

การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งถั่วเขียว  
ด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

Preparation and Modification of Thermoplastic Mung Bean starch  
by Cotton fibers and Low-density polyethylene



T108588

นางสาวดารินทร์ โพธิ์ศรี  
นางสาวลักขณา หอมมณี  
นางสาวปาริชาติ จิรภัคเสถียร

รพ.  
๑๒๒๙๗  
๒๕๕๑

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 108588  
วัน,เดือน,ปี..... - ๕ ก.ค. ๒๕๕๓

b. 1๒๒๙๑๕๖ X  
i. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๕๑

**Preparation and Modification of Thermoplastic Mung Bean starch by  
Cotton fibers and Low-density polyethylene**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2008**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงการพิเศษ**

การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก  
แป้งถั่วเขียวด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ  
Preparation and Modification of Thermoplastic Mung Bean starch  
by Cotton fibers and Low-density polyethylene

**นักศึกษา**

นางสาวดารินทร์ โปธิศรี รหัส 48050055  
นางสาวลักขณา หอมมณี รหัส 48050087  
นางสาวปาริชาติ จิรภัคเสถียร รหัส 48050662

**ปริญญา**

วิทยาศาสตร์บัณฑิต




**สาขาวิชา**

เคมีอุตสาหกรรม

**อาจารย์ที่ปรึกษา**

รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติ  
ให้นำโครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2551

คณะกรรมการ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์	
รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย	
รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ	



(ผศ.ดร.ชลอง จารุสุทธิรักษ์)

ปฏิบัติหน้าที่ประธานสาขาวิชา

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>โครงการพิเศษ</b>	การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งถั่วเขียวด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ		
<b>นักศึกษา</b>	นางสาวดารินทร์	โพธิ์ศรี	รหัส 48050055
	นางสาวลักขณา	หอมมณี	รหัส 48050087
	นางสาวปาริชาติ	จิรภัคเสถียร	รหัส 48050662
<b>ภาควิชา</b>	เคมี		
<b>สาขาวิชา</b>	เคมีอุตสาหกรรม		
<b>ปีการศึกษา</b>	2551		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญวารากร		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงการเตรียมและสมบัติต่างๆของพลาสติกย่อยสลายที่เตรียมได้จากเทอร์โมพลาสติกสตา์ช (Thermoplastic Starch, TPS) จากแป้งถั่วเขียว (Mung Bean starch) โดยใช้กัลิเซอร์อลเป็นพลาสติกไซเซออร์ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งถั่วเขียวในสูตรที่มีการผสมที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที มีลักษณะทางกายภาพดีที่สุดจากนั้นเป็นขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งถั่วเขียวโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และ/หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชเพิ่มขึ้น และสมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1 ส่วนฐานฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชในแต่ละสูตรเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับเมทริกซ์ได้ สำหรับ สมบัติทางความร้อนพบว่าการเติมเส้นใยฝ้ายมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชสูงขึ้น และยังพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ไม่มีการปรับปรุงมีแนวโน้มการย่อยสลายเร็วที่สุด แต่สูตรที่มีการปรับปรุงด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 40 % โดยน้ำหนัก ใช้เวลาในการย่อยสลายนานที่สุด

<b>Special Project</b>	Preparation and Modification of Thermoplastic Mung Bean starch by Cotton fibers and Low-density polyethylene		
<b>Name</b>	Miss.Darin	Phosee	ID 48050055
	Miss.Luxsana	Hommanee	ID 48050087
	Miss.Parichat	Chirapaksatien	ID 48050662
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Program</b>	Industrial chemistry		
<b>Academic Year</b>	2008		
<b>Special Project Advisor</b>	Asso.Prof.Dr.Jutarat	Prachayawarakorn	

### Abstract

This research aimed to focus on the preparation and properties of degradable plastic prepared from thermoplastic mung bean starch (TPS) plasticized by glycerol. It was found that the temperature of 170°C and the speed of 40 rpm were the suitable condition leading the best physical properties. The TPS specimens were then modified by reinforcing with cotton fibers and/or by adding with LDPE. It was found that the increase of cotton fibers and LDPE tended to increase the mechanical properties of TPS specimens. The result also showed that the ratio of 2:1 (cotton : LDPE) exhibited the maximum mechanical properties. Besides, morphological property of the specimens from Scanning Electron Microscope (SEM) illustrated that cotton fiber was well distributed and compatible with the TPS matrix. For thermal property, the onset thermal degradation temperature ( $T_d$ ) shifted to higher temperature by the addition of the cotton fibers. Furthermore, the TPS with no modification was easily degrade while the specimen with LDPE 40 % wt was the most difficult to degrade.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานพิเศษนี้ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆ เกี่ยวกับโครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์ และ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการงานพิเศษ โดยช่วยกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงการงานพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุจิตใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคาร ฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือรวมถึงให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ ตลอดจนการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ ที่ศูนย์บริการเครื่องมือ อาคารจุฬารัตน์วลัยลักษณ์ 2 คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและสอนเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องมือ

นอกจากนี้ยังขอบคุณท่านอื่นๆ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คารินทร์ โพธิ์ศรี  
ลักขณา หอมมณี  
ปาริชาติ จิรภัคเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการงานพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการงานพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 พลาสติก	4
2.1.1 แหล่งกำเนิดของพลาสติก	4
2.2 พลาสติกย่อยสลายได้	5
2.2.1 การย่อยสลายของพลาสติก	5
2.2.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยทางชีวภาพ	6
2.2.3 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง	7
2.2.3.1 การใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก	7
2.2.3.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้	7
2.2.3.3 แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์	10
2.2.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย	11
2.2.4.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน	11
2.2.4.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป	11
2.2.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์	12
2.2.4.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด	12
2.2.4.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4.6 การทดสอบโดยการฝังดิน	13
2.3 แป้ง	13
2.3.1 องค์ประกอบภายในแป้ง	13
2.3.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง	18
2.3.3 สมบัติของแป้ง	21
2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย	21
2.3.3.2 การเกิดเจลลาคีโนเซชัน	21
2.3.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	22
2.3.4 ถั่วเขียว	24
2.3.5 แป้งถั่วเขียว	25
2.3.6 กรรมวิธีการผลิตแป้งถั่วเขียว	25
2.3.7 แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาซ์	26
2.4 พลาสติกไซเซออร์	27
2.4.1 พลาสติกไซเซชันและพลาสติกไซเซออร์	27
2.5 เส้นใย	28
2.5.1 เส้นในฝ้าย	28
2.5.1.1 ลักษณะการจัดเรียงตัวภายในเส้นใย	29
2.5.1.2 องค์ประกอบทางเคมี	29
2.5.1.3 สมบัติทางกายภาพ	30
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	40
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	40
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	41
3.3 วิธีการทดลอง	43
3.4 วิธีการทดสอบ	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง	47
4.1 สมบัติเชิงกล	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวด้วยเครื่องผสมระบบปิด	47
4.1.2 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวโดยใช้เส้นใยฝ้ายเป็นส่วนเสริมแรง	50
4.1.3 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวโดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	53
4.1.4 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน	56
4.2 สันฐานวิทยา	60
4.2.1 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที	61
4.2.2 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้นใยฝ้ายเป็นส่วนเสริมแรง	62
4.2.3 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวปรับปรุงสมบัติโดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	64
4.2.4 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน	66
4.3 สมบัติด้านความร้อน	69
4.4 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	82
5.1 สรุปผลการวิจัย	82
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
เอกสารอ้างอิง	85
ภาคผนวก	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน	14
ตารางที่ 2.2	สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส	15
ตารางที่ 2.3	สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน	17
ตารางที่ 2.4	อัตราการคืนตัวของแป้งแต่ละชนิด	24
ตารางที่ 2.5	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วเขียว	25
ตารางที่ 2.6	สมบัติของเส้นใยฝ้าย	31
ตารางที่ 3.1	องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วเขียว	40
ตารางที่ 3.2	สมบัติทั่วไปของเส้นใยฝ้าย	40
ตารางที่ 3.3	สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เกรด LD1905F จากบริษัทไทย โพลีเอทิลีน จำกัด	41
ตารางที่ 3.4	อัตราส่วนของแป้ง และ กลีเซอรอล ที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	43
ตารางที่ 3.5	แสดงมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้	44
ตารางที่ 4.1	ลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวเมื่อผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด	48
ตารางที่ 4.2	ลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวเมื่อขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป	49
ตารางที่ 4.3	สมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	58
ตารางที่ 4.4	อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวเมื่อผสมด้วยเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	72
ตารางที่ 4.5	อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวเมื่อผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	73
ตารางที่ 4.6	ผลการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวเมื่อผสมด้วยเส้นใยฝ้าย และ/หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.7	78
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่มีการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย 5 และ 15% โดยน้ำหนัก	
ตารางที่ 4.8	79
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่มีการผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 20 และ 40% โดยน้ำหนัก	
ตารางที่ 4.9	80
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่มีการผสมด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1	



# สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	6
รูปที่ 2.2	การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้	8
รูปที่ 2.3	การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปแบบเม็ดแป้ง	9
รูปที่ 2.4	การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปแบบเจลลาทีน	9
รูปที่ 2.5	โครงสร้างของสตาร์ชกราฟท์โคพอลิเมอร์	10
รูปที่ 2.6	โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	14
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของอะมิโลส	15
รูปที่ 2.8	โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน	16
รูปที่ 2.9	ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ ธรรมดา	19
รูปที่ 2.10	ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ อิเล็กตรอน	20
รูปที่ 2.11	การเกิดรีโทรเกรเดชัน	23
รูปที่ 2.12	กลไกการคืนตัวของแป้ง	23
รูปที่ 2.13	ต้นฝ้าย และเมล็ดฝ้าย	29
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง	42
รูปที่ 4.1	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวที่ทำการผสม ด้วยเส้นใยฝ้ายในปริมาณต่างๆ	52
รูปที่ 4.2	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวที่ทำการผสม ด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณต่างๆ	55
รูปที่ 4.3	สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวที่ทำการผสม ด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณต่างๆ	57
รูปที่ 4.4	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวที่อุณหภูมิ 140 °C ความเร็วรอบ 50 rpm (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่ กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่ กำลังขยาย 300เท่า	61

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.5	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า	62
รูปที่ 4.6	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า	63
รูปที่ 4.7	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 20% โดยน้ำหนัก (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า	64
รูปที่ 4.8	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 40% โดยน้ำหนัก (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า	65
รูปที่ 4.9	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกันในอัตราส่วน 1:1 (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า	66
รูปที่ 4.10	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกันในอัตราส่วน 1:2 (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า	67
รูปที่ 4.11	สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกันในอัตราส่วน 2:1 (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า	68

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.12	(ก) TGA (ข) DTG ของ (a) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว (b) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซผสมด้วยเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก (c) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซผสมเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก	69
รูปที่ 4.13	(ก) TGA (ข) DTG ของ (a) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว (b) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 20% โดยน้ำหนัก (c) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำ 40% โดยน้ำหนัก	70
รูปที่ 4.14	(ก) TGA (ข) DTG ของ (a) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว (b) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซผสมด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นต่ำ เท่ากับ 1:1 (c) เทอร์โมพลาสติกสตาโรซผสมด้วย เส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 1:2 (d) เทอร์โม พลาสติกสตาโรซผสมด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 2:1	71
รูปที่ 4.15	การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที	74
รูปที่ 4.16	การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก	74
รูปที่ 4.17	การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก	75
รูปที่ 4.18	การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 20% โดยน้ำหนัก	75
รูปที่ 4.19	การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสม พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 40% โดยน้ำหนัก	75
รูปที่ 4.20	การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมเส้นใยฝ้าย ต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:1	76
รูปที่ 4.21	การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมเส้นใยฝ้าย ต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:2	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.22	การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวผสมเส้นใยฝ้าย ต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1	76
รูปที่ 4.23	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โม พลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวที่มีการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย 5 และ 15% โดยน้ำหนัก	78
รูปที่ 4.24	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โม พลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวที่มีการผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำ 20 และ 40% โดยน้ำหนัก	79
รูปที่ 4.25	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โม พลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวที่มีการผสมด้วยเส้นใยฝ้ายต่อ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1	80

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุที่เป็นพลาสติกกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรจุภัณฑ์พลาสติกจะมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นในอัตราสูงกว่าบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุชนิดอื่น เช่น กระดาษ โลหะและแก้ว ทั้งนี้เนื่องจากมีความทนทาน สามารถกันน้ำได้ดีและมีน้ำหนักเบา แนวโน้มความต้องการใช้พลาสติกมีการขยายตัวมากขึ้น ปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกจึงสูงขึ้นเช่นกัน ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมาทั้งนี้เนื่องจากขยะพลาสติกต้องใช้เวลายาวนานในการย่อยสลาย จึงได้ทำการค้นคว้าวิจัยหาพลาสติกแบบใหม่ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติในระยะเวลาอันสั้นและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

การสังเคราะห์พลาสติกที่มาจากวัสดุธรรมชาติถือเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหา มลภาวะที่เกิดจากพลาสติก ซึ่งสามารถย่อยสลายได้โดยแสงหรือกระบวนการทางชีวภาพใน ระยะเวลาอันสั้น วิธีการหนึ่งในการผลิตพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ คือ การเติมสารที่สามารถ เป็นอาหารของจุลินทรีย์ได้ เช่น แป้ง (Starch) เนื่องจากแป้งมีส่วนสำคัญในขบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ซึ่งเป็นกลไกการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย เมื่อนำมาผสมลงในพลาสติกใน ปริมาณที่เหมาะสมจะยังคงทำให้พลาสติกมีความเหนียวและแข็งแรงต่อการใช้งานได้ในระยะ เวลาหนึ่งหลังจากนั้นแล้วถ้าผ่านขบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) โดยใช้แสงและจุลินทรีย์จะทำให้ พลาสติกเกิดการเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำพลาสติกนั้นไปฝังลงดิน จะทำให้เกิด การสลายตัวได้เร็วขึ้น เนื่องจากในดินมีแร่ธาตุ ความชื้นและจุลินทรีย์นานาชนิดที่เป็นสภาวะ สำคัญของการย่อยสลายทางชีวภาพ

การนำพลาสติกหรือพอลิเมอร์มาผสมกับแป้งทำให้ได้พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ แต่ พอลิเมอร์ที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ลดลงอย่างชัดเจน การนำเส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้มาเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ผสมแป้ง จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่ง ที่น่าสนใจเพื่อผลิตพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ และช่วยทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าสมบัติเชิงกล ของพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติมีความแข็งแรงสูงและมี ความหนาแน่นต่ำจึงมีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารเสริมแรง เส้นใยธรรมชาติอาจได้มาจาก พืช สัตว์และแร่ธาตุ ตัวอย่างเช่น ฝ้าย (Cotton) ป่าน (Flax) ปอกระเจา (Jute) เส้นใยไม้ (Wood fibers) เป็นต้น

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) เป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติจึง สามารถย่อยสลายได้ ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกันอย่าง กว้างขวาง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการศึกษากันได้มาจากสตาร์ชชนิดต่างๆ เช่น แป้งข้าวโพด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Corn starch) [1] แป้งสาลี (Wheat starch) [2] แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch) [3] แป้งข้าวเจ้า (Rich starch) [4] เป็นต้น จากการรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังไม่พบรายงานที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งถั่วเขียว (Mung Bean starch) แต่อย่างไรก็ตามลักษณะทางกายภาพของแป้งถั่วเขียวเมื่อทำให้สุกนั้นจะมีความใส จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ทำบรรจุภัณฑ์ต่างๆได้

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศที่มีผู้ผลิตและส่งออกถั่วเขียวและผลิตภัณฑ์จากถั่วเขียวเป็นรายใหญ่ของโลก สำหรับตลาดส่งออกแป้งถั่วเขียวของประเทศไทยมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยในปี 2549 ปริมาณการส่งออกเท่ากับ 912.68 ตัน คิดเป็นมูลค่า 42.11 ล้านบาท เมื่อเปรียบเทียบกับปี 2548 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกแป้งถั่วเขียวเพิ่มขึ้นร้อยละ 44.0 และร้อยละ 23.1 ตามลำดับ ตลาดส่งออกที่สำคัญ คือ อินโดนีเซียมีสัดส่วนร้อยละ 54.2 รองลงมา คือ สหรัฐอเมริการ้อยละ 21.2 ฟิลิปปินส์ร้อยละ 7.7 กัมพูชาร้อยละ 8.3 และไต้หวันร้อยละ 3.5 [5] ทำให้ศักยภาพของถั่วเขียวและผลิตภัณฑ์ที่มีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่องทั้งตลาดในประเทศและตลาดส่งออก ถั่วเขียวและผลิตภัณฑ์จากถั่วเขียวส่วนใหญ่ใช้ภายในประเทศเพื่อการบริโภคโดยตรง และแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเพาะถั่วงอก อุตสาหกรรมขนมหวาน การผลิตแป้งถั่วเขียวและเส้นเส้นแป้งถั่วเขียว คนทั่วไปมักรู้จักในนามของแป้งซ่าหรือสามารถนำมาประกอบอาหารได้หลายประเภท โดยเฉพาะขนม เช่น ขนมเทียน ขนมชั้น คุกกี้ ทาร์ต เป็นต้น แป้งถั่วเขียวที่ผลิตจำหน่ายมีอยู่ 2 ลักษณะตามประโยชน์ใช้สอยที่แตกต่างกัน คือ แป้งถั่วเขียวคัดแปลง สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำขนมไทยและขนมต่างชาติ และแป้งถั่วเขียวธรรมชาติเป็นแป้งที่นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเส้นเส้นหรือก๋วยเตี๋ยวแข็งได้ [5]

โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch (Thermoplastic starch, TPS) ที่เตรียมได้จากแป้งถั่วเขียวและกลีเซอรอลนำมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density Polyethylene, LDPE) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ และศึกษาถึงการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarchผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย ซึ่งคาดว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์แต่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว (Thermoplastic Mung Bean starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์
- 1.2.2 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย (Cotton fibers) และการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene, LDPE)
- 1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการสลายตัวทางชีวภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
- 1.3.2 ศึกษาหาปริมาณแป้งถั่วเขียวและกลีเซอรอลที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้
- 1.3.3 ศึกษาหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกัน ได้แก่ อุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสม
- 1.3.4 ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
- 1.3.5 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งถั่วเขียวที่มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้งานกันทั่วไปได้
- 1.4.2 ช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนในยุคปัจจุบันและอนาคตได้
- 1.4.3 เพื่อแปรรูปแป้งถั่วเขียวซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีราคาถูก ให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 พลาสติก [6]

พลาสติก คือ สารสังเคราะห์ (Synthetic Materials) ที่มนุษย์คิดขึ้นมาประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและคลอรีน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ลักษณะอ่อนตัวขณะทำการผลิต ซึ่งโดยมากใช้กรรมวิธีการผลิตด้วยความร้อนหรือแรงอัดหรือทั้งสองอย่าง

พลาสติกมีคุณสมบัติทางโครงสร้างพิเศษที่เรียกว่า High Molecular Weight คือ ในหนึ่งโมเลกุลมีจำนวนอะตอมมากกว่าสารชนิดอื่น จึงทำให้มีสมบัติดังนี้ คือ

1. สมบัติทางกายภาพ (Mechanical) มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น ฯลฯ
2. สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical) เป็นฉนวนไฟฟ้า
3. สมบัติทางเคมี (Chemical) ทนกรด ต่าง และสารเคมีอื่นๆ

พลาสติกแบ่งเป็น 2 ประเภท โดยอาศัยลักษณะของพลาสติกเมื่อถูกความร้อน

1. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting หรือ TS) คือพลาสติกที่มีรูปทรงถาวรเมื่อผ่านการผลิตโดยการใช้ความร้อนและแรงอัด จะนำไปหลอมละลายอีกไม่ได้

2. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics หรือ TP) คือพลาสติกที่เมื่อได้รับความร้อนแล้วสามารถเปลี่ยนรูปได้และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกหลังจากนำไปหล่อทำเป็นผลิตภัณฑ์

##### 2.1.1 แหล่งกำเนิดของพลาสติก [6]

1. ผลิตผลทางการเกษตร เช่น Cellulose Nitrate, Cellulose Acetate, Cellulose Acetate-Butyrate, Shellac, Ethyl Cellulose, Casein

2. ผลิตผลทางการเกษตรและน้ำมัน มีน้อย เช่น Furan

3. น้ำมันและถ่านหิน เป็นแหล่งที่ใช้ผลิตพลาสติกชนิดต่างๆ ได้มากที่สุด เช่น

Polystyrene, Phenol-Formaldehyde, Melamine-Formaldehyde, Polyethylene, Urea-Formaldehyde, Nylon, Polyester, Acrylic, Epoxy

4. น้ำมันและสินแร่ เช่น Polyvinyl Butyral, Polyvinyl Carbazole, Polyvinyl Acetate, Polyvinyl Alcohol, Silicone, Polyvinyl Acetate-Chloride, Polyvinyl Chloride

5. สินแร่ มีน้อย เช่น Calcium-Aluminium Silicate dasine

## 2.2 พลาสติกย่อยสลายได้ [7]

การบริโภคผลิตภัณฑ์พลาสติกซึ่งผลิตจากวัตถุดิบทางปิโตรเคมีทั่วโลก มีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5 ต่อปี คิดเป็นปริมาณ 200 ล้านตันต่อปีหรือคิดเป็นปริมาณการบริโภคของประชากรสูงถึง 80-100 กิโลกรัมต่อคนต่อปี แต่ความสามารถในการนำขยะพลาสติกหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ยังอยู่ในระดับต่ำเพียงร้อยละ 30 โดยเฉพาะประเทศไทยที่มีขยะพลาสติกที่ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมทั่วประเทศไม่ต่ำกว่า 2.2 ล้านตันต่อปี ทำให้ปัจจุบันทั่วโลกได้หันมาสนใจผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพซึ่งมีแนวโน้มการเติบโตในตลาดโลกมากกว่าร้อยละ 30 ในขณะที่กำลังการผลิตในปัจจุบันมีเพียง 360,000 ตัน คิดเป็นส่วนแบ่งการตลาดเพียงร้อยละ 1 ของปริมาณพลาสติกที่ใช้ทั่วไป เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่อุดมสมบูรณ์ด้วยวัตถุดิบมวลชีวภาพหรือผลผลิตจากการเกษตร ได้แก่ ข้าวเจ้า อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวสาลี ปาล์ม น้ำมัน เป็นต้น โดยผลผลิตจากการเกษตรที่มีส่วนประกอบของแป้ง (คาร์โบไฮเดรต) น้ำตาล (กลูโคส) หรือ เส้นใย (เซลลูโลส) เหล่านี้สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แป้งจึงเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจในการนำมาเป็นวัสดุใช้ทดแทนพลาสติกในบางส่วนของการใช้งานเนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ง่าย มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส สามารถพองตัวขึ้นแผ่นฟิล์มได้ รวมทั้งมีลักษณะที่เปลี่ยนรูปได้ นำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ ราคาถูก และมีความบริสุทธิ์สูง ดังนั้นจึงเป็นโอกาสของประเทศไทยซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่มีความพร้อมและมีศักยภาพสูงในการที่จะผลักดันให้เกิดอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพขึ้นอย่างครบวงจร

### 2.2.1 การย่อยสลายของพลาสติก [8]

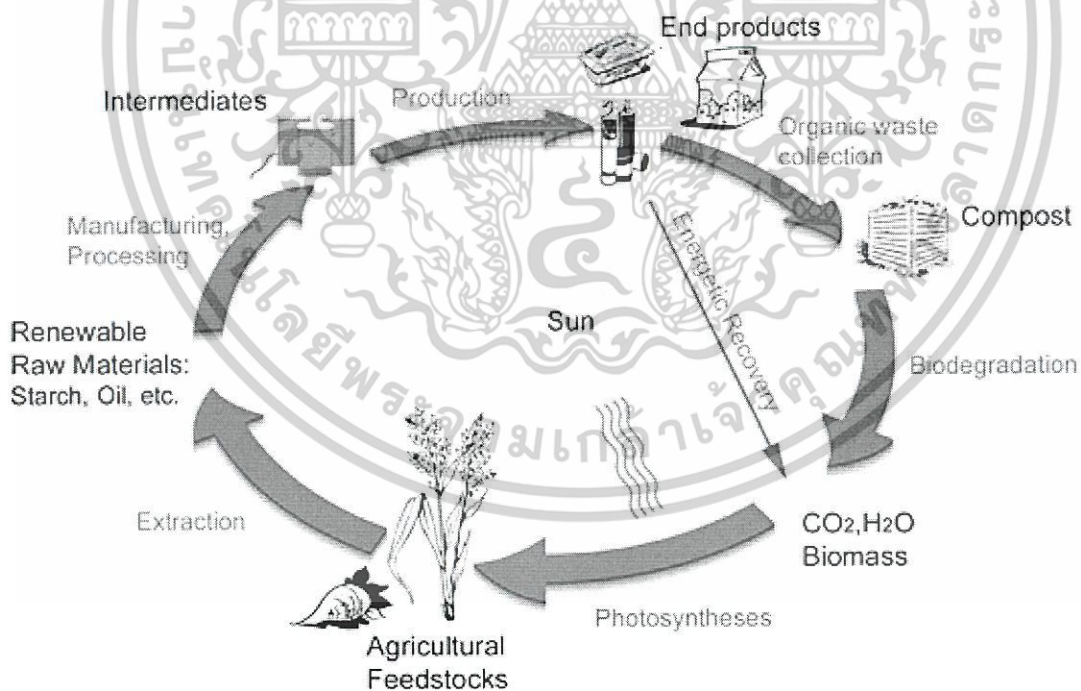
พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) หมายถึง พลาสติกที่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเนื่องจากมีสมบัติที่เปลี่ยนไป พลาสติกที่ย่อยสลายได้แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic)
2. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic)
3. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastic)
4. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ [9]

พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) หมายถึง พลาสติกที่ย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็กๆได้ โดยเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิตทั้งในสภาพที่มีอากาศหรือไม่มีอากาศ สารประกอบคาร์บอนที่ได้จะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม การพัฒนาการของระบบในธรรมชาตินั้นเริ่มจากมวลชีวภาพหลายพันล้านตันถูกผลิตขึ้นโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชตามธรรมชาติ ซึ่งมวลชีวภาพจำนวนที่เท่ากันนี้ถูกย่อยสลายกลับสู่ธรรมชาติกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งมวลชีวภาพและแร่ธาตุ การเกิดขึ้นในวัฏจักรนี้ผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ ซึ่งวัฏจักรของธรรมชาตินี้มีเกิดขึ้นและย่อยสลายไปอย่างครบวงจร โดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดขยะเข้ามาเกี่ยวข้อง ไม่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและไม่มีค่าใช้จ่ายสูง วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีจุดประสงค์ที่จะเลียนแบบวงจรของธรรมชาติที่กล่าวข้างต้นดังแสดงในรูปที่ 2.1 หลังจากผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำไปใช้งานโดยผู้บริโภคและถูกนำไปกำจัดโดยการย่อยเป็นปุ๋ยเพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและมวลชีวภาพ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกปล่อยออกมานั้นจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ ซึ่งวัฏจักรนี้ทำให้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นการใช้ทรัพยากรแบบอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมภายใต้ทรัพยากรที่ปลูกทดแทนได้



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง [8]

การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้มีการพัฒนาเป็นเวลานานแล้ว เริ่มตั้งแต่การที่เริ่มใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติราคาถูก คือ แป้งผสมในการฉีดพลาสติก และได้รับการพัฒนาจากนักวิทยาศาสตร์อย่างต่อเนื่อง ขณะนี้สามารถแบ่งเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

#### 2.2.3.1 การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก

กลุ่มนี้จะใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่า 90% ผลิตภัณฑ์ที่รู้จักจะอยู่รูปที่เรียกว่า Gelatinized starch puff หรือ Plate expanded by extrusion หรือ Baking with water หมายความว่า การให้แป้งเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำภายในตัวแป้งเมื่อถูกความร้อนสูงกลายเป็นไอ ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะเป็นการทดแทนโฟมที่ทำจากพอลิสไตรีน เรียกกันว่า โฟมแป้ง ใช้ในการรองรับภาชนะกันกระแทกในกล่อง โฟมแป้งแบ่งออกได้เป็น

##### (1) โฟมพลาสติกจากแป้ง

การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบอัดด้วยความดันสูงในเครื่องอัดรีด (Extruder) แป้งจะพองออกจากหัวฉีดเนื่องจากสูญเสียความชื้นและลดแรงดัน เมื่อเย็นตัวลงจะมีโครงสร้างแข็ง มีรูพรุนคล้ายโฟมสำหรับอุ้มอากาศ สมบัติของโฟมแป้งนี้ (ความหนาแน่น ความเหนียว) เกิดจากสมบัติของแป้ง ปริมาณน้ำ ชนิดและปริมาณของสารเติมแต่ง (Additive)

