

การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพจาก  
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของแป้งทวายผสมเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่วและ  
ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก

PROPERTIES OF THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH  
COMPOSITES REINFORCED BY KAPOK FIBERS  
AND MODIFIED BY STEARIC ACID



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพจาก  
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและ  
ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก

PROPERTIES OF THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH  
COMPOSITES REINFORCED BY KAPOK FIBERS  
AND MODIFIED BY STEARIC ACID



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PROPERTIES OF THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH  
COMPOSITES REINFORCED BY KAPOK FIBERS  
AND MODIFIED BY STEARIC ACID



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพจาก  
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วย  
เส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก

Properties of Thermoplastic Arrowroot Starch

Composites Reinforced by Kapok Fibers and Modified by  
Stearic Acid

ชื่อนักศึกษา

นางสาวจันจิรา จันท์แจ่ม รหัสนักศึกษา 55050593

นางสาวเพ็ญฟ้า สิงห์อุดม รหัสนักศึกษา 55050755

นางสาวศศิกร ภูมิแก้ว รหัสนักศึกษา 55050813

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี




ปีการศึกษา

2558

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ ประธานกรรมการ	
ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติคุณย์ กรรมการ	
รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปรับปรุงสมบัติของคอมโพสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจันจิรา จันท์แจ้ รหัสนักศึกษา 55050593 นางสาวเพียงฟ้า สิ่งห่อดม รหัสนักศึกษา 55050755 นางสาวศศิกร ภูมิแก้ว รหัสนักศึกษา 55050813
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์.ดร. จุฬารัตน์ ปรัชญาวรากร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของพลาสติกย่อยสลายที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม (Thermoplastic arrowroot starch, TPAS) โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และทำการเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น (Kapok fibers) โดยใช้กรดสเตียริกในปริมาณที่แตกต่างกันด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer) และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันพบว่ามีพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ  $1738\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O Stretching ซึ่งพบในกรดสเตียริกและเส้นใยนุ่นที่มีขี้ผึ้ง (Wax) เป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ยังพบว่าการสั่นของ O-H Stretching และ O-H bending มีการเคลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่าง แป้งท้าวยายม่อม เส้นใยนุ่น และกรดสเตียริก จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าเส้นใยนุ่นมีการกระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ในขณะที่การใช้กรดสเตียริกให้ได้สัณฐานวิทยาที่ไม่เข้ากัน นอกจากนี้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในด้านแรงดึง ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสคือเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (TPAS20F) จากการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (TPAS20F) และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (TPAS20F1SA) มีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (TPAS20F10SA) มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การย่อยสลายได้เร็วที่สุด และจากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าการเพิ่มปริมาณของ  
กรดสเตียริกไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน

คำสำคัญ : กรดสเตียริก เทอร์โมพลาสติกสตาเรซ แป้งทำวยายม่อม เส้นใยุ่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Properties of thermoplastic arrowroot starch composites reinforced by kapok fibers and modified by stearic acid
<b>Students</b>	Miss Chanchira Chanchaeng Student ID 55050593 Miss Piangfah Sing-udom Student ID 55050755 Miss Sasikorn Poomkaew Student ID 55050813
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Faculty</b>	Science
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
<b>Academic Year</b>	2015
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Jutarat Prachayawarakorn

### Abstract

This research studied on properties of thermoplastic arrowroot starch (Thermoplastic arrowroot starch, TPAS) using glycerol as a plasticizer. The TPAS polymer was reinforced by kapok fibers and different contents of stearic acid. The TPAS polymer was mixed using an internal mixer and, then, shaped by a compression molding machine. It was found from FT-IR spectra that the new wavenumber of  $1738\text{ cm}^{-1}$  (C=O stretching) were observed by stearic acid and wax, one composition of kapok fibers. In addition, the O-H stretching and O-H bending peaks shifted to lower wavenumber by the incorporation of stearic acid and kapok fibers into the TPAS matrix. For morphology, the result illustrated that the kapok fibers were well distributed and compatible with the TPAS matrix; while, of the use stearic acid caused the incompatible morphology. Furthermore, the highest maximum load, stress at maximum load and Young's modulus were obtained by the TPAS polymer reinforced by 20% kapok fibers (TPAS20F). The lowest water absorption was found in the TPAS polymer modified by 20% kapok fibers with or without 1% stearic acid (TPAS20F and TPAS20F1SA). The fastest degradation was observed in the TPAS polymer reinforced by 20% kapok fibers and 10% stearic acid (TPAS20F10SA). Finally, thermal degradation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

temperature of the TPAS polymer was not change significantly with the increasing contents of stearic acid.

**Keywords :** thermoplastic starch, arrowroot starch, kapok fibers, stearic acid



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรีชญาวรรการ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานพิเศษฉบับนี้ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆเกี่ยวกับโครงการงานพิเศษฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์ และ ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติดุลย์ ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการงานพิเศษโดยกรุณาช่วยตรวจทาน และแก้ไขโครงการงานพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ พี่กฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุนทั้งทางด้าน สารเคมี อุปกรณ์เครื่องมือ และอำนวยความสะดวกทั้งยังแนะแนววิธีการใช้เครื่องมืออย่างถูกต้องตลอดระยะเวลาการทำโครงการงานพิเศษครั้งนี้

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้ทำงานวิจัย เพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนในด้านต่างๆ จนทำให้โครงการงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จันจิรา      จันท์แจ้  
เพียงฟ้า      สิงห์อุดม  
ศศิกร      ภูมิแก้ว

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 ขอบเขต .....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>5</b>
2.1 พลาสติก.....	5
2.1.1 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic).....	5
2.1.2 เทอร์โมเซตติ้ง (Thermosetting) .....	5
2.2 วัสดุคอมโพสิต .....	5
2.2.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต .....	6
2.2.2 การประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิต .....	6
2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต.....	6
2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	7
2.3.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ .....	7
2.3.2 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลาย.....	9
2.3.3 พลาสติกสลายได้ทางชีวภาพจากแป้ง.....	9
2.4 วิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	12
2.5 แป้ง.....	14
2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดแป้ง .....	16
2.5.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง.....	18
2.5.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง .....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 สมบัติของเม็ดแป้ง.....	20
2.5.5 แป้งท้าวยายม่อม .....	23
2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) .....	25
2.6.1 กลีเซอรอล (Glycerol) .....	26
2.7 สารหล่อลื่น (Lubricants) .....	27
2.7.1 กรดสเตียริก (Stearic acid) .....	27
2.8 เส้นใย (Fibers) .....	28
2.8.1 ประเภทของเส้นใย.....	28
2.8.2 เส้นใยนุ่น (Kapok fibers) .....	29
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>37</b>
3.1 สารเคมี.....	37
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	38
3.3 การทดลอง.....	40
3.4 การทดสอบ.....	42
3.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน.....	42
3.4.2 สัมฐานวิทยา.....	42
3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	43
3.4.4 การดูดซับน้ำ .....	44
3.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน .....	44
3.4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	44
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....</b>	<b>45</b>
4.1 การทดสอบหมู่ฟังก์ชัน.....	46
4.2 สัมฐานวิทยา.....	48
4.3 สมบัติเชิงกล.....	51
4.4 การดูดซับความชื้น.....	54
4.5 การย่อยสลายโดยการฝังดิน .....	55
4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อน .....	59
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>63</b>
เอกสารอ้างอิง .....	65
ภาคผนวก.....	70
ภาคผนวก ก.....	71

ภาคผนวก ค.....	74
ภาคผนวก ง.....	77
ภาคผนวก จ.....	78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน.....	15
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งทำวยายม่อม.....	25
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งทำวยายม่อม.....	37
3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนุ่ม.....	37
3.3 อัตราส่วนในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซสูตรต่างๆ.....	41
3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมได้.....	43
4.1 สัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซสูตรต่างๆ.....	45
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นและลักษณะการสั่น.....	46
4.3 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่ม.....	61
4.4 อุณหภูมิการสลายตัว (°C) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่มและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก.....	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของแกรนูลแบ่งที่ใช้เป็นสารเติมหรือ filler ซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อพลาสติก .....	10
2.2 เม็ดพลาสติกที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) .....	11
2.3 โครงสร้างโมเลกุลของแป้ง .....	15
2.4 โครงสร้างของอะไมโลส.....	16
2.5 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน.....	17
2.6 ลักษณะของเม็ดแป้ง .....	19
2.7 ลักษณะภายในของเม็ดแป้ง .....	20
2.8 การพองตัวของเม็ดแป้ง .....	21
2.9 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน .....	22
2.10 การคืนตัวของแป้ง .....	23
2.11 กลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการสะaponนิฟิเคชัน .....	27
2.12 โครงสร้างของกรดสเตียริก.....	28
2.13 โครงสร้างของเส้นใยนุ่น.....	30
2.14 ต้นนุ่น และใบนุ่น.....	31
2.15 ดอกนุ่น ผลนุ่น และเมล็ดนุ่น .....	31
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน.....	39
4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก.....	47
4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งทำวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกที่กำลังขยาย 100 300 และ 1000 เท่า.....	50
4.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งทำวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก .....	54
4.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ความชื้นสัมพัทธ์ 93% ± 1.....	54
4.5 ลักษณะของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 3 วัน.....	56
4.6 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก .....	59
4.7 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก .....	60

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TPAS	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติ
TPAS20F	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก
TPAS20F1SA	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของแป้ง
TPAS20F2SA	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของแป้ง
TPAS20F3SA	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของแป้ง
TPAS20F4SA	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 4 โดยน้ำหนักของแป้ง
TPAS20F5SA	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของแป้ง
TPAS20F7.5SA	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 7.5 โดยน้ำหนักของแป้ง
TPAS20F10SA	เทอร์โมพลาสติกสตัดาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

พลาสติก (Plastic) เป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มนุษย์รู้จักมานานกว่า 130 ปี และนำมาใช้ประโยชน์แทนโลหะ ไม้ หรือวัสดุธรรมชาติอื่นๆ โดยเป็นวัสดุที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น จากการนำวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียม มาแยกเป็นสารประกอบบริสุทธิ์หลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอน (ถ่าน) กับก๊าซไฮโดรเจน เมื่อนำเอาสารประกอบแต่ละชนิดมาทำปฏิกิริยาให้มีลักษณะต่อกันเป็นเส้นสายยาวมากๆ จะได้วัสดุที่มีสมบัติเป็น พลาสติก [1]

การนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) เกิดขึ้นครั้งแรกในราว 40 ปีที่ผ่านมา ด้วยสภาวะโลกร้อนและปัญหามลพิษ ภาวการณ์ขาดแคลนเชื้อเพลิง และวัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเคมีที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ทำให้มีการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพเพื่อทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้

ถึงแม้ว่าพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพอาจผลิตได้จากวัตถุดิบกลุ่มปิโตรเคมี (Petroleum based resource) แต่การพัฒนาการผลิตจากวัตถุดิบชีวมวลจากธรรมชาติ (Bio-based materials) ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ (Renewable) และถือเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า ในบรรดาชีวมวลจากธรรมชาติทั้งหลาย แป้งจัดเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงและได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีปริมาณมาก หาง่าย ราคาถูก และสามารถย่อยสลายได้

เทอร์โมพลาสติกสตาρχ (Thermoplastic starch หรือเรียกย่อว่า TPS) หมายถึง การนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติก ซึ่งมีข้อจำกัดคือ โครงสร้างผลึกในแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก แกรนูลแป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมเหลวได้ หากให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้น การหลอมเหลวของแกรนูลแป้งจะเกิดการเผาไหม้และสลาย การเติมสารเติมแต่ง (Additive) ที่เรียกว่า Plasticizer จะช่วยทำให้แกรนูลของแป้งเกิดการหลอมเหลวได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงกล (Mechanical energy) [2]

แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot starch) มีชื่อเรียกว่าต้นสาคุ เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในอเมริกาใต้ Arrowroot ในภาษาพื้นเมืองชื่อว่า Zulu มีพืชอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ Arrowroot คือ Amaranth มีภาษาพื้นเมืองว่า Sagu เนื่องจากพืชสองชนิดนี้มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก เป็นไปได้ว่าเราเรียกชื่อ Arrowroot สลับ Sagu และไม่เกี่ยวข้องกับต้นปาล์มสาคุ (Metrohylonsagu)

แป้งท้าวยายม่อมเป็นแป้งที่ทำมาจากหัวท้าวยายม่อม (*Tacca leontopetaloides*) ซึ่งเก็บหัวได้ปีละครั้ง จึงทำให้เป็นแป้งที่มีราคาแพง ลักษณะแป้งเป็นเม็ดเล็กๆหยาบๆสีขาว ลักษณะของแป้งไม่นุ่มละเอียดเหมือนแป้งมัน มีลักษณะใส ความหนืดสูง ความทนทานต่อแรงเฉือนและความร้อนต่ำ

มีความเปราะเล็กน้อย มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงเท่ากับ 99% โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณอะไมโลส 24.53% และมีไขมัน เถ้า เส้นใย ฟอสฟอรัส และโปรตีนน้อยมาก [15]

เส้นใยนุ่ม (Kapok fibers) เป็นพืชเส้นใยชนิดหนึ่งที่ได้จากผลหรือฝัก มีรูปยาวรี รูปทรงกระบอกกลวง ผนังบางเรียบและเปราะ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทำเบาะ ที่นอน เป็นไส้ในบรรจุ หมอน ที่นอนเครื่องใช้ต่างๆ ทำวัสดุกันกระแทก เป็นฉนวนกันความร้อน เป็นต้น มักไม่นำมาใช้ใน อุตสาหกรรมสิ่งทอพวกปั่นด้ายเหมือนกันฝ้าย เพราะฟูและเบามาก ซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าเส้นใยฝ้ายถึง 5 เท่า เส้นใยไม่มีลักษณะหยิกหรือหยักที่จะช่วยให้กลุ่มเส้นใยจับตัวกันได้ดีเมื่อบั่นเป็นเส้นด้าย มีความถ่วงจำเพาะประมาณ  $\frac{1}{4}$  เท่าของน้ำ มีความยาวของเส้นประมาณ 8-30 มิลลิเมตร นอกจากนี้ ยังมีสมบัติไม่ดูดน้ำแต่สามารถซึมซับคราบน้ำมันได้เป็นอย่างดี [4]

กรดสเตียริก (Stearic acid) มีสูตรทางเคมี คือ  $C_{17}H_{35}COOH$  เป็นสารที่เกิดไขมันและน้ำมัน จากสัตว์จึงค่อนข้างปลอดภัย เป็นผลึกสีขาว มันเงา ลักษณะเฉพาะคือมีกลิ่นหืนของไขมัน สเตียริก แอซิด เกิดจากการผสมกันของกรดไขมันอิ่มตัวสำคัญ ได้แก่ กรดสเตียริก (Octadecanoic) และ กรดปาล์มิติก (Hexadecanoic or Palmitic Acid) กรดสเตียริกใช้เป็นสารช่วยการกระจายตัวและเป็นสารเร่งหรือกระตุ้นปฏิกิริยาในยางคอมพาวด์ โดยกรดสเตียริกมีส่วนช่วยในการกระจายตัวของ สารเติมเต็มหรือเม็ดสีต่างๆ อีกทั้งยังช่วยพัฒนากระบวนการผลิต เนื่องจากทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นที่ ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของยาง และช่วยให้การอัดขึ้นรูปเป็นไปได้ง่ายขึ้นด้วย ทั้งยังมักใช้ เป็นส่วนผสมในเครื่องสำอาง เช่น ผลิตภัณฑ์ระงับกลิ่นกาย โลชั่น ครีมรองพื้น และสบู่ มีคุณสมบัติ ช่วยสร้างความนุ่มนวล ลื่น เป็นประกายวาว เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสบู่ ผสมในเทียนเพื่อให้ เนื้อแกร่งและจุดติดง่าย และยังช่วยทำให้เทียนผิวมันลื่นหลุดจากพิมพ์ง่ายขึ้น [5]

ข้อจำกัดที่สำคัญของการนำผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้ง (TPS) มาใช้ประโยชน์ คือ ชิ้นงานจะมีสมบัติทางเชิงกลที่ไม่ดีนักและชิ้นงานจะมีความชื้นและว่องไวต่อน้ำมาก [2] เนื่องจาก ภายในโครงสร้างของ TPS นั้นมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ในการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งานจริงต้องทำการปรับปรุงสมบัติเพื่อแก้ไขข้อด้อยที่กล่าวมาก่อน

การพัฒนาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาเรช สามารถทำได้โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใย ธรรมชาติต่างๆ เช่น ป่าน ปอ และเซลลูโลส เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติเป็นวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจาก สามารถใช้แทนเส้นใยแก้วที่ใช้อยู่ทั่วไป และมีข้อได้เปรียบทั้งในเรื่องของน้ำหนัก และการยึดติด ระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาเรช ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกล ของเมทริกซ์ดังกล่าว นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ การเสริมแรงด้วย เส้นใยจะช่วยพัฒนาสมบัติหลายประการ เช่น ความสามารถในการทนความร้อน การลดอัตราการดูด ซึบความชื้น รวมทั้งการหดตัวขณะการขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติกสตาเรช เป็นต้น นอกจากนี้การใช้ กรดสเตียริก (Stearic acid) คาดว่าจะช่วยปรับปรุงสมบัติในด้าน การดูดซับน้ำของ เทอร์โมพลาสติกสตาเรชได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งท้าวยายม่อมยังพบไม่มากนัก เมื่อศึกษารายงานที่เกี่ยวข้องพบว่าจากงานวิจัยของ ปัญญา สุขการ และคณะ [6] ได้ทำการศึกษา การปรับปรุงสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเพคตินและเส้นใยนุ่น จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า เพคตินและเส้นใยนุ่นสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช นอกจากนี้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับทุกสูตร ในด้านแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 30% และเส้นใยนุ่น 20% โดยน้ำหนัก สมบัติการดูดซับน้ำพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 20% โดยน้ำหนัก มีสมบัติการดูดซับน้ำต่ำที่สุด จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่นมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยนุ่น และการย่อยสลายตัวโดยการฝังดิน พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 30% โดย น้ำหนัก ย่อยสลายได้เร็วที่สุด และงานวิจัยของ วรวรรณ พัฒนสิน [7] ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch , TPS) โดยการใช้แป้งมันสำปะหลังมาเป็น ส่วนผสมหลัก ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วนผสมแบ่งกับกลีเซอรอลเป็น 65 : 35 สมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน ไคโตซาน และเส้นใยฝ้าย ในปริมาณ ต่างๆ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยไคโตซานและเส้นใยฝ้าย ดูดซับน้ำได้น้อยที่สุดและ จากการศึกษาสัณฐานวิทยา (SEM) พบว่าเพคติน ไคโตซานและเส้นใยฝ้ายสามารถกระจายตัวและเข้า กันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและ เส้นใยฝ้าย ให้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสสูงที่สุด

งานวิจัยนี้จึงจะทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม และมีกลีเซอรอล เป็นพลาสติกไซเซอร์โดยจะศึกษาปริมาณเส้นใยนุ่น 20% โดยน้ำหนักและปริมาณกรดสเตียริกใน อัตราส่วนที่แตกต่างกัน และทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) และขึ้นรูปโดย กระบวนการการกดอัด (Compression molding) จากนั้นทดสอบสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ช ซึ่งคาดว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ทำการเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและ ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกที่เตรียมได้จะมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์แต่สามารถย่อย สลายได้ตามธรรมชาติ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม (Thermoplastic arrowroot starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์
2. เพื่อทดสอบสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม
3. ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยใช้เส้นใยนุ่นและกรดสเตียริก

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งท้าวยายม่อม โดยใช้เส้นใยนุ่นเป็นวัสดุเสริมแรง

1.3.3 ศึกษาปริมาณของกรดสเตียริกที่เหมาะสม

1.3.4 ศึกษาสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งท้าวยายม่อมที่เตรียมได้ ดังนี้

1.3.4.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy)

1.3.4.2 สมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)

1.3.4.3 สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope)

1.3.4.4 สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณการดูดซับความชื้น

1.3.4.5 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียบ (Thermogravimetric Analysis)

1.3.4.6 ความสามารถในการย่อยสลายโดยการฝังดิน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งท้าวยายม่อมโดยใช้เส้นใยนุ่นเป็นวัสดุเสริมแรง และชิ้นงานที่ได้มีสมบัติดีขึ้น

1.4.2 เมื่อผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกแล้วเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งท้าวยายม่อมมีการดูดซับน้ำที่ลดลง

1.4.3 วัสดุที่เตรียมได้สามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 พลาสติก

พลาสติกเป็นวัสดุที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นโดยการนำวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่น น้ำมันปิโตรเลียมมาแยกเป็นสารประกอบบริสุทธิ์หลายชนิดซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอน (ถ่าน) กับก๊าซไฮโดรเจน เมื่อนำเอาสารประกอบแต่ละชนิดมาทำปฏิกิริยาให้มีลักษณะต่อ ๆ กันเป็นเส้นสายยาว จะได้วัสดุที่มีสมบัติเป็นพลาสติก พลาสติกที่เกิดจากสารประกอบที่ต่างกันจะมีสมบัติแตกต่างกันไปด้วยและพลาสติกบางชนิดอาจเกิดจากสารประกอบมากกว่า 1 ชนิด

พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยอาศัยลักษณะของพลาสติกเมื่อถูกความร้อน [9]

##### 2.1.1.เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic)

พอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างโมเลกุลของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นแบบเส้นตรงหรือแบบกิ่งสั้นๆ สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และหลอมเหลวเป็นของเหลวหนืดเนื่องจาก โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่พันกันอยู่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันไปได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับความร้อน และเมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งตัว ซึ่งการหลอมเหลวและเย็นตัวนี้ สามารถเกิดกลับไปกลับมาได้โดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพ หรือโครงสร้างของพอลิเมอร์เปลี่ยนไป

##### 2.1.2.เทอร์โมเซตติง (Thermosetting)

พอลิเมอร์ประเภทนี้จะมีโครงสร้างเป็นแบบร่างแห ซึ่งจะหลอมเหลวได้ในขั้นตอนการขึ้นรูปครั้งแรกเท่านั้น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลทำให้พอลิเมอร์มีรูปร่างที่ถาวร ไม่สามารถหลอมเหลวได้อีกเมื่อได้รับความร้อน และหากได้รับความร้อนสูงเกินไป จะทำให้พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลแตกออก ได้สารที่ไม่มีสมบัติของความเป็นพอลิเมอร์ต่อไป [8]

#### 2.2 วัสดุคอมโพสิต

วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันทำให้สมบัติของวัสดุคอมโพสิตที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ องค์ประกอบของวัสดุคอมโพสิตได้แก่วัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นเฟสต่อเนื่องเรียกว่าเมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้นเรียกว่าสารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรงและทำให้วัสดุคอมโพสิตเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์และทำให้วัสดุคอมโพสิตมีสมบัติตามต้องการ [10]

### 2.2.1 การแบ่งชนิดของคอมโพสิต

สามารถแบ่งชนิดของคอมโพสิตได้ดังนี้

1. คอมโพสิตแบบเส้นใย (Fibrous Composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใย (Fibers) อาจเป็นเส้นใยสั้นหรือเส้นใยยาวต่อเนื่อง (Continuous Fibers) มักเป็นเส้นใยขนาดเล็ก มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรงตามแนวการจัดเรียงตัวของเส้นใยสูงกว่าแนวอื่นๆ

2. คอมโพสิตแบบแผ่นหรือลามิเนต (Laminar Composites) คือ คอมโพสิตที่ประกอบด้วยชั้น หรือแผ่นของวัสดุที่ยึดติดกันด้วยตัวเชื่อมเมทริกซ์ มีลักษณะเป็นชั้นๆ คล้ายแผ่นประกบ (Sandwich) หรือเป็นโครงสร้างคล้ายรังผึ้ง (Honeycomb)

3. คอมโพสิตแบบเป็นก้อน (Particulate Composites) คือ คอมโพสิตที่มีส่วนเสริมแรงเป็นเม็ด (Bead) แผ่น (Flake) หรือผง (Powder) ที่มีขนาดเล็ก [11]

### 2.2.2 การประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิต

สมบัติของวัสดุคอมโพสิตสามารถออกแบบได้จากวัสดุองค์ประกอบ สัดส่วนระหว่างวัสดุองค์ประกอบ ความเข้ากันได้ระหว่างวัสดุองค์ประกอบ การเรียงตัวของสารเสริมแรงและการกระจายตัวของสารเสริมแรงในเมทริกซ์ การควบคุมปัจจัยเหล่านี้มีส่วนทำให้สมบัติของวัสดุคอมโพสิตเป็นไปตามต้องการทำให้วัสดุคอมโพสิตสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายสาขาครอบคลุมตั้งแต่วัสดุสำหรับการใช้งานทั่วไปจนกระทั่งถึงวัสดุที่ใช้ในงานเฉพาะกิจที่ต้องการสมบัติพิเศษ [10]

### 2.2.3 ข้อดีและข้อเสียของคอมโพสิต

วัสดุคอมโพสิตมีมากมายหลายชนิดและมีสมบัติเด่นหลายประการ นอกจากนี้สามารถออกแบบโครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตให้เหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ ซึ่งข้อดีของวัสดุคอมโพสิตมีดังนี้

- มีสมบัติต่อน้ำหนักหรือความหนาแน่น (Properties to Weight/Density Ratio) สูง เช่น ความแข็งแรงจำเพาะ (Specific Strength) มอดุลัสจำเพาะ (Specific Modulus) ความเหนียวจำเพาะ (Specific Stiffness) ฯลฯ เนื่องจากวัสดุคอมโพสิตมีความหนาแน่นต่ำ มีน้ำหนักเบา

- มีสมบัติที่หลากหลาย สามารถสร้างวัสดุคอมโพสิตให้มีสมบัติตามต้องการ (Tailor-made Properties) ให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น เลือกชนิดเส้นใยและเมทริกซ์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน กำหนดปริมาณเส้นใยในคอมโพสิต การจัดให้เส้นใยเรียงตัวตามแนวรับแรง ฯลฯ

- มีอายุการใช้งานยาวนาน มักมีสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนดี

- มีสมบัติการรับแรงและแดมป์ (Damping) ดี

- ความทนทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) ดี

- มีเสถียรภาพต่อรูปร่าง (Dimensional Stability) สูง

อย่างไรก็ดีวัสดุคอมโพสิตมีข้อเสีย และเครื่องมือการขึ้นรูปคอมโพสิต มักมีสมบัติแต่ละ

ทิศทางไม่เท่ากัน ทำให้มีสมบัติข้อจำกัดบางประการ คือ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้นทุนการผลิตสูง เนื่องจากราคาของวัตถุดิบ
- แอนไอโซโทรปี (Anisotropy) เนื่องจากมีการจัดเรียงตัวของส่วนเสริมแรง เป็นสาเหตุให้คอมโพสิตไม่แข็งแรงในแนวตั้งฉากกับแนวการเรียงตัว
- ยากในการต่อ (Attaching) หรือเชื่อมติดกับวัสดุอื่น
- ยากในการทำลายและนำกลับมาใช้ใหม่หรือรีไซเคิล (Recycle) [11]

## 2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในอนาคตมีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากหลายสาเหตุเช่น มีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆทำให้พลาสติกมีราคาต่ำลง และมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น มีกฎข้อบังคับรวมถึงการที่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น ทำให้บริษัทต่างๆทำการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่มีสมบัติที่หลากหลายแตกต่างกันบางครั้งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไม่เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการทางชีวภาพอย่างแท้จริงเพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ปัจจุบันจึงมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) ขึ้นและให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ดังนี้

- ASTM D6400-99 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือพลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย รา และสาหร่าย
- ISO 472:1998 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือพลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้โดยเฉพาะเป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดของพลาสติกและการใช้งานผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น

### 2.3.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งกลไกการย่อยสลายของพลาสติกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

#### 1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้างเมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียรจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบ

ขยะกองคอมโพสท์หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีดหรือแม้กระทั่งชิ้นพลาสติกที่มีการพิมพ์ด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิวเนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

## 2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation)

โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้นซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

## 3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆโดยมีออกซิเจนและความร้อน แสงยูวีหรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่หน้าที่จะเพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็วแต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิชันซึ่งทำหน้าที่คะตะลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

## 4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอมไนด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่คะตะลิสต์ (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็น เอนไซม์ ต่าง ๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ Glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพและคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Nonenzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมีสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

### 5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endoenzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบและแบบ Exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆและมวลชีวภาพ

#### 2.3.2 การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้

การใช้งานผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ เช่น งานทางการแพทย์ สารเคลือบกระดาษหรือโฟม ฟิล์มคลุมดินและวัสดุสำหรับเกษตร ถูกสำหรับใส่ของ ฟิล์มและถุงสำหรับใส่ขยะเศษอาหารบรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค และโฟมเม็ดกันกระแทก เป็นต้น [12]

#### 2.3.3 พลาสติกสลายได้ทางชีวภาพจากแป้ง

แป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด ได้แก่ อะไมโลสและอะไมโลเพกติน ในธรรมชาติโมเลกุลแป้งจะมีการจัดเรียงตัวเกิดเป็นโครงสร้างกิ่งผลึกที่เป็นระเบียบในแกรนูลแป้ง (Starch granule) โครงสร้างระดับแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก สามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงถึง 220 องศาเซลเซียส แนวทางการนำแป้งมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกสลายได้ทางชีวภาพสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

##### 1. การใช้แป้งเป็นฟิลเลอร์ (Filler) หรือสารตัวเติมในพลาสติก

การใช้แป้งในลักษณะนี้จะเป็นการผสมแป้งเข้ากับพลาสติกในเครื่องอัดขึ้นรูป (Extruder) ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูงผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นเนื้อพลาสติกที่มีเม็ดแป้งกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอการผสมแป้งกับพลาสติกในลักษณะนี้จะเติมแป้งลงไปได้ในปริมาณไม่มากนักโดยเฉพาะการผลิตฟิล์มบางมักจะผสมแป้งได้ไม่เกิน 10% ในช่วงแรกการผสมแป้งในพลาสติกส่วนใหญ่มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้ของพลาสติกผสมอย่างไรก็ตามการผลิตพลาสติกที่ผลิตขึ้นจะย่อยสลายได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกับแป้งด้วยหากเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายไม่ได้ เช่น Polyethylene พลาสติกผสมที่ผลิตได้จะเกิดการย่อยสลายเฉพาะในส่วนของแป้งเท่านั้นแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ หากมีการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



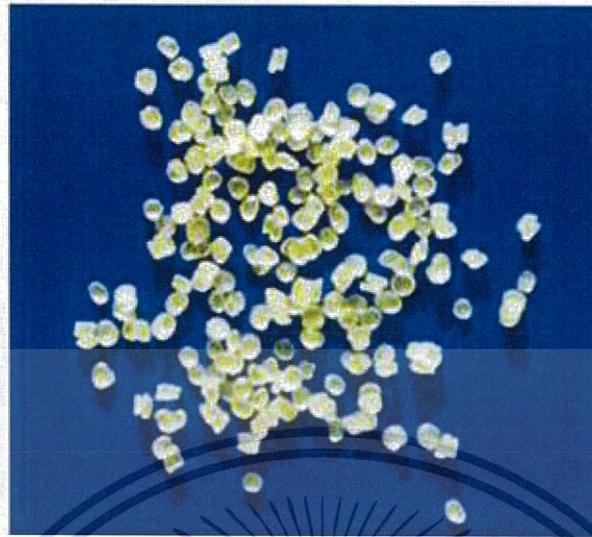
รูปที่ 2.1 ลักษณะของแกรนูลแป้งที่ใช้เป็นสารตัวเติมหรือ Filler ซึ่งกระจายตัวอยู่ในเนื้อพลาสติก [2]

เนื่องจากแป้งเป็นสารที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่พลาสติกส่วนใหญ่เป็นสารที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) สารทั้งสองชนิดจึงผสมเข้ากันได้ไม่ค่อยดี ดังนั้นแรงยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างพลาสติกกับแกรนูลแป้งจึงมีค่าต่ำทำให้พลาสติกผสมที่ได้มีความแข็งแรงและสมบัติเชิงกลต่ำด้วยแนวทางการแก้ปัญหานี้อาจทำได้โดยการดัดแปรโครงสร้างแป้งให้มีสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้น หรืออาจใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) เติมลงไป ในระหว่างกระบวนการหลอมผสม นอกจากนี้การผลิตฟิล์มบางยังถือเป็นอีกข้อจำกัดของวิธีนี้ ดังนั้นการผลิตฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่าขนาดแกรนูลแป้งจึงเป็นไปได้ยาก

