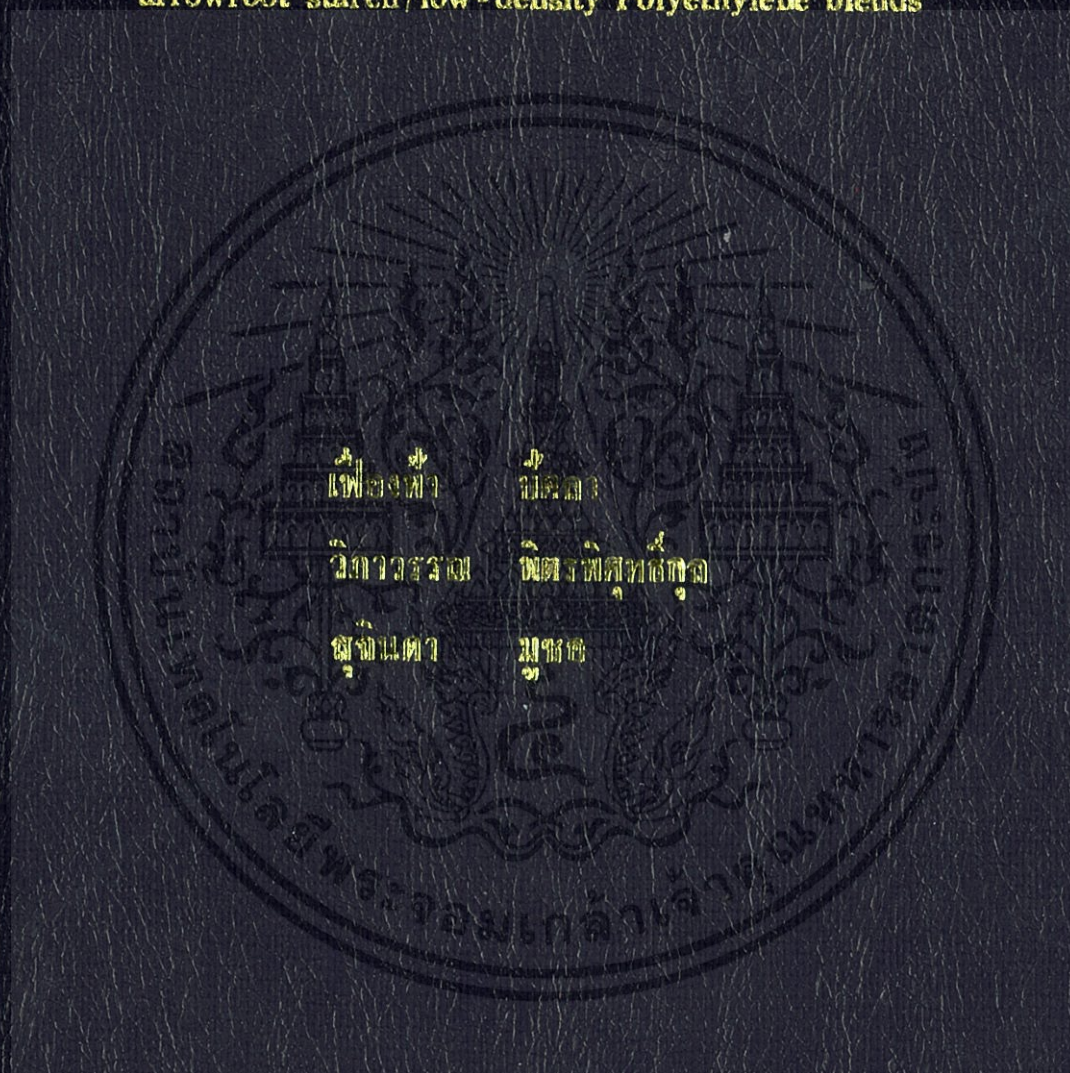


ผลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีคุณสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่ยังเตรียม  
จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาस्टิกสไตรีน/เอทิลีน และแป้งข้าวเย็นที่มีคุณสมบัติ  
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

Effect of cellulosic fibers on properties of biodegradable thermoplastic  
arrowroot starch/low-density Polyethylene blends



โครงการพิเศษงานวิจัยในหน่วยงานของงานการศึกษาตามหลักสูตร วิชาสาขาวิศวกรรม  
สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา ๒๕๕๕

ผลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียม  
จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจาก แป้งท้าวยายม่อมและ  
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

**Effect of cellulosic fibers on properties of biodegradable thermoplastic  
arrowroot starch / low -density Polyethylene blends**



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการดำเนินงานเพื่อการศึกษานี้เป็นลิขสิทธิ์ของผู้นิพนธ์และขอสงวนสิทธิ์ในชื่อการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อปีการศึกษา 2555 ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EFFECT OF CELLULOSIC FIBERS ON PROPERTIES OF  
BIODEGRADABLE THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH /  
POLYETHYLENE BLENDS**



**THE SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE IN  
INDUSTRIAL CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ **KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**โครงการพิเศษ**

ผลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกแป้งท้าวายม่อมและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

Effect of cellulosic fibers on properties of biodegradable thermoplastic arrowroot starch / low -density Polyethylene blends

**นักศึกษา**

นางสาวเฟื่องฟ้า ปัตลา รหัส 52050212  
นางสาววิภาวรรณ พิตรพิศุทธิกุล รหัส 52050234  
นางสาวสุจินดา มุขอ รหัส 52050248

**ปริญญา**

วิทยาศาสตรบัณฑิต

**สาขาวิชา**

เคมีอุตสาหกรรม


**ปีการศึกษา**

2555

**อาจารย์ที่ปรึกษา**

รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. นราธิป วิทยากร	
ดร. อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล	
รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ	

**ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์**

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** ผลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งท้าว ยายม่อมและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

<b>นักศึกษา</b>	นางสาวเฟื่องฟ้า	ปีตลา	52050212
	นางสาวสุจินดา	มุชอ	52050248
	นางสาววิภาวรรณ	พิตรพิศุทธิกุล	52050234

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต

**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม

**ปีการศึกษา** 2555

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของเส้นใยเซลลูโลสที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาarchจากแป้งท้าว ยายม่อม (Thermoplastic Arrowroot Starch, TPAS) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเมอร์ผสมเตรียมได้จากผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย (Cotton fibre) และเส้นใยนุ่น (Kapok fibre) ที่ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมมาศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อนและสมบัติการย่อยสลายในการแสดงผลการทดลองพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยนุ่นมีการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดและพบว่าเมทริกซ์ของ TPAS/LDPE และเส้นใย สามารถเข้ากันได้ดีโดยสังเกตจากการเปียกบนพื้นผิวของเส้นใยเมื่อพิจารณาผลจาก SEM นอกจากนี้ค่าแรงดึง ความเค้นดึง และ โมดูลัสมีค่าสูงสุดในพอลิเมอร์ผสมจากการเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น 20 เปอร์เซ็นต์ ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง จากการเติมเส้นใยฝ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยประการใด กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2524-5000

**Thesis Title** Effect of cellulosic fibers on properties of biodegradable thermoplastic arrowroot starch / low -density Polyethylene blends

**Student** Miss.Vipawan Pitpisutkul 52050234

Miss. Sujinda Musor 52050248

Miss.Fueangfa Pattala 52020212

**Degree** Bachelor of science

**Program** Industrial Chemistry

**Year** 2012

**Thesis Advisor** Assoc.Prof.Dr.Jatarat Prachayawarakorn

### Abstract

The research aimed to focus on the effect of cellulosic fibers on properties of biodegradable thermoplastic arrowroot starch (TPAS) plasticized by glycerol. The TPAS were mixed with low-density polyethylene (LDPE) by internal mixer at the temperature of 140 °C and the rotor speed of 40 rpm. Then, the TPAS/LDPE were injected by injection molding machine to produce the tested specimens. After that, the TPAS/LDPE specimens were modified with cotton fibers and kapok fibers at 5 10 15 and 20 % by weight starch. Different TPAS/LDPE specimens were analyzed for physical, mechanical, morphological, thermal and biodegradable properties. The results showed that the lowest water absorption was found in the TPAS/LDPE modified by kapok fibers, From SEM micrographs, the phase compatibility between the fibers and the TPAS/LDPE matrix was observed by the fiber surface wetting. In addition, the greatest load, stress at maximum load and Young's modulus were obtained from the TPAS/LDPE matrix reinforced by 20 % kapok fibers. Furthermore, thermal degradation temperature of the TPAS/LDPE blends reinforced unchanged by the addition of the cotton fibers

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษเป็นอย่างสูงที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และการช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. นราธิป วิทยากร และ ดร. อำนวย เพิ่มทรัพย์สกุล ที่กรุณาเป็นกรรมการ ตลอดจนให้คำแนะนำ เพื่อให้โครงการพิเศษนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุคใจ สอนสะอาด ที่ให้ความรู้ และข้อแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัยโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งผู้ที่ให้โอกาสต่อคณะผู้จัดทำ จนทำให้ประสบความสำเร็จในการศึกษา

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวเฟื่องฟ้า ปัตลา

นางสาววิภาวรรณ พิตรพิศุทธิ์กุล

นางสาวสุจินดา มุขอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	I
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูปภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 พลาสติก	4
2.2 พอลิเอทิลีน	4
2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีน	5
2.3 ประเภทของพลาสติกที่ย่อยสลายได้	5
2.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย	7
2.4.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน	7
2.4.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป	8
2.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์	8
2.4.3.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.3.2 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	8
2.4.3.3 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด	8
2.4.3.4 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน	8
2.5.3.5 การทดสอบโดยการฝังดิน	9
2.5 แป้ง	9
2.5.1 แหล่งของแป้ง	9
2.5.1.1 อะไมโลส	10
2.5.1.2 อะไมโลเพกทิน	11
2.5.2 พลาสติกสลายได้ทางชีวภาพจากแป้ง	11
2.5.2.1 การใช้แป้งเป็นฟิลเลอร์ หรือ สารตัวเติมในพลาสติก	11
2.5.2.2 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช	12
2.5.2.3 การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการหมัก	13
2.5.3 สมบัติของแป้ง	13
2.5.3.1 การพองตัวและการละลาย	14
2.5.3.2 การเกิดเจลลาติโนเซชัน	15
2.5.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	15
2.6 แป้งเท้ายายม่อม	16
2.6.1 กรรมวิธีการผลิตแป้งเท้ายายม่อม	17
2.7 เส้นใย	19
2.7.1 ความหมายเส้นใย	20
2.7.2 ประเภทเส้นใย	20
2.7.3 สมบัติเส้นใย	21
2.8 ฝ้าย	21
2.9 ฝู่น	23
2.10 พลาสติกไซเซออร์	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อนุญาตให้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11 กลีเซอรอล	26
2.12 สารช่วยผสม	27
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย	34
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	35
3.3 วิธีการทดลอง	39
3.4 วิธีการทดสอบ	42
3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล	42
3.4.1.1 แรงดึง ความแข็งแรงดึง โมดูลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด	42
จุดขาด	
3.4.2 การทดสอบสัณฐานวิทยา	44
3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	44
3.4.4 ทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน	44
3.4.5 ปริมาณการดูดซับน้ำ	45
3.4.6 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	
4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง TPAS/ LDPE ที่มีต่อสมบัติเชิงกล	46
4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR	48
4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา	52
4.4 สมบัติการดูดซับน้ำ	55
4.5 สมบัติเชิงกล	60
4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อน	63
4.7 การย่อยสลายโดยการฝังดิน	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งทำว้ายม่อม	18
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีของแป้งทำว้ายม่อม	18
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย	22
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนุ่น	23
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งทำว้ายม่อม	33
ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเกรดชนิด (LD1630J) จากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด	33
ตารางที่ 3.3 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์-กราฟท์-พอลิเอทิลีน เกรด การค้า MB 100 D จากบริษัท Dupont Packaging & Industrial Polymer	34
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้ง ทำว้ายม่อมและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมีมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์ พอลิเอทิลีน 5 % wt LDPE	39
ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจาก แป้งทำว้ายม่อม และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย เส้นใยนุ่น และเส้นใยปอกระเจา โดยมีมาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนเป็นสารช่วยผสม	40
ตารางที่ 3.6 สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)	41
ตารางที่ 3.7 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้	42
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพหลังการฉีด	46
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของพีคในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม	48
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS และ LDPE ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายในปริมาณต่างๆ	63
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS และ LDPE ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นในปริมาณต่างๆ	63
ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพ	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตร โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง	10
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลส	11
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพกติน	12
รูปที่ 2.5 ลักษณะของแกรนูลแป้งที่ใช้เป็นสารตัวเติม	13
รูปที่ 2.6 การพองตัวของเม็ดแป้ง	15
รูปที่ 2.7 การเกิดรีโทรเกรเดชัน	17
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเส้นใยฝ้าย	22
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเส้นใยนุ่น	24
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกลีเซอรอล	26
รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification)	27
รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/ LDPE ในอัตราส่วน 60:40 และ 70:30	47
รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม (ก) ไม่ผสมเส้นใย (ข) ผสมเส้นใยฝ้าย 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (ค) ผสมเส้นใยฝ้าย 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	49
รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม (ก) ไม่ผสมเส้นใย (ข) ผสมเส้นใยนุ่น 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (ค) ผสมเส้นใยนุ่น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	50
รูปที่ 4.4 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/ LDPE (ก) 100 เท่า และ (ข) 300 เท่า	52
รูปที่ 4.5 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/ LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย (ก) - (ข) 10 เปอร์เซ็นต์ และ (ค) - (ง) 20 เปอร์เซ็นต์	53
รูปที่ 4.6 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/ LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น (ก) - (ข) 10 เปอร์เซ็นต์ และ (ค) - (ง) 20 เปอร์เซ็นต์	54
รูปที่ 4.7 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS/ LDPE	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รับแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.8 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเส้นใยฝ้าย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	55
รูปที่ 4.9 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเส้นใยฝ้าย 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	56
รูปที่ 4.10 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเส้นใยขนุน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	56
รูปที่ 4.11 ปริมาณการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมเส้นใยขนุน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก	57
รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง	57
รูปที่ 4.13 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยและเส้นใยขนุน ปริมาณต่างๆ	61
รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติก เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย	64
รูปที่ 4.15 เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกเสริมแรงด้วยเส้นใยขนุน	65
รูปที่ 4.16 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของ TPAS/LDPE	67
รูปที่ 4.17 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 10 เปอร์เซ็นต์	68
รูปที่ 4.18 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 20 เปอร์เซ็นต์	69
รูปที่ 4.19 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยขนุน 10 เปอร์เซ็นต์	70
รูปที่ 4.20 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยขนุน 20 เปอร์เซ็นต์	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

พลาสติกเป็นวัสดุที่มนุษย์คิดค้นและประดิษฐ์ขึ้นเพื่อช่วยให้เรามีชีวิตที่สะดวกสบายยิ่งขึ้น ในอดีตเราไม่เคยรู้จักพลาสติกเลยจนกระทั่งกลางศตวรรษที่ 19 วัสดุดั้งเดิมที่มนุษย์ค้นพบและใช้ อยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวันในยุคก่อนหน้านี้นี้ล้วนเป็นวัสดุจากธรรมชาติทั้งสิ้นไม่ว่าจะเป็น แก้ว ไม้ กระดาษ โลหะ ยาง หรือ ขนสัตว์ สิ่งเหล่านี้เคยเป็นวัสดุที่ตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้ เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามมนุษย์ยังคงพยายามค้นหาวัสดุใหม่ๆ มาใช้งานอยู่เสมอ และมีแนวโน้มที่ จะมีความต้องการใช้พลาสติกเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อปริมาณขยะที่เกิดจากพลาสติกเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่เกิดการย่อยสลายได้ยาก และใช้ เวลานานประโยชน์เพียงเล็กน้อยในช่วงเวลาสั้นๆของพลาสติกได้ทำให้เกิดโทษต่อระบบนิเวศและ ชีวิตของผู้บริโภคต่อเนื่อง กว้างขวางและยาวนาน อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนอย่าง มากโดยเฉพาะการใช้ถุงพลาสติกใส่มูลฝอยจะทำให้เกิดการแปรสภาพมูลฝอยในภาวะที่ขาดอากาศ เป็นผลให้เกิดก๊าซชีวภาพที่เป็นต้นเหตุของการเกิดภาวะเรือนกระจกและทำให้โลกร้อน การ สังเคราะห์พลาสติกที่มาจากวัสดุธรรมชาติถือว่าเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม ใน บรรดาชีวมวลจากธรรมชาติทั้งหลายแป็งจัดเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงและได้รับความสนใจอย่าง มากเนื่องจากมีปริมาณมาก ง่ายราคาถูกและสามารถย่อยสลายได้

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch หรือเรียกย่อว่า TPS) หมายถึง การนำแป้งมา ใช้ในการผลิตพลาสติกซึ่งมีข้อจำกัดคือ โครงสร้างผลึกในแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก แกรนูลแป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมละลายได้ หากเรา ให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้น แทนที่จะหลอมเหลว แกรนูลแป้งจะเกิดการเผาไหม้และ สลายอย่างไรก็ดีหากมีการเติมสารเติมแต่ง (Additive) ที่เรียกว่า Plasticizer จะช่วยทำให้แกรนูลแป้ง เกิดการหลอมละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงกล (Mechanical energy) [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งต้นตำรายาม่อม (*Tacca leantopetaloides*) มีการปลูกทั่วไปแต่ยังไม่ใช่พืชหลัก และยังไม่มีการผลิตแป้งในระดับอุตสาหกรรมในท้องถิ่นมักเรียกต้นตำรายาม่อมว่า รากสาคุ แป้งตำรายาม่อม

จะมีคุณสมบัติคล้ายแป้งมัน, แป้งข้าวโพดจะมีลักษณะเม็ดสีขาวเล็ก ๆ หยาบ ๆ สามารถใช้มือบีบแป้งให้แตกได้ มันวาว ยืดหยุ่นได้ดี ใส ฯลฯ [2]

ข้อจำกัดที่สำคัญของการนำผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติกจากแป้ง (TPS) มาใช้ประโยชน์ คือ ชิ้นงานจะมีสมบัติทางกลที่ไม่ดีนักและชิ้นงานจะมีความชื้นและร่องไวน้ำมาก เนื่องจากภายในโครงสร้างโมเลกุลของ TPS นั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ในการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานจริงต้องทำการปรับปรุงสมบัติเพื่อแก้ไขข้อด้อยดังกล่าวก่อน

การพัฒนาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชอีกวิธีหนึ่ง คือ การเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติประเภทต่างๆ เช่น ป่าน ปอ และฝ้าย เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากสามารถใช้แทนเส้นใยแก้วที่ใช้อยู่ทั่วไปและมีข้อได้เปรียบทั้งในเรื่องของน้ำหนักและการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ส่งผลต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลของเมทริกซ์ดังกล่าว นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การเสริมแรงด้วยเส้นใยจะช่วยพัฒนาสมบัติหลายประการ เช่น ความสามารถในการทนความร้อน การลดอัตราการดูดซับความชื้น รวมทั้งการหดตัวขณะขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

รายงานที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งท้าวยายม่อมยังมีไม่มากนัก จากงานวิจัยของ วชิร คุณวิวัฒน์ และคณะ [3] พบว่าแป้งท้าวยายม่อมสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ แต่พบปัญหาเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลที่ยังต่ำ และการดูดซับน้ำที่สูงมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะปรับปรุงสมบัติของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งท้าวยายม่อม โดยจะทำการศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ที่เตรียมได้จากแป้งท้าวยายม่อมและ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) โดยสารช่วยผสมชนิด มาลิกแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-graft-polyethylene, MAPE) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้และขึ้นรูปได้โดยใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) และศึกษาถึงการปรับปรุงสมบัติของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เส้นใยเซลลูโลส 2 ชนิดได้แก่ เส้นใยฝ้าย และเส้นใยขนุนในปริมาณต่างๆ โดยคาดว่าผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์แต่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวายม่อมและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
- 1.2.2 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ โดยการใส่ เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.2 เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวายม่อมและพอลิเอทิลีน
- 1.3.3 ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น
- 1.3.4 ศึกษาถึงผลของปริมาณของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของ พอลิเมอร์ผสม
- 1.3.5 ศึกษาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ผสมได้แก่
  - สมบัติเชิงกล ด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
  - สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณการดูดซับความชื้น
  - สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของวัสดุ (TGA)
  - สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)
  - ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวายม่อมและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ที่ใช้งานกันทั่วไปได้
- 1.4.2 ช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนในปัจจุบันและอนาคตได้
- 1.4.3 เพื่อแปรรูปแป้งท้าวายม่อม ให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงขึ้น ส่งเสริมการนำวัสดุจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ธรรมชาติไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้กว้างขึ้นและเพิ่มมูลค่าให้กับเส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่น  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 พลาสติก [4]

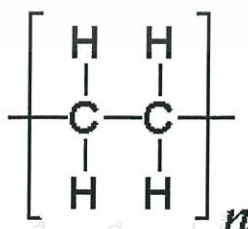
พลาสติกจัดเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโมเลกุลซ้ำๆ กันต่อกันเป็นโมเลกุลสายยาวๆ ประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน นอกจากนี้อาจมีธาตุอื่นๆเป็นส่วนประกอบย่อย ซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟลูออรีน คลอรีน และกำมะถัน เป็นต้น

พลาสติกแบ่งตามลักษณะของการถูกความร้อนได้ 2 ประเภท คือ

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) วัสดุประเภทนี้เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่ออุณหภูมิลดลงจะแข็งตัวถ้าให้ความร้อนอีกจะอ่อนตัวสามารถทำให้กลับเป็นรูปเดิมหรือเปลี่ยนเป็นรูปอื่นได้โดยคุณสมบัติของพลาสติกยังเหมือนเดิม เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน พอลิไวนิล คลอไรด์ พอลิเอสเตอร์

2. เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) ซึ่งเป็นพลาสติกที่คงรูปภายหลังจากการผ่านความร้อนแรงดัน เพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นลงจะแข็งตัวมีความแข็งแรงมาก ทนความร้อนและความดัน ไม่อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงพอก็จะแตกและไหม้เป็นขี้เถ้าสีดำ ไม่สามารถนำไปหลอมกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น พอลิยูรีเทน อีพ็อกซี และเมลามีน ที่ใช้ทำงาน ชาม ถึงแม้ว่าพลาสติกจะมีประโยชน์และคุณค่าสำหรับการใช้งานในหลายประเภทที่กล่าวมา แต่ปัญหาที่เกิดจากการใช้พลาสติกก็มีมากด้วยเช่นกัน หลายครั้งที่ “พลาสติก” ถูกต่อต้านจากผู้รักสิ่งแวดล้อม เพราะการทำลายหรือการย่อยสลายทำได้ยากและใช้เวลานานถึง 450 ปี รวมทั้งสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก

#### 2.2 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [5]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมี [5] เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนผลิตจากแก๊สเอทิลีนที่ผ่านกระบวนการเติมสารที่ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นพอลิเมอร์ได้ภายใต้แรงดันขนาดต่างๆ ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดตั้งแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ลักษณะเป็นน้ำมัน หรือไขข้น) ไปจนถึงขนาดโมเลกุลสูง (ลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้)

### 2.2.1 สมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีน

LDPE เป็นวัสดุประเภท Polyethylene Thermoplastic มีความหนาแน่นต่ำ (0.910 - 0.940 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ที่ผลิตโดยใช้แรงดันสูง จากกระบวนการ Free radical polymerization มีความเหนียวและยืดหยุ่นได้ดีทนต่อการกรอบแตก มีความนิ่มความใสแต่ใสไม่เท่าพลาสติกชนิด PP (Polypropylene) โครงสร้างทางเคมีเป็นกิ่งสาขา (Branching) มากกว่าโครงสร้างทางเคมีของ HDPE (High-density polyethylene) จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ต่ำกว่า และมีความแข็งแรงทนทานน้อยกว่า HDPE LDPE ทนความร้อนได้ไม่มากนัก ทนสารเคมีได้ดี แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงในหม้ออัดไอน้ำ (Autoclave) เท่าพลาสติกชนิด PP และทนต่อสารเคมีน้อยกว่า HDPE LDPE เริ่มหลอมตัวที่ 120 °C ทนความเย็นได้ถึง 50 °C ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้ LDPE มีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว มีความเหนียวและยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ สามารถผสมให้มีสีต่างๆ ได้

### 2.3 ประเภทของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ [6]

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) คือพลาสติกที่ออกแบบมาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้ ก่อให้เกิดการสูญเสียสมบัติบางประการที่สามารถวัดได้โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 5 ประเภท คือ

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้างเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาตัวอย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบ

ขยะ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด หรือแม้กระทั่งชิ้นพลาสติกที่มีการฉาบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบ ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้น ในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่กระตุ้นเร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮไดรด์ พอลิคาร์บอนเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายในโมเลกุลของ พอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะอัลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะ

แวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายใน โมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือ เอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่ พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของ จุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนนี้สุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำเกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