##### (2) โฟมจากแป้ง

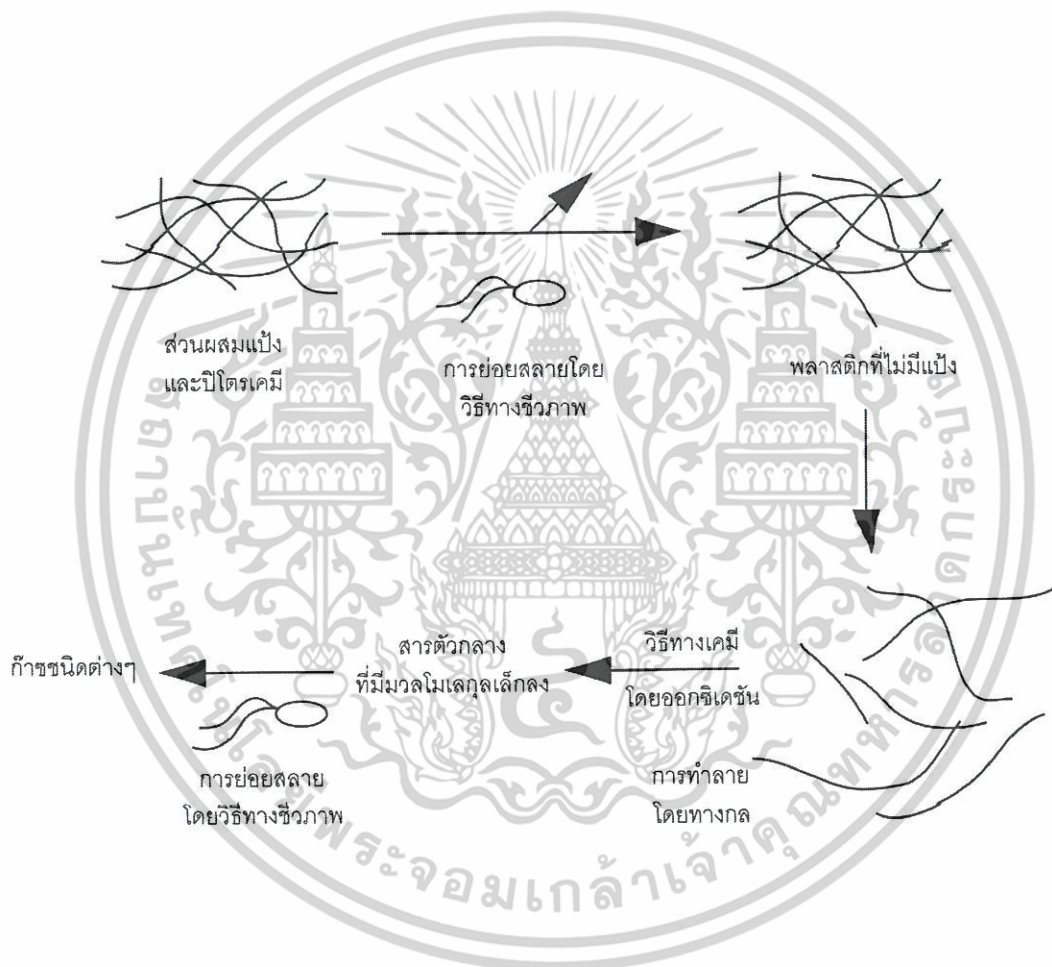
เป็นการใช้ลักษณะการขยาย (Expansion) ของส่วนผสมจากแป้งและเส้นใย เช่น เยื่อ (Pulp) เพื่อสร้างความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เมื่อขึ้นรูปในแม่พิมพ์ เช่น ภาชนะใส่ของ ถ้วย ถาด เป็นต้น

#### 2.2.3.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

พลาสติกที่ผลิตได้จากกลุ่มนี้จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนที่ต่างกัน คือ ส่วนที่เป็นแป้งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้แสดงดังรูปที่ 2.2 แป้งที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถใช้ได้ 2 รูป คือ ในรูปเม็ดแป้งและแป้งที่ผ่านการเจลาทิไนซ์ อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ได้จากวิธีนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ 100% โดยจุลินทรีย์จะย่อยแป้งที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติก เกิดรูพรุน ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมีจะถูกทำลายต่อไปด้วยแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมี

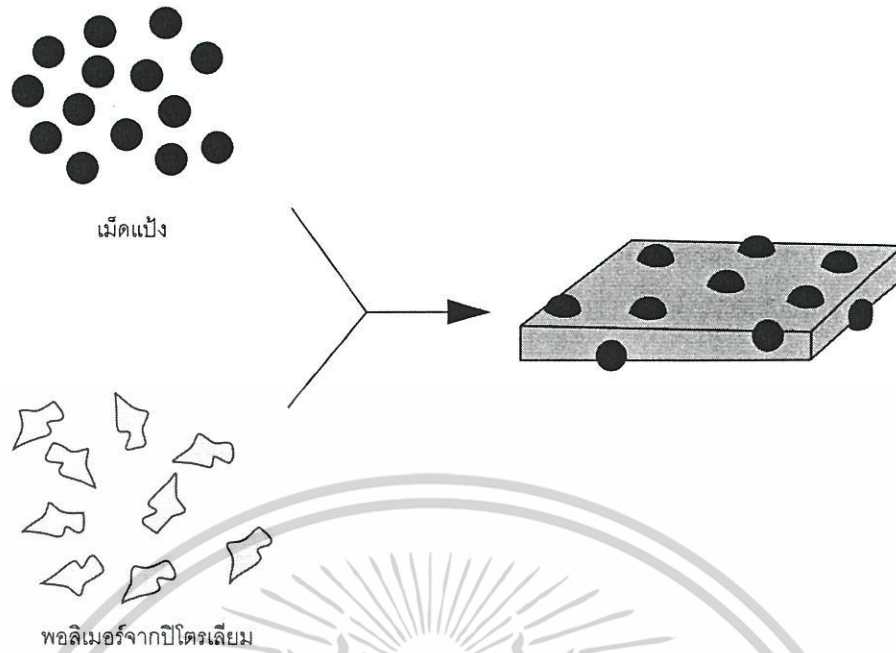
### (1) ในรูปเม็ดแป้ง

แป้งจะผสมกับพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี นำไปขึ้นรูปโดยไม่ต้องทำให้เม็ดแป้งแตกออก ปริมาณแป้งที่ใช้ในวิธีนี้ถูกจำกัดไม่ให้เกิน 10% และต้องมีความชื้นน้อยกว่า 1% เพื่อป้องกันการเกิดไอน้ำระหว่างกระบวนการอัดรีด อาจมีการใส่สารเติมแต่งอื่นๆ ได้ เช่น ใส่น้ำมันข้าวโพด ซึ่งเป็น auto-oxidant เข้าไปในกระบวนการผลิต เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับเกลือโลหะในดินหรือสิ่งแวดล้อม เกิดอนุมูลอิสระชนิดเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะไปย่อยพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมีให้ได้โพลิโกลเมอร์ที่เล็กลง เพื่อให้ง่ายต่อการย่อยสลายต่อไป การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้งแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ [8]

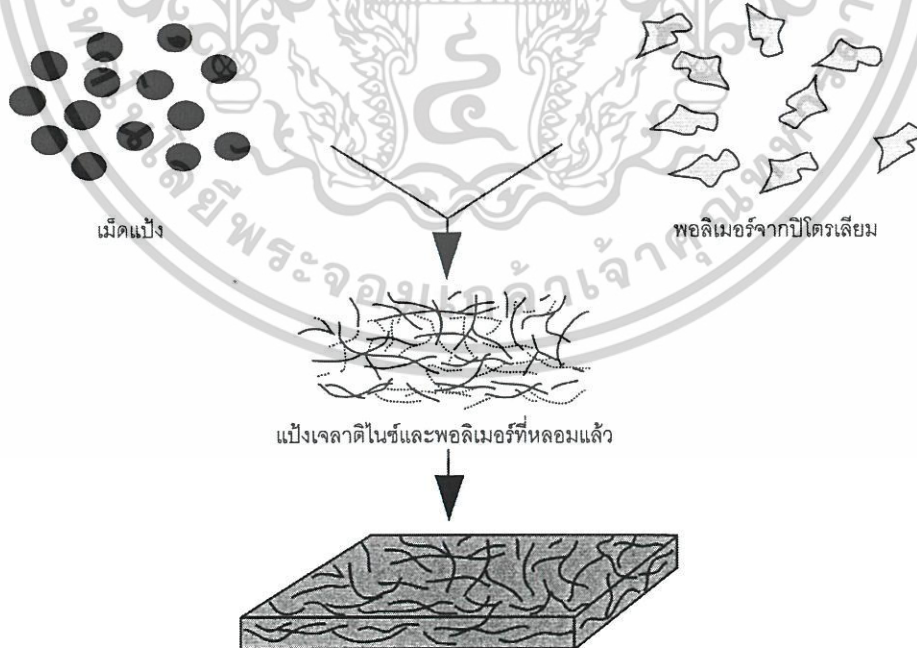
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.3** การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปแบบเม็ดแป้ง [8]

**(2) ในรูปแบบเจลลาตินไนซ์**

วิธีนี้เม็ดแป้งจะแตกตัวทั้งหมดผสมรวมกับอนุพันธ์ของปิโตรเคมีที่หลอมละลาย กระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.4



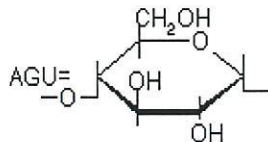
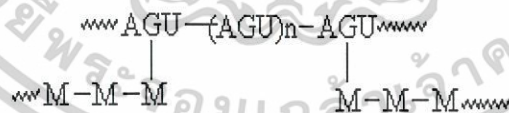
**รูปที่ 2.4** การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปแบบเจลลาตินไนซ์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในประเทศไทยได้ทดลองผลิตพลาสติกย่อยสลายได้จากส่วนผสมของแป้งมันสำปะหลัง และพอลิคาโพรแลคแทม โดยแป้งมันที่ใช้อยู่ในรูปเม็ดแป้งเจลาทีนซ์ ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและความสามารถในการย่อยสลาย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติของส่วนผสมขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแป้งที่ใช้ เมื่อปริมาณแป้งในรูปเม็ดแป้งและแป้งเจลาทีนซ์ในส่วนผสมต่ำกว่า 40% พบว่าความแข็งแรงดึงของส่วนผสมทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน เปอร์เซ็นต์การดึงยึดขึ้นอยู่กับรูปแป้งที่ใช้ถ้าปริมาณแป้งมากกว่า 30% ในการทดลองพบว่าในรูปเม็ดแป้งมีเปอร์เซ็นต์การดึงยึดสูงกว่าแป้งรูปเจลาทีนซ์ถึง 125 เท่าที่ปริมาณแป้ง 50% เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon Analyzer) และกล้องจุลทรรศน์ชนิดอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่าในรูปแป้งเจลาทีนซ์สามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีโครงสร้างลำดับที่น้อยกว่าในรูปเม็ดแป้ง เมื่อทำการทดสอบส่วนผสมที่มีอัตราส่วนต่างๆ กัน พบว่าส่วนผสมที่มีแป้งเจลาทีนซ์ 30% และพอลิคาโพรแลคแทม 70% เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตพลาสติกที่มีสมบัติทางกายภาพดีและมีความสามารถในการย่อยสลายสูง

### 2.2.3.3 แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์

โครงสร้างของแป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์ (Starch graft copolymer) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 โดยที่ AGU เป็นหน่วยกลูโคส และ M เป็นมอนอเมอร์ที่จะมาทำปฏิกิริยากับแป้ง แป้งที่ใช้อาจใช้ในรูปของเม็ดแป้งหรือแป้งเจลาทีนซ์ การทำปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Graft copolymerization) ขั้นแรกจะต้องทำให้เกิดอนุมูลอิสระบนสายโมเลกุลของแป้งก่อน ซึ่งมี 2 วิธี คือ โดยวิธีทางเคมีและวิธีฉายรังสี ซึ่งจะใช้วิธีไหนขึ้นอยู่กับชนิดของมอนอเมอร์ วิธีทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมที่สุด คือ ปฏิกิริยาของแป้งกับเกลือซีริก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสตาร์ชกราฟท์โคพอลิเมอร์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดอนุภาคลิเธอรบน โมเลกุลแบ่ง ไอออนของมอนอเมอร์ปีโตรเคมีตัวแรกจะเข้ามาสร้างพันธะกัน จากนั้นตัวต่อๆ ไปจะเข้ามาต่อกับตัวแรก เป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ จนได้กิ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งในแป้งแต่ละโมเลกุลจะมีกิ่งก้านจำนวนน้อย

## 2.2.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [8]

### 2.2.4.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณหาหน้าหนักแห้ง สมมูลมวลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ  $C_g$  คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ

$C_s$  คือ คาร์บอนที่ละลายได้

$C_m$  คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = \frac{C_d}{C_i} \times 100$$

เมื่อ  $C_i$  คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

### 2.2.4.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวลหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูง จะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ แต่พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

### 2.2.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

#### (ก) การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง ที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้าง นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ และเมื่อนำมาล้างและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆ ในพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

#### (ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ ซึ่งจะพบว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังไว้ในดินมีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและมีขนาดเล็กลง เนื่องจากมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาว ซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลาย เหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่มีกำลังขยายสูงยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนีของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ฝังดินไว้ 6 เดือนมาตรวจปริมาณไนโตรเจน พบว่าปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.06% เป็น 0.16% มาจากกรดอะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตและสร้างโคโลนีบนพอลิเมอร์ และย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้งบนพอลิเมอร์ โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

### 2.2.4.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกิริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

### 2.2.4.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

วิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวผลึก โดย Differential Thermal Analysis (DTA) หรือ Differential Scanning Calorimeter (DSC) การวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียโดยใช้ Thermogravimetric Analysis (TGA)

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะอสัณฐาน (Amorphocity) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยที่ส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนผลึก
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายแป้งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

### 2.2.4.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 x 50 มิลลิเมตรหลายๆ ตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่าง ๆ

## 2.3 แป้ง [8]

“แป้ง” ในการผลิตนั้นหมายถึง คาร์โบไฮเดรต ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาวัว (Flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง จะจัดอยู่ในประเภทฟลาวัว เรียกว่า Corn flour , Wheat flour เช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้าที่ยังมีโปรตีน 7 ถึง 8 % เรียกว่า Rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปนอันหมายถึงโปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่น ๆ ถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็นสตาร์ช (Starch) เช่น Corn starch , Wheat starch เป็นต้น

### 2.3.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

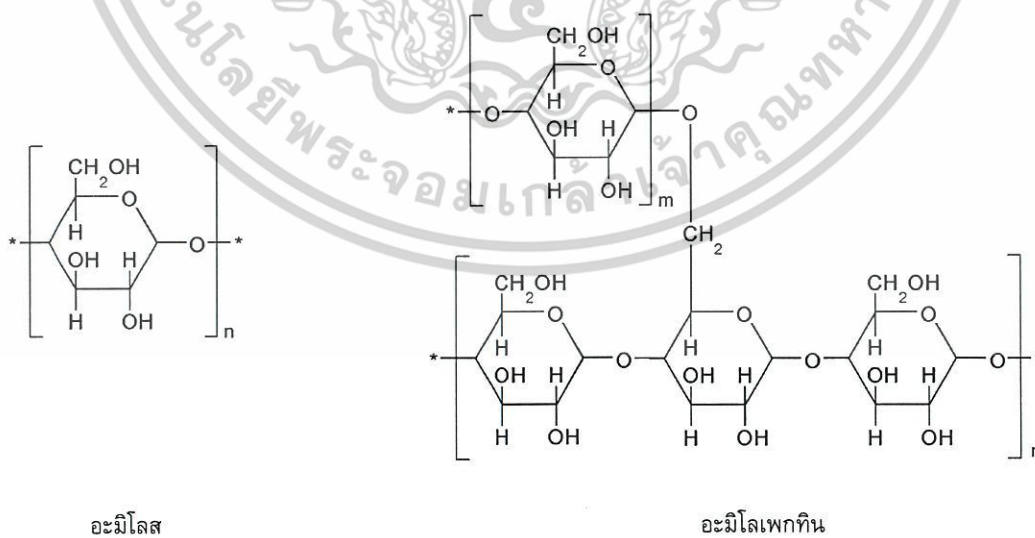
พอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แบ่งจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน (ดังตารางที่ 2.1) ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกัน

**ตารางที่ 2.1** สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [8]

สมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะ โครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha - 1, 4$	$\alpha - 1, 4$ และ $\alpha - 1, 6$
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัว เป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

### องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.6 ได้แก่

1. อะมิโลส (Amylose)
2. อะมิโลเพกทิน (Amylopectin)
3. สารตัวกลาง (Intermediate material)

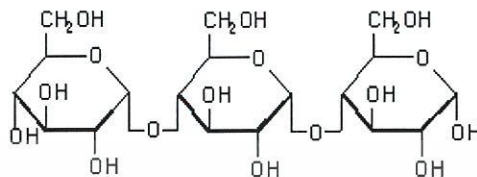


**รูปที่ 2.6** โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. อะมิโลส (amylose)

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 ( $\alpha$ -1,4) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะมิโลส [8]

แป้งจากรั้วพืชมีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัวมีปริมาณอะมิโลสต่ำประมาณ 20% น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^6$  คาลตัน ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับชั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลส มีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลสของแป้งหลายๆ ชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส [8]

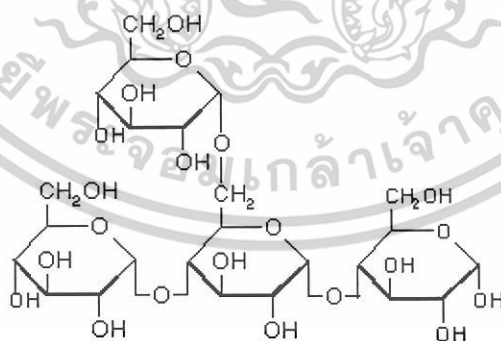
แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะมิโลส (%)	$\beta$ -Amylolysis Limit (%)	ขนาด โมเลกุล (DP)เฉลี่ย	จำนวน สายเฉลี่ย (NC)	ความยาว สายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุล กิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17					
- อินดิกา		73	1,000	4.0	250	49
- จาโปนิก		81	1,100	3.4	320	31
แป้งมันสำปะหลัง	17	75	2,600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4,900	9.5	240	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) การศึกษาการเกิดเจลาตินไนซ์ของแป้งมันฝรั่ง พบอะมิโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง อะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะมิโลเพกทินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะมิโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดโครงสร้างของอะมิโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คล้ายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้องอะมิโลสอยู่ในลักษณะที่เป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คล้ายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะมิโลสจะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้

## 2. อะมิโลเพกทิน

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก  $\alpha$ -1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1, 6 ดังรูปที่ 2.8 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทินจากแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยกลูโคสที่มีกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$  -1, 6 มีอยู่ประมาณ 5 % ของปริมาณกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^9$  คาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสายโซ่ (Chain) 3 ชนิด คือ

- 1) **สาย A (A-chain)** เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure)
- 2) **สาย B (B-chain)** มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสาย A และสาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9 :1
- 3) **สาย C (C-chain)** เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

**ตารางที่ 2.3** สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [8]

แหล่งแป้ง	ปริมาณอะมิโลเพกทิน (%)	ขนาดโมเลกุลเฉลี่ย (DP)	ความยาวสายเฉลี่ย (CL)	จำนวนสายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสายภายนอกเฉลี่ย (CL)	โมเลกุลกิ่ง (%)
แป้งสาลี	72	4,800	19	250	13	5
แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370	15	6
แป้งข้าวเจ้า	83					
- อินเดีย		4,700	21	220	14	6
- จาโปนิก		12,800	19	670	13	5
- ข้าวเหนียว		18,500	18	1,000	12	5
แป้งมันสำปะหลัง	79	9,800	24	410	15	8
แป้งมันฝรั่ง	83					

### 3. สารตัวกลาง

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกทินแต่ใหญ่กว่าอะมิโลส และสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะมิโลเพกทิน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณหรือสัดส่วนของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และสารตัวกลางในเมล็ดแป้งไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูก เช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างการเพาะปลูก เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดทอนข้อความและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้ง

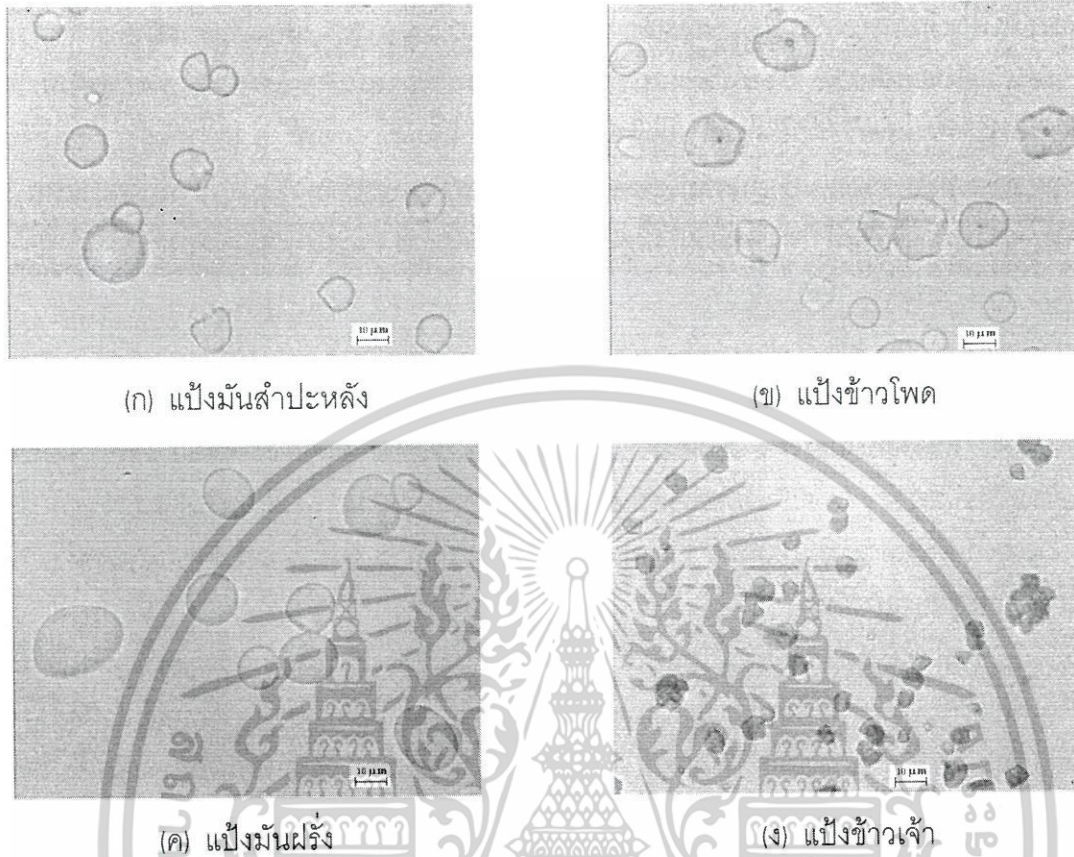
ส่วนประกอบอื่น ๆ ภายในเม็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดแป้ง
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง
4. ส่วนประกอบอื่นที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

#### 2.3.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

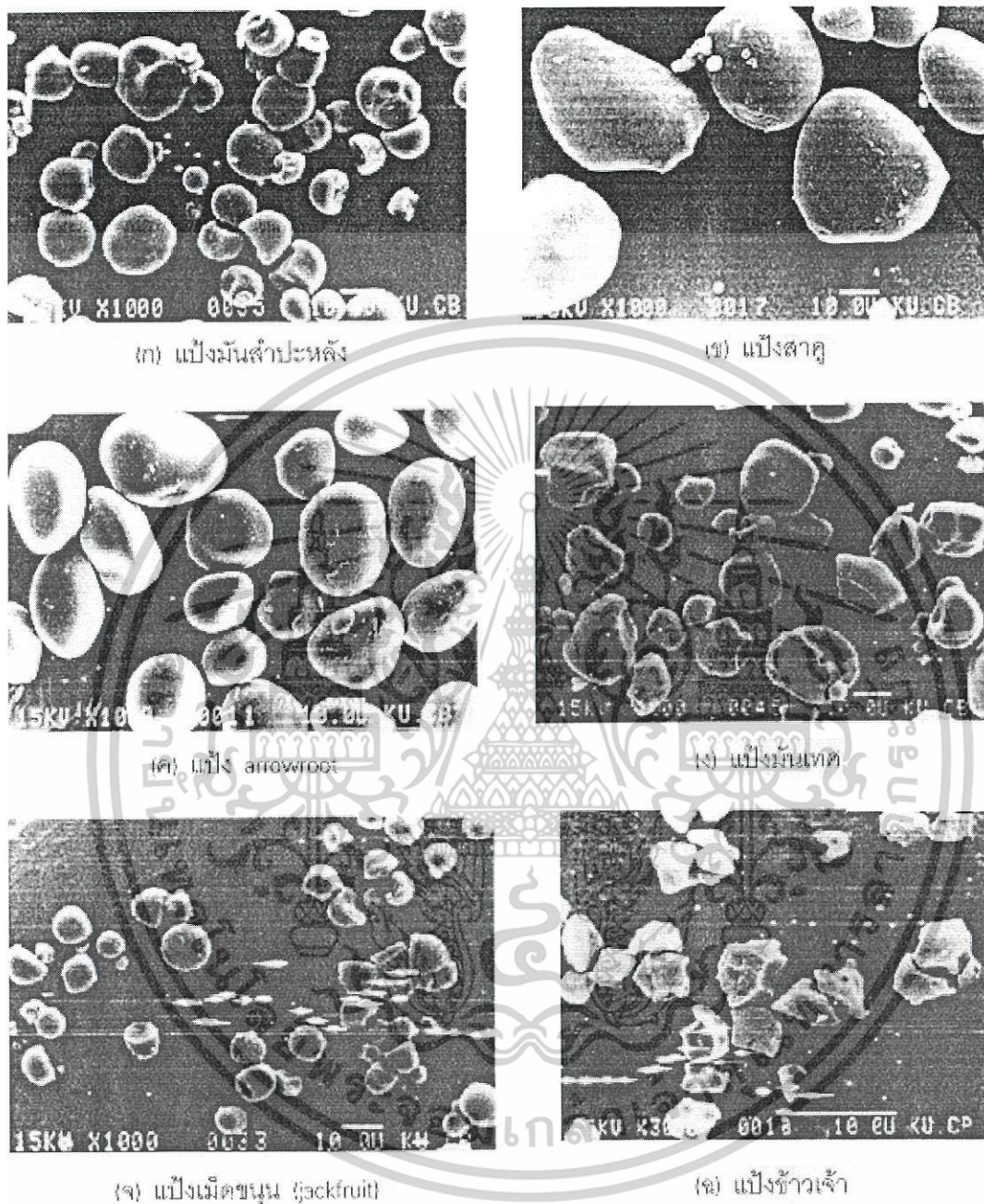
แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจสอบลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (รูปที่ 2.9) และแบบอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) (รูปที่ 2.10) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้น ๆ

เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วย โมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกทิน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่



**รูปที่ 2.9** ขนาดและรูปร่างของเม็ดแว็งชนิดต่างๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (กำลังขยาย 40 เท่า) [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 2.10** ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน ที่กำลังขยาย(ก)-(จ)1,000 เท่า และ (ฉ) 3,000 เท่า [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3.3 สมบัติของแป้ง [8]

### 2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเมล็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเมล็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17 %

น้ำที่อยู่ในเมล็ดแป้งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก (Crystal water) น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bond water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10 % สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้งจะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต  $[n(C_6H_{10}O_5) \cdot H_2O]$

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลิตไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเจลลิตไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัวทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มมากขึ้น สมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเมล็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเมล็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเมล็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

### 2.3.3.2 การเกิดเจลลิตไนเซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลลิตไนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิเริ่มเจลลิตไนซ์มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเลกุลยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสลงระนาบโพลาริซได้ เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ  $65^{\circ}\text{C}$  (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นกับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามาและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เรียกว่าการเกิดเจลาตินในเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสลงระนาบโพลาริซได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนน้ำและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนน้ำจะเกิดสีน้ำเงินเข้ม เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจลาตินในเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า

### 2.3.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาตินในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กลงจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการคูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) ดังรูปที่ 2.11 เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลาตมีลักษณะขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้นมีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนวสสำหรับกรเซงานเพอกรศกษเทอนน ไมอนุญตหนนไปเซประยชนदनกรค้  
ไมว่ากรณใดๆ ทังล้น อักทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแป้งในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในกระบวนการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย กลไกการคืนตัวของแป้งแสดงได้ดังรูปที่ 2.12

ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสเพกทินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) เมื่อขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization) ของอะมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 °C อะมิโลสเพกทินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.11 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [8]



รูปที่ 2.12 กลไกการคืนตัวของแป้ง [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.4 อัตราการกินตัวของแป้งแต่ละชนิด [8]

ชนิดของแป้ง	%การตกตะกอนของส่วนที่ไม่ละลาย		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
แป้งมันฝรั่ง	10	15	20
แป้งข้าวโพด	37	48	62
แป้งสาลี	45	48	52
แป้งมันสำปะหลัง	11	12	13
แป้งข้าวโพดเหนียว	0.2	0.5	1

### 2.3.4 ถั่วเขียว [10]

- ชื่ออื่นๆ : ถั่วมูม (ภาคเหนือ) ถั่วจิม (เชียงใหม่) ถั่วดำ ถั่วเขียว ถั่วทอง (ไทย-ภาคกลาง)
- ชื่อสามัญ : Mung Bean, Mung, Mongo Bean, Green Bean
- ชื่อวิทยาศาสตร์ : *Phaseolus Aureus Roxb.*
- วงศ์ : PAPILIONACEAE
- ลักษณะทั่วไป
- ต้น : เป็นพรรณไม้ล้มลุกเนื้ออ่อนและจะมีอายุสั้นเพียงไม่เกิน 1 ปี ลำต้นจะมีขนเป็นสีน้ำตาลและจะแตกกิ่งก้านสาขา
- ใบ : เป็นใบรวมประกอบด้วยใบย่อยประมาณ 3 ใบ ฐานใบนั้นจะกว้างตรงปลายใบจะแหลม
- ดอก : ดอกนั้นจะเป็นสีเหลือง
- เมล็ด (ผล) : ผลนั้นจะออกเป็นฝักและมีขนเป็นสีน้ำตาลอยู่ทั่วฝัก ฝักจะมีความยาวประมาณ 6-10 ซม. ส่วนเมล็ดถั่วเขียวจะมีสีแตกต่างกัน จะเป็นสีเขียวหรือสีเหลืองก็ได้ สีเหลืองก็คือถั่วทองที่เราเรียกกันนั่นเอง
- ถิ่นที่อยู่ : พรรณไม้นี้มักจะปลูกกันทั่วไปในเขตร้อน โดยเฉพาะประเทศจีน อินเดีย และมาเลเซีย ในประเทศบางท้องถิ่นก็นิยมปลูกกันในนาหลังจากที่เกี่ยวข้าวเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5 แป้งถั่วเขียว [5]

แป้งถั่วเขียว (Mung Bean Starch) สกัดมาจากถั่วเขียว มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เมื่อจับผิวสัมผัสแล้วจะรู้สึกสากมือ ก่อนใช้จึงควรมานวดให้เป็นผงก่อน เมื่อทำให้สุกจะมีลักษณะข้นก่อนข้างใส ถ้าพักให้เย็นจะจับตัวเป็นก้อนแข็งอยู่ตัว แป้งชนิดนี้มักใช้เป็นส่วนผสมในขนมไทย เหมาะสำหรับทำอาหารที่ต้องการความใสอยู่ตัว เช่น ซ่าหริ่ม ขนมลิ่มกลั่น ตัวตะโก้

#### ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งถั่วเขียว [11]

องค์ประกอบ	ร้อยละ
ความชื้น	9.49
คาร์โบไฮเดรต	3.20
โปรตีน	22.26
ไขมัน	0.33
เส้นใย	0.53
เถ้า	3.20
ปริมาณอะมิโลส	37.90
ปริมาณอะมิโลเพกทิน	62.10
อื่นๆ	0.9

### 2.3.6 กรรมวิธีการผลิตแป้งถั่วเขียว [12]

1. นำเมล็ดถั่วเขียวที่ทำความสะอาดแล้วมาแกะเทาะให้แตกเป็น 2 ซีก โดยใช้เครื่องมือ/บดและกรองแยกกาก ปรับแต่งชุดลูกหินแกะเทาะให้ห่างพอเหมาะ ที่จะแกะเทาะถั่วแตกเป็นสองซีกได้ หลังจากได้ถั่วซีกให้นำมาผัดเอาเปลือกป็น จมูกถั่ว และสิ่งเจือปนขนาดเล็กออก เพราะสิ่งเจือปนเหล่านี้ถ้าบดไปพร้อมกันกับ เมล็ดถั่วเขียวแล้วจะแยกออกจากกันได้ยาก บางส่วนจะตกตะกอนรวมกับแป้ง และเห็นได้ชัดเมื่อผลิตออกมาเป็นวุ้นเส้นแล้ว

2. ใช้ถั่วซีกครั้งละ 10 กิโลกรัม (ใช้น้ำประมาณ 30 กิโลกรัม) แช่นานประมาณ 1-3 ชั่วโมง พอให้เมล็ดถั่วซีกนิ่มและแยกเปลือกออกได้ง่าย

3. นำถั่วซีกที่ล้างแล้วไปบดในเครื่องมือ / บดและกรองแยกกาก โดยขณะบดต้องผสมน้ำลงไปกับถั่วซีกด้วยเพราะแป้งถั่วเขียวมีคุณสมบัติในการละลายน้ำและตกตะกอนได้ง่าย ดังนั้นการผสมน้ำให้มากจะมีส่วนช่วยชะล้างแป้งและโปรตีนออกมาได้มากด้วย

4 ถั่วซีกที่ถูกบดจนละเอียดจะไหลผ่านลงมาในส่วนเครื่องกรองแยกกาก และถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นแป้งและน้ำโปรตีนจะไหลผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช ลงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาชนะเดียวกัน ขณะที่ส่วนของกากถั่วเขียวจะถูกอัดและส่งผ่านออกไปจากเครื่องกรองแยกกาก หรืออาจใช้ผ้าขาวบางกรองแยกกาก ถั่วเขียวออกจากน้ำแป้งแทนเครื่องกรองแยกกากได้

5. กากถั่วเขียวที่ได้ครั้งแรกอาจนำมาผสมน้ำแล้วไม่กรองแยกกากอีก 1 ครั้ง เพื่อแยกแป้งที่ ตกค้างในกากถั่วเขียวออกให้หมด

6. การตกตะกอนแป้ง โดยการตั้งน้ำแป้งที่กรองแยกกากออกหมดแล้ว ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วเทน้ำสีเขียวส่วนบนทิ้ง ซึ่งน้ำสีเขียวนี้เป็นน้ำที่มีโปรตีน ละลายอยู่สามารถนำได้ ตกตะกอนโปรตีนใช้เป็นอาหารสัตว์ หรือใช้ผลิตซีอิ๊วได้ การตกตะกอนแป้งจะต้องไม่นานเกินไป เพราะจะทำให้โปรตีนตกตะกอนด้วย หลังจากนั้นล้างแป้งด้วยน้ำสะอาดโดยกวนแป้งในน้ำแล้วทิ้ง ให้แป้งตกตะกอน ประมาณ 3 ครั้ง หรือจนกระทั่งแป้งมีสีขาว น้ำที่ใช้ตกตะกอนใส เทน้ำทิ้งไปจะ ได้แป้งขึ้น

7. นำแป้งขึ้นไปตากแดดให้แห้ง ความชื้นประมาณ 8-10 เปอร์เซ็นต์ จะสามารถเก็บรักษา ไว้ได้นาน

### 2.3.7 แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch) [8]

ในธรรมชาติโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินมีการจัดเรียงตัวกัน โดยมีการสร้าง พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็น โครงสร้างผลึกที่ค่อนข้างแข็งแรงอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีอุณหภูมิการหลอมตัวที่สูงมาก โดยปกติอุณหภูมิการหลอมตัวของเม็ดแป้งสูงกว่า อุณหภูมิการสลายตัว ทำให้แป้งไม่สามารถหลอมตัวได้ นั่นคือ ถ้าได้รับความร้อนสูง (มากกว่า 265 องศาเซลเซียส) แป้งจะเกิดการเผาไหม้ก่อนการหลอมตัว

**เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch)** หมายถึง วัสดุที่สามารถหลอมตัว และ นำไปขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ได้ โดยการใช้ความร้อนและความดัน จากสมบัติของแป้งที่กล่าว ข้างต้นจะเห็นว่าโดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกเลย ซึ่งเราสามารถทำให้แป้งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) คือ พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้ โมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกทินเป็นอิสระมากขึ้น ดังนั้นเราจึงนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นแผ่น หรือขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างๆ ได้ พลาสติกที่ผลิตได้โดยวิธีนี้จึงเรียกว่า **เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch ,TPS)**

## 2.4 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) [13]

พลาสติไซเซอร์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) ซึ่งการไหลแบบพลาสติก หมายถึง การไหลของวัสดุที่ต้องอาศัยความเค้นหรือแรงน้อยที่สุดขนาดหนึ่งมากระทำต่อวัสดุนั้น ซึ่งความเค้นหรือแรงขนาดน้อยที่สุดที่ทำให้วัสดุเกิดการไหลนี้เรียกว่า Yield value

### 2.4.1 พลาสติไซเซชันและพลาสติไซเซอร์ (Plasticization and Plasticizers)

พลาสติไซเซชัน หมายถึง กรรมวิธีหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติไซเซอร์ โคนพลาสติไซเซอร์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการผสมพลาสติไซเซอร์เข้าไปในพอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์เรียกว่า **พลาสติไซเซชันภายนอก (External plasticization)** และเรียกพลาสติไซเซอร์ที่ผสมลงไปว่า **พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer)** ซึ่งพลาสติไซเซอร์ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำลาย

ข้อดีของพลาสติไซเซอร์ภายนอก คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการในการใช้งานได้โดยการปรับชนิดและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไป แต่ก็มีจุดด้อย คือ พลาสติไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้

โดยทั่วไปแล้วพลาสติไซเซอร์ภายนอกเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณหรือใกล้เคียง  $-50^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ **พลาสติไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (True plasticizer or primary plasticizer)** และ **พลาสติไซเซอร์เสริมหรือพลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer)** โดยพลาสติไซเซอร์แท้จริงสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆ ได้ และไม่แยกออกมาจากพอลิเมอร์ ในขณะที่พลาสติไซเซอร์เสริมมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติไซเซอร์แท้จริงและช่วยเสริมประสิทธิภาพของพลาสติไซเซอร์แท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติไซเซอร์เสริมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่น ๆ ของพอลิเมอร์ด้วย

## 2.5 เส้นใย (fibers) [14]

**เส้นใย** หมายถึง หน่วยที่เล็กที่สุดของวัสดุสิ่งทอ โดยปกติจะถูกจำแนกโดยความอ่อนตัว ความละเอียด และอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาต่างๆ

เส้นใยสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. เส้นใยที่มาจากธรรมชาติ (Natural Fibers)
2. เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man-made Fibers)

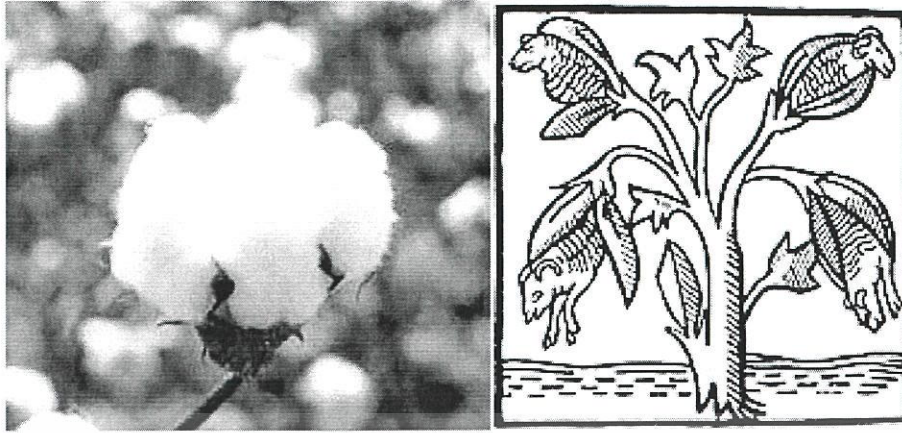
**เส้นใยธรรมชาติ** หมายถึง เส้นใยที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ เช่น เส้นใยขนสัตว์ เส้นใยจากพืชหรือเส้นใยจากแร่ธาตุต่างๆสามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภทใหญ่ ๆ ตามแหล่งกำเนิดเส้นใย คือ เส้นใยที่ได้มาจากพืช เส้นใยที่ได้มาจากสัตว์ และเส้นใยที่ได้มาจากแร่ธาตุ

### 2.5.1 เส้นใยฝ้าย (Cotton fiber) [12]

เส้นใยฝ้าย คือ เส้นใยที่มีลักษณะนุ่มที่เกิดขึ้นรอบ ๆ เมล็ดจากต้นฝ้าย ซึ่งเป็นไม้พื้นเมืองชนิดต้นเดี่ยวที่มีอยู่ทั่วโลก ทั้งในประเทศอเมริกา อินเดีย และแอฟริกาเป็นส่วนใหญ่ แต่เส้นใยฝ้ายในตลาดส่วนใหญ่ทั่วโลกเป็นพันธุ์พื้นเมืองที่มีชื่อว่า กอสลีเปียม ฮิสซูตัม (*Gossypium hirsutum*) และ กอสลีเปียม บาบาคินส์ (*Gossypium barbadense*) จากประเทศอเมริกา เส้นใยฝ้ายมักถูกทอเป็นหลอด และใช้เป็นด้ายที่นุ่มและมีการระบายอากาศที่ดี ที่นิยมใช้แปรรูปเป็นเครื่องนุ่งห่มอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

เส้นใยฝ้ายสามารถผลิตได้จากการแยกเมล็ด ชีพี้่งและ โปรตีนออก เป็นรูปของเซลลูโลสบริสุทธิ์ (Cellulose) หรือเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) ผลิตภัณฑ์จากเส้นใยฝ้ายมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง มีความแข็งแรงสูง คงทน และดูดซับได้ดี เพราะมีการเสียน้ำหนักน้อยกว่า 10% ระหว่างกระบวนการแปรรูปจากวัตถุดิบฝ้าย (Raw cotton balls) เป็นเส้นใยฝ้าย โดยเส้นใยหนึ่งเส้นเกิดจากเซลลูโลส 20 ถึง 30 ชั้นเรียงตัวเป็นขดซึ่งยังช่วยให้เส้นใยมีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้นอีกด้วย เมื่อเมล็ดฝ้าย (Cotton boll) แตกออก เส้นใยหนึ่งจะถูกทำให้อยู่รูปแผ่นแบน เกลียว หรือมีลักษณะคล้ายริบบิ้น (Ribbon-like shapes) และจะขดเข้าด้วยกัน จากนั้นจะผูกติดกันไว้เพื่อความสะดวกในกระบวนการปั่น (Spinning) เป็นเส้นด้าย (Yarn) ต่อไป

เส้นใยฝ้ายนั้นมีความละเอียดมาก มีความยาวเส้นใยตั้งแต่ 10-56 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับคุณภาพของเส้นใย เส้นใยฝ้ายจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11-22 ไมครอน เป็นเส้นใยที่ละเอียดมาก ๆ มีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดเส้นใย ซึ่งเส้นใยฝ้ายจะมีสีออกขาวจนถึงสีเทาอ่อน



รูปที่ 2.13 ต้นฝ้าย และเมล็ดฝ้าย [14]

### 2.5.1.1 ลักษณะการจัดเรียงตัวภายในเส้นใย

1. บริเวณที่เป็นส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous Regions) เป็นบริเวณที่สามารถรับน้ำและความชื้น ดังนั้น จะเป็นบริเวณที่ยอมให้สีย้อมเข้าไปได้แต่จะเป็นส่วนที่ไม่แข็งแรง
2. บริเวณที่เป็นส่วนที่เป็นระเบียบ (Crystalline Regions) เป็นบริเวณที่ไม่สามารถรับน้ำและความชื้น เป็นส่วนที่แข็งแรงของเส้นใยเนื่องจากโซ่โมเลกุลเรียงตัวเป็นระเบียบ
3. การจัดเรียงตัวของส่วนที่เป็นระเบียบตามแนวแกนเส้นใย (Orientation) เป็นบริเวณที่มีส่วนที่เป็นระเบียบเรียงตัวตามแนวแกนของเส้นใย ทำให้เพิ่มความแข็งแรงในด้านการทนแรงดึงตามแนวแกนเส้นใยได้

### 2.5.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดพอลิแซ็กคาไรด์ (polymer polysaccharide carbohydrate) ที่มีสายโซ่ยาว ประกอบด้วยกลูโคสชนิดเบต้า ( $\beta$ -glucose) โดยมีโครงสร้างเคมี คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$

เซลลูโลสมอนอเมอร์ประกอบด้วยกลูโคสชนิดเบต้าที่เชื่อมเข้าด้วยกันในรูปของ 1,4 glycosidic bonds ซึ่งโครงสร้างของเซลลูโลสเป็นโซ่ตรงที่ไม่มีการขดตัวเกิดขึ้น และมีการเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่หมู่ไฮดรอกไซด์ในรูปของเส้นใยขนาดเล็ก (Micro fibrils) ซึ่งทำให้สายโซ่มีความหนาแน่นมากขึ้นอันนำไปสู่ความแข็งแรงที่มากขึ้นนั่นเอง โดยความแข็งแรงนี้จะทำให้ผนังเซลล์ที่เป็นส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตนั้นมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.3 สมบัติทางกายภาพ

#### ความเหนียว (Tenacity)

ความแข็งแรงของผ้าฝ้าย เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวที่ดีของพอลิเมอร์ที่ยาว (มีค่าความเป็นผลึกประมาณ 70%) มีการสร้างตัวของพันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิเมอร์ที่ติดกัน เส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยที่แข็งแรงกว่าเดิมเมื่อเปียกน้ำ เนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่อย่างชั่วคราว ในส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ การจัดเรียงตัวที่ดีขึ้น เมื่อเปียกน้ำยังผลให้เพิ่มปริมาณของพันธะไฮโดรเจนขึ้น ทำให้ค่าเหนียว (Tenacity) เพิ่มขึ้นประมาณ 5 % ธรรมชาติของการยืดหยุ่นตัวและความเป็นพลาสติก เส้นใยฝ้ายจะไม่มีควมยืดหยุ่นตัว เพราะว่าเป็นเส้นใยที่มีส่วนที่เป็นผลึกสูง เนื่องจากการที่มีส่วนที่เป็นระเบียบมาก ทำให้ไม่สามารถจะพับหรือทบ เพราะจะทำให้พอลิเมอร์ขาดออกจากกันทำให้ผ้าฉีกขาดง่ายซึ่งเป็นจุดอ่อนของพอลิเมอร์นี้

#### ธรรมชาติของการดูดซึมความชื้น

ฝ้ายเป็นเส้นใยที่ดูดซึมความชื้นได้ดี เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) มากมายในพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามการที่น้ำจะสามารถแทรกซึมจะเป็นบริเวณที่ไม่เป็นระเบียบเท่านั้น เพราะว่าง่ายภายในของบริเวณที่เป็นผลึกมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของน้ำ การพองตัวในน้ำก็เช่นเดียวกันจะเกิดในบริเวณที่ไม่เป็นระเบียบ

สำหรับสมบัติอื่น ๆ ของเส้นใยฝ้ายแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

## ตารางที่ 2.6 สมบัติของเส้นใยฝ้าย [14]

Property	Evaluation
Shape	Fairly uniform in width, 12-20 microns; length varies from ½ to 2½ inches; typical length is 7/8 to 1¼ inches.
Luster	Low
Tenacity (strength)	
• Dry	3.0-5.0 g/d
• Wet	3.3-6.0 g/d
Resiliency	Low
Density	1.54-1.56 g/cm <sup>3</sup>
Moisture absorption	
• raw:conditioned saturation	8.5%
• mercerized:conditioned saturation	15-25%
• raw:conditioned saturation	8.5-10.3%
Dimensional stability	Good
Resistance to	
• acids	damage, weaken fibers
• alkalis	resistant; no harmful effects
• organic solvents	high resistance to most
• sunlight	Prolonged exposure weakens fibers
• microorganisms	Mildew and rot-producing bacteria damage fibers
• insects	Silverfish damage fibers
Thermal reactions	
• to heat	Decomposes after prolonged exposure to temperatures of 150 °
• to flame	C or overburns readily

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### **อุณหภูมิวิกฤติ (Critical temperatures)**

- อุณหภูมิใช้งานทั่วไป ต้องไม่ต่ำกว่า 77°F (25°C)
- อุณหภูมิที่เหมาะสม 68°F (20°C)
- อุณหภูมิวابلไฟ 248°F (120°C)
- อุณหภูมิลูกใหม่ 401°F (205°C)
- อุณหภูมิเผาใหม่ 410°F (210°C)
- อุณหภูมิจุดติด 765°F (407°C)

โดยเซลล์โลสที่แห้งจะแข็งกระด้างและเปราะ ไม่ยืดหยุ่นที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) และจะติดไฟได้ง่าย

ในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 35°C เป็นช่วงที่เหมาะสมแก่การขึ้นรูปเพื่อนำไปใช้งาน และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C จะช่วยหยุดการเน่าเสียของเส้นใยฝ้ายได้ จึงเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาเซลล์โลสที่ใช้กันทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**M. Gaspar และคณะ [1]** ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวโพดที่มีการเติมพอลิเมอร์ธรรมชาติ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลเตรียมจากแป้งข้าวโพด 70 กรัม และกลีเซอรอล 30 กรัม ในขณะทำการผสมนั้นมีการเติม 10 -10 กรัมของเซลลูโลส Hemicellulose และ Zein จากนั้นทำการตรวจวัดความแข็งแรงเชิงกล การดูดซึมน้ำ และการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมและไม่ได้เติม 10% w/w ของ Polycaprolactone ถูกใช้ในการควบคุมการทดลอง โดยตัวอย่างทั้งหมดถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์คอมโพสิตที่มีการเติม Hemicellulose และ Zein นั้นให้ค่าความแข็งแรงเชิงกลที่ดีที่สุด (10.4 และ 11.5 MPa) การตรวจวัดการดูดน้ำของตัวอย่างถูกควบคุมโดยใช้ความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน โดยการดูดน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติม Polycaprolactone Hemicellulose และ Zein มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการเติมและไม่เติมเซลลูโลสให้ค่าการดูดความชื้นมากกว่า Polycaprolactone เมื่อมีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์

**X.F.Ma และคณะ [2]** ได้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้งข้าวสาลี (Thermoplastic wheat flour, TPF) โดยใช้พลาสติกไซเซออร์ผสมระหว่างยูเรีย (Urea) และฟอร์มามาไมด์ (Formamide) ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) ความต่อเนื่องของวิภาคของเม็ดแป้งข้าวสาลีถูกตรวจสอบด้วย SEM การวิเคราะห์สมบัติการไหลถูกแสดงให้เห็นในระหว่างกระบวนการผลิตเทอร์โมพลาสติกด้วยเครื่องอัดรีด และอุณหภูมิของกระบวนการมีผลต่อการปรับตัวของพฤติกรรมไหลของ TPF สำหรับ TPF ที่มีปริมาณพลาสติกไซเซออร์ผสม 30% ให้สมบัติเชิงกลค่อนข้างดี ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) การดึงยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) พลังงาน ณ จุดขาด (Emergy break) และมอดุลัสของยัง (Young's modulus) มีค่า 2.07 MPa 44% 0.35 N และ 20.1 MPa ตามลำดับ สำหรับการทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption) นั้น TPF ที่มีปริมาณพลาสติกไซเซออร์ผสมต่างๆ ให้ความต้านทานการดูดซึมน้ำที่ดีกว่า

**ปิยะรัตน์ เรียวรักษา [3]** พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผสมกับแป้งมันสำปะหลังด้วยส่วนผสมต่างๆ กัน สมบัติของของผสมเหล่านี้ ได้แก่ ความต้านทาน แรงดึงและการยืดตัวเมื่อขาดได้ถูกตรวจสอบเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของของผสมพลาสติกไซเซออร์หลายตัว ได้แก่ กลีเซอรอล โมโนสเตียเรต ซิงค์สเตียเรต และอีโพลีน ได้ถูกเติมลงไปปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของของผสม สมบัติเชิงกลของของผสมแต่ละส่วนผสมได้ถูกเปรียบเทียบกับส่วนผสมเดียวกันที่ไม่มีพลาสติกไซเซออร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีกลีเซอรอล โมโนสเตียเรตหรือซิงค์สเตียเรตในของผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง ทำให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงกว่าเมื่อมีอีโพลีนและสูงกว่าของผสมที่ไม่ได้เติมพลาสติกไซเซออร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมอีโพลีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าการยืดตัวเมื่อขาดลดลง ในการเปรียบเทียบกับของผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้งข้าวโพดที่ผสมกลีเซอรอล โมโนสเตียเรตและซิงค์สเตียเรตในลักษณะเดียวกัน พบว่าของผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้งมันสำปะหลัง ทุกส่วนผสมมีความต้านทานแรงดึงและค่าการยืดตัวเมื่อขาดสูงกว่าของผสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับแป้งข้าวโพดเมื่อมีกลีเซอรอล โมโนสเตียเรตหรือซิงค์สเตียเรตอยู่ด้วยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอน ไมโครสโคปปี ได้แสดงให้เห็นว่ามีคแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่บนพอลิเมอร์เมทริกซ์

**บุษยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์ และคณะ [4]** งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) จากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอน เริ่มจากการหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าในสูตรที่มีการผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที มีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด จึงถูกเลือกให้เป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า สำหรับขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนการดัดแปรเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพื่อปรับปรุงสมบัติโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและ/หรือการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยทำการผสมเป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:0 0:1 1:1 1:2 และ 2:1 ด้วยวิธีการขึ้นรูปและภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนแรก จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1 จากผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:0 มีค่าสูงสุด แต่ที่อัตราส่วน 0:1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำที่สุด ส่วนลักษณะทางวิทยาของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในแต่ละสูตรเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับเมทริกซ์ได้ดีกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และยังพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในสูตรที่ไม่มีการปรับปรุง มีแนวโน้มในการย่อยสลายเร็วที่สุด แต่สูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 0:1 ใช้เวลาในการย่อยสลายนานที่สุด

**N. Wang และคณะ [15]** ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกรดซิตริก (Citric acid) ที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากกลีเซอรอล (Glycerol) แป้ง (Starch) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Linear low-density polyethylene) การมีกรดซิตริกช่วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับปรุงการแพร่กระจายและการพลาสติกไซเซชันของแป้งซึ่งแสดงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ในขณะเดียวกันเป็นการเพิ่มสมบัติเชิงกลด้วย สำหรับการศึกษสมบัติการไหลได้ (Rheological) นั้นพบว่ากรดซิตริกมีผลทำให้ค่าความหนืด (Viscosity) ลดลง และยังช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลได้ของเทอร์โมพลาสติกที่ผสมด้วยพอลิเอทิลีนอีกด้วย เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) พบว่ากรดซิตริกสามารถทำให้โมเลกุลของแป้งที่มีปฏิกริยาต่อกันนั้นอ่อนลง และยังช่วยปรับปรุงการพลาสติกไซเซชันของแป้งอีกด้วย สำหรับเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตเมตรี (X-ray diffractometry) แสดงถึงความสมบูรณ์ของแป้งที่ถูกพลาสติกไซต์ใน CA/TP/SPE ที่มีการผสมกัน นอกจากนี้กรดซิตริกยังสามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำได้อีกด้วย

**X. Ma และ J.Yu [16]** ได้ทำการศึกษาชนิดของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่ต่างกันที่มีผลต่อเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) โดยทำการอ้างอิงกับกลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้จะประกอบด้วยฟอร์มามาไมด์ (Formamide) อะเซตาไมด์ (Acetamide) และยูเรีย (Urea) ผลของปริมาณน้ำที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical property) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสามารถแสดงได้ดังนี้ คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีฟอร์มามาไมด์เป็นพลาสติกไซเซอร์มีโครงสร้างที่ยืดหยุ่นทำให้มีปริมาณน้ำในขอบเขตที่กว้างและค่า Strain ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีพลาสติกไซเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น 65% ที่มีปริมาณน้ำสูง (42%) เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) แสดงว่ายูเรียที่มีปริมาณน้อยๆ มีผลต่อแป้งในกระบวนการของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแต่พลาสติกไซเซอร์ตัวอื่นๆ นั้นไม่มีผล สำหรับลำดับการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) สามารถแสดงได้ดังนี้ คือ ยูเรีย > ฟอร์มามาไมด์ > อะเซตาไมด์ > โพลีออล พันธะไฮโดรเจนเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่าง 1:1 ของพลาสติกไซเซอร์กับแป้ง ซึ่งปริมาณของแป้งมี 14.167, 13.795, 13.698 และ 12.939 kcal/mol ทำการตรวจสอบเทอร์โมพลาสติกที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ต่างๆ โดยใช้เทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตเมตรี (X-ray diffractometry) ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นพบว่า ยูเรียและฟอร์มามาไมด์เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีประสิทธิภาพในการต้านทานความเสื่อมสภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และอะเซตาไมด์ไม่สามารถเพิ่มความเป็นผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ โดยสมบัติส่วนใหญ่เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชดูจากความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างพลาสติกไซเซอร์กับโมเลกุลของแป้ง

**D. Schlemmer และคณะ [17]** ได้ทำการศึกษาการผสมกันระหว่างพอลิสไตรีน (Polystyrene) กับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) ที่ถูกเตรียมจากการใช้พลาสติกไซเซอร์ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน คือ กลีเซอรอล (Glycerol) และน้ำมันบูริติ (Buriti oil) การออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสื่อมสภาพ (Degradation) ของพอลิไตรีนกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมกัน พิจารณาได้จากการฝังดิน (Soil burial test) โดยการบรรจุชิ้นงานไว้ในกล่องที่เจาะรูเป็นเวลา 6 เดือน และนำมาทดสอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis) หลังจากเกิดการเสื่อมสภาพแล้วนั้นสามารถอธิบายได้ว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการผสมด้วยกลีเซอรอลมีการเสื่อมสภาพทางความร้อน (Thermal degradation) น้อยกว่า และการมีปริมาณของเทอร์โมพลาสติก 50% หรือมากกว่านั้นช่วยปรับปรุงการเสื่อมสภาพให้ดีขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป 6 เดือน PS/TPS ที่มีการผสมด้วยน้ำมันบูริติเมื่อทำการทดสอบเพื่อหาการเสื่อมสภาพทางความร้อนพบว่ามีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักที่หายไป นอกจากนี้การดูดซับน้ำสามารถอธิบายด้วยการหายไปของแข็งหลังจากการฝังดิน ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าแข็งถูกบริโภคโดยสิ่งมีชีวิตเล็กๆ

**A.A.S. Curvelo และคณะ [18]** ในการวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยเซลลูโลสจากเยื่อเยื่อคัลิปต์เป็นส่วนเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล สามารถเตรียมได้จากแป้งข้าวโพดกับกลีเซอรอลซึ่งเป็นพลาสติกไซเซอรและเสริมแรงด้วยเส้นใยฟอกขาวขนาดสั้น (16% w/w) เส้นใยที่ใส่ในเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางความร้อน คือ DSC และ TGA และการทดลองการดูดซับน้ำ คอมโพสิตที่ได้แสดงถึงค่าการเพิ่มขึ้น 100% ของ Tensile strength และมากกว่า 50% ของ Modulus เมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่เสริมแรง ความแตกต่างของค่า  $T_g$  ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและคอมโพสิตนั้นดูจากอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยกับพลาสติกไซเซอรซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมด้วยกลีเซอรอล 30% มีค่า  $T_g$  น้อยกว่าคอมโพสิตที่ผสมเส้นใย 16% สำหรับ TGA ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เกิดการหายไปของน้ำหนักของ TPS และคอมโพสิตเท่ากับ 30 และ 23% ตามลำดับ การดูดซับน้ำของ TPS ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสมีค่าลดลงเนื่องจากเส้นใยเซลลูโลสดูดซับน้ำได้น้อยกว่าสตาโรล ส่วนการเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอรนั้นส่งผลให้ TPS มีความว่องไวต่อน้ำมากขึ้น การแตกหักของพื้นผิวด้วยวิธีการส่อง SEM แสดงให้เห็นถึงการติดแน่นที่คิระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ จากเหตุผลที่ได้มานี้ทำให้เห็นถึงข้อดีของการใช้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลเสริมแรงด้วยเส้นใยเพราะเส้นใยที่ใช้นี้มาจากธรรมชาติราคาถูกและมีจำนวนมาก

**M. Wollerdorfer และ H. Bader [19]** ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable polymer) ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย เช่น ปอ (Flax) ปอกระเจา (Jute) ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) และเส้นใยที่สร้างขึ้นใหม่จากเซลลูโลส ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สำหรับการเตรียมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นประกอบด้วยพอลิเอสเตอร์ (Polyester) พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) เทอร์โมพลาสติก ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สตาร์ช (Thermoplastic starch) และปริมาณเส้นใย 20-35% โดยใช้กระบวนการอัดรีด แล้วจึงทำการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดของกระบวนการเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเส้นใยที่ 25% และ 35% พบว่าเส้นใยปอ ปอกระเจา และ เซลลูโลส ไม่สามารถปรับปรุงความแข็งแรงดึงของคอมโพสิตได้ โดยมีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย เนื่องจากปริมาณเส้นใยที่สูงขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวที่ไม่เข้ากัน สำหรับเส้นใยปาล์มน้ำมันทำให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลง เพราะเส้นใยมีความไม่บริสุทธิ์สูง อย่างไรก็ตามพอลิแซคคาไรด์และเส้นใยพืชมีความเหมือนกันด้านเคมี ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลสเป็นส่วน มากส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของพอลิเมอร์เสริมแรงมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งสาลี (Thermoplastic wheat starch) ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยนั้นมีความแข็งแรงดึงสูงกว่าที่ปราศจากเส้นใย การเสริมแรงด้วยเซลลูโลสไดอะซิเตท (Cellulose diacetate) นั้นส่งผลให้ค่าความเค้น (Stress) เพิ่มขึ้น 52% ( $55 \text{ N/mm}^2$ )