## 2. การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch)

เทอร์โมพลาสติกหมายถึงพอลิเมอร์ที่สามารถอ่อนตัวและหลอมเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน แต่เมื่อทำให้เย็นลงก็จะสามารถแข็งตัวและคงรูปร่างได้ พลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกทำให้สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นฟิล์ม ภาชนะ และชิ้นส่วนรูปทรงต่างๆ ได้ การนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติกมีข้อจำกัดคือ โครงสร้างผลึกในแกรนูลของแป้งมีความแข็งแรงมาก แกรนูลแป้งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมละลายได้ หากเราให้ความร้อนแก่แป้งที่ปราศจากความชื้นแทนที่จะหลอมเหลว แกรนูลแป้งจะเกิดการเผาไหม้และสลายอย่างไรก็ดี หากมีการเติมสารเติมแต่ง (Additive) ที่เรียกว่า Plasticizer จะช่วยทำให้แกรนูลแป้งเกิดการหลอมละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อน และแรงกล (Mechanical energy) ได้ สารที่เรียกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch หรือเรียกย่อว่า TPS) เม็ดพลาสติก TPS ที่ผลิตได้สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องมือและกระบวนการผลิตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพลาสติกทั่วไป เช่น เอกซ์ทรูเดอร์ เครื่องฉีด และเครื่องเป่าฟิล์ม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 เม็ดพลาสติกที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) [2]

ถึงแม้ว่าจะทำหน้าที่เป็น Plasticizer ของแป้งได้ดี แต่เนื่องจากน้ำระเหยได้ง่าย ทำให้พลาสติกที่ได้มีลักษณะเปราะ สารที่นิยมใช้เป็น Plasticizer ในการผลิต TPS ได้แก่ กลีเซอรอลเนื่องจาก TPS สามารถหลอมตัวได้เมื่อได้รับความร้อนและแรงกลที่เหมาะสม จึงสามารถใช้ TPS เป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตพลาสติก อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ผลิตจาก TPS มีข้อจำกัดที่สำคัญสองประการ คือมีสมบัติเชิงกลต่ำ (Poor mechanical properties) และไม่ทนน้ำ งานวิจัยและพัฒนาส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงสมบัติทั้งสองด้านของ TPS ให้ดีขึ้น ซึ่งแนวทางที่นิยมได้แก่การดัดแปรโครงสร้างของแป้งด้วยกระบวนการทางเคมี และการผสม TPS กับพลาสติกสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ

### 3. โฟมจากแป้ง (Starch-based Foams)

โฟมจากแป้งถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อทดแทนโฟมที่ผลิตจาก Polystyrene ซึ่งใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์โฟมหลายชนิด เช่น เม็ดโฟมกันกระแทก (Losse-fill), ถาดหรีดจานโฟม และผลิตภัณฑ์โฟมอื่นๆ โฟมที่ผลิตจากแป้งนอกจากจะสามารถย่อยสลายได้แล้วยังมีกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้เพียงน้ำเป็นสารช่วยให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างโฟม (Blowing agent) เนื่องจากองค์ประกอบหลักคือแป้งทำให้โฟมที่ผลิตได้ไม่ทนน้ำและยังมีสมบัติบางประการที่ดีกว่าโฟมจาก Polystyrene การนำพลาสติกที่ย่อยสลายได้ชนิดอื่น เช่น Polyvinyl alcohol, Polycaprolactone และ Polylactic acid มาผสมกับแป้งเป็นแนวทางที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของโฟมแป้ง

### 4. การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการหมัก (Starch as feed stock for fermentation process)

เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสจึงเป็นวัตถุดิบที่สำคัญสำหรับกระบวนการหมักเพื่อผลิตสารหลายชนิด เช่น แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ เอสเทอร์ และกรด เป็นต้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยที่ควรศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในบรรดาสารต่างๆ ที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักแป้งกรดแลคติกได้รับความสนใจและมีความสำคัญอย่างมากในการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ เนื่องจากกรดแลคติกเป็นมอนอเมอร์สำหรับการผลิต Polylactic acid หรือที่เรียกย่อว่า PLA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพที่มีศักยภาพสูงและมีการวิจัยและพัฒนามากที่สุดตัวหนึ่งในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาทำให้มีความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีอย่างรวดเร็วจนในปัจจุบันมีการผลิต PLA ในระดับอุตสาหกรรมแพร่หลายมากขึ้น PLA เป็นพลาสติกสลายได้ทางชีวภาพที่มีสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไป สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายชนิด เช่น ภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง ฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ของเล่น และอุปกรณ์เครื่องใช้ต่างๆ หรือแม้กระทั่งชิ้นส่วนในรถยนต์ด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่องจึงทำให้ PLA เป็นพลาสติกทางเลือกที่มีบทบาทสำคัญในการทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ดังนั้นจึงคาดการณ์ได้ว่าปริมาณความต้องการใช้ PLA น่าจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งย่อมส่งผลให้ความต้องการใช้แปงเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิต PLA มากขึ้นด้วยเช่นกัน [2]

## 2.4 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย มีดังต่อไปนี้

### 1. การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณหาพื้นที่หน้าแก๊ส สมมูลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$Cd = Cg + Cs + Cm$$

เมื่อ  $Cg$  คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ

$Cs$  คือ คาร์บอนที่ละลายได้

$Cm$  คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = (Cd/Ci) * 100$$

เมื่อ  $Ci$  คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

## 2. การวิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวลหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุ ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์ จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นเช่น พอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูงจะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่า พอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของปริมาณแป้งต่ำ

## 3. การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

### (ก) การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง ที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้างนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ และเมื่อนำมาล้างและสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆ ในพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

### (ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ ซึ่งพบว่า พอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งฝังไว้ในดิน มีสีที่เปลี่ยนแปลงไปและมีขนาดเล็กกลอง เนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาวซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลายเหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่มีกำลังขยายสูง ยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคโลนีของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ฝังดิน 6 เดือน มาตรวจวัดหาปริมาณไนโตรเจน พบว่าปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.06% เป็น 0.16% มาจากกรดอะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือ จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตและสร้างโคโลนีบนพอลิเมอร์และย่อยสลาย ส่วนที่เป็นแป้งบนพอลิเมอร์ โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

## 4. การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared Spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ปฏิกิริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าว ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมภายในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์ สเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรดใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแป้งจะเกิดรูขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมี CO<sub>2</sub>เกิดขึ้น ซึ่งสามารถวัดจากสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด

## 5. การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

การวิเคราะห์ด้วยความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวผลึก โดย Differential Thermal Analysis (DTA) หรือ Differential Scanning Calorimeter (DSC) การวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียไปโดยใช้ Thermogravimetric Analysis (TGA)

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะอสัณฐาน (Amorphous) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนผลึก

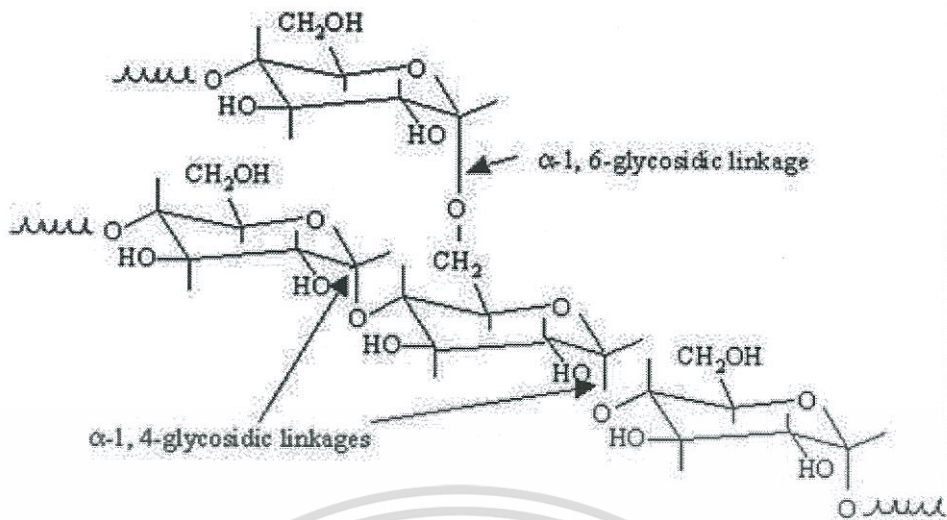
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายแบ่งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแป้งก่อนและหลังการย่อยสลาย

## 6. การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 X 120 มิลลิเมตร หลายนๆ ตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 2 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน [13]

## 2.5 แป้ง

แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็น Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -Glycosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี Anomeric carbon (C1) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลาย ที่มีคุณสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่ง Reducing end 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสแต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า “ Intermediate material ” แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของแป้ง [14]

แป้งเป็น Homopolysaccharide ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืช และเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชเก็บสะสมแป้งไว้ตามส่วนต่างๆ เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้น และผล โดยรวมกันอยู่เป็นเม็ดแป้ง (Starch granule) แป้งส่วนใหญ่ได้มาจากเมล็ดของธัญพืช เช่น ข้าวเจ้า ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง และบางส่วนได้มาจากหัวและรากของพืช เช่น มันเทศ มันฝรั่ง และมันสำปะหลัง แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะ คือ มีโครงสร้างในทางเคมีในโมเลกุลแตกต่างกันและเม็ดแป้งจะมีขนาดรูปร่าง และสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน โดยเฉพาะรูปร่างของเม็ดแป้งที่มาจากพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [14]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ $\alpha$ -1,6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน

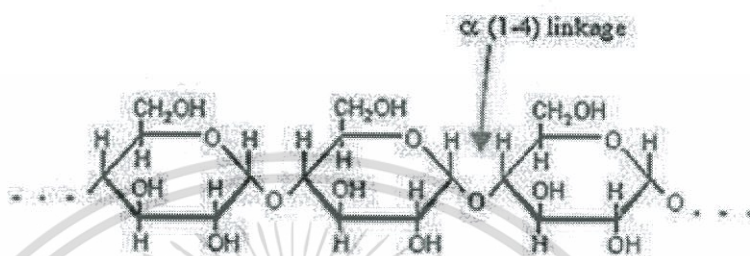
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.1 องค์ประกอบทางเคมีของเม็ดแป้ง

องค์ประกอบทางเคมีของแป้ง มีดังต่อไปนี้

### 1. อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,4-Glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.4 อาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย



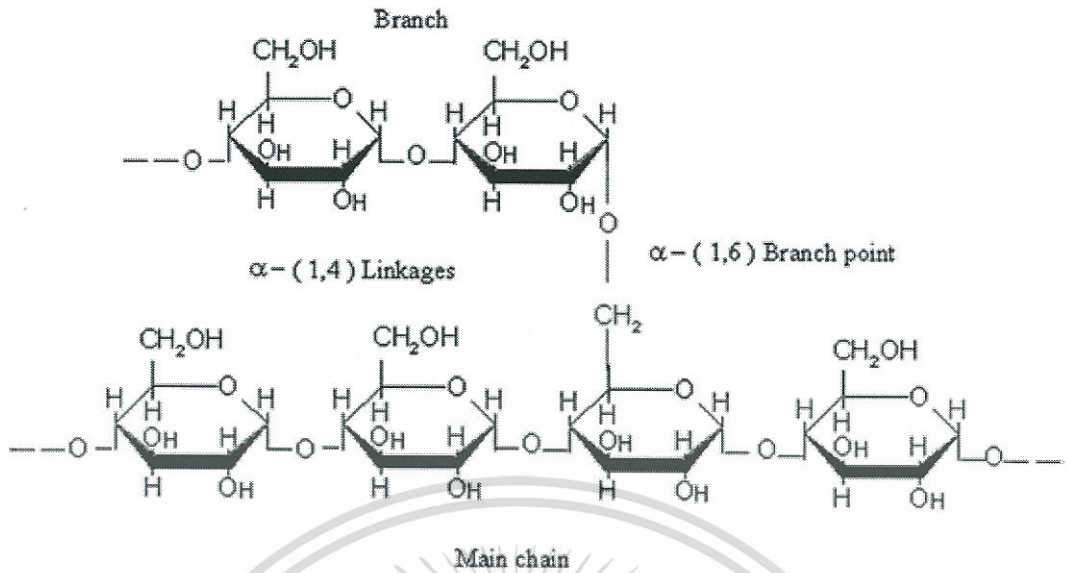
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของอะไมโลส [14]

โดยทั่วไปแป้งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูง ประมาณ 22-30% ส่วนแป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาคูจะมีปริมาณ อะไมโลสต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง 18-24% น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน โดย อะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมี Degree of polymerization (DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของ อะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลส ยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง

อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น Butanol, Fatty acid, Surfactant, Phenol และ Hydrocarbon สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ จะไม่ละลายในน้ำโดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์อะไมโลสที่มีความยาวสายโซ่มากกว่า 45 หน่วยกลูโคสเมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินม่วงซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ และใช้ในการตรวจสอบปริมาณอะไมโลสในแป้ง

### 2. อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย พันธะ  $\alpha$ -1, 4- Glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 6-Glycosidic linkage ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [14]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ  $\alpha$ -1, 6 Glycosidic linkage มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสใน อะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 107 ถึง 109 ดาลตัน และมีการคืนตัวต่ำ

### 3. ไขมัน (Lipid)

ไขมันที่สกัดได้จากเมล็ดแป้งอาจเป็นไขมันที่เป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้งจริงๆ หรืออาจมาจากเนื้อเยื่อ ส่วนอื่นๆ และมาจับอยู่กับเมล็ดแป้งในขณะที่ทำการสกัดแป้ง แป้งจากเอนโดสเปิร์มของพวกธัญพืชจะมีลักษณะเฉพาะคือ มีไขมันเป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้ง (Integral lipids) ในขณะที่เมล็ดแป้ง จากมันฝรั่ง เม็ดถั่วประเภทต่างๆ หรือจากส่วนอื่นๆ ของธัญพืชไม่พบ Integral lipids ไขมันที่จับอยู่กับเมล็ดแป้งนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ไขมันที่มาจากเนื้อเยื่ออื่นๆ เช่น จากเมมเบรนและสเฟียร์โรโซม ซึ่งจะจับอยู่กับเมล็ดแป้งแบบหลวมๆ ประกอบด้วยไขมันพวกไตรกรีเซอไรด์ ไตเอซิลไกลโคไลปิด และ ฟอสโฟไลปิด ระหว่างการเจริญของเมล็ดข้าว จะเกิดการย่อยสลายไขมันบางส่วนได้กรดไขมัน และ โมโนเอซิลกรีเซอไรด์ ในขณะที่สกัดแป้ง แม้ว่าเมล็ดแป้งจะพองตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่กรดไขมันและโมโนเอซิลไลปิดเหล่านี้สามารถถูก ดูดซึมเข้าไปในบริเวณชั้นผิวของเมล็ดแป้งได้ จึงเรียกไขมันส่วนนี้ว่า “Starch surface lipids” ส่วนไขมัน ที่เป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้งอย่างแท้จริงจะพบอยู่ภายในเมล็ดแป้ง ในแป้งข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลีพบว่า เป็นไขมันประเภท ไลโซฟอสโฟไลปิดทั้งหมด ในขณะที่ในแป้งข้าวเจ้า ข้าวโพดและข้าวโพด พบว่าเป็นกรดไขมันประมาณ 30-60% แป้งข้าวเหนียว ข้าวโพดเหนียว ข้าวบาร์เลย์เหนียว และข้าวสาลีเหนียวซึ่งมีอะไมโลสต่ำมาก พบว่ามีปริมาณไขมันต่ำมากเช่นกัน และแป้งจากข้าว

เหล่านี้ เมื่อกลายพันธุ์ให้มีอะไมโลสสูงจะพบไขมันในปริมาณมากด้วย แป้งข้าวโอตมีไขมันอะไมโลสและฟอสฟอรัสสูงกว่าแป้งจากธัญพืชอื่นๆ