## 2.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [7]

### 2.4.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าวปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณหาหน้าหนักแห้ง สมมูลมวลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ เมื่อ  $C_g$  คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ ให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C_s$  คือ คาร์บอนที่ละลายได้

$C_m$  คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = (C_d \div C_i) \times 100$$

เมื่อ  $C_i$  คือคาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

## 2.4.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพทำให้เกิดการสูญเสียมวลหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักของ พอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของเอทิลีนกับแป้งในปริมาณที่สูง จะย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วย พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลาย แต่พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

## 2.4.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

### 2.4.3.1 การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้าง นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ และเมื่อนำมาล้างและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆในพอลิเมอร์ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

### 2.4.3.2 การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ ซึ่งจะพบว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังในดินมีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและมีขนาดเล็กลงเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาว ซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลายเหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีนนอกจากนี้การใช้ SEM

ที่มีกำลังขยายสูงยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนีของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ฝังดินไว้ 6 เดือน มาตรวจปริมาณไนโตรเจนพบว่าปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.06% เป็น 0.16% มาจากกรดอะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตและ

สร้างโคโรนาบนพอลิเมอร์ และย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้งพอลิเมอร์โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

#### 2.4.3.3 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นในการดูดซับ และความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

#### 2.4.3.4 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 ใช้ศึกษาการย่อยแป้งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

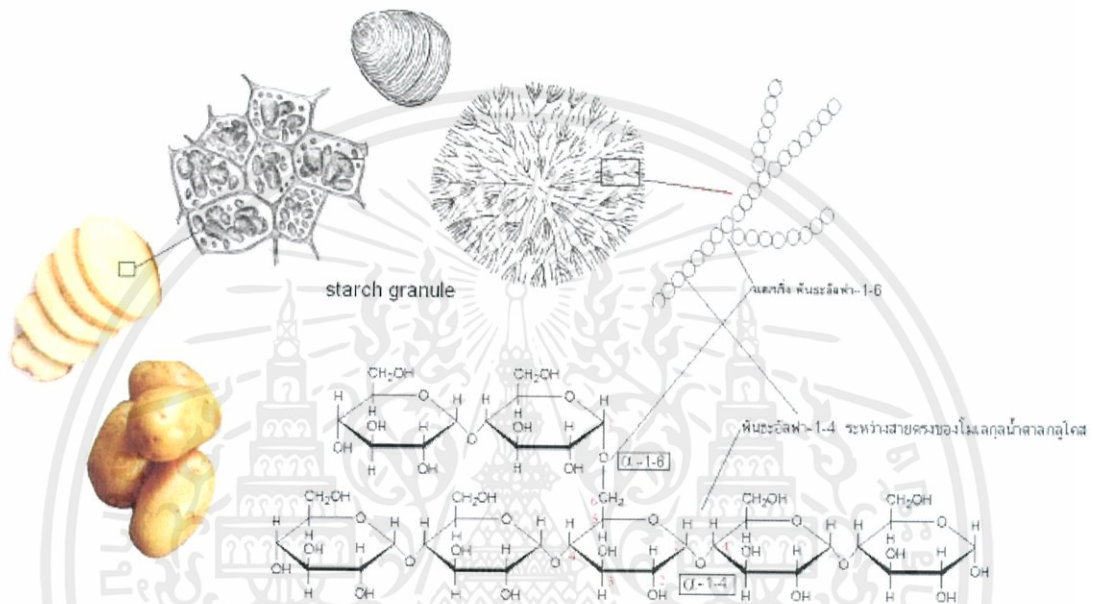
#### 2.5.3.5 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 x 50 มิลลิเมตรหลายๆตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้ประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดินทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 แป้ง (Starch) [6]

แป้ง (Starch) คือ พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ที่พบในพืช เช่น เมล็ดธัญพืช พืชหัว และถั่วเมล็ดแห้งมีส่วนประกอบสำคัญคือน้ำตาลกลูโคส (Glucose) เชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างแบบอะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกทิน (Amylopectin) อัดกันแน่นอยู่ในเม็ดแป้ง (Starch granule)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [9]

ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไปยังมีส่วนประกอบอื่นๆอยู่มากจะเรียกว่า ฟลาวร์ (Flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูงจะจัดอยู่ในประเภทฟลาวร์ เรียกว่า Corn flour, Wheat flour เช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้าที่ยังมีโปรตีน 7 ถึง 8% เรียกว่า Rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปนอันหมายถึงโปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่นๆ ถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่จึงเรียกว่าเป็นสตาร์ช (Starch) เช่น Corn starch, Wheat starch เป็นต้น

แป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งเกิดจากการต่อกันของโมเลกุลเดี่ยวจนเป็นสายยาว โดยแป้งเป็นอาหารสะสมในเซลล์พืชมักพบอยู่ในส่วนของ ราก เมล็ด ต้น และผลบางชนิด (ข้าวเจ้ามีแป้ง 75% ข้าวโพดมีแป้ง 50% มันฝรั่งมีแป้ง 20%) ประกอบด้วยเม็ดแป้งขนาดเล็ก แต่ละชนิดมีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน

### 2.5.1 แหล่งของแป้ง [10]

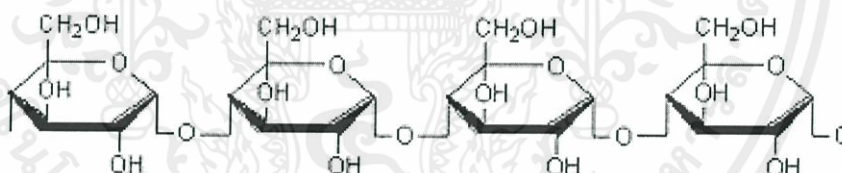
ซึ่งเป็นแหล่งสะสมอาหารของเนื้อเยื่อพืช (Plant tissue) มักพบในเมล็ดธัญพืช (Cereal grain) เช่น ข้าว (Rice) ข้าวสาลี (Wheat) ข้าวโพด (Corn) พืชหัว (Tuber crop) เช่น มันฝรั่ง (Potato) มันเทศ (Sweet potato) มันสำปะหลัง (Tapioca) ถั่วเมล็ดแห้ง (Legume) เช่น ถั่วเขียว (Mung bean)

#### โครงสร้างและส่วนประกอบของสตาร์ช

1. อะไมโลส (Amylose)
2. อะไมโลเพกทิน (Amylopectin)

##### 2.5.1.1 อะไมโลส

ประกอบด้วย  $\alpha$ -D-กลูโคส หลาย ๆ หน่วยมาจับต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 4 ไกลโคซิดิกทั้งหมด ดังนั้น โครงสร้างจึงเป็นเส้นตรง เมื่อโซ่ยาวขึ้นจะมีลักษณะเป็นเป็นขดเกลียวซึ่งจะเกิดสารเชิงซ้อน (Complex compound) กับ ไอโอดีน ได้สารสีน้ำเงิน



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของอะไมโลส [10]

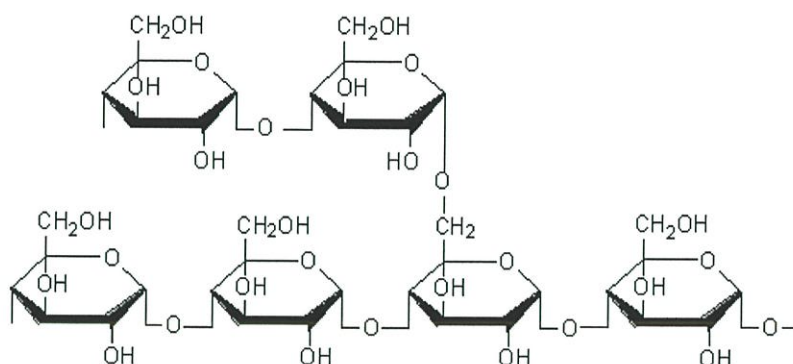
##### 2.5.1.2 อะไมโลเพกทิน

ประกอบด้วย  $\alpha$ -D-กลูโคส หลาย ๆ หน่วยมาจับต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 4 ไกลโคซิดิก บางส่วน แต่มีบางส่วนจับต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 6 ไกลโคซิดิก โดยมีอัตราส่วนระหว่างพันธะทั้ง

สองชนิดเป็น 15 : 1 ตามลำดับ ดังนั้น โครงสร้างของอะไมโลเพกทินจึงเป็นกิ่งก้านสาขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารทศวงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลเพกทิน [10]

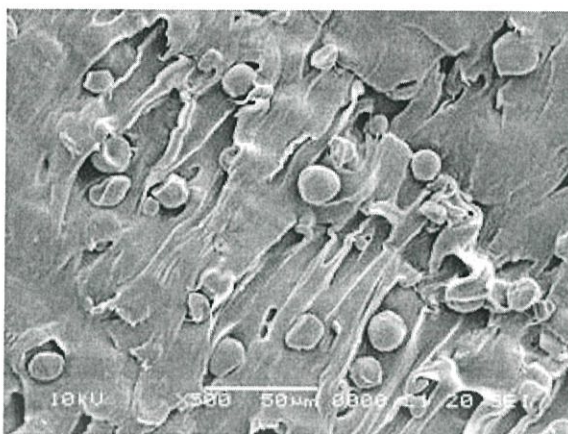
### 2.5.2 พลาستيكย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้ง [8]

แป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิดได้แก่ อะไมโลส และ อะไมโลเพกทิน ในธรรมชาติ โมเลกุลแป้งจะมีการจัดเรียงตัวเกิดเป็น โครงสร้างกิ่งผลึกที่เป็นระเบียบในแกรนูลแป้ง (Starch granule) โครงสร้างระดับแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก สามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงถึง 220 °C แนวทางการนำแป้งมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาستيكสลายได้ทางชีวภาพ สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

#### 2.5.2.1 การใช้แป้งเป็นฟิลเลอร์ (filler) หรือสารตัวเติมในพลาستيك [11]

การใช้แป้งในลักษณะนี้จะเป็นการผสมแป้งเข้ากับพลาستيكในเครื่องอัดรีด (Extruder) ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ผลลัพธ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นเนื้อพลาستيكที่มีเม็ดแป้งกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ (รูปที่ 2.5) การผสมแป้งกับพลาستيكในลักษณะนี้จะเติมแป้งลงไปได้ในปริมาณไม่มากนัก โดยเฉพาะการผลิตฟิล์มบางมักจะผสมแป้งได้ไม่เกิน 10% ในช่วงแรกการผสมแป้งในพลาستيكส่วนใหญ่มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้ของพลาستيكผสม อย่างไรก็ตามการที่ผลิตภัณฑ์พลาستيكที่ผลิตขึ้นจะย่อยสลายได้หรือไม่ ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับแป้งด้วย หากเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายไม่ได้ เช่น Polyethylene พลาستيكผสมที่ผลิตได้จะเกิดการย่อยสลายเฉพาะในส่วนของแป้งเท่านั้น แต่แป้งไม่ได้ช่วยให้ Polyethylene เกิดการย่อยสลายได้แต่อย่างใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ลักษณะของแกรนูลแป้งที่ใช้เป็นสารตัวเติม [9]

เนื่องจากแป้งเป็นสารที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่พลาสติกส่วนใหญ่เป็นสารที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) สารทั้งสองชนิดจึงผสมเข้ากันได้ไม่ค่อยดี ดังนั้นแรงยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างพลาสติกกับแกรนูลแป้งจึงมีค่าต่ำ ทำให้พลาสติกผสมที่ได้มีความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลต่ำด้วย แนวทางการแก้ปัญหานี้อาจทำได้โดยการดัดแปรโครงสร้างแป้งให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้นหรืออาจใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) เติมลงไปในช่วงกระบวนการหลอมผสม นอกจากนี้การผลิตฟิล์มบางยังถือเป็นอีกข้อจำกัดของวิธีนี้ เนื่องจากแกรนูลแป้งโดยทั่วไปมีขนาดประมาณ 5-100 nm (ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) ดังนั้นการผลิตฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่าขนาดแกรนูลแป้งจึงเป็นไปได้ยาก

### 2.5.2.2 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch)

เทอร์โมพลาสติก หมายถึง พอลิเมอร์ที่สามารถอ่อนตัวและหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน แต่เมื่อทำให้เย็นลงก็จะสามารถแข็งตัวและคงรูปร่างได้ พลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นเทอร์โม-พลาสติกทำให้สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ภาชนะและชิ้นส่วนรูปทรงต่างๆ ได้ การนำ แป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติกมีข้อจำกัดคือโครงสร้างผลึกในแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก แกรนูลแป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมละลายได้ หากเราให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้นแทนที่จะหลอมเหลว แกรนูลแป้งจะเกิดการเผาไหม้และสลาย อย่างไรก็ตามหากมีการเติมสารเติมแต่ง (Additive) ที่เรียกว่า Plasticizer จะช่วยทำให้แกรนูลแป้งเกิดการหลอมละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงกล (Mechanical energy) ได้ สารที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch หรือเรียกย่อว่า TPS) เม็ดพลาสติก

TPS ที่ผลิตได้สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องมือและกระบวนการผลิตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพลาสติกทั่วไป เช่น เครื่องอัดรีด เครื่องฉีด และเครื่องเป่าฟิล์ม เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะทำหน้าที่เป็น Plasticizer ของแป้งได้ดี แต่เนื่องจากน้ำระเหยได้ง่ายทำให้พลาสติกที่ได้มีลักษณะเปราะ จึงไม่นิยมใช้น้ำในการผลิต TPS สารที่นิยมใช้เป็น Plasticizer ในการผลิต TPS ได้แก่ กลีเซอรอล เนื่องจาก TPS สามารถหลอมตัวได้เมื่อได้รับความร้อนและแรงกลที่เหมาะสม จึงสามารถใช้ TPS เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตพลาสติก อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ผลิตจาก TPS มีข้อจำกัดที่สำคัญสองประการ คือมีสมบัติเชิงกลต่ำ (Poor mechanical properties) และไม่ทนน้ำ งานวิจัยและพัฒนาส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงสมบัติทั้งสองด้านของ TPS ให้ดีขึ้น ซึ่งแนวทางที่นิยมได้แก่ การดัดแปลงโครงสร้างของแป้งด้วยกระบวนการทางเคมี และการผสม TPS กับพลาสติกสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ

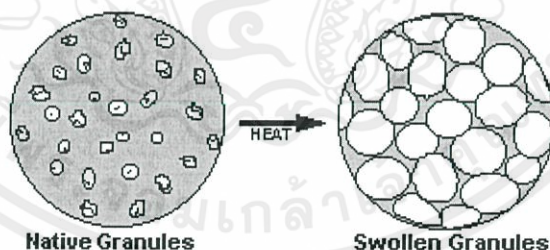
### 2.5.2.3 การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการหมัก (Starch as feed stock for fermentation process)

เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสจึงเป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับกระบวนการหมักเพื่อผลิตสารหลายชนิด เช่น แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ เอสเทอร์ และกรด เป็นต้น ในบรรดาสารต่างๆ ที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักแป้ง กรดแลคติกได้รับความสนใจและมีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ เนื่องจากกรดแลคติกเป็นมอนอเมอร์สำหรับใช้ในการผลิต Polylactic acid หรือที่เรียกย่อว่า PLA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพที่มีศักยภาพสูงและมีการวิจัยและพัฒนามากที่สุดตัวหนึ่งในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ทำให้มีความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว จนในปัจจุบันมีการผลิต PLA ในระดับอุตสาหกรรมแพร่หลายมากขึ้น โดยผู้นำทางการผลิต PLA ที่ใหญ่ที่สุดในโลกได้แก่ NatureWorks LLC (USA) ซึ่งทำการผลิต PLA จากแป้งข้าวโพด PLA เป็นพลาสติกสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไป สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด เช่น ถัง ภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง ฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ของเล่นและอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ หรือแม้กระทั่งชิ้นส่วนในรถยนต์ ด้วยการพัฒนาด้านเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ PLA เป็นพลาสติกทางเลือกที่มีบทบาทสำคัญในการทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ดังนั้นจึงคาดการณ์ได้ว่าปริมาณความต้องการใช้ PLA น่าจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งย่อมส่งผลให้มีความต้องการใช้แป้งเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิต PLA มากขึ้นด้วยเช่นกัน

### 2.5.3 สมบัติของแป้ง [6]

#### 2.5.3.1 การพองตัวและการละลาย (Swelling and solubility)

แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพกทิน (Intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วน Crystallite โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ Amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆไม่เป็นระเบียบ และมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 °C ขึ้นไป ส่วน Amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้นและการจับกันของโมเลกุลในส่วน crystallite เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.6) โมเลกุลในส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแหเรียกว่า Micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้ แต่อาจมีโมเลกุลของอะไมโลสและ อะไมโลเพกทิน ซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและ โมเลกุลแป้งอยู่ในสภาวะละลายมากขึ้น



รูปที่ 2.6 การพองตัวของเม็ดแป้ง [10]

#### 2.5.3.2 การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

เมื่อนำแป้งใส่ในน้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซึมน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก Collision สังเกตการพองตัวของเม็ดแป้งสาธิตในน้ำที่อุณหภูมิห้องพบว่าแป้งที่พองตัวมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10% และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและคุณสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้

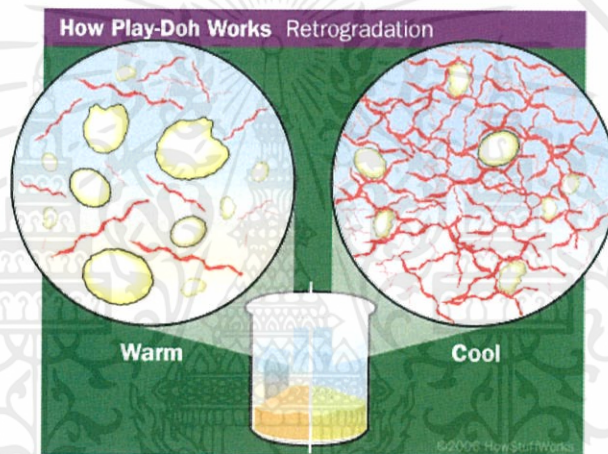
เนื่องจากโมเลกุล อะไมโลส และอะไมโลเพกทินในส่วนที่เป็น Crystallite จับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75 °C หรือใช้สารเคมี เช่น ให้ความร้อน 60 °C แก่แป้งสาธิตจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วน Crystallite ลดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบเครื่องหมายกากบาท (Maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างส่วน Crystallite ที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (Degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาติไนซ์ไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันที่ห่างกันถึง 8-10 °C โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาติไนซ์ได้ก่อนขนาดเล็กแต่เมื่อใช้ SEM ส่องดูโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30% พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กันแป้งอาจเกิด Gelatinized ได้ที่อุณหภูมิ 25°C โดยการละลายใน Solvent เช่น alkali , liquid ammonia , DMSO , aq. CaCl<sub>2</sub>

การตรวจสอบอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์โดยใช้เครื่องมือที่วัด และบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ เช่น เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ซึ่งใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันของปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ ปกติโพลิเมอร์ต่างๆ ในรูปผลึกและอสัณฐานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อนแป้งก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อย เมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (Tm) ที่สูงมาก กล่าวคือในช่วงของ 160°C ถึง 200°C แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำมากขึ้นอุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลง เมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70% แป้งจะเกิดเจลาติไนเซชัน โดยทั่วไปจะถือว่าอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีสูงสุด (Peak temperature) คือ อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชัน สำหรับการตรวจสอบการเกิด เจลาติไนเซชันของแป้งโดยใช้เครื่อง DSC ทำได้โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างแป้งกับน้ำในอัตราส่วน 30/70 จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลขช่วงในการเกิด เจลาติไนเซชัน จะได้ Thermogram ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็น

กราฟระหว่าง Heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (DH, cal/g) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่าง

### 2.5.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

สามารถเกิดได้ทั้งในเจลและสารแขวนลอย ซึ่งจะมีความข้นหนืดสูง เมื่อถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว จะเกิดเป็นผลึกเล็กๆ (จากการรวมกลุ่มของ โมเลกุลแป้งที่แน่นมากขึ้น) และตกตะกอน ทำให้สมบัติของเจลเปลี่ยนไป ปัจจัยสำคัญของการเกิดปฏิกิริยานี้ คือ อุณหภูมิกับขนาดและรูปร่าง โมเลกุลของแป้ง ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ได้เร็วสุดจะอยู่ที่ช่วง 0 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.7 การเกิดรีโทรเกรเดชัน [11]

## 2.6 แป้งท้ายยาม่อม [12]

แป้งท้ายยาม่อม (Arrowroot Starch) สกัดจากพืชหัวท้ายยาม่อม ลักษณะแป้งเป็นเม็ดเล็กๆ หยิบๆ สีขาวลักษณะของแป้งจะหนัก มีเม็ดแป้งปนอยู่บ้าง ใมนุ่มละเอียดเหมือนแป้งมัน เมื่อต้องการนำมาทำอาหารจะต้องบดให้ละเอียดเป็นผงเสียก่อนด้วยครก โดยใช้สากคดถึงๆ หากไม่บดเมื่อนำมาปรุงอาหารจะเป็นเม็ดไตอยู่ในอาหาร เมื่อนำไปประกอบอาหารจะให้ความข้นเหนียวนุ่มและใสวาว เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นจะเหนียวกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด (จึงใช้ในปริมาณไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งที่แตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดคือ เมื่อนำมาอุ่น จะมีความข้นและไม่คืนตัว สามารถนำมาใช้ประกอบอาหารและทำขนมได้หลายชนิด ได้แก่ ขนม



สมบัติ	แป้งท้าวยายม่อม
Trough Viscosity (RVU)	188
Onset Temperature (T, °C)	71.12
Peak Temperature (T, °C)	76.06
Enthalpy ( $\Delta H, J/g$ )	16.60

### 2.6.1 กรรมวิธีการผลิตแป้งท้าวยายม่อม [14]

1. ล้างหัวท้าวยายม่อมให้สะอาดแล้วนำไปปอกเปลือก

2. นำมาย่อยสลายให้ได้แป้งโดยน้ำสะอาดโดยวิธีใดวิธีหนึ่ง ดังนี้

วิธีที่ 1 เอาหัวฝนนบนแผ่นสังกะสีที่เจาะรูด้วยตะปูใช้ภาชนะเช่น โองหรือถังพลาสติกใส่น้ำรอร์รับ ส่วนที่ฝน

วิธีที่ 2 นำหัวสับย่อยให้เป็นชิ้นเล็กแล้วใส่ในเครื่องปั่นผลไม้เติมน้ำเล็กน้อยแล้วปั่น

3. เอาส่วนที่ได้จากข้อ 2 มาเติมน้ำคนให้เข้ากันแล้วกรองด้วยผ้าขาวบาง เอาส่วนที่เป็นกากทิ้งไป แช่ส่วนที่กรองได้ในภาชนะนาน 3 ชั่วโมง แป้งจะตกตะกอนอยู่ก้นภาชนะเมื่อครบ 3 ชั่วโมงเทน้ำทิ้งเติมน้ำลง แป้งที่ตกตะกอนคนให้เข้ากันแล้วกรองอีกเอาส่วนกากทิ้งไปแช่ส่วนที่กรองได้ ครั้งที่ 2 นี้อีกจนครบ 3 ชั่วโมงแล้วดำเนินการเหมือนกับ เมื่อครบ 3 ชั่วโมงแรกเสร็จแล้วแช่ส่วนที่กรองได้เป็นครั้งที่ 3 เมื่อครบ 3 ชั่วโมงแล้วจึงเทน้ำทิ้งเอาแป้งที่ตกตะกอนอยู่ก้นภาชนะ ออกมาตากแดดให้แห้งก็จะได้แป้งขาวสะอาดโดยได้น้ำหนักกว่า 1 กิโลกรัมจากหัวสด ประมาณ 5 กิโลกรัม

### 2.7 เส้นใย (Fibers) [15]

ตามนิยามแล้ว เส้นใย หมายถึง วัสดุหรือสารใดๆที่เกิดจากธรรมชาติและมนุษย์สร้างขึ้น ที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือมากกว่า 100 สามารถขึ้นรูปเป็นผ้า เอกสารนี้ได้ และต้องเป็นองค์ประกอบที่เล็กที่สุดของผ้า ไม่สามารถแยกย่อยในเชิงกลได้อีก ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1 ความหมายของเส้นใย

เส้นใย หมายถึง สิ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียวยาว องค์ประกอบของเซลล์ ส่วนใหญ่ เป็น เซลลูโลส เกิดจากการรวมตัวของพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) ของกลูโคส (Glucose) ซึ่ง โมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัวกันในผนังเซลล์ของพืชเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมาก เกิดการเกาะ จับตัวกันเป็นเส้นใยขึ้น

### 2.7.2 ประเภทของเส้นใย

1. เส้นใยจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติ แบ่งได้เป็น

1.1 เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้ จากส่วนต่างๆของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ไยสับปะรด ไยมะพร้าว ฝ้าย นุ่น ทรนารายณ์ เป็นต้น เซลลูโลส เป็น โฮโมพอลิเมอร์ ประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสจำนวนมาก มีโครงสร้างเป็น กิ่งก้านสาขา

