำคัญของถั่วแดง คือ แป้ง 58.16%, โปรตีน 21.97%, เส้นใย 5.40% และไขมัน 0.58% คุณค่าทางโภชนาการแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ถั่วแดงสามารถใช้ประโยชน์เป็นอาหารลดความอ้วน และเป็นอาหารสำหรับผู้ป่วยเป็นโรคเบาหวานได้ดีอีกด้วย อีกทั้งยังให้ประโยชน์อีกหลายอย่าง คือ ขับพิษ ปวดประจำเดือนผิดปกติ ช่วยขับปัสสาวะ บรรเทาอาการปวดบวม และบรรเทาอาการปวดข้อต่อ



รูปที่ 2.3 ถั่วแดง (นิรนาม 3, 2556)

โดยทั่วไปมักจะรับประทานเป็นของหวาน เช่น ถั่วแดงต้มน้ำตาล ขนมปังเนื้อถั่วแดงหรือไอศกรีมถั่วแดง เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำมาประกอบอาหารคาว เช่น หมูอบถั่วแดง แกงถั่วโอสถ และซูปถั่วแดง เป็นต้น (นาค, 2556)

ถั่วแดงจัดว่าเป็นถั่วที่ให้โปรตีนสูง ในขณะที่เดียวกันก็เป็นถั่วที่ให้ไขมันอิ่มตัวต่ำมาก ศาสตราจารย์ มาร์ก บริก (Prof. Mark Brick) จากมหาวิทยาลัย โคโลราโด (Colorado State University) สหรัฐอเมริกา ผู้ที่ได้ทำการศึกษาทางด้านการใช้ประโยชน์จากถั่วในการป้องกันโรค มีความเห็นว่า กินโปรตีนจากถั่วแดงร่วมกับถั่วหลากชนิดบ่อยครั้งแทนโปรตีนจากเนื้อสัตว์ จะทำให้น้ำหนักตัวลดลง พร้อมกับช่วยป้องกันปัญหาสุขภาพในระยะยาวได้ อีกทั้งถั่วแดงมีสารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant) คือ Polyphenolics ช่วยยับยั้งการเกิดโรคหัวใจได้อีกด้วย และมีสารพิวรีน (Purine) อยู่ในระดับปานกลาง แม้จะไม่มากนักแต่ผู้ป่วยที่เป็นโรคเกาต์ควรรับประทานในปริมาณที่จำกัดพอเหมาะ เพราะสารดังกล่าวสามารถกระตุ้นทำให้อาการของข้ออักเสบกำเริบได้ (Frynn, 2013)

#### - ถั่วดำ

ถั่วดำ (Black bean) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Vigna senesis* หรือ *Vigna unguiculata* (L.) Walp. จัดเป็นพืชล้มลุก เปลือกหุ้มเมล็ดเป็นสีดำ ดังรูปที่ 2.4 เป็นพืชตระกูลถั่วที่มีอายุเก็บเกี่ยวสั้นทนแล้ง ถั่วดำจัดเป็นถั่วชนิดที่มีโปรตีนสูง ไขมันต่ำ มีคาร์โบไฮเดรตสูง (ทิพวดี, 2550) แม้ว่าถั่วดำจะมีปริมาณไขมันเพียงเล็กน้อย แต่น้ำมันมีคุณสมบัติคล้ายน้ำมันถั่วเหลือง นอกจากนี้ถั่วดำยังมีสารแอนโทไซยานิน ใช้แต่งสีขนม โดยต้มเกี่ยวกับน้ำหรือบดผสมกับแป้ง ซึ่งนับเป็นตัวล้างพิษชั้นดี ถั่วดำสามารถนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด เช่น น้ำถั่วดำ ข้าวเหนียวถั่วดำ และโศรายากิ เป็นต้น โดยคุณค่าทางโภชนาการของถั่วดำแสดงได้ไว้ในตารางที่ 2.1 ในทางสมุนไพรถั่วดำมีรสหวาน ขับของเหลวในร่างกาย บำรุงไต ขับเหงื่อ แก้อาการบวมน้ำ แก้อ่อนใน และบำรุงสายตา เหมาะสำหรับผู้ที่มีอาการบวมน้ำ เหน็บชา ดีซ่าน ไตเสื่อม ปวดเอว อีกทั้งถั่วดำยังมีโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต แคโรทีน (carotene) ไนอะซิน (niacin) วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 และสารที่ช่วยบรรเทาอาการปวดลำไส้เล็ก



รูปที่ 2.4 ถั่วดำ (นิรนาม 4, 2556)

จากงานวิจัยพบว่าผู้ที่บริโภคถั่วดำ 3 ถ้วยต่อวัน มีโอกาสเป็นโรคหัวใจน้อยกว่าผู้ที่ไม่บริโภค (นิรนาม4, 2556) แต่อย่างไรก็ตามผู้ป่วยโรคเกาต์ควรรับประทานในปริมาณที่จำกัด เนื่องจากถั่วดำมีสารพิวรีน (Purine) ระดับปานกลาง สารดังกล่าวอาจเป็นตัวกระตุ้นทำให้อาการข้ออักเสบกำเริบขึ้นได้

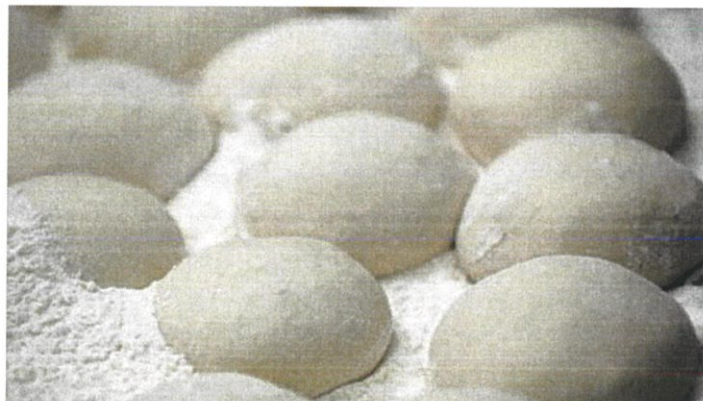
ตารางที่ 2.1 สารอาหารในธัญพืช (100 g)

สารอาหาร	ถั่วเขียว	ถั่วแดง	ถั่วดำ	เมล็ดลินิน
โปรตีน (g)	23.86	24.37	21.6	18.29
ไขมัน (g)	1.15	0.25	1.42	42.16
คาร์โบไฮเดรต (g)	62.62	59.8	62.36	28.88
เส้นใยอาหาร (g)	16.3	24.9	15.5	27.3
แคลเซียม (mg)	132	195	123	255
โซเดียม (mg)	15	11	5	30
คลอเรสเตอรอล (mg)	0	0	0	0
พลังงาน (kcal)	300	330	341	534

ที่มา: (Anonymous 1, 2556)

## 2.2 แป้งโด

แป้งโดคือ เป็นส่วนผสมของแป้งสาลีกับน้ำซึ่งถูกนวดให้เข้ากัน มีลักษณะ เหนียว นุ่ม ยืดหยุ่น สามารถดึงเป็นแผ่นบางได้โดยไม่ขาดง่าย (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.5 แป้งโด (Kacey, 2014)

## 2.2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของแป้งโด

### - แป้งสาลี

กระบวนการผลิตแป้งสาลีสิ่งสำคัญคือ ข้าวสาลีที่นำมาใช้ในการผลิต สำหรับข้าวสาลีที่นำมาไม่แป้งสาลีนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ข้าวสาลีชนิดแข็ง (Hard wheat) กับข้าวสาลีชนิดอ่อน (Soft wheat) ข้าวสาลีชนิดแข็งเมื่อนำมาไม่จะได้แป้งสาลีชนิดแข็ง ซึ่งเป็นแป้งที่มีโปรตีนสูง และมีคุณภาพดี มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้สูง เหมาะสำหรับการทำขนมปัง เพราะสามารถนวดผสมให้ได้ก้อนแป้งที่มีความยืดหยุ่นดี ทนต่อสภาพการผสม และการหมักรวมไปถึง ทนต่ออุณหภูมิของห้อง และเครื่องผสม มีคุณสมบัติในการกักเก็บก๊าซที่ดี ซึ่งเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณภาพ คือมีรู และเนื้อสัมผัสที่ดี ส่วนข้าวสาลีชนิดอ่อน เมื่อนำมาไม่ก็จะได้แป้งสาลีชนิดอ่อน ซึ่งมีโปรตีนต่ำ มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ต่ำกว่าแป้งชนิดแข็ง มีความทนทานต่อการผสม และการหมักที่ต่ำ เหมาะสำหรับใช้ทำผลิตภัณฑ์ขนมเค้ก และคุกกี้ เมล็ดข้าวสาลีนั้นประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

- รำ (Bran) เป็นส่วนแข็งที่อยู่ด้านนอกสุดของเมล็ด ประกอบด้วยเซลล์หลายชั้น มีอยู่ประมาณ 14% ของเมล็ด

- เอนโดสเปิร์ม (Endosperm) เป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางของเมล็ด ประกอบไปด้วยเม็ดสตาร์ช (starch granules) จำนวนมาก และมีโปรตีนที่ทำให้เกิดกลูเทน ส่วนนี้จะมีอยู่ประมาณ 84% ของเมล็ด

- จมูกข้าว (Germ) เป็นส่วนที่อยู่ตอนล่างของเมล็ด ประกอบด้วยไขมันเป็นส่วนใหญ่ และมีวิตามิน แร่ธาตุอยู่บ้าง ส่วนนี้จะมีอยู่ประมาณ 2% ของเมล็ด

ในการผลิตแป้งสาลีเพื่อใช้ในการทำผลิตภัณฑ์เบเกอรี่นั้น ส่วนที่เป็นรำ ชั้นของแอสโลน (อยู่ถัดจากชั้นของรำ) และจมูกข้าวจะถูกขัดสีออกไป เนื่องจากในส่วนของรำ และชั้นแอสโลนนั้นจะประกอบด้วยสารต่างๆ ที่ร่างกายย่อยไม่ได้ เป็นพวกกาก ถ้ามีปนอยู่ในแป้งจะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ลดลง ส่วนจมูกข้าวนั้นมีปริมาณไขมันสูง ถ้ามีอยู่ในแป้งก็จะมีผลต่อคุณภาพในการเก็บของแป้งทำให้แป้งมีกลิ่นหืนได้ แป้งสาลีถือเป็นวัตถุดิบที่สำคัญเป็นส่วนผสมหลักที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ และเนื่องจากแป้งมีหลายชนิด แต่ละชนิดก็เหมาะสำหรับการทำผลิตภัณฑ์เฉพาะอย่าง ผู้ซื้อจะต้องเลือกใช้แป้งสาลีที่มีคุณลักษณะเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการทำ โดยพิจารณาจากปริมาณโปรตีนกลูเทนภายในแป้ง แป้งสาลีมีองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.2

กลูเทนประกอบด้วยกลูเตนิน และไกลอะดลินในอัตราส่วนเท่า ๆ กัน กลูเตนินจะทำให้ก้อนแป้งโดสามารถเก็บกักก๊าซที่ขึ้นฟูไว้ได้ จะให้ความแข็งแรงกับกลูเทนซึ่งเป็นโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ ส่วนไกลอะดลินเป็นสารที่อ่อน และเหนียวจะเป็นตัวเชื่อม โดยคุณลักษณะของแป้งสาลีที่ดี สีของแป้งควรมีสีขาว ถ้าหากมีสีอื่นปน เช่น สีเหลืองอ่อนของแซนโทฟิลล์ หรือสีครีม จะทำให้ขนมปังมีเนื้อใน (Crumb) ที่มีสีไม่ดี ดังนั้นแป้งที่ไม่ออกมาก็ควรผ่านการฟอกสีก่อน แป้งโดต้องสามารถอุ้มก๊าซ

(Strength) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมัก และทนต่อสภาพการผสมต่าง ๆ (Tolerance) ได้ดีโดยที่ กลูเทินไม่ฉีกขาด ความทนต่อสภาพต่าง ๆ นี้ สัมพันธ์กับกลูเทินโดยตรง แป้งสาลีที่มีคุณภาพ จะมีความทนต่อสภาพต่าง ๆ สูง จะสามารถหมักได้นาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการขึ้นฟู และมีปริมาตรที่ดี นอกจากนี้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของแป้ง (Water absorption) ควรค่าที่สูง เนื่องจากแป้งที่มีคุณลักษณะในการดูดซึมน้ำได้มากพอ จะทำให้คุณภาพของแป้งยังคงสภาพดีอยู่ ผลของการที่แป้งดูดซึมน้ำได้มาก จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาตรมากขึ้น เนื้อในไม่แห้ง ทำให้สามารถเก็บรักษาได้ดี และการนวดผสม ควรมีความสม่ำเสมอเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของแป้ง (Uniformity) หากแป้งขาดความสม่ำเสมอแล้ว จะมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่มีมาตรฐาน จึงต้องทำการตรวจสอบในทุกกระบวนการผลิต

#### - น้ำ

น้ำดื่มสะอาดเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตอื่นๆ แม้ว่าน้ำจะไม่มีแคลอรีหรือสารอาหารที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ใดๆ น้ำมีบทบาทสำคัญในเศรษฐกิจโลก เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายของสารเคมีหลากหลายชนิด และอำนวยความสะดวกในเรื่องการให้ความเย็นในภาคอุตสาหกรรม การคมนาคม และการเกษตรกรรม (Pollack and Gerald, 2011)

ในอุตสาหกรรมอาหารส่วนของกระบวนการผลิตขนมปัง น้ำเป็นส่วนประกอบหลักที่ขาดไม่ได้ เนื่องจากน้ำมีหน้าที่รวมตัวกับโปรตีนในแป้งทำให้เกิดกลูเทิน น้ำที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์เบเกอรี่อาจเป็นน้ำทั่วไป น้ำที่อยู่ในน้ำนมหรือน้ำผลไม้ก็ได้ โดยหน้าที่ของน้ำได้แก่ ช่วยควบคุมความชื้นของแป้งโด ช่วยละลายส่วนผสมอื่น ๆ เช่น น้ำตาล เกลือ ทำให้สตาร์ชเกิดการพองตัว และยังช่วยการกระจายยีสต์ในการหมักแป้งโด

#### ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของแป้งสาลี

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
คาร์โบไฮเดรต	79.01
โปรตีน	8.39
น้ำตาล	1.00
ความชื้น	7.07
แร่ธาตุ	3.08
ไขมัน	0.43
อื่น ๆ	2.02

ที่มา: จิตธนา และอรอนงค์, 2537

## - ยีสต์

ยีสต์หรือสำเหล้า (yeast) คือ รากลุ่มหนึ่งที่มีขนาดใหญ่เป็นเซลล์เดี่ยว มีรูปร่างหลายแบบ เช่น รูปร่างกลม รี สามเหลี่ยม รูปร่างแบบมะนาว เป็นต้น ส่วนใหญ่มีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ โดยวิธีการแตกหน่อ พบทั่วไปในธรรมชาติในดิน น้ำ และในส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยที่ยีสต์บางชนิดพบอยู่กับแมลง และในกระเพาะของสัตว์บางชนิด แต่แหล่งที่พบยีสต์อยู่บ่อย ๆ คือ แหล่งที่มีน้ำตาลความเข้มข้นสูง เช่น น้ำผลไม้ที่มีรสหวาน

ยีสต์เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กมาก มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส (Eukaryotic micro-organisms) จัดอยู่ในกลุ่มจำพวกเห็ด รา (Fungi) มีทั้งที่เป็นประโยชน์ และโทษต่ออาหาร มีการนำยีสต์มาใช้ประโยชน์นานมาแล้ว โดยเฉพาะการผลิตอาหารที่มีแอลกอฮอล์ และการผลิตขนมปัง ในกระบวนการผลิตขนมปัง ยีสต์ช่วยให้แป้งโดขึ้นฟูโดยการหมัก ยีสต์เป็นรากลุ่มหนึ่งที่มีขนาดเล็ก เมื่อใส่ลงในแป้งนวม และน้ำตาลที่เป็นอาหารของยีสต์ ยีสต์จะกิน และเจริญเติบโตสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้ขนมขึ้นฟู เนื้อนุ่ม มีกลิ่นหอมเฉพาะตัว ยีสต์จะทำหน้าที่ตั้งแต่กระบวนการผสม การนวด ไปจนถึงการอบ และเมื่อนำไปอบยีสต์จะหยุดทำหน้าที่ ยีสต์ที่ใช้ในการทำเบเกอรี่มี 3 ชนิด คือ

ยีสต์สด เป็นยีสต์ที่ผลิตขึ้นโดยการเลี้ยงอัดรวมกัน โดยมีอาหารของยีสต์ที่เปียกชื้นเป็นก้อนแข็ง ห่อด้วยกระดาษตะกั่วหรือพลาสติกที่กันน้ำได้

ยีสต์แห้งชนิดเม็ด เป็นยีสต์แห้งเป็นยีสต์ที่อยู่ในสภาพการพักตัว โดยยีสต์ที่นำไปผ่านกระบวนการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำที่ควบคุมไว้ 95 องศาฟาเรนไฮต์ ถึง 104 องศาฟาเรนไฮต์

ยีสต์แห้งชนิดผงหรือยีสต์แห้งสำเร็จรูป เป็นยีสต์ที่มีกำลังหมักสูงสุด นิยมใช้มากที่สุด มีลักษณะเป็นผงละเอียด มีความสามารถในการหมักสูง ไม่ต้องละลายน้ำก่อนนำไปใช้

ยีสต์ทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่างกัน คือ ยีสต์สดจะมีความสามารถในการหมักต่ำที่สุด และยีสต์ผงจะมีความสามารถในการหมักสูงที่สุด

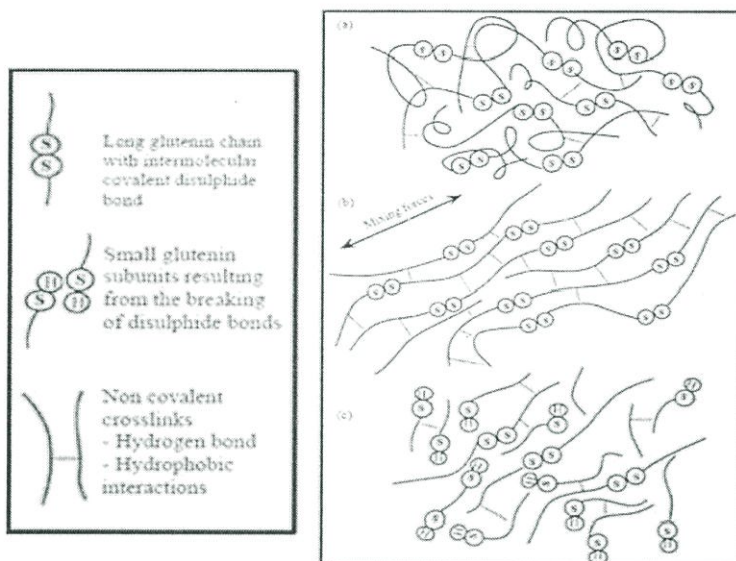
## - ไขมัน

ไขมัน หมายถึง สารประกอบหลายชนิดซึ่งมีลักษณะร่วมกันคือ ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ไม่ละลายน้ำ ไขมันในทางเคมีคือ ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งเป็นไตรเอสเทอร์ของกลีเซอรอล (Glycerol) กับกรดไขมัน (Fatty acid) ไขมันเป็นลิพิดชนิดหนึ่ง ซึ่งแยกแยะได้จากโครงสร้างทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ โมเลกุลไขมันสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตหลายชนิด โดยทำหน้าที่ทั้งเชิงโครงสร้าง และเมตาบอลิซึม ไขมันในที่นี้รวมไปถึงน้ำมันด้วย

ไขมัน และน้ำมันที่ใช้ในกระบวนการผลิตขนมปัง มีแหล่งที่มาจากทั้งพืช และสัตว์ ตัวอย่างของไขมันที่ได้จากพืช เช่น น้ำมันถั่วลิสง เต้าเจี้ยว น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันงา น้ำมันมะพร้าว น้ำมันมะกอก และเนยโกโก้ เป็นต้น ส่วนตัวอย่างไขมันสัตว์ที่กินได้ เช่น มันหมู น้ำมันปลา เนยเหลว และชั้นไขมันวาล์ว ไขมันเหล่านี้ได้มาจากนม และเนื้อ ตลอดจนจากไถ่หนังของสัตว์ สำหรับเนยขาว



หลังจากที่แป้งโดเกิดความยืดหยุ่นสูงสุดแล้ว ถ้ายังคงผสมต่อไปแป้งโดที่ได้จะเริ่มนิ่ม มีลักษณะเหนียวติดมือ เรียกว่า แป้งโดเกิดการแตกสลาย (Broken down) สาเหตุเกิดจากการใช้แรงเหวี่ยงนานเกินไป ทำให้แรงต้านทานการผสมลดลง ดังรูปที่ 2.7 ในวงการอาหาร แป้งสาลีเป็นแป้งที่ใช้ในการทำผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะของโปรตีนกลูเทนในแป้งสาลี มีผลต่อการดูดซับน้ำของโมเลกุลแป้ง การเกิดเจล และความหนืด (สวรัักษ์, 2551)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิดพันธะของกลูเทน (a) เมื่อเริ่มต้นผสม (b) เมื่อมีความยืดหยุ่นสูงสุด และ(c) เมื่อทำการผสมมากเกินไป (Zaidel *et al.*, 2010)

### 2.2.3 คุณลักษณะทางเคมีของแป้งโด

แป้งโดเกิดจากการรวมตัวของแป้งสาลี และน้ำ แป้งสาลีเป็นผลิตภัณฑ์ของการนำส่วนที่เป็นเอนโดสเปิร์มของแป้งข้าวสาลี (wheat flour) มาโม่ (milling) ให้เป็นผงละเอียด โปรตีนสำคัญในข้าวสาลี คือ กลูเทน ซึ่งเป็นไกลโคโปรตีน เกิดจากการรวมตัวของโปรตีนกลูเตนิน (glutenin) และไกลอะดลิน (gliadin) ในสัดส่วนเท่าๆ กัน โดยจะสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) ทำให้กลูเทนมีลักษณะเหนียว และยืดหยุ่น สามารถเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ผลิตขึ้นโดยยีสต์ (yeast) หรือผงฟูเอาไว้ได้ ก่อนแป้งที่ได้จะเรียกว่า แป้งโด

ไกลโคโปรตีน (glycoprotein) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากการรวมตัวของพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตกับโปรตีน (protein) คาร์โบไฮเดรต และโปรตีนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยเกิดได้ 2 รูปแบบคือ พันธะแบบ N - ไกลโคไซด์ (N-linked) โมเลกุลของน้ำตาล (saccharide) จะสร้างพันธะ N - ไกลโคไซด์แบบปีตากับหมู่เอมีน (amine) ของกรดแอมิโนแอสพาราจีน (asparagine) ที่อยู่ในลำดับแรกของ Asparagine - Amino acid -