#### 4. โปรตีน (Protein)

โปรตีนที่สกัดได้จากเมล็ดแป้งแบ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มเช่นเดียวกันคือ เป็นโปรตีนที่จับอยู่ที่ผิวของเมล็ดแป้ง (Surface protein) ซึ่งสกัดออกได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาตินไนซ์ และโปรตีนที่เป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดแป้ง (Integral protein) ซึ่งการสกัดต้องใช้อุณหภูมิใกล้เคียงหรือสูงกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาตินไนซ์มันฝรั่งและมันสำปะหลังมีโปรตีนในปริมาณที่ต่ำ (0.1 %w/w หรือน้อยกว่า) เมื่อเปรียบเทียบกับ แป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวโพดและข้าวสาลี ซึ่งมีปริมาณโปรตีน 0.3-0.5 % (w/w) โปรตีนที่อยู่ในแป้งจะเกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดกลิ่นรสและการเกิดฟองในแป้ง

#### 5. ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

ฟอสฟอรัสในแป้งจากธัญพืชมักพบในรูปของฟอสโฟลิปิด (Lysophospholipid) ในขณะที่แป้งจากรากและหัวมักมีฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำและอยู่ในรูปของฟอสเฟต แป้งมันฝรั่งเป็นแป้งจากหัวที่มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate ester) สูง ปริมาณ Phosphate group ในแป้งมันฝรั่งมีประมาณ 1 group ต่อ 200-400 หน่วยของน้ำตาลกลูโคส (200-800 ppm) โดยหมู่ฟอสเฟตทำให้แป้งมีคุณสมบัติเป็น Polyelectrolyte ทำให้เมล็ดแป้งกระจายตัวในน้ำและฟองตัวได้ดี เนื่องจากโมเลกุลแป้งผลัดกันเอง

#### 6. เถ้าและสารอนินทรีย์อื่นๆ (Ash & Inorganic components)

สารอนินทรีย์อื่นๆ ในแป้ง เช่น  $Ca^{+}$ ,  $K^{+}$ ,  $Mg^{+}$  และ  $Zn^{+}$  พบในปริมาณเล็กน้อย ปริมาณของสารเหล่านี้หาได้จากสิ่งที่เหลือจากการเผาที่อุณหภูมิเฉพาะ แป้งมันฝรั่งมีหมู่ฟอสเฟตในรูปของเกลือที่มีอยู่ในมันฝรั่งเองหรือได้จากกระบวนการล้างน้ำ ปริมาณเถ้าของแป้งมันฝรั่งเท่ากับปริมาณหมู่ฟอสเฟต ปริมาณเถ้าบางส่วนในแป้งธัญพืช คือ ปริมาณฟอสโฟลิปิด ปริมาณเถ้าของแป้งที่ใช้ในทางการค้าโดยทั่วไป คือ สารประกอบโลหะของโซเดียมโปตัสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม

#### 7. ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นของแป้งขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity; RH) ของอากาศขณะที่เก็บผลิตภัณฑ์ ถ้ามีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำแป้งจะมีความชื้นต่ำด้วย ถ้าความชื้นสูงเมล็ดแป้งจะดูดซับน้ำไว้มาก ปริมาณความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ของแป้งขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง ภายใต้สภาวะอากาศปกติแป้งโดยทั่วไปจะมีความชื้น 10-20 % (w/w)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งประกอบด้วยวงแหวน เรียกว่า Growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์หรือ Scanning electron microscopy เม็ดแป้งที่เปียกและสดจะสังเกตเห็น Growth ring ได้ง่าย เม็ดแป้งขนาดใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง แป้งต้นพุทธรักษาที่ผ่านการแช่น้ำจะสังเกตเห็น Growth ring ได้ชัดเจน ในแป้งที่แห้งจะไม่พบ Growth ring สำหรับเม็ดแป้งขนาดเล็ก เช่น แป้งข้าวบาร์เลย์ และแป้งข้าวเจ้าจะสังเกตได้ยากจากการส่องกล้องจุลทรรศน์ แต่สามารถสังเกตเห็นได้เมื่อนำแป้งผ่าน ปฏิกิริยาเคมีหรือย่อยด้วยเอนไซม์และศึกษาด้วย SEM โครงสร้างของ Growth ring แสดงถึงลักษณะ การเจริญของเม็ดแป้งโดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (Hilum) ซึ่งส่วนนี้ ประกอบด้วยส่วน Reducing end ของโมเลกุลแป้ง มีด้าน Non-reducing end ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินแผ่กระจายออกไป จุดเชื่อมกิ่ง (Branch point) ของอะไมโลเพคตินอยู่ในส่วนออสัญฐานและสายอยู่ในส่วนผลึกถ้าส่องด้วยกล้องโพลาไรซ์ (Polarized microscope) จะมองเห็นวงแหวนและไฮลัม เป็นเครื่องหมายกากบาทสีดำชัดเจน (Birefringence หรือ Polarization cross) โดยจุดตัดของ กากบาทจะเป็นตำแหน่งของไฮลัมและบริเวณอื่นจะเห็นเป็นแสงสว่างวาว ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันถึงลักษณะ ที่โมเลกุลของแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ



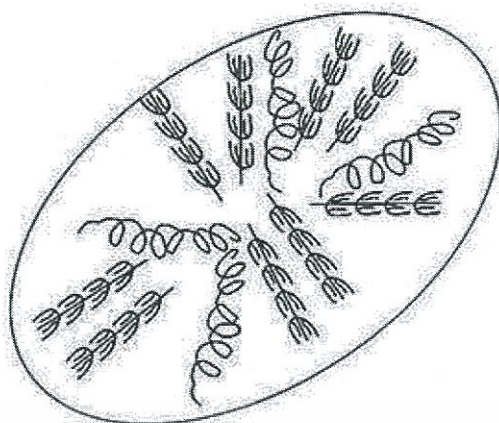
เม็ดแป้ง (starch granule)

รูปที่ 2.6 ลักษณะเม็ดแป้ง [14]

### 2.5.3 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้นๆ เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบ กึ่งผลึก (Semicrystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนที่เป็นอสัญฐาน (Amorphous) โดยโครงสร้างลักษณะภายในเม็ดแป้งแสดงดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

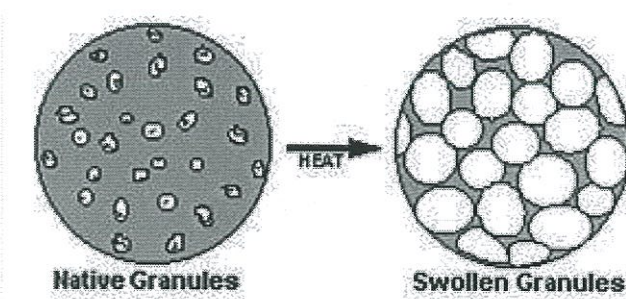


รูปที่ 2.7 ลักษณะภายในเม็ดแป้ง [14]

#### 2.5.4 สมบัติของแป้ง

##### 1. การพองตัวและการละลาย (Swelling and Solubility)

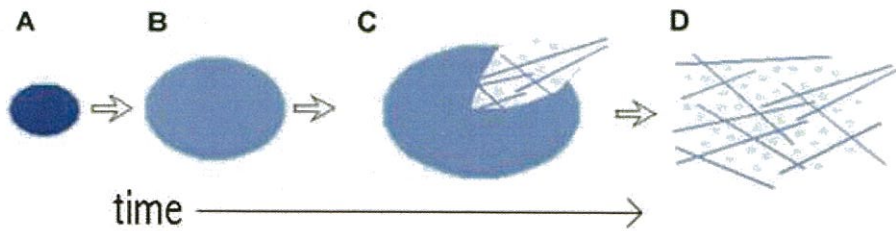
แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณ 25-30% และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน (Intermixed) ภายในเม็ดแป้ง ในส่วน Crystallite โมเลกุลอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ช่วยป้องกันการกระจายตัวและทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนของ Amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่เกาะเกี่ยวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็นเมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 °C ขึ้นไป ส่วน Amorphous จับกับน้ำได้มากขึ้นและการจับกันของโมเลกุลในส่วน Crystallite เริ่มคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลส่วนที่เริ่มคลายตัวออกจากกันจับกับน้ำ ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น โมเลกุลในส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่เกิดสภาพคล้ายร่างแหเรียกว่า Micelle network ซึ่งยึดเหนี่ยวกันไว้ทำให้เม็ดแป้งยังคงสภาพอยู่ได้แต่อาจมีโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินซึ่งมีขนาดเล็กและอิสระกระจายตัวออกจากเม็ดแป้ง เมื่อทำให้อุณหภูมิน้ำแป้งสูงขึ้นไปอีก ส่วน Crystallite ที่เหลืออยู่นี้จะคลายตัวออกทำให้เม็ดแป้งพองมากขึ้นและโมเลกุลแป้งอยู่ในสภาพสารละลายมากขึ้น



รูปที่ 2.8 การพองตัวของเม็ดแป้ง [14]

## 2. การเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization)

เมื่อนำแป้งใส่น้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซับน้ำได้ในปริมาณจำกัดปริมาณหนึ่ง แต่จะยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้จำกัดมากและสังเกตได้ยาก สังเกตการณ์พองตัวของเม็ดแป้งสาธิตในน้ำที่อุณหภูมิห้องพบว่าแป้งที่พองตัวมีเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้น 10% และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและคุณสมบัติดั้งเดิม ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนที่เป็น Crystallite จับตัวกันอย่างหนาแน่นแข็งแรงจึงไม่ละลายในน้ำเย็น แต่น้ำอาจจะซึมเข้าไปในส่วนของเม็ดแป้งซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระได้บ้าง แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75 °C หรือใช้สารเคมี เช่น ให้ความร้อน 60 °C แก่แป้งสาธิตจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วน Crystallite สดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้งซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาตินในเซชัน” ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่สำคัญขึ้นคือ มีการพองตัวของเม็ดแป้งและเครื่องหมายกากบาท (Maltese cross) ภายในเม็ดแป้งหายไป อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างส่วน Crystallite ที่แตกต่างกัน ทั้งระดับการจับกัน (Degree of association) และความสม่าเสมอของการเกิดเจลาตินในซีไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันก็ตาม อาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันที่ห่างกันถึง 8-10 °C โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาตินในซีได้ก่อนขนาดเล็ก แต่เมื่อใช้ SEM ส่องดูโครงสร้างของเม็ดแป้งข้าวบาร์เลย์ซึ่งมีเม็ดแป้งขนาดเล็กอยู่ประมาณ 30% พบว่าการสูญเสียเครื่องหมายกากบาทจะเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน แป้งอาจเกิดเจลาตินในซีได้ที่อุณหภูมิ 25 °C โดยการละลายใน Solvent เช่น Alkali, Liquid ammonia, DMSO, aq. CaCl<sub>2</sub>



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [14]

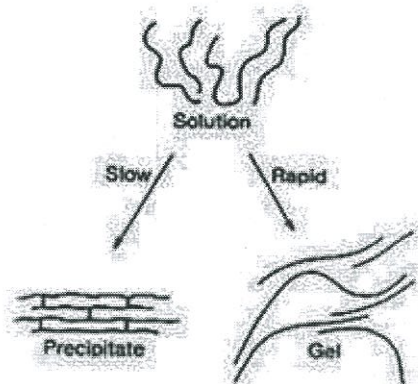
### ลำดับการเปลี่ยนแปลงเป็นดังนี้

1. เริ่มมีการพองตัวในส่วนที่เป็นระเบียบน้อยที่สุดคือในส่วน Amorphous
2. การพองตัวจะทำให้เกิด Tension ต่อ Crystallites ที่อยู่ข้างเคียงทำให้โครงสร้างเสียหาย
3. การให้ความร้อนต่อไปจะเกิด Uncoiling หรือการแตกตัวของ Double helical region เกิดการแตกตัวของโครงสร้างผลึก Side chain ของอะไมโลเพคตินที่แยกตัวออกมาจะถูก hydrate และมีการพองตัวไปในแนวรอบๆ ดังนั้นจะเกิด Stress ต่อโครงสร้างผลึกที่ยังเหลืออยู่
4. การเกิด Hydration ต่อไปจะเพิ่ม Mobility ของโมเลกุลทำให้เกิดการกระจายตัวของโมเลกุล
5. โมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกมาจาก Swollen granule
6. การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้ Granule แตกออกมากขึ้นจนในที่สุดได้เป็นสารละลาย

### 3. การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาทีไนเซชัน แล้วให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วจะเกิดการแตกออกของโมเลกุลของอะไมโลส ขนาดเล็ก ซึ่งจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลของอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแห 3 มิติ โครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีกมีความหนืดคงตัวมากขึ้นเกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึกเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “รีโทรเกรเดชัน” (Retrogradation) หรือการคืนตัว หรือ Setback เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงอีกลักษณะการจัดเรียงของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า “Syneresis” ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การคืนตัวของแป้ง [14]

การคืนตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากราก หัว มีอัตราการคืนตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากรากหรือหัวเมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยกที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ทำให้เกิดสภาพเป็น Matrix ซึ่งยึดอยู่ด้วยกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ การมีอะไมโลเพคตินอยู่ด้วยทำให้อัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงชันลง เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีกิ่งก้านสาขาทำให้เกาะกะ ยกที่โมเลกุลจะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ได้ จึงพบว่าแป้งประเภท waxy มีอัตราการคืนตัวของน้ำแป้งสูงน้อยกว่าแป้งชนิดอื่น ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคืนตัวของน้ำแป้งสูงด้วย โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่งมีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน [14]

### 2.5.5 แป้งท้าวายม่อม

แป้งท้าวายม่อมเป็นแป้งที่ทำมาจากหัวท้าวายม่อม (*Tacca leontopetaloides*) ซึ่งเก็บหัวได้ปีละครั้ง จึงทำให้เป็นแป้งที่มีราคาแพง ลักษณะแป้งเป็นเม็ดเล็กๆหยาบๆสีขาวลักษณะของแป้งจะหนัก มีเม็ดแป้งปนอยู่บ้าง ไม่นุ่มละเอียดเหมือนแป้งมัน ลักษณะของแป้งเมื่อทำให้สุกโดนการกวนกับน้ำด้วยไฟอ่อนปานกลาง แป้งละลายง่าย สุกง่าย เมื่อสุกจะเริ่มใส มีเงาในเนื้อแป้งเหนียวปานกลาง เมื่อเย็นแล้วแป้งรวมตัวกันเป็นก้อน ล่อนออกจากภาชนะได้ เมื่อต้องการนำมาทำอาหารจะต้องบดให้ละเอียดเป็นผงเสียก่อนด้วยครก โดยใช้สากคลึงๆ หากไม่บดเมื่อนำมาปรุงรสนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาหารจะเป็นเม็ดได้อยู่ในอาหาร เมื่อนำไปประกอบอาหารจะให้ความชื้นเหนียวนุ่มและใสวาว เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นจะเหนียวกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด (จึงใช้ในปริมาณไม่มากเท่ากับแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพด)

### 1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ชื่อสามัญ East Indian arrow root

เป็นไม้ล้มลุกอายุหลายปี มีหัวลักษณะกลมแบน หรือ รี อยู่ใต้ดิน ในฤดูฝนจะออกงามดีแต่จะโถมลงในฤดูหนาว ต้นสูงประมาณ 80 เซนติเมตร ก้านใบออกตรงขึ้นจากหัว มีจำนวน 1-3 ก้าน ใบเป็นใบเดี่ยวออกที่ปลายก้าน สีเขียวอ่อน มีจุดประสีขาวหรือสีม่วงดำ ออกดอกคราวละ 1-2 ช่อ แต่ละช่อ 10-20 ดอก ใต้วงกลุ่มดอกมีกลีบรองดอกใหญ่และกลีบรองดอกย่อยรองรับ ดอกสีเหลืองอ่อน เหลืองแกมเขียว หรือเขียวแกมม่วงดำ ที่ช่อดอกสายยาว สายนี้จะติดอยู่จนผลแก่ ผลสีเขียว สุกสีเหลือง

ท้าวายม่อมมีการกระจายพันธุ์กว้างตั้งแต่แอฟริกา เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ หมู่เกาะแปซิฟิก จนถึงออสเตรเลีย ในไทยพบกระจายตัวต่างๆเคยมีการสำรวจ พบอยู่ค่อนข้างหนาแน่นในป่าบริเวณชายฝั่งภาคตะวันออกและภาคใต้และพบอย่างกระจัดกระจายในป่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นพืชล้มลุกเจริญเติบโตได้ดี ในสภาพร่มเงาใต้ต้นไม้ในป่าโปร่งที่เป็นดินทรายหรือดินร่วนทราย การขยายพันธุ์ด้วยเมล็ดหรือการแยกหัวต้น ท้าวายม่อมชาวจังหวัดระยองรู้จักกันในชื่อต้นนางนวล