1.2 เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ (Wool) ไหม (Silk) ผม (Hair) เล็บ เขา ไยไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติ คือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลง ถ้าสัมผัสแสงแดดนานๆ จะสลายตัว

1.3 เส้นใยจากหินแร่ เช่น แร่ใยหิน (Asbestos) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำไฟฟ้า

2. เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ ใช้ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ แบ่งเป็น 3 ประเภท

2.1 เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เช่น เทโอรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะมีความฟูยืดหยุ่น ไม่เป็น อันตรายต่อผิวหนัง สำหรับดากรอน (Dacron) เป็นเส้นใยสังเคราะห์พวกพอลิเอสเตอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mylar มีประโยชน์ทำเส้นใยทำเชือก และฟิล์ม

2.2 เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่เขียนกำกับหลังชื่อจะแสดงจำนวนคาร์บอนอะตอม ในมอนอเมอร์ของ เอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอนจัดเป็นพวกเทอร์มอพลาสติก มีความแข็งแรง มากกว่าพอลิเมอร์แบบเดิมชนิดอื่น (เพราะมีแรงดึงดูดที่แข็งแรงของพันธะเพปไทด์) เป็นสารที่ติดไฟยาก (เพราะไนลอนมีพันธะ C-H ในโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์แบบเดิมชนิดอื่น) ไนลอน

สามารถทดสอบโดยผสมโซดาแลม ( $\text{NaOH} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หรือเผาจะให้ก๊าซแอมโมเนีย ประโยชน์ของไนลอน ใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีตาร์ สายเอ็น ไม่เร็กเกิด เป็นต้น

2.3 เส้นใยอะคริลิก เช่น ใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ่านวม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคาถัน แดด ผ้าม่าน พรหม เป็นต้น

2.4 เซลลูโลสแอซีเตด เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติกเข้มข้น โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสอะซีเตด เช่น ผลิตเป็นเส้นใยอาร์เนล 60 ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ

3. เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำสารจากธรรมชาติ มาปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะกับการใช้งาน เช่น การนำเซลลูโลสจากพืชมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิด เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ นำมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่าเส้นใยธรรมชาติ ตัวอย่างเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เช่น วิสคอสเรยอง แบนเบอร์ก เรยอง เป็นต้น

### 2.7.3 สมบัติของเส้นใย

โครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย เป็นสมบัติซึ่งมีผลโดยตรงต่อสมบัติของผ้าที่สร้างขึ้นจากเส้นใยนั้นๆ เส้นใยโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติ ดังนี้คือ

9.3.1 มีความแข็งแรง และทนทาน (Strength and durability)

9.3.2 สามารถปั่นได้

9.3.3 มีความสามารถในการดูดซับดี

โดยทั่วไปผ้าที่ผลิตจากเส้นใยที่แข็งแรงจะมีความแข็งแรงทนทานตามไปด้วย หรือผ้าที่ผลิตขึ้นจากเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีจะส่งผลให้ผ้าสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในส่วนที่มีการสัมผัสกับผิวและดูดซับน้ำ เช่น ผ้าเช็ดตัว ผ้าอ้อม เป็นต้น ดังนั้น การทราบสมบัติของเส้นใย จะทำให้สามารถทำนายสมบัติของผ้าที่มีเส้นใยนั้นๆ ได้และทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ประเภทได้ถูกต้องตามความต้องการ ที่จะนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณี **2.8 ฝ้าย (cotton) [16]** ผลิตแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การจำแนกทางพฤกษศาสตร์

Class	Angiospermae
Subclass	Dicotyledonae
Family	Malvaceae
Genus	Gossypium
Species	hirsutum

## ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ฝ้ายมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Gossypium* spp. อยู่ในตระกูล Malvaceae มีระบบรากแบบรากแห มีรากแก้วและมีรากแขนงออกจากรากแก้ว

ลำต้น : ประกอบด้วยข้อและปล้อง สูงประมาณ 60 – 160 ซม. เป็นพืชหลายฤดู แต่มักปลูกเป็นพืชฤดูเดียว

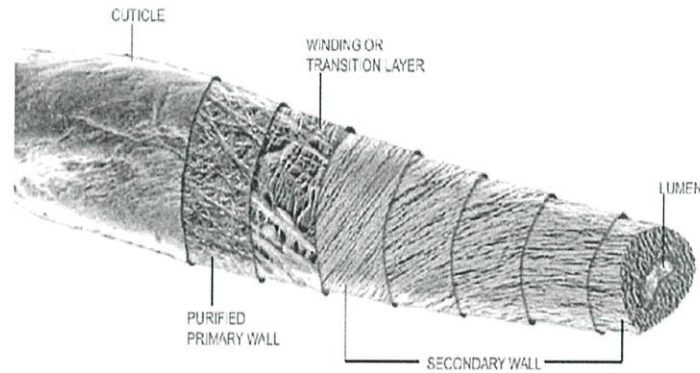
ใบ : ออกตามข้อของลำต้น ใบมี 3 – 5 แฉก แผ่นใบบางและมีขนปกคลุม ก้านใบยาวเท่ากับ ความกว้างของใบ

ดอก : ออกในลักษณะสลับบนกิ่ง ดอกกว้างประมาณ 3 นิ้ว มีกลีบเลี้ยงค่อนข้างใหญ่ที่ฐานดอก 3 กลีบ ซึ่งห่อหุ้มดอกอ่อนเอาไว้ กลีบดอกฝ้ายมี 5 กลีบ อาจมีสีขาวหรือสีเหลือง และจะเปลี่ยนเป็น สีม่วงหลังจากดอกบานได้ประมาณ 2 – 3 วัน ผลฝ้ายหรือที่เรียกว่าสมอฝ้าย (Ball) มีลักษณะกลมรี ภายในแบ่งออกเป็น 3 – 5 ส่วน ยาวประมาณ 4 – 5 ซม. สมอฝ้ายจะปริออก เมื่อแก่ และ ต้นเม็ล็ดซึ่ง ห่อหุ้มด้วยใยสั้นใยยาว (Lint) และเส้นใยสั้น (Fuzz fibers)

## ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยฝ้าย [17]

Cellulose	94 %
Protein	1.3 %
Ash	1.2 %
Pectin	1.2 %
Oil, Fat and Wax	0.6 %
Sugar	0.3 %
Pigment	trace
Others	1.4 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ซึ่งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเส้นใยฝ้าย [18]

### สมบัติของฝ้าย [19]

เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากพืช คือดอกฝ้าย ส่วนประกอบของเส้นใย คือ เซลลูโลส เส้นใยฝ้ายมีลักษณะคงทน ซึ่มซ่านน้ำได้ดี เส้นใยฝ้ายทนต่อสภาวะค้างได้ดี เส้นใยไม่เปื่อยหรือไม่ละลายในด่างที่เข้มข้นและเจือจางทุกชนิด แต่จะละลายในกรดเข้มข้น และเปื่อยลงได้เร็วในกรดอ่อน

### 2.10 นุ่น Kapok [20]

#### ลักษณะทั่วไป

นุ่นเป็นพืชเส้นใยชนิดหนึ่ง เส้นใยที่ได้จากผลหรือฝักมีน้ำหนักเบา อ่อนนุ่ม ใช้ในอุตสาหกรรมทำเบาะ ที่นอน วัสดุกันกระแทก เป็นฉนวนกันความร้อน ฟูนุ่นไม่ดูดซับน้ำแต่ดูดซับน้ำมัน จึงใช้เป็นส่วนประกอบของชนวนระเบิดใช้บุผนังเรือบรรทุกน้ำมัน ถังน้ำมันเครื่องบิน เสื้อชูชีพ น้ำมันในเมสสิคใช้ผสมน้ำมันพืชเพื่อใช้บริโภคน้ำมันหล่อลื่น ใช้ทำสบู่ กากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันใช้เป็นอาหารสัตว์ ใสนุ่น แขนนุ่น และลำต้นใช้เพาะเห็ดได้ดี นุ่นมีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา

#### ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

นุ่น (Kapok) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Ceiba pentandra* Gaerth. อยู่ในตระกูล Bombaceae

#### ลำต้น :

มีลักษณะสูงใหญ่ ลำต้นกลมผิวเรียบ แตกกิ่งรอบลำต้นมักจะขนานกับพื้นดิน ใบเดี่ยวรูปไข่แกมรูปหัวใจ กว้าง 10-15 ซม. ยาว 15-20 ซม. ดอกเดี่ยวหรือเป็นช่อตามซอกใบและปลายกิ่ง ผลเป็นฝักยาว 10-15 ซม. มีขนยาวนุ่มปกคลุมทั่วทั้งฝัก

มีลักษณะเป็นแฉกประมาณ 5 – 8 แฉก รูปหอกห้กกลี 6 – 10 ซม. โปนุ่นจะร่วงเมื่อนุ่นเริ่มออกดอก

ดอก :

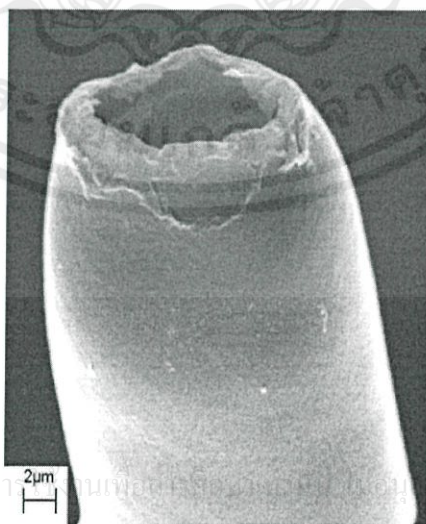
ดอกออกเป็นกระจุกมีสีขาวหรือขาวปนเหลืองเป็นดอกสมบูรณ์เพศดอกบานเต็มที่ ขนาดกว้างประมาณ 5 ซม. และยาวประมาณ 5 ซม. กลีบดอกมี 5 กลีบ ดอกนุ่นจะบานในตอนเย็นและบานถึงตอนเช้า

ผลหรือฝัก :

มีความยาวตั้งแต่ 8 – 50 ซม. หัวท้ายเรียวแหลม เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 – 10 ซม. ผลอ่อนมีสีเขียวเมื่อแก่เต็มที่เปลือกมักจะแตกออกเห็นเส้นใยสีขาวหรือขาวอมเหลือง  
เมล็ด : มีลักษณะกลม สีน้ำตาลหรือดำ

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนุ่น [21]

Cellulose	64 %
Lignin	13 %
Water	8,6 %
Ash	1.4-3.5 %
Water-soluble substance	4.7-9.7 %
Xylan	2.3-2.5 %
Wax	1.4 %



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการ... เพื่อเป็น... ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 โครงสร้างของเส้นใยนุ่น [22]

## สมบัติของนุ่น [23]

ปุยนุ่นมีคุณสมบัติอ่อนนุ่มโยและเบาพิเศษกว่าพืชเส้นใยอื่นๆ คือ ไม่ดูดซับน้ำแต่ดูดซับน้ำมัน สามารถรับน้ำหนักได้ 30 เท่าตัวในน้ำทะเล จึงใช้จัดทำเป็นเสื้อชูชีพ ทำให้ผู้สวมลอยตัวอยู่ในน้ำได้ ทางยุทธปัจจัยใช้ทำชนวนระเบิด เพราะมีคุณสมบัติไวไฟเผาไหม้ได้เร็วมาก ทำวัสดุกันกระแทก ยัดหมอน ที่นอนเครื่องใช้ต่างๆ ใส่ในฝักที่ปั่นเอาเมล็ดและปุยนุ่นออกแล้ว ก็เป็นวัสดุที่มีเซลลูโลสสำหรับใช้เพาะเห็ด เปลือกใช้ทำเชื้อเพลิง

## 2.11 พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) [24]

พลาสติกไซเซอร์เป็นสารเติมแต่งในพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมากโดยทำการเติมลงไปเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่พลาสติก เช่น Di-iso-octylphthalate (DIOP), Dioctyl phthalate (DOP) เป็นต้น โดยพลาสติกไซเซอร์จะเข้าไปแทรกตัวระหว่างโมเลกุลพอลิเมอร์ทำให้แรง Van der Waal ลดลง พลาสติกที่แข็งเปราะ สามารถทำให้อ่อนตัวเหนียวและยืดหยุ่น เพื่อเพิ่มความทนทานต่อความร้อน เพื่อต้านทานต่อการสึกหรอ และสามารถเติมฟิลเลอร์ (Filler) ปริมาณมากขึ้นได้โดยเติมพลาสติกไซเซอร์ พลาสติกที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า Plastic plastisized เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ หรือพีวีซี ที่เราใช้กันอยู่ทุกวันนี้ล้วนแต่เป็น พีวีซีพลาสติกไซส์ทั้งสิ้นในการเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์นั้นควรจะต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ของ พอลิเมอร์กับตัวพลาสติกไซเซอร์ด้วย นอกจากนี้ยังไม่ต้องคำนึงถึงเรื่องราคา เสถียรภาพ และการคงอยู่ของ พลาสติกไซเซอร์ด้วย ซึ่งหมายถึงพลาสติกไซเซอร์บางชนิดจะระเหยออกมาเมื่อสัมผัสความร้อน สารเคมี หรือ ตัวทำละลายบางชนิดได้ นอกจากนี้ยังมีสารเคมีอีกหลายชนิดที่ทำหน้าที่พลาสติกไซเซอร์ในแง่ เช่น กลีเซอรอล ยูเรีย พอร์มาไมด์ ซอบิทอลและกลูโคส เป็นต้น

พลาสติกไซเซชัน (Plasticization) คือ กระบวนการหรือกรรมวิธีที่ช่วยให้พอลิเมอร์นั้นมีการไหลแบบพลาสติก (Plastic Flow)หรือกระบวนการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิเมอร์ซึ่งได้จากการที่เราเติมพลาสติกไซเซอร์ลงในสารผสมของพอลิเมอร์ โดยพลาสติกไซเซอร์แบ่งได้เป็นพลาสติกไซเซอร์ภายใน (Internal plasticizer) และ พลาสติกไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer)

พลาสติกไซเซอร์ภายใน (Internal Plasticizer) เป็น Copolymerization ที่ได้จากการนำ Monomer ที่มี Homopolymer มา Copolymerize กับ Monomer ซึ่ง Homopolymer ของมันมีค่า Tg ต่ำ

กว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีส่วนที่แข็งและอ่อนอยู่ร่วมกัน ไม่สามารถแยกออกจากกันโดยการสกัดออก (Extraction)

พลาสติกไซเซอร์ภายนอก(External Plasticizer)เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

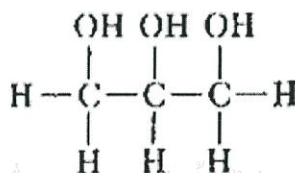
1.พลาสติกไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิ (True plasticizer or primary plasticizer) เมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ปฐมภูมิผสมกับพอลิเมอร์แล้วจะสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี และไม่ซึมออกจากพอลิเมอร์

2.พลาสติกไซเซอร์เสริมหรือพลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer) เมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิผสมกับพอลิเมอร์แล้วจะมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันที่จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติกแท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติกไซเซอร์เสริมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่นๆของพอลิเมอร์ด้วย

## 2.12 กlycerol (Glycerol) [24]

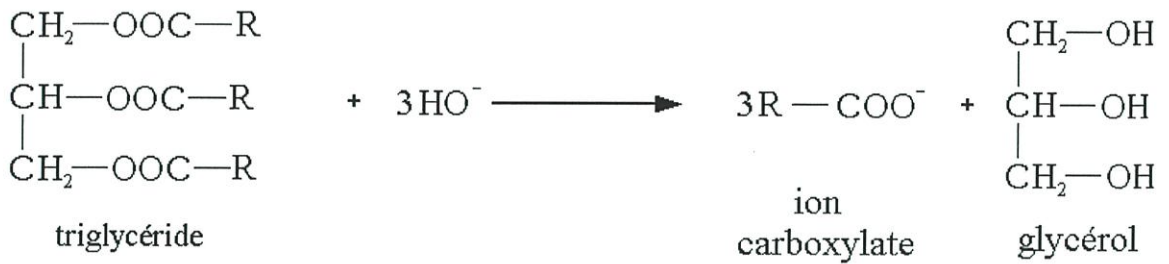
- กlycerol เป็นพอลิแอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม มีน้ำหนักโมเลกุล 92 มีสูตรโครงสร้างดังนี้

สมบัติทางเคมีคล้ายแอลกอฮอล์ H ในหมู่ (OH) มีสมบัติเป็นกรดที่อ่อนมากกว่ากlycerol มีสมบัติเป็นของเหลวหนืด มีรสหวาน 0.6 เท่าของน้ำตาล ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำและแอลกอฮอล์ได้ดีที่อุณหภูมิปกติ กlycerol ใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางที่ให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวเรียกว่า มอยส์เจอร์ไรเซอร์ โดยส่วนมากกlycerol จะมาจากผลพลอยได้ในการผลิตสบู่และกรดไขมัน โดยมีกรดหรือเบสเจือจางเป็นตัวเร่งหรือที่เรียกว่าปฏิกิริยา Saponification



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกlycerol [25]



รูปที่ 2.11 ปฏิกิริยา Saponification [26]

### 2.13 สารช่วยผสม (Compatibilizer) [27]

การเติมสารช่วยผสมนั้นช่วยแก้ปัญหาการทำพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) ทำให้ของผสมนั้นเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเมื่อเราไม่มีการเติมสารช่วยผสมนี้ลงไปก็จะทำให้เกิดข้อบกพร่องต่างๆ เช่น มีสมบัติการยึดติดที่พื้นผิวระหว่างวัฏภาคไม่ดี ค่าความตึงผิวที่พื้นผิวระหว่าง 2 วัฏภาค (Interfacial tension) สูง และทำให้สัณฐานวิทยา (Morphology) ที่ไม่เสถียรเมื่อผ่านกระบวนการแปรรูป ดังนั้นสารช่วยผสม (Compatibilizer) ใช้ผสมเพื่อให้เกิดผลดังต่อไปนี้

- เพื่อช่วยในการละลายและลดแรงตึงผิว (Surface tension) ซึ่งกันและกัน ระหว่างวัฏภาคที่แยกกันอยู่
- ทำให้ขนาดของอนุภาคเฟสที่กระจายตัวลดลง
- เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibilizer)
- ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสัณฐานวิทยาที่เสถียรขณะผ่านกระบวนการแปรรูป

ซึ่งวิธีการที่สามารถทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีขึ้น แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. Non-reaction Blending คือการเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เกิดปฏิกิริยา ทั้งนี้ สารช่วยผสมที่ใช้ควรมีสูตร โครงสร้างที่เหมือนกับพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันเพื่อให้เกิดการเกี่ยวพัน (Entanglement) กับวัฏภาคทั้งสองของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งสารช่วยผสมที่นิยมใช้กันคือ พอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) ซึ่งมีหลายชนิด เช่น พอลิเมอร์แบบโคปอลิเมอร์ แบบไตรบลิค แบบกราฟท์หรือแบบสุม

2. Reactive Blending เป็นวิธีการเติมสารช่วยผสมลงในพอลิเมอร์ผสมแบบเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมนั้นมีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีขณะที่ทำการผสม หรือทำให้เกิดกราฟท์พอลิเมอร์ ชนิดหนึ่งให้มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีกับ

พอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ตัวอย่างเช่น การกราฟท์พอลิเอทิลีนด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride) หรืออะคริลิกแอซิด (Acrylic acid) ซึ่งทำให้มีหมู่คาร์บอกซิลที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับ พอลิเมอร์ชนิดอื่นที่มีหมู่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมี เช่น พอลิเอไมด์

ในงานวิจัยนี้เราใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนเป็นการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่เสถียร ซึ่งจะทำให้สมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physical Chemical Properties) ดีขึ้น โดยเพิ่มความมีขั้วของพอลิเอทิลีน โดยทำให้มีความเป็นบวกเพิ่มขึ้นและความสามารถในการยึดติดเพิ่มขึ้น พบว่าแอนไฮไดรด์ เป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมโยงเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เพิ่มความสามารถในการต้านทานความร้อนและเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์อื่นรวมทั้งสารตัวเติมได้เป็นอย่างดี

#### 2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัชร คุณวิวัฒน์ และคณะ [3] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) โดยการใช้แป้งข้าวเจ้ามาเป็นส่วนผสมหลัก และทำการผสมกับแป้งชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งท้าวยายม่อม หรือแป้งถั่วเขียว ในอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0 75:25 50:50 25:75 และ 0:100 โดยเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเตรียมได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมแบบระบบปิด (Internal mixer) แล้วขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากนั้นทำการศึกษารวดสี พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมมีความสว่างมากที่สุดและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้ามีสีออกแดงมากที่สุด สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงที่สุดพบได้ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว สำหรับแป้งผสมนั้นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งผสมของแป้งข้าวเจ้ากับแป้งถั่วเขียวแสดงสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ส่วนการทดสอบการดูดซับน้ำ ผลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำมากที่สุดและน้อยที่สุด คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว ตามลำดับ นอกจากนี้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งทุกสูตรแสดงให้เห็นว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้น สำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดิน เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้ามีการย่อยสลายเร็วที่สุด และจากการศึกษานี้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเขียว

**พิมพ์ชนก แสงนิติเดช และเพ็ญฤทัย บุญประสิทธิ์ [28]** ได้ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เริ่มจากการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเส้นใยฝ้าย หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำการเตรียมแป้งข้าวเจ้ากับกลีเซอรอลผสมเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High-speed mixer) จากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิและความเร็วรอบ 170 องศาเซลเซียสและ 40 รอบต่อนาที แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) พบว่าเส้นใยฝ้ายมีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์ของแป้งมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จากนั้นปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยการใส่สารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮดรอกซีกราฟท์พอลิเอทิลีนหรือไวนิลไตรเมทอกซีไซเลนลงไป พบว่าเมื่อใช้สารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮดรอกซีกราฟท์พอลิเอทิลีนทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นชัดเจนกว่าการใช้สารคู่ควบไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน แต่มีเสถียรภาพทางความร้อนน้อยกว่าในส่วนฐานวิทยาศาสตร์เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าสารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮโดรกราฟท์พอลิเอทิลีนและสารคู่ควบไวนิลไตรเมทอกซีไซเลนทำให้เมทริกซ์ของแป้งและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเข้ากันได้ดีขึ้น นอกจากนี้การย่อยสลายของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้สารช่วยผสมมาเลอิกแอนด์ไฮโดรกราฟท์ พอลิเอทิลีนหรือไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน

**วรวิทย์ โพนนิกร [29]** ศึกษาถึงการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE) จากขบวนการรีไซเคิลมาทำการผสมกับสารตัวเติมอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อม โดยใช้ปริมาณแป้ง 10 20 และ 30 % โดยการหลอมและนำไปขึ้นรูปเพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของแป้งที่ส่งผลกระทบต่ออายุการย่อยสลายของพอลิเมอร์ จากผลการทดลองพบว่าชนิดและปริมาณของแป้งมีผลกระทบต่ออายุการทดสอบความแข็งแรงดึง กล่าวคือ เมื่อปริมาณแป้งมากขึ้น ทำให้ความทนแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่า โมดูลัสเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมแป้ง และเมื่อทำการศึกษาฐานวิทยาศาสตร์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าหลังการฝังกลบพอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่างๆ เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมแป้งและการเติมแป้งสาลีทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าการเติมแป้งข้าวเจ้าและแป้งท้าวยายม่อม ตามลำดับ

**H-S. Kim และคณะ [30]** ได้ทำการศึกษาการเติมสารช่วยผสมสองชนิดที่แตกต่างกัน ได้แก่ มาเลอิกแอนด์ไฮดรอกซี-กราฟต์-พอลิพรอพิลีน (MAPP) และ มาเลอิกแอนด์ไฮดรอกซี-กราฟต์ พอลิเอทิลีน (MAPE) ลงในคอมโพสิตของพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่มีการใช้แป้งจากแกลบ (Rice husk flour) และใช้ Bio-flour เป็นสารเสริมแรงโดยได้ทำการศึกษาถึงความแตกต่างของพอลิเมอร์ MAPE ซึ่งได้แก่ HDPE-MA และ LLDPE-MA ด้วยจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ MAPE และ MAPP พบว่าเสถียรภาพทางความร้อน มอดุลัสสะสม ( $E'$ ) อุดหนุนเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้วและมอดุลัสสูญเสีย ( $E''$ ) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับเสถียรภาพทางความร้อน  $E'$  และ  $E''$  เมื่อใช้ MAPE พบว่ามีค่าไม่เปลี่ยนแปลงถึงจะใช้ MAPE ต่างชนิดกันก็ตาม สำหรับอูดหนุนการหลอมเหลวของคอมโพสิตไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแต่ค่าความเป็นผลึกของคอมโพสิตที่ใช้ MAPP และ MAPE เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปริมาณของ MAPP และ MAPE เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าเสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติอื่นๆ เนื่องมาจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างพื้นผิวของสารช่วยผสมกับแป้งและเมทริกซ์ โดยผลการทดลองสามารถยืนยันได้การวิเคราะห์ FTIR-ATR ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของคอมโพสิตเมื่อมีการใส่ MAPP และ MAPE ลงไปผลของการเติม HDPE-MA และ LLDPE-MA ลงไปทำให้พื้นผิวของคอมโพสิตดีขึ้นสามารถเข้ากันได้กับแป้งจากแกลบ และ การใช้ HDPE-MA ทำให้องศาความเป็นผลึก (Crystallinity,  $X_c$ ) ของคอมโพสิตเพิ่มขึ้นกว่าการใช้ LLDPE-MA