Serine หรือ Asparagine - Amino acid - Threonine โดยที่ Amino acid คือกรดแอมิโนใด ๆ ก็ได้ ยกเว้น โพรลีน (proline) และแอสพาราจีน พันธะแบบ O - ไกลโคไซด์ (O - linked) โมเลกุลของ แซ็กคาไรด์จะสร้างพันธะ O - ไกลโคไซด์แบบแอลฟา กับหมู่ไฮดรอกซิลของกรดแอมิโนซีรีน (serine) และทรีโอนีน (threonine) ไกลโคโปรตีนเป็นโปรตีนสายยาว เกิดจากกรดอะมิโนหลายตัวเชื่อมต่อกัน ด้วยพันธะเพปไทด์ ในแต่ละตำแหน่งลักษณะของพันธะจะแตกต่างกัน ซึ่งมีประเภทของพันธะที่เกิดขึ้น แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

พันธะโควาเลนต์ เป็นพันธะที่เกิดขึ้นมากที่สุดบนสายไกลโคโปรตีนหนึ่ง ๆ การเชื่อมต่อระหว่างพันธะโควาเลนต์จะใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างสองอะตอมส่งผลให้มีพลังงานระหว่างพันธะสูง พันธะระหว่างกรดอะมิโนซิสทีน (Cystine) ที่ตำแหน่งซัลเฟอร์ เรียกว่าไดซัลไฟด์ (Disulfide linkage) มีความสำคัญต่อความยืดหยุ่นของกลูเทนเป็นพันธะไอออนิก ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ (anion) อันเนื่องมาจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน มีการเกิดน้อยในโครงสร้างกลูเทน พันธะไฮโดรเจนพันธะไฮโดรเจน เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสองโมเลกุล ซึ่งแต่ละโมเลกุลนั้นประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนสร้างพันธะโคเวเลนต์กับอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (en) สูงมาก ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีไฮโดรเจนอยู่ มีจำนวนการเกิดพันธะมากที่สุดถึง 42% จึงมีความสำคัญต่อลักษณะของโครงสร้างกลูเทนมากกว่าพันธะอื่น เป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างกรดอะมิโนกลูตามิกในรูปกลูตามีน สำหรับพันธะแวนเดอร์วาลส์ มีแรงดึงดูดแบบอ่อน ๆ ที่ช่วยยึดโมเลกุลเข้าด้วยกันเกิดขึ้นระหว่างกรดอะมิโนที่ไม่มีประจุกับกรดไขมัน หรือระหว่างสคาร์ชกับกลีเซอไรด์ พันธะนี้มีพลังงานต่ำที่สุดแต่มีผลต่อลักษณะของกลูเทน โดยก่อให้เกิดลักษณะการไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic bonds) ระหว่างกลุ่มของโปรตีนที่ไม่มีประจุ (Nonpolar groups) ไกลอะดิน และกลูเตนินเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดกลูเทน พันธะของไกลอะดินจะเป็นในลักษณะของการเชื่อมกันภายในโมเลกุล ส่วนกลูเตนินเป็นการเชื่อมระหว่างโมเลกุล เนื่องจากลักษณะพันธะของโปรตีนทั้งสองแตกต่างกันจึงมีผลทำให้ลักษณะของไกลอะดิน และกลูเตนินต่างกัน ในทางกายภาพ ไกลอะดินมีคุณสมบัติในการไหลได้ดีกว่ากลูเตนิน มีลักษณะเหนียวคล้ายยาง แต่เมื่อรวมตัวกันเป็นกลูเทนจะได้ลักษณะที่เหมาะสม มีความยืดหยุ่นพอดี (ขวัญฤดี และวชิระ, 2543)

ตารางที่ 2.3 พันธะทางเคมีที่สำคัญในแป้งโด

ชนิดของพันธะ	ลักษณะการเกิด	พลังงาน (kcal/mol)
โควาเลนต์	พันธะระหว่างอะตอมด้วยคู่อิเล็กตรอน	30-100
ไอออนิก	พันธะระหว่างประจุตรงข้าม	10-100
ไฮโดรเจน	พันธะในลักษณะอิเล็กโตรเนกาทีฟของอะตอมระหว่างไฮโดรเจน (กับออกซิเจน)	2-5
แวนเดอร์วาลส์	พันธะที่เกิดระหว่างกลุ่มที่ไม่มีประจุ	มากกว่า 0.5

ที่มา: Pylar, 1973

## 2.2.4 กระบวนการผลิตแป้งโด

### - การผสมแป้งโด

เริ่มจากการนำส่วนผสมของแป้งโดทั้งหมดผสมเข้าด้วยกัน โดยขั้นตอนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมแป้งโด เริ่มจากขั้นแรก Pick up stage คือ ส่วนผสมต่าง ๆ ที่นำมาผสมรวมกันจะเริ่มเกาะตัวกัน ส่วนผสมบางส่วนมีลักษณะเปียก บางส่วนมีลักษณะแห้ง ถือเป็นขั้นตอนที่เริ่มผสมส่วนผสมทั้งหมดจึงยังไม่เข้ากันดี ถัดไปเป็นขั้นตอน Clean up stage กล่าวคือ เป็นขั้นตอนที่ส่วนผสมต่าง ๆ จะรวมเข้ากันได้มากยิ่งขึ้นกว่าเดิม ถัดไปคือ ขั้นตอน Development stage เป็นขั้นตอนที่ก้อนแป้งเกาะรวมกันจนมีลักษณะเนียน นุ่ม และเกิดพันธะกลูเทนภายในแป้งโดขึ้น มีลักษณะเป็นร่างแห แป้งโดที่ได้จะไม่เหนียวติดมือ และขั้นตอนสุดท้าย Final stage คือ ขั้นตอนที่แป้งโดรวมตัวกันจนมีลักษณะเนียนมากขึ้น สามารถนำแป้งโดที่ได้มาซึ่งเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ โดยจะมีโยที่เหนียว

### - การนวดแป้งโด

เครื่องผสมจะค่อย ๆ ผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน ส่วนผสมจะมีลักษณะเกาะกันเป็นเม็ดหยวบ และแฉะติดตะขอปั่นในช่วงแรก จากนั้นเมื่อทำการปั่นผสมต่อ ส่วนผสมที่ได้จะค่อย ๆ ผสมจนกลายเป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะเรียบเนียนขึ้น ไม่เหนียวติดโถผสม และตะขอปั่น สามารถยึดเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าแป้งโดได้รับการนวดอย่างเหมาะสมแล้ว ควรหยุดการนวดทันทีเนื่องจากถ้ายังคงดำเนินการนวดต่อไป จะทำให้แป้งโดเกิดการแตกสลาย (broken down) ทำให้แรงต้านทานการนวดน้อยลง (Peighambardoust *et al.*, 2005) แป้งโดจะมีลักษณะนิ่ม จนเหลวติดมือไม่สามารถยึดเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ เนื่องจากพันธะกลูเทนภายในแป้งโดเกิดการฉีกขาด ทำให้เนื้อสัมผัสภายในร่วน แต่ในขณะเดียวกัน ถ้าแป้งโดได้รับการนวดน้อยเกินไป จะทำให้แป้งโดมีความยืดหยุ่นน้อย ความสามารถในการกักเก็บก๊าซในกระบวนการหมักลดลง ส่งผลให้ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ลดลง ทั้งนี้การนวดแป้งโดอาจทำได้หลากหลายวิธี เช่น การนวดแป้งโดด้วยมือ

### - การหมักแป้งโด

เมื่อนวดแป้งโดผสมจนได้แป้งโดที่เหมาะสมแล้ว จะต้องหมักแป้งโดทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่ง ระยะเวลาการหมักขึ้นอยู่กับวิธีการทำผลิตภัณฑ์ สถานที่หมักแป้งโด อุณหภูมิที่ใช้ในการหมัก จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ให้มีอุณหภูมิอยู่ที่ 78 – 80°F และมีความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 70 - 78% เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวหน้าของแป้งโดเปียกหรือแห้งจนเกินไป ซึ่งอาจเป็นผลต่อผลิตภัณฑ์หลังการอบได้หรืออาจใช้ผ้าคลุมเพื่อป้องกันน้ำภายในแป้งโดระเหยสู่อากาศภายนอก เพื่อป้องกันไม่ให้ผิวแป้งโดแห้งเกินไป ถ้าอากาศเย็นมากควรเพิ่มปริมาณยีสต์ที่ใช้ในสูตร และอาจจะต้องยืดระยะเวลาการหมักออกไปเล็กน้อย แต่ถ้าอากาศร้อนมากควรลดปริมาณของยีสต์ลง และใช้เวลาในการหมักให้สั้นลง

ในระหว่างที่หึ่งแปงโดไว้นั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายในแปงโด โดยอีสต์จะใช้น้ำตาลเป็นอาหาร และสตาร์ชบางส่วนจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาล จนในที่สุดกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอลกอฮอล์ ก๊าซนี้มีส่วนทำให้แปงโดขยายตัว หลังจากที่หมักไว้ระยะเวลาหนึ่งเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นเกือบเท่าตัวจะต้องทำให้แปงโดมีปริมาตรลดลง โดยการไล่อากาศออก เพื่อทำให้ก้อนแปงโดมีอุณหภูมิเท่ากัน รวมไปถึงไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีมากเกินไป และนำอากาศบริสุทธิ์เข้าไปแทนที่ ทำให้อีสต์สามารถทำงานได้ดีขึ้น

#### - ช่วงการหมัก

ระยะเวลาที่ใช้ในการหมักแปงโดมีผลต่อผลิตภัณฑ์ จึงควรมีระยะเวลาการหมัก และปริมาณอีสต์ที่พอเหมาะ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีกลิ่นหอมของอีสต์นำรับประทาน มีรสชาติดี มีคุณลักษณะที่เหมาะสมทั้งปริมาณ และคุณภาพ แต่ถ้าหมักโดยใช้เวลานานไป ขนมปังจะมีลักษณะแฉะ เนื้อนุ่ม อย่างไรก็ตามถ้าใช้เวลาในการหมักน้อยไป ขนมปังที่ได้จะมีขนาดเล็ก สีเปลือกเข้ม เนื้อขนมปังสีไม่ขาว

#### 2.2.5 ผลของส่วนผสมต่อสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแปงโด

สมบัติทางเนื้อสัมผัสของแปงโดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ องค์ประกอบของแป้ง (ปริมาณโปรตีนสูงหรือต่ำ) สภาพะของการผสม (เวลาการผสม รูปแบบการผสม และอุณหภูมิ) และส่วนผสมต่าง ๆ (น้ำ เกลือ ยีสต์ เนย และอิมัลซิไฟเออร์)

Saha *et al.* (2011) พบว่าแป้งที่มีปริมาณโปรตีนสูงจะทำให้แปงโดมีคุณภาพดีกว่าแป้งที่มีโปรตีนต่ำ เนื่องจากแป้งที่มีปริมาณโปรตีนมากจะมีปริมาณการเกิดกลูเทนที่มากกว่าแป้งที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ ส่งผลให้แปงโดมีความยืดหยุ่นสูง สามารถขยายตัวได้ดี และมีความสามารถในการกักเก็บก๊าซที่เกิดจากการหมักได้มากกว่า

Zaidel *et al.* (2010) การเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือที่รู้จักกันว่าเกลือมีผลทำให้ช่วยเร่งการเกิดโครงสร้างกลูเทน และเพิ่มความแข็งแรงของพันธะกลูเทนมากขึ้น แต่เมื่อเติมในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้แปงโดมีลักษณะที่พองตัวได้ยาก มีปริมาตรน้อย การใส่เกลือเป็นเพิ่มค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของแปงโด ซึ่งค่า pH มีผลต่อเวลาในการผสม หาก pH มีค่าต่ำจะใช้เวลาการผสมน้อย นอกจากนี้เกลียยังทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (Elastic modulus) ลดลง เนื่องมาจากการผสมเกลือมากเกินไปทำให้พันธะของกลูเทนนั้นเกิดการแข็งตัวทำให้ความสามารถในการยืดหยุ่นลดน้อยลง

Anonymous. (2012) อธิบายว่า การใช้น้ำที่มีความกระด้างมากจะส่งผลให้พันธะกลูเทนเกิดการแข็งตัว ความยืดหยุ่นของกลูเทนลดลง น้ำที่นำมาใช้ควรเป็นน้ำที่มี pH 5 – 6 ส่วนการใส่ส่วนผสมจำพวกไขมัน ไม่ควรใส่ผสมพร้อม กับน้ำ เพราะไขมันจะไปเคลือบบนเม็ดแป้ง ทำให้ความสามารถการจับตัวกับน้ำของแป้งลดลง ส่งผลให้กลูเทนเกิดได้น้อยลง

## 2.3 เนื้อสัมผัสของอาหารและการวิเคราะห์

### 2.3.1 เนื้อสัมผัส

เนื้อสัมผัสอาหาร หมายถึง คุณภาพหรือคุณสมบัติของอาหารที่รู้สึกได้ด้วยสัมผัสภายในปาก หรือด้วยมือ อาหารมีเนื้อสัมผัสต่าง ๆ เช่น ความกรอบ (crispness) ความแข็ง (Hardness) ความนุ่ม (tenderness) เคี้ยวมัน (chewiness) นอกจากนี้เนื้อสัมผัสยังอาจเนียน เป็นก้อน เป็นทราย เปื่อย ยุ่ย เป็นต้น

เนื้อสัมผัสยังใช้เป็นดัชนีแสดงคุณภาพอาหาร อาหารที่เก็บไว้นานเนื้อสัมผัสอาจเปลี่ยนแปลงได้ด้วยเหตุผลหลายประการ ผัก และผลไม้เมื่อเสียน้ำจะเหี่ยวเฉา สูญเสียความดันเต่ง (turgor pressure) ของผลิตภัณฑ์ เช่น ไอศกรีมเป็นเม็ดทรายเนื่องจากแลคโทสตกตะกอน และการเติบโตของเกร็ดน้ำแข็งในอุณหภูมิตู้แช่แข็งมีลักษณะผันผวน ทำให้เกิดทั้งการละลาย และการกลับไปเย็นจนแข็งตัวใหม่ (thawing and freezing)

สมบัติด้านเนื้อสัมผัสของอาหารมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของอาหารโดยตรง และเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค อาหารหลายชนิดผู้บริโภคใช้เนื้อสัมผัสเป็นเกณฑ์หลักเพื่อพิจารณาตัดสินใจการยอมรับ และมีผลอย่างยิ่งกับระดับความชอบ (นิรนาม5, 2012)

### 2.3.2 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัส

การประเมินเนื้อสัมผัสอาหารคือ การวัดการตอบสนองของอาหารเมื่อได้รับแรงกระทำจากปฏิบัติการต่าง ๆ เช่น การตัด การฉีก การเคี้ยว การกด และการยึด เนื้อสัมผัสอาหารขึ้นกับคุณสมบัติการไหล (rheological property) ของอาหาร โดยทั่วไปวิธีการประเมินคุณสมบัติของอาหารแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ การวิเคราะห์โดยใช้ประสาทสัมผัส (sensory method of analysis) กับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ (instrumental method of analysis) ดังรายละเอียดโดยสังเขปต่อไปนี้

#### - การวิเคราะห์โดยใช้ประสาทสัมผัส

ในวิธีนี้การประเมินเนื้อสัมผัสอาหารกระทำโดยการเคี้ยว ดังนั้นฟัน ลิ้น และขากรรไกรจะทำหน้าที่ส่งแรงกระทำไปสู่อาหาร การที่อาหารแยกออกหรือไหลในปากยากง่ายเพียงใดย่อมบ่งบอกถึงว่ามันให้ประสาทสัมผัสแก่ผู้กระทำอย่างไร เช่น แข็ง เปราะ ข้น ไหลหยด ฯลฯ คำว่า รสปาก (mouthfeel) อาจเป็นคำทั่วไปที่ใช้บอกลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารที่เรารู้สึกในปาก ที่จริงแล้วการประเมินโดยใช้ประสาทสัมผัสมีขอบเขตมากกว่าการใช้ฟัน ลิ้น และขากรรไกร ทั้งนี้รวมถึงการใช้ประสาทสัมผัสในการดมกลิ่น ชิมรส ฟังเสียง และสัมผัส การประเมินเนื้อสัมผัสของอาหาร เกสซ์ชัณฑ์ และเครื่องสำอาง โดยการสัมผัสคือการใช้นิ้วมือ ซึ่งเปรียบได้กับการใช้ริมฝีปาก ลิ้น เพดานปาก และฟันภายในปาก การประเมินเนื้อสัมผัสอาหารโดยประสาทสัมผัสแน่นอนย่อมมีความผันแปรสูง ถึงแม้

อาจลดความผันแปรลงได้บ้างด้วยการใช้ผู้ประเมินที่ชำนาญ อย่างไรก็ตามก็ดีกว่าวิธีการที่ขึ้นกับความรูสึกชอบส่วนบุคคลนี้ยังนิยมใช้ตลอดมา

- การวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ

ทำได้โดยการใช้เครื่องมือแสดงคุณสมบัติหรือคุณภาพของอาหารแทนผลจากการทดสอบโดยวิธีใช้ประสาทสัมผัส วิธีการประเมินโดยใช้เครื่องมือมี 3 แนวทาง ได้แก่

- วิธีการวัดพื้นฐาน (fundamental method) อาศัยการวัดคุณสมบัติกายภาพ เช่น แรงเครียด/แรงเค้น

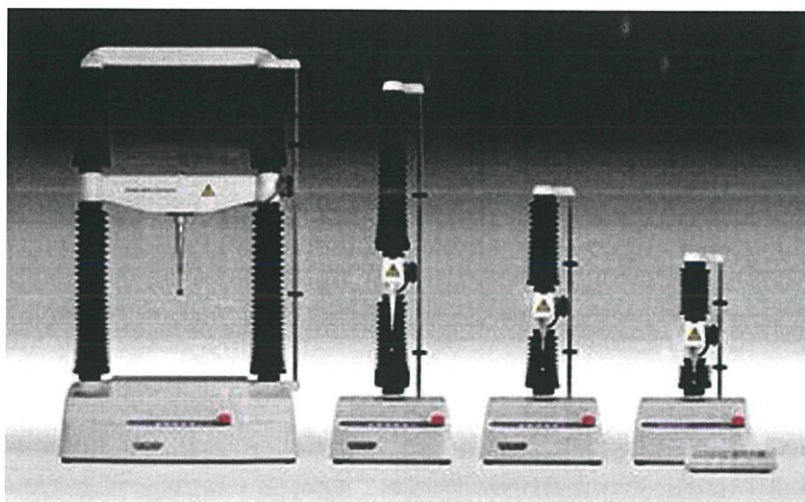
- วิธีใช้การเลียนแบบ (imitative method) เป็นการจำลองการเคี้ยวอาหารโดยใช้อุปกรณ์กล

- วิธีที่มีการทดลอง (empirical method) คือ การใช้เครื่องมือพิเศษที่สามารถวัดค่าเฉพาะทางที่เป็นประโยชน์กับการใช้งาน

ในบางครั้งการประเมินเนื้อสัมผัสอาหารโดยเครื่องมือได้รับความนิยมมากกว่าการใช้ประสาทสัมผัส เพราะเราสามารถกระทำภายใต้สภาวะที่มีการกำหนด และการควบคุมอย่างเข้มงวด นอกจากนี้ปัญหาความไม่แน่นอนของการทดลองเป็นไปได้สูงว่าเกิดจากเนื้ออาหารมีส่วนผสมหลากหลายมากกว่าจากความไม่แม่นยำของเครื่องมือ เหตุผลอีกประการสำหรับการใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมืออาจมาจากการเปลี่ยนแปลงในระดับของส่วนประกอบอาหารที่เกิดขึ้นประจำ ซึ่งอาจทำให้คุณสมบัติหลายประการของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไปด้วยในเวลาเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้บางอย่างก็ยากต่อการกลบเกลื่อน ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสร้าง ความยุ่งยากกับการวิเคราะห์โดยประสาทสัมผัส เช่น ความแน่นของเนื้อเค้กที่ไม่สม่ำเสมอมีสาเหตุมาจากปริมาณน้ำตาล เพราะฉะนั้นวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาทางด้านเนื้อสัมผัสอาหารจำนวนมากจึงเป็นการประดิษฐ์วิธีทดสอบเชิงกลขึ้นมา โดยให้มีสมรรถนะแทนการประเมินโดยใช้ประสาทสัมผัสของมนุษย์ได้ เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการประเมินเนื้อสัมผัสอาหาร (นิรนาม5, 2012)

### 2.3.3 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสโดยเครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer)

Texture Analyzer คือ เครื่องมือวัดลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหาร (รูปที่ 2.8) เป็นอีกทางวิธีหนึ่งในการทดสอบสมบัติของอาหาร เป็นเครื่องมือที่ถูกสร้างขึ้นเลียนแบบลักษณะการเคี้ยวของมนุษย์ โดยจำลองการกัด 2 ครั้ง โดยการกดหัวโพรบลงไปในวัสดุหรือชิ้นอาหาร และวัดแรงต้านที่เกิดขึ้น โดยมีมอเตอร์ทำหน้าที่ให้กำลังแก่ชุดทดสอบ ทั้งนี้การใช้หัวโพรบนั่นขึ้นอยู่กัลักษณะงานที่ต้องการ และชิ้นงานนั้นๆ ผลการทดสอบที่ได้จะอยู่ในรูปของกราฟแรง - เวลา (รูปที่ 2.9) ทั้งนี้สามารถทำการทดสอบได้หลายลักษณะ



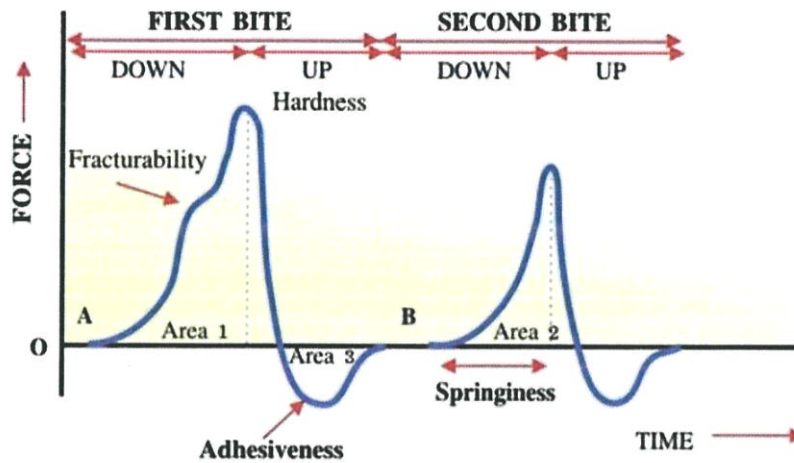
รูปที่ 2.8 เครื่องมือวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Anonymous 2, 2012)