ประโยชน์หัวท้าวายม่อม สามารถนำมาทำเป็นแป้งที่เป็นอาหารเรียกว่า แป้งท้าวายม่อมซึ่งได้จากหัว ถ้านำแป้งมากวนกับน้ำตาลกรวด เป็นอาหารบำรุงคนป่วยและคนชรา แก้อ่อนเพลียเบื่ออาหาร ทำให้เกิดกำลังชุ่มชื่นใจ ขนบางชนิดใช้แป้งท้าวายม่อมเป็นส่วนผสมเพื่อให้ตัวเนื้อขนมนุ่มนวลเพิ่มขึ้น

### 2. สมบัติแป้งท้าวายม่อม

มีลักษณะใส ความหนืดสูง ความทนทานต่อแรงเฉือนและความร้อนต่ำ มีความเปราะเล็กน้อย มีปริมาณคาร์โบไฮเดรต เท่ากับ 99% โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณอะไมโลส 24.53% และมีไขมัน เล็ก เส้นใย ฟอสฟอรัส และโปรตีนน้อยมาก มีการพองตัวปานกลาง มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีนเซชัน เท่ากับ 72.25 องศาเซลเซียส แป้งเปียกที่มีความเข้มข้นสูงจะมีเสถียรภาพของความหนืดต่ำกว่าแป้งเปียกความเข้มข้นต่ำ การเกิดรีโทรเกรเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บนาน 7 วัน และเมื่อเก็บไว้นานขึ้น (14 วัน) จะมีการเกิดรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ การเก็บที่ -20 องศาเซลเซียส ช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันได้ และมีการไหลแบบ Pseudoplastic

สมบัติที่แตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดคือ เมื่อนำมาอุ่นจะมีความเข้มข้น และไม่คืนตัว สามารถนำมาใช้ประกอบอาหารและทำขนมได้หลายชนิด ได้แก่ ขนมชั้น ขนมเปียกปูน ขนมขอม่วง ขนมกล้วย ข้าวเหนียวปากหม้อ เป็นต้น

วิธีการผลิตแบ่งจากหัวท้าวายม่อม มีขั้นตอนต่างๆดังนี้

1.ล้างหัวให้สะอาดปลอกเปลือก

2.นำมาย่อยสลายให้ได้แบ่งโดยน้ำสะอาดโดยมีวิธี 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 เอาหัวฝนบนแผ่นสังกะสีที่เจาะรูด้วยตะปูใช้ภาชนะ เช่น โองหรือ ถังพลาสติกใส่น้ำรอรับส่วนที่ฝนได้ไว้

วิธีที่ 2 นำเอาหัวสับย่อยให้เป็นชิ้นเล็กแล้วใส่เครื่องปั่นผลไม้เติมน้ำเล็กน้อย แล้วปั่น

3. เอาส่วนที่ได้จากข้อที่.2 มาเติมน้ำคนให้เข้ากันแล้วกรองด้วยผ้าขาวบาง เอาส่วนที่เป็นกากทิ้งไปแช่ส่วนที่กรองไว้ในภาชนะเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แบ่งจะตกตะกอนอยู่ ก้นภาชนะเมื่อครบ 3 ชั่วโมงเทน้ำทิ้งเติมน้ำลงแบ่งที่ตกตะกอนคนให้เข้ากันแล้วกรองอีกครั้ง แล้วเอาส่วนกากทิ้งไปแช่ส่วนที่กรองได้ครั้งที่ 2 นี้อีกจนครบ 3 ชั่วโมง จากนั้นเทน้ำทิ้งเอา แบ่งที่ตกตะกอนอยู่ก้นภาชนะ ออกมาตากแดดให้แห้งจะได้แบ่งขาวสะอาด โดย หัวท้าวายม่อม 5 กิโลกรัม จะได้แบ่งปริมาณประมาณ 1 กิโลกรัม [15]

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของแบ่งท้าวายม่อม [15]

องค์ประกอบ	ร้อยละ
ความชื้น	0.2
คาร์โบไฮเดรต	99.36
โปรตีน	0.05
ไขมัน	0.03
เถ้า	0.15
อะไมโลส	17.34
อะไมโลเพคติน	83.66
อื่นๆ	0.50

## 2.6 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers)

พลาสติไซเซอร์ เป็นสารเติมแต่งที่ผสมในพลาสติกเพื่อเพิ่มความนิ่ม ความสามารถในการยืด และความยืดหยุ่นแก่ชิ้นงาน พลาสติไซเซอร์ที่เติมจะช่วยให้แรงดึงดูระหว่างโซ่พอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากตัวมันเองจะเกิดพันธะกับโซ่พอลิเมอร์โดยพันธะไฮโดรเจนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ นอกจากนั้น จะช่วยให้โซ่พอลิเมอร์อยู่ห่างกันขึ้นทำให้การพันกันระหว่างโซ่พอลิเมอร์ลดลง ทำให้โซ่พอลิเมอร์เป็นอิสระ สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันและกันเพิ่มขึ้น

พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติแข็ง เปราะ ไม่อ่อนตัว และแตกหักได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำจึง ทำให้ไม่เหมาะกับการใช้งานบางอย่างจนกว่าจะมีการทำให้พอลิเมอร์นั้นมีความอ่อนตัวเสียก่อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการการเพิ่มความอ่อนตัวให้กับพอลิเมอร์นั้นเรียกว่าพลาสติกไซเซชัน (Plasticization) และสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเพื่อเพิ่มความอ่อนตัวนี้เรียกว่าพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ซึ่งพลาสติกไซเซอร์จะเพิ่มความอ่อนตัว ความสามารถในการหักงอได้ (Flexibility) และความสามารถในการยืดออก (Extensibility or Strerchability) ของพอลิ-เมอร์ โดยการทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้องนอกจากนี้พลาสติกไซเซอร์ยังช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก และลดความหนืดของพอลิเมอร์ไหลอมเหลว ทำให้กระบวนการขึ้นรูปง่ายขึ้น [16]

### 2.6.1 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล (Glycerol) หรือ กลีเซอริน (Glycerin) เป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มของโพลีไฮดริคแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง ถือเป็นสารชนิดเดียวกันสำหรับเป็นสารตั้งต้นสำคัญในอุตสาหกรรมต่างๆ อาทิ การผลิตสบู่ การผลิตยา การผลิต ถูกค้นพบครั้งแรก เมื่อปี ค.ศ. 1779 โดยนักเคมีชาวสวีเดน ชื่อ Carl W. Scheele จากการทดลองปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันในการสกัดน้ำมันมะกอก กลีเซอรอล มาจากคำว่า glykys แปลว่า “หวาน” โดยในระยะแรกมีการใช้ประโยชน์สำหรับเป็นส่วนผสมของกาว ทำให้กาวมีความเหนียวมากขึ้น รวมถึงส่วนผสมของสีย้อม และน้ำหมึก

#### 1.คุณลักษณะเฉพาะของกลีเซอรอล

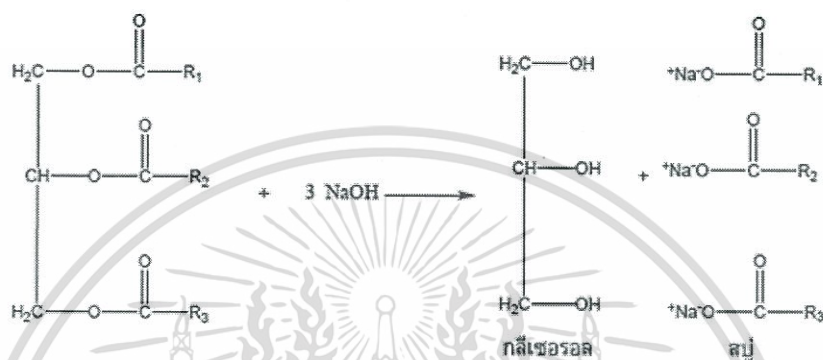
- มีสถานะปกติเป็นของเหลวขุ่น ไม่มีสี มีรสหวาน
- สูตรทางเคมี  $C_3H_8O_3$
- มวลอะตอม 92.09382 กรัม/โมล
- ความหนาแน่น 1.261 กรัม/ลบ.ซม.
- จุดหลอมเหลว 18 องศาเซลเซียส
- จุดเดือด 290 องศาเซลเซียส
- ความหนืด 1.2 pa-s
- แรงตึงผิว (20 องศาเซลเซียส) 63.4 มิลลินิวตัน/เมตร
- จุดวาบไฟ (ระบบเปิด) 177 องศาเซลเซียส
- จุดติดไฟ 204 องศาเซลเซียส
- ละลายได้ในน้ำ และแอลกอฮอล์ ไม่ละลายในเบนซีน อีเทอร์ และน้ำมัน

#### 2.กระบวนการผลิต

1. กลีเซอรอล สามารถผลิตได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิสของน้ำมันจากพืช และไขมันจากสัตว์ โดยมีกรดหรือเบสเจือจางเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดเป็นกลีเซอรอลกับกรดไขมัน

2. กลีเซอรอล ยังสามารถผลิตได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ที่ถือเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสะaponนิฟิเคชัน ได้สบู่ แอลกอฮอล์ และน้ำผสมรวมอยู่ ซึ่งการผลิตไบโอดีเซลทุกๆ 9 กิโลกรัม จะเกิดกลีเซอรอลประมาณ 1 กิโลกรัม เสมอ

3. การผลิตที่ได้จากกระบวนการการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันได้เมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอริน [17]



รูปที่ 2.11 กลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการสะaponนิฟิเคชัน [17]

## 2.7 สารหล่อลื่น (Lubricants)

สารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นสารที่เติมลงไปในพอลิเมอร์เพื่อช่วยในการขึ้นรูปโดยการปรับปรุงสมบัติของการไหลและช่วยลดปัญหาการติดของพอลิเมอร์กับชิ้นส่วนของเครื่องจักร แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. สารหล่อลื่นภายใน (Internal mixer) ทำหน้าที่ช่วยในการไหลและลดความหนืด
2. สารหล่อลื่นภายนอก (External mixer) ทำหน้าที่ช่วยให้พลาสติกหลุดจากผิวโลหะที่ร้อน

ได้ดีและหน่วงเหนี่ยวการหลอม

การเลือกใช้สารหล่อลื่น

1. ไม่ระเหยง่ายหรือให้ควันที่อุณหภูมิของการขึ้นรูป
2. ไม่ทำให้ชิ้นงานที่เสถียรภาพทางความร้อนลดลง
3. ไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน
4. ไม่ซึมออกระหว่างการเก็บรักษา [18]

### 2.7.1 กรดสเตียริก (Stearic acid)

กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดไขมันชนิดหนึ่งสูตรเคมี คือ C<sub>17</sub>H<sub>35</sub>COOH เป็นผลึกสีขาว ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในแอลกอฮอล์และอีเธอร์ พบในไขมันพืชและสัตว์ ใช้เป็นส่วนประกอบในการทำยาเครื่องสำอางเป็นต้นมีลักษณะเป็นผลึกสีขาวมันเงาลักษณะเฉพาะคือมีกลิ่นหืนของไขมัน กรดสเตียริก เกิดจากการผสมกันของกรดไขมันอิ่มตัวสำคัญ ได้แก่ กรดสเตียริก (Octadecanoic) และกรดปาล์มิติก (Hexadecanoic or Palmitic Acid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2. เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นโดยใช้วัสดุธรรมชาติ ทำปฏิกิริยากับสารเคมีเกิดเป็นสารใหม่ เช่น เซลลูโลสอะซิเตด วิสคอสเรยอง เป็นต้น

3. เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใช้ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ แบ่งเป็น 4 ประเภท

1. เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เช่น เทโทรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะมีความฟู ยืดหยุ่น ไม่เป็นอันตรายต่อผิวหนัง สำหรับตาครอน (Dacron) เป็นเส้นใยสังเคราะห์ พอลิเอสเตอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Mylar มีประโยชน์ทำเส้นใยทำ เชือก และฟิล์ม

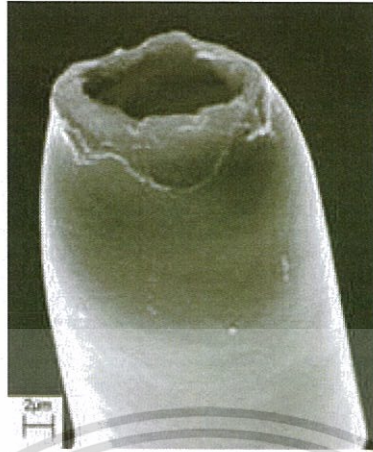
2. เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีหลาย ชนิด เช่น ไนลอน 6, 6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่เขียนกำกับหลังชื่อจะแสดง จำนวนคาร์บอนอะตอมในมอนอเมอร์ของเอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอนจัดเป็น พลาสติกเทอร์โมพลาสติก มีความแข็งมากกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น เป็นสารที่ติดไฟ ยาก (เพราะไนลอนมีพันธะ C-H ในโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น) ไนลอนสามารถทดสอบโดยผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH + Ca(OH)<sub>2</sub>) หรือเผาจะให้ ก๊าซแอมโมเนีย ประโยชน์ของไนลอน ใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีตาร์สายเอ็น ไม้แร็กเก็ต เป็นต้น

3. เส้นใยอะคริลิก เช่น ออร์โซใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ่านวม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคากันแดด ผ้าปูที่นอน พรม เป็นต้น

4. เซลลูโลสแอซิเตด เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำ ปฏิกิริยากับกรดอะซิติกเข้มข้นโดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์ จากเซลลูโลสอะซิเตด เช่น ผลิตเป็นเส้นใยอาร์แนล 60 ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำ แผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ [21]

#### 2.8.2 เส้นใยนุ่น (Kapok fibers)

เส้นใยนุ่น เป็นพืชเส้นใยชนิดหนึ่ง ที่ได้จากผล หรือฝัก มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา มี รูปร่างรี รูปทรงกระบอกกลวง ผนังบาง เรียบและเปราะ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทำเบาะ ที่นอน เป็น ใส่นียัดหมอน ที่นอนเครื่องใช้ต่าง ๆ ทำวัสดุกันกระแทก เป็นฉนวนความร้อน เป็นต้น จะไม่ค่อยใช้ใน อุตสาหกรรมสิ่งทอพวกปั่นด้ายเหมือนกับฝ้าย เพราะฟูและเบามาก ซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าเส้นใยฝ้าย ถึง 5 เท่า เส้นใยไม่มีลักษณะหยิกหรือหยักที่จะช่วยให้กลุ่มเส้นใยจับตัวกันได้ดีเมื่อปั่นหรือปั่นเป็น เส้นด้าย มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1/4 เท่าของน้ำ มีความยาวของเส้นประมาณ 8-30 มิลลิเมตร [4]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเส้นใยนุ่มนวล [22]

### 1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ชื่อสามัญ White silk cotton tree, Ceiba, Kapok, Java cotton, Java kapok, Silk-cotton

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Ceibapentandra* (L.) Gaertn. จัดอยู่ในวงศ์ BOMBACACEAE

ชื่อท้องถิ่น ง้าว ง้าวสาย ง้าวสร้อย ง้วน้อย (ภาคกลาง), งิ้ว (คนเมือง), ปังพัวะ (ม้ง), นุ่น (ไทลื้อ), ต่อเหมาะ (กะเหรี่ยงแดง) เป็นต้น

ต้นนุ่น จัดเป็นไม้ยืนต้นผลัดใบในช่วงฤดูแล้ง ประมาณเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ลำต้นสูงใหญ่เปลาตรง สูงได้ประมาณ 10-30 เมตร ตรงยอดแผ่เป็นพุ่มกว้าง ลำต้นเป็นสีเขียวและมีหนามขึ้นอยู่ทั่วไปบริเวณโคนต้น ขยายพันธุ์ด้วยการเพาะเมล็ด เป็นพรรณไม้กลางแจ้งที่มีถิ่นดั้งเดิมอยู่ในแถบอันดามัน และมีปลูกมากในเขตร้อนทั่วไป เพื่อใช้ปุยจากผลนำมาหมอนและที่นอนชอบขึ้นตามริมลำธาร พบได้ทั่วตามป่าเบญจพรรณ และป่าดิบเขา