**แพรววลิตา บุญกัณฑ์ ศรีกัลยา ศรีปาน และสุธาณี พันธุ์ประชา [31]** ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งถั่วเหลืองโดยใช้เส้นใยฝ้ายและเส้นไหมเป็นส่วนเสริมแรงโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งถั่วเหลืองและผลของปริมาณของเส้นใยฝ้ายและเส้นไหม ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ การเตรียมทำได้โดยการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกลสถัญฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติการดูดน้ำ และสมบัติการย่อยสลาย จากการทดลองพบว่าการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่อัตราส่วน 100 : 0 ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายมีค่าต่ำสุด เส้นใยฝ้ายและเส้นไหมสามารถเสริมแรงเทอร์โมพลาสติกสตาโรซได้และสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงที่สุด พบได้ในเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ผสมเส้นใยฝ้าย 10 % โดยน้ำหนัก จากสถัญฐานวิทยาเมื่อเพิ่มปริมาณแป้งถั่ว

เหลืองพบว่าพื้นผิวชิ้นงานมีลักษณะขรุขระ นอกจากนี้สามารถพบ เมทริกซ์ของแป้งปกคลุมพื้นผิวของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยไหมจาก TGA เทอร์โมแกรม อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชทุกตัวอย่าง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการเติมเส้นใยฝ้ายหรือเส้นใยไหม นอกจากนี้โปรตีนที่มีอยู่ในแป้งถั่วเหลืองและเส้นใยไหมสามารถเพิ่มการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชได้

**R. Zullo และคณะ [32]** ได้ทำการศึกษาผลของของแป้งและพลาสติกไซเซออร์จากหลายแหล่งผลิตเพื่อใช้ในการเป่าฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตา์ช โดยใช้แป้ง 3 ชนิด คือ แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งมันสำปะหลังที่มีปริมาณอะไมโลสในเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างกันและจากหลายแหล่งการผลิตมาผสมกับ พลาสติกไซเซออร์ 2 ชนิด คือ กลีเซอรอลและยูเรีย/ฟอร์มามิด (2:1) หลังจากนั้นนำส่วนผสมระหว่างแป้งและพลาสติกไซเซออร์ในอัตราส่วน 70 : 30 สำหรับตัวอย่างทั้งหมด ยกเว้นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตา์ชจากแป้งมันสำปะหลังใช้อัตราส่วน 80 : 20 จากนั้นทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) แล้วนำเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ได้ไปเป่าขึ้นรูปเป็นฟิล์ม นำฟิล์มที่เตรียมได้นั้นไปศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลจากผลการทดสอบพบว่าฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตา์ชสูตรที่ประกอบด้วยแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (> 50 %) ผสมกับยูเรีย/ฟอร์มามิด (30 %) นั้นมีสมบัติที่ดีที่สุด โดยสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่มีความหนา 50 ไมโครเมตร และการใช้กระบวนการเป่าฟิล์มที่มีประสิทธิภาพ ทำให้มีสมบัติการดึงยึดที่ดี มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างสูงขณะทำการหลอมเหลว

**A. Cordoba และคณะ [33]** ได้ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตา์ช (Thermoplastic Starch) จากแป้งข้าวโพด (Corn Starch) โดยใช้กลีเซอริน (Glycerin) เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่ปริมาณ 30 % โดยน้ำหนักและมีการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชด้วยอัลจิเนต (Alginate) ที่ 0 5 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก ทำผสมด้วยเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Brabender) ที่อุณหภูมิ 140 °C และความเร็วรอบ 32 รอบต่อนาที ไปเป็นเวลา 8 นาที แล้วทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 10 นาที เมื่อทำการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อปริมาณของอัลจิเนตเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มให้มอดูลัสของยังและความแข็งแรงของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชลดลง แต่ทำให้เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด และความ

ด้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเติมอัลจินเนตทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นสำหรับสมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของอัลจินเนตเพิ่มขึ้น ส่วนลักษณะทางกายภาพพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาเรชมีความเข้ากัน ได้มากขึ้นเนื่องจากอัลจินเนตไปลดขนาดอนุภาคของเม็ดแป้ง

**W. Ning และคณะ [34]** ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกรดซิตริก (Citric acid) ที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเรช ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวโพด (Corn Starch) โดยใช้กลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์ ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low-Density Polyethylene) ในอัตราส่วน TPS : LLDPE : CA = 100 : 100 : 1, 100 : 100 : 2, 100 : 100 : 3 พบว่าการใช้กรดซิตริกช่วยปรับปรุงการแพร่กระจายและการพลาสติกไซเซชันของแป้งซึ่งแสดงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ในขณะเดียวกันการเพิ่ม CA ที่ 3% โดยน้ำหนักของ LLDPE ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง สำหรับการศึกษาศสมบัติการไหลได้นั้น พบว่ากรดซิตริกมีผลทำให้ค่าความเหนียวลดลงและยังช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลได้ของเทอร์โมพลาสติกที่ผสมด้วยพอลิเอทิลีนอีกด้วย เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี พบว่ากรดซิตริกสามารถทำให้โมเลกุลของแป้งที่มีปฏิกิริยาต่อกันนั้นอ่อนลง และช่วยปรับปรุงการพลาสติกไซเซชันของแป้งอีกด้วย นอกจากนี้กรดซิตริกยังสามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำได้อีกด้วย

**X. F. Ma และคณะ [35]** ได้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้งข้าวสาลี (Thermoplastic wheat flour, TPF) โดยใช้พลาสติกไซเซอร์ผสมระหว่างยูเรีย (Urea) และฟอร์มามิด (Formamide) ในอัตราส่วน 1:2 ที่ปริมาณ 20 30 40 และ 50 % โดยน้ำหนักของแป้งด้วยเครื่องอัดรีดชนิดสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) ความต่อเนื่องของวัฏภาคของเม็ดแป้งข้าวสาลีถูกตรวจสอบด้วย SEM พบว่าเมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้น TPF มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากขึ้น การวิเคราะห์สมบัติการไหลพบว่าอุณหภูมิของกระบวนการอัดรีดมีผลต่อการปรับตัวของพฤติกรรมไหลของ TPF โดยความเหนียวมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ พลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้นสำหรับ TPF ที่มีปริมาณพลาสติกไซเซอร์ผสม 30 % ให้สมบัติเชิงกลค่อนข้างดี ค่าความแข็งแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาด พลังงาน ณ จุดขาด และโมดูลัสของยังมีค่า 2.07 MPa 44% 0.35 N และ 20.1 MPa ตามลำดับ สำหรับการทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) นั้น TPF ที่มีปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่ำ ให้ความต้านทานการดูดซับที่ดีกว่า และเมื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของ TPF มีค่าลดลง เมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้น

W. Shujun และคณะ [36] ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ์ (TPS) จากแป้งข้าวโพด (Corn Starch) กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) ที่เตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสม โดยใช้ TPS และ LLDPE ในอัตราส่วน 50:50 ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยวและศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetry (TG) สัณฐานวิทยาด้วย SEM และสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ซึ่งการใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวเพื่อทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยใช้ความร้อน (Plasticisation) จากงานวิจัยพบว่าค่าความแข็งแรงดึงและการดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ TPS เพิ่มขึ้น สำหรับการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าการใช้ TPS และ แอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride, MAH) พบว่าให้สมบัติเชิงกลดีกว่าการที่ไม่เติม ซึ่งสามารถบอกได้โดยใช้เทคนิค TG ที่พบว่ามีการเสถียรภาพทางความร้อนมากขึ้นและเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมมาผสมกับ MAH ทำให้ TPS กับ LLDPE ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น เทคนิค FTIR แสดงให้เห็นถึง MAH สามารถต่อกิ่งบนสายโซ่ของ LLDPE ได้โดยใช้กระบวนการเดียวกับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPS กับ LLDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 สารเคมี

1. แป้งท้าวขยวม่อม ทรายลาทอง จากห้างหุ้นส่วนสามัญนิติบุคคล ตงจั้น องค์กรประกอบทางเคมีของแป้งท้าวขยวม่อม แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์กรประกอบทางเคมีของแป้งท้าวขยวม่อม [13]

องค์ประกอบ	ร้อยละ
ไขมัน	0.03
เส้นใยหยาบ	0.41
โปรตีน	0.05
เถ้า	0.15
คาร์โบไฮเดรต	99.36

2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System

3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene, LDPE) สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเกรดชนิด (LD1630J) จากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้	วิธีการทดสอบ
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g / 10 min	28	ASTM D1238
ความหนาแน่น (Density)	g / 10 cm <sup>3</sup>	0.915	ASTM D 1505
จุดหลอมเหลว (Melting point)	°C	110	ASTM D 2117

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

#### 4. เส้นใยฝ้าย เส้นใยขนุน

5. มาเลอิกแอนไฮไดรด์-กราฟท์-พอลิเอทิลีน (Maleic anhydride-graft-polyethylene, MAPE) สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์-กราฟท์-พอลิเอทิลีน แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 สมบัติของมาเลอิกแอนไฮไดรด์-กราฟท์-พอลิเอทิลีน เกรด การค้า MB 100 D จาก บริษัท Dupont Packaging & Industrial Polymer

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้	วิธีการทดสอบ
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g / 10 min	2	ASTM D1238 – ISO1133
ความหนาแน่น (Density)	g / 10 cm <sup>3</sup>	0.96	ASTM D 1505
จุดหลอมเหลว (Melting point)	°C	134	ASTM D 3418 – ISO3146

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโรงงานพิเศษ

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) BRABENDE รุ่น MX500-D75L90, CHAREON
2. เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) COSMO รุ่น TTI-220/80 HI TECH, WELLTEC INDUSTRIAL EQUIPMENT
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) LEO รุ่น JSM-5410 LV; JEOL
4. เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) รุ่น PYRIS Diamond, PERKIN ELMER

5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing machine) Lloyd Instrument รุ่น LR 5k,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

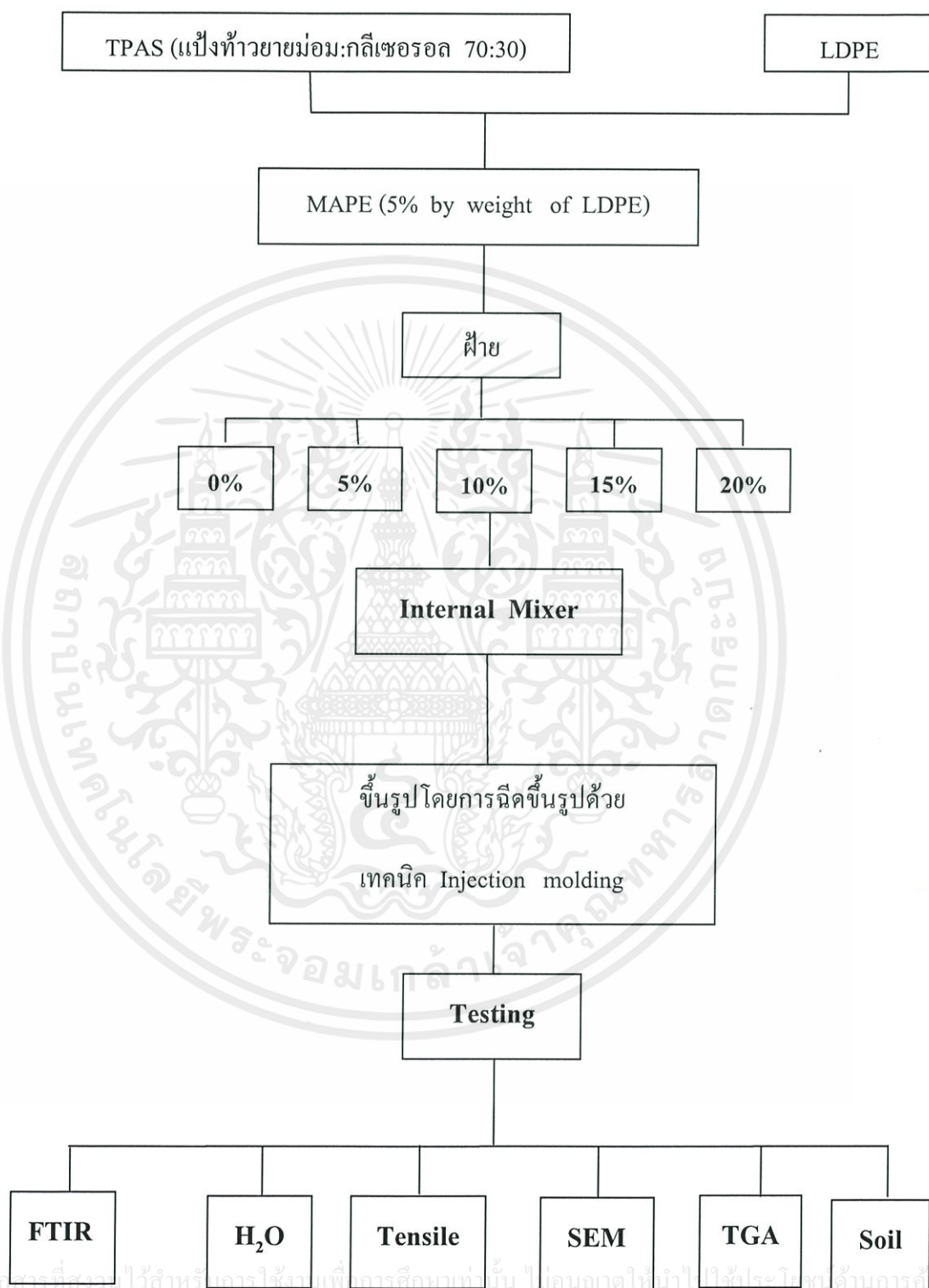
INTRO ENTERPRISE

6. เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (IR Spectrophotometer) รุ่น SPECTRUM GX,  
PERKIN ELME
7. เครื่องชั่งแบบละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
8. ถังมือกันความร้อน
9. เกรียง
10. ตู้อบ



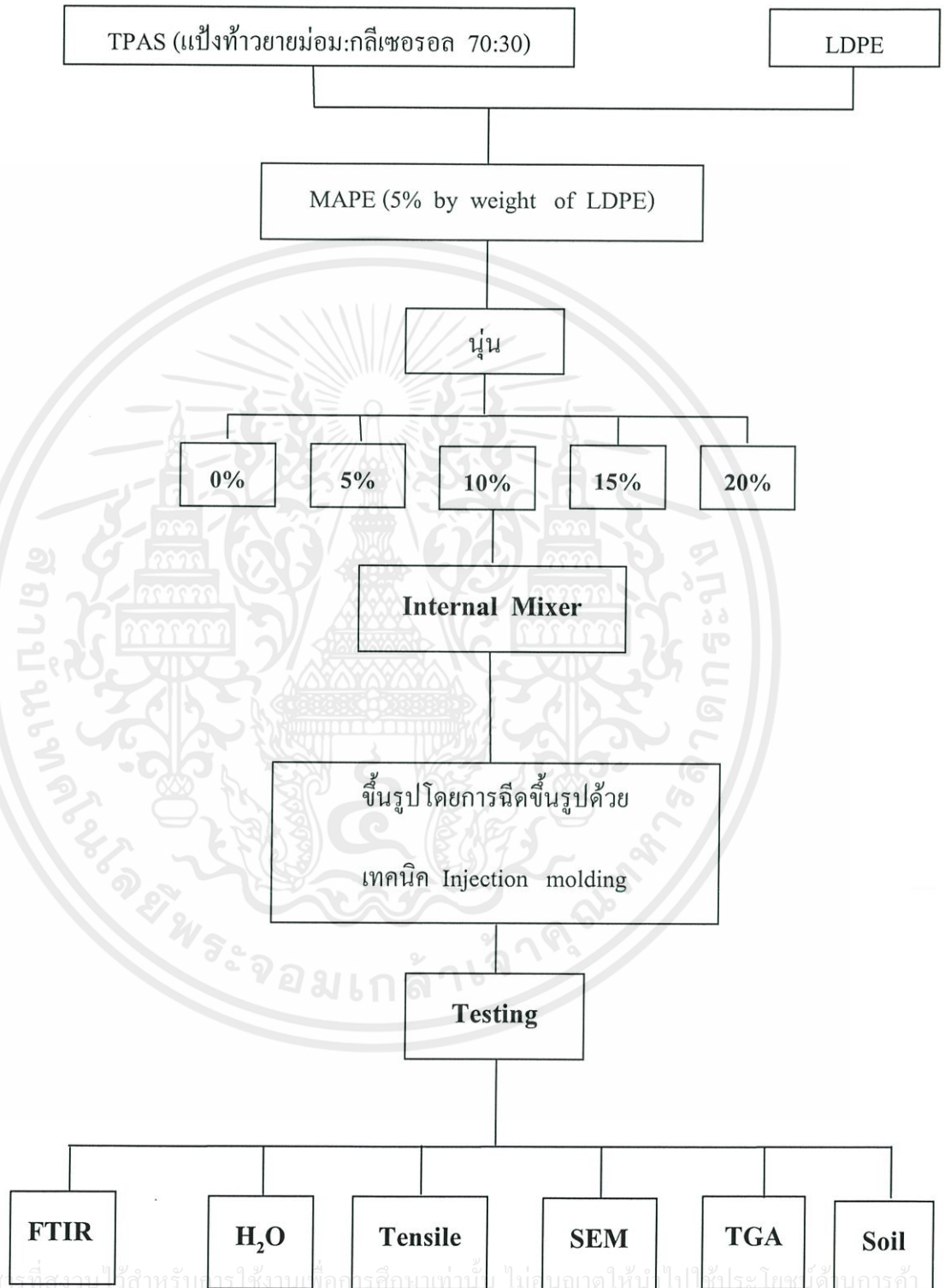
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แผนผังขั้นตอนการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปแจ้งประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แผนผังขั้นตอนการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### ตอนที่ 1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE

3.3.1.1 ทำการชั่งน้ำหนักแป้งท้าวายม่อมและกลีเซอรอลใส่ลงภาชนะ ในอัตราส่วน 70:30 ทำการผสมให้เข้ากัน

3.3.1.2 เก็บของผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในแป้ง

3.3.1.3 นำ TPAS ที่เตรียมได้มาผสมกับ LDPE ในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 โดยน้ำหนัก และมาเติมแอนไฮไดรด์ กราฟท์พอลิเอทิลีน(MAPE) 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของ LDPE ดังตารางที่ 3.4 ด้วย เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)

3.3.1.4 นำของผสมที่เตรียมได้มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่ อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียสและที่ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

#### ตอนที่ 2 การขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE

3.3.2.1 นำ TPAS/LDPE ที่ได้จาก ตอนที่ 1 มาทำการบด

3.3.2.2 นำของผสมที่ได้จากการบดไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.2.3 นำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ตามสภาวะดังตารางที่ 3.6

3.3.2.3 นำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

#### ตอนที่ 3 การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ด้วยเส้นใยธรรมชาติ

3.3.3.1 ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่เตรียมได้ในตอนที่ 2 ที่มี สมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยใช้เส้นใยฝ้าย ในปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ น้ำหนักของ TPAS

3.3.3.2 ทำการปรับปรุงสมบัติ TPAS/ LDPE ที่เตรียมไว้ในตอนที่ 2 ที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยใช้เส้นใยถั่ว ในปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของ TPAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังไม่ได้ตีพิมพ์ลงนิตยสาร และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารที่ตีพิมพ์ทุกครั้ง

3.3.3.3 ทำการปรับปรุงสมบัติ TPAS ผสม LDPE ที่เตรียมไว้ในตอนที่ 1 ที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยใช้เส้นใยุ่น ในปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของ TPAS

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างTPAS/LDPE โดยมี MAPE เป็นสารช่วยผสม

TPAS (g)	LDPE (g)	MAPE (g)
100	0	0
90	10	0.5
80	20	1
70	30	1.5
60	40	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยุ่น โดยมี MAPE เป็นสารช่วยผสม

TPAS (g)	LDPE (g)	MAPE (% wt LDPE)	เส้นใยฝ้าย (% wt TPAS)	เส้นใยุ่น (% wt TPAS)
*	*	5	0	0
*	*	5	5	0
*	*	5	10	0
*	*	5	15	0
*	*	5	20	0
*	*	5	0	5
*	*	5	0	10
*	*	5	0	15
*	*	5	0	20

(\*) เป็นปริมาณของ TPAS/LDPE ที่ได้จากตอนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป (Injection molding)

Description	Unit	Value
<b>PRESSURE</b>		
1 <sup>st</sup> stage pressure	Bar.	65
2 <sup>nd</sup> stage pressure	Bar.	65
3 <sup>rd</sup> stage pressure	Bar.	65
<b>FLOW SPEED</b>		
1 <sup>st</sup> stage injection speed	rpm	30
2 <sup>nd</sup> stage injection speed	rpm	30
3 <sup>rd</sup> stage injection speed	rpm	30
<b>TIME</b>		
1 <sup>st</sup> stage injection time	Sec.	30
2 <sup>nd</sup> stage injection time	Sec.	30
3 <sup>rd</sup> stage injection time	Sec.	30
Melting time	Sec.	500
Cooling time	Sec.	200
<b>TEMPERATURE</b>		
Zone 1	°C	140
Zone 2	°C	145
Zone 3	°C	150

### 3.4 วิธีการทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.10 กรุณาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ตารางที่ 3.7 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
แรงดึง (Load)	ASTM D 638	N
ความเค้น ณ จุดแรงดึงยืดสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young's modulus)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Strain at maximum load)	ASTM D 638	Mm
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (% Strain at maximum load)	ASTM D 638	%

#### 3.4.1.1 แรงดึงความแข็งแรงดึง มอดุลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ซึ่ในงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปคัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์ทดสอบตามสภาวะดังนี้

TEST SPEED : 40 mm/min

GAUGE LENGTH : 25 mm

LOAD CELL : 5 kN



รูปที่ 3.4 ลักษณะชิ้นงานคัมเบลล์ที่นำมาทดสอบ [37]

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น

ความเค้น ณ จุดแรงดึงยืดสูงสุด (Stress at maximum load) =  $F/A$  การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (% Strain at maximum load) =  $[(L - L_0) / L_0] * 100$

เมื่อ F คือแรงที่ใช้ดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

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

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

$L_0$  ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

### 3.4.2 การทดสอบสัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป

### 3.4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (Onset degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (% Weight loss at onset degradation temperature) ของ เทอร์โมพลาสติกสตาบิลด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) ทำได้โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้บรรยากาศไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ที่สภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง 50 – 600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating Rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้วจึงนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram) ได้เป็น DTG

### 3.4.4 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 x 50 มิลลิเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 30 - 40 เปอร์เซ็นต์ดินมีความเป็นไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้รดน้ำและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ กรด-ด่าง เท่ากับ 7 และอุณหภูมิของดินมีค่าเท่ากับ 32 องศาเซลเซียส การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วย

ความระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปในดิน ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักของพอลิเมอร์ ผสมที่ลดลงในแต่ละสัปดาห์ เป็นระยะเวลา 3 เดือน

### 3.4.5 การทดสอบหาปริมาณดูดซับน้ำ

ทดสอบการดูดซับน้ำ (Water absorption) ตามมาตรฐาน ASTM D 570 โดยนำชิ้นงาน ตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ จดน้ำหนักไว้ จากนั้นนำไปแช่น้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุกๆ 1 วัน แล้วคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำได้ดังนี้

$$W_a (\%) = (W_o - W_e) / W_o \times 100$$

เมื่อ  $M_c$  คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น

$W_o$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

$W_e$  คือ น้ำหนักของชิ้นหลังแช่น้ำ

### 3.4.6 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Infrared Spectroscopy) ทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวจนกระทั่งเป็นฟิล์มแผ่นบาง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2-3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์แล้วนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน  $10^4 \text{ kg/cm}^2$  นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์จะได้สเปกตรัมของสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและศึกษาผลของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจาก พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE พอลิเมอร์ผสมเตรียมได้ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection Molding) จากนั้นทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย (Cotton fiber) และเส้นใยนุ่น (Kapok fiber) ที่ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสม มาศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล ล้วนฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติการดูดซับน้ำ และสมบัติการย่อยสลาย