### 2.3.4 การทดสอบแบบ Texture Profile Analysis

การทดสอบโดยใช้เทคนิค Texture Profile Analysis (TPA) สามารถวิเคราะห์ และอธิบาย ลักษณะเนื้อสัมผัสได้ 7 ลักษณะ ได้แก่ Factorability, Hardness, Cohesiveness, Adhesiveness, Springiness, Gumminess และ Chewiness โดยมีการนิยามดังนี้ (ดูรูปที่ 2.9 ประกอบ)

- Factorability คือ แรงสูงสุดที่ทำให้ตัวอย่างหรืออาหารแตกหักในครั้งแรก มีหน่วยเป็นแรง เช่น นิวตัน (N) เป็นต้น
- Hardness คือ แรงที่มีค่ามากที่สุดในช่วงการกดครั้งแรกมีหน่วยเป็นแรง เช่น นิวตัน (N) เป็นต้น
- Cohesiveness คือ พลังงานที่ใช้ยึดเกาะกันภายในอาหารเนื้ออาหาร หาได้จากอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของการกดครั้งที่ 1 ที่เป็นบวก ต่อพื้นที่ใต้กราฟของการกดครั้งที่ 2 ( $\text{Area 2}/\text{Area 1}$ )
- Adhesiveness คือ พลังงานที่จำเป็นต้องใช้เพื่อดึงหัววัด หรือหัวกด ที่สัมผัสอยู่กับอาหาร ออก หาได้จากพื้นที่ของแรงในฝั่งลบของการกดครั้งแรก ( $\text{Area 3}$ )
- Springiness คือ ความสามารถในการคืนตัวสู่สภาพเดิมของชิ้นอาหารหลังจากการกดครั้งแรก
- Gumminess คือ พลังงานที่ใช้ในการทำให้อาหารกึ่งของแข็งซึ่งมีค่าความแข็ง (Hardness) น้อย แต่พลังงานยึดเกาะกันภายใน (Cohesiveness) สูง แยกตัวออกจากกันจนถึงขั้นพร้อมที่จะกลืนได้ หาได้จากผลคูณของ Hardness กับ Cohesiveness

- Chewiness คือ พลังงานที่ต้องใช้เคี้ยวอาหารเพื่อให้อยู่ในสภาพที่พร้อมจะกลืนลงคอ หาได้จากผลคูณของ Gumminess กับ Springiness หรือ Hardness, Cohesiveness และ Springiness (พิมพ์เพ็ญ และจิราภา, 2549)



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับเวลา จากการทดสอบโดยเทคนิค Texture Profile Analysis (พิมพ์เพ็ญ และจิราภา, 2549)

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Peighambardoust *et al.* (2005) ทำการศึกษาผลของแรงเฉือนที่มีผลต่อกลิ่น ซึ่งมีความสำคัญในการกำหนดคุณภาพสุดท้ายของกระบวนการทำผลิตภัณฑ์จากแป้งสาลี โดยทำการทดลองแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากไบกวนแป้ง และแรงเฉือนแบบธรรมดา การวัดโดยไบกวนแป้งมีแรงที่เกี่ยวข้องคือ แรงเฉือน และแรงดึง จากผลการทดลองพบว่าขนาดโมเลกุลของกลูเตนนั้นมีความแตกต่างกันระหว่างทดลองแรงเฉือนแบบใช้ไบกวน และการทดลองแรงเฉือนแบบธรรมดา โดยการเฉือนโดยใช้ไบกวนพบว่าจะมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่าการเฉือนแบบธรรมดา และกลิ่นที่มีขนาดเล็กกว่าจะส่งผลให้แป้งโดมีคุณภาพที่ดีกว่า เนื่องจากแป้งที่มีกลิ่นขนาดเล็กจะมีเนื้อแป้งที่ละเอียดกว่า ทำให้มีความหนาแน่นมากกว่า แต่จะผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความฟู และปริมาตรน้อยกว่าแป้งที่มีกลิ่นขนาดใหญ่ เพราะแป้งที่มีกลิ่นใหญ่จะสามารถเก็บสะสมก๊าซปริมาณสูงได้ดีในระหว่างการหมัก

Peighambardoust *et al.* (2006) ทำการศึกษาแรงเฉือน และแรงดึงของไบกวนที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งโด โดยทำการทดลองระหว่างแรงเฉือนแบบปกติกับแรงเฉือนจากไบกวนที่สภาวะการทำงานเดียวกัน จากการทดลองพบว่าโครงสร้างของแป้งโดที่ได้จากการใช้แรงเฉือนจากไบกวนมีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างของแป้งโดที่ได้จากแรงเฉือนแบบปกติ เนื่องจากแป้งที่ทดลองแรงเฉือนจากไบกวนจะมีขนาดกลูเตนเล็ก ทำให้มีความหนาแน่นมากกว่าแป้งที่ทดลองแรงเฉือนแบบธรรมดา

Peighambardoust *et al.* (2007) ทำการศึกษาผลกระทบของพลังงานจำเพาะ และรูปแบบการเนื่องต่อการเกิดกลูเทนในโด ในการศึกษานี้ใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Couette cell ซึ่งเป็นชุดทดลองที่ผู้วิจัยทำการออกแบบ และสร้างขึ้น มีหลักการทำงานคล้ายเครื่องวัดความหนืด โดยสามารถปรับตั้งลักษณะทำงานได้ 2 รูปแบบ คือ แบบศูนย์กลางร่วม (concentric) และแบบเยื้องศูนย์กลาง (eccentric) ซึ่งการทำงานของแต่ละรูปแบบจะทำให้เกิดการเนื่อง ในการทดลองทำการควบคุมความเร็วรอบให้อยู่ระหว่าง 15 – 30 rpm และควบคุมอุณหภูมิของระบบที่ 27 °C ในการทดลองเมื่อทำการนวดโดด้วยกระบวนการแบบศูนย์กลางร่วม (concentric) เสร็จ นำโดมาวิเคราะห์ความหนา และปริมาณของ glutenin macro – polymer (GMP) ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Laser Scanning Confocal Microscopy (LSCM) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ปริมาณกลูเทนที่เกิดขึ้น โดยทำการวิเคราะห์ที่เวลา 15, 30, และ 45 นาที และในการทดลองด้วยกระบวนการแบบเยื้องศูนย์กลาง (eccentric) ทำการทดลองที่ค่าอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลาง (e) เป็น 0.42 และ 0.75 (สมการ 2.1) โดยวิเคราะห์ความหนาและปริมาณของ Glutenin macro-polymer (GMP) ด้วยเครื่อง Laser Scanning Confocal Microscopy (LSCM) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ปริมาณกลูเทนที่เกิดขึ้น ทำการวิเคราะห์ที่เวลา 15, 30 และ 45 นาที จากการทดลองพบว่า การใช้แรงในปริมาณมากจะทำให้เกิดโครงสร้างสามมิติของกลูเทนได้เร็วกว่าการใช้แรงในปริมาณน้อย และหากเวลาในการผสมมากเกินไปจะทำให้โครงสร้างและพันธะของกลูเทนที่จับตัวกันถูกทำลาย ส่งผลให้คุณสมบัติของโดเกิดการเปลี่ยนแปลง จึงสรุปได้ว่าพลังงานที่ใช้ในการนวดผสมโด และเวลามีผลต่อการเกิดโครงสร้างของกลูเทน ซึ่งจะส่งผลให้คุณลักษณะของโดที่ได้แตกต่างกัน

$$e = \frac{L}{R_{out} - R_{in}} \quad (2.1)$$

โดย L คือ ระยะห่างมากที่สุดระหว่างโลหะทรงกระบอก

$R_{out}$  คือ รัศมีของโลหะทรงกระบอกนอก

$R_{in}$  คือ รัศมีของโลหะทรงกระบอกใน

Stanke *et al.* (2014) ศึกษาค่าคุณสมบัติของโดขณะที่ขึ้นฟูโดยใช้แบบจำลองทางกล (Mechanical model) อธิบายผลในการทดลองใช้ยีสต์สด 2% และ 4% โดยควบคุมอุณหภูมิการขึ้นฟูของแป้งโดที่ 28°C, 32°C และ 35°C ทำการวัดค่าความยืดหยุ่นของโดโดยพิจารณาว่าแป้งโดเป็นของเหลวแบบนิวโตเนียน จากการทดลองพบว่าการอธิบายผลด้วยแบบจำลองทางกลเป็นวิธีที่เหมาะสม เมื่อทดสอบการขึ้นฟูของแป้งโดที่ใช้ยีสต์ 2% และ 4% พบว่าแป้งโดที่ใช้ยีสต์สด 4% ในการหมักมีการขึ้นฟูมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งโดที่ขึ้นฟูมากจะมีความเหนียวมากขึ้นด้วย

เนื่องจากการใช้ยีสต์สดในปริมาณมากจะเกิดการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า ทำให้แป้งโดมีฟองอากาศภายในแป้งโดมาก และสามารถกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น

Einde *et al.* (2004) ศึกษาผลของการเขื่อน และอุณหภูมิต่อการสลายพันธะของสตาร์ช ในการศึกษาใช้พลังงานจำเพาะแทนแรงเฉือนที่เกิดขึ้น นำตัวอย่างการทดลองที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดกับน้ำ ควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 80°C และ 100°C ผลของการศึกษาพบว่า พลังงานจำเพาะมีผลต่ออัตราการสลายพันธะของสตาร์ชมากที่สุด รองลงมาคือ อุณหภูมิ และความเร็ว ตามลำดับ

Ghorbel and Launay. (2014) ศึกษาค่าความเหนียวของแป้งโด โดยใช้หัตถ์ทรงกระบอกที่ทำจากวัสดุต่างกัน 6 ชนิด และใช้ตัวอย่างแป้งโดที่มีอัตราส่วนน้ำที่แตกต่างกัน ทำการเก็บข้อมูลในการทดลองได้แก่ ค่าความตึงผิว กับค่าความเหนียว จากการศึกษาพบว่า ค่าแรงตึงผิวของแป้งโดมากหรือน้อย มีผลมาจากโครงสร้างภายในของแป้งโด ถ้าพันธะภายในโดแข็งแรงจะส่งผลให้ค่าความตึงผิวของแป้งโดสูง ทำให้ต้องใช้แรงในการดึงหัตถ์ออกจากโดมาก

# บทที่ 3

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง

#### 3.1.1 หลักการทำงานและการออกแบบเบื้องต้น

ในการออกแบบชุดทดลองขนาดแบ่งแบบเน้นการเหือน อาศัยหลักการของทรงกระบอกจุดศูนย์กลางร่วม (Co-concentric cylinders) โดยทรงกระบอกภายในยึดติดกับแกนเพลลามอเตอร์ ซึ่งจะเป็นตัวพาเนื้อแบ่งโดเคลื่อนที่ไปตามการหมุนด้วยแรงเสียดทาน ชุดทดลองที่ออกแบบขึ้นสามารถสร้างกลไกการขนาดได้ใน 2 ลักษณะ คือ การขนาดแบบร่วมศูนย์กลาง (Co-concentric) เพื่อจำลองการเหือนแบบคงตัว (Steady) กับ การขนาดแบบเยื้องศูนย์กลาง (Eccentric) เพื่อจำลองการเหือนแบบไม่คงตัว (Transient)

ในสภาวะการเหือนแบบคงตัว สามารถคำนวณค่าความเค้นได้ภายใต้สมมติฐาน คือ แรงบิด (Torque) และความเร็วรอบขณะที่เครื่องทำงานมีค่าคงที่ตลอดเวลา โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.1 (Masccoko, 1994)

$$\sigma_{in} = \frac{M_{in}}{2\pi HR_{in}^2} \quad (3.1)$$

โดย  $\sigma_{in}$  = ความเค้น (N/m<sup>2</sup>)

$M_{in}$  = ทอร์กหรือแรงบิด (Nm)

$H$  = ความสูงของทรงกระบอก (m)

$R_{in}$  = รัศมีของโลหะทรงกระบอกภายใน (m)

อย่างไรก็ตาม ในสภาวะการเหือนแบบไม่คงตัวนั้น ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ถูกขนาดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องพิจารณาในเชิงพลังงานจำเพาะดังสมการที่ 3.2 (Hoog and Anderssen, 2005)

$$SME = \frac{\Omega_{in}}{m} \int_{t=0}^{t_f} M_{in}(t) dt \quad (3.2)$$

โดย SME = specific mechanical energy (kJ/kg)

$\Omega_{in}$  = ความเร็วของโลหะทรงกระบอกภายใน (rad/s)

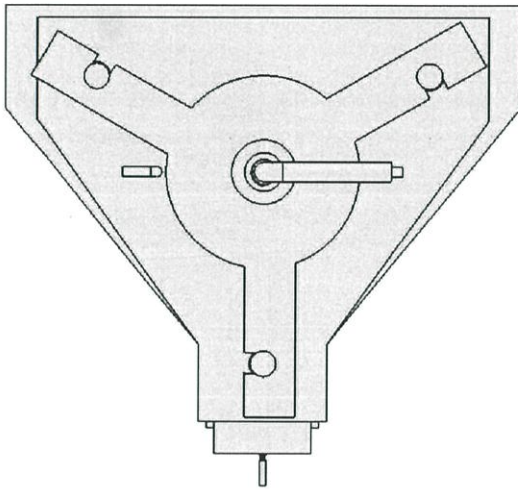
$m$  = น้ำหนักของโดที่ใส่เข้าไป (kg)

$M_{in}$  = ค่าทอร์กที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆ (Nm)

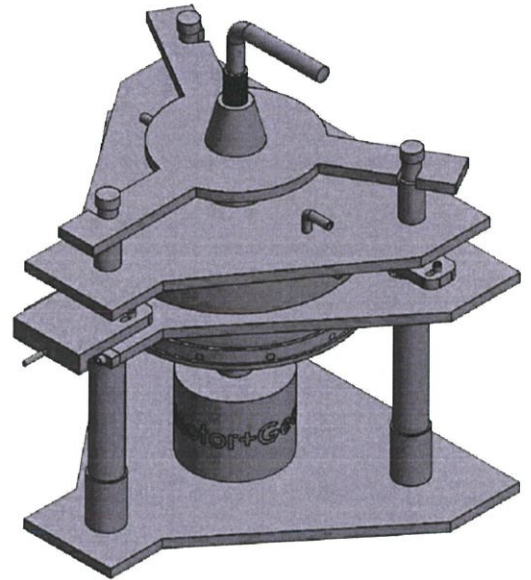
$t_f$  = เวลาที่ใช้ในการดำเนินการทั้งหมด (sec)

### 3.1.2 ชุดทดลองวัดแรงแ้งโตแบบเน้นการเฉือน

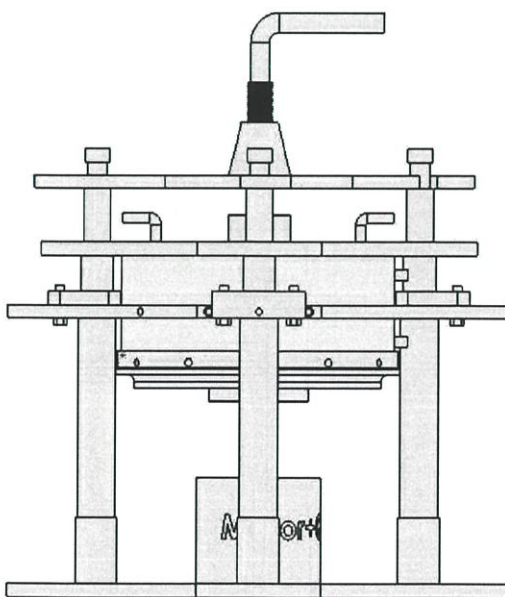
รูปที่ 3.1 – 3.6 แสดงภาพวาดเส้น (Drawing) ของชุดทดลองวัดแรงแ้งโตแบบเน้นการเฉือน และ รูปที่ 3.7 – 3.13 ชุดทดลองวัดแรงแ้งโตแบบเน้นการเฉือน



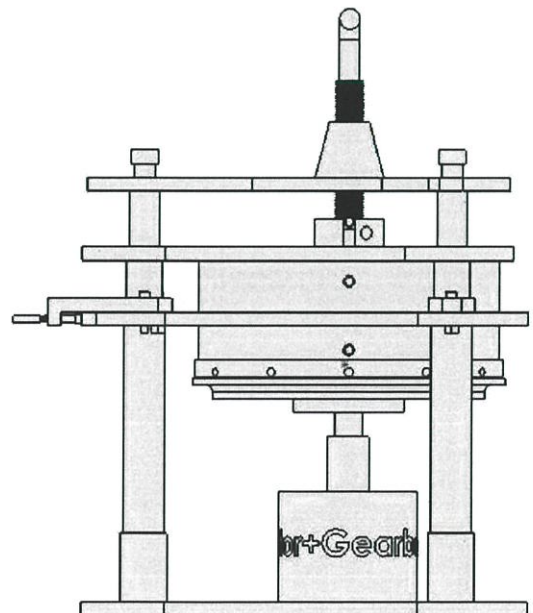
รูปที่ 3.1 มุมมองด้านบน (Top view)



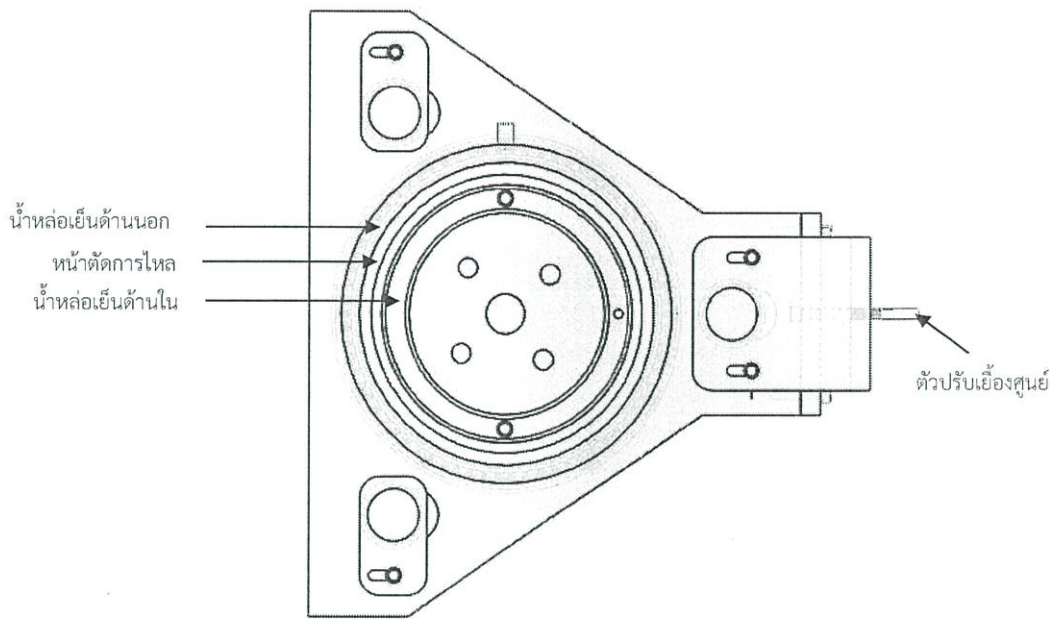
รูปที่ 3.2 มุมมอง 3 มิติ (Isometric)



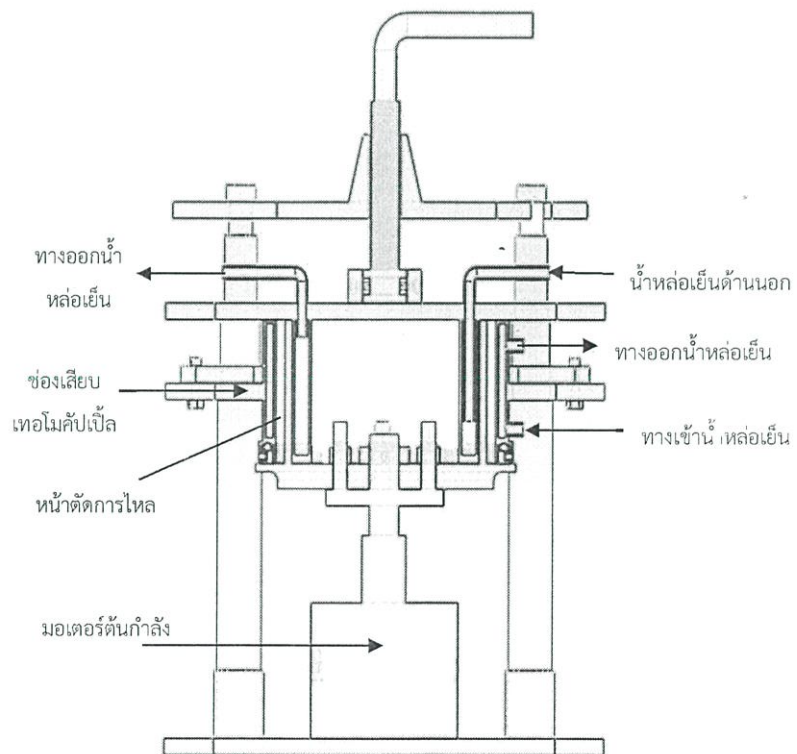
รูปที่ 3.3 มุมมองด้านหน้า (Front view)



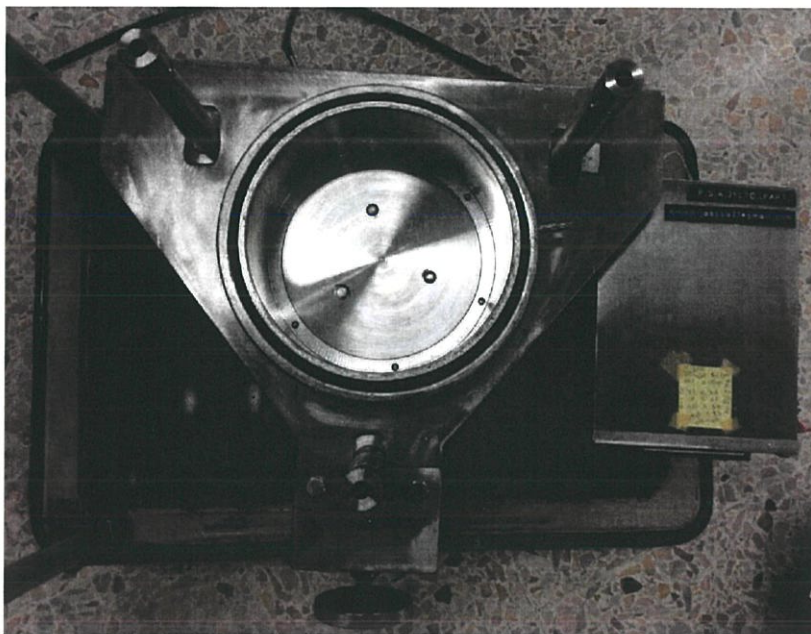
รูปที่ 3.4 มุมมองด้านข้าง (Side view)