ใบนุ่น ใบเป็นใบประกอบแบบนิ้วมือ ออกเรียงสลับ มีใบย่อยประมาณ 5-11 ใบ ก้านใบย่อยยาวประมาณ 0.3-0.5 เซนติเมตร ส่วนก้านใบรวมยาวประมาณ 8-20 เซนติเมตร ลักษณะของใบย่อยเป็นรูปขอบขนานแกมใบหอกหรือรูปหอกเรียวแหลม ปลายใบและโคนใบเรียวแหลม ส่วนขอบใบเรียบ ใบมีขนาดกว้างประมาณ 1-1.5 นิ้ว และยาวประมาณ 2-5 นิ้ว แผ่นใบเป็นสีเขียว ก้านใบและเส้นก้านใบเป็นสีแดงอมน้ำตาล



รูปที่ 2.14 ต้นนุ่น และใบนุ่น [22]

ดอกนุ่น ออกดอกเป็นช่อกระจกระจบริเวณซอกใบ ขนาดประมาณ 2-3.5 เซนติเมตร ดอกย่อยมีจำนวนมาก หรือช่อหนึ่งมีดอกประมาณ 1-5 ดอก ลักษณะของดอกเป็นรูปถ้วย ปลายดอกแยกออกเป็นกลีบ 5 กลีบ ยาวประมาณ 1-1.5 นิ้ว กลีบดอกเป็นสีขาวแกมเหลือง กลีบดอกติดกันที่ฐาน กลีบด้านนอกเป็นสีขาวนวลและมีขน ส่วนด้านในกลีบเป็นสีเหลือง กลางดอกมีเกสรเพศผู้ประมาณ 5-6 อัน ก้านเกสรเพศเมียไม่แยก ออกดอกในช่วงประมาณ เดือนมกราคมถึงเดือนมีนาคม

ผลนุ่น ลักษณะของผลเป็นรูปยาวรี ปลายและโคนผลแหลม เปลือกแข็ง ผลมีขนาด กว้างประมาณ 2 นิ้ว และยาวประมาณ 4-5 นิ้ว เมื่อแห้งจะแตกออกได้เป็น 5 พู ภายในผล จะมีนุ่นสีขาวเป็นปุ๋ยอยู่ และมีเมล็ดจำนวนมาก

เมล็ดนุ่น เมล็ดเป็นสีดำ เมล็ดมีเส้นใยสีขาวคล้ายเส้นไหมยาวหุ้มเมล็ดเป็นปุ๋ยนุ่น อยู่



รูปที่ 2.15 ดอกนุ่น ผลนุ่น และเมล็ดนุ่น [23]

## 2. ประโยชน์ของนุ่น

ประโยชน์ของนุ่น มีดังต่อไปนี้

1. ฝักที่ยังอ่อนมากๆ เนื้อในผลยังไม่เป็นปุ๋ยนุ่น ใช้เป็นอาหารได้ โดยนำมา รับประทานสดๆ หรือใส่ในแกง

2. เมล็ดใช้สกัดทำเป็นน้ำมันพืช ส่วนกากที่เหลือจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบใน อุตสาหกรรมอาหาร สัตว์

3. ใสนุ่นสามารถนำมาใช้เพาะเห็ดฟางได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ขนที่ติดอยู่ที่เมล็ด เรียกว่า นุ่น หรือ เส้นใยนุ่น สามารถนำมาใช้ยัดหมอน พูก และที่นอนได้

5. เนื้อไม้ใช้ทำกระสวยทอผ้า เยื่อกระดาษ สันรองเท้า และนำมาบดทำไส้ในไม้อัด

6. นิยมนำมาปลูกเป็นพืชสวนเพื่อเก็บผลมาใช้ประโยชน์ [23]

### 3. สมบัติของเส้นใยนุ่น

สมบัติของเส้นใยนุ่น มีดังต่อไปนี้

1. มีน้ำหนักเบากว่าเส้นใยฝ้ายถึง 5 เท่า

2. เป็นวัสดุที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

3. ไม่ก่อให้เกิดอาการภูมิแพ้ ปราศจากกลิ่น

4. ลอยน้ำได้ และมีแรงต้านน้ำถึง 30 เท่าต่อน้ำหนักจริงของตัววัสดุ (หรือประมาณ 5 เท่าของแรงติดตัวในน้ำเมื่อเทียบกับวัสดุไม้ก๊อก) จึงใช้ยัดทำเป็น เสื้อชูชีพ ทำให้ผู้สวมลอยตัวอยู่ในน้ำได้

5. เป็นฉนวนควบคุมอุณหภูมิได้ดีเยี่ยม

6. ไม่ดูดน้ำแต่สามารถซึมซับคราบน้ำมันได้เป็นอย่างดี

7. ไวไฟเผาไหม้ได้เร็วมาก จึงใช้ทำชนวนระเบิดทางด้านยุทธปัจจัย [24]

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร และคณะ ศึกษาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเอทิลีนโดยมีเส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรงซึ่งทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) โดยการใช้แป้งข้าวเจ้ามาเป็นส่วนผสมหลัก ใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วนผสมกลีเซอรอลกับแป้งเป็น 1:1 ทำการเตรียมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer) จากนั้นนำไปผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิและความเร็วรอบ 170 องศาเซลเซียส และ 40 รอบต่อนาที แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และเติมสารช่วยผสมมาลิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนและไวนิลไตรเมทอกซีไซเลน พบว่า มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลดีกว่าการใช้ไวนิลไตรเมทอกซีไซเลนแต่การใช้มาลิกแอนไฮไดรด์กราฟท์พอลิเอทิลีนและไวนิลไตรเมทอกซีไซเลนทำให้การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มลดลง [25]

วัลลดา หวานเสนาะ ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเส้นใยฝ้าย เส้นใยตาล เส้นใยไหม เส้นใยพอลิเอสเทอร์ และเส้นใยไพลอน พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใย โดยที่ปริมาณ เส้นใย 10% ของน้ำหนักแป้งให้สมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนการดูดซับความชื้นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการดูดซับความชื้นลดลง และเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับเมทริกซ์แบ่งได้ นอกจากนี้พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนมีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดิน เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเส้นใยชนิดต่าง ๆ และจากการศึกษานี้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีสมบัติโดยรวมดีที่สุด คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย [26]

สุภารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน และคณะ ได้ศึกษาผลของปริมาณและขนาดของเส้นใยเซลลูโลสต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วน 65 : 35 เส้นใยเซลลูโลสได้แก่เส้นใยปอและเส้นใยนุ่น โดยใช้ในอัตราส่วน 0, 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนักของแป้งและกลีเซอรอล โดยเริ่มจากการเตรียมแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอลและผสมเส้นใยต่างๆ ด้วยเครื่องผสมระบบปิดแล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป เมื่อทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นจากการเติมเส้นใยเซลลูโลส อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมปริมาณเส้นใยปอ แต่มีแนวโน้มอุณหภูมิการสลายตัวลดลงเมื่อเติมปริมาณเส้นใยนุ่น การดูดน้ำพบว่าเมื่อผสมเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังมีค่าการดูดซับน้ำลดลง [27]

วรวรรณ พัฒนสิน ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch , TPS) โดยการใช้แป้งมันสำปะหลังมาเป็นส่วนผสมหลักใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วนผสมแป้งกับกลีเซอรอลเป็น 65 : 35 สมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคติน ไคโตซาน และเส้นใยฝ้าย ในปริมาณต่างๆ และได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยเพคติน และเส้นใยฝ้าย, ไคโตซานและเส้นใยฝ้าย และเพคตินผสมไคโตซานและเส้นใยฝ้าย การผสมแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอล ทำด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) แล้วนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) จากการศึกษาหามุ่ฟังก์ชันพบพีคใหม่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ  $1720\text{ cm}^{-1}$  และ  $1550\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงการใส่เพคติน และไคโตซานเข้าไปในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชตามลำดับ จากการศึกษาสมบัติการดูดน้ำพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยไคโตซานและเส้นใยฝ้าย ดูดซับน้ำได้น้อยที่สุด จากการศึกษาสัณฐานวิทยา (SEM) พบว่า เพคติน ไคโตซานและเส้นใยฝ้ายสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเพคตินและเส้นใยฝ้าย ให้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกสูตร [7]

จุฑารัตน์ ปรัชญาวารการ และคณะ ทำการศึกษาผลของคาราจีแนน (Carrageenan) ต่อเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) จากแป้งมันสำปะหลังกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยมีการเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น และมีกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ โดยนำมาผสมโดยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำไปขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) โดยใช้ความดันและความเร็วรอบในการฉีดขึ้นรูป เป็น 30 บาร์และ 50 รอบต่อ นาที ตามลำดับ และใช้อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปอยู่ในช่วง 150 – 170 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของ การผสมของเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ต่อเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เป็น 1 ต่อ 1 และเติมสารช่วยผสม มาลิกแอคไฮไดรด์ กราฟท์พอลิเอทิลีนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ และ มีการใส่คาร์ราจีแนนร้อยละ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยน้ำหนักตามลำดับ และใส่เส้นใยนุ่นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในทุกสูตร พบว่า ชิ้นงานมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดเมื่อใส่ คาร์ราจีแนนที่ร้อยละ 10 ต่อน้ำหนัก และ/หรือ เส้นใยนุ่น โดยมีค่าความเค้นสูงสุดและโมดูลัสของยัง (Young's modulus) เท่ากับร้อยละ 27.5 และ 320 ตามลำดับ ชิ้นงานมีการย่อยสลายที่ติมากขึ้นและร้อยละการดูดซับน้ำ ของชิ้นงานไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใส่คาร์ราจีแนน หรือเส้นใยนุ่น [28]

แก้วตา แก้วตาทิพย์ และคณะ ทำการศึกษาผลของลิกนินและลิกนินที่ผ่านกระบวนการ เอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ที่ส่งผลต่อเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ (Thermoplastic starch, TPS) จากแป้งมันสำปะหลัง และมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ มีการใส่ลิกนินและลิกนินที่ผ่าน กระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ผลการทดลองพบว่า เมื่อใส่ลิกนินหรือลิกนินที่ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชันแล้วมีสมบัติเชิงกลที่ติมากกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาซซ์เพียงอย่างเดียว โดยค่าความแข็งแรงดึงของชิ้นงานที่ใส่ลิกนินและลิกนินที่ ผ่านกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชัน มีค่ามากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์จากแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 17 และ 32 ตามลำดับ และชิ้นงานเมื่อมีการเติมลิกนินและลิกนินที่ผ่านกระบวนการ เอสเทอร์ริฟิเคชัน มีการดูดน้ำลดลงจากเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ที่มีร้อยละการดูดน้ำเท่ากับ 23.81 เป็นร้อยละ 18.60 และ 14.30 ตามลำดับ[29]

Y. Zhang. และคณะ ทำการศึกษาผลของหมู่คาร์บอนิลต่อออกซิไดส์เทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ (Oxidized thermoplastic starch) จากแป้งข้าวโพด และมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ จากการ เตรียมชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานมีองค์ประกอบของหมู่คาร์บอนิลเท่ากับร้อยละ 17.6, 38.5, 49.3 และ 55.4 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ชิ้นงานมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะที่สูงขึ้น ตามองค์ประกอบของ หมู่คาร์บอนิลที่เพิ่มมากขึ้น และค่าการดูดความชื้นของชิ้นงานที่มีองค์ประกอบของหมู่คาร์บอนิล ร้อยละ 38.5 มีค่าต่ำที่สุด คือ ร้อยละ 19.8 เมื่อเทียบกับเทอร์โมพลาสติกจากแป้งข้าวโพดซึ่งมีค่าการ ดูดความชื้นเท่ากับร้อยละ 30.7 เนื่องจากแป้งออกซิไดส์มีความชอบน้ำที่ลดลงทำให้มีสมบัติ การดูดซับน้ำลดลง [30]

ปัญญาญ์ สุขการ และคณะ ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้จาก แป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเพคตินและเส้นใยนุ่น จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า เพคตินและ เส้นใยนุ่นสามารถกระจายตัวและเข้ากันได้ดีกับเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ นอกจากนี้สมบัติเชิงกลที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเผยแพร่เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 30% และเส้นใยถั่ว 20% โดยน้ำหนัก สมบัติการดูดน้ำพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยถั่ว 20% โดยน้ำหนัก มีสมบัติการดูดซับน้ำต่ำที่สุด จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยถั่วมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยถั่ว และการย่อยสลายตัวโดยการฝังดิน พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ปรับปรุงด้วยเพคติน 30% โดยน้ำหนัก ย่อยสลายได้เร็วที่สุด [6]

ยศธร ธเนศรุ่งโรจน์ ศึกษาอิทธิพลของชนิดแป้งที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งชนิดต่างๆ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งถั่วเขียว แป้งข้าวเหนียวและแป้งท้าวยายม่อม ใช้เครื่องผสมแบบปิดและขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) นอกจากนี้ยังศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างปริมาณแป้งของ TPS จากแป้งแต่ละชนิดกับ LDPE พบว่า เมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงจากการทดสอบเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แต่ส่งผลทำให้พีคช่วง O-H stretching ของ TPS มีความเข้มเพิ่มขึ้น การดูดซับน้ำสูงขึ้น สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น สำหรับสมบัติเชิงกล พบว่า เปอร์เซ็นต์การดึงยืดและความแข็งแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณ TPS ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่าเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้นพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มการย่อยสลายด้วยการฝังดินเร็วขึ้น แต่ทำให้ค่าดัชนีการไหล ค่าความสว่างจากการวัดสี และอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนของ LDPE ลดลงเมื่อปริมาณ TPS เพิ่มขึ้น จากงานวิจัยพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งถั่วเขียวและ LDPE แสดงสมบัติโดยรวมดีที่สุดในเชิงพิจารณาจากผลการทดสอบการดูดซับน้ำ สมบัติเชิงกล สมบัติการไหล และสมบัติการย่อยสลาย [31]

ปิสิพร ฤทธิเรืองเดช และคณะ ทำการศึกษาพฤติกรรมด้านความเหนียวและสมบัติทางกลของแป้งท้าวยายม่อม พบว่าแป้งท้าวยายม่อมให้ค่าความเหนียวสูงสุดสูงที่สุดเท่ากับ 322 RVU ที่ 95 องศาเซลเซียส ในขณะที่แป้งทำให้ค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 181 RVU และจากการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลโดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความเค้น และความเครียดที่ได้จากการวัดค่าแรงกด พบว่า เจลแป้งท้าวยายม่อมคล้ายกับเจลแป้งมันสำปะหลังและเจลแป้งข้าว แต่ให้ลักษณะที่แตกต่างกับเจลแป้งข้าวเจ้า เจลแป้งท้าวยายม่อมให้ค่า Young's Modulus ที่ช่วงค่าความเค้นน้อยกว่า 0.2 มีค่าเท่ากับ 3.768 KPa ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าเจลแป้งท้าวยายม่อมที่จำหน่ายตามท้องตลาด เจลแป้งมันสำปะหลัง และเจลแป้งข้าว ซึ่งมีค่า Young's Modulus เท่ากับ 2.318, 1.475 และ 2.257 KPa ตามลำดับ แต่จะมีค่าน้อยกว่าเจลแป้งข้าวเจ้า ซึ่งให้ค่า Young's Modulus เท่ากับ 9.885 KPa สำหรับการเปรียบเทียบค่าความเครียด ณ ค่าความเค้นที่แตกต่างกัน คือ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ของเจลแป้งท้าวยายม่อมที่ผลิตได้กับแป้งชนิดอื่นจะให้ผลเป็นไปในทางเดียวกับค่า Young's Modulus นั้นแสดงว่าเจลแป้งท้าวยายม่อมมีลักษณะเจลที่แข็งกว่าเจลแป้งมันสำปะหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเจลแบ่งเท้า ในขณะที่เจลแบ่งข้าวเจ้ามีลักษณะเจลที่แข็ง และมีแนวโน้มแตกเปราะที่ระยะทางกดสูงๆ [32]

V. Schmidt และคณะ ทำการศึกษาการปรับปรุงการซึมผ่านของไอน้ำโดยเติมสารจำพวกไขมัน เช่น กรดสเตียริกในฟิล์มที่ทำจากแป้ง เตรียมฟิล์มแบ่งโดยใช้เทคนิคการเทหล่อ จากนั้นเติมกรดสเตียริกเพื่อลดการซึมผ่านของไอน้ำ และกลีเซอรอลในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ กรดสเตียริก 3.76-12.24 กรัมต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 กรัม และกลีเซอรอล 21.76-30.24 กรัมต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 กรัม จากนั้นศึกษาสมบัติเชิงกล และการซึมผ่านของไอน้ำพบว่า ฟิล์มแบ่งที่มีกรดสเตียริก 4 กรัม และกลีเซอรอล 24 กรัมต่อน้ำหนักแป้งแห้ง 100 กรัม มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น รวมถึงการซึมผ่านของไอน้ำลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์มแบ่งที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง โดยฟิล์มแบ่งมีความแข็งแรงดึง 10.4 MPa ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด 6% รับแรงกดทะลุได้ 5 N เสียรูปร่างที่แรงกดทะลุ 5.5% ค่าความสามารถในการละลายน้ำ 25% และค่าการซึมผ่านของไอน้ำ  $1.93 \times 10^{-7}$  gm/m<sup>2</sup> [33]