**S.S. Paes และคณะ [20]** ได้ศึกษาอิทธิพลของสภาวะการเตรียมเพสต์ (Paste) ที่มีผลต่อสมบัติของเพสต์แป้งสำปะหลัง (Cassava starch paste) และฟิล์ม การเตรียมฟิล์มนั้นอาศัยเทคนิคการหล่อด้วยการทำเป็นเจลของเพสต์สตาร์ชภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน 8 สภาวะคือ 70 80 90 และ 100 องศาเซลเซียสและที่แรงเฉือน 150 และ 18,000 rpm สมบัติของเพสต์ถูกตรวจโดย Rapid Visco Analyzer (RVA) ซึ่งแสดงพิกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยที่แรงเฉือนสูงๆ มีผลต่อสมบัติเชิงกลทั้งหมดซึ่งถูกกำหนดด้วยการทดสอบความแข็งแรงโดยเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ใช้แรงเฉือนต่ำๆ นอกจากนี้ฟิล์มที่เตรียมโดยใช้อุณหภูมิต่ำๆ และแรงเฉือนสูงๆ มีการกระจายตัวของข้อมูลสมบัติเชิงกล (โมดูลัสยืดหยุ่น การดึงยึด ณ จุดขาด และความเค้นสูงสุด) ที่สูง สำหรับฟิล์มที่เตรียมโดยใช้แรงเฉือนที่ต่ำให้การกระจายสูงของค่าการดึงยึด ณ จุดขาด ที่ปริมาณความชื้นต่ำ (RH<45 %) การเตรียมเพสต์ด้วยวิธีที่แตกต่างกันมีผลทำให้ได้โครงสร้างของฟิล์มที่แตกต่างกัน สำหรับสภาวะที่ไม่รุนแรง (อุณหภูมิต่ำ และแรงเฉือนต่ำ) ผลการเตรียมเพสต์ที่ต่อสมบัติของฟิล์มถูกบรรยายด้วยปรากฏการณ์ของเม็ดแป้งขนาดต่างๆ ที่เหลืออยู่ในอีกทางหนึ่งเมื่อใช้สภาวะแรง (อุณหภูมิสูงและแรงเฉือนสูง) มีผลเนื่องจากการแบ่งแยกวิภาคของ Amylase และ Amylopectin-rich การเตรียมฟิล์มสตาร์ชด้วยวิธีการเตรียมมาตรฐานนั้นมีความสำคัญ

**A.J.F.Carvalho และคณะ [21]** เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชนี้เป็นส่วนผสมระหว่างแป้งข้าวโพดกับกลีเซอรอลเสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลส และศึกษาลักษณะโดยวิธีการแยกขนาดอย่างมีประสิทธิภาพของโครมาโทกราฟี น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายตัวนี้ถูกวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ของการเสถียรภาพของสายโซ่ เนื่องจากกระบวนการผสมและเทอร์โมพลาสติกไซเซชัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมโพสิตถูกเตรียมที่อุณหภูมิ 150-160 องศาเซลเซียส โดยใช้กลีเซอรอลและเส้นใยในปริมาณ 30-50 และ 5-15% ตามลำดับ ผลการทดลองที่ได้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณกลีเซอรอลและการเสถียรภาพของแป้งที่ลดลง ขณะที่ปริมาณเส้นใยก็เพิ่มขึ้นด้วย การเปลี่ยนแปลงในโครมาโทกราฟีแสดงในรูปเศษส่วนของน้ำหนักโมเลกุลที่ตรงกันของ Amylopectin และดัชนีการแพร่กระจายของเมทริกซ์ที่ต่ำกว่าของแป้งธรรมชาติเพราะการเสถียรภาพของโมเลกุลแป้งผลจากแรงเฉือนที่นำไปทำให้โมเลกุลแยกออกเป็นเสี่ยง

**M. F. Huang และคณะ [22]** ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของคอมโพสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วย Montmorillonite (Montmorillonite-reinforced Theroplastic Starch Composite, MTPSC) ที่เตรียมได้จาก Montmorillonite (MMT) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ใช้กลีเซอรอลเป็น พลาสติกไซเซอร์ (Glycerol-plasticized Theroplastic Starch, GTPS) ด้วยกระบวนการอัดรีด เมื่อทำการตรวจวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า MMT มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอใน GTPS เทคนิค FT-IR แสดงให้เห็นว่าหมู่ C-O ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของ MTPSC มีการเคลื่อนไปทางเลขคลื่นที่สูง ในขณะที่หมู่ไฮดรอกซิลของ MMT มีการเคลื่อนไปทางเลขคลื่นที่ต่ำ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก การดึงดูดยึดอย่างแข็งแรงระหว่าง MMT กับ โมเลกุลสตาร์ชและการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของ MMT กับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ช เมื่อทำการเก็บ MTPSC เป็นเวลา 14 วันที่ความชื้นสัมพัทธ์ 39 % ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัสของยัง และพลังงาน ณ จุดขาด ของ MTPSC มีค่าเท่ากับ 27.34 MPa 206.74 MPa และ 1.723 MPa ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลของ MTPSC ถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น ในขณะที่เดียวกันได้ทำการศึกษาผลของปริมาณน้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกลโดยเทคนิค DTA ซึ่งแสดงให้เห็นว่า MTPSC มีความเสถียรทางความร้อนและสมบัติความต้านทานการดูดน้ำดีกว่า GTPS

**Y. Lu และคณะ [23]** ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) กับพอลิยูรีเทน (Polyurethane, Pu) ที่สังเคราะห์ได้จากน้ำมันละหุ่ง (Castor oil) ผลของปริมาณ PU ที่มีต่อสัญญาณวิทยา การผสมเข้ากันได้ และสมบัติทางกายภาพของ PU/TPS ถูกตรวจสอบโดยใช้ SEM DSC และการตรวจวัดของสมบัติเชิงกลและความว่องไวต่อน้ำ (Water sensitivity) ซึ่งผลการผสมเข้ากันได้มีค่าสูงสุดเมื่อปริมาณของ PU น้อยกว่า 15 wt% เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่ผิวหน้าระหว่างหมู่ยูรีเทน (Urethane group) กับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ของสตาร์ช สำหรับผล DSC ของของผสมที่ PU น้อยกว่า 15 wt% นั้น ปรากฏพิคในช่วงกว้างและมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับ TPS อย่างไรก็ตามการแยกออกของวัฏภาคของของผสมสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อปริมาณ PU มากกว่า 15 wt% การรวมตัวของ PU 4-20 wt% ใน TPS มีผลในการช่วยปรับปรุงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ามอดูลัสของยัง (40-75 MPa) ค่าความแข็งแรงดึง (3.4-5.1 MPa) และการดึงยืด ณ จุดขาด (116-176%)

**A.L. Da Róz และคณะ [24]** ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของประเภทและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ (Mechanical property) สมบัติทางความร้อน (Thermal property) และสมบัติในการดูดซับน้ำ (Water-absorption property) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) สำหรับการตรวจสอบนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ คือ กลุ่มแรกเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ และกลุ่มที่สองนั้นเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์ โดยพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย โมโนไฮดรอกซ์ซิลแอลกอฮอล์ (Monohydroxy alcohol) และไกลคอลที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (High molecular weight glycol) ปริมาณและประเภทของพลาสติกไซเซอร์ไม่มีผลต่อความเป็นผลึก (Crystallinity) ของตัวอย่าง แต่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล (Mechanical property) ของเทอร์โมพลาสติกใน 2 แนวทางที่ต่างกัน คือ มีผลทำให้นุ่มเมื่อมีการเติมพลาสติกไซเซอร์และมีผลทำให้แข็งเมื่อไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. แบ่งแก้วเขียวตราต้นสน ชนิดคัดแปร จากบริษัท สิทธิพันธ์ จำกัด องค์กรประกอบของแบ่งแก้วเขียวแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์กรประกอบทางเคมีของแบ่งแก้วเขียว [11]

องค์กรประกอบ	ร้อยละ
ความชื้น	9.49
คาร์โบไฮเดรต	3.20
โปรตีน	22.26
ไขมัน	0.33
เส้นใย	0.53
เถ้า	3.20
ปริมาณอะมิโนส	37.90
ปริมาณอะมิโนเฟกทิน	62.10
อื่นๆ	0.9

2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System
3. กรดสแตียริก จากบริษัท Lab System
4. เส้นใยฝ้าย

ตารางที่ 3.2 สมบัติทั่วไปของเส้นใยฝ้าย

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้
ความยาว (L)	mm	5
เส้นผ่านศูนย์กลาง(D)	$\mu\text{m}$	1
L/D ratio	-	500:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)  
สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแสดงในตารางที่ 3.2

**ตารางที่ 3.3** สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เกรด LD1905F  
จากบริษัทไทยโพลิเอทิลีน จำกัด

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้	วิธีการทดสอบ
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g / 10 min	5.2	ASTM D1238
ความหนาแน่น (Density)	g / cm <sup>3</sup>	0.919	ASTM D 1505
จุดหลอมเหลว (Melting point)	°C	110	ASTM D 2117

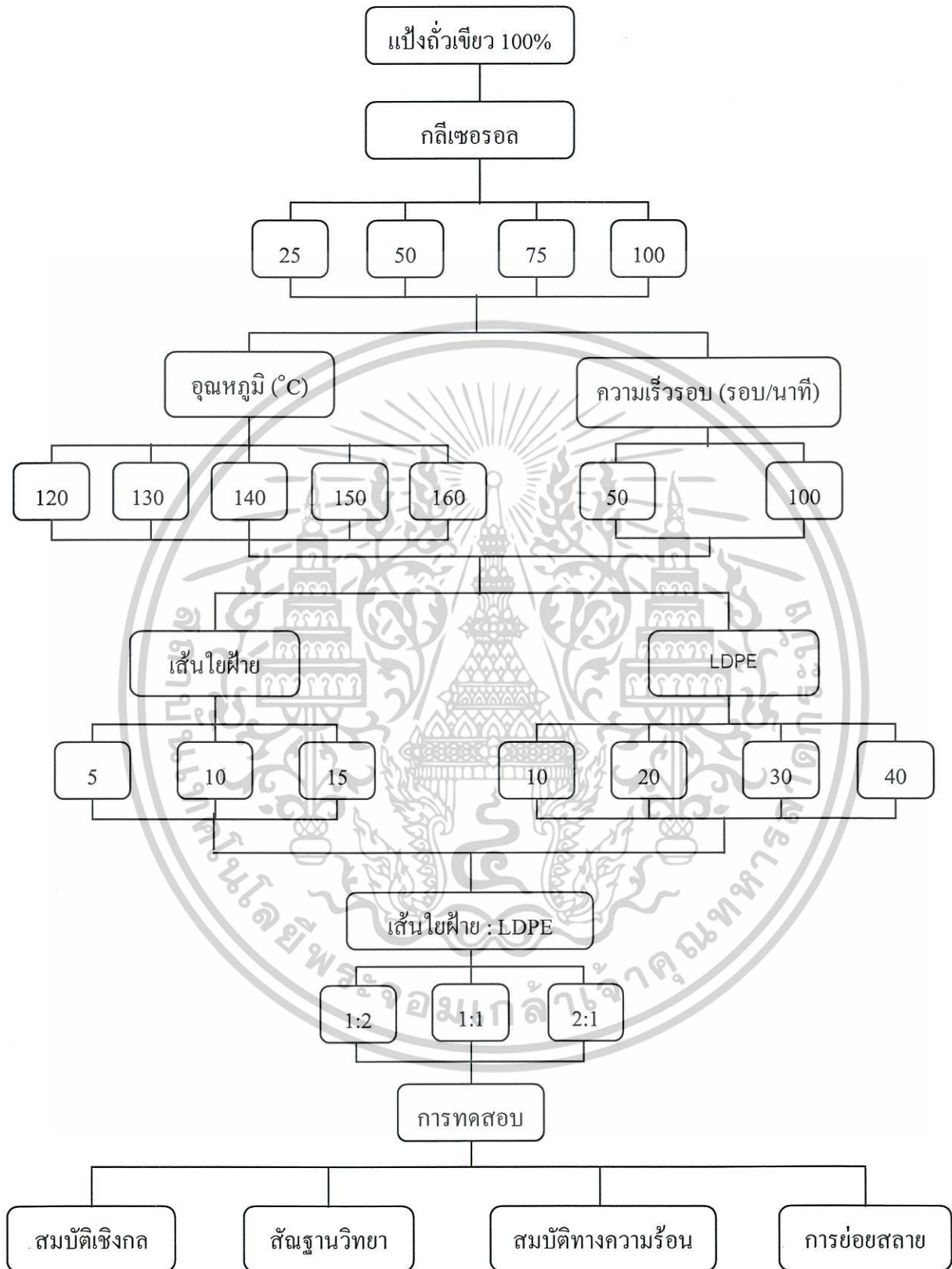
หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

6. น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil)

### 3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องผสมความเร็วสูง (High-speed mixer)
2. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)
3. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding)
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
5. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer Hardness แบบ Shore A)
6. เครื่องชั่งแบบละเอียด (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง)
7. แผ่นเปลวอลูมิเนียม (Aluminium Foil)
8. แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.1** แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดลอง

แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.1 และแบ่งออกเป็น 3 ตอนดังนี้

#### ตอนที่ 1 การหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียว

- 3.3.1.1 ทำการชั่งน้ำหนักแป้งถั่วเขียวและกลีเซอรอลใส่ลงภาชนะ ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.3 ทำการผสมให้เข้ากัน
- 3.3.1.2 เก็บของผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในแป้ง
- 3.3.1.3 นำของผสมที่เตรียมได้มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ 120 130 140 150 และ 160 องศาเซลเซียสและที่ความเร็วรอบ 50 และ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที สังเกตลักษณะทางกายภาพของของผสมที่ได้ เช่น สีและกลิ่น
- 3.3.1.4 เลือกอุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสมที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ได้ซึ่งควรจะมีลักษณะเป็นชิ้นหรือก้อนพันติค รวมถึงพิจารณาจากสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้

#### ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของ แป้ง กลีเซอรอลที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล

แป้งถั่วเขียว (phr)	กลีเซอรอล (phr)
100	25
100	50
100	75
100	100

#### ตอนที่ 2 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียว

- 3.3.2.1 ทำการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์ วางแผ่นพีวีซีแล้วทาน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) ลงไปบนแม่พิมพ์ด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ใส่เทอร์โมพลาสติกสตาโรลลงในแม่พิมพ์ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน จากนั้นนำแม่พิมพ์ไปใส่ในเครื่องอัดขึ้นรูปทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิที่ผสม
- 3.3.2.2 ใช้ในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (120 130 140 150 และ 160 องศาเซลเซียส) และใช้

ความดันในช่วง 1300 psi เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการหล่อเย็นอีก 5 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2.3 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้วนำไปตัดรูปดัมเบลล์เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติกลต่อไป

### ตอนที่ 3 การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียว

3.3.3.1 ทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้ในตอนที่ 2 โดยใช้เส้นใยฝ้ายในปริมาณ 5% 10% และ 15% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล

3.3.3.2 ทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมไว้ในตอนที่ 2 โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 10 % 20% 30% และ 40% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล

3.3.3.3 ทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้ โดยการใส่เส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ

## 3.4 วิธีการทดสอบ

### 3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.4

**ตารางที่ 3.5** มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้ [25,26]

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
แรงดึง (Load)	ASTM D 638	N
ความเค้น (Stress at max load)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus, E)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด (Extention at max load)	ASTM D 638	mm
ความเครียด (% Strain at max load)	ASTM D 638	%
ความแข็งกด (Hardness)	ASTM D 2240	Shore A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1.1 แรงดึง ความเค้น มอดุลัส การดัดยืด และความเครียด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ซินงานที่ใช้ในการทดสอบ จะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ซินงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสถานะของซินงานที่จะใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60%ทดสอบตามสถานะดังนี้

Test speed	:	40 mm/min
Gauge length	:	25 mm
Load cell	:	100 N

ค่ามอดุลัส และความเครียด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{มอดุลัส (Young's modulus, E)} = (F/A) / [(L-L_0)/L_0]$$

$$\text{ความเครียด (\% Strain at max load)} = [(L-L_0)/L_0] * 100$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดัดยืดซินงานตัวอย่าง (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของซินงานตัวอย่าง ( $\text{mm}^2$ )

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดัดยืดซินงานตัวอย่าง (mm)

$L_0$  คือ ระยะที่ซินงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

### 3.4.1.2 ความแข็งกด (Hardness)

วัดความแข็งของซินงาน ตามมาตรฐาน ASTM D 2440 ด้วย Durometer Hardness ชนิด Shore A โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะต้องมีความหนาอย่างน้อย  $\frac{1}{4}$  นิ้ว หรือ 0.25 นิ้ว ทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงกดตัวอย่างละ 10 จุด สเกลสำหรับอ่านค่าความแข็งกด อยู่ในช่วง 0-100 โดยค่าความแข็งกด 0 คือ ความแข็งกดของของเหลว และค่าความแข็งกด 100 คือความแข็งของวัสดุที่แข็งมากไม่ยุบตัว เช่น กระดาษ

### 3.4.2. การทดสอบสัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยนำซินงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยทำการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (Onset degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (% weight loss at onset degradation temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้บรรยากาศไนโตรเจน ( $N_2$ ) ที่ภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที เมื่อได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้วจึงนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram) ได้เป็น DTG

### 3.4.4. การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน [27]

ตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 x 50 มิลลิเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 10-20% ดินมีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และอุณหภูมิของดินมีค่าเท่ากับ 32 องศาเซลเซียส การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ลดลงในแต่ละวัน เป็นระยะเวลา 28 วัน โดยใช้กล้องดิจิทัล SONY Cyber-shot รุ่น DSC-W55 ความละเอียด 7.2 เมกะพิกเซล

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วน 1:1 โดยทำการศึกษาอุณหภูมิและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเครื่องผสมระบบปิด ศึกษาปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยใช้เส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยเลือกศึกษาถึงปริมาณที่เหมาะสมของเส้นใยฝ้ายที่ใช้ในการเสริมแรง ปริมาณที่เหมาะสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และอัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยศึกษาจากสมบัติเชิงกล ล้าฐานวิทยาศาสตร์ทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้ ให้ผลดังนี้

#### 4.1 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ แรงดึง มอดุลัส การดึงยืด ความเค้น ความเครียด และความแข็งแรง ให้ผลการทดลองดังนี้

##### 4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวด้วยเครื่องผสมระบบปิด

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งถั่วเขียวโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วน 1:1 ที่ความเร็วรอบ 50 และ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 120 130 140 150 และ 160 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** ลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวเมื่อผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด

ความเร็วรอบ (rpm)	อุณหภูมิ (°c)	ลักษณะทางกายภาพ
50	120	ชิ้นงานมีลักษณะขุ่น ไม่จับตัวเป็นก้อน ดึงยืดได้น้อย
	130	ชิ้นงานมีลักษณะใสมากขึ้น จับตัวเป็นก้อนมากขึ้น ดึงยืดได้มากขึ้น
	140	ชิ้นงานมีลักษณะใส จับตัวเป็นก้อนมาก ดึงยืดได้มาก
	150	ชิ้นงานมีสีคล้ำ ดึงยืดได้ยาก และมีความเหนียว
	160	ชิ้นงานมีสีคล้ำเกือบดำ จับตัวเป็นก้อนได้มากและเหนียวมาก
100	120	ชิ้นงานมีลักษณะขุ่น จับตัวเป็นก้อนได้บ้างเล็กน้อย ดึงยืดได้น้อย
	130	ชิ้นงานมีลักษณะใสมากขึ้น จับตัวเป็นก้อนมากขึ้น ดึงยืดได้มากขึ้น
	140	ชิ้นงานมีลักษณะคล้ำ จับตัวเป็นก้อนได้มาก ดึงยืดได้ยาก
	150	ชิ้นงานมีสีคล้ำ ดึงยืดได้ยาก และมีความเหนียว
	160	ชิ้นงานมีสีคล้ำเกือบดำ จับตัวเป็นก้อนได้มากและเหนียวมาก

จากตารางที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิที่สามารถขึ้นรูปแป้งถั่วเขียวได้ คือ 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่เตรียมได้ มาทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 120 130 และ 140 องศาเซลเซียส ให้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

**ตารางที่ 4.2** ลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวเมื่อขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป

ความเร็วรอบ (rpm)	อุณหภูมิ (°c)	ลักษณะทางกายภาพ
50	120	ชิ้นงานมีลักษณะขุ่น ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นต่อเนื่องกันได้
	130	ชิ้นงานมีลักษณะใสมากขึ้น สามารถขึ้นรูปได้บ้าง
	140	ชิ้นงานมีลักษณะใส ขึ้นรูปเป็นแผ่นต่อเนื่องกันได้
100	120	ชิ้นงานมีลักษณะขุ่น ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้
	130	ชิ้นงานมีลักษณะใสมากขึ้น ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้
	140	ชิ้นงานมีลักษณะคล้ำ สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้บ้าง

จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้จากแป้งถั่วเขียวโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ พบว่าเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสมทำให้ลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมกลีเซอรอลเปลี่ยนไป แสดงว่าอุณหภูมิและความเร็วรอบมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวและภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำต่อไป

#### 4.1.2 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวโดยใช้เส้นใยฝ้ายเป็นส่วนเสริมแรง

เนื่องจากเส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ทั่วไปในปริมาณมาก อีกทั้งมีการจัดเรียงตัวที่ดีส่งผลให้เส้นใยฝ้ายมีความแข็งแรง เหนียว สามารถรับแรงได้ดีในแนวเส้นใย [14] ดังนั้นเส้นใยฝ้ายจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรล จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีเส้นใยฝ้ายที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) ของเส้นใยเท่ากับ 500:1 ผสมอยู่ในปริมาณ 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 (ก)-(ค) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เติมเส้นใยฝ้ายในปริมาณแตกต่างกัน พบว่าแรงดึง (รูปที่ 4.1 (ก)) ความเค้น (รูปที่ 4.1 (ข)) และมอดูลัส (รูปที่ 4.1 (จ)) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีแนวโน้มนุ่มเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 10 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีความแข็งแรง มีมอดูลัสสูงกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล และสามารถทนแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยได้ดีเนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถั่วเขียวและเส้นใยฝ้ายได้ทำให้ผสมเข้ากันได้ดี นอกจากนี้โครงสร้างของแป้งถั่วเขียวและเส้นใยฝ้ายมีลักษณะที่คล้ายกัน กล่าวคือ มีความมีขี้ผึ้งทำให้เกิดความเข้ากันได้ อีกทั้งเส้นใยฝ้ายยังมีอัตราส่วนระหว่างยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ที่สูง เมื่อมีแรงกระทำเส้นใยฝ้ายจะช่วยกระจายแรงหรือส่งผ่านแรงนั้นไปตามความยาวของเส้นใย เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมเส้นใยฝ้ายจึงสามารถรับแรงและกระจายแรงได้ดีขึ้น แต่เมื่อทำการผสมเส้นใยฝ้ายลงไปปริมาณมากขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มนุ่มต่ำลงโดยแรงดึง ความเค้น และมอดูลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเริ่มมีแนวโน้มนุ่มลดลงเมื่อใส่เส้นใยฝ้ายลงไป 15 % โดยน้ำหนัก อาจเกิดขึ้นเนื่องจากมีเส้นใยฝ้ายในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้มีการแยกวัฏภาคเกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณรอยต่อของวัฏภาค ส่งผลให้ความเข้ากันได้ของเส้นใยฝ้ายกับเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลลดลง

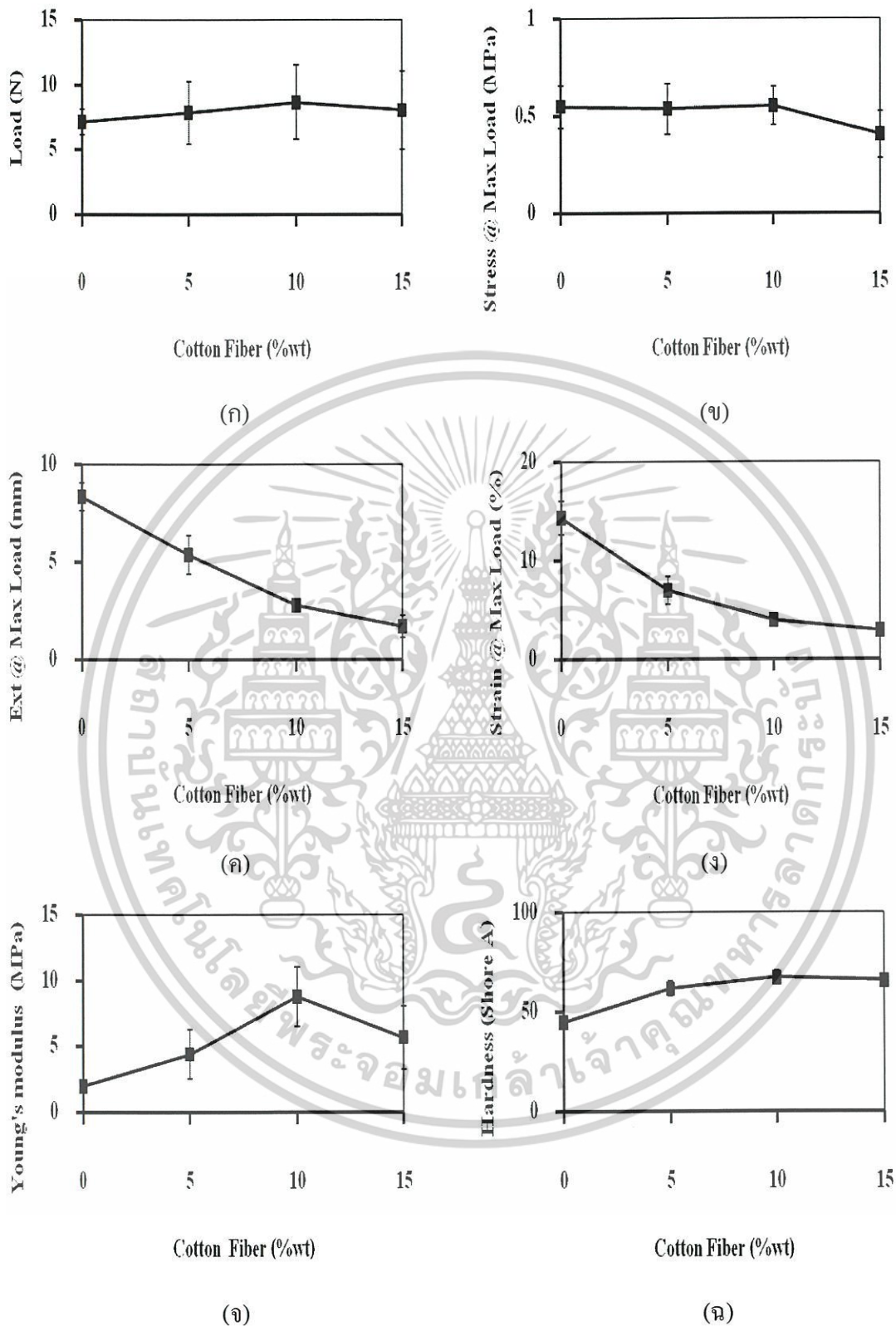
ส่วนการดึงยึด (รูปที่ 4.1 (ค)) และความเครียด (รูปที่ 4.1 (ง)) ให้ผลในการทำงานเหมือนกัน โดยมีแนวโน้มนุ่มลดลง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยฝ้าย เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีความสามารถในการยึดตัวดีและมีความเป็นผลึกสูง ทำให้เปลี่ยนรูปร่างได้ยากกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมเส้นใยฝ้ายลงไปมีการดึงยึดและความเครียดต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการเติมเส้นใยฝ้าย

จากรูปที่ 4.1 (ข) พบว่าเมื่อทำการเติมเส้นใยฝ้ายลงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรลทำให้ความแข็งกคมีแนวโน้มนุ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีความแข็งมากกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและความแข็งกคเป็นสมบัติของพื้นผิว ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของ

เส้นใยฝ้ายในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจึงทำให้ปริมาณของเส้นใยฝ้ายที่กระจายอยู่ตามพื้นผิวของชิ้นงานมีมากขึ้นส่งผลให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยฝ้ายปริมาณ 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อผสมเส้นใยฝ้ายลงในปริมาณ 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก เส้นใยฝ้ายมีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์ของแป้งและสามารถผสมขึ้นรูปได้ง่าย แต่ความเข้ากันได้ของเส้นใยฝ้ายกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยฝ้ายเป็น 15 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากไม่สามารถทำการผสมเส้นใยฝ้ายให้เข้ากับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ เพราะว่ามีเส้นใยฝ้ายในปริมาณมาก ส่งผลให้แป้งถั่วเขียวผสมกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์นั้นไม่สามารถห่อหุ้มเส้นใยฝ้ายเพื่อให้เกิดเป็นวัสดุภาคที่ต่อเนื่องกันได้ ทำให้มีเส้นใยฝ้ายบางส่วนแยกออกจากเมทริกซ์

ดังนั้นหากพิจารณาจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยฝ้ายในปริมาณต่างๆ กัน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีเส้นใยฝ้ายผสมอยู่ในปริมาณ 10 % โดยน้ำหนัก มีค่าแรงดึง ความเค้น มอดุลัส และความแข็งกดสูงที่สุด จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติต่อไป



**รูปที่ 4.1** สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวที่ทำการผสมด้วยเส้นใยฝ้ายในปริมาณต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวโพดโดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ คือ มีความเหนียว (Toughness) ความยืดหยุ่น (Flexibility) ดีแม้ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ และกระบวนการแปรรูปทำได้ง่าย [ 28 ] ดังนั้น จึงเลือกใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในปริมาณ 10 20 30 และ 40 % โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2

ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แสดงดังรูปที่ 4.2 จากผลการทดลองพบว่าแรงดึง (รูปที่ 4.2 (ก))และ ความเค้น (รูปที่ 4.2 (ข)) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความต้านทานแรงดึง เหนียวและยืดหยุ่นได้ดีแต่ที่ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 10% โดยน้ำหนัก มีค่าแรงดึงและความเค้นต่ำกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 0% โดยน้ำหนัก เล็กน้อยเนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่าง วัสดุของแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และที่ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้นจาก 20 – 40% โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าแรงดึงและความเค้นมีแนวโน้มมากขึ้น เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีแนวโน้มการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนสามารถรับแรงได้สูงขึ้น ส่วนการดึงยึด (รูปที่ 4.2 (ค)) และความเครียด (รูปที่ 4.2 (ง)) พบว่ามีค่าลดลงเมื่อปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้นทำให้ความสามารถในการดึงยึดลดลง ชิ้นงานยืดออกได้ลดลง

จากรูปที่ 4.2 (จ)-(ฉ) พบว่าเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดูลัสและความแข็งกมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความแข็งมากกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในเทอร์โมพลาสติกสตาโรลส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งมากขึ้น

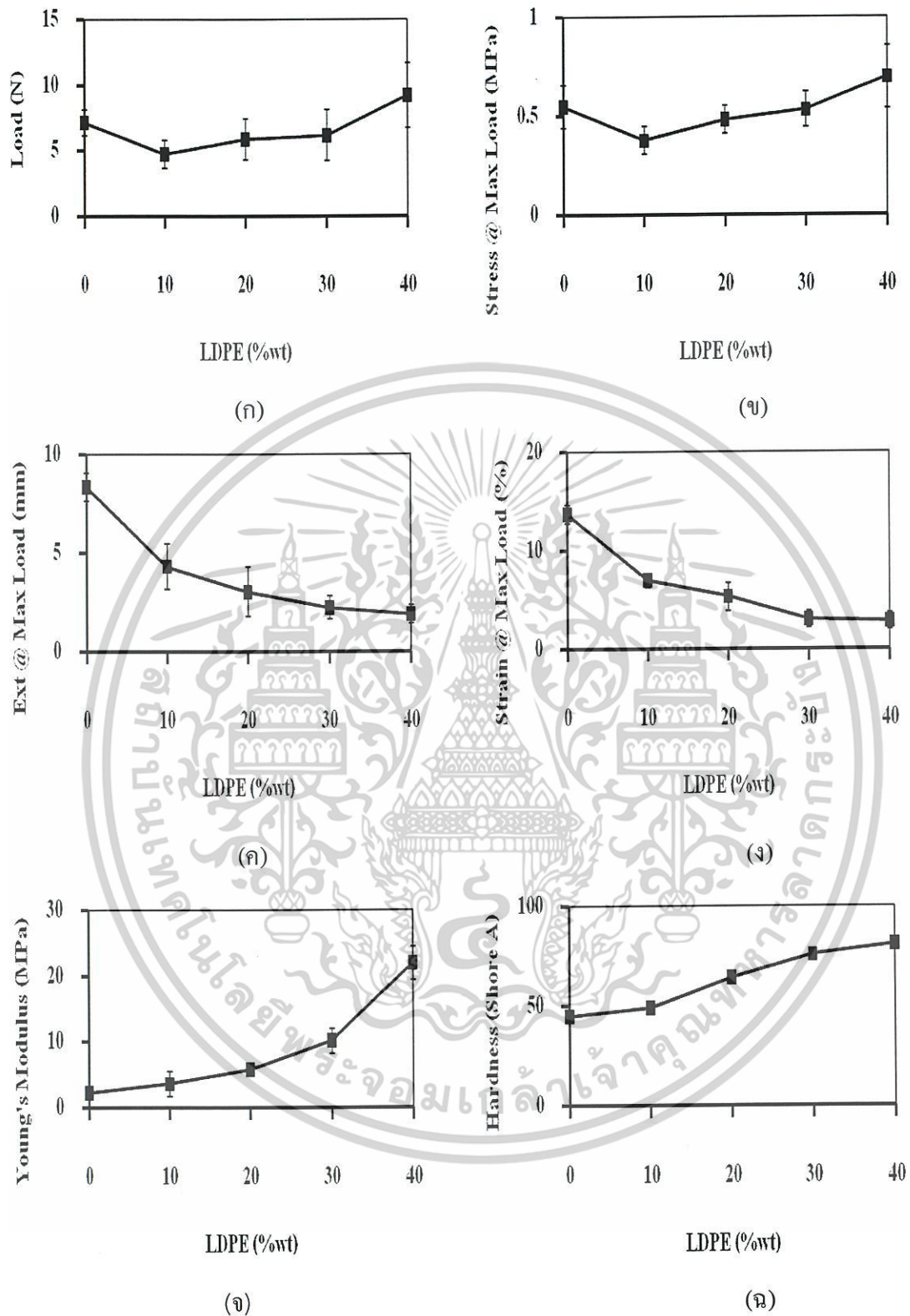
จากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวโพดซึ่งปรับปรุงสมบัติโดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แสดงการแยกกันระหว่างวัสดุทั้งสองเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลนั้นมีความเป็นขั้ว ส่วนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำนั้นเป็น โมเลกุลไม่มีขั้ว และพบว่าปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของแป้งนั้นมีแนวโน้มเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน การเสียดสีจากแรงดึงจึงทำได้ยากกว่า ส่วนในกรณีใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณน้อยกว่านั้น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกระจายตัวใน

เอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณน้อยกว่านั้น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกระจายตัวในไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมทริกซ์ของแปงได้ดีกว่า ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างภูมิภาคซึ่งเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานมากกว่า จึงทำให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่ากรณีใส่ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากกว่า แต่การผสม ในเครื่องผสมระบบปิดทำได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในปริมาณมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.2** สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวที่ทำการผสมด้วยพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

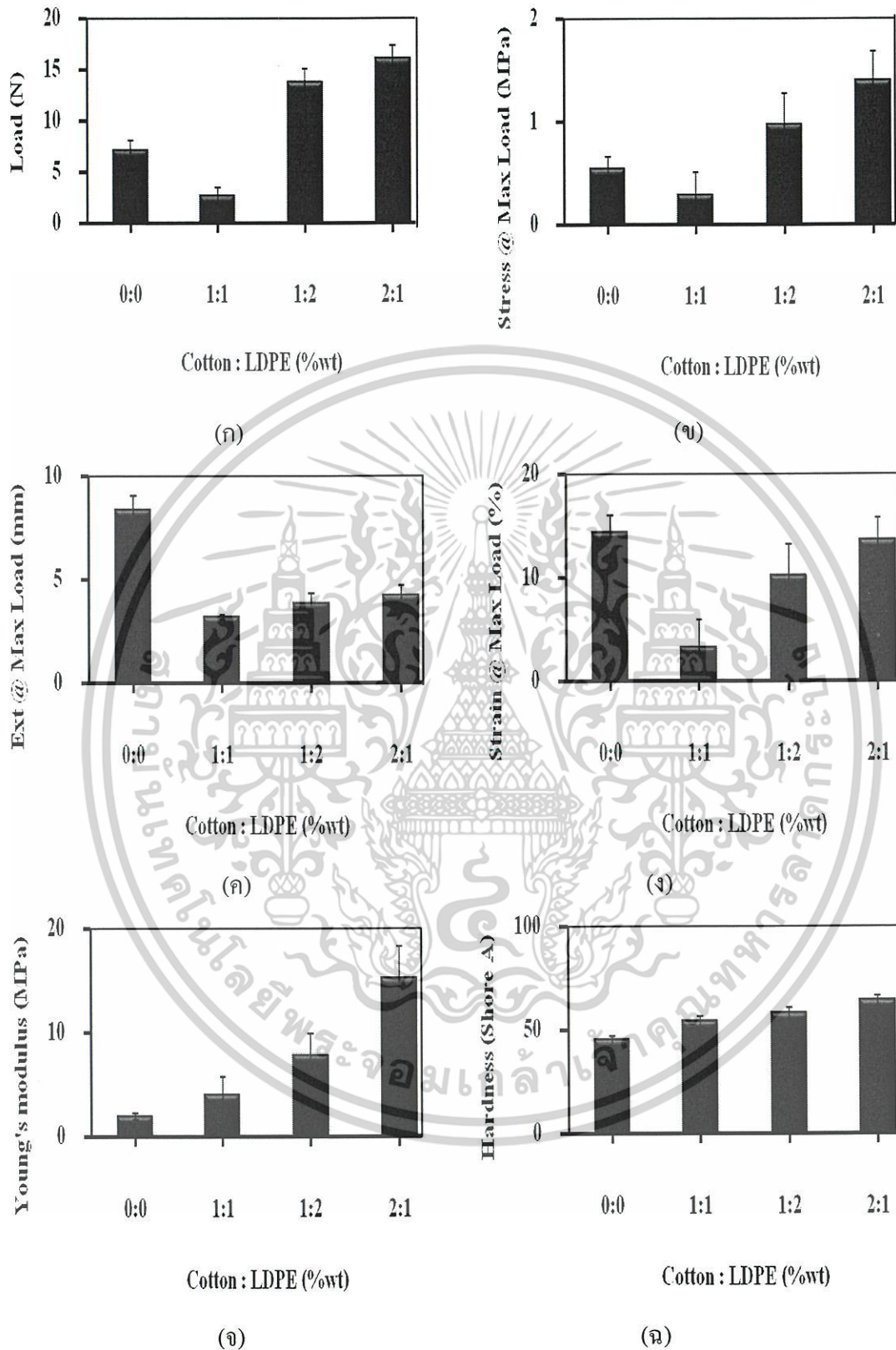
#### 4.1.4 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวโดยใช้เส้นใยฝ้าย และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน

การทดลองในส่วนนี้เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน การทดลองในส่วนนี้จึงเกี่ยวข้องกับการศึกษาอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ดังนี้ 0:0 1:1 1:2 และ 2:1 โดยเลือกเติมปริมาณเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำลงไป 10% โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึง มอดูลัส การดึงยืด ความเค้น ความเครียด และความแข็งกดของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเมื่อนำเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 0:0 1:1 1:2 และ 2:1 มาผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล เมื่อพิจารณาสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนกับชนิดความหนาแน่นต่ำ 1:1 พบว่า มอดูลัส (รูปที่ 4.3 (จ)) และความแข็งกด (รูปที่ 4.3 (ฉ)) มีค่าเพิ่มมากขึ้นจากสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 0:0 ส่วนแรงดึง (รูปที่ 4.3 (ก)) ความเค้น (รูปที่ 4.3 (ข)) การดึงยืด (รูปที่ 4.3 (ค)) และความเครียด (รูปที่ 4.3 (ง)) พบว่าสูตรอัตราส่วน 1:1 มีค่าต่ำกว่า 0:0 เนื่องจากเมื่อเติมใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำลงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ส่งผลให้ความต่อเนื่องของเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลลดลง รับแรงได้ลดลง และเมื่อพิจารณาสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 1:1 พบว่าแรงดึง (รูปที่ 4.3 (ก)) ความเค้น (รูปที่ 4.3 (ข)) การดึงยืด (รูปที่ 4.3 (ค)) ความเครียด (รูปที่ 4.3 (ง)) มอดูลัส (รูปที่ 4.3 (จ)) และความแข็งกด (รูปที่ 4.3 (ฉ)) ต่ำกว่าสูตรอัตราส่วน 1:2 และ 2:1 เพราะปริมาณเส้นใยฝ้ายเท่ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจึงไม่แสดงสมบัติเชิงกลโดยรวมอันเป็นผลมาจากเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำอย่างเด่นชัด

นอกจากนี้เมื่อเติมเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 2:1 ที่มีปริมาณเส้นใยฝ้ายมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่ามีสมบัติเชิงกลสูงกว่าสูตรอัตราส่วน 1:1 และ 1:2 เนื่องมาจากเส้นใยฝ้ายเป็นวัสดุเสริมแรงจากธรรมชาติที่สามารถช่วยเสริมแรงและช่วยให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลสามารถยึดเกาะกันได้ดีมากขึ้นจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ได้มีความแข็งแรงและสามารถรับแรงได้มากขึ้น

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1 ถือเป็นสูตรที่มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุดในงานวิจัยนี้ โดยพิจารณาจากค่าแรงดึง มอดูลัส การดึงยืด ความเค้น ความเครียด และความแข็งกดที่มากที่สุด



**รูปที่ 4.3** สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งข้าวที่ทำการผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วนต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.3** สมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติ

TPS	สมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลง (%)					
	Load	Stress at Max Load	Extension at Max Load	Strain at Max Load	Young's Modulus	Hardness (Shore A)
PURE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cotton 5%	10.08	-3.64	-35.53	-55.25	99.55	37.64
Cotton 10%	21.15	0.00	-66.63	-73.74	298.64	49.89
Cotton 15%	12.75	-27.27	-79.90	-80.76	157.27	46.33
LDPE 10%	-34.03	-30.91	-48.33	-49.38	62.73	9.35
LDPE 20%	-17.93	-12.73	-63.64	-64.59	166.82	43.21
LDPE 30%	-13.73	-3.64	-73.21	-78.05	352.27	68.60
LDPE 40%	29.27	27.27	-77.79	-79.74	719.09	80.62
Cotton:LDPE 1:1	-62.32	-49.09	-61.96	-76.23	82.73	20.27
Cotton:LDPE 1:2	92.58	76.36	-54.07	-25.60	255.00	29.40
Cotton:LDPE 2:1	124.09	152.73	-49.28	-0.88	591.82	42.54

จากการศึกษาแรงดึงและความเค้นพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกันในอัตราส่วน 2:1 ที่มีปริมาณเส้นใยฝ้ายมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำให้ค่าแรงดึงและความเค้นสูงสุด เนื่องจากเส้นใยฝ้ายเป็นวัสดุเสริมแรงตามธรรมชาติ สามารถทนแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งถั่วเขียวและเส้นใยฝ้าย ทำให้ผสมเข้ากันได้ดีช่วยทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสามารถยึดเกาะกันได้ดีมากจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้มีความแข็งแรงและสามารถรับแรงได้มากขึ้น

ส่วนการดึงยึดและความเครียดนั้นมีความโน้มลดลง เมื่อปริมาณของเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการดึงยึดลดลง ชิ้นงานยึดออกได้ลดลง นอกจากนั้นเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความสามารถในการยึดตัวได้ดีกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว จึงทำให้เปลี่ยนรูปได้ยากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่ามอดูลัสและความแข็งแรงกดของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 40 % โดยน้ำหนัก เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีความแข็งแรงมากกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียว ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากขึ้น

ดังนั้นสรุปได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกันในอัตราส่วน 2:1 ที่มีปริมาณเส้นใยฝ้ายมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำถือเป็นสูตรที่มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุดในงานวิจัยนี้ โดยพิจารณาจากค่าแรงดึง ความเค้นและมอดูลัส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

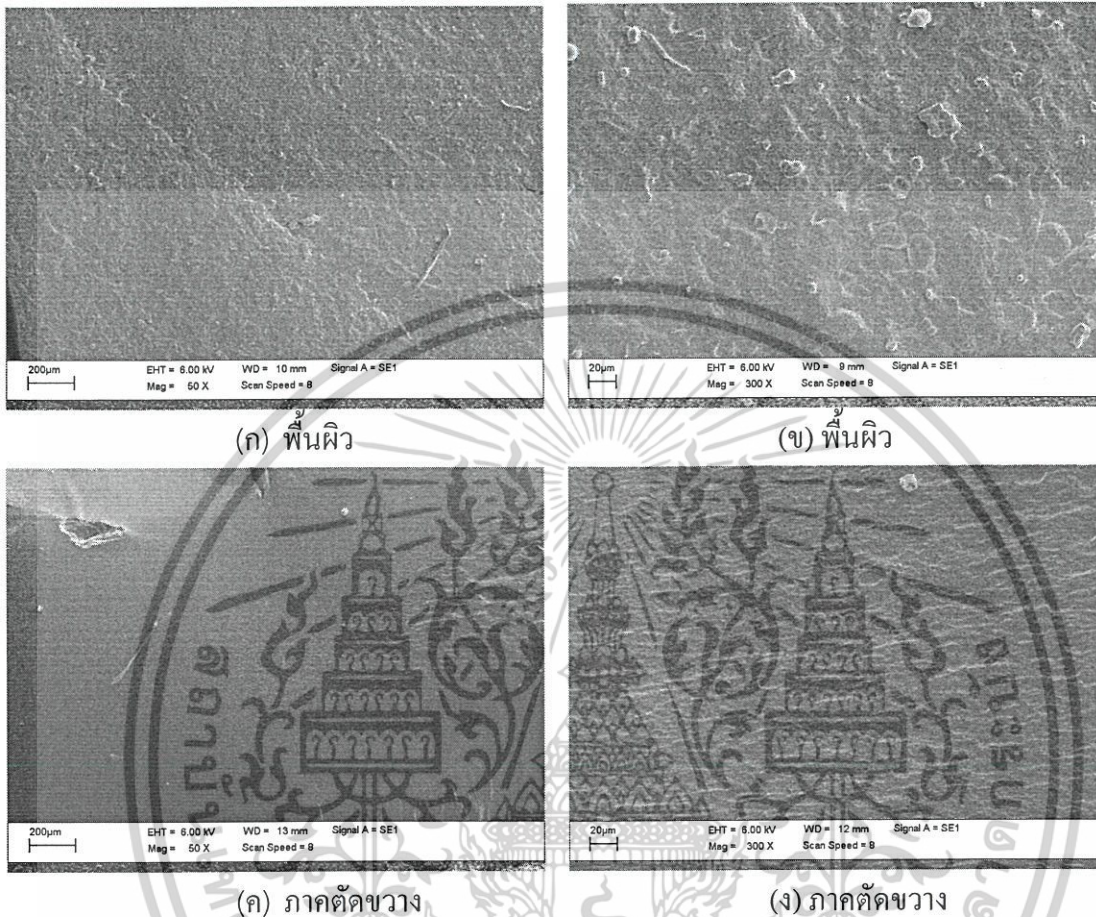
## 4.2 ศึกษานวทยา (Morphology)

การศึกษานวทยา (Morphology) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวโพด โดยปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัว (Dispersion) และลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial surface) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน ให้ผลการทดลองดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 เทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งถั่วเขียว ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที

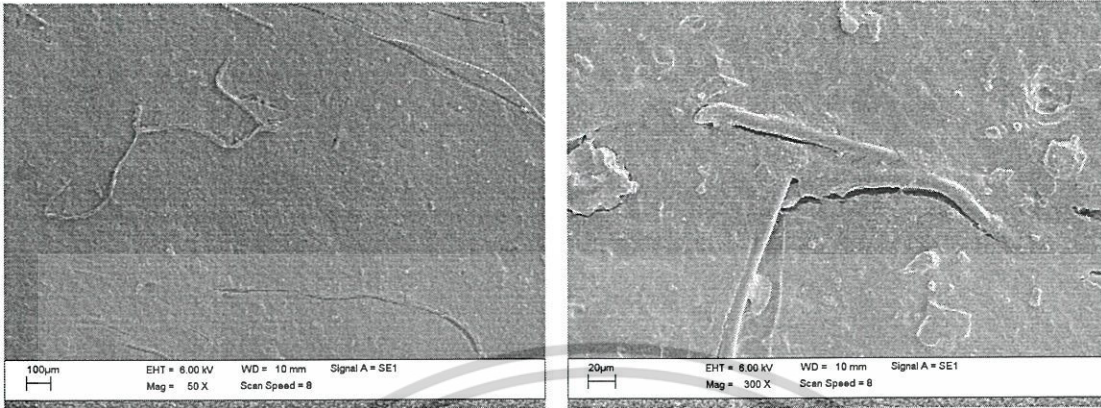


**รูปที่ 4.4** ลักษณะวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งถั่วเขียว ที่อุณหภูมิ 140 °C ความเร็วรอบ 50 rpm (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งถั่วเขียวที่กำลังขยาย 50 และ 300 เท่าตามลำดับ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ส่วนรูปที่ 4.4 (ค) และ (ง) แสดงให้เห็นลักษณะภายในภาคตัดขวางของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งถั่วเขียวซึ่งมีช่องว่างหรือรูพรุนกระจายอยู่บ้าง เนื่องมาจากความชื้นที่แป้งดูดซับไว้ ดังนั้นเมื่อนำมาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดการระเหยของน้ำและความชื้น เกิดเป็นช่องว่างภายในชิ้นงาน

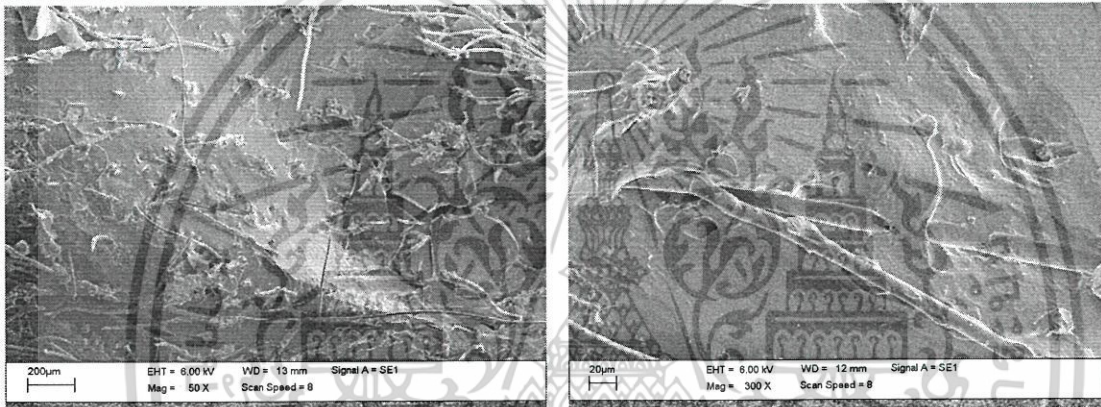
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้นใยฝ้ายเป็นส่วนเสริมแรง



(ก) พื้นผิว

(ข) พื้นผิว

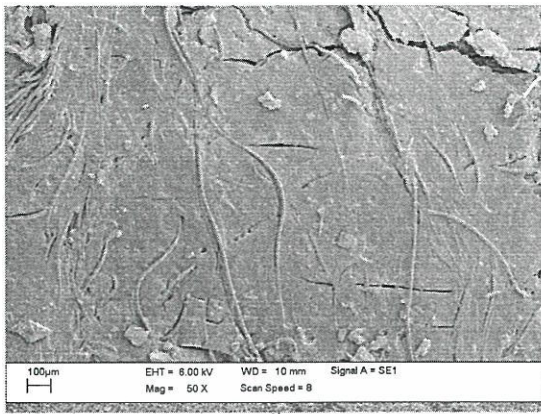


(ค) ภาคตัดขวาง

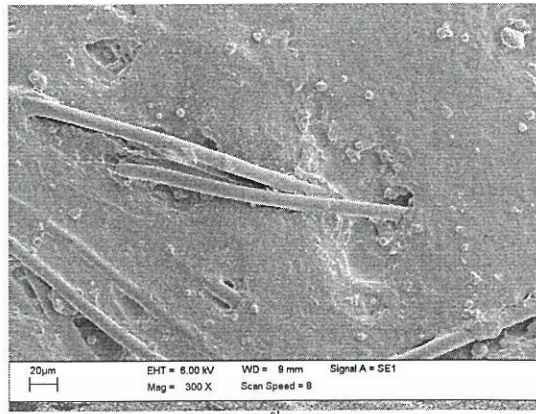
(ง) ภาคตัดขวาง

**รูปที่ 4.5** ลักษณะวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย 5 % โดยน้ำหนัก (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า

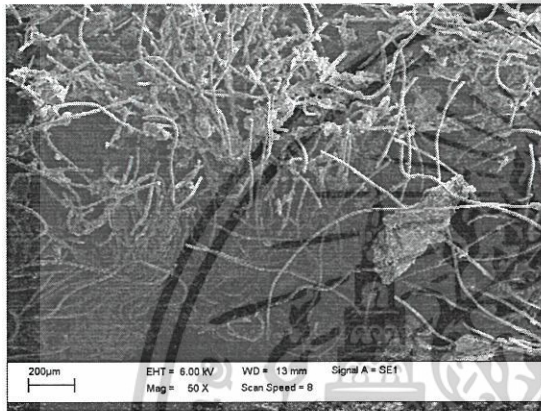
จากรูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่ผสมเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 50 และ 300 เท่าตามลำดับ ศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยฝ้ายในเมทริกซ์ พบว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดี และรูปที่ 4.5 (ค) และ (ง) แสดงถึงความสามารถในการผสมของเส้นใยฝ้ายกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว พบว่าเส้นใยฝ้ายสามารถเข้ากันได้ดีกับเมทริกซ์ สังเกตได้จากการที่มีอนุภาคแป้งไปเกาะอยู่บนผิวของเส้นใยฝ้ายเนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลเช่นเดียวกัน



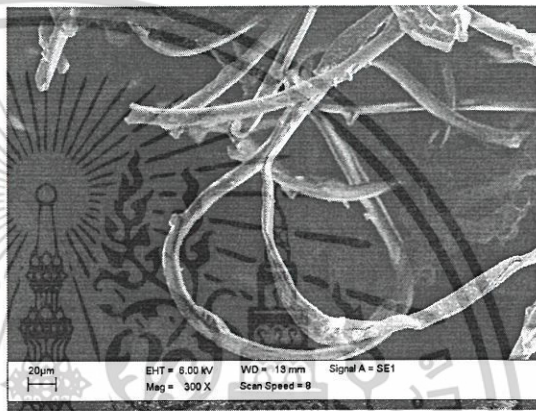
(ก) พื้นผิว



(ข) พื้นผิว



(ค) ภาคตัดขวาง



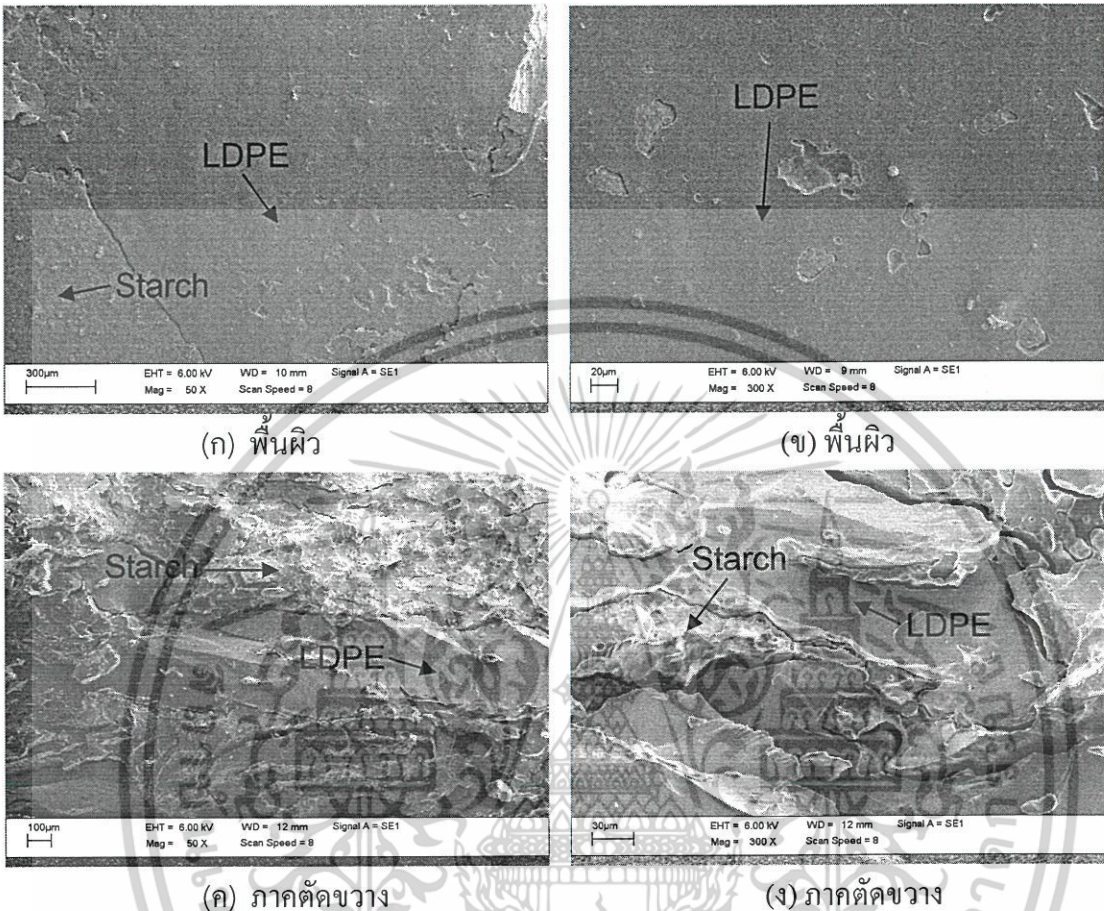
(ง) ภาคตัดขวาง

**รูปที่ 4.6** สันฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งกล้วยเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย 15 % โดยน้ำหนัก (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งกล้วยที่ผสมเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 50 และ 300 เท่าตามลำดับ ศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยฝ้ายในเมทริกซ์ พบว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดี และรูปที่ 4.6 (ค) และ (ง) แสดงถึงความสามารถในการผสมของเส้นใยฝ้ายกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งกล้วย พบว่าเส้นใยฝ้ายสามารถเข้ากันได้ดีกับเมทริกซ์ สังเกตได้จากการที่มีอนุภาคแป้งไปเกาะอยู่บนผิวของเส้นใยฝ้าย แต่มีเส้นใยฝ้ายบางส่วนไม่ถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์ เนื่องจากมีเส้นใยฝ้ายอยู่ในปริมาณมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

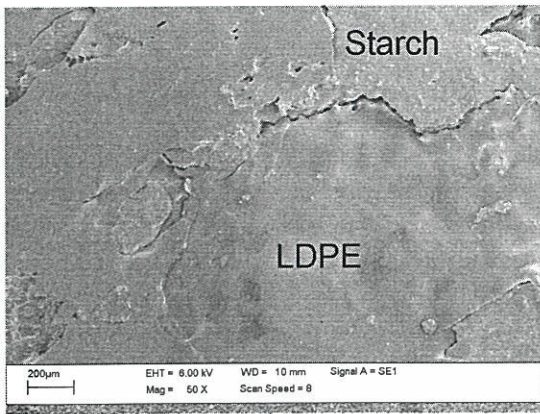
### 4.2.3 เทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวปรับปรุงสมบัติโดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