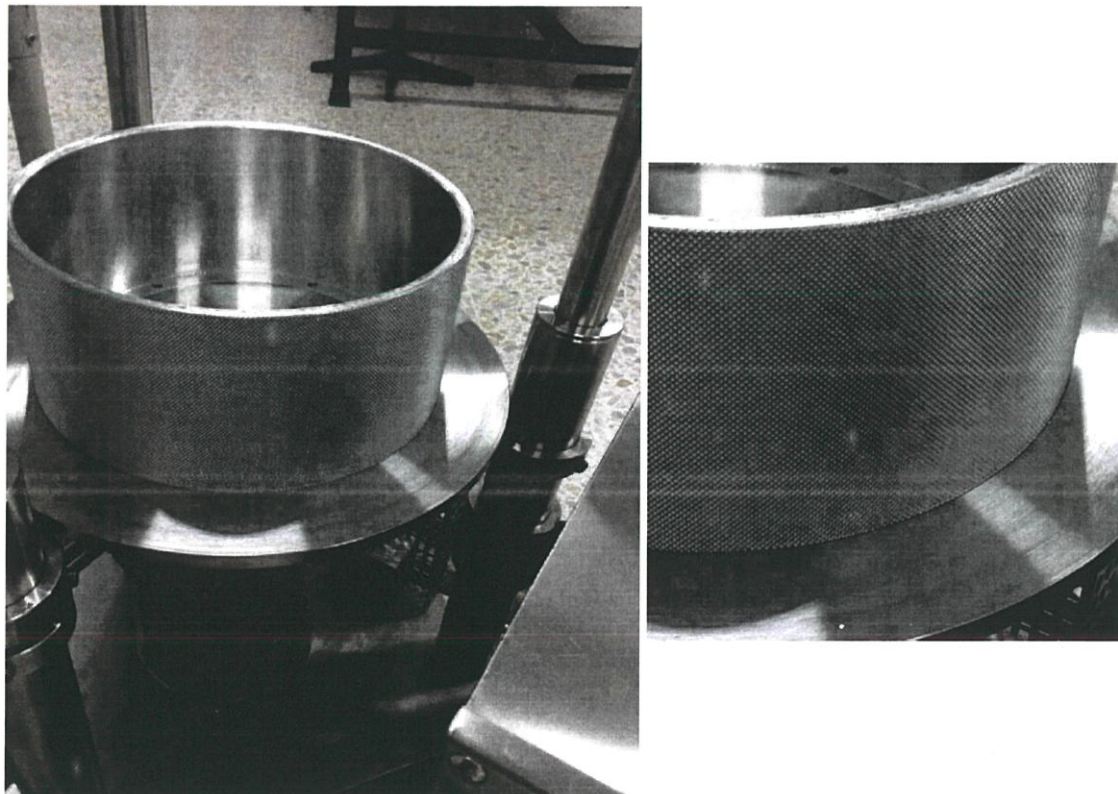
รูปที่ 3.5 ภาพตัด (Section View) มุมมองด้านบน (Top view)



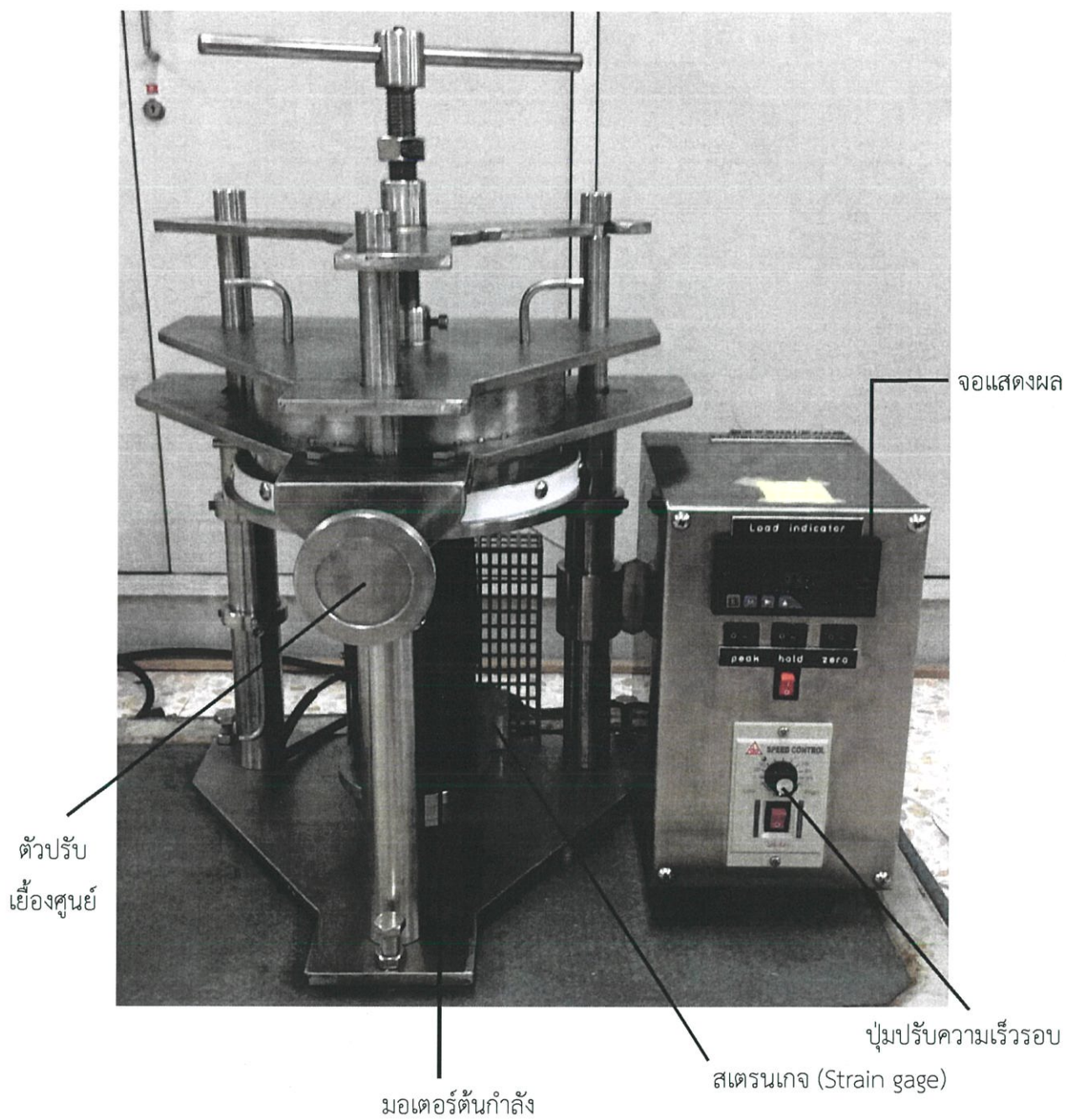
รูปที่ 3.6 ภาพตัด (Section View) มุมมองด้านหน้า (Front view)



รูปที่ 3.7 ชุดทดลองขนาดแบ่งโดแบบเน้นการเคี้ยว (มุมมองด้านบน)



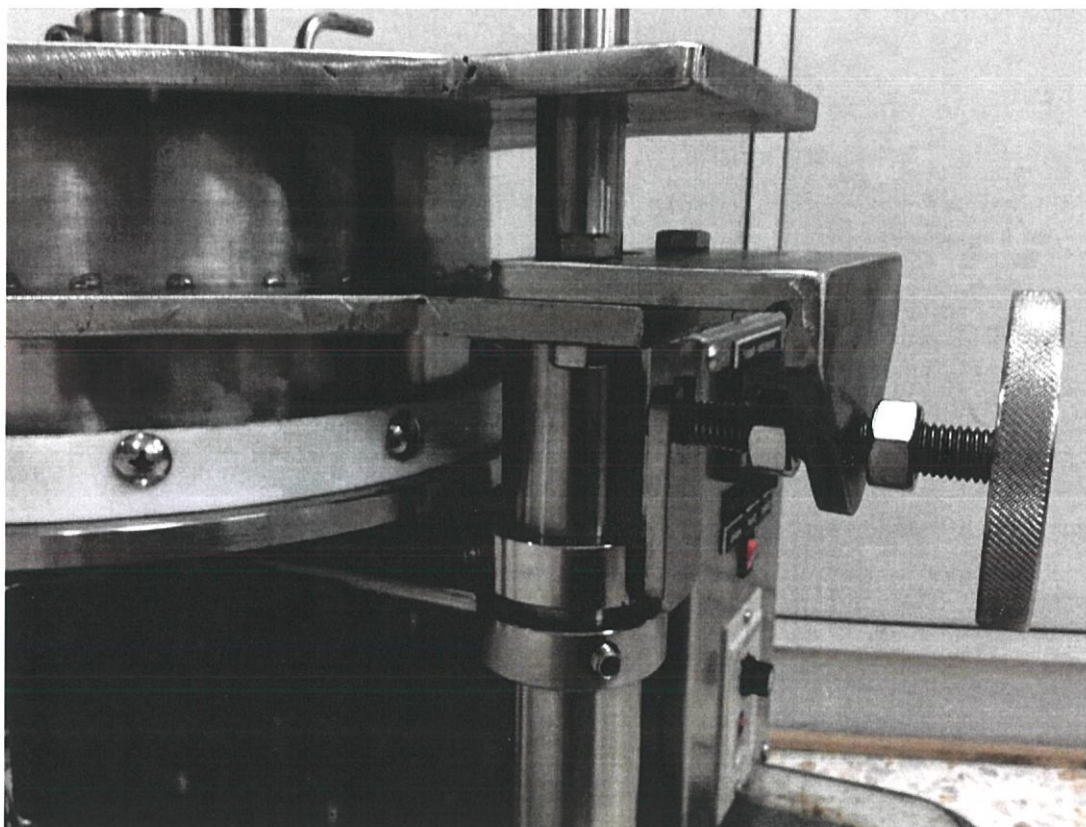
รูปที่ 3.8 ทรงกระบอกภายในชุดทดลอง (พื้นที่การเคี้ยว)



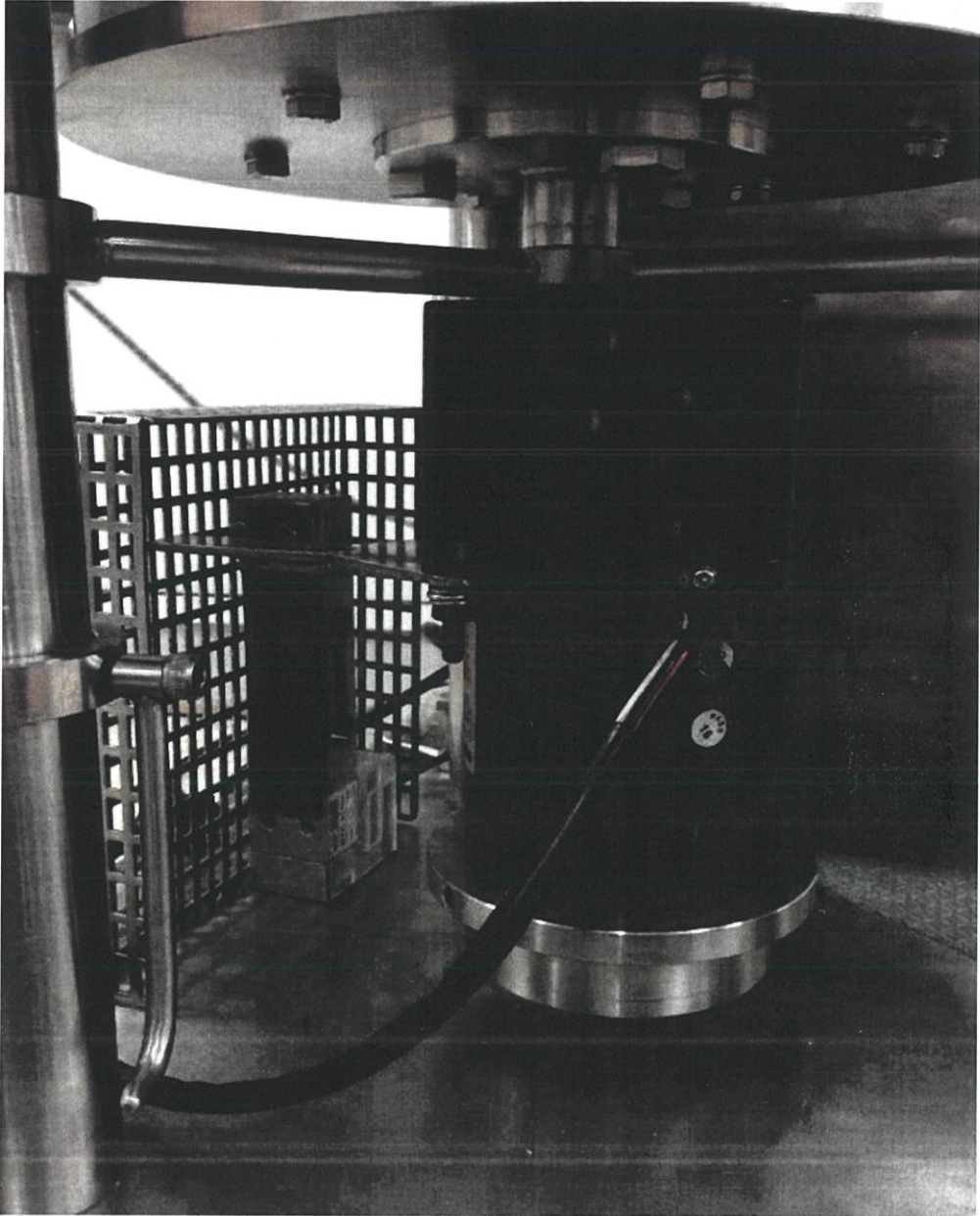
รูปที่ 3.9 ชุดทดลองขนาดแบ่งโตแบบเน้นการเหวี่ยง



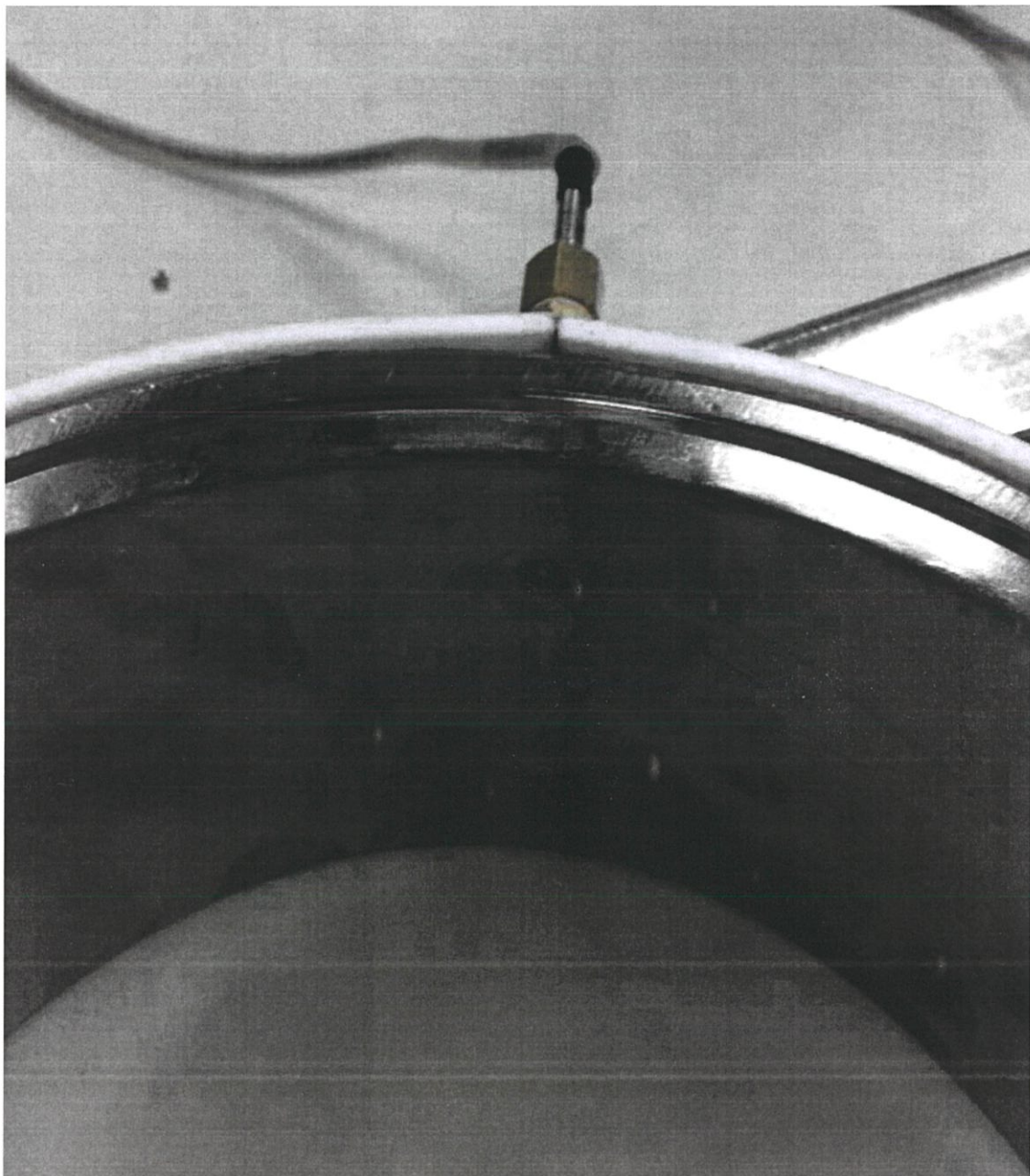
รูปที่ 3.10 หน้าจอแสดงผลและชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่ 3.11 กลไกการปรับเอียงศูนย์



รูปที่ 3.12 มอเตอร์ และ สเตรนเกจ (Strain gage)



รูปที่ 3.13 เทอร์โมคัปเปิ้ล

จากรูปที่ 3.9 การปรับช่องว่างของพื้นที่หน้าตัดการไหล (gap) ของแปรงโตะ สามารถทำได้โดยหมุนตัวปรับเอียงศูนย์โดยมีระยะกำกับไว้ที่เสา ส่วนการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์นั้นสามารถทำได้โดยการปรับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์

แรงบิด (Torque) จะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์มีแรงเสียดทานที่เกิดจากแปรงโตะ ในระหว่างการนวด โดยใช้ strain gage ในการวัดแรงบิดที่เกิดขึ้น และต่อเข้ากับ Universal Type Digital Panel Meter รุ่น Watanabe A5000 series เพื่อแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่ส่งมาจาก strain gage เป็นค่าแรงบิด และยังเป็นตัวส่งข้อมูลไปเก็บยังคอมพิวเตอร์แบบอนุกรม ผ่านสาย 9 - pin เพื่อนำค่าแรงบิดนี้ไปคำนวณเป็น SME ต่อไป

การวัดอุณหภูมิของโตะโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล Type K ซึ่งมีราคาไม่แพง และอยู่ในช่วงการใช้งาน ต่อเข้ากับ Data logger รุ่น Agilent 34970A เพื่อแปลงสัญญาณทางไฟฟ้าให้เป็นค่าอุณหภูมิ และต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อสังเกต และบันทึกค่าทุกวินาที (Real time)

## 3.2 การดำเนินการทดลอง

### 3.2.1 วัสดุุดิบ

1. แป้งสาลีชนิดทำขนมปัง ตรา หงส์ขาว
2. เกลือป่น ตรา ประจักษ์
3. น้ำตาลทรายขาว ตรา มิตรผล
4. เนยสด ชนิดจืด ตรา ออร์คิดส์
5. ยีสต์ผง ตรา เพอร์เฟค
6. ถั่วเขียวเมล็ดแห้ง ตรา ท็อปส์
7. ถั่วแดงเมล็ดแห้ง ตรา ท็อปส์
8. ถั่วดำเมล็ดแห้ง ตรา ท็อปส์
9. เมล็ดลินินสีน้ำตาล จัดจำหน่ายโดย บริษัท เนเชอรัล ฟาร์มาซูติคอล (ประเทศไทย) จำกัด
10. น้ำสะอาด

### 3.2.2 อุปกรณ์

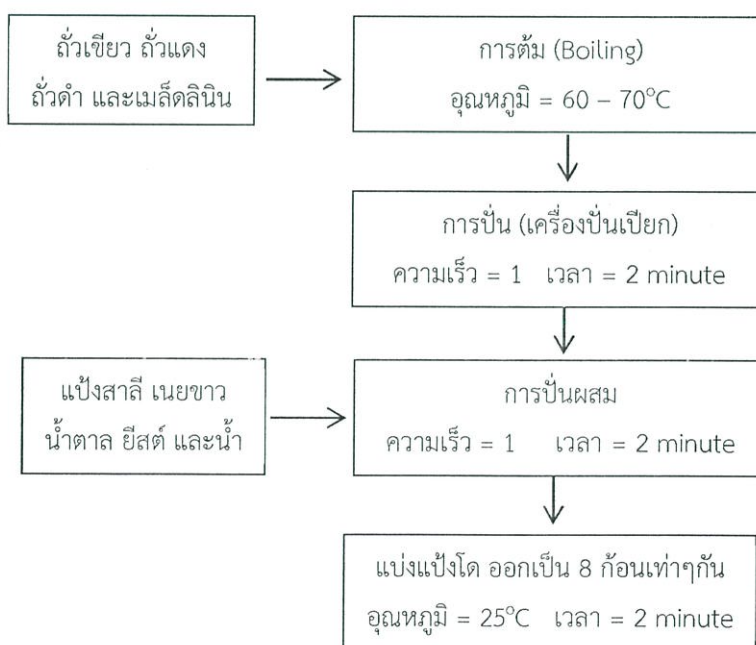
1. เครื่องปั่นผสม Kitchen Aid รุ่น 5KSM150PSE และหัวปั่นรูปตะขอ
2. เครื่องปั่นเปียก Panasonic รุ่น MX-J210GN
3. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง Shimadzu รุ่น UX3200G
4. เทอร์โมมิเตอร์แบบแท่งแก้ว

5. กระจกตวง ขนาด 250 ml
6. หม้อ
7. อ่างผสมแป้ง
8. ถาดสแตนเลส
9. กระดาษไข
10. ตะแกรงพัก
11. มีดแบบฟันเลื่อย

### 3.2.3 การเตรียมตัวอย่าง

ส่วนผสมแป้งโดสูตรควบคุม ประกอบด้วย แป้งสาลี 158.94 g น้ำตาลทราย 5.17 g เนยจืด 15.89 g เกลือ 1.99 g ยีสต์ 2.78 g น้ำ 103.31 g ถั่วแดง ถั่วเขียว และถั่วดำ ชนิดละ 3.97 g แป้งโดที่ผสมเมล็ดลินินเตรียมเช่นเดียวกับสูตรควบคุม แต่ผสมเมล็ดลินินในปริมาณต่าง ๆ กัน 3 ระดับ คือ 10%, 20% และ 40% ของน้ำหนักแป้ง