M. Chiumarelli และคณะ ทำการศึกษาการพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มเคลือบที่สามารถรับประทานได้ 4 สูตรซึ่งประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล คาร์นูบา แร็กซ์ และกรดสเตียริก ในปริมาณที่แตกต่างกัน เพื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ อัตราการหายใจเมื่อห่อหุ้มแอปเปิ้ลที่หั่นแล้ว ความหนาแน่นพื้นผิว ความสามารถในการละลาย สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และลักษณะโครงสร้าง พบว่าเมื่อมีปริมาณคาร์นูบา แร็กซ์สูง และปริมาณกลีเซอรอลต่ำ ส่งผลให้ได้ฟิล์มเคลือบคุณภาพต่ำ มีลักษณะแข็ง และต้านทานการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำต่ำ ในขณะที่สูตรที่ประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง 3%โดยน้ำหนัก กลีเซอรอล 1.5% โดยน้ำหนัก คาร์นูบา แร็กซ์ 0.2%โดยน้ำหนัก และ กรดสเตียริก 0.8%โดยน้ำหนัก พบว่าฟิล์มเคลือบที่ได้มีสมบัติต้านทานการซึมผ่านได้ดี สมบัติเชิงกลดี สมบัติทางความร้อนดี สมบัติทางกายภาพดี และมีโครงสร้างที่ดี เหมาะแก่การนำมาเคลือบผลไม้และผลิตภัณฑ์ต่างๆ [34]

A. Jiménez และคณะ ทำการศึกษาผลของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวต่อโครงสร้าง และสมบัติทางแสงของฟิล์มแบ่งข้าวโพด พบว่าเมื่อเติมกรดไขมันลงในฟิล์มแบ่งช่วยเพิ่มความไม่ชอบน้ำแก่เมทริกซ์ แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความไม่ชอบน้ำของกรดไขมันแต่ละชนิด จากสมบัติทางแสงพบว่ากรดไขมันอิ่มตัวไม่ส่งผลกับสมบัติทางแสง แต่กรดไขมันไม่อิ่มตัว คือกรดโอเลอิก ลดความมันเงาและความโปร่งแสงของฟิล์มแบ่ง อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของแป้งและสายโซ่เส้นตรงของกรดไขมันช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของของผสม ส่งผลให้โครงสร้างการจัดเรียงตัวของของผสมมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น รวมถึงเพิ่มความมันเงาและความโปร่งใสของฟิล์มแบ่ง [35]

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมี

1. แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot starch) ตราปลาไทย 5 ดาวจากบริษัท อี.ที.ซี.เอียบตงจั่น จำกัด องค์ประกอบทางเคมีของแป้งท้าวยายม่อมแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งท้าวยายม่อม [36]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ
Amylopectin	84.79
Amylose	15.21
Moisture	15.34
Crude Protein	0.5
Crude Fiber	0.47
Ash	0.21
Crude Fat	0.18

2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จาก บริษัท Lab System

3. เส้นใยุ่น ตัดเป็นความยาว 2 มิลลิเมตร มีค่า L/D ratio เท่ากับ  $113.11 \pm 55.39$   
(ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยุ่น [37]

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละ
Cellulose	$53.40 \pm 0.23$
Hemicellulose	$29.63 \pm 0.62$
Lignin	$20.73 \pm 0.21$
Wax	$5.31 \pm 0.29$
Ash	$0.54 \pm 0.09$

4. กรดสเตียริก (Stearic acid) จาก บริษัท รวมเคมีภัณฑ์ จำกัด

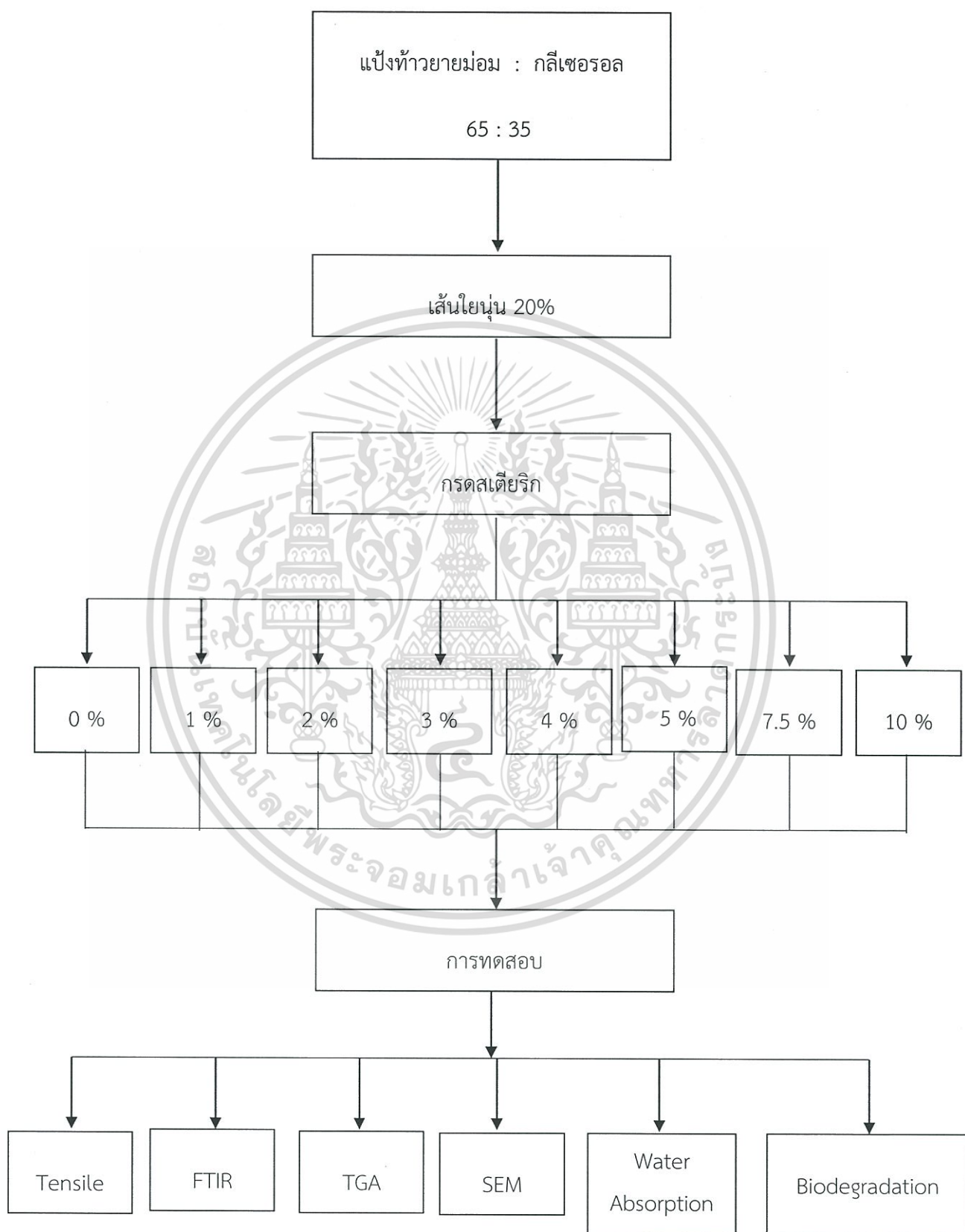
5. น้ำมันซิลิโคน (Silicone Oil)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer) BRABENDE รุ่น MX500-D75L90, CHAREON
2. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) Model MGLP-20 AT M/G NO.228
3. เครื่องทดสอบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) Lloyd Instrument รุ่น LR5k, INTROENTERPRISE
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) JEOL รุ่น JSM-6610LV TOKYU, JAPAN
5. เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) รุ่น PYRIS Diamond, PERKINELMER
6. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (IR Spectrophotometer) รุ่น SPECTRUM GX, PERKINELMER
7. เกรียง
8. ถังมือกันความร้อน
9. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 2 ตำแหน่ง
10. แผ่นใส
11. เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์
12. ไมโครมิเตอร์
13. ถังซิปล็อค
14. กรรไกร
15. ถาดรอง
16. ตะแกรงร่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีพิมพ์เผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดลอง

แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานแสดงในรูปที่ 3.1

#### ตอนที่ 1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

1.1 ชั่งน้ำหนักแป้งท้าวยายม่อมต่อกลีเซอรอลในอัตราส่วน 65: 35

1.2 ผสมให้เข้ากัน และหมักทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

#### ตอนที่ 2 การผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

2.1 ผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer) ที่สภาวะอุณหภูมิ 150 °C ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

2.2 ล้างเครื่องผสมระบบปิดก่อนทำการผสม โดยใช้แป้งที่หมักเตรียมไว้จากนั้นทำความสะอาดด้วยแปรงทองเหลือง

2.3 ชั่งน้ำหนักแป้งที่หมักเตรียมไว้ในปริมาณ 50 กรัม

2.4 ตัดเส้นใยนุ่ม ความยาว 2 มิลลิเมตร จากนั้นชั่งน้ำหนักเส้นใยนุ่มในปริมาณร้อยละ 20 ต่อน้ำหนักรวมทั้งหมด

2.5 ชั่งน้ำหนักกรดสเตียริกในปริมาณร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ

2.6 ผสมส่วนผสมทั้งหมดในเครื่องผสมระบบปิด (Internal Mixer) โดยเติมแป้งท้าวยายม่อม เส้นใยนุ่ม และกรดสเตียริก ตามลำดับ ในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.4 ระยะเวลาในการผสม 5 นาที

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนในการผสมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ซสูตรต่างๆ

สูตร	แป้งท้าวยายม่อม (กรัม)	เส้นใยนุ่น (กรัม)	กรดสแตียริก (กรัม)
TPAS	50	0	0
TPAS20F	50	10	0
TPAS20F1SA	50	10	0.325
TPAS20F2SA	50	10	0.65
TPAS20F3SA	50	10	0.975
TPAS20F4SA	50	10	1.3
TPAS20F5SA	50	10	1.625
TPAS20F7.5SA	50	10	2.4375
TPAS20F10SA	50	10	3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตอนที่ 3 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

3.1 ขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) ซึ่งใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ที่สภาวะอุณหภูมิ 150 °C ความดัน 1,300 psi เวลาในการกดอัด 5 นาที และหล่อเย็น 5 นาที

3.2 ทำความสะอาดแม่พิมพ์ จากนั้นวางแผ่นใสแล้วทาน้ำมันซิลิโคน (Silicone Oil) บนแม่พิมพ์ ด้านที่สัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

3.3 นำแป้งที่ได้จากเครื่องผสมระบบปิดวางลงบนแม่พิมพ์ จากนั้นประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน และนำเข้าเครื่องกดอัดเป็นเวลา 5 นาที และหล่อเย็นเป็นเวลา 5 นาที เมื่อสิ้นสุดนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

### 3.4 การทดสอบ

#### 3.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Infrared Spectroscopy) โดยนำสารตัวอย่างอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่าง 2-3 มิลลิกรัม บดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้ว จำนวน 0.2-0.5 กรัม เมื่อบดเข้ากันแล้วใส่ลงในแม่พิมพ์ และนำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน  $10^4$  kg/cm<sup>2</sup> เวลา 5 นาที เมื่อเสร็จแล้วนำเม็ดตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์จะได้ สเปกตรัมของสารตัวอย่าง

#### 3.4.2 สันฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) คือ การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยเตรียมตัวอย่างจากการหักชิ้นงานในไนโตรเจนเหลว จากนั้นเคลือบสารตัวอย่างด้วยทอง และทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM โดยศึกษา สันฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยและกรดสเตียริก

### 3.4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติต่างๆตามมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 882	MPa
มอดุลัส (Young's Modulus)	ASTM D 882	MPa
% การดัดยืง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (Strain at maximum load)	ASTM D 882	%

ความแข็งแรงดึง มอดุลัสและเปอร์เซ็นต์การดัดยืง ณ จุดแรงดึงสูงสุด

ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D882 ลักษณะชิ้นงานที่ทดสอบเป็นรูปดัมเบลจำนวน 10 ชิ้นงานในแต่ละสูตร โดยควบคุมสภาวะของชิ้นงานในการทดสอบที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60% ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed: 40 mm. /min

Gauge length: 25 mm.

Load cell: 1kN

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดัดยืง ณ จุดแรงดึงสูงสุด คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)} = F/A$$

$$\text{มอดุลัส (Young's Modulus)} = \frac{F/A}{(L-L_0)/L_0}$$

$$\% \text{ การดัดยืง ณ จุดแรงดึงสูงสุด (\%Elongation at Maximum Load)} = \frac{(L-L_0)}{L_0} \times 100$$

### 3.4.4 การดูดซับน้ำ (Water absorption)

อบเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมาชั่งน้ำหนัก (ภายใต้สภาวะนี้ยังไม่เกิดการระเหยของพลาสติกไซเซอร์) และเก็บตัวอย่างในภาชนะปิดที่บรรจุด้วยน้ำกลั่นซึ่งให้ความชื้นสัมพัทธ์  $93\pm 1\%$  ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM E 104 แล้วนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก ณ เวลาเดียวกันของทุกวัน โดยคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำได้จากสมการนี้

$$W_t = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100$$

เมื่อ  $W_t$  คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

$W_w$  คือ น้ำหนักหลังการดูดน้ำ

$W_d$  คือ น้ำหนักก่อนการดูดน้ำ

โดยผลการทดลองได้จากตัวอย่าง 4 ตัวอย่าง ต่อ 1 สูตร

### 3.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Degradation temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเครื่องเทอร์โมแกรวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 50-600 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

### 3.4.6 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

ตัดเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทำกรทดสอบเป็นรูปดัมเบล ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5-10% ฝังชิ้นงานเป็นระยะเวลา 3 วัน จากนั้นเก็บตัวอย่างที่ทดสอบ ควรเก็บตัวอย่างด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากตัวอย่างอาจกระจายไปในดิน แล้วนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก จากนั้นศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา การดูดซับน้ำ และการย่อยสลายโดยการฝังดิน โดยสัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซสูตรต่างๆ

สัญลักษณ์	เส้นใยนุ่น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	กรดสเตียริก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
TPAS	0	0
TPAS20F	20	0
TPAS20F1SA	20	1
TPAS20F2SA	20	2
TPAS20F3SA	20	3
TPAS20F4SA	20	4
TPAS20F5SA	20	5
TPAS20F7.5SA	20	7.5
TPAS20F10SA	20	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

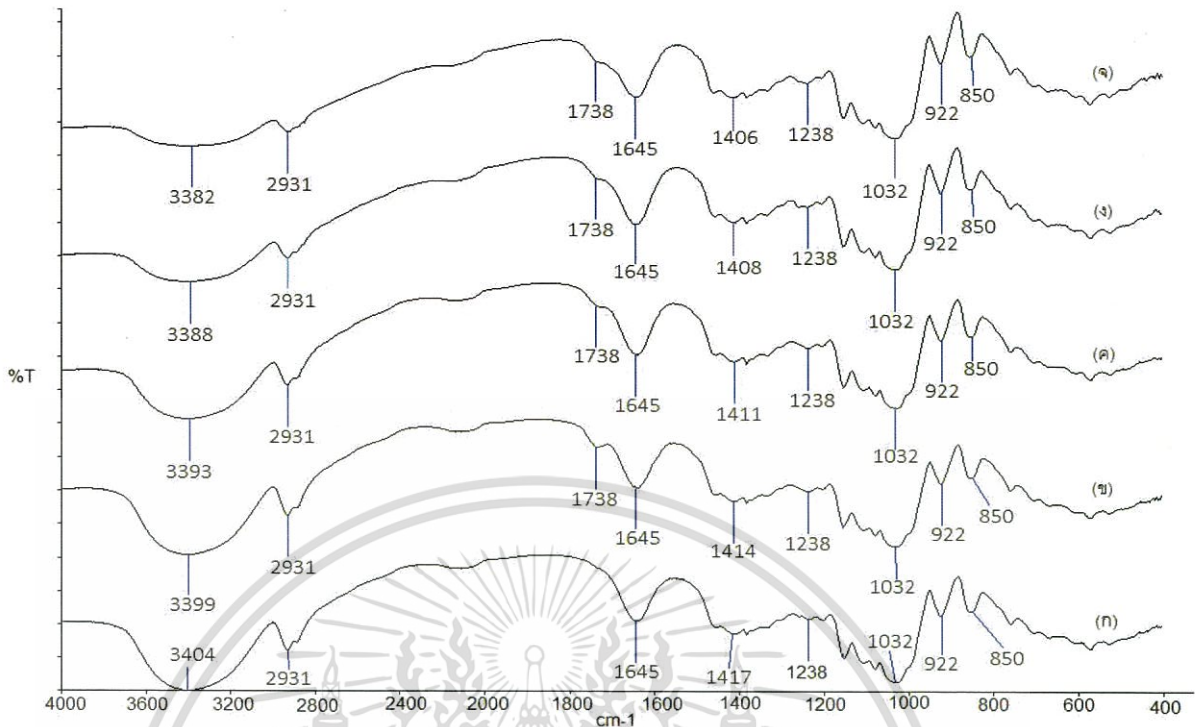
#### 4.1 การทดสอบหมู่ฟังก์ชัน (FT-IR)