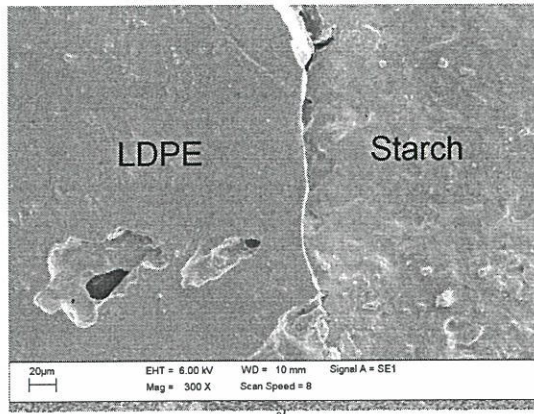
**รูปที่ 4.7** สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 20 % โดยน้ำหนัก (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวที่ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 20% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 50 และ 300 เท่าตามลำดับ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะขรุขระและพบช่องว่างกระจายอยู่บนพื้นผิวซึ่งมีสาเหตุมาจากความชื้นที่ระเหยออกไปขณะทำการผสม นอกจากนี้ยังพบรอยต่อระหว่างสองวัสดุของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าว ส่วนรูปที่ 4.7 (ค) และ (ง) แสดงลักษณะบริเวณภาคตัดขวาง พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีการกระจายตัวต่ำ เนื่องจากความเป็นขั้วต่างกันระหว่างสองวัสดุ โดยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วจึงทำให้ไม่ชอบกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งข้าวที่มีขั้ว

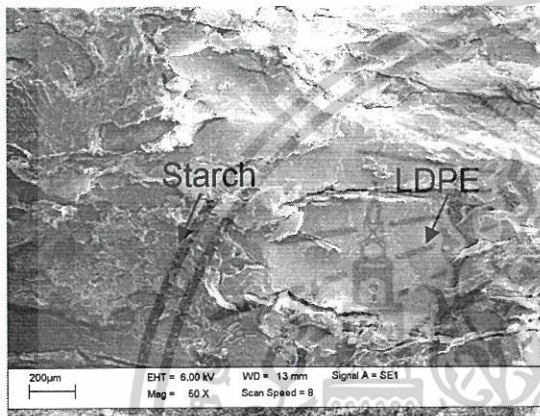
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



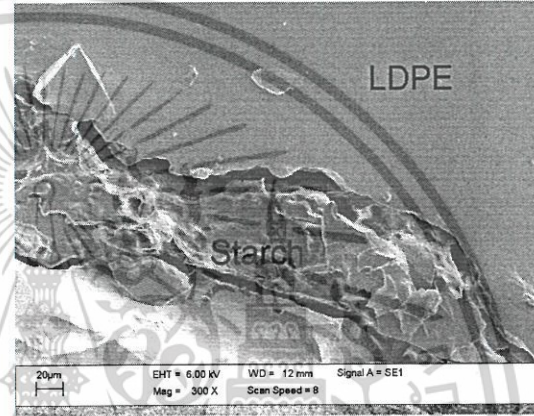
(ก) พื้นผิว



(ข) พื้นผิว



(ค) ภาคตัดขวาง



(ง) ภาคตัดขวาง

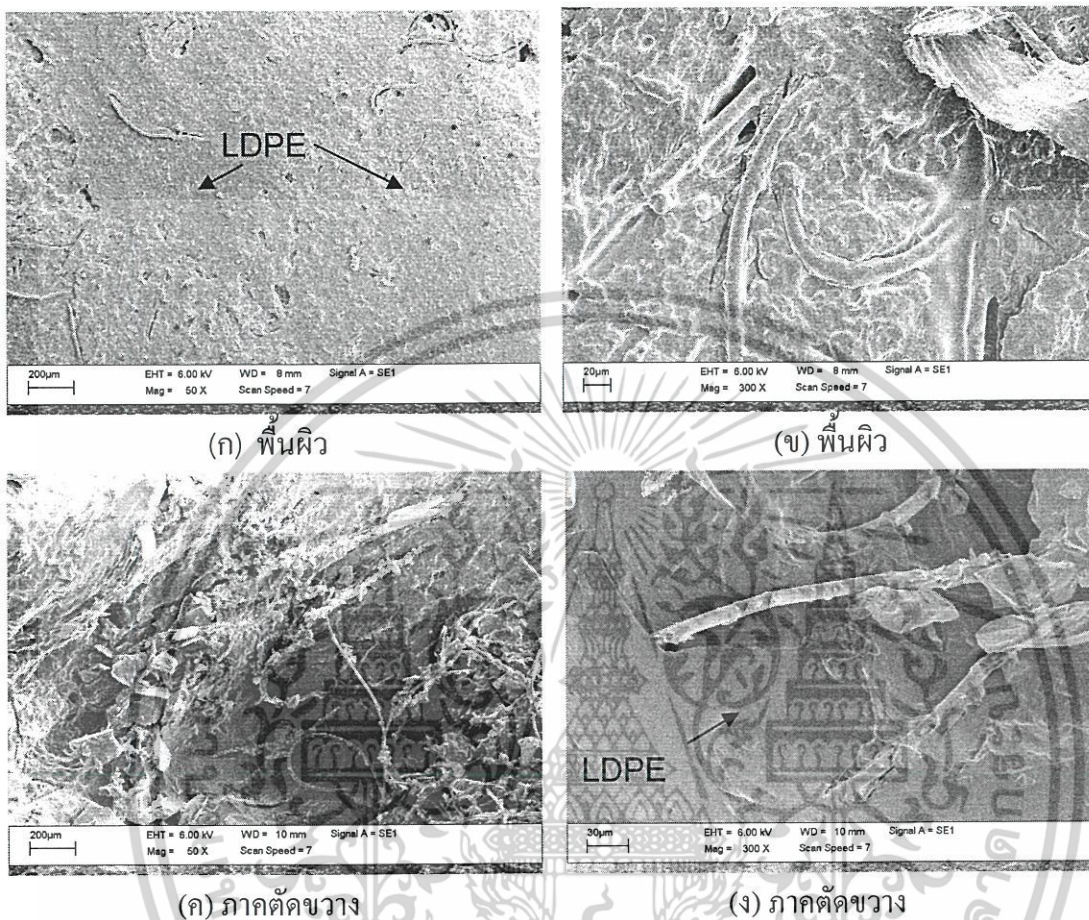
**รูปที่ 4.8** สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 40 % โดยน้ำหนัก (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.8 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวที่ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 40% โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 50 และ 300 เท่าตามลำดับ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะไม่เรียบ มีรอยต่อระหว่างวัฏภาคระหว่างสารทั้งสองชัดเจน นอกจากนี้ยังพบช่องว่างของความชื้นที่ระเหยออกไปขณะทำการผสม

ส่วนรูปที่ 4.8 (ค) และ (ง) แสดงบริเวณภาคตัดขวางพบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนไม่กระจายตัวในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างสารทั้งสองอย่างชัดเจน เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วจึงชอบอยู่ด้วยกันเองมากกว่ากระจายในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าว นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้นทำให้การผสมเข้ากันได้ของสารทั้งสองชนิดน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

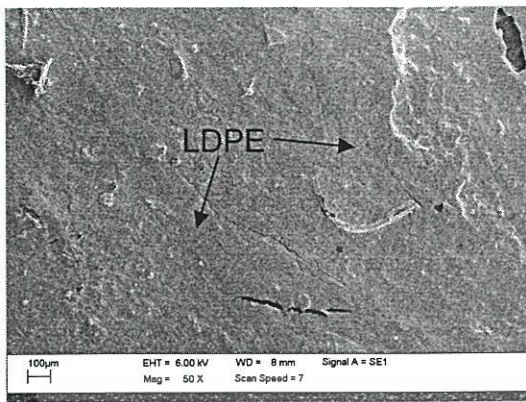
#### 4.2.4 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน



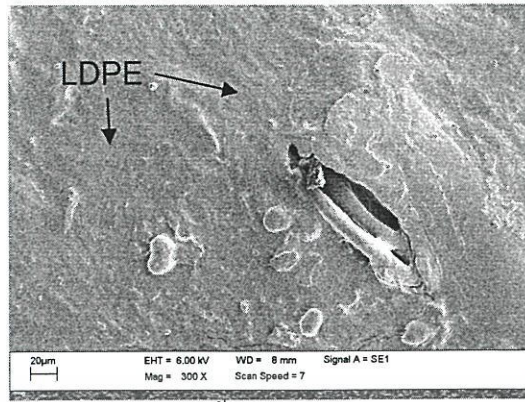
**รูปที่ 4.9** สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกันในอัตราส่วน 1:1 (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.9 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่ผสมเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว ส่วนรูปที่ 4.9 (ค) และ (ง) แสดงลักษณะบริเวณภาคตัดขวาง พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวเกิดการแยก วิกฤตกันอย่างชัดเจน เนื่องจากสมบัติของความเป็นขั้วต่างกัน โดยเส้นใยฝ้ายมีแนวโน้มรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน

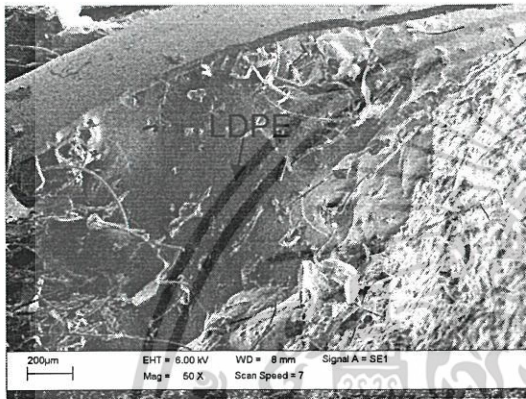
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) พื้นผิว



(ข) พื้นผิว



(ค) ภาคตัดขวาง

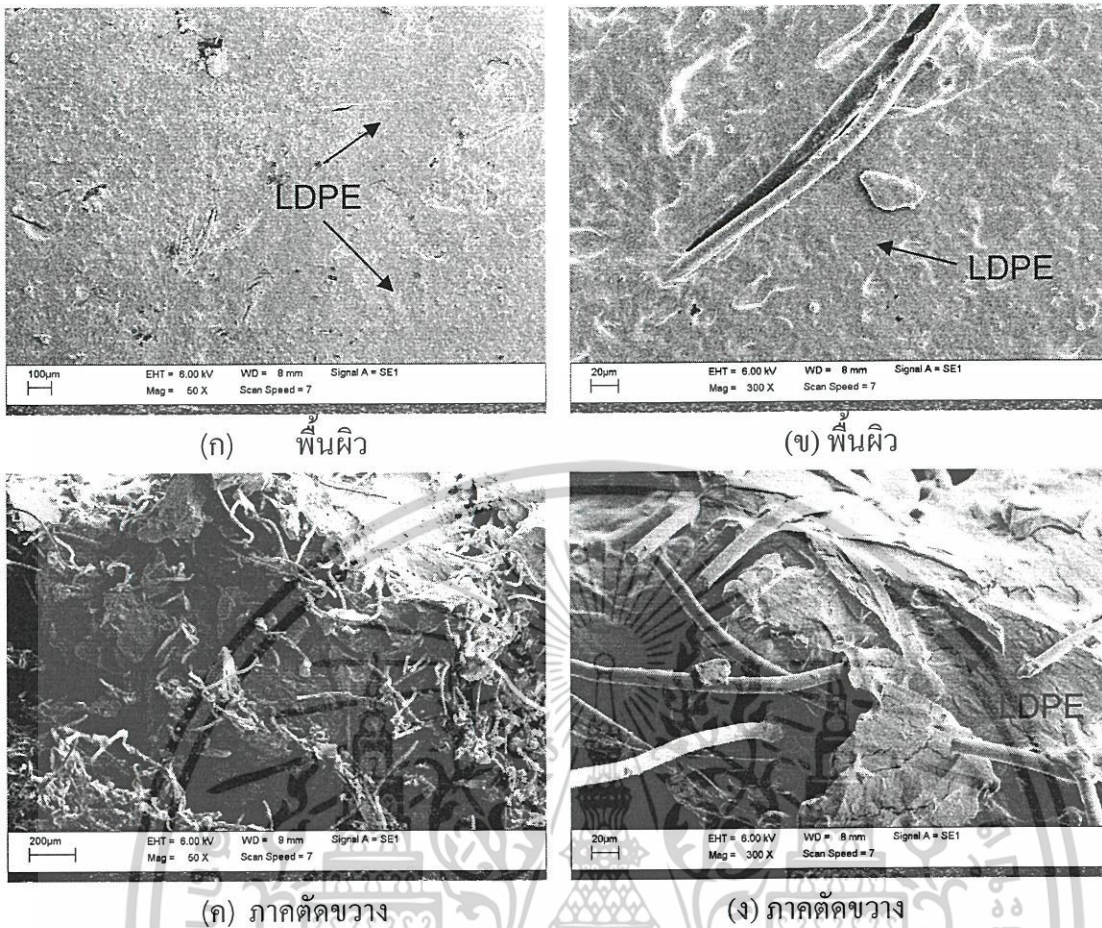


(ง) ภาคตัดขวาง

**รูปที่ 4.10** สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกันในอัตราส่วน 1:2 (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.10 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งถั่วเขียวที่ผสมเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:2 ที่กำลังขยาย 50 และ 300 เท่า ตามลำดับ พบว่าเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีการกระจายตัวในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งถั่วเขียว แต่เนื่องจากปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีมากกว่า ทำให้เห็นส่วนที่เป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำชัดเจน ส่วนรูปที่ 4.10 (ค) และ (ง) แสดงลักษณะบริเวณภาคตัดขวาง พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งถั่วเขียวมีการแยกวิธภาคกัน โดยบริเวณที่เป็นผิวเรียบเป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและบริเวณที่มีผิวขรุขระเป็นส่วนของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

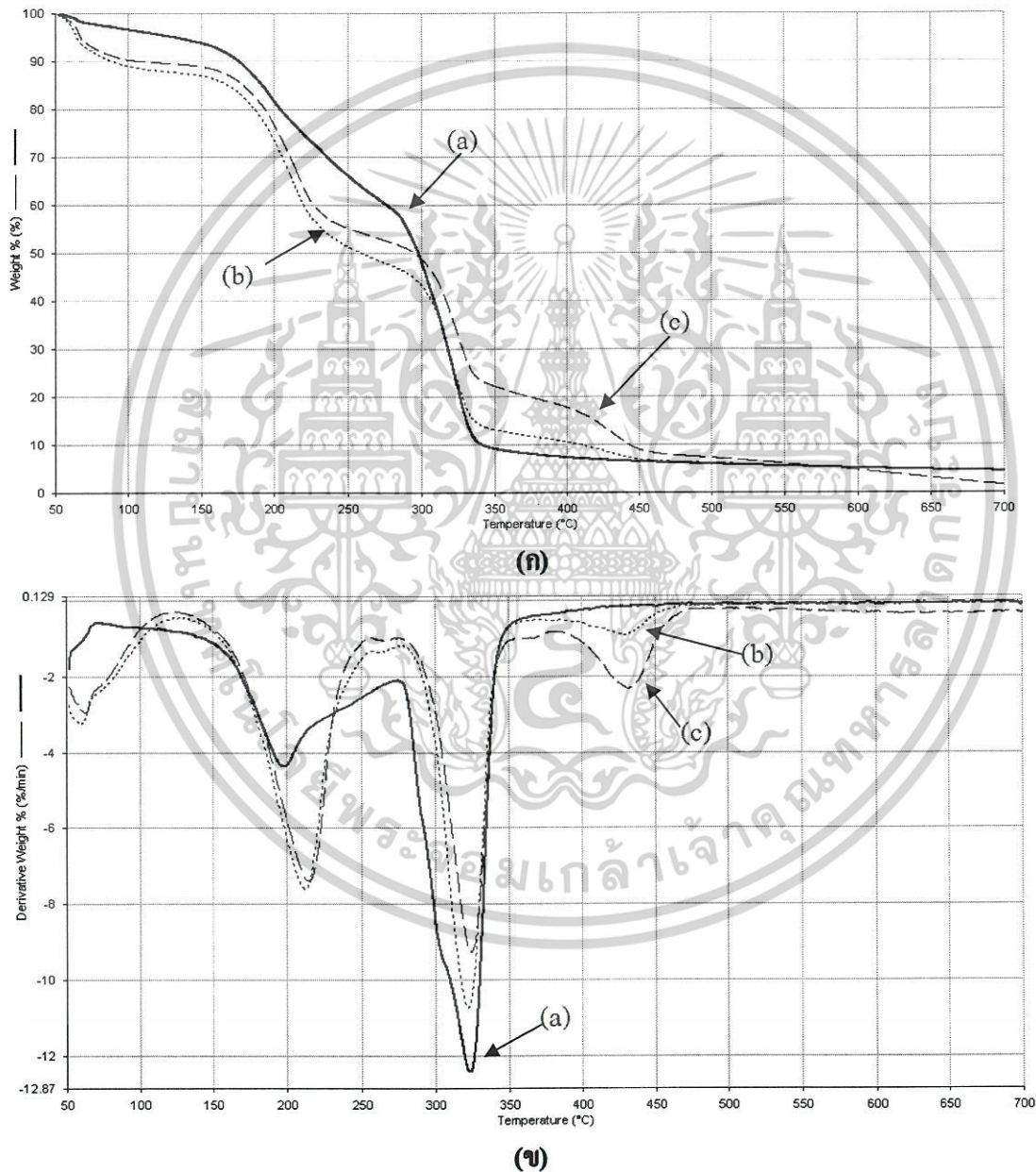


**รูปที่ 4.11** สัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกันในอัตราส่วน 2:1 (ก) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) พื้นผิวที่กำลังขยาย 300 เท่า (ค) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า (ง) ภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 300 เท่า

จากรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1 ที่กำลังขยาย 50 และ 300 เท่า ตามลำดับ พบว่าเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกระจายตัวในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว โดยปริมาณของเส้นใยฝ้ายมีมากกว่า ส่วนรูปที่ 4.11 (ค) และ (ง) แสดงลักษณะบริเวณภาคตัดขวาง พบว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว และที่บริเวณของเส้นใยฝ้ายมีอนุภาคของเม็ดแป้งเกาะอยู่เนื่องจากมีความเป็นขั้วที่เหมือนกันของแป้งและเส้นใยฝ้าย

### 4.3 สมบัติด้านความร้อน

สมบัติด้านความร้อนที่ทำการศึกษา ได้แก่ การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Onset Degradation Temperature,  $T_d$ ) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ( $N_2$ ) และใช้สถานะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 50-700 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที ให้ผลการทดลองดังนี้

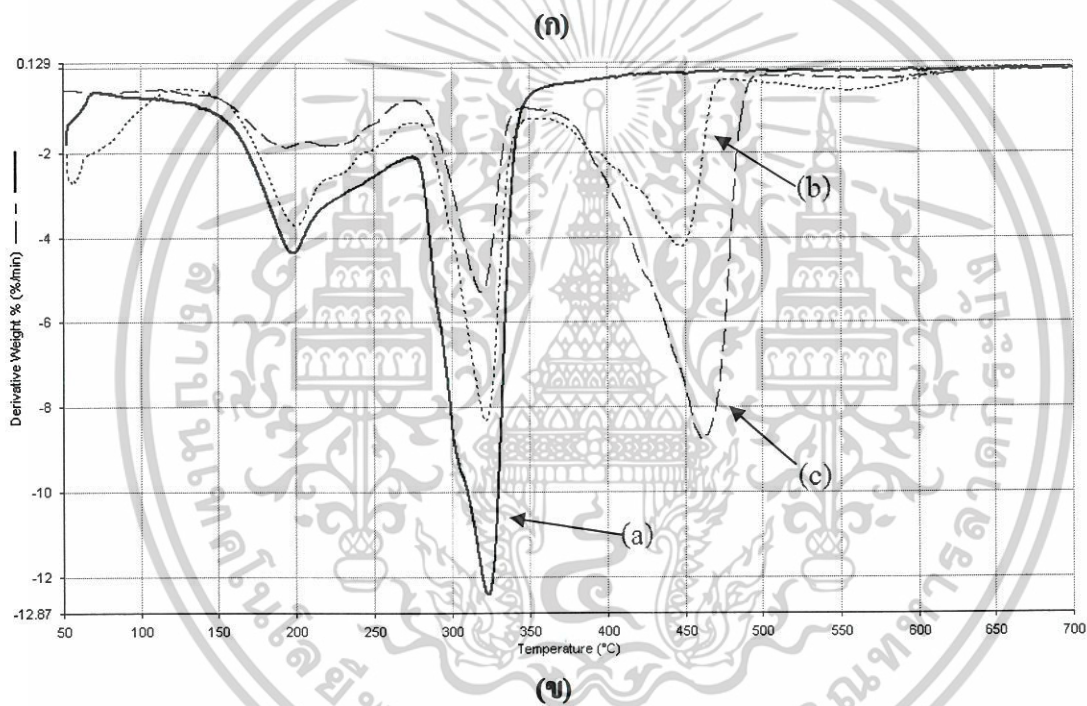
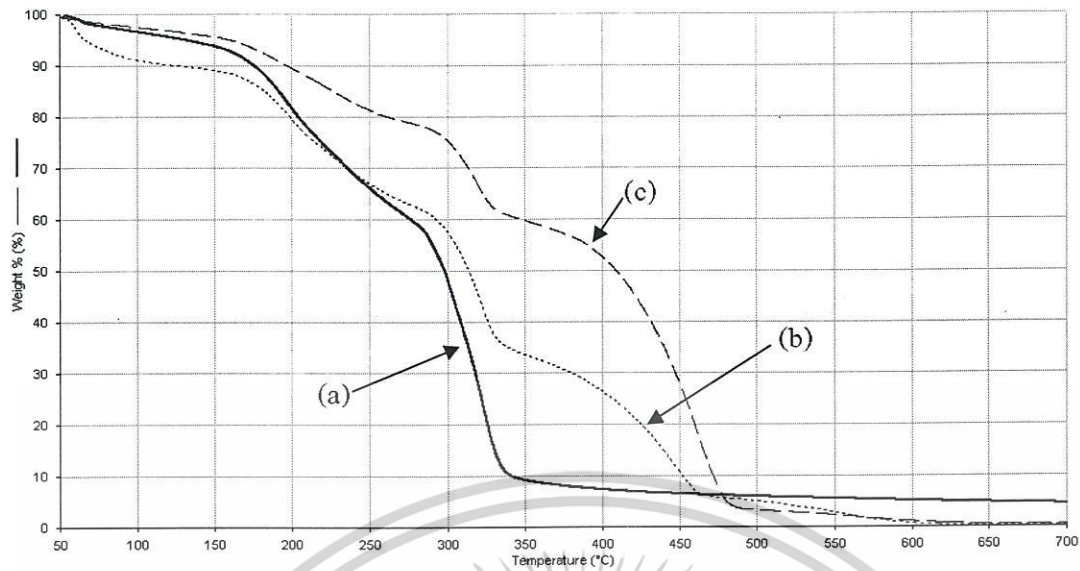


**รูปที่ 4.12** (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (a) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว

(b) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมด้วยเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก

(c) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมด้วยเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

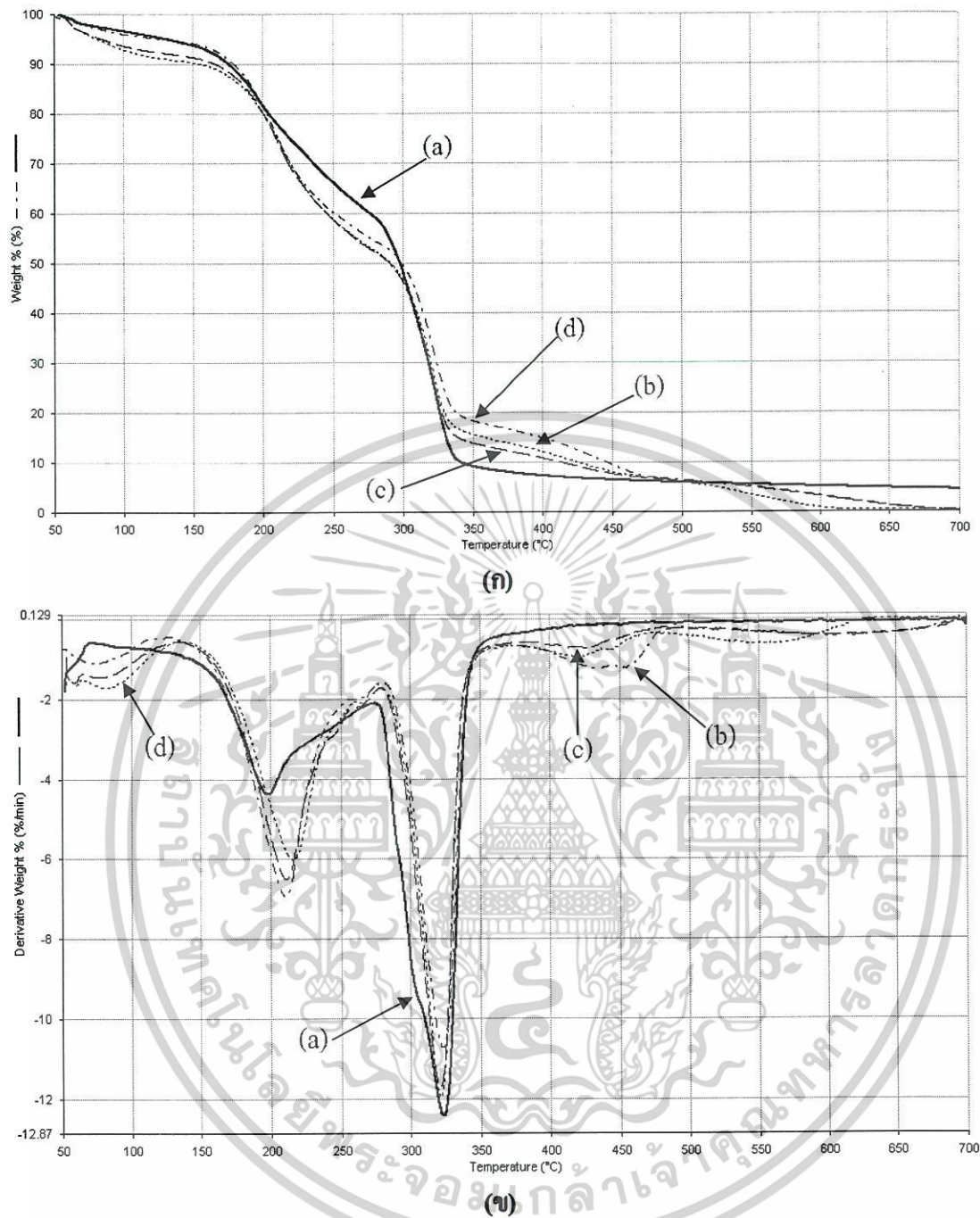


**รูปที่ 4.13** (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (a) เทอร์โมพลาสติกสตา์จจากแป้งถั่วเขียว

(b) เทอร์โมพลาสติกสตา์จผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 20 % โดยน้ำหนัก

(c) เทอร์โมพลาสติกสตา์จผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 40 % โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.14** (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (a) เทอร์โมพลาสติกสตา์รชจากแป้งถั่วเขียว

(b) เทอร์โมพลาสติกสตา์รชผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 1:1

(c) เทอร์โมพลาสติกสตา์รชผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 1:2

(d) เทอร์โมพลาสติกสตา์รชผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.4** อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวเมื่อผสมด้วยเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

เส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)			
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยฝ้าย)	ช่วงที่ 4 (พอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำ)
Pure	295.8	176.2	-	-
เส้นใยฝ้าย 5%	303.9	186.5	430.1	-
เส้นใยฝ้าย 15%	304.2	180.2	411.4	-
พอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นต่ำ 20%	303.9	175.9	-	413.4
พอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นต่ำ 40%	302.5	165.7	-	423.2

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 176.2 และ 295.8 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของกลีเซอรอลที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอรและแป้งถั่วเขียว [18,22] จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าเส้นใยฝ้ายมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซสูงขึ้น โดยสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายในปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเพิ่มขึ้นมากที่สุด มีค่าเป็น 304.2 องศาเซลเซียส โดยพบอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเส้นใยฝ้ายอยู่ที่ 411.4 องศาเซลเซียส สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซลดลงเป็น 302.5 องศาเซลเซียส โดยพบอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ อยู่ที่ 423.2 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 5 และ 15% โดยน้ำหนัก ได้แก่ 45 % 56% และ 50% ตามลำดับ ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่มีการปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปมีค่าเท่ากับ 45% 40% และ 23% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำสามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.5** อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากแป้งข้าวเจียวเมื่อผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน

เส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)			
	ช่วงที่ 1 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 2 (แป้ง)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยฝ้าย)	ช่วงที่ 4 (พอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำ)
0:0	295.8	176.2	-	-
1:1	305.2	185.2	408.6	551.4
1:2	304.8	185.3	403.2	547.1
2:1	303.8	188.3	400.5	542.7

จากรูปที่ 4.5 การศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซ โดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน ในอัตราส่วน 0:0 1:1 1:2 และ 2:1 พบว่าสูตรที่มีอัตราส่วนของเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำคิดเป็น 1:1 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่ 408.6 และ 551.4 องศาเซลเซียส สูตรอัตราส่วน 1:2 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่ 403.2 และ 547.1 องศาเซลเซียส และสูตรอัตราส่วน 2:1 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่ 400.5 และ 542.7 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่เตรียมได้มีทั้งเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นองค์ประกอบ โดยสูตรอัตราส่วน 1:1 ที่มีปริมาณเส้นใยฝ้ายเท่ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีผลทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาเรซมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวสูงขึ้นเป็น 305.2 องศาเซลเซียส ส่วนสูตรอัตราส่วน 1:2 ที่มีปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากกว่าเส้นใยฝ้ายส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาเรซมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวสูงขึ้นเป็น 304.8 องศาเซลเซียส และสูตรอัตราส่วน 2:1 ที่มีปริมาณเส้นใยฝ้ายมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีผลทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาเรซมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวสูงขึ้นเป็น 303.8 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซสูงขึ้น นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่ไม่ได้ปรับปรุงและปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน ในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ได้แก่ 45% 49% และ 51% ตามลำดับ