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างขนมปังเพื่อสุขภาพแสดงไว้ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแป้งโด

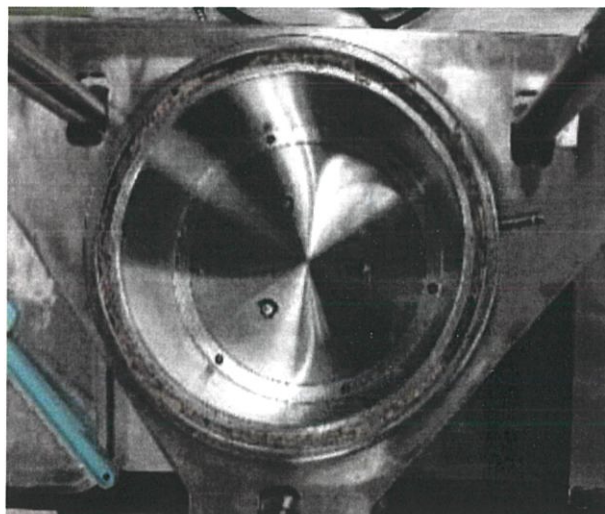
### 3.2.4 การนวดแป้งโดด้วยชุดทดลอง

นำแป้งโดที่ผ่านการผสมแล้ว (300 g) มาแบ่งออกเป็น 10 ก้อน ๆ ละ 30 g รีดให้เป็นแผ่นบางก่อนบรรจุเข้าเครื่อง ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 โดยใช้แผ่นเทปลอนเป็นตัวกดแป้งโด (รูปที่ 3.17) ควบคุมความเร็วรอบของชุดทดลอง 13.5 rpm โดยการปรับกำลังไฟที่ป้อนให้มอเตอร์ 100% และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 25 - 35°C ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมแก่การทำงานของยีสต์ (Walsh and Martin, 1967) ค่า load ที่วัดได้จะถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์แบบ Real time

จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของชุดทดลองพบว่า เมื่อนวดแป้งโดที่ความเร็วสูง (13.5 rpm) แบบเอียงศูนย์ และไม่เอียงศูนย์ พบว่ามีแป้งโดร่วออกมาจากชุดทดลอง(รูปที่ 3.18) จึงทำการแก้ไขโดยการติดแผ่นเทปลอนที่ชุดทดลอง ดังรูป 3.19



รูปที่ 3.15 การเตรียมแป้งโดให้เป็นแผ่นบางก่อนบรรจุลงชุดทดลอง



รูปที่ 3.16 การบรรจุแป้งโดลงชุดทดลอง



รูปที่ 3.17 แผ่นเทปลอน

โดยหลังจากทำการปรับแก้ชุดทดลอง แล้วทำการทดลองในเบื้องต้นซ้ำ พบว่าแป้งโดรั่วออกมาในปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่า 10% w/w)



รูปที่ 3.18 ก่อนติดแผ่นเทปลอน



รูปที่ 3.19 หลังติดแผ่นเทปลอน

### 3.3 การคำนวณค่าพลังงานจำเพาะ (SME) ในการนวด

ค่าพลังงานจำเพาะ (SME) ของการนวดแบบเยื้องศูนย์ (Ec) หาโดยหลักการการคำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ 3.2 (Hoog and Anderssen, 2005) โดยในงานทดลองนี้ ผลลัพธ์ของการอินทิเกรตสามารถประมาณได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงบิดกับเวลา

### 3.4 การทดสอบสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโด

ทำการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของแป้งโด ใช้เทคนิค Texture Profile Analysis (TPA) โดยเตรียมตัวอย่างแป้งโดที่ผ่านการนวดด้วยชุดทดลองแล้ว จำนวน 2 ก้อน ๆ ละ 30 g คลึงให้เป็นก้อนกลม แล้วพักไว้ 5 นาที ก่อนทำการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (TA.XTplus Texture Analyser, Stable Micro System) ด้วยหัวกดทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm (P50) รายละเอียดการตั้งค่าเครื่องแสดงไว้ในภาคผนวก ก.1 ผลการทดสอบอยู่ในรูปของกราฟแรง และเวลานำกราฟที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความแข็ง (Hardness), ค่าความเหนียว (Adhesiveness), ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) และค่าความเกาะติด (Cohesiveness)

### 3.5 การวิเคราะห์การขึ้นฟูของแป้งโด

วิเคราะห์การขึ้นฟูของแป้งโด โดยใช้เทคนิคการแทนที่ด้วยเมล็ดงาขาว เตรียมตัวอย่างแป้งโด 4 ก้อน ๆ ละ 30 g คลึงให้เป็นก้อนกลม นำแป้งโด 2 ก้อนมาหาปริมาตรจำเพาะของโดก่อนขึ้นฟู และอีก 2 ก้อน หมักให้ขึ้นฟูเป็นเวลา 35 นาที ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 25 - 35°C ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของยีสต์ จากนั้นหาปริมาตรของโดหลังขึ้นฟู รายละเอียดวิธีการวิเคราะห์การขึ้นฟูของแป้งโดแสดงไว้ในภาคผนวก ก.2

### 3.6 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

โครงการนี้ เลือกใช้แผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) เนื่องจากเป็นแผนการทดลองที่มีค่าองศาความเป็นอิสระ (degree of freedom, df) สูงสุด หลังการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) หากพบว่ามีความแตกต่างต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ ก็ทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ( $p < 0.05$ )

## ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

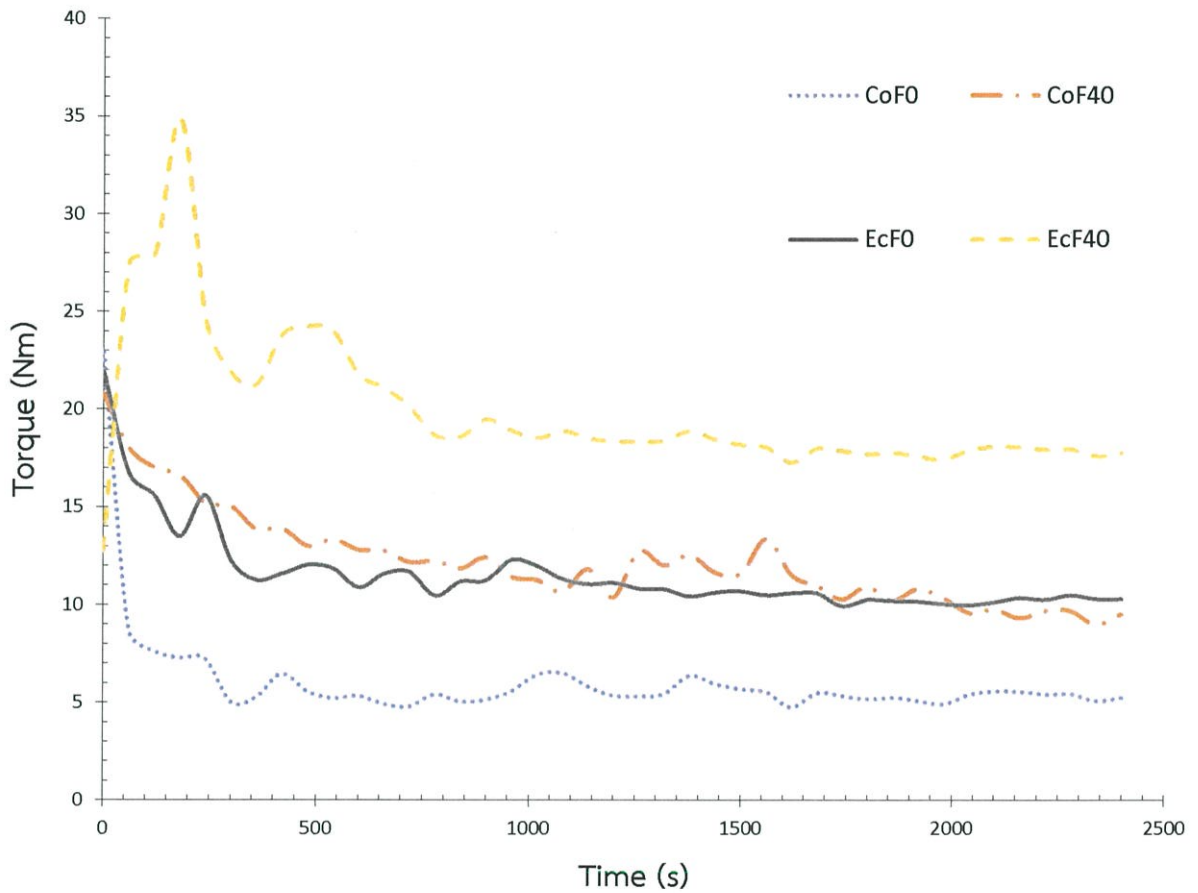
### 4.1 ค่าพลังงานจำเพาะในการนวดแป้งโด

แรงบิด (Torque) ที่เกิดขึ้นในการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 4 - 35 Nm โดยพบค่าแรงบิดต่ำสุดในการนวดแป้งโดสูตรควบคุมแบบไม่เยื้องศูนย์และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการผสมเมล็ดลินิน ค่าแรงบิดสูงสุดพบในการนวดแป้งโดที่ผสมเมล็ดลินิน 40% แบบเยื้องศูนย์ รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณการผสมเมล็ดลินินเท่ากันนั้น การนวดแป้งโดแบบเยื้องศูนย์จะใช้แรงบิดมากกว่าการนวดแป้งโดแบบไม่เยื้องศูนย์ เนื่องจากในบางช่วงหน้าตัดการไหลของแป้งโดนั้นแคบลงจึงเกิดการต้านการไหลมากกว่าการนวดแบบไม่เยื้องศูนย์ทำให้ค่าแรงบิดสูงขึ้น หากการเยื้องศูนย์มีค่าเท่ากัน สูตรที่มีเมล็ดลินินมากกว่าจะใช้แรงบิดในการนวดมากกว่า ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Peighambardoust *et al.* (2006) จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่าพลังงานจำเพาะ (SME) ในการนวดแบบเยื้องศูนย์กว่าแบบไม่เยื้องศูนย์อย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

### 4.2 ผลของค่าพลังงานจำเพาะต่อสมบัติทางเนื้อสัมผัสและการขึ้นฟูของแป้งโด

เนื่องจากค่า SME มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มข้นของเมล็ดลินินที่ผสมลงในแป้งโด ดังตารางที่ 4.1 ดังนั้นจึงต้องทำการแยกวิเคราะห์ผลของ SME ในแต่ละความเข้มข้นของเมล็ดลินิน จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ค่า SME ไม่มีผลต่อค่าความเหนียว (Adhesiveness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) และค่าความเกาะติด (Cohesiveness) แต่มีผลให้ค่าความแข็ง (Hardness) ของแป้งโดที่ผสมเมล็ดลินิน 40% (F40) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้อาจเนื่องจากเมื่อปริมาณเมล็ดลินินสูงทำให้ต้องใช้พลังงานในการนวดสูงขึ้น และเมื่อให้พลังงานกับแป้งโดมากเกินไปก็จะมีผลให้โครงสร้างของกลูเตน (Gluten) เกิดการแตกสลาย (Break down) ทำให้แป้งโดสูญเสียความแข็ง และความสามารถในการขึ้นฟู (Peighambardoust *et al.*, 2006)

ส่วนความสามารถในการขึ้นฟูของแป้งโดนั้น ค่า SME ในช่วงที่ศึกษานั้นไม่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นฟูของแป้งโดแต่อย่างใด ทั้งนี้อาจเกิดจากค่าความแปรปรวนที่ค่อนข้างสูงจึงทำให้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติไม่เห็นถึงความแตกต่างแต่อย่างใด



**รูปที่ 4.1** รูปแบบโดยทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลาในระหว่างการนวด (CoF0 คือการนวดแป้งโดที่ไม่ผสมเมล็ดลินินแบบไม่เยื้องศูนย์, CoF40 คือการนวดแป้งโดที่ผสมเมล็ดลินิน 40% แบบไม่เยื้องศูนย์, EcF0 คือการนวดแป้งโดที่ไม่ผสมเมล็ดลินินแบบเยื้องศูนย์ และ EcF40 คือการนวดแป้งโดที่ผสมเมล็ดลินิน 40% แบบเยื้องศูนย์)

ตารางที่ 4.1 ค่าพลังงานจำเพาะ (SME) ในการนวดแป้งโด (หน่วย: kJ/kg)

รูปแบบการนวด	สูตรแป้งโด			
	F0	F10	F20	F40
ไม่เยื้องศูนย์	83.93 ± 5.04 <sup>a</sup>	109.50 ± 1.75 <sup>a</sup>	118.03 ± 1.22 <sup>a</sup>	139.60 ± 23.67 <sup>a</sup>
เยื้องศูนย์	130.16 ± 5.73 <sup>b</sup>	133.73 ± 15.59 <sup>b</sup>	169.97 ± 21.23 <sup>b</sup>	227.00 ± 2.43 <sup>b</sup>

<sup>a, b</sup>: อักษรที่แตกต่างกันในแนวตั้งหมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Tukey's HSD,  $p < 0.05$ )

### 4.3 อิทธิพลของเมล็ดลินินต่อเนื้อสัมผัสของแป้งโด

สมบัติทางเนื้อสัมผัสของตัวอย่างแป้งโดที่ผ่านการนวดแบบเยื้องศูนย์และไม่เยื้องศูนย์ วัดโดยใช้เทคนิค Texture Profile Analysis (TPA) แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 - 4.5

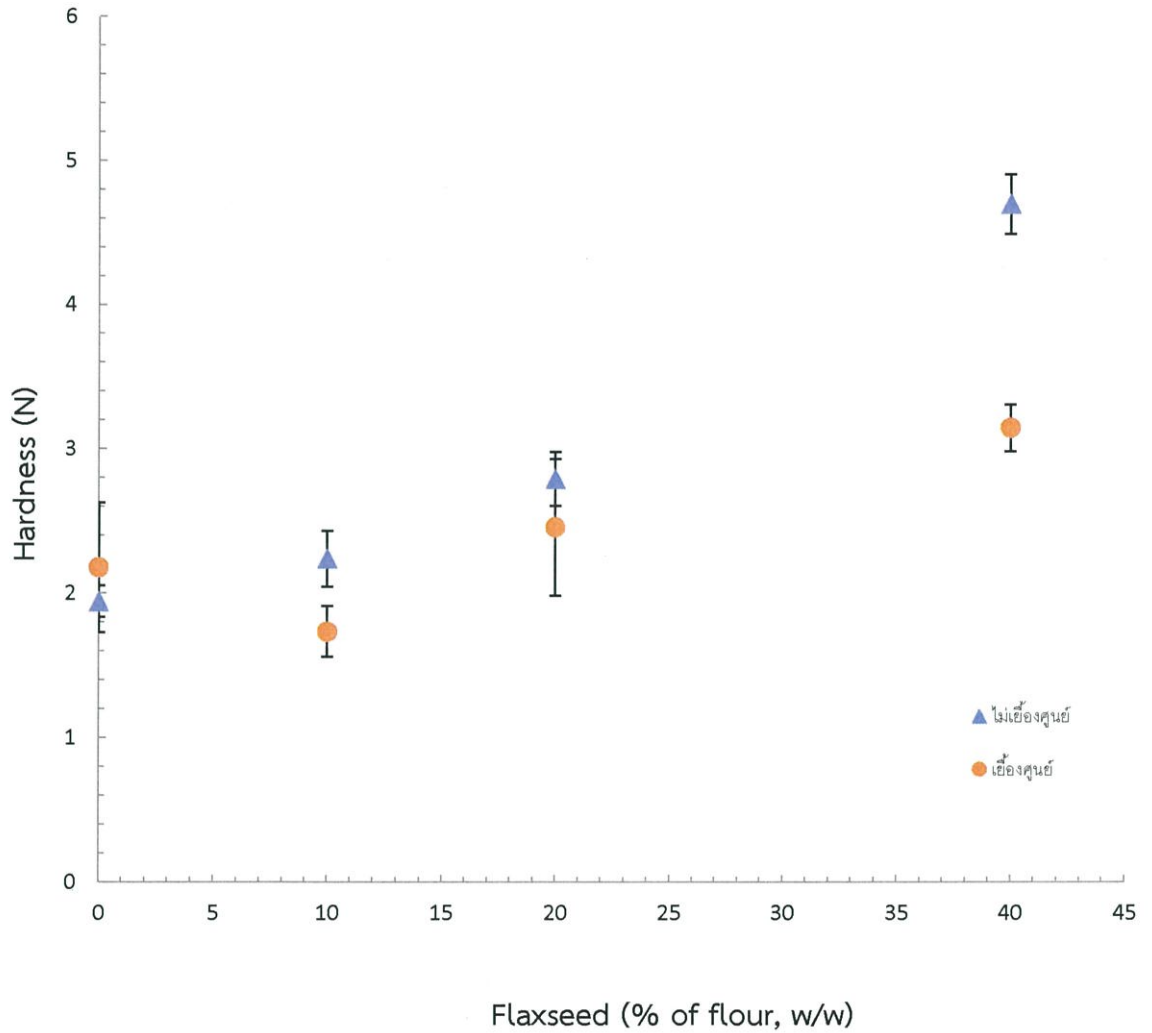
เห็นได้ว่าความแข็งของแป้งโดสูตรควบคุม (F0) ทั้งที่ถูกรูปแบบเยื้องศูนย์ ( $e = 0.25$ ) และไม่เยื้องศูนย์ ( $e = 0$ ) มีค่าต่ำสุด (ประมาณ 2.06 N) และแป้งโดสูตรผสมเมล็ดลินิน 40% มีความแข็งมากที่สุด (4.70 N) ค่าความแข็งนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเมล็ดลินินที่ผสมลงไป (รูปที่ 4.2)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าการรูปแบบการนวดมีผลต่อค่าความแข็ง จึงทำการวิเคราะห์ผลจากการนวดในแต่ละแบบแยกจากกัน สำหรับแป้งโดที่นวดแบบเยื้องศูนย์นั้นค่าความแข็งของทุกสูตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในแป้งโดที่ถูกรูปแบบไม่เยื้องศูนย์นั้น ค่าความแข็งของสูตรควบคุม สูตรที่ผสมเมล็ดลินิน 10% และ 20% นั้นไม่แตกต่างกัน แต่สูตรที่ผสมเมล็ดลินิน 40% นั้นค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

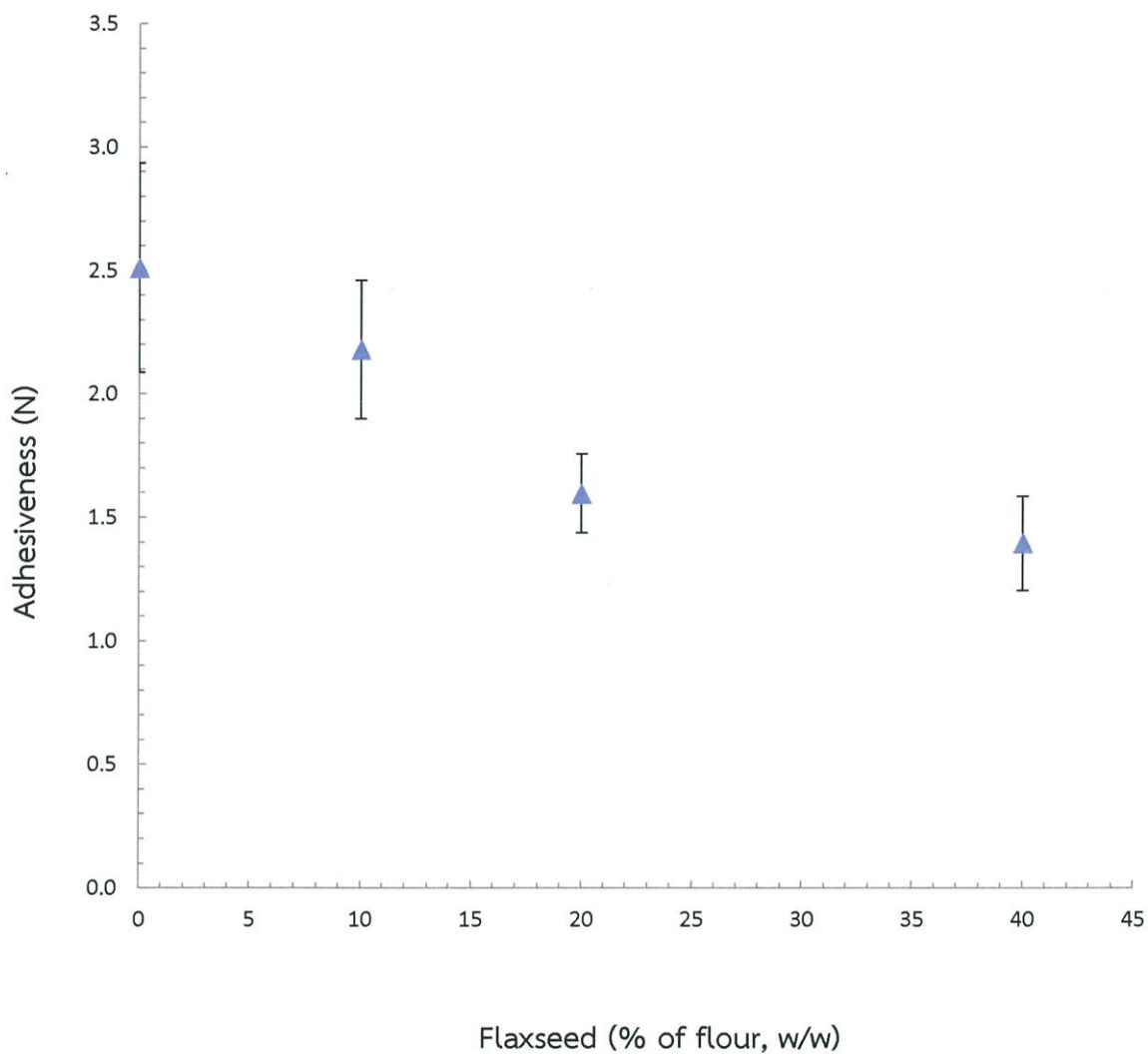
จากรูปที่ 4.3 - 4.5 จะเห็นได้ว่า ค่าความเหนียว ค่าความยืดหยุ่น และค่าความเกาะติดของแป้งโดสูตรควบคุมมีค่าสูงที่สุด และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณการผสมเมล็ดลินินมากขึ้น อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) พบว่า รูปแบบการนวดไม่มีผลต่อค่าเหล่านี้ ค่าความยืดหยุ่นของแป้งโดลดลงเมื่อมีการผสมเมล็ดลินินลงในตัวอย่างและลดลงมากที่สุดเมื่อปริมาณเมล็ดลินินเป็น 40% แต่แป้งโดสูตรผสมเมล็ดลินิน 10% และ 20% มีความยืดหยุ่นไม่แตกต่างกัน สำหรับค่าความเหนียวและค่าความเกาะติดของแป้งโดนั้น จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อผสมเมล็ดลินินในปริมาณ 20% ขึ้นไป

จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อมีการผสมเมล็ดลินินลงในแป้งโด เมล็ดลินินจะแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโครงสร้าง มีผลให้การรวมตัวกันของไกลอะดิน และกลูเตนินเกิดขึ้นได้ยาก โครงสร้างสามมิติของกลูเทนจึงเกิดได้น้อยทำให้ค่าความเหนียว ค่าความยืดหยุ่น และค่าความ

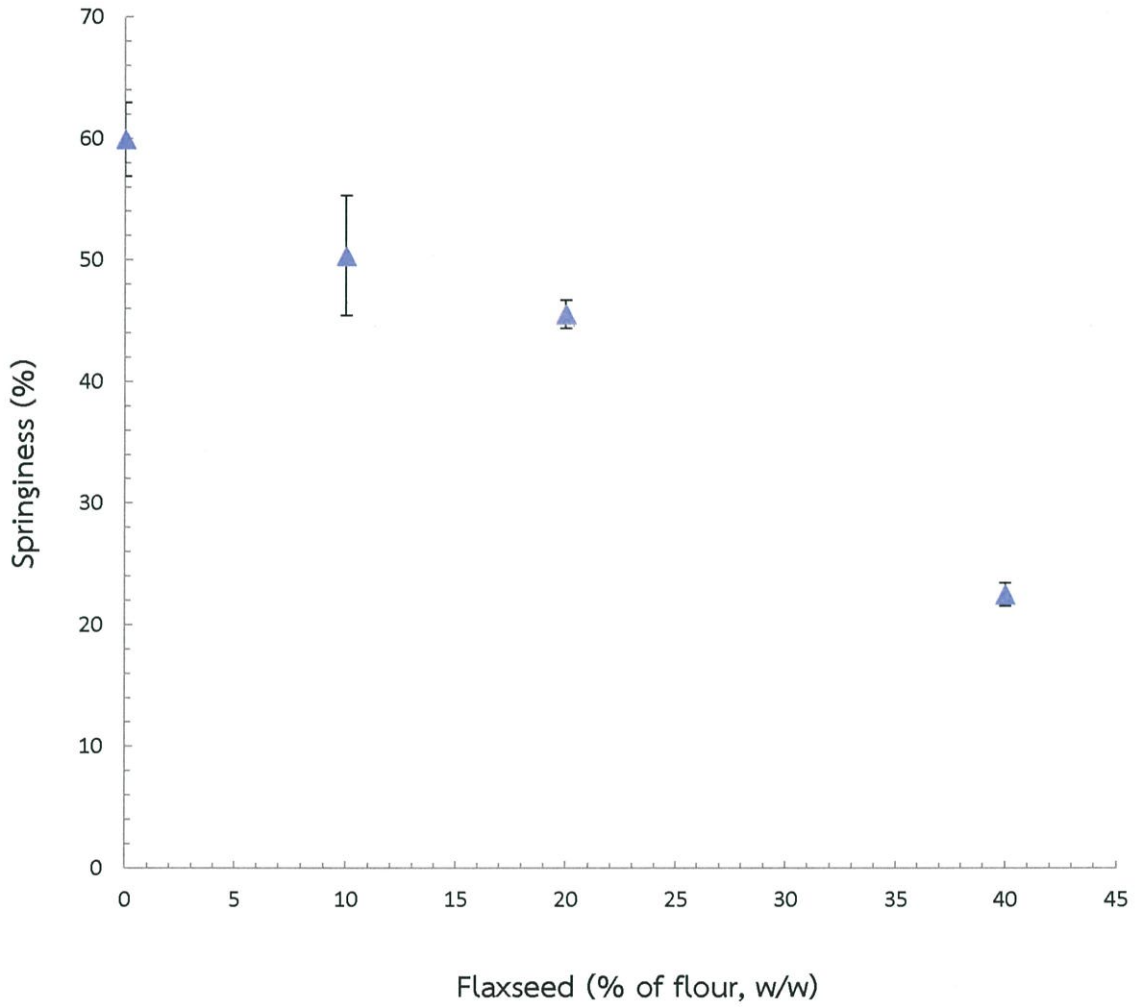
เกาะติดลดลง การกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมักย่อมลดลงและทำให้การขึ้นฟูของแป้งโดเกิดขึ้นได้น้อยลง ซึ่งน่าจะส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นด้วย ประกอบกับเมล็ดลินินมีโครงสร้างที่แข็ง เมื่อเพิ่มปริมาณเมล็ดลินินลงในส่วนผสมอาจเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น (Sivam *et al.*, 2010)



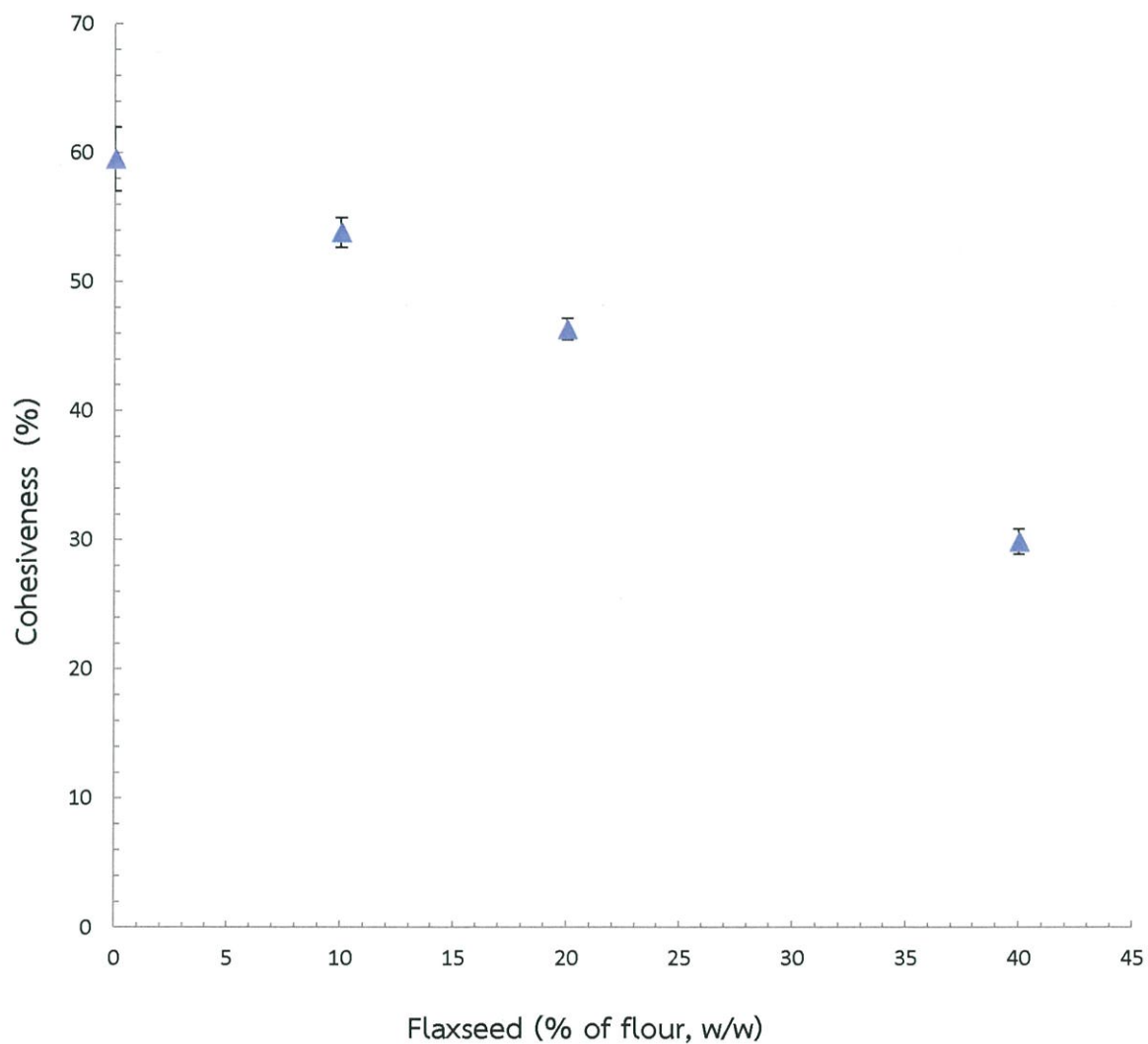
รูปที่ 4.2 ผลของเมล็ดลินินต่อค่าความแข็ง (Hardness) ของแป้งโด (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



รูปที่ 4.3 ผลของเมล็ดลินินต่อค่าความเหนียว (Adhesiveness) ของแป้งโด (ข้อมูลที่แสดงในกราฟ คือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



รูปที่ 4.4 ผลของเมล็ดลินินต่อค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ของแป้งโด (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



รูปที่ 4.5 ผลของเมล็ดลินินต่อค่าความเกาะติด (Cohesiveness) ของแป้งโด (ข้อมูลที่แสดงในกราฟ คือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ครั้ง และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ตารางที่ 4.2 ค่าความแข็งของแป้งโด (หน่วย: N)

รูปแบบการนวด	สูตรแป้งโด			
	F0	F10	F20	F40
ไม่เยื้องศูนย์	1.94±0.11 <sup>a</sup>	2.24±0.19 <sup>a</sup>	2.79±0.9 <sup>a</sup>	4.70±0.21 <sup>b</sup>
เยื้องศูนย์	2.18±0.45	1.17±0.17	2.46±0.48	3.15±0.16

<sup>a, b</sup> อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Tukey's HSD,  $p < 0.05$ )

ตารางที่ 4.3 ค่าความเหนียว ความยืดหยุ่น และความเกาะติด ของแป้งโด

สูตรแป้งโด	Adhesiveness (N)	Springiness (%)	Cohesiveness (%)
F0	2.51 ± 0.42 <sup>a</sup>	59.91 ± 3.02 <sup>a</sup>	59.50 ± 2.48 <sup>a</sup>
F10	2.18 ± 0.28 <sup>ab</sup>	50.35 ± 4.91 <sup>b</sup>	53.82 ± 1.15 <sup>a</sup>
F20	1.60 ± 0.16 <sup>bc</sup>	45.52 ± 1.15 <sup>b</sup>	46.34 ± 0.83 <sup>b</sup>
F40	1.40 ± 0.19 <sup>c</sup>	22.45 ± 0.95 <sup>c</sup>	29.88 ± 0.99 <sup>c</sup>

<sup>a, b, c</sup> อักษรที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Tukey's HSD,  $p < 0.05$ )

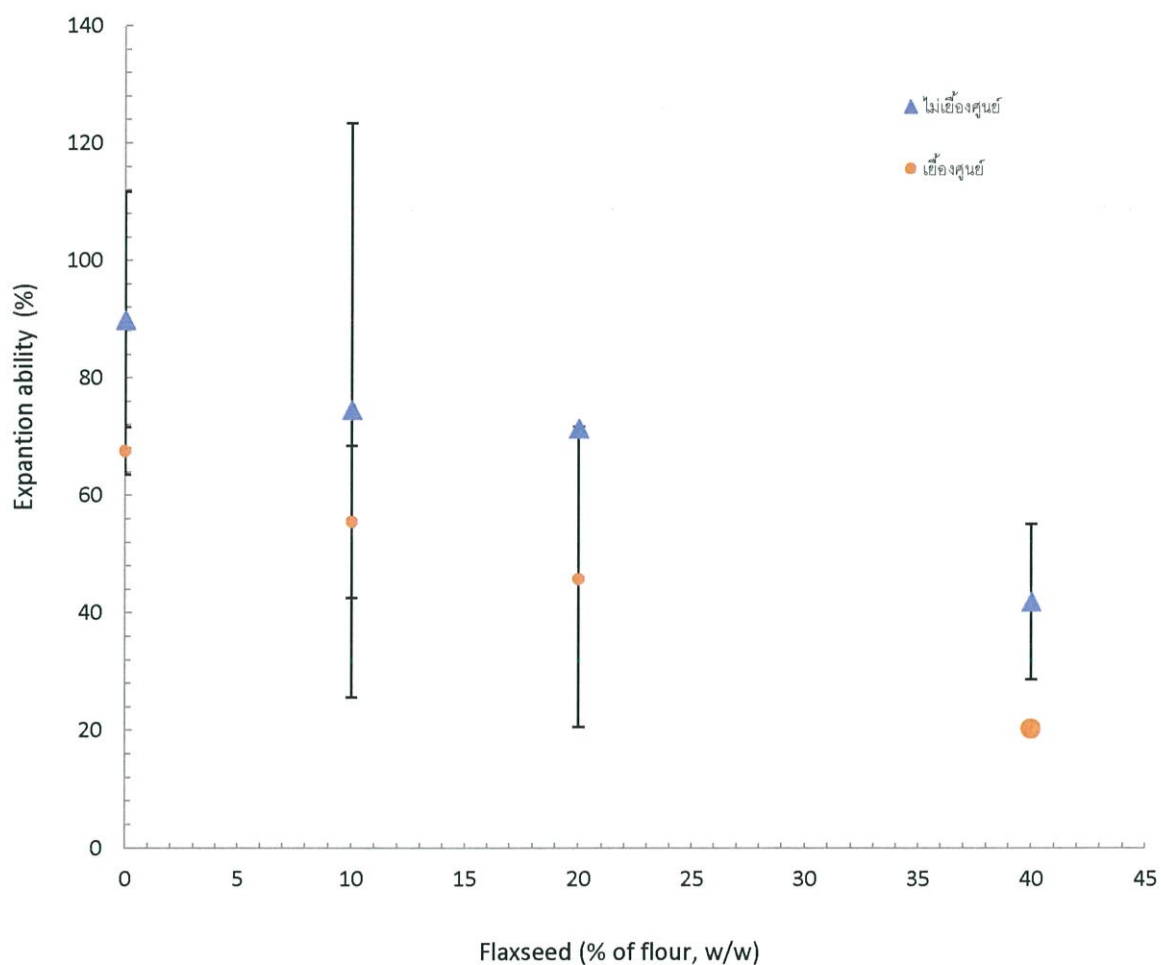
#### 4.4 การขึ้นฟูของแป้งโด

ผลการวิเคราะห์การขึ้นฟูของตัวอย่างแป้งโดที่มีการผสมเมล็ดลินินในปริมาณ 10%, 20% และ 40% ที่ผ่านการนวดแบบเยื้องศูนย์ และไม่เยื้องศูนย์ แสดงในรูปที่ 4.6

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการขึ้นฟูของแป้งโด มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการผสมเมล็ดลินิน ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในเบื้องต้นไม่พบว่ารูปแบบของการนวดมีอิทธิพลต่อการขึ้นฟู อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีความแปรปรวนค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเป็นเหตุให้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในเบื้องต้นไม่พบว่ารูปแบบของการนวดและการผสมเมล็ดลินินมีอิทธิพลต่อการขึ้นฟู (ภาคผนวก ก.2 และ ตารางที่ 4.4) อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์โดยตัดข้อมูลที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงออก พบว่าสำหรับแป้งโดที่นวดแบบไม่เยื้องศูนย์ การพองตัวของแต่ละสูตรไม่แตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญ ส่วนในแป้งโดที่นวดแบบเยื้องศูนย์นั้นพบว่าการผสมเมล็ดลินินในปริมาณ 40% มีผลให้แป้งโดมีการพองตัวน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.5)

โครงสร้างสามมิติของกลูเทนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสมแป้งสาลี กับส่วนผสมอื่น ๆ จะทำหน้าที่กักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการหมัก แต่เมื่อมีการผสมเมล็ดลินินเข้าไปในแป้งโด เมล็ดลินินอาจแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโครงร่างของโดและขัดขวางการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างโมเลกุลของกลูเทน ซึ่งย่อมทำให้ความสามารถของแป้งโดในการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงและส่งผลให้การขึ้นฟูของแป้งโดลดลง (Sivam *et al.*, 2010)



รูปที่ 4.6 ผลของเมล็ดลินินต่อการขึ้นฟู (Expansion ability) ของแป้งโด (ข้อมูลที่แสดงในกราฟคือค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 2 ซ้ำ และค่าความคลาดเคลื่อนคือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ตารางที่ 4.4 ค่าการขึ้นฟูของแป้งโด

สูตร	การขึ้นฟู (%)	
	ไม่เี้องศูนย์	เี้องศูนย์
F0	89.88 ± 21.84	67.57 ± 4.03
F10	74.62 ± 48.90	55.51 ± 12.97
F20	71.40 ± 0.35	45.72 ± 25.09
F40	41.90 ± 13.18	20.23 ± 0.46

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าการขึ้นฟูของแป้งโดเมื่อตัดข้อมูลที่มีความแปรปรวนสูงออก

สูตร	การขึ้นฟู (%)	
	ไม่เี้องศูนย์	เี้องศูนย์
F0	89.88 ± 21.84	67.57 ± 4.03 <sup>a</sup>
F10	-	55.51 ± 12.97 <sup>a</sup>
F20	71.40 ± 0.35	-
F40	41.90 ± 13.18	20.23 ± 0.46 <sup>b</sup>

<sup>a, b</sup>: อักษรที่แตกต่างกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Tukey's HSD,  $p < 0.05$ )

#### 4.5 การเปรียบเทียบสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโดจากการนวดด้วยชุดทดลองกับเครื่องปั่นอเนกประสงค์

แม้ว่าการเปรียบเทียบสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโดที่ได้จากการนวดโดยชุดทดลองกับเครื่องปั่นอเนกประสงค์โดยทั่วไปอาจไม่สามารถทำได้อย่างชัดเจน แต่เพื่อให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโด ผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบการทดลองนี้กับการศึกษาของ นูริน และคณะ (2556) ที่ใช้เครื่องปั่นอเนกประสงค์นวดแป้งโด ทั้งนี้ การเปรียบเทียบตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า แป้งโดได้รับการนวดอย่างพอดี อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยแป้งโดจะมีลักษณะเหนียว นุ่ม ยืดหยุ่น ไม่ติดมือ และสามารถยืดเป็นแผ่นบาง ๆ ได้

นูริน และคณะ (2556) ศึกษาสมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโดที่นวดโดยใช้เครื่องปั่นอเนกประสงค์ (Kitchen Aid รุ่น KSM150PSE และหัวปั่นรูปตะขอ) ส่วนผสมของสูตรควบคุมประกอบด้วย แป้งสาลี 400 g เนยจืด 40 g ยีสต์ 7 g เกลือ 5 g น้ำตาล 13 g ถั่วแดง ถั่วเขียว ถั่วดำ ชนิดละ 10 g และสูตรที่มีการผสมเมล็ดลินิน โดยเตรียมส่วนผสมจากสูตรควบคุมเช่นเดียวกัน แต่จะผสมเมล็ดลินินในปริมาณต่าง ๆ กัน 3 ระดับ ได้แก่ 10%, 20% และ 30% ใช้เวลาในการนวด 4 นาที เพื่อให้แป้งโดอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม แล้วพบว่า ความแข็งของสูตรควบคุมมีค่าน้อยที่สุด และค่านี้มีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการผสมเมล็ดลินิน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 2.71 - 4.69 N ค่าความเหนียว ค่าความยืดหยุ่น และค่าความเกาะติดของแป้งโดมีแนวโน้มลดน้อยลง โดยอยู่ในช่วง 1.44 - 2.01 N, 43.41% - 55.03% และ 50.07% - 58.23% ตามลำดับ

ในการทดลองนี้ ทำการวิเคราะห์สมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโดที่นวดโดยชุดทดลอง ซึ่งเวลาในการนวด 40 นาที เพื่อให้แป้งโดอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม พบว่าในตัวอย่างแป้งโดที่ไม่มีการผสมเมล็ดลินิน (สูตรควบคุม) มีค่าความแข็งน้อยที่สุด และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณการผสมเมล็ดลินินในแป้งโด โดยค่าความแข็งจะอยู่ในช่วง 1.94 - 4.70 N ส่วนค่าความเหนียว ความยืดหยุ่น และความเกาะติดของแป้งโดมีแนวโน้มลดน้อยลงตามปริมาณการผสมเมล็ดลินินซึ่งอยู่ในช่วง 1.40 - 2.51 N, 22.45 - 59.91% และ 29.88 - 59.50% ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่า แป้งโดที่นวดด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์และแป้งโดที่นวดด้วยชุดทดลองนั้นมีสมบัติทางเนื้อสัมผัสที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเหล่านี้ ซึ่งได้แก่ ค่าความแข็ง ความเหนียว ความยืดหยุ่น และความเกาะติด ก็เป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ค่าความแข็งของแป้งโดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าความเหนียว ความยืดหยุ่น และความเกาะติดของแป้งโดมีแนวโน้มลดลงการผสมเมล็ดลินิน

## สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองนวดแป้งโดผสมเมล็ดลินิน (Flaxseed) ในปริมาณไม่เกิน 40% โดยน้ำหนัก แป้ง ด้วยชุดทดลองแบบเน้นการเหือนที่ออกแบบและสร้างขึ้น สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) ค่าพลังงานจำเพาะ (SME) ที่ใช้ในการนวดในช่วงที่ทำการศึกษามีผลต่อการขึ้นฟู (Expansion ability) ค่าความเหนียว (Adhesiveness) ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) และค่าความเกาะติด (Cohesiveness) ของแป้งโด แต่จะมีผลให้ค่าความแข็ง (Hardness) ลดลง
- 2) การผสมเมล็ดลินินลงในแป้งโด มีผลให้แป้งโดมีค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเมล็ดลินินมีปริมาณ 40% แต่ค่าความเหนียว ความยืดหยุ่น และความเกาะติด ลดลง โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวของค่าความเหนียวและความเกาะติด จะเห็นได้เมื่อเมล็ดลินินมีปริมาณ 20% ขึ้นไป แต่ความยืดหยุ่นลดลงเมื่อมีการผสมเมล็ดลินินลงในแป้งโดแม้เพียง 10%
- 3) การนวดแป้งโดแบบเยื้องศูนย์ (Eccentric) มีผลให้ค่าความแข็งและการขึ้นฟูของแป้งโดที่ผสมเมล็ดลินินในปริมาณ 40% ของน้ำหนักแป้ง ลดลง

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

คณะผู้จัดทำโครงการมีข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป ดังนี้

- 1) ควรปรับปรุงชุดทดลองให้มีช่วงการเยื้องศูนย์ที่กว้างขึ้น เพื่อที่ช่วยให้ช่วงของการทดลองกว้างขึ้นและน่าจะช่วยให้ผลการศึกษชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้แล้วการปรับปรุงดังกล่าว จะส่งผลให้เกิดความสะดวกในการปรับตั้งชุดทดลอง
- 2) เนื่องจากการผสมเมล็ดลินิน ส่งผลให้สมบัติทางเนื้อสัมผัสของแป้งโดเปลี่ยนไป ซึ่งน่าจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสของขนมปังเช่นกัน ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงลักษณะทางเนื้อสัมผัสและการยอมรับของผู้บริโภค (Sensory test) ของขนมปังที่ได้จากการนวดโดยใช้ชุดทดลองนี้

## บรรณานุกรม

- ขวัญฤดี อินทริยะ และวชิระ สงจิตร. 2543. *การใช้ทุเรียนผงเพื่อทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์เค้กคุกกี้และขนมปัง*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จันทนา ชัดตา และพรพรรณ ไตรปิ่นเพชร. 2543. *การเสริมไฟเบอร์จากชงขนุนผงในผลิตภัณฑ์ขนมปัง เค้กและคุกกี้*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ทิพวดี จิตพิศทธิ์. 2550. *การสกัดแอนโธไซยานินจากเมล็ดถั่วดำและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นาค โพธิ์แทน. 2556. *การปลูกถั่วแดงหรือถั่วเขียว*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.eto.ku.ac.th/neweto/e-book/plant/rice/peanut.pdf>.
- นิรนาม1. 2548. *ถั่วเขียว*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://th.wikipedia.org/wiki>.
- นิรนาม2. 2556. *ถั่วเขียวสรรพคุณและประโยชน์ของถั่วเขียว*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://frynn.com>.
- นิรนาม3. 2556. *ถั่วแดง*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.baanmaha.com/community/thread49801.html>.
- นิรนาม4. 2556. *ถั่วดำ มหัศจรรย์แห่งธัญพืช*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://tanchualee.com/forum/index.php?topic=81.0>.
- นิรนาม5. 2555. *เนื้อสัมผัสอาหาร การวัดเพื่อควบคุมคุณภาพ*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.charpa.co.th/articles/food%20texture.htm>.
- นุรีน ทรงศิริ, เบญญาภา หงส์ชัชวาล และปฐมพงศ์ มารุตเสถียร. 2556. *อิทธิพลของเมล็ดลินินและการแช่เย็นต่อเนื้อสัมผัสของแป้งโดและคุณภาพของขนมปังเพื่อสุขภาพ*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอาหาร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ประกอบ. 2556. *เมล็ดแฟลกซ์ หรือเมล็ดลินิน Flaxseed*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://healthyka.blogspot.com/2014/09/flaxseed.html>.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์. 2556. *Food Wiki. Food Network Solution: ศูนย์เครือข่ายข้อมูลอาหารครบวงจร*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki>.