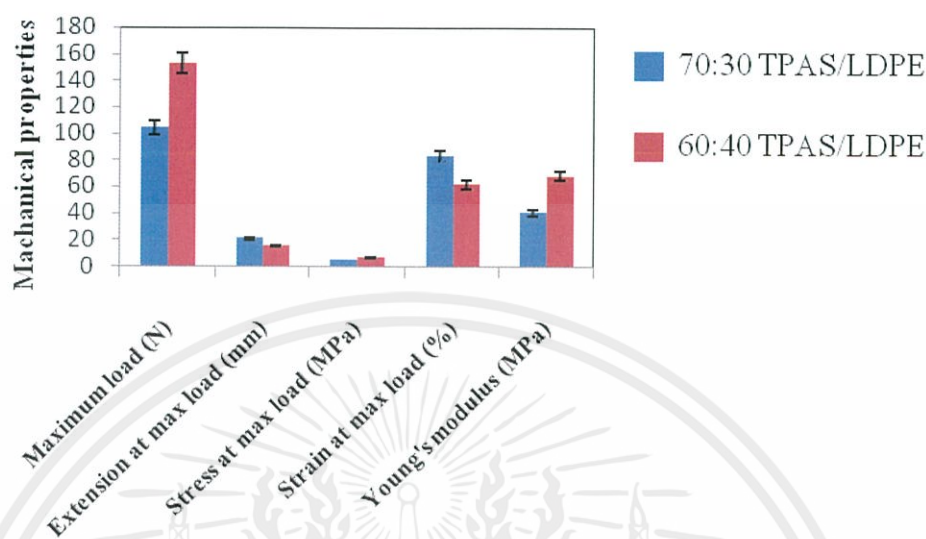
#### 4.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง TPAS/ LDPE ที่มีต่อสมบัติเชิงกล

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพหลังการฉีด

อัตราส่วน (TPAS : LDPE)	ลักษณะทางกายภาพ
100:0	ไม่สามารถฉีดออกได้ ชิ้นงานติดอยู่ทาง Runner ไม่สามารถแกะชิ้นงานได้
90:10	ฉีดออก แต่ชิ้นงานไม่สมบูรณ์ และชิ้นงาน บางส่วนติดทาง Runner ไม่สามารถแกะชิ้นงาน ได้ รูปร่างไม่เหมือนแม่พิมพ์
80:20	ฉีดออก แต่ติดทาง Runner ไม่สามารถแกะ ชิ้นงานได้ ลักษณะชิ้นงานไม่สมบูรณ์
70:30	ฉีดออก ชิ้นงานสมบูรณ์ตามแม่พิมพ์ ไม่ติด แม่พิมพ์
60:40	ฉีดออก ชิ้นงานสมบูรณ์ตามแม่พิมพ์ ไม่ติด แม่พิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการศึกษ้อัตราส่วนพบว่า อัตราส่วน 70:30 และ 60:40 สามารถฉีดขึ้นรูปได้ ดังนั้น นำ 2 อัตราส่วนนี้มาทดสอบสมบัติเชิงกล ให้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ในอัตราส่วน 70:30 และ 60:40

จากรูปที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วน 60:40 ให้ค่าแรงดึง ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุดและมอดุลัสมากกว่าอัตราส่วน 70:30 ทำให้รับแรงได้มากกว่าและมีสมบัติเชิงกลดีกว่า แต่มีปริมาณของ TPAS น้อยกว่า ทำให้ในการย่อยสลายช้าลง แต่อัตราส่วน 70:30 ให้ค่าความเครียดและการดึงมากกว่า เพราะมีส่วนของแป้งมากกว่า จากปริมาณแป้งที่มากกว่าทำให้ย่อยสลายได้เร็วกว่าเป็นการลดการใช้พลาสติก ดังนั้นจึงเลือกอัตราส่วน 70:30 มาทำการศึกษาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-IR

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันทำได้โดยการใช้เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) โดยใช้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายในอัตราส่วน 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยขนุนในอัตราส่วน 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง พิกที่ปรากฏมีลักษณะคล้ายกันดังที่แสดงในตารางที่ 4.1

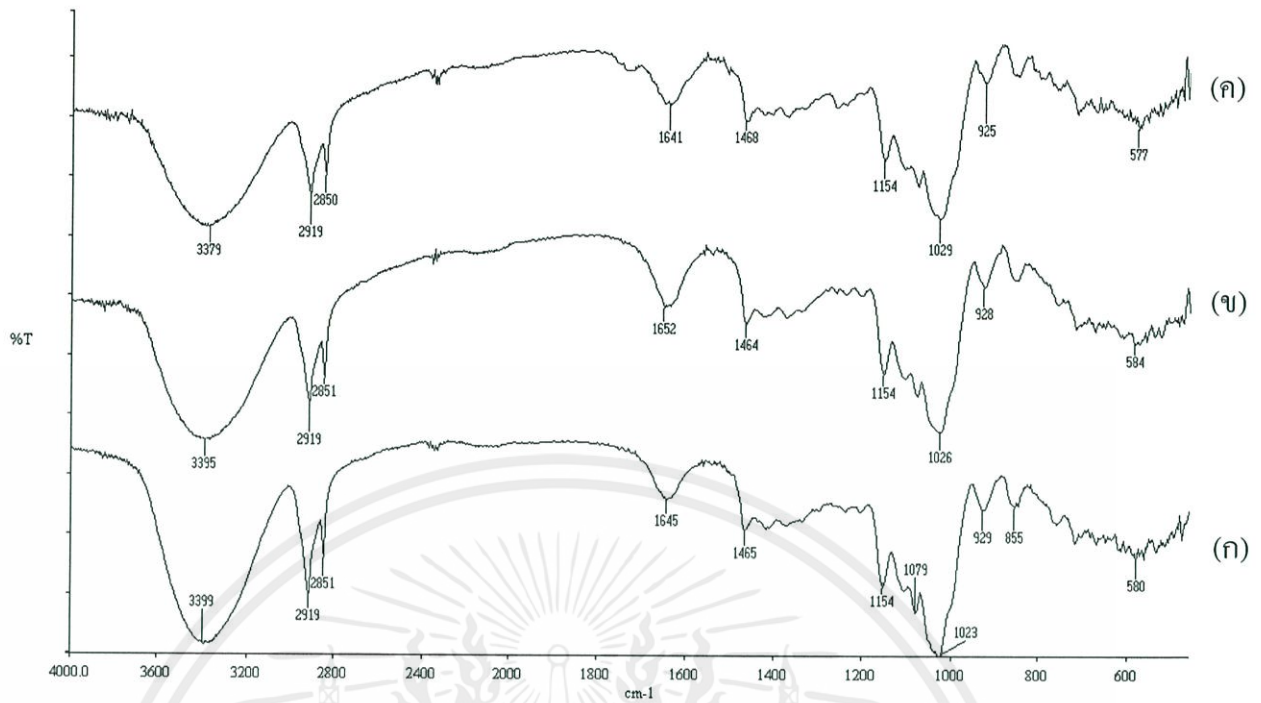
ตารางที่ 4.2 ตำแหน่งของพิกในอินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสม [38]

Wavenumber range, $\text{cm}^{-1}$	Functional group
3600-3200	O-H stretching
3000-2800	C-H (-CH <sub>2</sub> -, -CH <sub>3</sub> ) stretching
1650-1635	Bounded water
1485-1445	O-H-bending
1475-1450	CH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> bending
1200-1000	C-O-H bending
940-900	C-H out-of-plane-bending
770-735	C-H out-of-plane-bending

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายจากการศึกษาหมู่ฟังก์ชัน

ของ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ผสมเส้นใยฝ้ายในอัตราส่วน 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย (ก) 0 เปอร์เซ็นต์ (ข) 10 เปอร์เซ็นต์ และ (ค) 20 เปอร์เซ็นต์

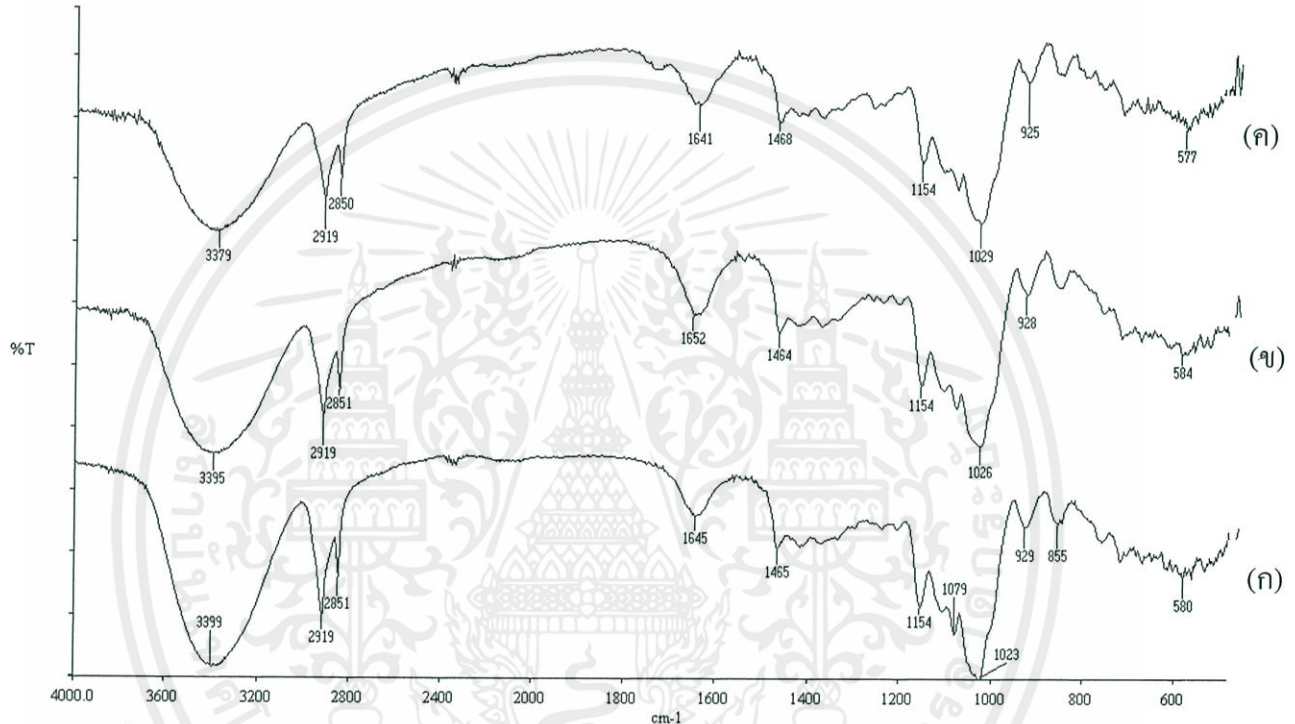
จากรูปที่ 4.2 (ก) แสดงสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE พบว่าพีคที่ตำแหน่ง  $3399\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ O-H stretching พีคตำแหน่งที่  $2919\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching พีคที่  $2851\text{ cm}^{-1}$  เป็น C-H stretching ของแอลดีไฮด์ แถบพีคที่ตำแหน่ง  $1645\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ O-H ของโมเลกุลน้ำที่อยู่ในเป้ง พบพีคที่  $1465\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ O-H bending พบพีคที่  $1154\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะของ C-O-H bending ของเป้งพบแถบพีคที่  $925$  และ  $858\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ C-H out-of-plane [38]

เมื่อพิจารณาดำเนินการสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของเป้ง (รูปที่ 4.2 (ข)-(ค)) พบว่าพีคที่  $3399\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching พบว่าพีคที่ตำแหน่งนี้เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่เลขคลื่นลดลง การเปลี่ยนแปลงของพีคที่มีการเคลื่อนที่ไปยังเลขคลื่นที่ลดลงนี้แสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น แสดงให้เห็นถึงพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นใหม่ระหว่างเป้งและเส้นใยฝ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าที่เต็มลงไป ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ A.Pawak and M.Mucha โดยรายงานวิจัยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ทั้งสองได้กล่าวไว้ว่า พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสององค์ประกอบที่ผสมกัน สามารถศึกษาได้

จากเทคนิค FT-IR โดยเมื่อสององค์ประกอบมีความเข้ากันได้ จะทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้นระหว่างองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 โดยทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเดี่ยวๆ [39]

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยนำน้ำหนักของแป้ง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยุ่น (ก) 0 เปอร์เซ็นต์ (ข) 10 เปอร์เซ็นต์ และ (ค) 20 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของรอยละสังผ่านแสงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE พบพีกที่ตำแหน่ง  $3399\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ O-H stretching พีกตำแหน่งที่  $2919\text{ cm}^{-1}$  และ  $2850\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นแบบ C-H stretching ของแอลคิลไฮด์ แถบพีกที่ตำแหน่ง  $1645\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ bond water พบแถบพีกที่  $1154\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะของ C-O-H bending ของแป้งพบแถบพีกที่  $929$  และ  $855\text{ cm}^{-1}$  เป็นลักษณะการสั่นของ CH out-of-plane

[38] เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยุ่น 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง (รูปที่ 4.3 (ข)-(ค)) พบว่าพีกที่  $3399\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงลักษณะการสั่นแบบ O-H stretching พบว่าพีกที่ตำแหน่งนี้เกิดการเคลื่อนไปที่เลขคลื่นลดลง การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมที่มีการเคลื่อนที่ไปยังเลขคลื่นที่ลดลงนี้

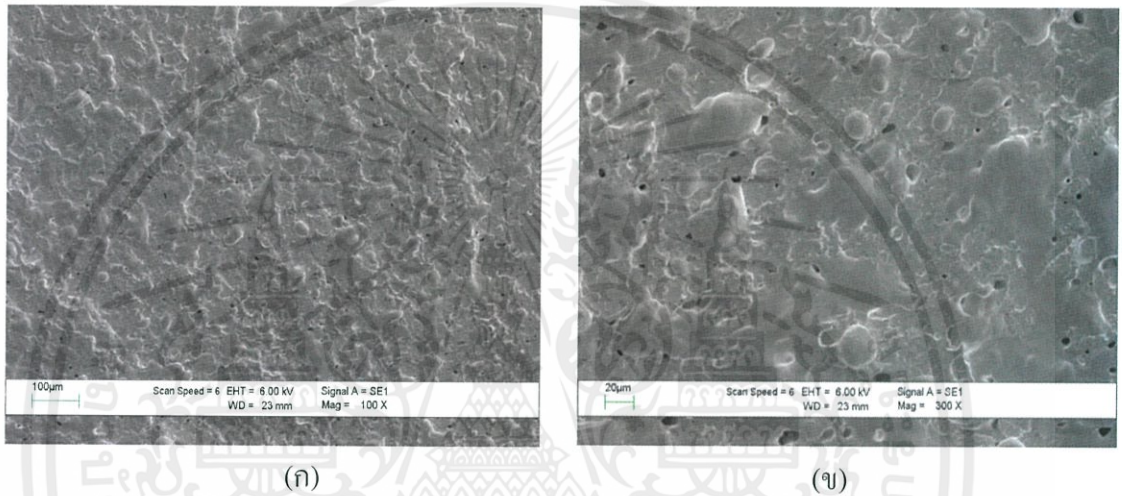
แสดงให้เห็นว่าเกิดอันตรกิริยาทางเคมีเกิดขึ้น โดยมีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งและเส้นใยุ่นที่เติมลงไป ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ A.Pawak and M.Mucha โดยรายงานวิจัยทั้งสองได้กล่าวว่า พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสององค์ประกอบที่ผสมกันสามารถศึกษาได้จากเทคนิค FT-IR โดยเมื่อสององค์ประกอบมีความเข้ากันได้จะทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาทางเคมีขึ้นระหว่างองค์ประกอบที่ 1 และองค์ประกอบที่ 2 โดยทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบเดี่ยวๆ [39]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา

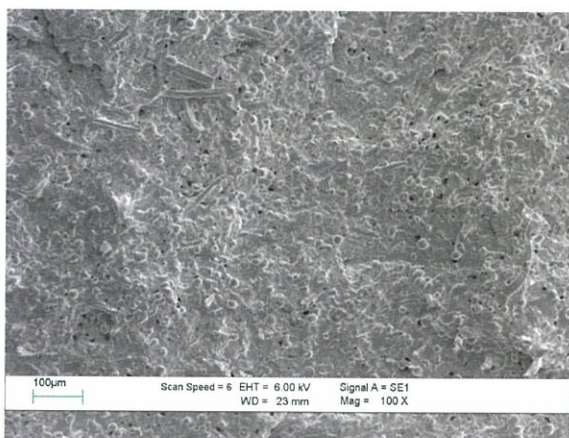
ผลการทดสอบสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง เพื่อศึกษา ลักษณะการกระจายตัว (Dispersion) และลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial surface) ให้ผลการทดลองดังนี้



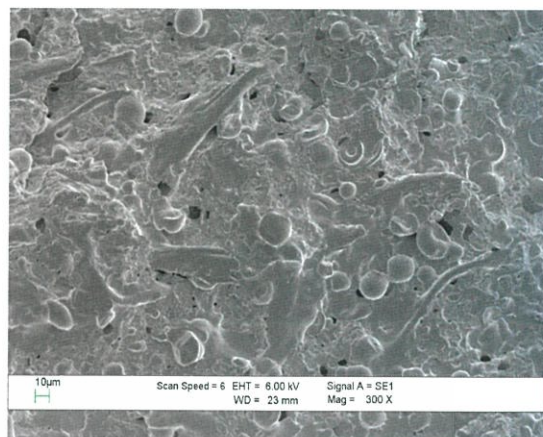
รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE (ก) 100 เท่า และ (ข) 300 เท่า

จากรูปที่ 4.4 (ก) พบว่ามีการกระจายตัวที่ดีของ LDPE ในเมทริกซ์ของ TPAS และไม่มี การแยก วัฏภาคของ TPAS หรือ LDPE อย่างชัดเจน และรูปที่ (ข) แสดงถึงลักษณะพื้นผิวของ พอลิเมอร์ผสมที่กำลังขยาย 300 เท่าพบพื้นผิวบางส่วนมีลักษณะเป็นก้อนกลม เนื่องจากแป้ง เกิดการหลอมได้ไม่สมบูรณ์ และมีรูพรุนซึ่งคาดว่าเกิดจากการที่แป้งดูดซับความชื้นไว้ ดังนั้น เมื่อนำมาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูง จึงเกิดการระเหยของน้ำและความชื้น เกิดเป็นช่องว่างภายในของชิ้นงาน นอกจากนี้จากการใช้สารช่วยผสม MAPE ทำให้ไม่ เห็น การแยกออกหรือช่องว่างระหว่างวัฏภาคของ TPAS และ LDPE

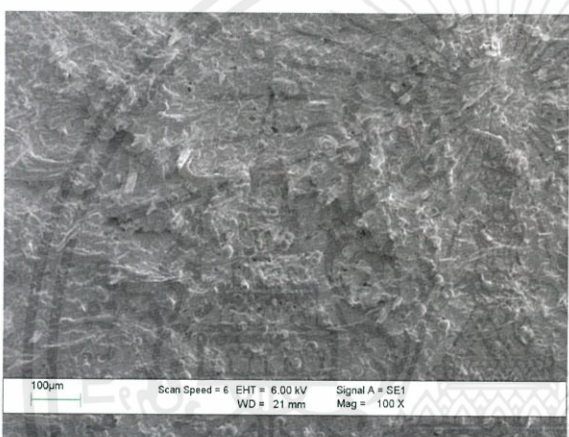
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



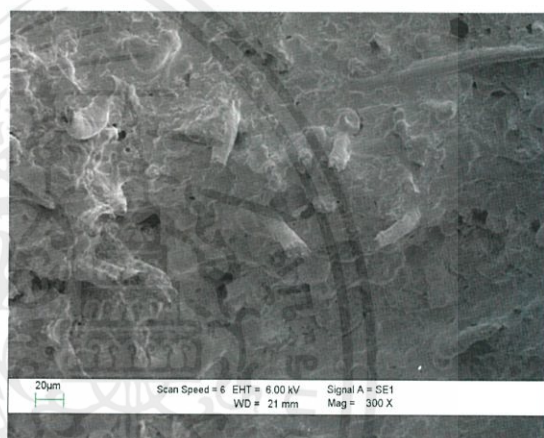
(ก)



(ข)



(ค)

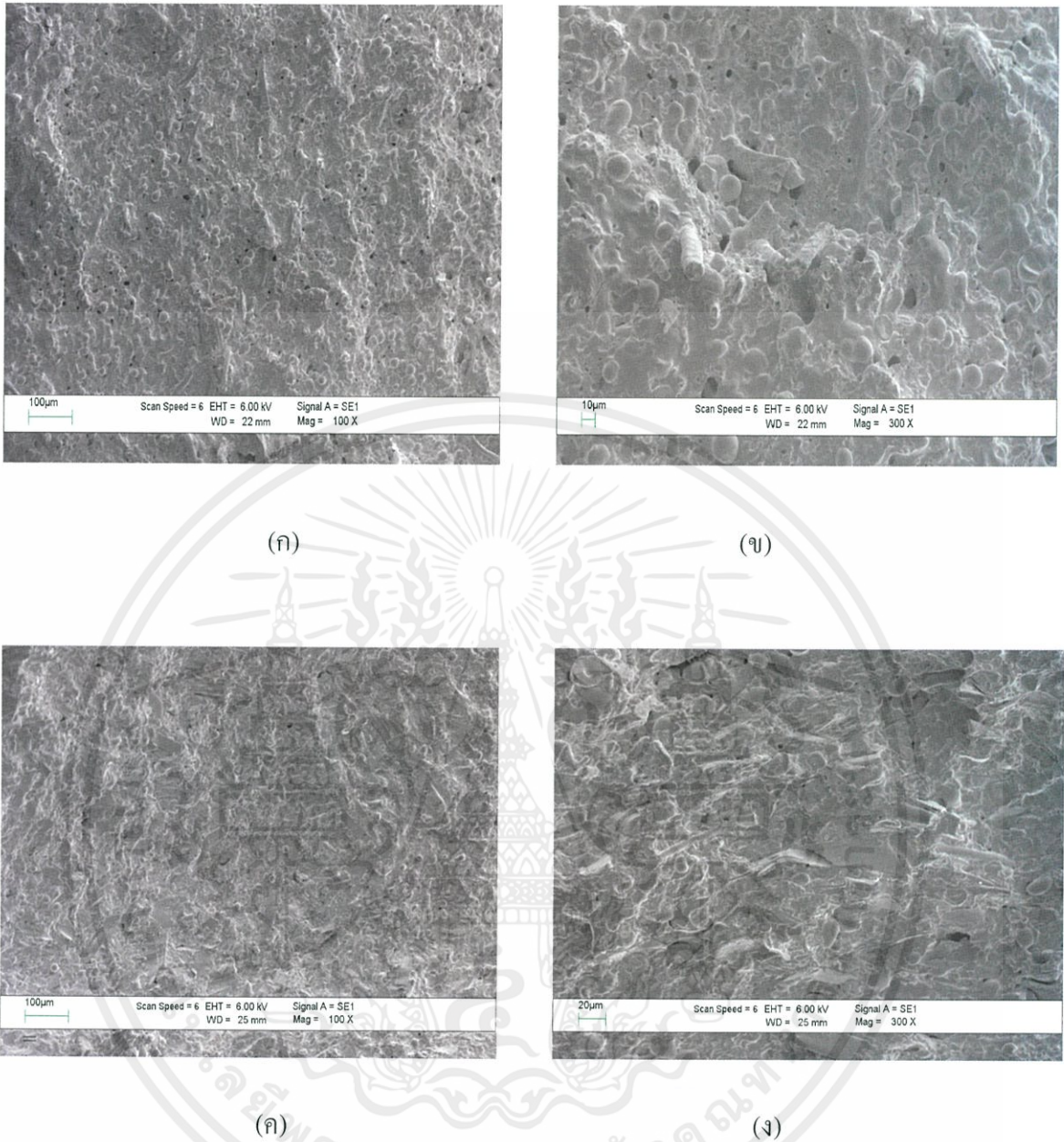


(ง)

รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/ LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย (ก) - (ข) 10 และ (ค) - (ง) 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง พบว่าเส้นใยฝ้ายกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ TPAS และ LDPE นอกจากนี้พื้นผิวของเส้นใยถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์ของ TPAS (Surface wetting) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยฝ้ายและ TPAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น (ก) - (ข) 10 และ (ค) - (ง) 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง

จากรูปที่ 4.6 สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีสัณฐานวิทยาใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 10 เปอร์เซ็นต์ แต่มีปริมาณเส้นใยนุ่นที่มากกว่ากระจายตัวในเมทริกซ์ของ TPAS/LDPE และพบลักษณะของ Surface wetting เช่นเดียวกับเส้นใยฝ้าย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทางสน. อื่นๆ ห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 สมบัติการดูดซับน้ำ

การทดสอบการดูดซับน้ำโดยนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่นที่ปริมาณแตกต่างกัน มาทำการทดสอบโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 3 สัปดาห์ ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

รูปที่ 4.7 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE



สัปดาห์ที่ 0

สัปดาห์ที่ 1

สัปดาห์ที่ 2

สัปดาห์ที่ 3

รูปที่ 4.8 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ผู้รับมอบนี้จะต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง

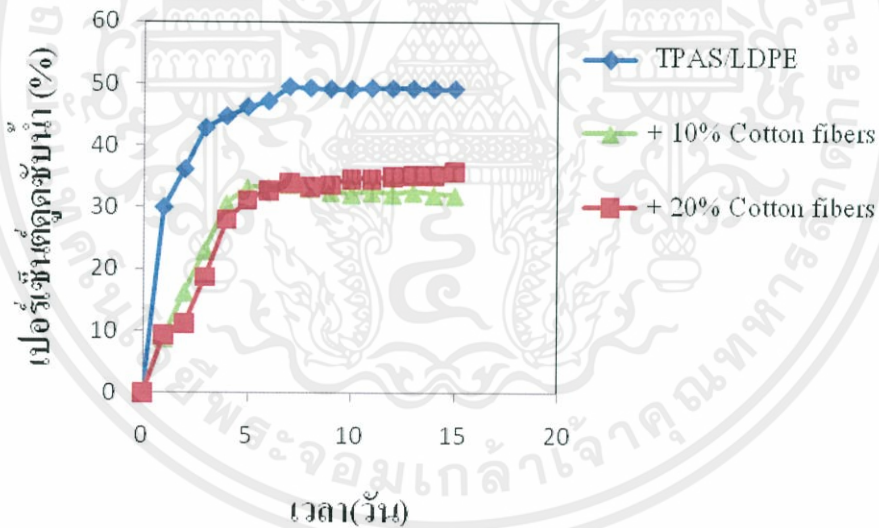


รูปที่ 4.10 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



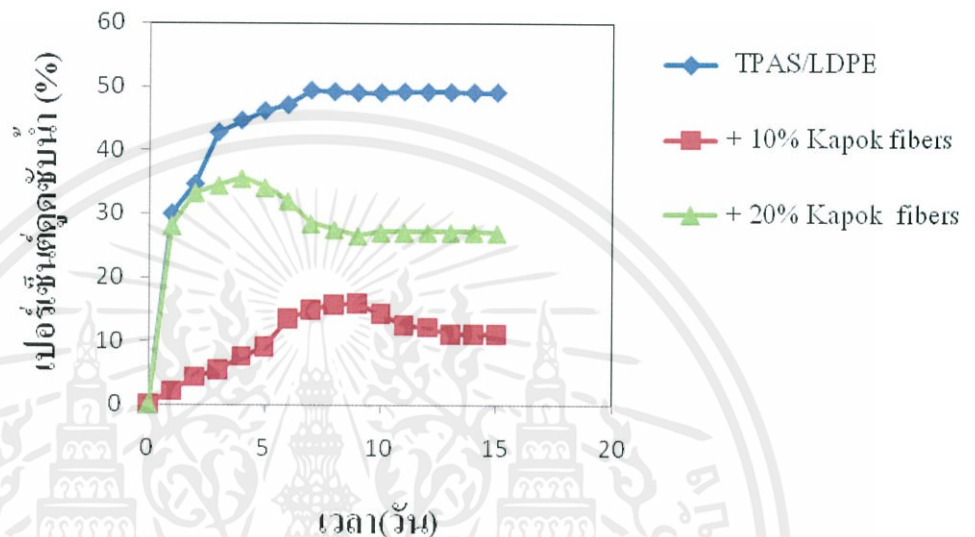
รูปที่ 4.11 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง



รูปที่ 4.12 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง

จากรูปที่ 4.12 การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 5 วันแรก เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณแป้งถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งโครงสร้างของแป้งมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลจำนวนมากจึงสามารถดูดซับน้ำได้มาก หลังจากนั้นปริมาณการดูดซับน้ำมีแนวโน้มคงที่

เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 เปอร์เซ็นต์ และ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสามารถดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE เนื่องจากเส้นใยฝ้ายสามารถดูดซับน้ำได้ดีแต่น้อยกว่าแป้ง [40, 41] เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 เปอร์เซ็นต์สามารถดูดซับน้ำได้ใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง

พอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ (รูปที่ 4.13) พบว่าสามารถดูดซับน้ำได้น้อยกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมี Wax เป็นองค์ประกอบทำให้มีส่วนที่ไม่ดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วเส้นใยฝ้ายไม่ดูดซับน้ำแต่ดูดซับน้ำมัน [42] เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 20 เปอร์เซ็นต์ ดูดซับน้ำได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากโครงสร้างเส้นใยฝ้ายทอกลางตรงกลาง (รูปที่ 4.6) ทำให้น้ำซึมผ่านท่อนี้เข้าไปยังเส้นใยได้ จึงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากมีปริมาณของเส้นใยฝ้ายที่มากกว่า เมื่อวิเคราะห์ผลการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยฝ้าย พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย [42] มีความสามารถในการดูดซับน้ำน้อยกว่าเส้นใยฝ้าย

เนื่องจากปริมาณ Wax ที่มากกว่าของเส้นใยนุ่น นอกจากนี้การลดลงของเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำในช่วงวันที่ 4 – 10 ในพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น เกิดขึ้นเนื่องจากมีส่วนของแป้งหลุดออกจากชิ้นงานที่ทำการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 สมบัติเชิงกล

การศึกษาผลของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ทำการปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้นใยฝ้ายและนุ่นในปริมาณต่างๆ สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษาได้แก่ แรงดึง ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด การยืดออก ณ จุดแรงดึงสูงสุด เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส ให้ผลการทดลองดังนี้

### 4.3.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยและเส้นใยนุ่น

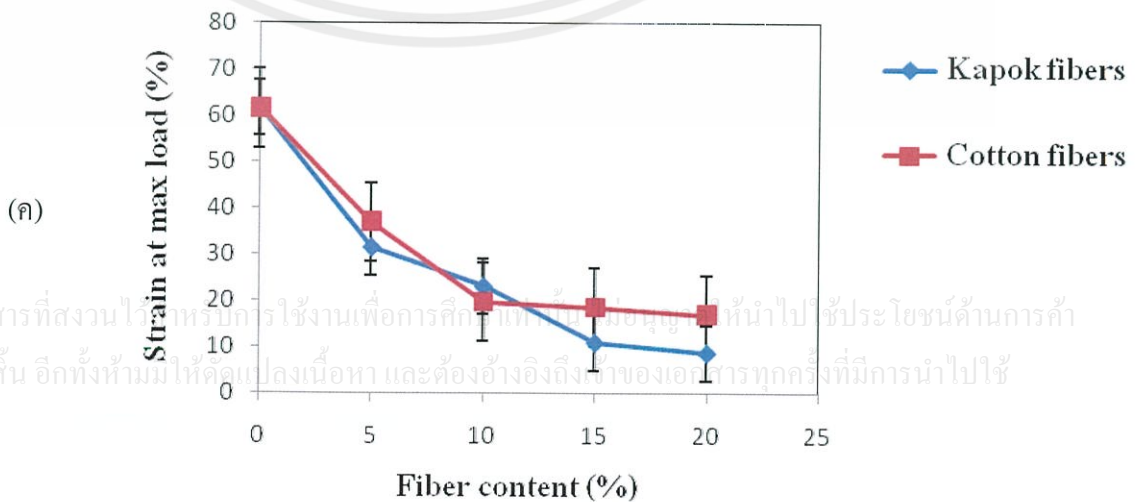
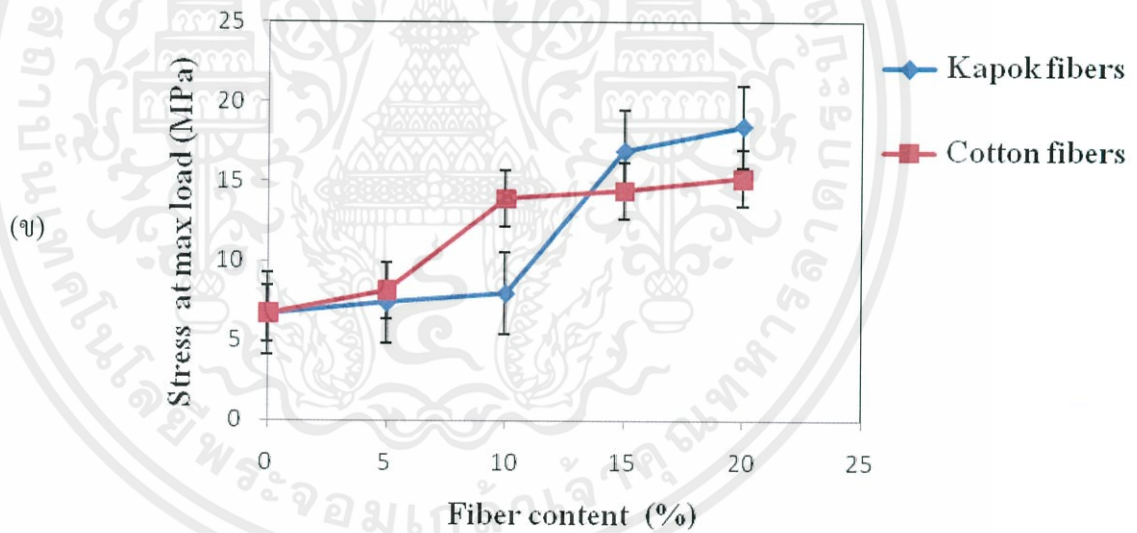
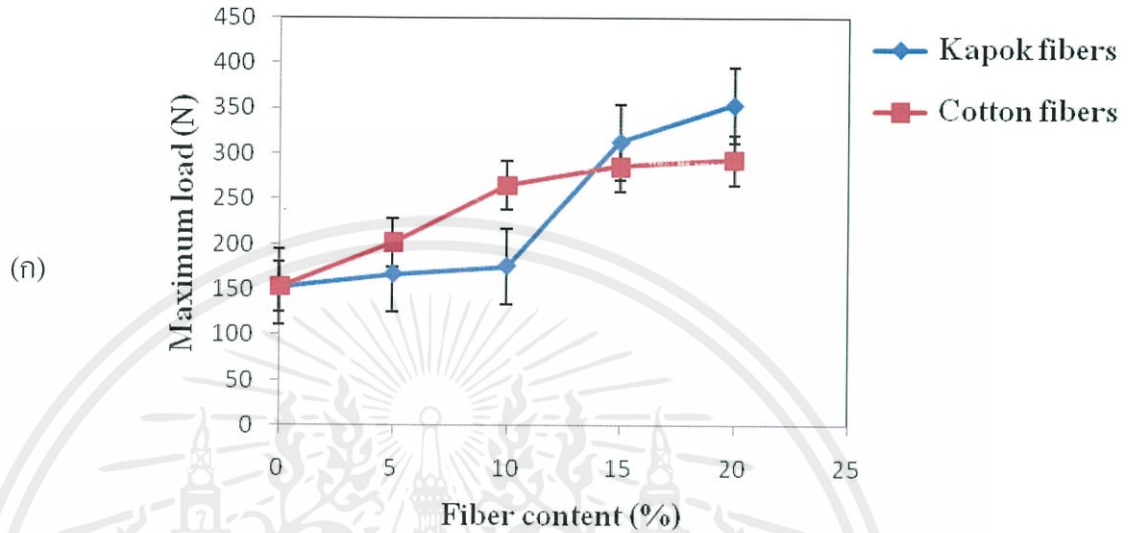
รูปที่ 4.14 (ก)-(จ) แสดงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่เติมเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นลงไปปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง พบว่าแรงดึง (รูปที่ 4.14 (ก)) ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.14 (ข)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.14 (จ)) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยทั้งสองชนิดที่เพิ่มขึ้น

การที่เส้นใยฝ้ายและนุ่นสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ได้นั้น เนื่องจากเส้นใยฝ้ายและนุ่นมีความมีขั้ว ซึ่งสามารถเข้ากันได้กับวัฏภาคของ TPAS ซึ่งยืนยันได้จากผลของการเคลื่อนที่ของพีค OH Stretching (FTIR ในหัวข้อที่ 4.2) และหลักฐานวิทยา (ในหัวข้อที่ 4.3) เมื่อเปรียบเทียบในระหว่างเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นพบว่า เส้นใยนุ่นให้แนวโน้มค่าความแข็งแรงมากกว่า เส้นใยฝ้าย อาจเนื่องจากเส้นใยนุ่นมีน้ำหนักน้อยกว่าเส้นใยฝ้าย จึงทำให้มีเส้นใยนุ่นกระจายตัวในเมทริกซ์ของ TPAS/LDPE ในจำนวนที่มากกว่าที่น้ำหนักของเส้นใยที่เท่ากัน

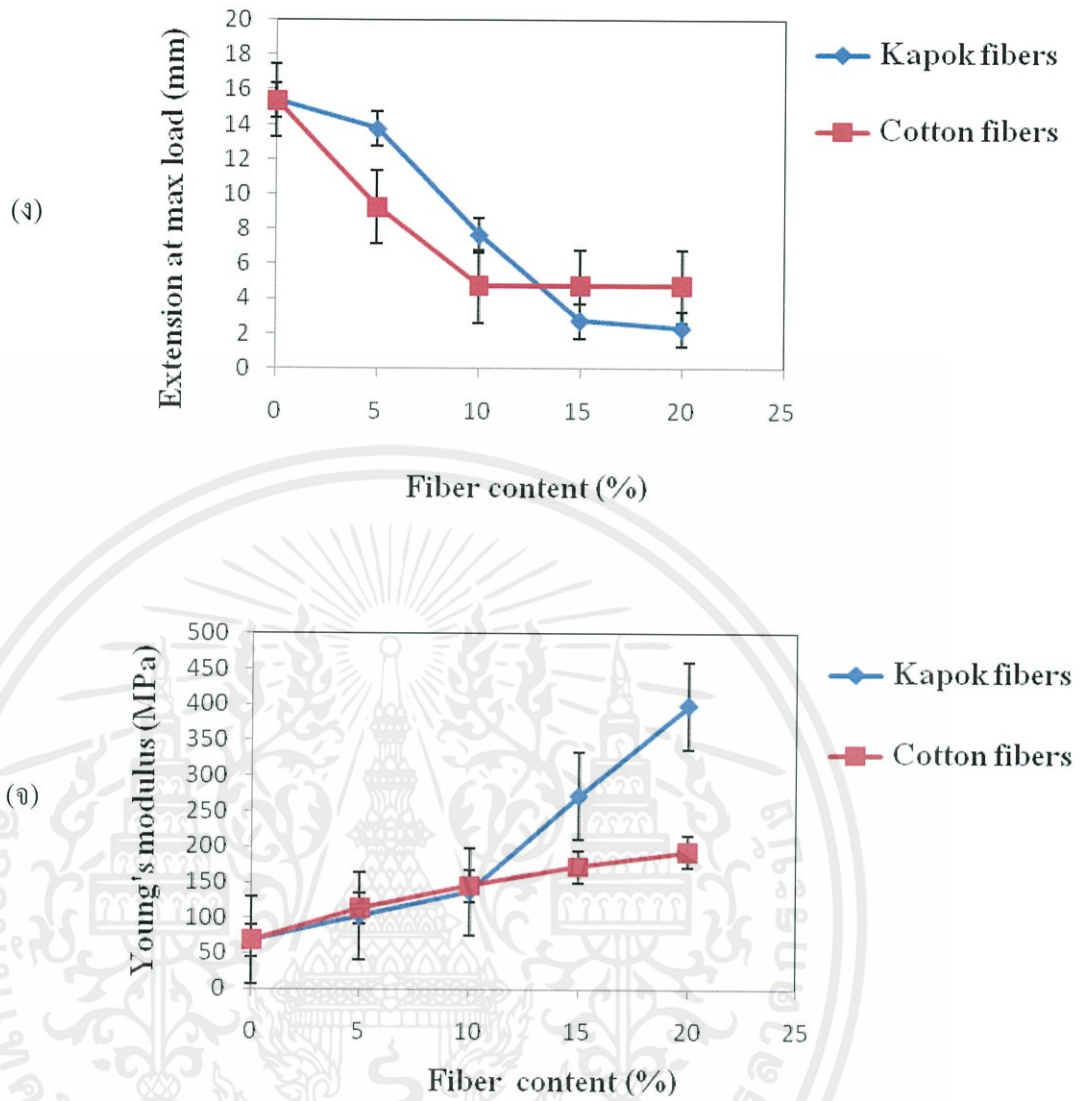
ส่วนของเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.14 (ค)) และการยืดออก ณ จุดแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.14 (ง)) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติมปริมาณเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นลงไป ปริมาณมากขึ้น เนื่องจากเส้นใย 2 ชนิดมีการจัดเรียงตัว ทำให้มีผลึกสูง จึงมีการยึดตัวได้ต่ำกว่าเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ผสม โดยเมื่อปริมาณของเส้นใยเพิ่มขึ้น พบว่า ค่าความเครียดและการยืดออกมีแนวโน้มต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่มีการเติมเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นในปริมาณต่างๆ กัน พบว่า ปริมาณของเส้นใยนุ่นที่เหมาะสมที่สุดในการเติม

คือ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของแป้ง ซึ่งส่งผลให้มีค่า แรงดึง ความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุดและ  
มอดุลัสสูงสุด โดยให้ค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 131 เปอร์เซ็นต์ 175 เปอร์เซ็นต์ และ 485 เปอร์เซ็นต์  
ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงที่มาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยและเส้นใยนุ่ม ปริมาณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

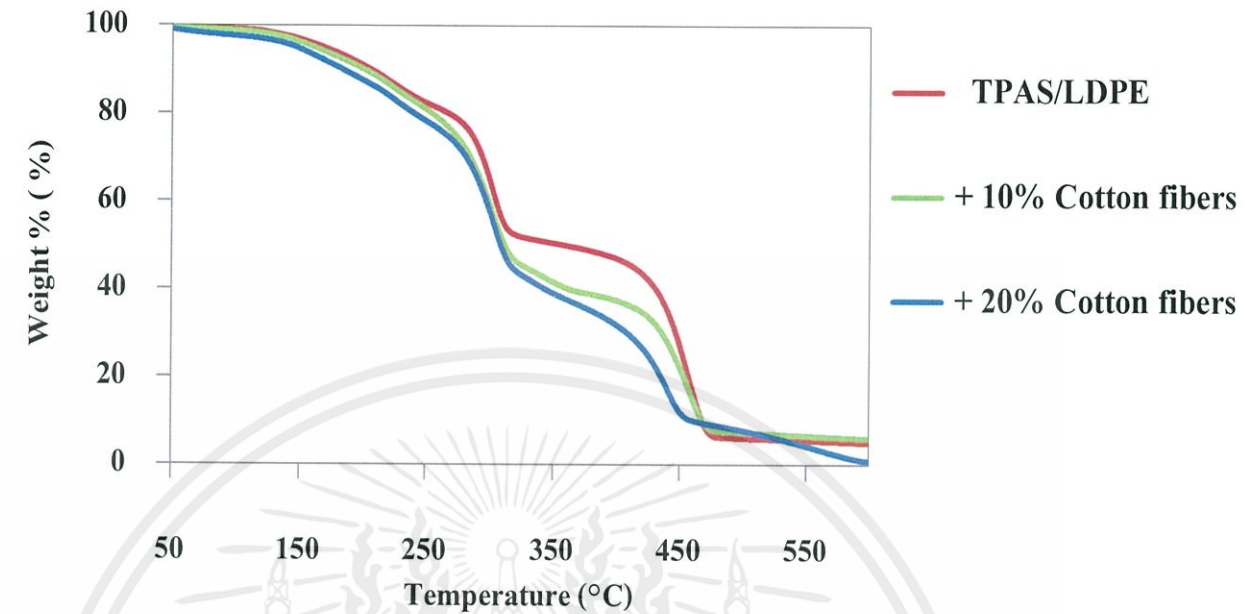
สมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ได้ศึกษาถึง อุณหภูมิการสลายตัว (Onset decomposition temperature,  $T_d$ ) โดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก แอานาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyser, TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ( $N_2$ ) และใช้สภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที ให้ผลดังรูปที่ 4.15-4.16 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}C$ ) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายในปริมาณต่างๆ

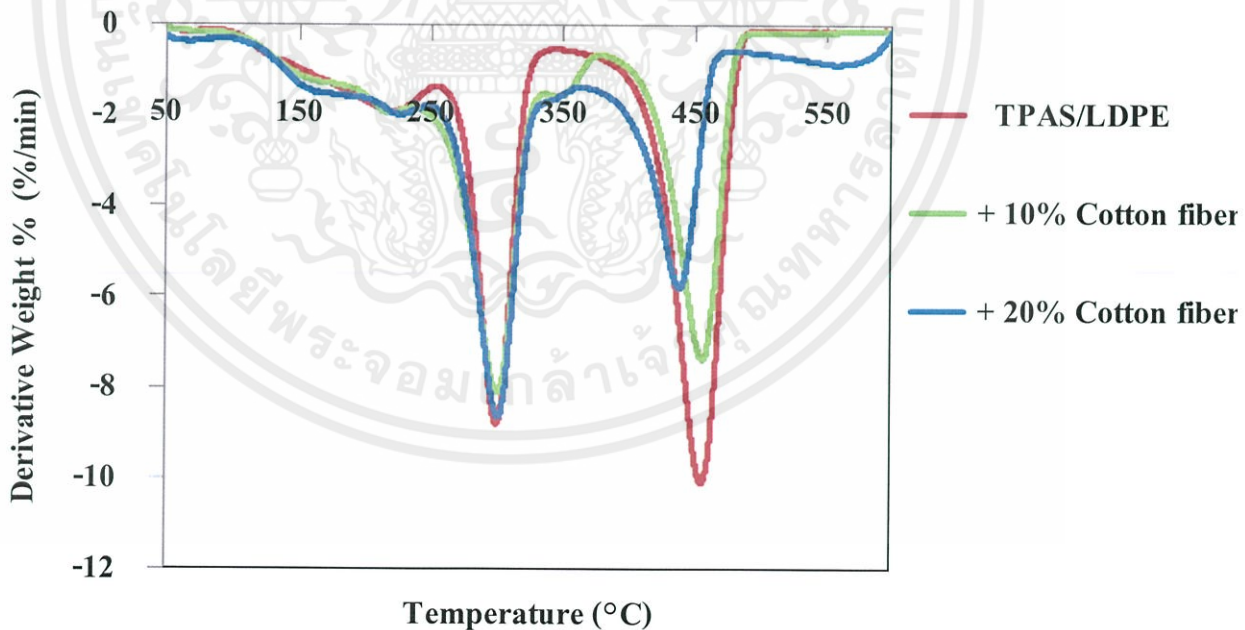
ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}C$ )			
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ช่วงที่ 4
TPAS/LDPE	221.1	300.2	-	455.8
+10% Cotton fibers	219.5	300.7	344.99	456.3
+20% Cotton fibers	228.7	301.3	342.00	439.1

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}C$ ) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในปริมาณต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}C$ )			
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	ช่วงที่ 4
TPAS/LDPE	221.1	300.2	-	455.7
+10% Kapok fibers	215.7	297.0	344.37	434.2
+20% Kapok fibers	199.6	297.0	341.45	456.8

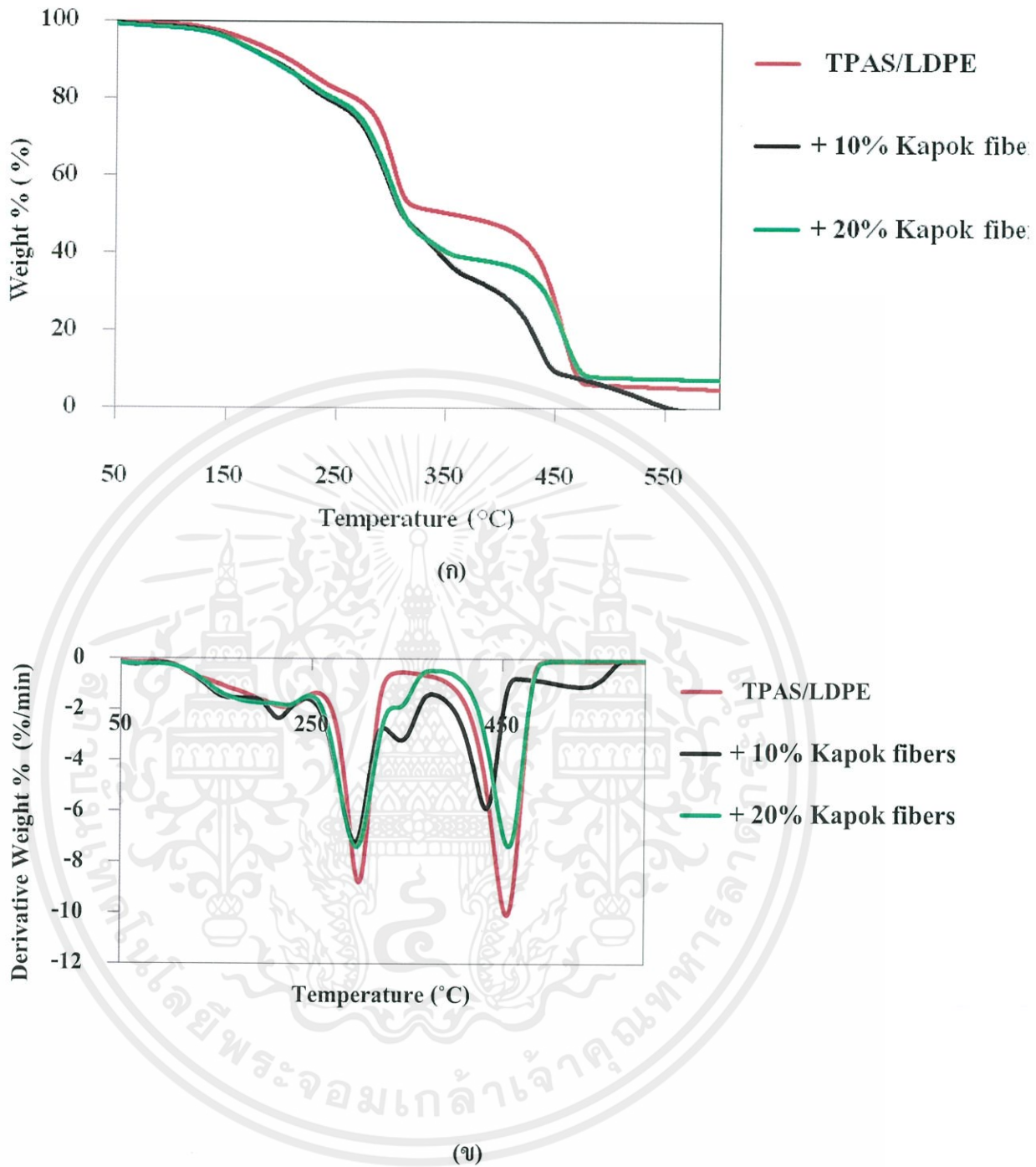


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 4.15 (ก) TGA และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE และ  
 พอลิเมอร์ผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย

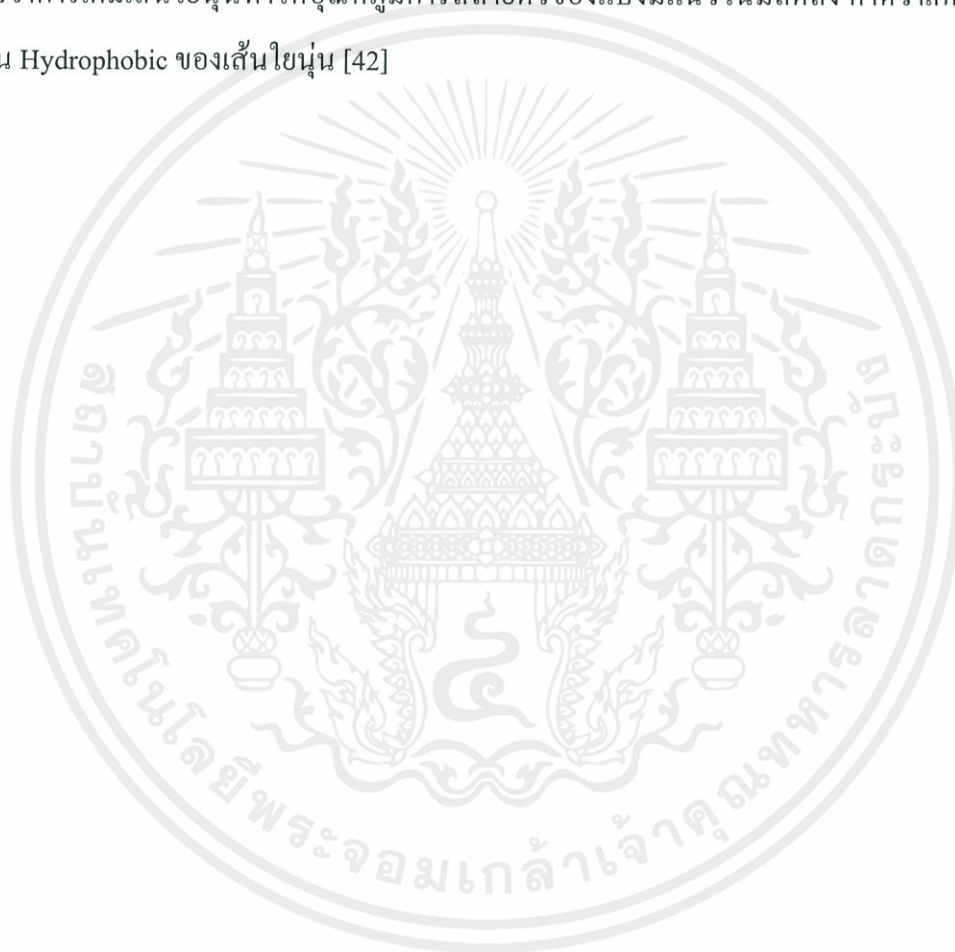


รูปที่ 4.16 (ก) TGA และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE และพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยอ่อน

จากรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.3 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE มีอุณหภูมิการสลายตัว 3 ช่วงโดยช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของกลีเซอรอล [41] ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งที่ว่ายามอม [3] ช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ LDPE

และสำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายพบว่าเมื่ออุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นมาโดยเส้นใยฝ้ายมีอุณหภูมิการสลายตัวประมาณ 350 °C [40] ช่วงที่ 4 เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของ LDPE นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของแป้ง (ช่วงที่ 2) มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงจากการใส่เส้นใยฝ้าย

จากรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.4 พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยขนุนมีอุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มขึ้นมาเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย แต่พบว่าการเติมเส้นใยขนุนทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งมีแนวโน้มลดลง คาดว่าเกิดจากความ เป็น Hydrophobic ของเส้นใยขนุน [42]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินทำได้โดยนำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย และเส้นใยนุ่นที่ปริมาณแตกต่างกัน มาทำการทดสอบโดยการฝังดิน เป็นเวลา 5 สัปดาห์ ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.17 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สัปดาห์ที่ 0



สัปดาห์ที่ 1



สัปดาห์ที่ 2



สัปดาห์ที่ 3



สัปดาห์ที่ 4



สัปดาห์ที่ 5

รูปที่ 4.18 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 10เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สัปดาห์ที่ 0



สัปดาห์ที่ 1



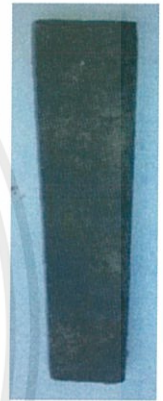
สัปดาห์ที่ 2



สัปดาห์ที่ 3



สัปดาห์ที่ 4



สัปดาห์ที่ 5

รูปที่ 4.19 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สัปดาห์ที่ 0



สัปดาห์ที่ 1



สัปดาห์ที่ 2



สัปดาห์ที่ 3



สัปดาห์ที่ 4



สัปดาห์ที่ 5

รูปที่ 4.20 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยนุ่น 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สัปดาห์ที่ 0



สัปดาห์ที่ 1



สัปดาห์ที่ 2



สัปดาห์ที่ 3



สัปดาห์ที่ 4



สัปดาห์ที่ 5

**รูปที่ 4.21** การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยุ่น 20 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 4.17-4.21 พบว่าพอลิเมอร์ระหว่าง TPAS/LDPE ทุกสูตรมีแนวโน้มการย่อยสลายที่เหมือนกัน กล่าวคือ เมื่อเวลาผ่านไปพอลิเมอร์ผสมถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ที่มีในดิน ซึ่งเห็นได้จาก รูปชิ้นงานที่มีการบวมตัวและแตกออกของพอลิเมอร์ พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE มีการสลายตัวมาก และเมื่อพิจารณา พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่มีการผสมเส้นใยที่ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแป้ง พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่มีการผสมเส้นใยฝ้าย และุ่นมีแนวโน้มการย่อยสลายคล้ายกัน แต่ ย่อยสลายได้ยากกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการใช้เส้นใย

ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมจากการทดลองการย่อยสลายโดยการฝังดิน

พอลิเมอร์ผสม	การย่อยสลาย
TPAS/LDPE	เมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์เริ่มมีการย่อยสลายและสีเริ่มคล้ำขึ้น สัปดาห์ที่ 3 สีเริ่มคล้ำกว่าเดิมเพราะการย่อยสลายเพิ่มขึ้น สัปดาห์ที่ 4 เริ่มมีรอยแตกตรงกลางของชิ้นงานเกิดขึ้นและเกิดการย่อยสลายต่อไปจนสีเริ่มจางและรอยแตกเพิ่มมากขึ้น
พอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 10 เปอร์เซ็นต์	เมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์ชิ้นงานเกิดการบวมตัวขึ้นเล็กน้อย สัปดาห์ที่ 3 มีลักษณะคล้ายฟองอากาศเกิดขึ้นภายในชิ้นงาน สัปดาห์ที่ 4 และ 5 เริ่มเกิดการโค้งงอและในสัปดาห์ที่ 6 เกิดเป็นขลุ่ยรอบชิ้นงาน
พอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย 20 เปอร์เซ็นต์	เมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์ชิ้นงานเริ่มมีสีคล้ำ สัปดาห์ที่ 3 พื้นผิวเริ่มมีร่องรอยการย่อยสลายทำให้ผิวขรุขระในสัปดาห์หลังจากนั้นชิ้นงานมีสีเข้มขึ้นเนื่องจากการแทรกตัวของดิน
พอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยถั่ว 10 เปอร์เซ็นต์	เมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์ชิ้นงานเกิดการบวมตัวและเริ่มมีการหลุดลอกของชิ้นงาน สัปดาห์ที่ 3 เริ่มมีลักษณะคล้ายฟองอากาศเกิดขึ้น และสัปดาห์ต่อมาชิ้นงานเริ่มโค้งงอและพื้นผิวเริ่มหลุดลอกเป็นแผ่น
พอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยถั่ว 20 เปอร์เซ็นต์	เมื่อเวลาผ่านไป 2 สัปดาห์ชิ้นงานเริ่มมีการโค้งงอและสีเริ่มคล้ำ สัปดาห์ที่ 3 เริ่มหลุดลอกออกเป็นแผ่นและในสัปดาห์ต่อไปเริ่มเกิดการหลุดลอกมากขึ้นที่ปลายทั้งสองด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ โดยการใช้เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น ที่ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมมาศึกษาอัตราส่วนระหว่าง TPAS/LDPE ที่มีต่อสมบัติเชิงกล หมู่ฟังก์ชัน สัณฐานวิทยา สมบัติการดูดซับน้ำ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการย่อยสลาย ได้ผลสรุปดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR พบว่าการเติมเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE นั้น ทำให้แถบการสั่นของ OH-stretching มีการเลื่อนตำแหน่ง (Shift) ไปในตำแหน่งที่ลดลง แสดงว่ามีการเกิดพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นใหม่

2. จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าลักษณะของภาคตัดขวางของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติโดยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นในปริมาณต่างๆกัน พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ โดยที่พอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น พบว่ามีลักษณะของเส้นใยกระจายตัวบนพื้นผิวและพบลักษณะของ Surface wetting บนพื้นผิวของเส้นใย

3. การศึกษาการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นในปริมาณต่างๆ พบว่าการเติมเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นลงในพอลิเมอร์ผสมของ TPAS/LDPE ทำให้การดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมลดลงและการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยนุ่นมีค่าน้อยกว่าเส้นใยฝ้าย

4. จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE โดยใช้เส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่นเป็นส่วนเสริมแรงในปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าที่ปริมาณเส้นใยนุ่น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมสูงที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ระหว่าง TPAS/LDPE มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมปริมาณเส้นใยฝ้ายลงไป แต่การเติม

ปริมาณเส้นใยนุ่มทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแป้งทำวยายม่อมในพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง

6. จากการศึกษาการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE แนวโน้มการย่อยสลายเร็วที่สุดและพอลิเมอร์ผสม TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและนุ่ม ทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้ช้ากว่า

7. จากการศึกษาโดยรวม พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยนุ่ม 20 เปอร์เซ็นต์ มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด โดยพิจารณาจากสมบัติการดูดซับน้ำและสมบัติเชิงกล

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาชนิดเส้นใย ความยาวเส้นใย ขนาดเส้นใย เพิ่มเติม โดยอาจเลือกใช้เป็นเส้นใย ปอ กระเจา ลิ้นจี่ เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม
2. ศึกษาการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้วิธีการอื่นๆ เช่น ย่อยสลายโดยใช้แสง โดยใช้จุลินทรีย์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/index.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/index.html) (สืบค้นข้อมูลวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- [2] <http://guru.google.co.th/guru/thread?tid=0e5f863d66ed5055> (สืบค้นข้อมูลวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- [3] วัชรวิ คุณวิวัฒน์ จิราวรรณ โสธร และวรรณวรางค์ สุทระ. สมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งข้าวเจ้าผสมกับแป้งมันสำปะหลัง แป้งท้าวยายม่อม หรือแป้งถั่วเขียว. โครงการงานพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.2552.
- [4] สิริรัตน์ จิตการคำ. จากขยะสู่น้ำมัน เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม. วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี,จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [5] สรินทร ศรีธาดาวุฒิ, สรุย์พร อุตเจริญ และอภิชัย ชาญพานิชย์การ, การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์. ปรินูญานิพนธ์ โครงการงานพิเศษ, วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา, 2541.
- [6] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีของแป้ง.พิมพ์ครั้งที่ 3.มหาวิทย เกษตรศาสตร์.2546.
- [7] ธนาวิดี ลีจากภัย . 2549 . พลาสติกที่ย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- [8] [Http://www.thaitapiocastarch.org/article26\\_th.asp](Http://www.thaitapiocastarch.org/article26_th.asp) (สืบค้นข้อมูลวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- [9] กล้าณรงค์ ศรีรอด กาญจณา กู้โรจนวงศ์ และวิไล สันติโสภาคศรี. 2541, โครงสร้างของอะไมโลส อะไมโลเพกติน และคุณสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่สกัดได้จากเกษตรศาสตร์ 50 ในอายุต่างๆกัน ในการประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 36 3-5 กุมภาพันธ์ 2541, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่นอูญาดให้มาใช้ประโยชน์ในการค้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

- [10] [Http://: www.opta-food.com/ access/starch2.html](http://www.opta-food.com/access/starch2.html) (สืบค้นข้อมูลวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- [11] [Http://www.ceramic.lpru.ac.th/files/9%20fiber.doc](http://www.ceramic.lpru.ac.th/files/9%20fiber.doc) (สืบค้นข้อมูลวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ. 2555)
- [12] กกล้าณรงค์ ศรีรอด, 2544. แป้งและอนุพันธ์ของแป้งการผลิตและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร.เอกสารประกอบการบรรยายทางวิชาการ.มูลนิธิอานิตย โมะ โตะ.กรุงเทพฯ: 1-8.
- [13] ปิติพร ฤทธิเรืองเดช.คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งท้าวยาม่อมและการนำไปใช้ประโยชน์ในขนมชั้น วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร)มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.2546.
- [14] <http://www.doa.go.th/botany/foot.html> (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)
- [15] [www.ceramic.lpru.ac.th/files/9%20fiber.doc](http://www.ceramic.lpru.ac.th/files/9%20fiber.doc) (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)
- [16] <http://202.28.48.140/isaninfo/?p=193> (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)
- [17] <http://textilelearner.blogspot.com/2012/03/chemical-composition-of-textile-fiber.html> (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)
- [18] [http://www.ars.usda.gov/main/site\\_main.htm?modecode=64-35-21-00&page=2&docid=4027](http://www.ars.usda.gov/main/site_main.htm?modecode=64-35-21-00&page=2&docid=4027) (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)
- [19] <http://202.28.48.140/isaninfo/?p=164> (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)
- [20] <http://www.swicofil.com/products/001cotton.html> (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)
- [21] Y. Liu, J.Wang, Y. Zheng and A.Wang, **Adsorption of methylene blue by kapok fiber treated by sodium chlorite optimized with response surface methodology**, Chemical Engineering,184 (2012) 248–255.
- [22] M.A. Abdullah, Anisa Ur Rahmah, Z. Man, **Physicochemical and sorption characteristics of Malaysian Ceiba pentandra (L.) Gaertn. as a natural oil sorbent**, **Journal of Hazardous Materials**, 177 (2010) 683–69.
- [23] <http://www.scribd.com/doc/25704788/Propertise-of-Natural-Fibre> (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)

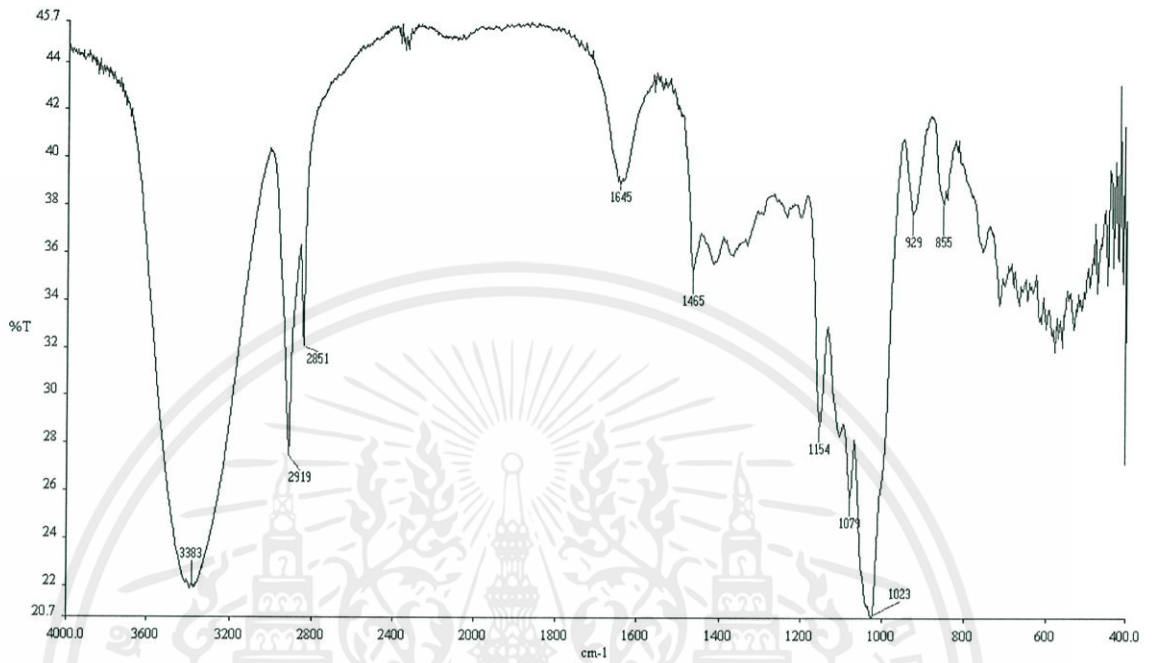
- [24] ชลธิชา มีชนะนะ และระรินธร คีระจางรุพงศ์. ผลของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติเชิงกลของกระดาษที่ได้จากแบคทีเรียเซลลูโลส. ปรียญานิพนธ์ ภาควิชาชีวประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2549.
- [25] <http://home.roadrunner.com/~lubehawk/BioHELP!/biochem.htm> (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)
- [26] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Saponification\\_dun\\_triglyceride.GIF](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Saponification_dun_triglyceride.GIF) (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)
- [27] D.R. Paul and C.B. Bucknall. 2000. **Polymer Blends**. Vol. 1. John Wiley & Sons. New York
- [28] พิมพ์ชนก แสงนิตินเดช และเพ็ญฤทัย บุญประสิทธิ์. ผลของสารตัวเติมและสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า. โครงการพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2551.
- [29] วรวิทย์ โพนนิกร. ผลของแป้งชนิดต่างๆที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝักกลบ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2546.
- [30] H.-S. Kim, S. Kim, H.-J.Kim and H.-S. Yang, Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composite with different compatibilizing agent type and content, *Thermochimica Acta* , 451 (2006) 181-188.
- [31] แพรววลลิตา บุญกัณหา ศรีกัลยา ศรีปาน สุธาสินี พันธุ์ประชา. การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชจากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งถั่วเหลืองโดยใช้เส้นใยฝ้ายและเส้นใยไหมเป็นส่วนเสริมแรง. โครงการพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.2553.
- [32] R Zullo and S.Iannace, The effect of different starch sources and plasticizers on film blowing of thermoplastic starch : Correlation among process,elongational properties and micromolecular structure. *Carbohydrate Polymers*, 77 (2009) 376-383.
- [33] ทั้งนี้ A. Cordoba, N. Cuellar, M. Gonzalez and J. Medina, The plasticizing effect of alginate on thermoplastic starch/glycerin blends. Carbohydrate Polymers, 73 (2008) 409-416.

- [34] W. Ning, Y. Jingao, M. Xiaofei and W. Ying, **The influence of citric acid on the properties of thermoplastic starch/linear low-density polyethylene blends**, Carbohydrate Polymers, 67 (2007) 417-424.
- [35] 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) 255-262.
- [36] W. Shujin, Y.Jingao and Y.Jinglin, **Preparation and characterization of compatible thermoplastic starch/polyethylene blends**, Polymer Degradation and Stability, 87 (2005) 395-401.
- [37] <http://www.polyprod.com/eng-stress.html> (สืบค้นข้อมูลวันที่ 9 กันยายน 2555)
- [38] X. Ma, J. Yua and J.F. Kennedy, **Studies on the properties of natural fibers reinforced thermoplastic starch composites**, Carbohydrate Polymes, 62 (2005) 19-24.
- [39] M. Mucha and P. Pawlak. **Thermal analysis of chitosan and its blends**, Thermochemica Acta, 427 (2005) 69-76.
- [40] L. Dobricau, P.A. Sreekumer, R.Satah, N. Leblanc, C. Terrie, R. Gattin and J.m. Saiter. "Wheat flour thermoplastic matrix reinforced by waste cotton fibre : Agro-green composite". Composite Part A : Applied Science and Manufacturing, 40 (2009) 329-334.
- [41] A.A.S. Curvelo, A.J.F. Carvalho and J.A.M. Agnelli, **Thermoplastic starch cellulosic fiber composites preliminary results**, Carbohydrate Polymers, 45 (2001) 183-188
- [42] K. Hori, M.E. Flavier, S. Kuga, T.T. Lam and K. Iiyama. "Excellent oil absorbent kapok [Ceiba pentandra (L.) Gaertn]. fiber : fiber structure, chemical characteristics, and application." The Japan Wood Research Society. 46 (2000) 401-404.