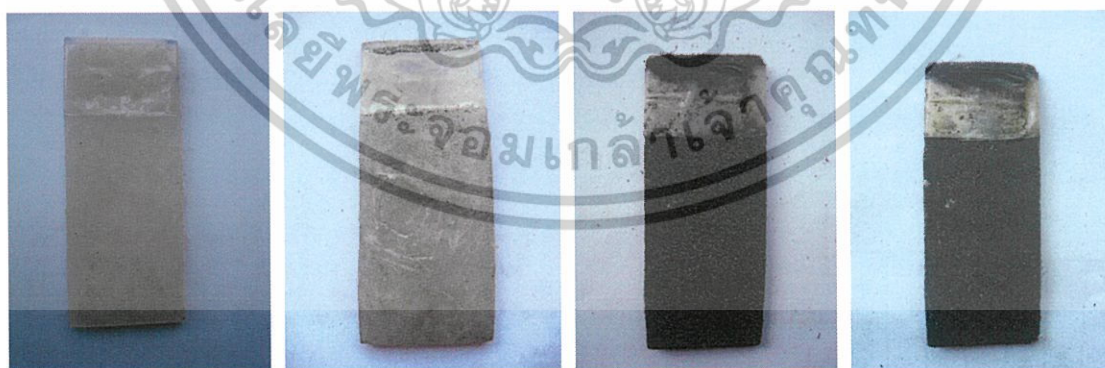
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินได้นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และ/หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในสูตรต่างๆ ดังนี้ คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายในปริมาณ 5 และ 15 % โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 20 และ 40 % โดยน้ำหนัก และสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ มาทำการทดสอบโดยการฝังดินที่มีความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 อุณหภูมิของดินเท่ากับ 32 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นของดินคงที่เป็นเวลา 28 วัน ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.15 - 4.22

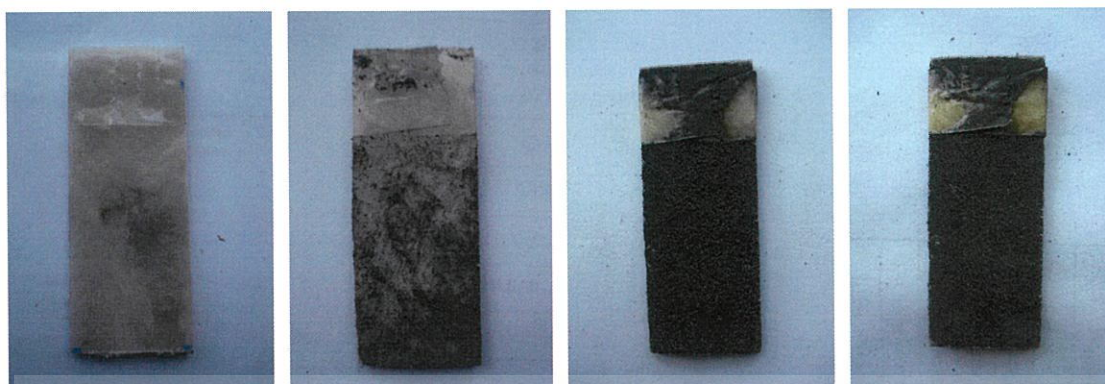


รูปที่ 4.15 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งกล้วยผสมที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.16 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งกล้วยผสมเส้นใยฝ้ายในปริมาณ 5 % โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก่อนฝังดิน

วันที่ 4

วันที่ 18

วันที่ 28

รูปที่ 4.17 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวผสมเส้นใยฝ้ายในปริมาณ 15 % โดยน้ำหนัก



ก่อนฝังดิน

วันที่ 7

วันที่ 14

วันที่ 22

รูปที่ 4.18 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 20 % โดยน้ำหนัก



ก่อนฝังดิน

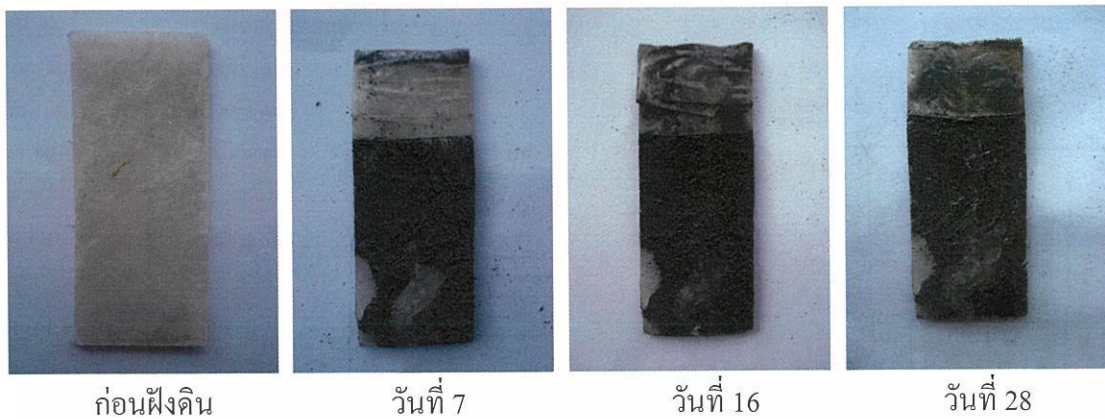
วันที่ 7

วันที่ 18

วันที่ 28

รูปที่ 4.19 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 40 % โดยน้ำหนัก

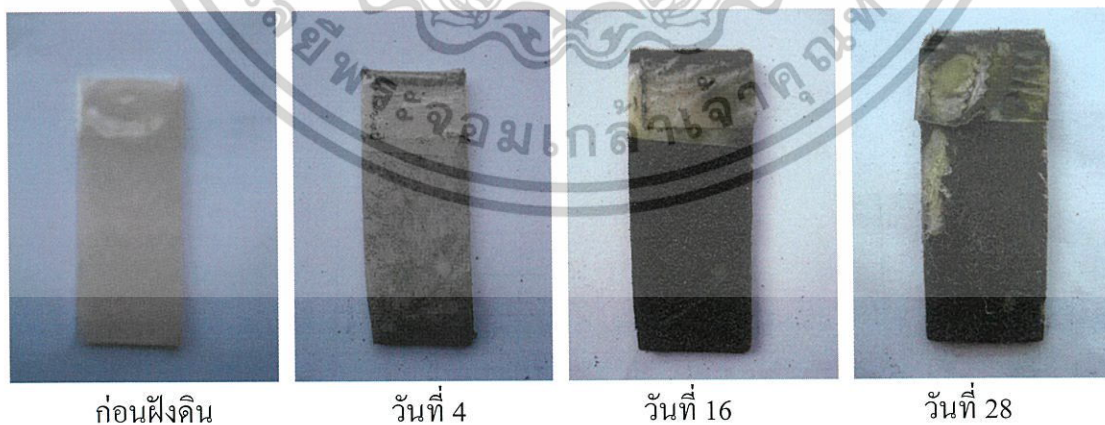
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวผสมเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:1



รูปที่ 4.21 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวผสมเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:2



รูปที่ 4.22 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวผสมเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

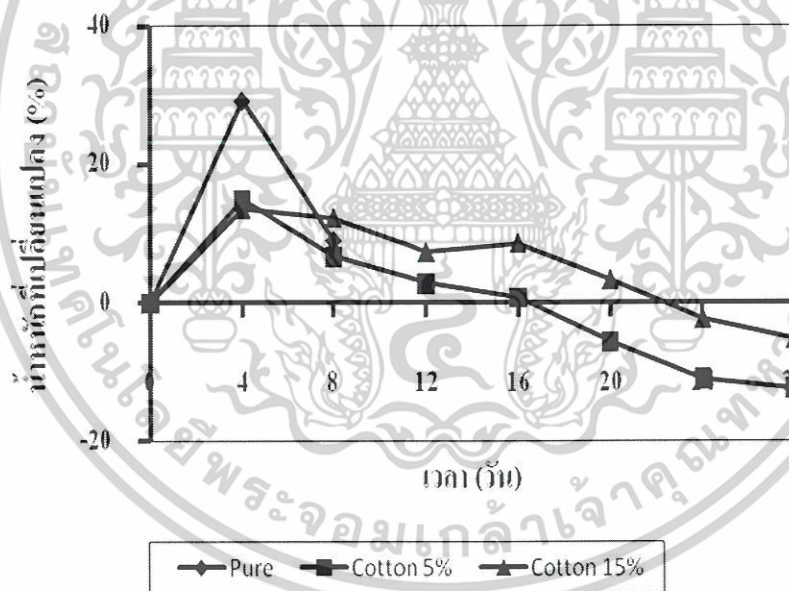
**ตารางที่ 4.6** ผลการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวเมื่อผสมด้วยเส้นใยฝ้าย และ/หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

ชิ้นงานทดสอบ	การย่อยสลาย
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล	เมื่อเวลาผ่านไป 7 วันเริ่มเกิดการย่อยสลาย บริเวณขอบชิ้นงานและการย่อยสลายเกิดขึ้นต่อไป จนชิ้นงานไม่สามารถรวมเป็นชิ้นงานเดียวกันได้ในเวลา 11 วัน
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล + เส้นใยฝ้าย 5%	เมื่อเวลาผ่านไป 10 วัน เริ่มเกิดการย่อยสลาย บริเวณขอบของชิ้นงาน
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล + เส้นใยฝ้าย 15%	เมื่อเวลาผ่านไป 9 วัน เริ่มเกิดการย่อยสลายโดยส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งหลุดออกไปก่อน
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล + LDPE 20%	เมื่อเวลาผ่านไป 2 วัน ชิ้นงานเริ่มเกิดการย่อยสลายโดยส่วนผิวด้านนอกที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งจะย่อยสลายหลุดออกไปก่อน จากนั้นเมื่อเข้าวันที่ 14 ชิ้นงานขาดเป็นสองชิ้น
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล + LDPE 40%	เมื่อเวลาผ่านไป 3 วัน ชิ้นงานเปลี่ยนเป็นสีขาว ขุ่นและแข็ง บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งเกิดการย่อยสลายหลุดออกไป และเมื่อทำการฝังดินต่อจนครบ 28 วันชิ้นงานไม่เกิดการย่อยสลาย
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล + เส้นใยฝ้าย : LDPE (1:1)	เมื่อเวลาผ่านไป 2 วัน เริ่มเกิดการย่อยสลายโดยส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งจะย่อยสลายหลุดลอกออกไปก่อน
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล + เส้นใยฝ้าย : LDPE (1:2)	เมื่อผ่านไป 3 วัน เริ่มเกิดการย่อยสลายโดยส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งจะย่อยสลายหลุดออกไปก่อน จากนั้นเมื่อเข้าวันที่ 13 ชิ้นงานเริ่มมีรอยแยกและขาดออกเป็นสองชิ้นในวันที่ 21
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล + เส้นใยฝ้าย : LDPE (2:1)	เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ชิ้นงานย่อยสลายโดยเริ่มเกิดการย่อยสลายบริเวณขอบชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.7** เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวที่มีการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย 5 และ 15 % โดยน้ำหนัก

วันที่	% น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง		
	Pure	Cotton 5%	Cotton 15%
0	0.00	0.00	0.00
4	29.19	14.84	13.62
8	9.01	6.71	12.29
12	-	2.83	7.31
16	-	0.71	8.64
20	-	-5.65	3.32
24	-	-10.95	-2.33
28	-	-12.37	5.32

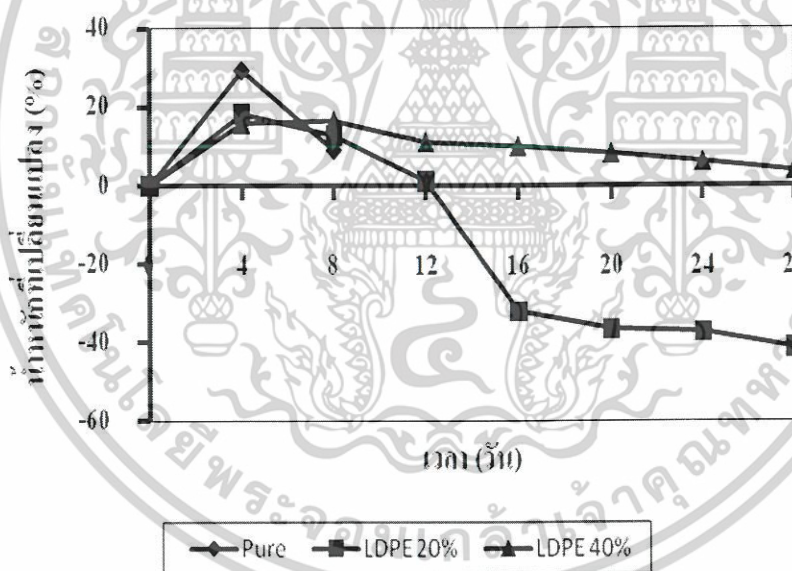


**รูปที่ 4.23** เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวที่มีการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย 5 และ 15 % โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.8** เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวเมื่อผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 20 และ 40 % โดยน้ำหนัก

วันที่	% น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง		
	Pure	LDPE 20%	LDPE 40%
0	0.00	0.00	0.00
4	29.19	18.25	15.82
8	9.01	12.77	16.55
12	-	1.09	11.15
16	-	-32.12	10.07
20	-	-36.50	8.27
24	-	-37.23	6.12
28	-	-41.24	3.96

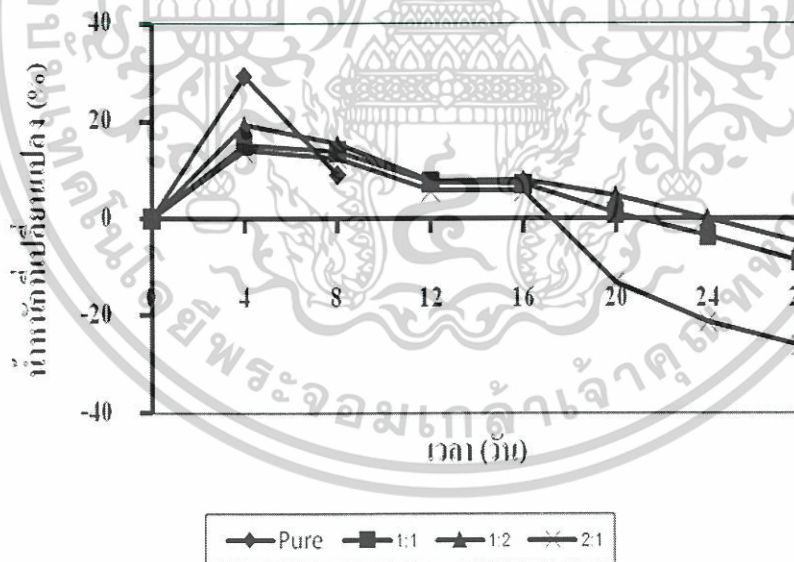


**รูปที่ 4.24** เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวเมื่อผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 20 และ 40 % โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.9** เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวที่มีการผสมเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1

วันที่	% น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง			
	Pure	Cotton : LDPE		
		1:1	1:2	2:1
0	0.00	0.00	0.00	0.00
4	29.19	15.25	19.14	13.89
8	9.01	13.83	15.18	12.35
12	-	7.45	7.59	5.56
16	-	7.09	7.92	5.56
20	-	1.06	4.62	-13.27
24	-	-3.55	0.00	-21.30
28	-	-8.87	-4.95	-26.23



**รูปที่ 4.25** เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวที่มีการผสมเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.23 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติเมื่อเวลาผ่านไป 4 วัน มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากเป็งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วทำให้มีความสามารถในการดูดความชื้นสูง และเมื่อเวลาผ่านไป 8 วัน น้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีแนวโน้มลดลง เพราะว่าการย่อยสลาย สำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมเส้นใยฝ้ายมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นในช่วงแรก เนื่องจากส่วนของเป็งและเส้นใยฝ้ายเป็นโมเลกุลที่มีขั้วทำให้ดูดความชื้นเข้าไป แต่เมื่อเวลาผ่านไปน้ำหนักของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลงเพราะส่วนของเป็งเกิดการย่อยสลาย โดยส่วนของเส้นกราฟที่มีค่าติดลบนั้นหมายถึงน้ำหนักของชิ้นงานที่เหลือมีค่าต่ำกว่าน้ำหนักของชิ้นงานเริ่มต้น และเมื่อพิจารณาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของชิ้นงานพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการเติมเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยกว่าที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.24 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นในช่วงแรก เนื่องจากเมทริกซ์ของเป็งดูดความชื้น และเมื่อเวลาผ่านไปชิ้นงานมีน้ำหนักลดลงเพราะส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของเป็งเกิดการย่อยสลาย ส่วนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำไม่เกิดการย่อยสลาย และเมื่อใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 20% โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักชิ้นงานมากกว่าเมื่อใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก เนื่องจากการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณที่น้อยกว่านั้นทำให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกระจายตัวในเมทริกซ์ของเป็งได้ดีกว่า ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคซึ่งเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ซึ่งจุดบกพร่องนั้นเป็นจุดเริ่มต้นของการย่อยสลายทำให้ชิ้นงานขาดออกจากกัน

จากรูปที่ 4.25 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน พบว่าเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนในอัตราส่วน 2:1 มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมากที่สุด เนื่องจากเกิดการย่อยสลายมากที่สุด โดยเริ่มเกิดการย่อยสลายเมื่อเวลาผ่านไป 17 วัน ชิ้นงานมีขาดออกจากกันเป็นสองชิ้น แต่ที่อัตราส่วน 1:2 พบว่ามีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยที่สุด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่ความเร็วรอบ 50 และ 100 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 120 130 140 150 และ 160 องศาเซลเซียส พบว่าภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 50 รอบ/นาที ทำให้ได้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีลักษณะทางกายภาพดีที่สุด

2. จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวโดยใช้เส้นใยฝ้ายเป็นส่วนเสริมแรงในปริมาณ 5% 10% และ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่าที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 10% ให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุด และสมบัติเชิงกลเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเส้นใยฝ้ายในปริมาณ 15% โดยน้ำหนัก

3. จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวโดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 10% 20% 30% และ 40% โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปริมาณ 40% ให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุด

4. จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้เส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำคิดเป็นอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 พบว่าเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีส่วนช่วยให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซสามารถรับแรงได้มากขึ้น โดยให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุดเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยอัตราส่วน 2:1

5. จากการศึกษาสัมมนาวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าเส้นใยฝ้ายสามารถผสมเข้ากับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวได้ เนื่องจากมีความเป็นขั้วเหมือนกัน ทำให้เส้นใยฝ้ายกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว ส่วนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวเกิดการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน เนื่องจากความเป็นขั้วที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่ได้ปรับปรุง และเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่มีการปรับปรุง

7. จากการศึกษาสมบัติด้านการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำใช้เวลาในการย่อยสลายเร็วที่สุด ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก ใช้ระยะเวลาการย่อยสลายนานที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้นควรเติมสารช่วยผสม (Compatibiliser) ซึ่งทำหน้าที่เสมือนสะพานเชื่อมวัฏภาคของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งไม่มีขั้วให้เข้ากับเมทริกซ์ของแป้งถั่วเขียวซึ่งมีขั้วได้ดีขึ้น จึงเกิดการกระจายตัวของวัฏภาคของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากขึ้นด้วย ทั้งนี้สารช่วยผสมที่นิยมใช้มักเป็นพวกพอลิเมอร์ผสมที่มีโครงสร้างแบบโคปอลิเมอร์ ไตรโคปอลิเมอร์ แบบกึ่ง และแบบสุ่ม และการเข้ากันได้ที่ดีขึ้นจะส่งผลต่อการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding) โดยจะได้ชิ้นงานที่มีรอยแยกของวัฏภาคน้อยลงด้วย

2. ศึกษาผลของพลาสติกไซเซออร์ โดยเลือกใช้พลาสติกไซเซออร์ต่างชนิดกัน เช่น พอลิเอทิลีน ไกลคอล ซอร์บิทอล เป็นต้น

3. ศึกษาการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลด้วยเทคนิคอื่นๆ เช่น การอัดรีด (Extrusion) เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M.Gaspar, Zs.Benko, G. Dogoss , K. Reczey and T. Czigany. **Reducing water absorption in compostable starch-based plastics**. Polymer Degradation and Stability, 90 (2005) 563 – 569.
- [2] X.F. Ma, J.G. Yu and Y.B. Ma. **Urea and formamide as a mixed plasticizer for thermoplastic wheat flour**. Carbohydrate Polymers, 60 (2005) 11 – 116.
- [3] ปิยะรัตน์ เรียวรักษา. **การเตรียมพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจากแป้งมันสำปะหลัง**. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม (วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บัณฑิต วิทยาลัย .2540.
- [4] บุญรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์ ประภาวดี เกตุสุดา และ วีรยา ธรรมมิกะ. **การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ**. วิทยานิพนธ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [5] [www.kasikorningmag.com](http://www.kasikorningmag.com)
- [6] <http://elibrary.eduzones.com/index>
- [7] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
- [8] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [9] <http://www.european-bioplastics.org>
- [10] เอกสารสมุนไพรรไทย สำนักวิทยบริการ สถาบันราชภัฏสมเด็จพระเจ้าพระยา
- [11] คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
- [12] <http://gotoknow.org/file/uraiwan-2008/preroop.dog>
- [13] อรุษา สรวารี. 2546. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1**. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2541.
- [14] มณฑา จันทร์เกตุเล็ก. 2541 **วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น**. ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร.
- [15] N. Wang, J. Yu, X. Ma and Y. Wu . **The influence of citric acid on the properties of thermoplastic starch / linear low – density polyethylene blends**. Carbohydrate Polymers, 67 (2007) 446-453.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] X. Ma and J. Yu. **The plasticizers containing amide groups for thermoplastic starch.** Carbohydrate Polymers, 57 (2004) 197-203.
- [17] D. Schlemmer, M.J.A. Sales and I.S. Resck. **Degradation of different polystyrene / thermoplastic starch blends buried in soil.** Carbohydrate Polymers, 75 (2008) 58-62.
- [18] A.A.S. Curvelo, A.J.F. de Carvalho and J.A.M. Agnelli. **Thermoplastic starch – cellulosic fibers composites : preliminary results.** Carbohydrate Polymers, 45 (2001) 183 -188.
- [19] M. Wollerdorfer and H. Bader. **Influence of natural fibres on the mechanical properties of biodegradable polymer.** Industrial Crops and Products, 8 (1998) 105 -112.
- [20] S.S. Paes, I. Yakimets and J.R. Mitchell. **Influence of gelatinization process on functional properties of cassava starch films.** Food Hydrocolloids, 22 (2008) 788 – 797.
- [21] A.J.F. Carvalho, M.D. Zambon, A.A.S. Curvelo and A. Gandini. **Size exclusion chromatography characterization of thermoplastic starch composites: Influence of plasticizer and fibre content.** Polymer, 46 (2005) 9863 - 9870.
- [22] M.F. Huang, J.G. Yu and X.F. Ma. **Studies on the properties of Montmorillonite-reinforced thermoplastic starch composites.** Polymer, 45 (2004) 7017 - 7023.
- [23] Y. Lu, L. Tighzert, P. Dole and D. Erre. **Preparation and properties of starch thermoplastics modified with waterborne polyurethane from renewable resources.** Polymer, 46 (2005) 9863 - 9870.
- [24] A.L. Da Roz, A. J. F. Carvalho, A. Gandind and A. A. S. Curvelo. **The effect of plasticizers on thermoplastic starch composition obtained by melt processing.** Carbohydrate Polymers, 63 (2006) 417 – 424.
- [25] ASTM D 638. **Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic.** Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1992.
- [26] ASTM D 2240 **Stardard Test Method for Rubber Property-Duroter Hardness.** West Conshohocken : American Society for Testing and Materails, 2000.
- [27] R. Chandra and R. Rustgi. **Biodegradable polymers.** Prograss in Polymer Science , 23 (1998) 1273 – 1335.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] ผศ.ดร.เจริญ นาคะสรรค์. 2546 .**เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก**. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ตารางแสดงลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอลที่ปริมาณต่างๆ ขึ้นรูปด้วยการอัดขึ้นรูป

แป้งข้าวเหนียว (phr)	กลีเซอรอล (phr)	ลักษณะทางกายภาพ
100	25	ชิ้นงานมีลักษณะแตกป่นเป็นผงสีขาว ไม่สามารถขึ้นรูปได้
100	50	ชิ้นงานมีสีขาวขุ่น สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้มากขึ้น บริเวณขอบชิ้นงานแตกป่นเป็นผงสีขาว
100	75	ชิ้นงานมีความเหนียวมากขึ้น สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นที่ต่อเนื่องกันได้ แต่ยังมีสีขาวขุ่นอยู่
100	100	ชิ้นงานมีความเหนียวคล้ายยาง ขึ้นรูปเป็นแผ่นที่ต่อเนื่องกันได้ มีลักษณะใสตลอดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวโพดโดยใช้เส้นใยฝ้ายและ  
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

## แรงดึง

ชนิดทดสอบ	Load (N)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 140 °C/50 rpm	7.14±0.98
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 5%	7.86±2.41
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 10%	8.65±2.87
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 15%	8.05±3.02
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 10%	4.71±1.07
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 20%	5.86±1.57
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 30%	6.16±1.94
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 40%	9.23±2.48
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	2.69±0.78
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	13.75±1.32
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	16.00±1.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ความเค้น

ชนิดทดสอบ	Stress at max load (MPa)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 140 °C/50 rpm	0.55±0.11
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 5%	0.53±0.13
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 10%	0.55±0.10
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 15%	0.40±0.12
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 10%	0.38±0.07
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 20%	0.48±0.07
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 30%	0.53±0.09
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 40%	0.70±0.16
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	0.28±0.22
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	0.97±0.31
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	1.39±0.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การดึงยืด

ชนิดทดสอบ	Extension at max load (mm)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 140 °C/50 rpm	8.36±0.72
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 5%	5.39±0.99
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 10%	2.79±0.28
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 15%	1.68±0.56
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 10%	4.32±1.16
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 20%	3.04±1.25
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 30%	2.24±0.59
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 40%	1.89±0.48
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	3.18±0.10
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	3.84±0.50
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	4.24±0.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ความเครียด

ชนิดทดสอบ	Stain at max load (%)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 140 °C/50 rpm	13.67±0.97
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 5%	6.12±1.43
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 10%	3.59±0.29
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 15%	2.63±0.56
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 10%	6.94±0.69
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 20%	5.29±1.41
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 30%	3.00±0.82
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 40%	2.77±0.86
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	3.25±2.67
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	10.17±3.08
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	13.52±2.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## มอดูลัส

ชั้นทดสอบ	Modulus (MPa)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 140 °C/50 rpm	2.20±0.33
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 5%	4.39±1.87
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 10%	8.77±2.29
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 15%	5.66±2.41
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 10%	3.58±1.93
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 20%	5.80±0.99
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 30%	9.95±1.96
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 40%	18.02±2.57
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	4.02±1.77
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	7.81±2.10
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	15.22±3.12

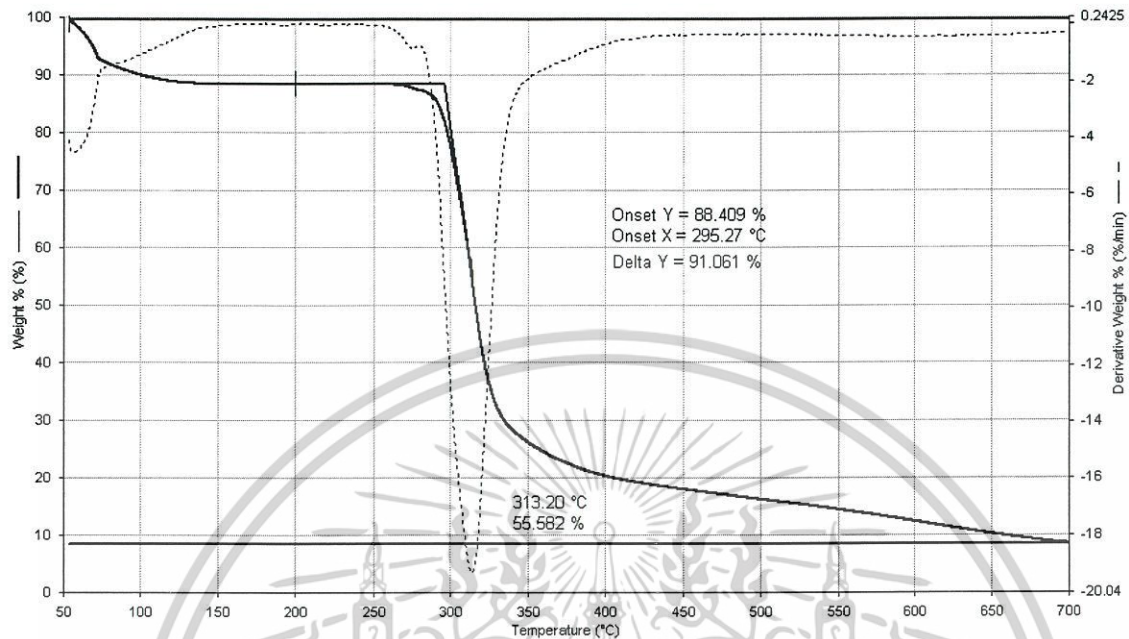
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ความแข็งกด**