## บรรณานุกรม(ต่อ)

- ศรีชาติ พลฉิม. 2542. *การศึกษาและเปรียบเทียบพันธุ์ข้าวเหนียวพันธุ์สงเสริมและสายพันธุ์ปรับปรุงในสภาพการปลูกที่แตกต่างกัน*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สวรัรักษ์ จันทระเทพธิมากุล. 2551. *คุณสมบัติทางรีโอโลยีของโดและผลิตภัณฑ์อาหารเข้าสำเร็จรูป*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Anonymous1. 2013. *Nutrient Data Lab*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://ndb.nal.usda.gov/>.
- Anonymous2. 2012. *Texture Analysis*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.stablemicrosystems.com>.
- De Hoog, F.R., Anderssen, R.S., 2005. Approximate solutions for the couette viscometry equations. *Bulletin of the Australian Mathematical Society.*, 72; 461–470.
- Don, C., Lichtendonk, W.J., Johan J., Plijter, T. and Rob, J. 2005. The effect of mixing on glutenin affect gluten function particle properties: aggregation factors that in dough. *Journal of Cereal Science.*, 41; 69–83.
- Frynn Gaberriel. 2013. *Beans*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.frynn.com/beans>.
- Ebadi, M. 2006. Flaxseed. *Pharmacodynamic basis of herbal Medicine*. 2<sup>nd</sup> Edition. United States of America: CRC Press; 341-342.
- Eindea, R.M., Bolsiusa, A., Soestb, J.J.G., Jansenc, L.P.B.M., Goota, V.D. and Booma, R.M. 2004. The effect of thermomechanical treatment on starch breakdown and the consequences for process design. *Carbohydrate Polymers.*, 55; 57-63.
- Ghorbel D., and Launay B. 2014. An investigation into the nature of wheat flour dough adhesive behavior. *Food Research International.*, 64; 305- 313.
- Gravel, P. and Schofield, J.D. 1984. A Starch granule protein associated with endosperm softness in wheat. *Cereal Chemistry.*, 63; 379-380.

## บรรณานุกรม(ต่อ)

- Kacey Culliney. 2014. *Steamed v baked bread: Processing change impacts glycemic response*. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.bakeryandsnacks.com/Processing-Packaging/Bread-processing-can-alter-glycemic-response-GI-promise>.
- Macosko, C.W. 1994. *Rheology: Principles, measurements and applications*. Wiley, New York, USA.
- Peighambardoust, S.H., Brenk, S.V., Goot, A.J.V.D., Hamer, R.J. and Boom, R.M. 2005. Effect of simple shear on the physical properties of glutenin macro polymer (GMP). *Journal of Cereal Science.*, 42; 59–68.
- Peighambardoust, S.H., Brenk, S.V., Goot, A.J.V.D., Hamer, R.J. and Boom, R.M. 2006. Mixing behaviour of a zero-developed dough compared to a flour– water mixture. *Journal of Cereal Science.*, 44; 12–20.
- Peighambardoust, S.H., Brenk, S.V., Goot, A.J.V.D., Hamer, R.J. and Boom, R.M. 2006. Microstructure formation and rheological behaviour of dough under simple shear flow. *Journal of Cereal Science.*, 43; 183–197.
- Peighambardoust, S.H., Brenk, S.V., Goot, A.J.V.D., Hamer, R.J. and Boom, R.M. 2007. Dough processing in a couette-type device with varying eccentricity: Effect on glutenin macro-polymer properties and dough micro-structure. *Journal of Cereal Science.*, 45; 34-48.
- Pollack, L. and Gerald, P. 2011. Water has three phases – gas, liquid, and solid; but recent findings from our laboratory imply the presence of a surprisingly extensive fourth phase that occurs at interfaces. *Water Science*, University of Washington.
- Saha, S., Gupta, A., Singh, S.R.K., Bharti, N., Singh, K.P., Mahajan, V. and Gupta, H.S. 2011. Compositional and varietal influence of finger millet flour on rheological properties of dough and quality of biscuit. *LWT Food Science Technologies.*, 44; 616-621.
- Sivam, A.S., Sun-Waterhouse, D., Quek, S. and Perera, C.O. 2010. Properties of bread dough with added fiber polysaccharides and phenolic antioxidants: A Review. *Journal of food Science.*, 75; 163-174.

## บรรณานุกรม(ต่อ)

- Stanke, M., Zettel, V., Schtze, S. and Hitzmann, B. 2014. Measurement and mathematical modeling of the relative volume of wheat dough during proofing. *Journal of Food Engineering.*, 131; 58-64.
- Walsh, R.M. and Martin, P.A. 1997. Growth of *saccharomyces cerevisiae* and *saccharomyces uvarum* in a temperature. *Journal of the institute of brewing.*, 83; 169-172.
- Weegels, P.L., Hamer, R.J. and Schofield, J.D. 1996. Critical review: functional properties of wheat glutenin. *Journal of Cereal Science.*, 23; 1-18.
- Zaidel, D.N.A., Chin N.L. and Yusof Y.A. 2010. A review on rheological properties and measurements of dough and gluten. *Journal of Applied Sciences.*, 10; 248-249.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของแป้งโด

#### ก.1 การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของแป้งโด

##### อุปกรณ์

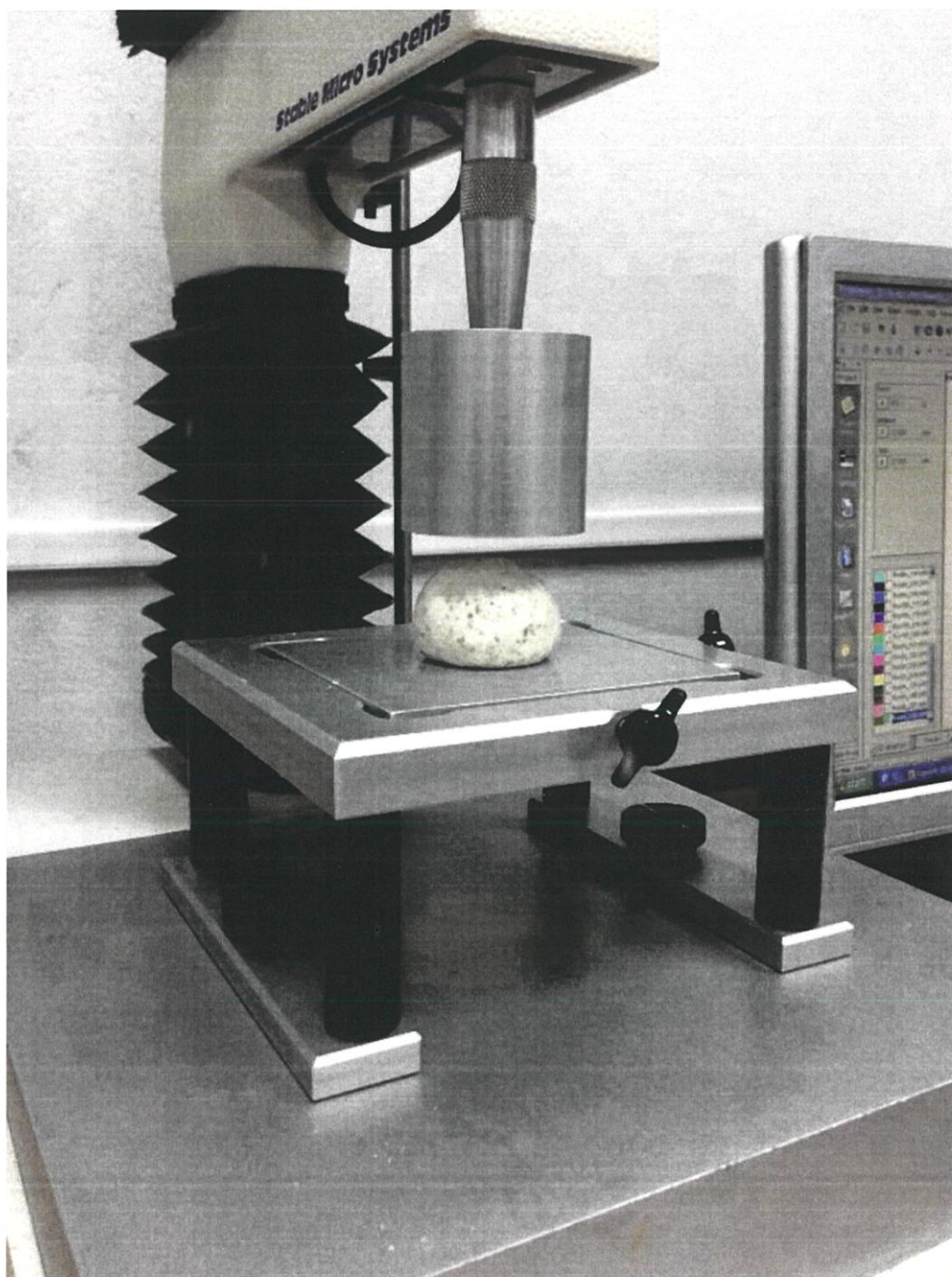
- 1) เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer)
- 2) หัวกดแบบทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm (P50)
- 3) เครื่องชั่ง ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

##### วิธีการทดลอง

- 1) เก็บตัวอย่างแป้งโด ขนาด 30 g คลึงเป็นก้อนกลม
- 2) ตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส โดยการวัดแรงที่ใช้ในการกด ในโปรแกรมสำเร็จรูป Typical Texture Expert™ โดยมีรายละเอียดอื่น ๆ ในการตั้งค่าดังนี้

Mode:	Texture Profile Analysis (TPA)
Probe:	P50 (ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 mm)
Pre-Test Speed:	2.0 mm/s
Test Speed:	2.0 mm/s
Post-Test Speed:	10.0 mm/s
Strain:	50%
Time:	5 sec
Force Trigger:	5 g

- 3) วางชิ้นตัวอย่างตรงกึ่งกลางของหัวกด แล้วทำการวัดค่าพร้อมทำซ้ำโดยการเปลี่ยนชิ้นตัวอย่างใหม่ทุกครั้ง (ทำ 2 - 3 ครั้ง/สูตร)



รูปที่ ก.1 ลักษณะการวางชิ้นตัวอย่างแป้งโด

## ก.2 การวิเคราะห์การขึ้นฟูของแป้งโด

### อุปกรณ์

- 1) เมล็ดงาขาว 1 กิโลกรัม
- 2) ถาดสำหรับวางภาชนะ
- 3) ไม้บรรทัดสำหรับปาดงาขาวส่วนเกิน
- 4) เครื่องชั่ง ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 5) อุปกรณ์ในการหาความหนาแน่นรวม ได้แก่ กรวย ขาดั่ง และภาชนะที่ทราบปริมาตร

### วิธีการทดลอง

1) เตรียมแป้งโดตัวอย่างละ 30 กรัม จำนวน 4 ก้อน โดยแป้งโด 2 ก้อนแรกนำมาวิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะทันที และแป้งโดอีก 2 ก้อนก่อนวัดปริมาตรจำเพาะ ควรหมักให้ขึ้นฟู เป็นเวลา 35 นาที

2) วัดความหนาแน่นของงาขาว โดยนำงาขาวใส่ลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรผ่านกรวย จนเต็มโดยไม่มีการอัดแน่น ปาดงาขาวส่วนเกินออก นำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณค่าความหนาแน่นรวม โดยความหนาแน่นของงาขาว เท่ากับ น้ำหนักของงาขาวหารด้วยปริมาตรของภาชนะ

3) วางภาชนะรูปทรงกระบอกไว้ตรงกลางถาด เทงาขาวใส่ภาชนะรูปทรงกระบอกด้วยความเร็วสม่ำเสมอจนล้น ใช้ไม้บรรทัดปาดถั่วส่วนที่เกินออก โดยปาดจากตรงกลางออกสองข้าง เอางาขาวส่วนที่เกินออก เทงาขาวที่อยู่ในภาชนะรูปทรงกระบอกเก็บไว้

4) บรรจุแป้งโดลงในภาชนะรูปทรงกระบอก เต็มเมล็ดงาขาวจากที่เก็บไว้ก่อนหน้าให้เต็มภาชนะ ปาดเมล็ดงาขาวส่วนที่เกินจากขอบภาชนะออก

5) ชั่งน้ำหนักของเมล็ดงาขาวส่วนเกิน

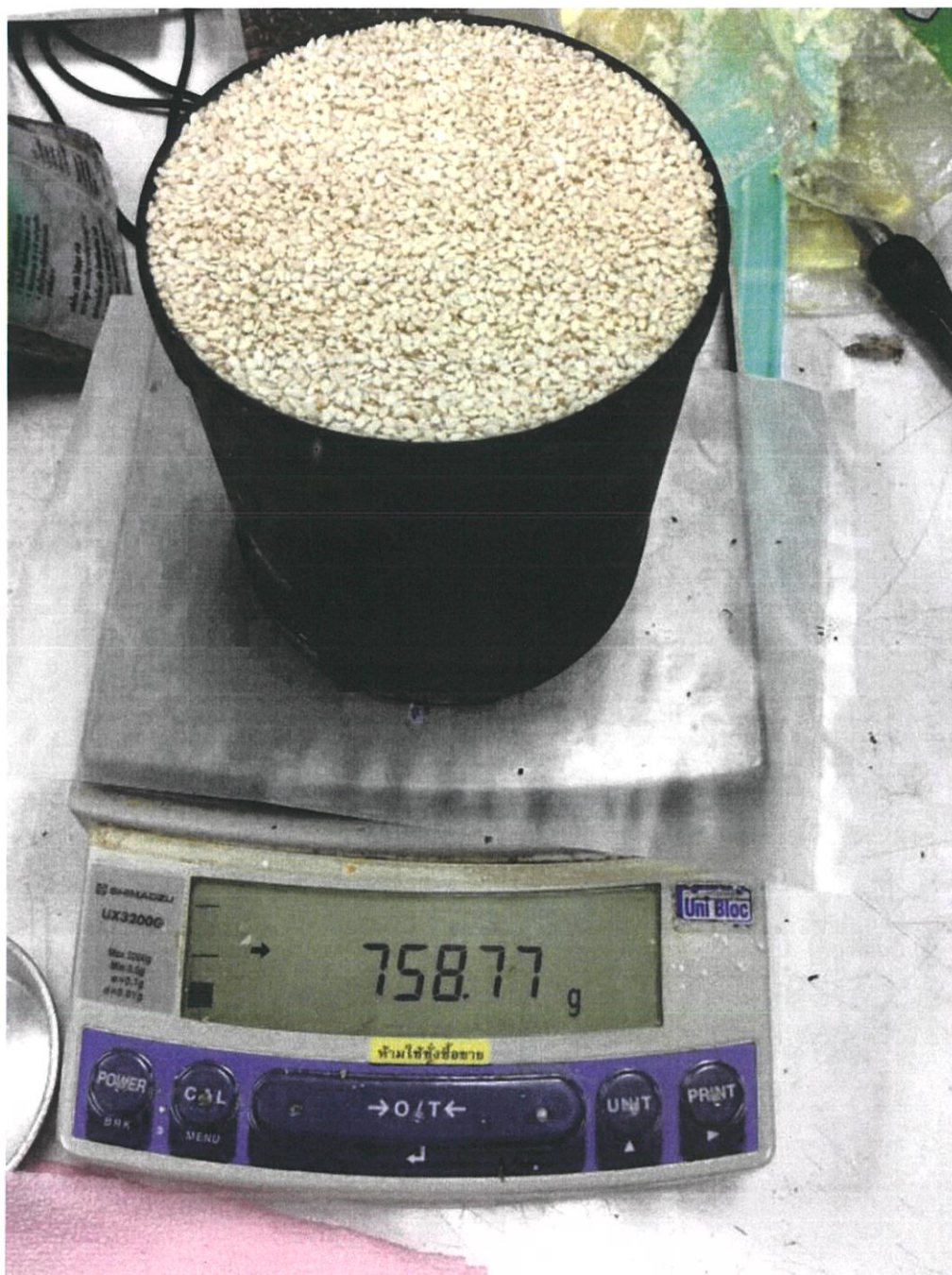
6) คำนวณหาปริมาตรของงาขาวที่ถูกแทนที่ได้จาก

$$\text{ปริมาตรเมล็ดงาขาวส่วนเกิน} = \frac{\text{น้ำหนักของงาขาวส่วนเกิน}}{\text{ความหนาแน่นของงาขาว (bulk density)}}$$

7) คำนวณค่าปริมาตรจำเพาะโดย

$$\text{ปริมาตรจำเพาะของแป้งโด (cm}^3\text{/g)} = \frac{\text{ปริมาตรเมล็ดงาขาวส่วนเกิน}}{\text{น้ำหนักแป้งโด}}$$

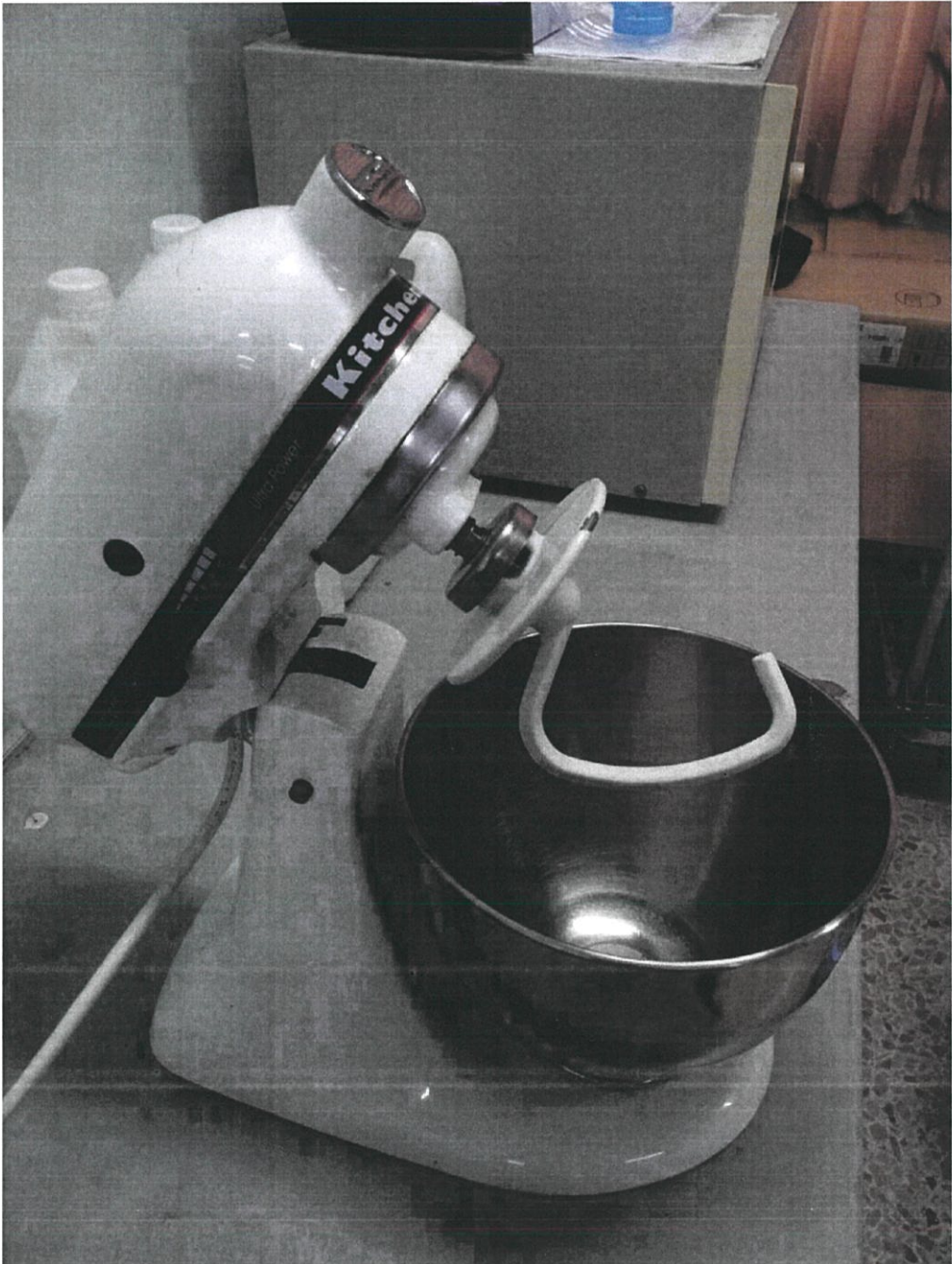
8) ทำการวิเคราะห์ซ้ำโดยเปลี่ยนตัวอย่างแป้งโด เพื่อวัดปริมาตรจำเพาะของแป้งโดก่อนและหลังขึ้นฟู ทำซ้ำโดยการเปลี่ยนขึ้นตัวอย่างใหม่ทุกครั้ง (ทำ 2 ซ้ำ/สูตร)