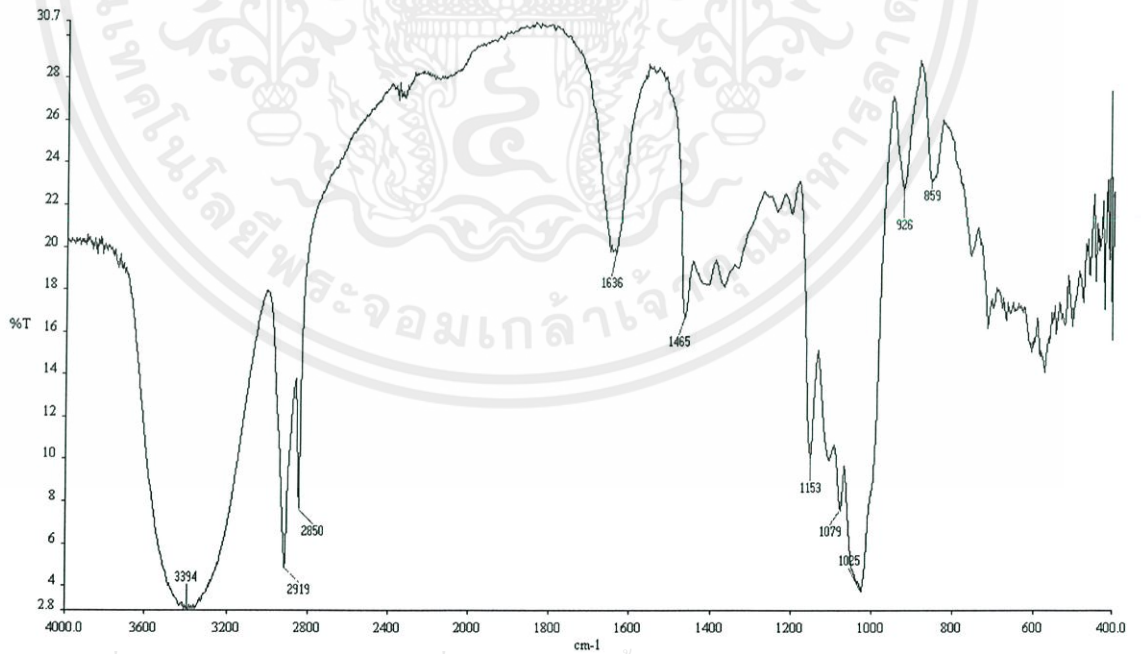
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

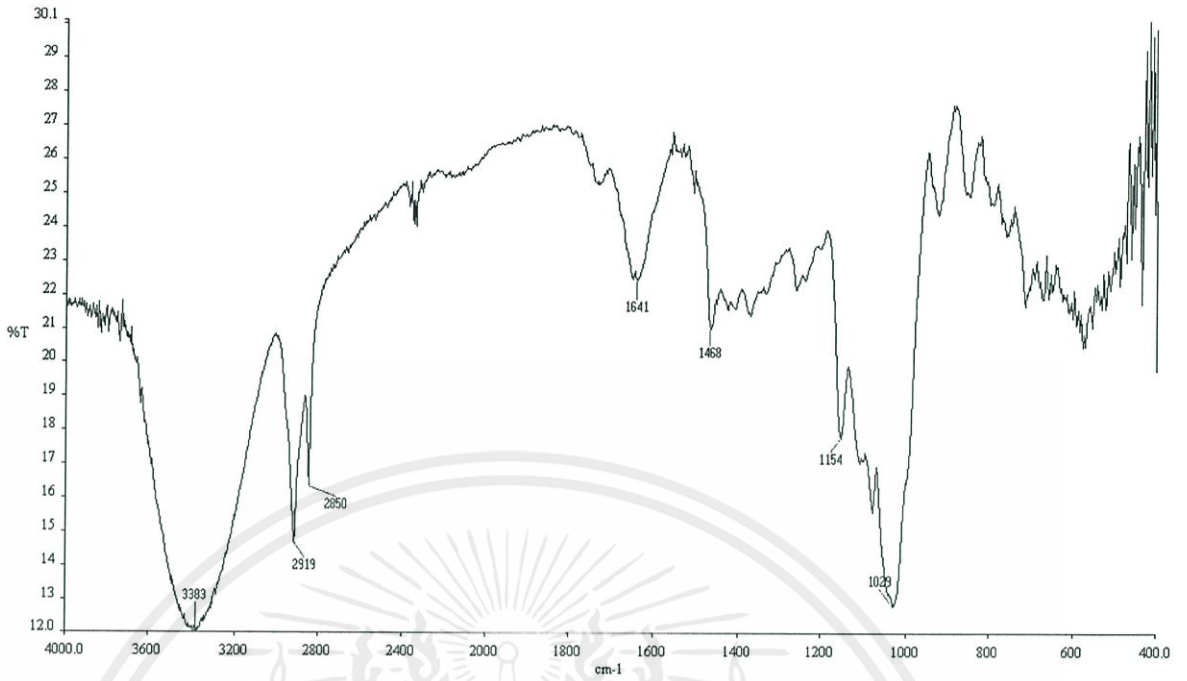
## ภาคผนวก ก



## อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE

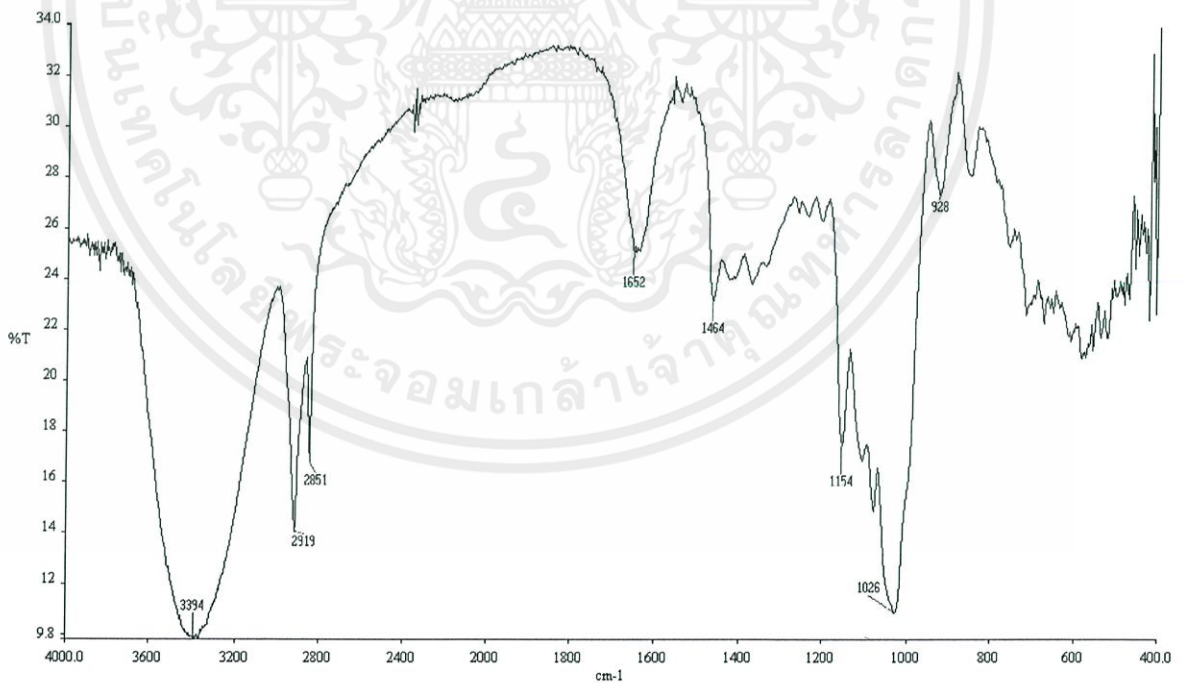


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยผ้า



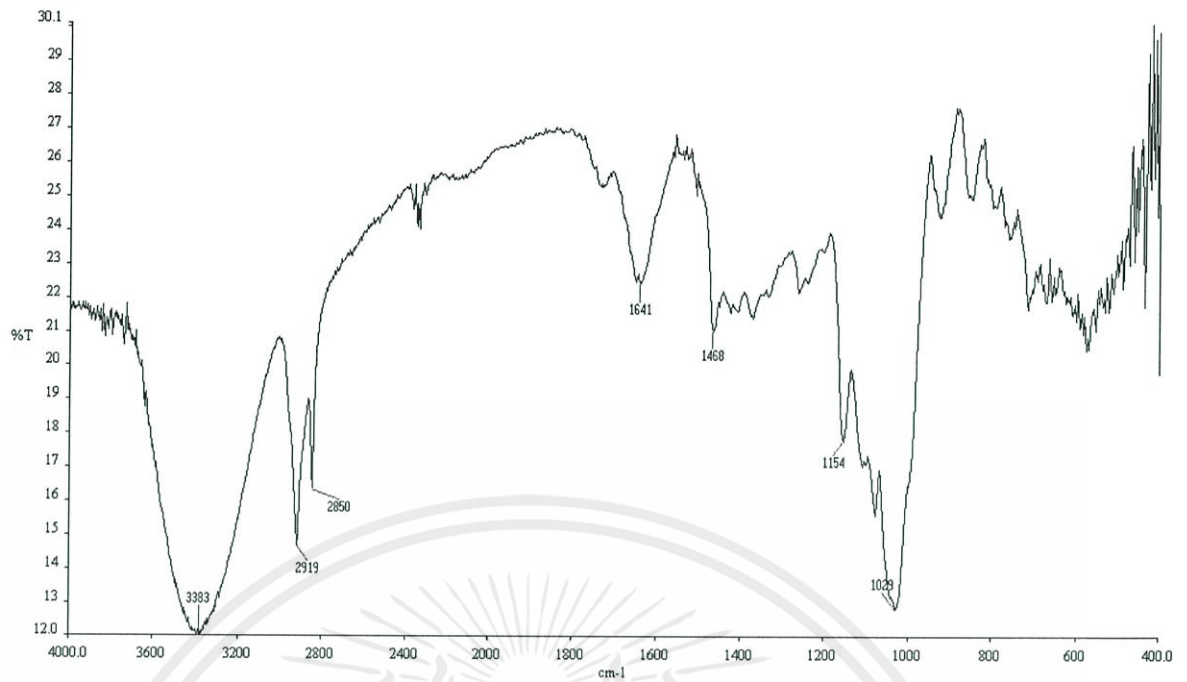
อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย

20 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย

10 เปอร์เซ็นต์



อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น

20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของ TPAS/LDPE ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและเส้นใยนุ่น

แรงดึง

ชนิดทดสอบ	Load (N)
TPAS/LDPE	153.16 ± 18.39
TPAS/LDPE + 5% Cotton fiber	201.91 ± 15.39
TPAS/LDPE + 10% Cotton fiber	265.48 ± 4.77
TPAS/LDPE + 15% Cotton fiber	285.96 ± 4.32
TPAS/LDPE + 20% Cotton fiber	293.27 ± 23.46
TPAS/LDPE + 5% Kapok fiber	167.35 ± 6.68
TPAS/LDPE + 10% Kapok fiber	176.21 ± 16.41
TPAS/LDPE + 15% Kapok fiber	313.41 ± 10.59
TPAS/LDPE + 20% Kapok fiber	354.09 ± 6.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นสูงสุด

ชนิดทดสอบ	Stress at max load (MPa)
TPAS/LDPE	153.16 ± 18.39
TPAS/LDPE + 5% Cotton fiber	8.16 ± 0.57
TPAS/LDPE + 10% Cotton fiber	13.94 ± 0.36
TPAS/LDPE + 15% Cotton fiber	14.41 ± 0.48
TPAS/LDPE + 20% Cotton fiber	15.20 ± 1.18
TPAS/LDPE + 5% Kapok fiber	7.39 ± 0.19
TPAS/LDPE + 10% Kapok fiber	7.98 ± 0.67
TPAS/LDPE + 15% Kapok fiber	16.91 ± 0.60
TPAS/LDPE + 20% Kapok fiber	18.46 ± 0.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เปอร์เซ็นต์ความเครียด

ชนิดทดสอบ	Strain at max load (%)
TPAS/LDPE	153.16 ± 18.39
TPAS/LDPE + 5% Cotton fiber	37.03 ± 2.69
TPAS/LDPE + 10% Cotton fiber	19.19 ± 0.42
TPAS/LDPE + 15% Cotton fiber	18.68 ± 0.77
TPAS/LDPE + 20% Cotton fiber	17.04 ± 2.46
TPAS/LDPE + 5% Kapok fiber	31.51 ± 8.83
TPAS/LDPE + 10% Kapok fiber	23.07 ± 2.78
TPAS/LDPE + 15% Kapok fiber	11.01 ± 0.58
TPAS/LDPE + 20% Kapok fiber	8.74 ± 0.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## มอดูลัส

ชนิดทดสอบ	Young's modulus (MPa)
TPAS/LDPE	153.16 ± 18.39
TPAS/LDPE + 5% Cotton fiber	113.69 ± 28.82
TPAS/LDPE + 10% Cotton fiber	145.19 ± 22.25
TPAS/LDPE + 15% Cotton fiber	172 ± 36.32
TPAS/LDPE + 20% Cotton fiber	193.51 ± 51.75
TPAS/LDPE + 5% Kapok fiber	102.95 ± 25.68
TPAS/LDPE + 10% Kapok fiber	137.168 ± 17.85
TPAS/LDPE + 15% Kapok fiber	271.91 ± 40.46
TPAS/LDPE + 20% Kapok fiber	398.81 ± 87.80

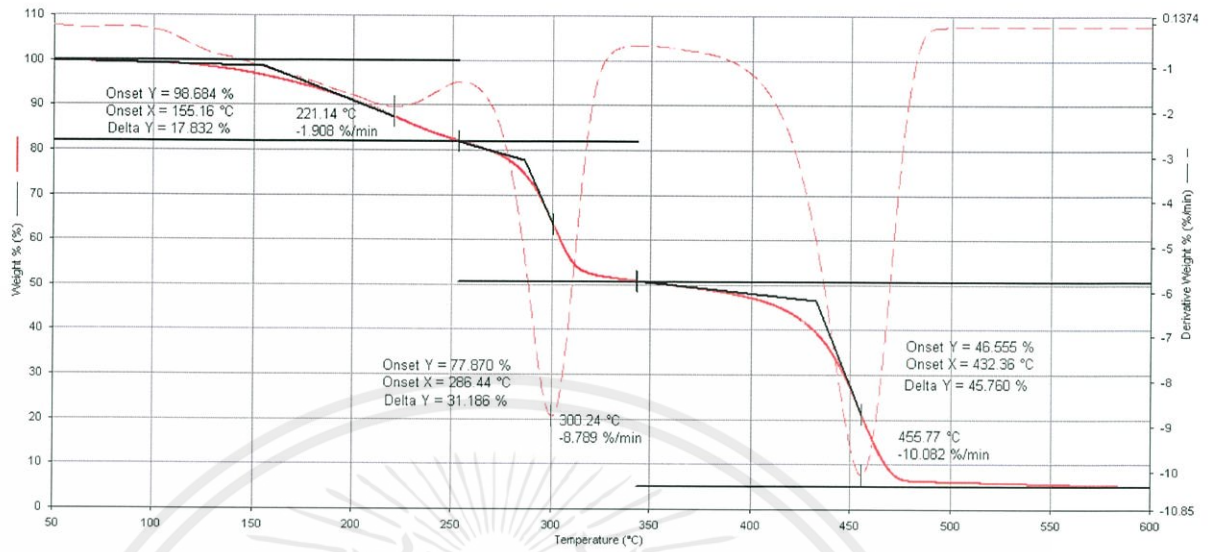
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การยืดออกสูงสุด

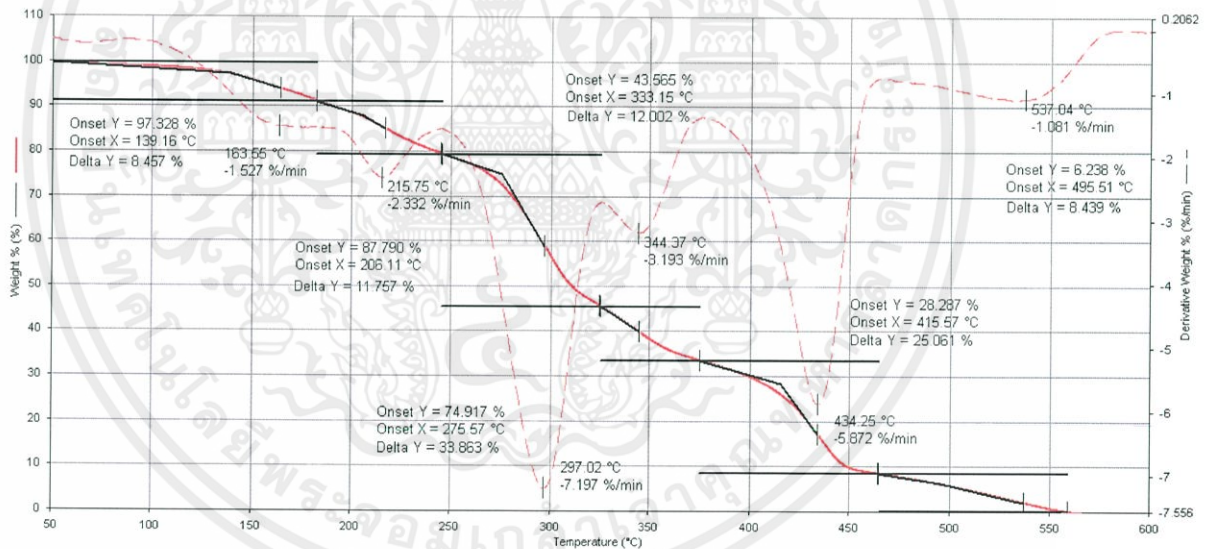
ชนิดทดสอบ	Extension at max load (mm)
TPAS/LDPE	153.16 ± 18.39
TPAS/LDPE + 5% Cotton fiber	9.25 ± 0.67
TPAS/LDPE + 10% Cotton fiber	4.75 ± 0.12
TPAS/LDPE + 15% Cotton fiber	4.74 ± 0.34
TPAS/LDPE + 20% Cotton fiber	4.72 ± 0.14
TPAS/LDPE + 5% Kapok fiber	13.76 ± 2.74
TPAS/LDPE + 10% Kapok fiber	7.67 ± 0.74
TPAS/LDPE + 15% Kapok fiber	2.75 ± 0.11
TPAS/LDPE + 20% Kapok fiber	2.32 ± 0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

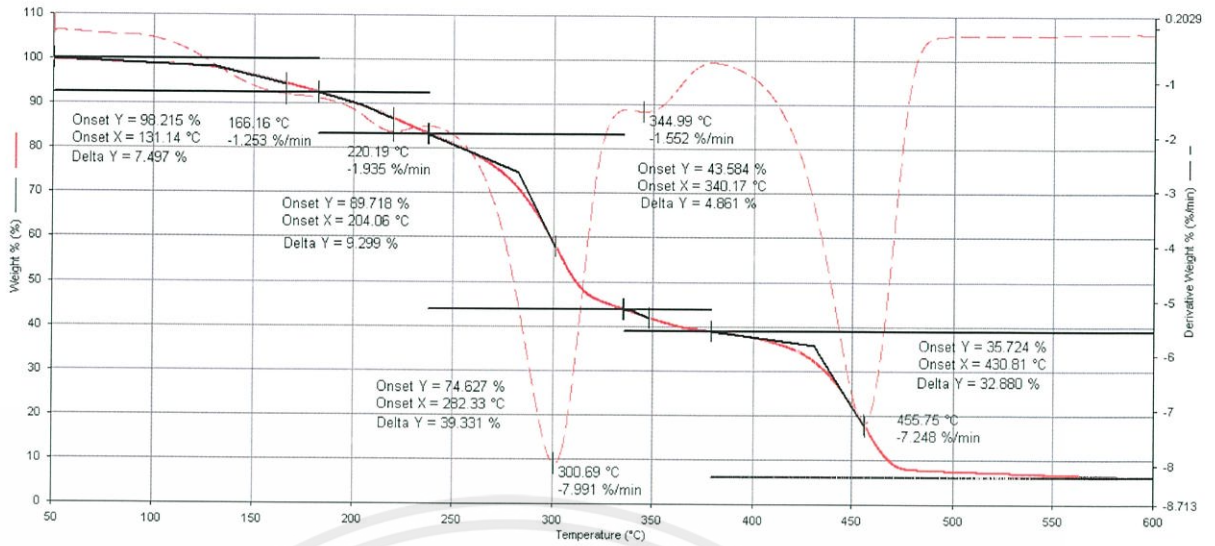


## เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE

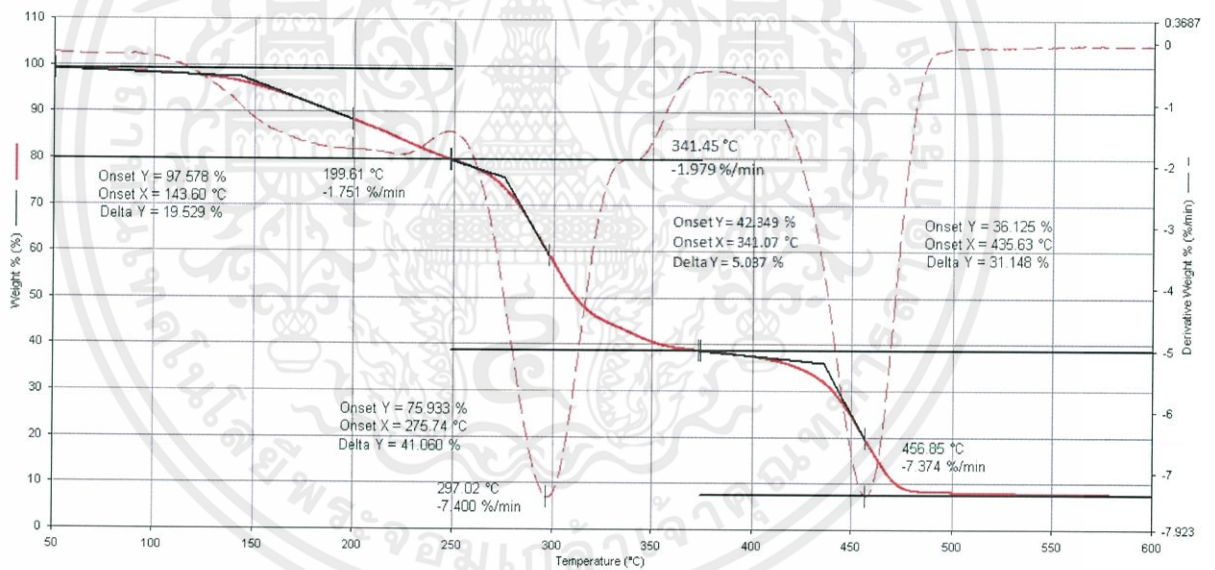


เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยไผ่ 10 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

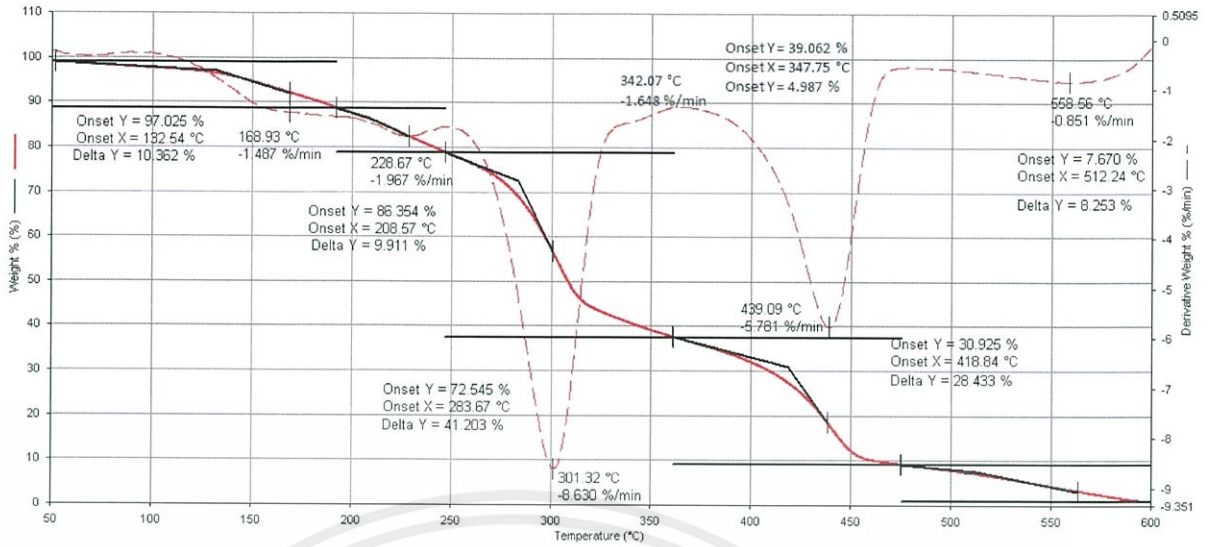


เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 10 เปอร์เซ็นต์



เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยงุ่น 20 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้าย 20 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## ตารางเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ผสมเส้นใยนุ่น

วันที่	TPAS/LDPE	+ 10% Kapok fibers	+ 20% Kapok fibers
1	30.0	9.3	8.9
2	36.1	11.2	16.2
3	42.8	18.7	23.1
4	44.7	28.1	30.6
5	44.6	31.2	33.2
6	47.1	32.8	33.2
7	49.4	34.0	33.8
8	49.2	33.4	33.2
9	49.1	33.7	32.5
10	49.0	34.6	32.2
11	49.2	34.6	32.5
12	49.1	35.0	32.2
13	49.1	35.3	32.5
14	49.1	35.3	32.1
15	49.1	35.2	32.0
16	49.0	35.2	31.8
17	49.0	35.1	31.7
18	49.0	35.1	31.6
19	49.0	35.1	31.5
20	49.0	35.1	31.6
21	49.0	35.1	31.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPAS/LDPE ที่ผสมเส้นใยฝ้าย

วันที่	TPAS/LDPE	+ 10% Cotton fibers	+ 20% Cotton fibers
1	30.0	2.1	28.0
2	34.6	4.3	33.2
3	42.8	5.4	34.4
4	44.7	7.5	35.5
5	44.6	9.1	34.1
6	47.1	13.4	31.9
7	49.4	14.8	28.4
8	49.2	15.6	27.5
9	49.1	15.9	26.5
10	49.0	14.3	27.0
11	49.2	12.4	27.1
12	49.1	12.2	27.0
13	49.1	11.1	27.1
14	49.1	11.1	27.1
15	49.1	11.1	27.0
16	49.0	11.0	27.1
17	49.0	11.1	27.1
18	49.0	11.1	27.1
19	49.0	11.1	27.0
20	49.0	11.1	27.0
21	49.0	11.0	27.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

## ตารางเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง

TPAS/LDPE	10% Kapok fibers	20% Kapok fibers	10% Cotton fibers	20% Cotton fibers
10.3	16.8	10.2	26.7	30.4
11.1	25.0	20.4	30.5	37.8
13.7	28.1	20.4	33.5	44.2
17.4	27.5	23.7	22.5	47.7
20.6	25.0	24.6	24.6	45.8
20.8	28.1	22.2	34.1	42.6
21.6	28.1	22.8	19.5	43.2
21.9	29.0	20.4	21.0	39.7
22.2	34.0	20.1	20.4	28.5
24.3	32.8	17.7	27.8	25.3
23.5	30.9	17.4	24.9	24.0
24.6	29.3	16.8	22.2	23.3
23.8	28.4	13.5	21.0	21.1
23.8	24.6	12.9	19.2	18.9
23.0	25.6	11.4	18.3	18.9
20.8	20.0	7.5	14.5	18.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้