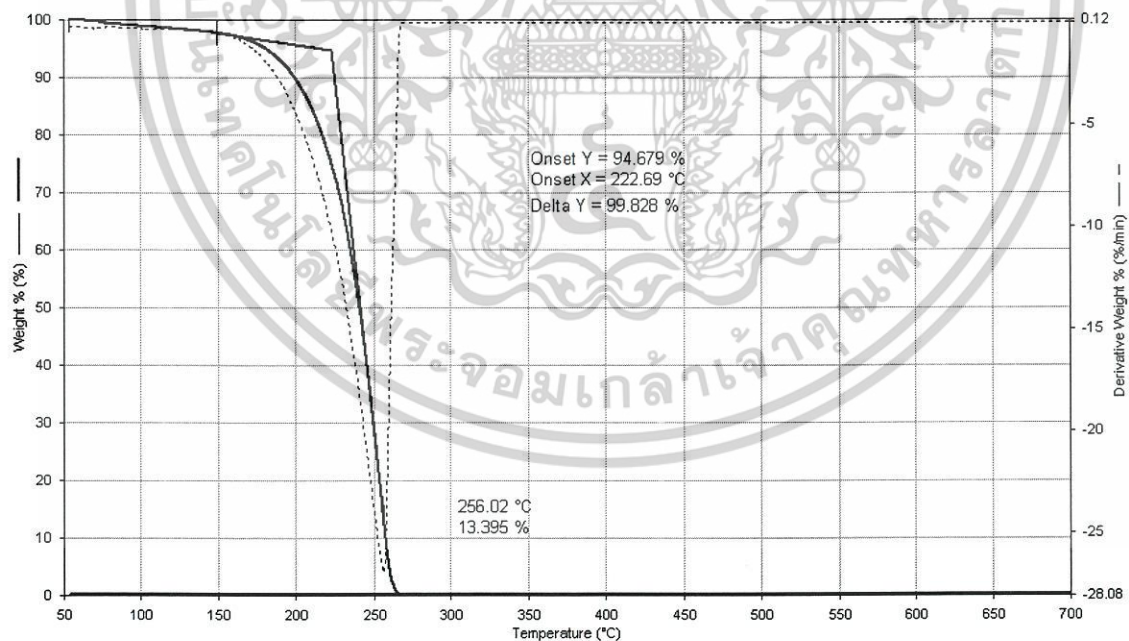
ชนิดทดสอบ	Hardness (Shore A)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 140 °C/50 rpm	44.90±2.33
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 5%	61.80±3.74
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 10%	67.30±3.49
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 15%	65.70±3.34
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 10%	49.10±1.51
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 20%	64.30±1.77
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 30%	75.70±1.89
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 40%	81.10±3.18
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	54.00±2.55
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	58.10±2.73
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	64.00±2.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค  
สมบัติทางความร้อน

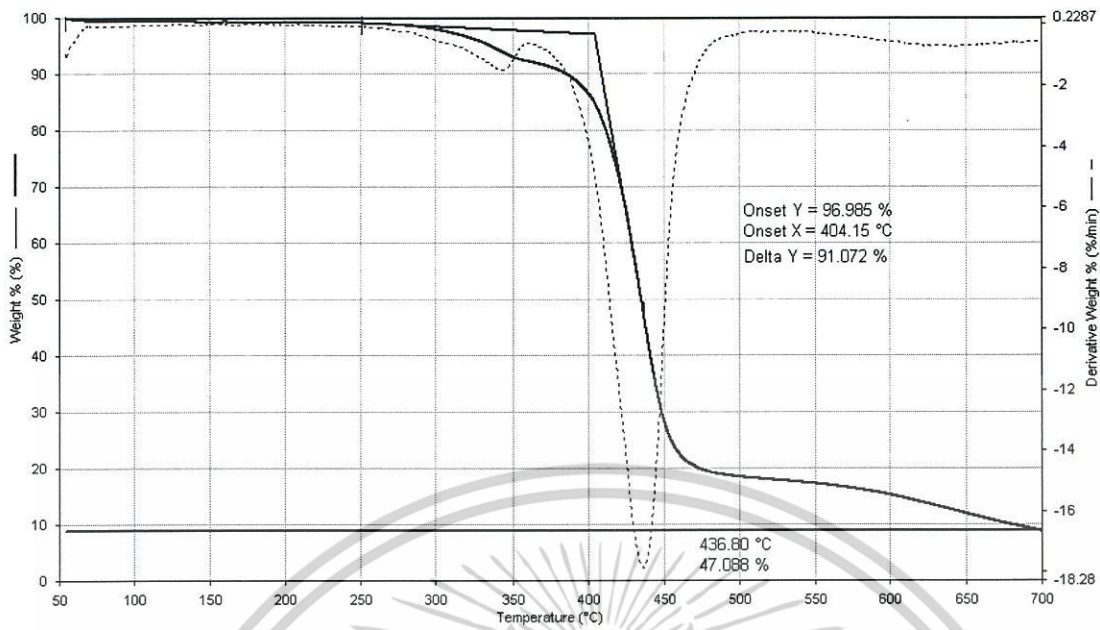


รูปภาพแสดง TGA และ DTG ของแป้งถั่วเขียว

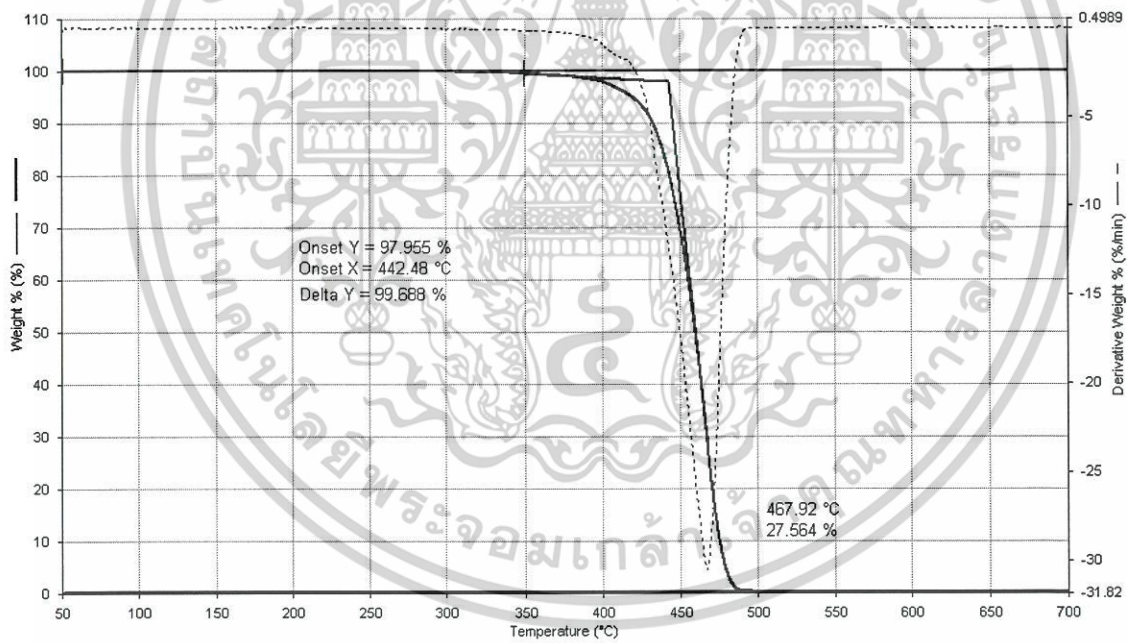


รูปภาพแสดง TGA และ DTG ของกลีเซอรอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

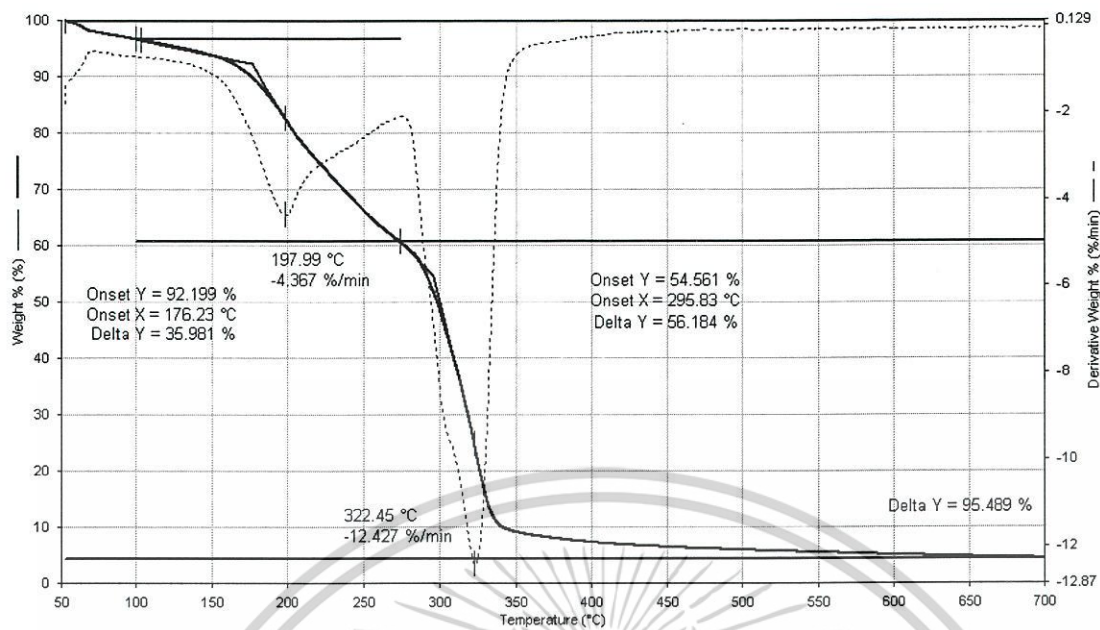


รูปภาพแสดง TGA และ DTG ของเส้นใยฝ้าย

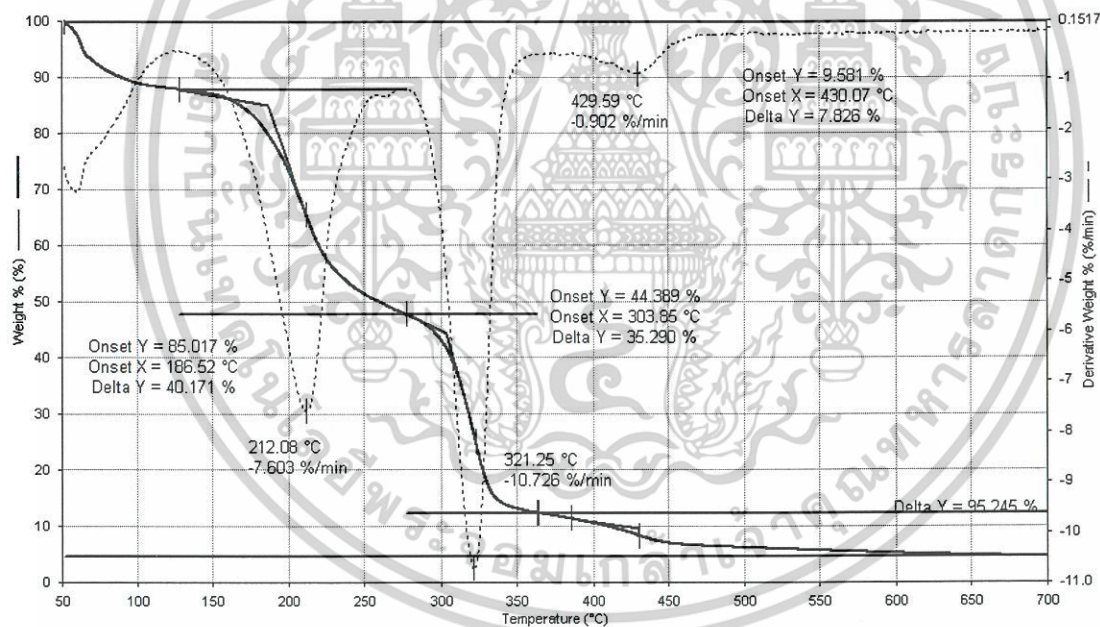


รูปภาพแสดง TGA และ DTG ของพอลิเอทิลีนทรีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

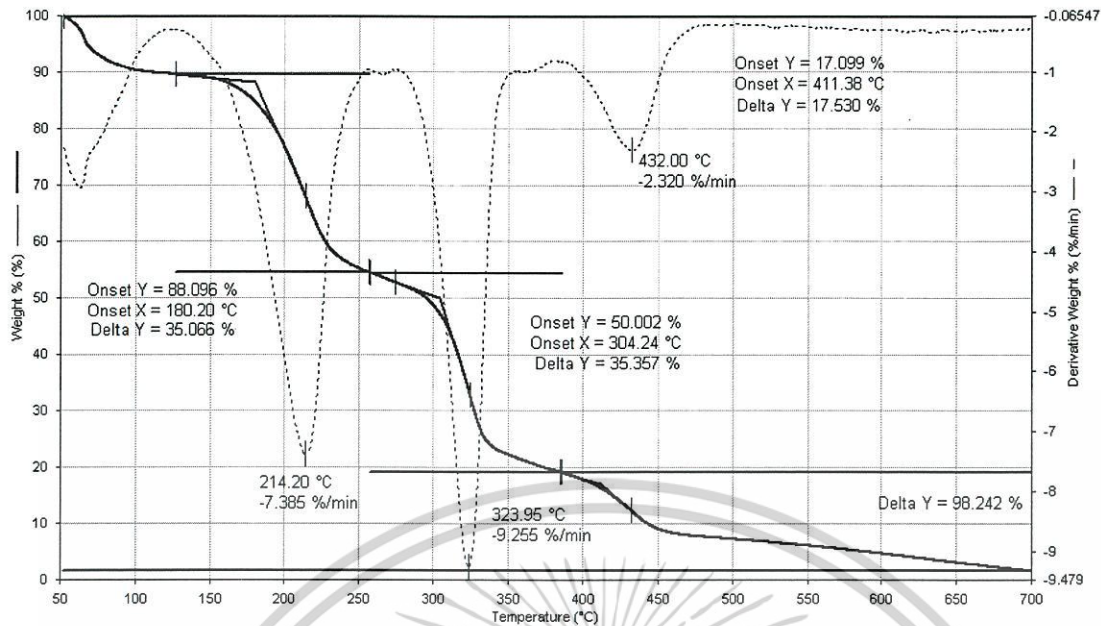


รูปภาพแสดง TGA และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียว

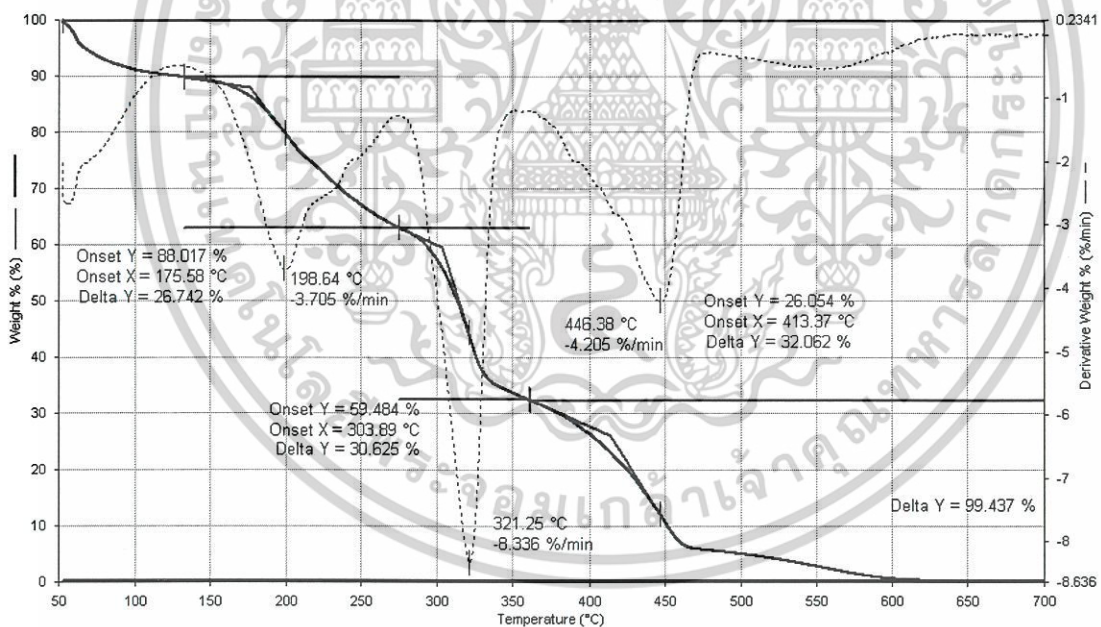


รูปภาพแสดง TGA และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยเส้นใยผ้า 5% โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

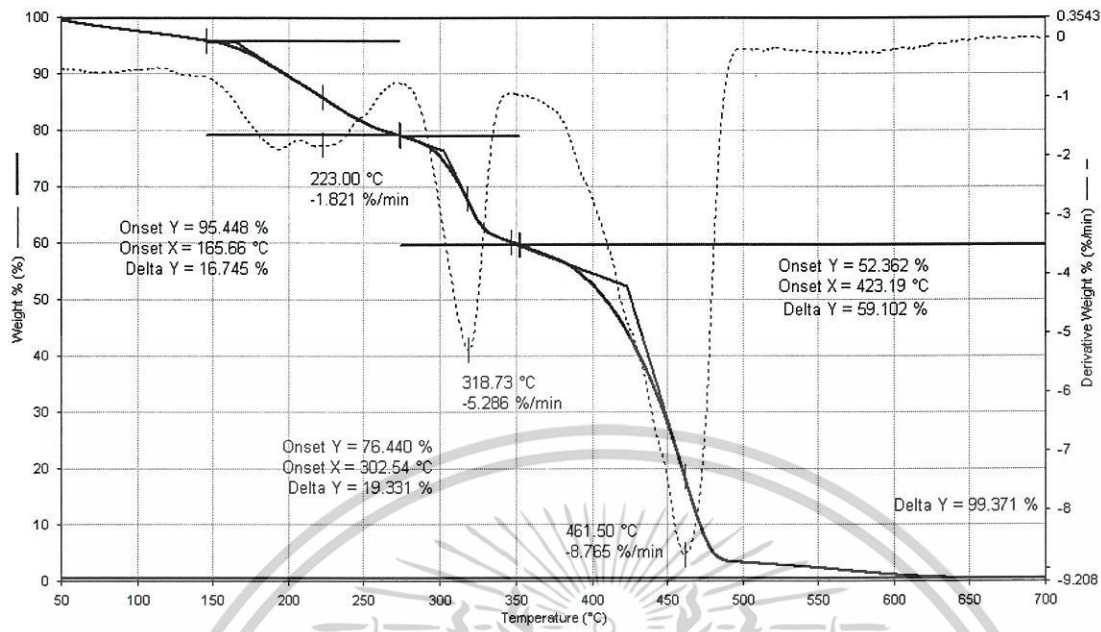


**รูปภาพแสดง TGA และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยเส้นใยฝ้าย 15% โดยน้ำหนัก**

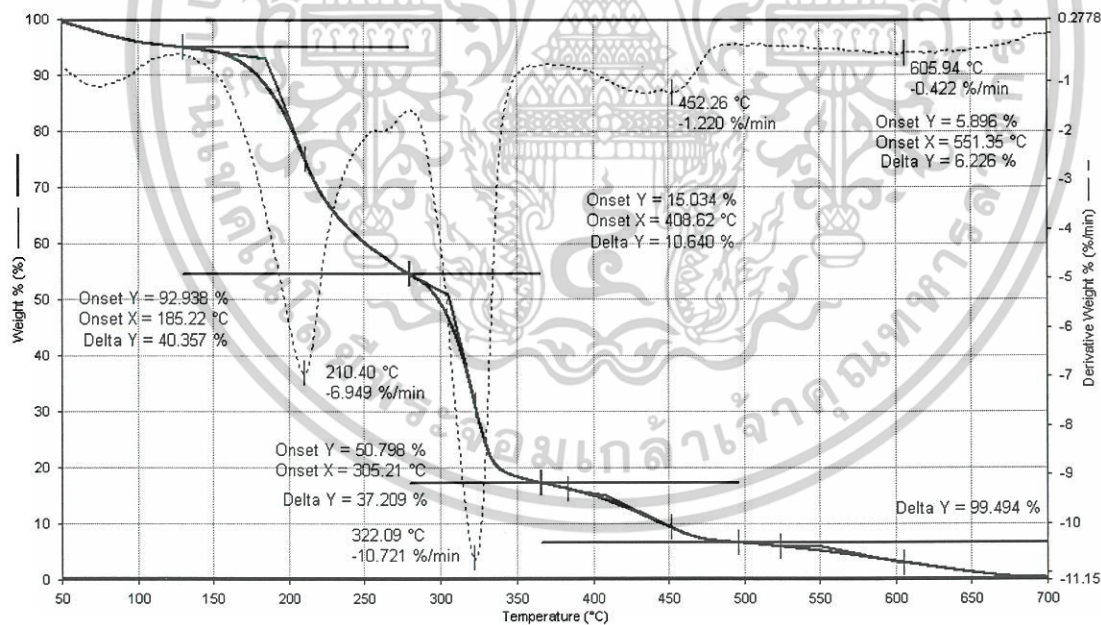


**รูปภาพแสดง TGA และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ 20 % โดยน้ำหนัก**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

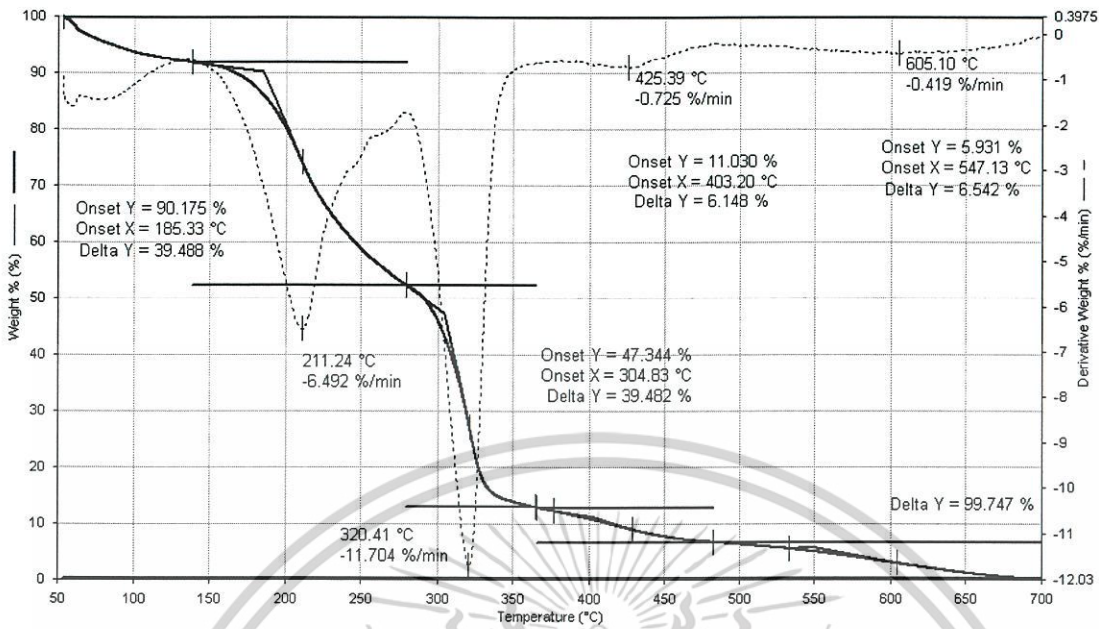


**รูปภาพแสดง** TGA และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 40% โดยน้ำหนัก

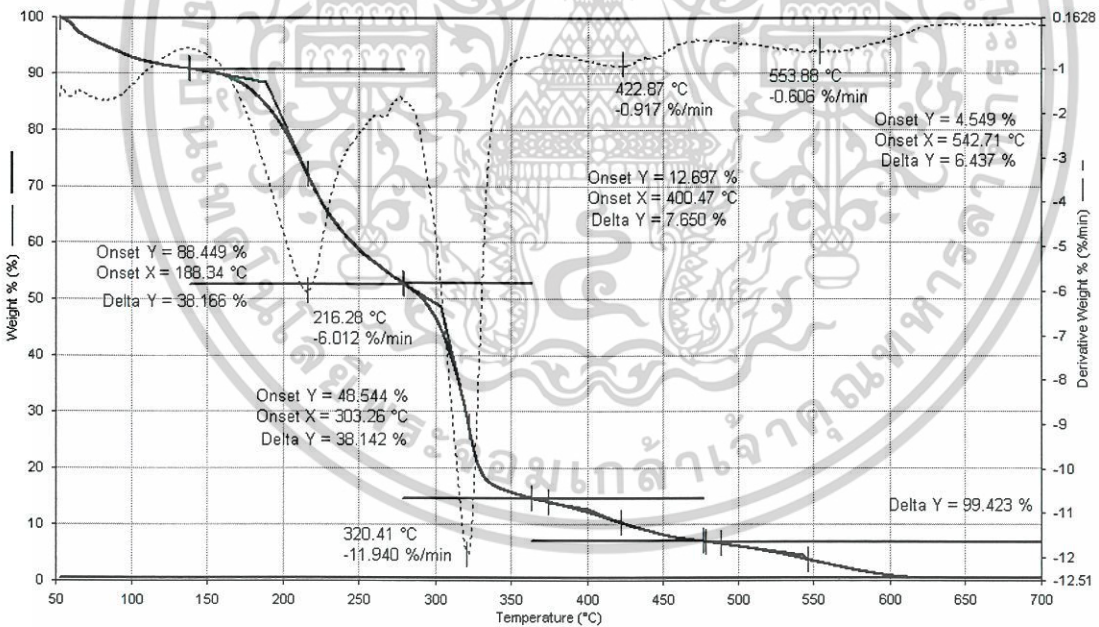


**รูปภาพแสดง** TGA และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งถั่วเขียวผสมด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในอัตราส่วน 1:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปภาพแสดง TGA และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวผสมด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในอัตราส่วน 1:2**



**รูปภาพแสดง TGA และ DTG ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวผสมด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ในอัตราส่วน 2:1**

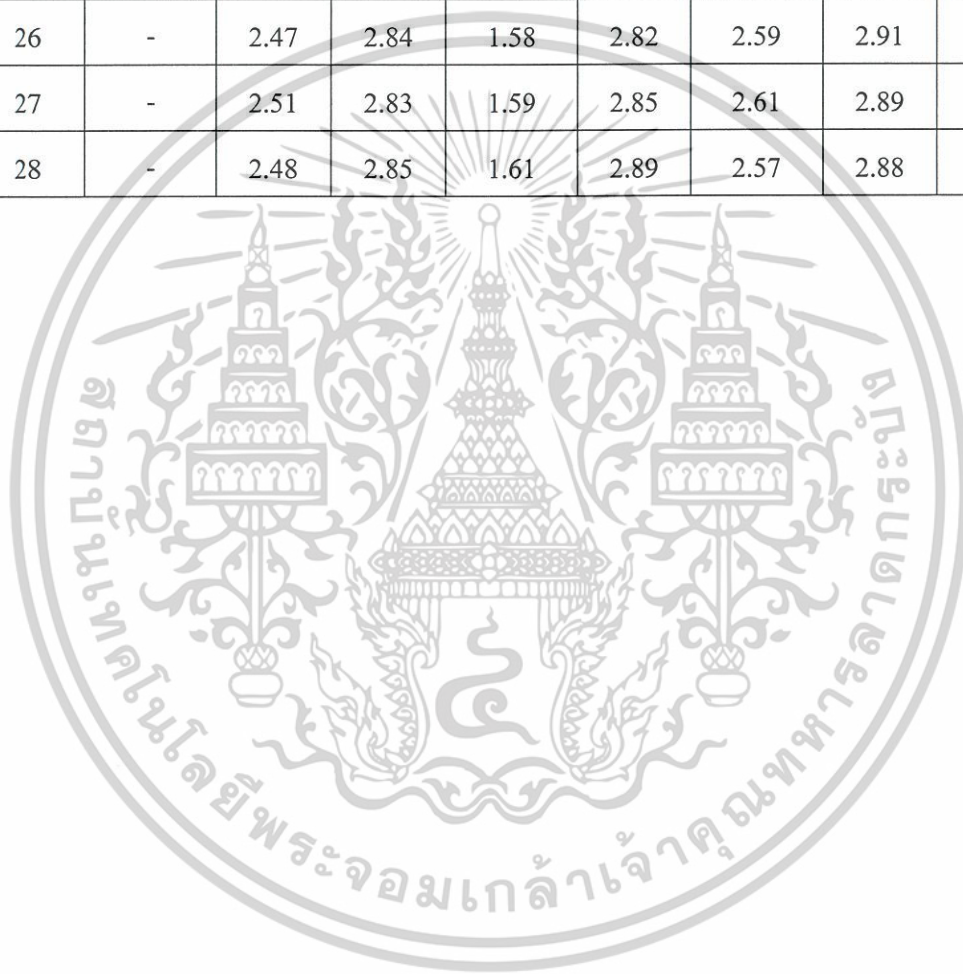
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ง**  
**ตารางน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดิน**

วันที่	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (กรัม)							
	Pure	Cotton Fiber		LDPE		Cotton : LDPE		
		5%	15%	20%	40%	1:1	1:2	2:1
0	3.22	2.83	3.01	2.74	2.78	2.82	3.03	3.24
1	4.14	3.22	3.52	3.24	3.04	3.23	3.76	3.85
2	4.18	3.23	3.53	3.22	3.06	3.27	3.78	3.81
3	4.15	3.24	3.51	3.23	3.21	3.26	3.58	3.74
4	4.16	3.25	3.42	3.24	3.22	3.25	3.61	3.69
5	4.08	3.18	3.41	3.22	3.24	3.24	3.53	3.68
6	3.82	3.11	3.32	3.18	3.23	3.22	3.52	3.71
7	3.35	3.06	3.34	3.15	3.25	3.23	3.51	3.72
8	3.51	3.02	3.38	3.09	3.24	3.21	3.49	3.64
9	1.72	3.01	3.41	2.98	3.12	3.15	3.45	3.63
10	1.83	2.99	3.43	2.92	3.13	3.14	3.41	3.62
11	0.93	2.92	3.32	2.84	3.05	3.05	3.32	3.52
12	-	2.91	3.23	2.77	3.09	3.03	3.26	3.42
13	-	2.89	3.28	2.75	3.08	3.05	3.28	3.44
14	-	2.85	3.24	2.73	3.08	3.03	3.28	3.45
15	-	2.84	3.24	2.69	3.05	3.01	3.25	3.44
16	-	2.85	3.27	1.86	3.06	3.02	3.27	3.42
17	-	2.75	3.17	1.81	3.06	2.97	3.24	3.36
18	-	2.74	3.15	1.79	2.99	2.97	3.25	2.8
19	-	2.71	3.13	1.76	3.05	2.87	3.27	2.82
20	-	2.67	3.11	1.74	3.01	2.85	3.17	2.81
21	-	2.67	3.08	1.71	2.97	2.82	3.16	2.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (กรัม)							
	Pure	Cotton Fiber		LDPE		Cotton : LDPE		
		5%	15%	20%	40%	1:1	1:2	2:1
22	-	2.54	3.04	1.69	2.98	2.78	3.09	2.62
23	-	2.51	3.04	1.71	2.96	2.76	3.02	2.62
24	-	2.52	2.94	1.72	2.95	2.72	3.03	2.55
25	-	2.49	2.88	1.63	2.88	2.63	2.95	2.49
26	-	2.47	2.84	1.58	2.82	2.59	2.91	2.37
27	-	2.51	2.83	1.59	2.85	2.61	2.89	2.42
28	-	2.48	2.85	1.61	2.89	2.57	2.88	2.39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้