รูปที่ ก.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ปริมาณจำเพาะ

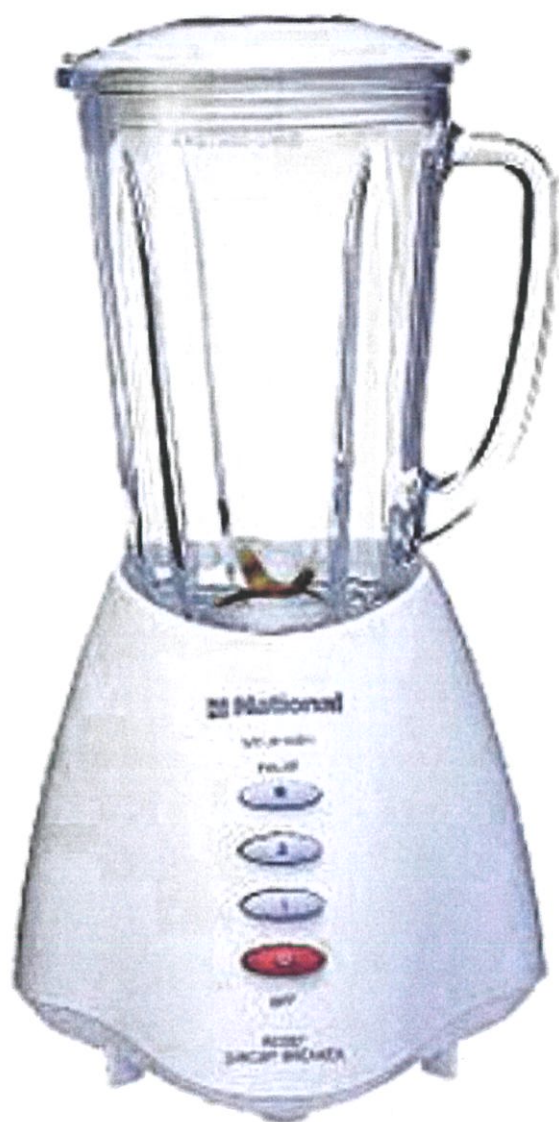
ภาคผนวก ข  
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ข.1 เครื่องปั่นผสม



รูปที่ ข.1 เครื่องปั่นผสม Kitchen Aid รุ่น 5K5M150PSE

## ข.2 เครื่องปั่นเป็ยก

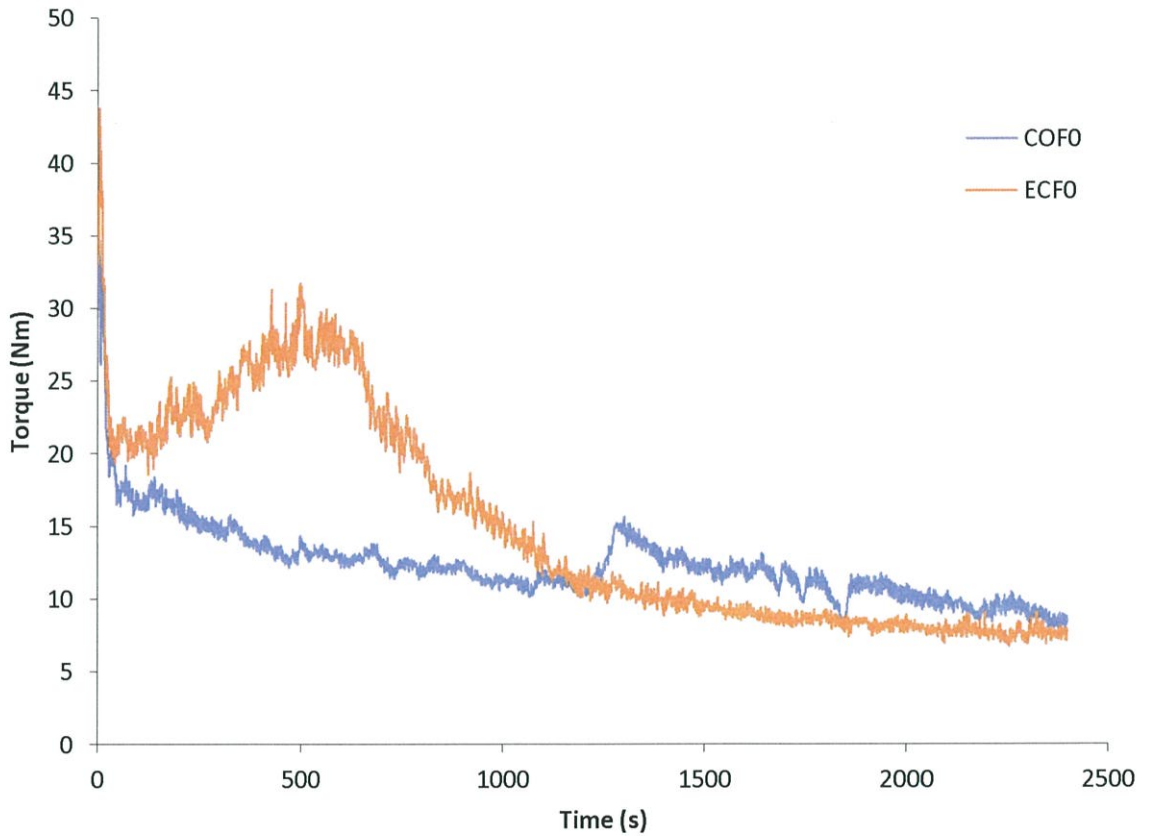


รูปที่ ข.2 เครื่องปั่นเป็ยก Panasonic MX-J210GN

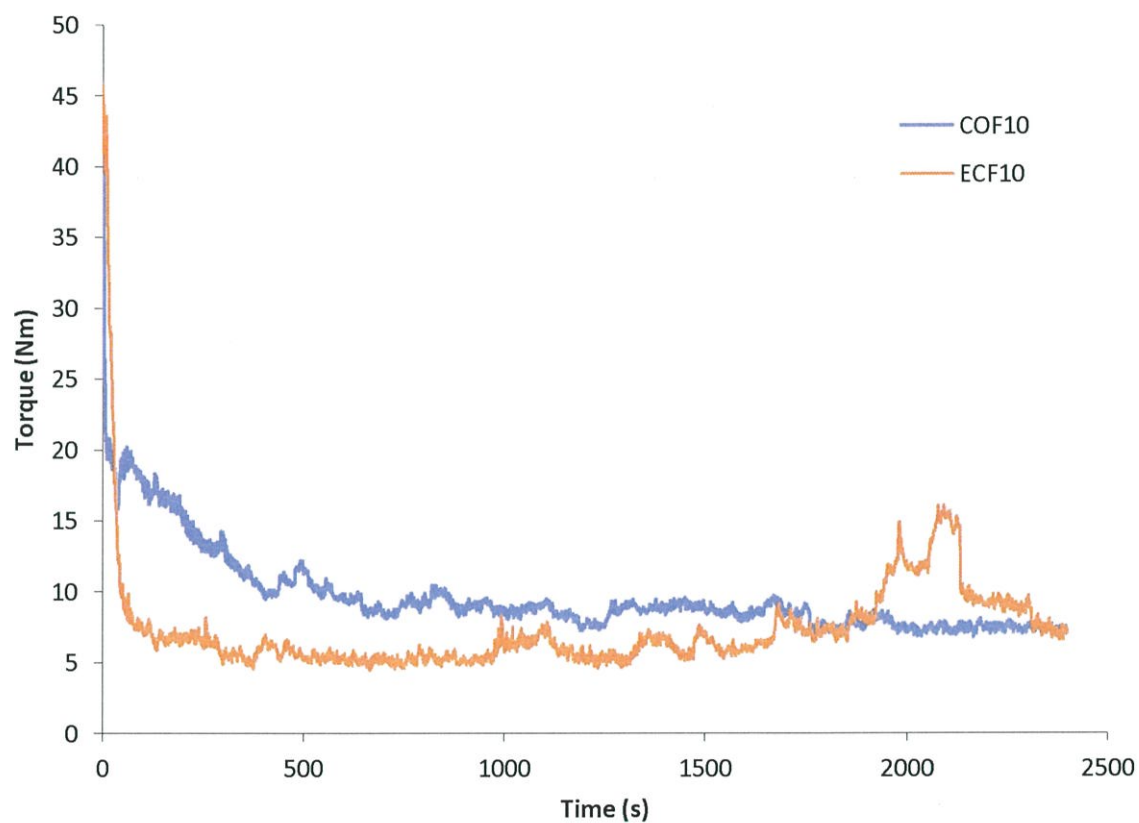
## ภาคผนวก ค

## กราฟของแรงบิดในระหว่างการนวด

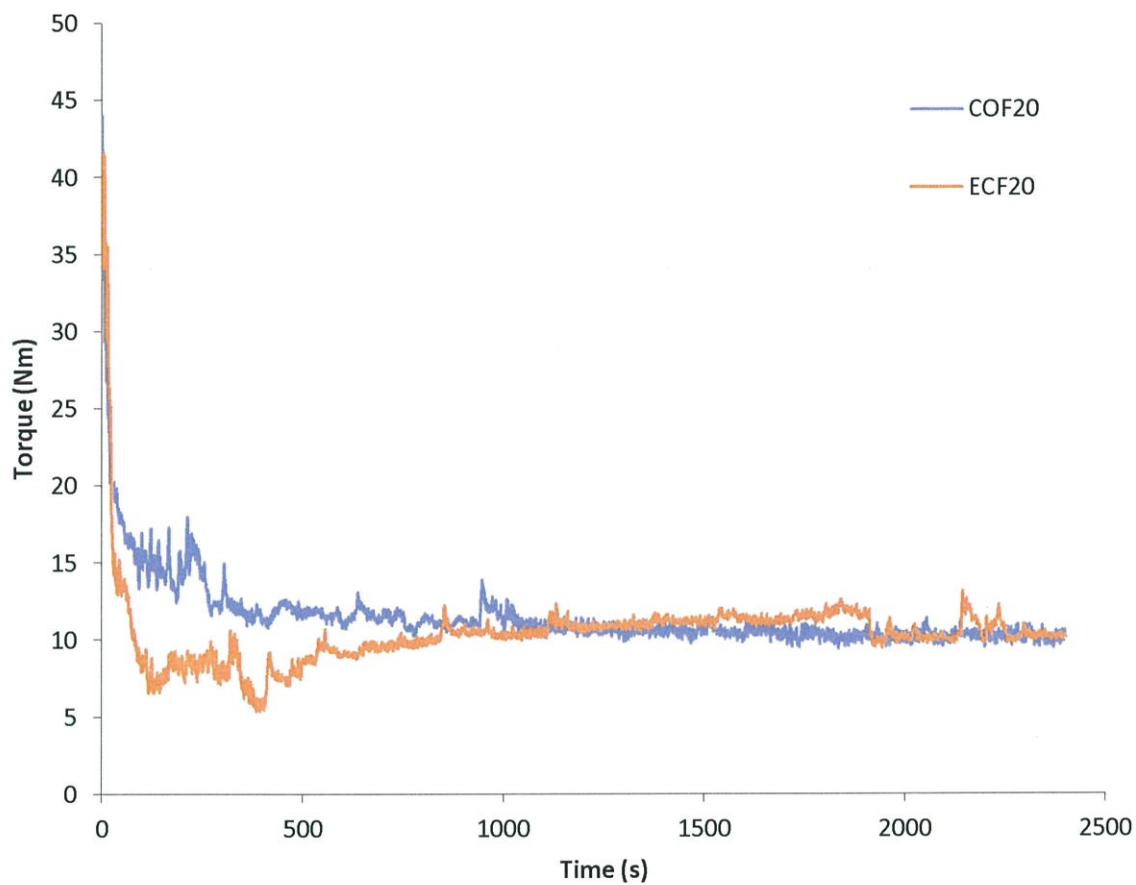
## ค.1 รูปแบบทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลา



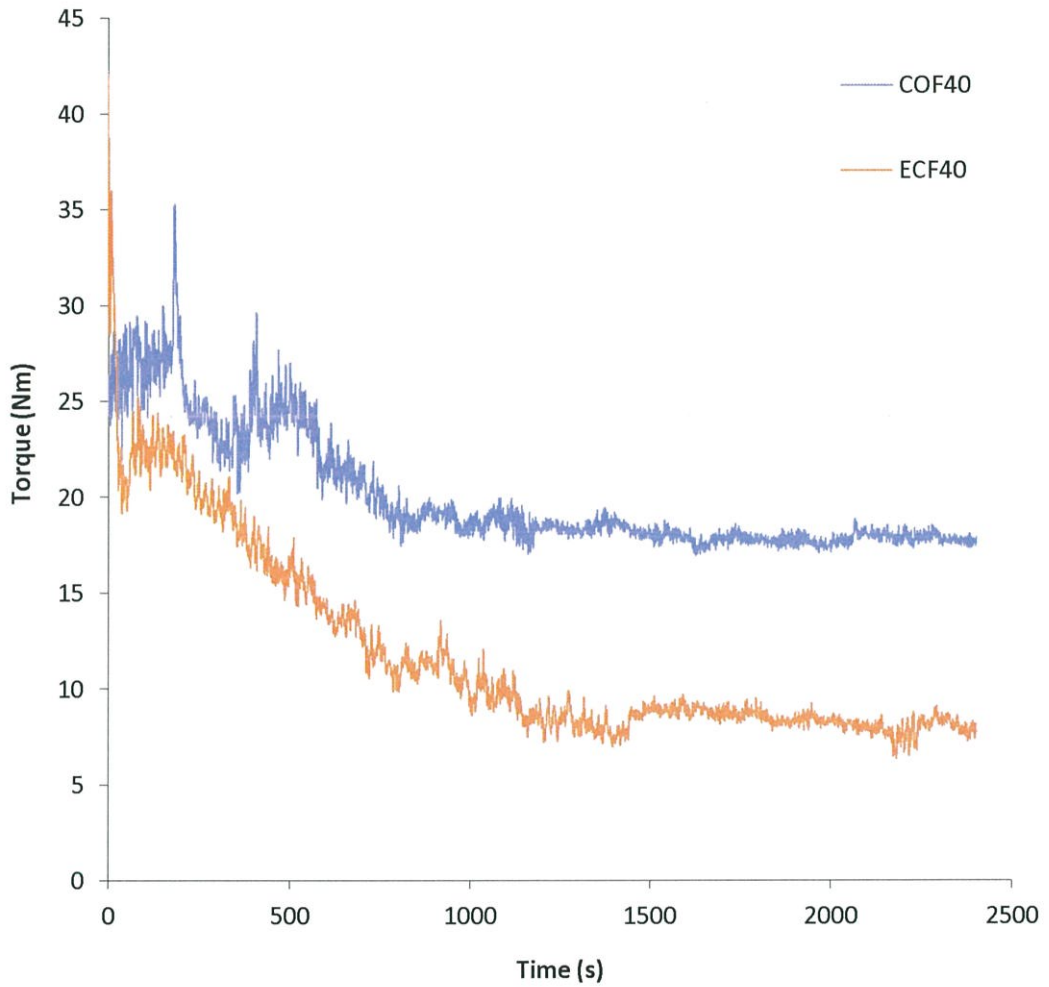
รูปที่ ค.1ก ความสัมพันธ์ของแรงบิดกับเวลาของการนวดแบ่งโดสสูตรควบคุม (FO) แบบเอียงศูนย์ (Ec) และไม่เอียงศูนย์ (Co)



รูปที่ ค.1ข ความสัมพันธ์ของแรงบิดกับเวลาของการนวดแป้งโดที่มีการผสมเมล็ดลินิน 10 % ของ น้ำหนักแป้ง (F10) แบบเยื้องศูนย์กลาง (Ec) และไม่เยื้องศูนย์กลาง (Co)



รูปที่ ค.1ค ความสัมพันธ์ของแรงบิดกับเวลาของการนวดแป้งโดที่มีการผสมเมล็ดลินิน 20 % ของ น้ำหนักแป้ง (F20) แบบเยื้องศูนย์ (Ec)



รูปที่ ค.1ง ความสัมพันธ์ของแรงบิดกับเวลาของการนวดแป้งโดที่มีการผสมเมล็ดลินิน 40 % ของ น้ำหนักแป้ง (F40) แบบเยื้องศูนย์ (Ec) และไม่เยื้องศูนย์ (Co)

## ภาคผนวก ง

## ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

## ง.1 การวิเคราะห์ข้อมูลด้าน SME

## Paired Samples Statistics

	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1 Co	112.7675	4	23.02529	11.51264
Ec	165.2175	4	44.94957	22.47478

## Paired Samples Correlations

	N	Correlation	Sig.
Pair 1 Co & Ec	4	.901	.099

## Paired Samples Test

	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Co - Ec	-52.45000	26.18409	13.09204	-94.11473	-10.78527	-4.006	3	.028

## ง.2 การวิเคราะห์ข้อมูลด้านเนื้อสัมผัสของแป้งโด

Hardness

### Between-Subjects Factors

		Value Label	N
Formula	0	F0	4
	10	F10	4
	20	F20	4
	40	F40	4
Gap	0	Co	8
	1	Ec	8

### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Hardness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Model	124.711 <sup>a</sup>	8	15.589	202.387	.000
Formula	9.616	3	3.205	41.615	.000
Gap	1.166	1	1.166	15.143	.005
Formula * Gap	1.674	3	.558	7.245	.011
Error	.616	8	.077		
Total	125.327	16			

a. R Squared = .995 (Adjusted R Squared = .990)

## Co-concentric

Formula ( $X_1, X_2$ )	$X_1$	$X_2$	Diff.
F0,F10	1.94	2.24	0.29
F0,F20	1.94	2.79	0.85
F0,F40	1.94	4.70	2.76
F10,F20	2.24	2.79	0.55
F10,F40	2.24	4.70	2.46
F20.F40	2.79	4.70	1.91

Tukey HSD0.05 = 1.34

## Eccentric

Formula ( $X_1, X_2$ )	$X_1$	$X_2$	Diff.
F10,F0	1.74	2.24	0.44
F10,F20	1.74	2.79	0.72
F10,F40	1.74	4.70	1.41
F0,F20	2.18	2.79	0.28
F0,F40	2.18	4.70	0.97
F20.F40	2.46	4.70	0.69

Tukey HSD0.05 = 1.34

## Adhesiveness

## Between-Subjects Factors

		Value Label	N
Formula	0	F0	4
	10	F10	4
	20	F20	4
	40	F40	4
Gap	0	Con	8
	1	Ec	8

## Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: adhesiveness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	3.811 <sup>a</sup>	7	.544	3.669	.044
Intercept	59.098	1	59.098	398.350	.000
Formula	3.179	3	1.060	7.142	.012
Gap	.059	1	.059	.396	.547
Formula * Gap	.573	3	.191	1.288	.343
Error	1.187	8	.148		
Total	64.095	16			
Corrected Total	4.997	15			

a. R Squared = .763 (Adjusted R Squared = .555)

## ANOVA

Adhesiveness

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3.179	3	1.060	6.991	.006
Within Groups	1.819	12	.152		
Total	4.997	15			

## Adhesiveness

Tukey B<sup>a</sup>

Formula	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
F40	4	1.4000		
F20	4	1.5950	1.5950	
F10	4		2.1800	2.1800
F0	4			2.5125

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 4.000.

## Springiness

## Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Springiness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	3106.972 <sup>a</sup>	7	443.853	38.637	.000
Intercept	31764.151	1	31764.151	2765.030	.000
Formula	3035.931	3	1011.977	88.091	.000
Gap	2.176	1	2.176	.189	.675
Formula * Gap	68.866	3	22.955	1.998	.193
Error	91.903	8	11.488		
Total	34963.025	16			
Corrected Total	3198.874	15			

a. R Squared = .971 (Adjusted R Squared = .946)

## ANOVA

Springiness

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3035.931	3	1011.977	74.527	.000
Within Groups	162.944	12	13.579		
Total	3198.874	15			

## Springiness

Tukey B<sup>a</sup>

Formula	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
F40	4	22.4500		
F20	4		45.5125	
F10	4		50.3500	
F0	4			59.9125

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 4.000.

## Cohesiveness

## Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: cohesiveness

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1992.834 <sup>a</sup>	7	284.691	20.814	.000
Intercept	35880.410	1	35880.410	2623.242	.000
Formula	1973.107	3	657.702	48.085	.000
Gap	.863	1	.863	.063	.808
Formula * Gap	18.864	3	6.288	.460	.718
Error	109.423	8	13.678		
Total	37982.667	16			
Corrected Total	2102.257	15			

a. R Squared = .948 (Adjusted R Squared = .902)

## ANOVA

Cohesiveness

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1973.107	3	657.702	61.111	.000
Within Groups	129.150	12	10.762		
Total	2102.257	15			

## Cohesiveness

Tukey B<sup>a</sup>

Formula	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
F40	4	29.8750		
F20	4		46.3375	
F10	4			53.8125
F0	4			59.3963

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 4.000.

### ง.3 การวิเคราะห์ข้อมูลด้านการขึ้นฟูของแป้งโด

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: Proof

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	6806.314 <sup>a</sup>	7	972.331	2.017	.173
Intercept	54462.817	1	54462.817	112.990	.000
Formula	4817.091	3	1605.697	3.331	.077
Gap	1966.841	1	1966.841	4.080	.078
Formula * Gap	22.382	3	7.461	.015	.997
Error	3856.127	8	482.016		
Total	65125.259	16			
Corrected Total	10662.441	15			

a. R Squared = .638 (Adjusted R Squared = .322)

การวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อตัดชุดข้อมูลที่มีความแปรปรวนสูงออก

Co-concentric

#### ANOVA

Co-concentric

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2342.558	2	1171.279	5.401	.101
Within Groups	650.594	3	216.865		
Total	2993.152	5			

## Eccentric

## ANOVA

## Eccentric

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2420.894	2	1210.447	19.660	.019
Within Groups	184.706	3	61.569		
Total	2605.600	5			

## Multiple Comparisons

Dependent Variable: Eccentric

## Tukey HSD

(I) F	(J) F	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
0	10	12.05928	7.84657	.393	-20.7293	44.8479
	40	47.34066*	7.84657	.019	14.5520	80.1293
10	0	-12.05928	7.84657	.393	-44.8479	20.7293
	40	35.28138*	7.84657	.041	2.4928	68.0700
40	0	-47.34066*	7.84657	.019	-80.1293	-14.5520
	10	-35.28138*	7.84657	.041	-68.0700	-2.4928

\*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

## Eccentric

Tukey HSD<sup>a</sup>

F	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
40	2	20.2260	
10	2		55.5074
0	2		67.5666
Sig.		1.000	.393

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 2.000.