จากการศึกษา Fourier-Transform Infrared Spectroscopy ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากแป้งท้าวยายม่อม โดยศึกษาผลของการปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยกรดสเตียริกเสริมแรง ด้วยเส้นใยุ่นนุ่ พืคปรากฏมึลักษณะคล้ายกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่นและลักษณะการสั่น [38]

เลขคลื่น (cm <sup>-1</sup> )	ลักษณะการสั่น
3200-3600	O-H stretching
2800-3000	Alkanes C-H stretching
1640	Bounded water
1420-1485	O-H bending
1410	C-H wagging (In-plane bending)
1300-1100	C-O stretching
1200-1000	C-H bending
900-940	C-H out of plane bending
800-860	C-H out of plane bending
735-770	C-H out of plane bending
600	C-H ของ CH <sub>2</sub> rocking

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซที่มีองค์ประกอบของเส้นใยนุ่มร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีกรดเตียริกปริมาณต่างๆ โดย (ก) TPAS (ข) TPAS20F (ค) TPAS20F1SA (ง) TPAS20F3SA และ (จ) TPAS20F5SA

จากรูปที่ 4.1 (ก) – (จ) แสดงสเปกตรัมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซจากแป้งท้าวยาย่ม่อมที่ปรับปรุงด้วยกรดเตียริกที่ปริมาณต่างๆ พบว่าสเปกตรัมอินฟราเรดทุกสูตรมีโครงสร้างหลักที่คล้ายคลึงกันซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลสตามลักษณะดังนี้ พีคในช่วงความยาวคลื่น  $3200-3500\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ O-H Stretching จากแป้งและกลีเซอรอล พีคในช่วง  $2800-2900\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นแบบ C-H Stretching ของ  $\text{CH}_2$  ของแป้ง พีค  $1650\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากน้ำในโมเลกุลของแป้ง พีคช่วง  $1100-1300\text{ cm}^{-1}$  ลักษณะการสั่นแบบ C-O Stretching ของแป้ง พีคที่ตำแหน่ง  $1400\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคของ OH Bending พีคช่วง  $1000-1200\text{ cm}^{-1}$  ลักษณะการสั่นแบบ C-H Bending และพีคช่วง  $700-850\text{ cm}^{-1}$  ลักษณะการสั่นแบบ C-H Bending [39]

เมื่อเติมเส้นใยนุ่มร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ลงไปในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซดังรูปที่ 4.1 (ข) พบพีคที่มีลักษณะคล้ายกับพีคของแป้ง เนื่องจากแป้งและเส้นใยนุ่มที่มีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกัน โดยความแตกต่างของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซจากแป้งท้าวยาย่ม่อมที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยนุ่มและปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยนุ่ม รูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) พบว่าพีค  $3300-3500\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงการสั่นของ O-H Stretching และ พีค  $1417\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของ O-H bending จากแป้งและกลีเซอรอลมีการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างองค์ประกอบที่ 1 และ องค์ประกอบที่ 2 ทำให้อินฟราเรดสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น [40] และยังปรากฏพีคที่  $1738\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O Stretching ของหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของเส้นใยนุ่นที่มีองค์ประกอบของขี้ผึ้ง (Wax) [37]

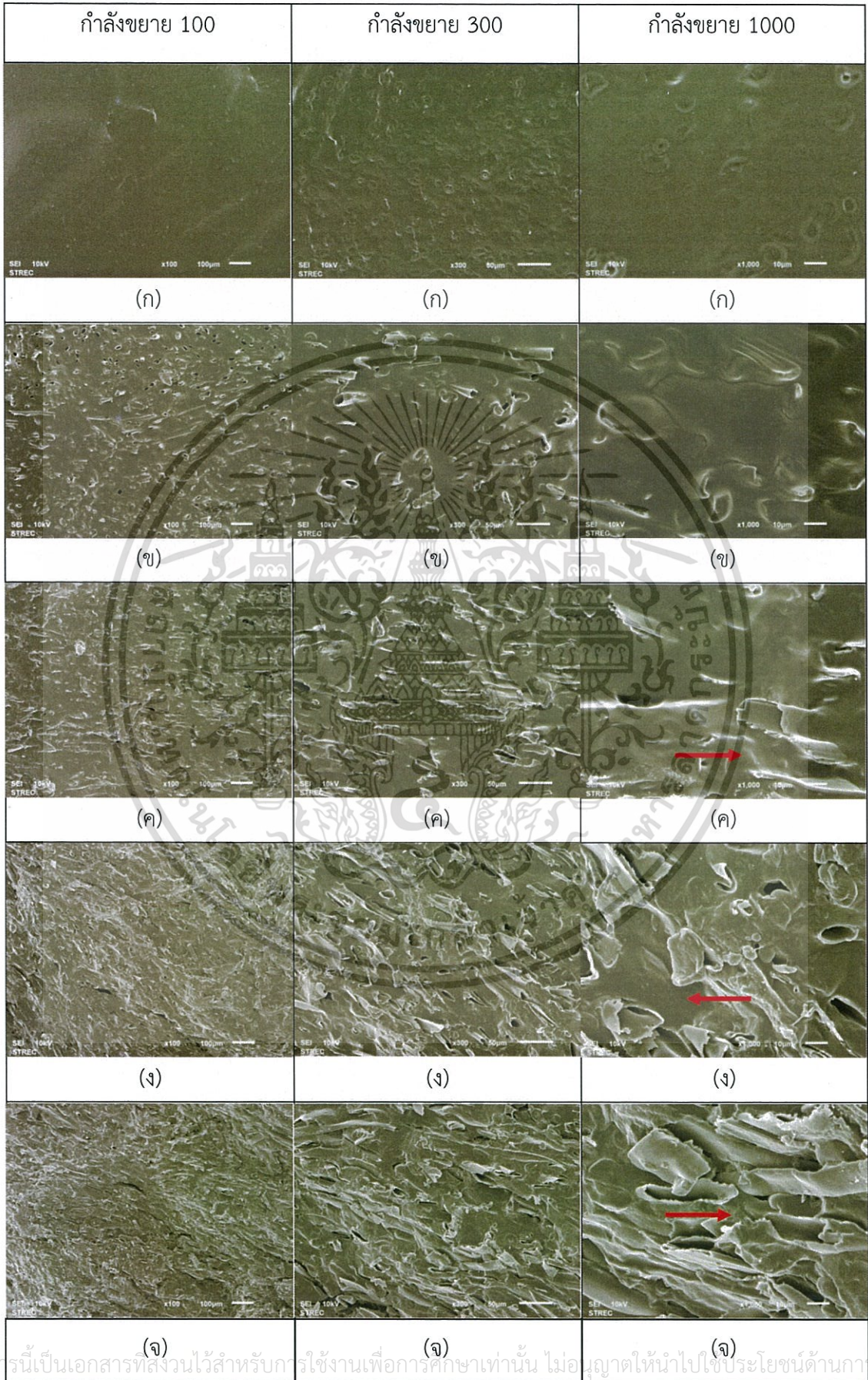
สำหรับความแตกต่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีองค์ประกอบของเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และกรดสเตียริกร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักตามลำดับ รูปที่ 4.1(ค) – 4.1(จ) พบพีคที่  $1738\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O Stretching ซึ่งแสดงอยู่ในฟังก์ชันคาร์บอกซิล (COOH) ของกรดสเตียริก ซึ่งมีความเข้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกรดสเตียริกที่เพิ่มขึ้น (ร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ) นอกจากนี้ยังพบว่าพีค  $3300\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงการสั่นของ O-H Stretching และ พีค  $1417\text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของ O-H bending มีการเคลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งท้าวยายม่อม เส้นใยนุ่น และกรดสเตียริก [40]

## 4.2 สัณฐานวิทยา

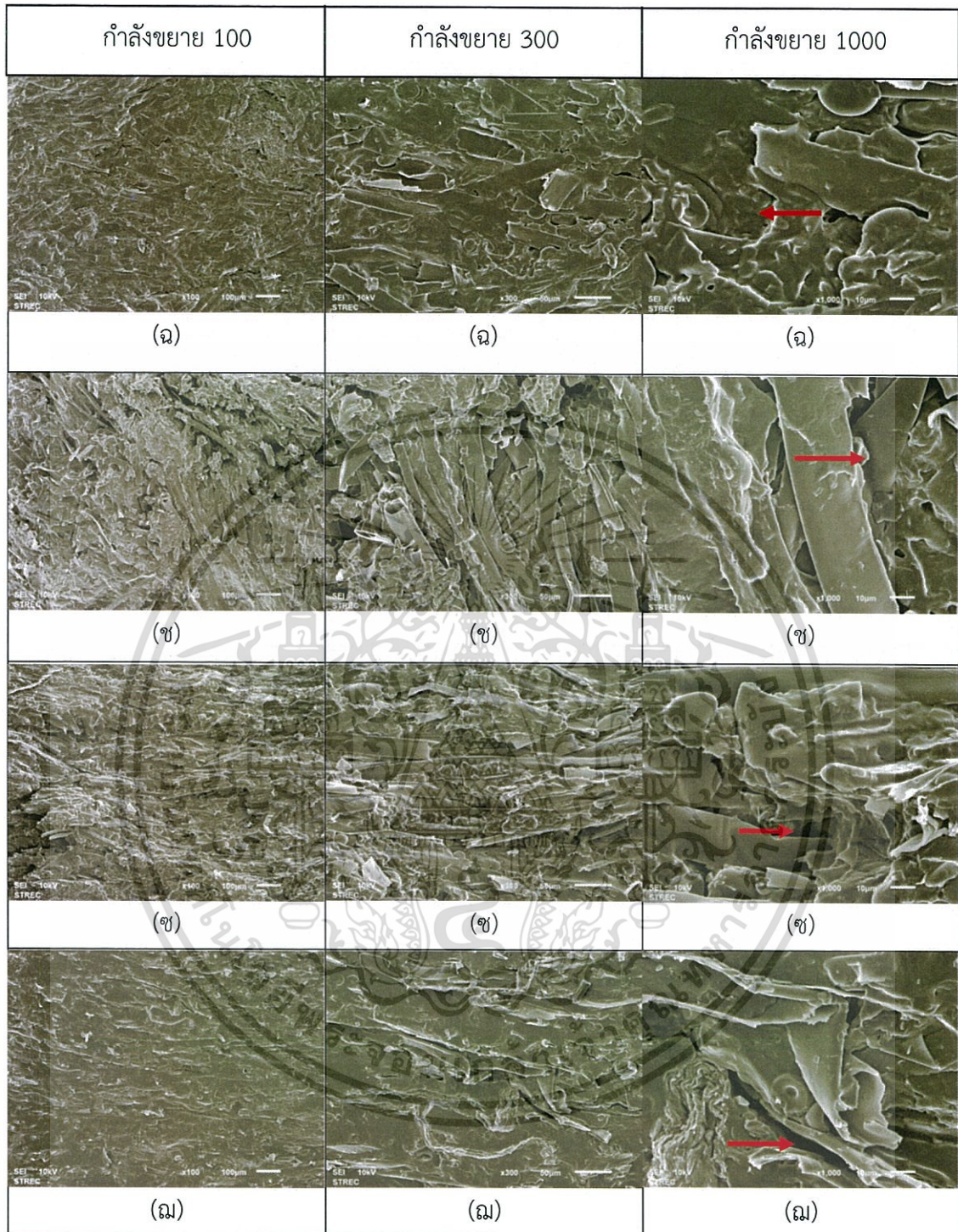
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยพิจารณาการกระจายตัวและความเข้ากันได้ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อม เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 100 300 และ 1000 เท่า ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 (ก) แสดงลักษณะภาพตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติที่กำลังขยาย 100 300 และ 1000 ตามลำดับ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียว แต่พบแปงที่หลอมไม่สมบูรณ์บางส่วน

ลักษณะภาพตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่กำลังขยาย 100 300 และ 1000 ตามลำดับ (รูปที่ 4.2 (ข)) พบว่า เส้นใยนุ่นมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ และยังพบเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเกาะอยู่บนพื้นผิวของเส้นใยนุ่น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคเทอร์โมพลาสติกสตาโรซและเส้นใยนุ่น เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรซและเส้นใยนุ่นมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน คือ มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเหมือนกัน จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกที่กำลังขยาย 100 300 และ 1000 เท่า (ก) TPAS (ข) TPAS20F (ค) TPAS20F1SA (ง) TPAS20F2SA (จ) TPAS20F3SA (ฉ) TPAS20F4SA (ช) TPAS20F5SA (ซ) TPAS20F7.5SA และ (ฅ) TPAS20F10SA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 (ค) แสดงลักษณะภาพตัดขวางของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจาก แป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของแป้ง พบว่าเส้นใยนุ่นมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติก สตาโรล แต่เมื่อปริมาณกรดสเตียริกเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.2 (ง) – 4.2 (ฉ)) พบว่ามีช่องว่างระหว่างวัฏภาค (ลูกศร) ของเส้นใยนุ่นกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ไม่ดีระหว่างวัฏภาค เทอร์โมพลาสติกสตาโรล เส้นใยนุ่น และกรดสเตียริก เนื่องจากโครงสร้างของกรดสเตียริก ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว ส่งผลให้มีความเกะกะจึงทำให้กรดสเตียริกเข้ากันได้ไม่ดี กับวัฏภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีความเข้มข้นสูง และเมื่อปริมาณกรดสเตียริกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ เกิดช่องว่างระหว่างวัฏภาค (ลูกศร) ของเส้นใยนุ่นกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและกรดสเตียริก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

### 4.3 สมบัติเชิงกล

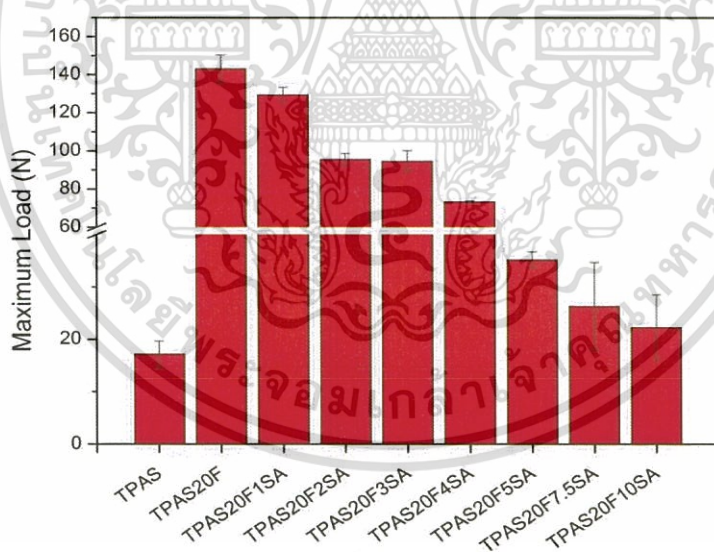
การศึกษาสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ที่เตรียมได้จากจากแป้งท้าวยายม่อมที่มี กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงด้วย กรดสเตียริกร้อยละ 1 2 3 4 5 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ ให้ผลการทดลองดังนี้

จากรูปที่ 4.3 แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติ และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก ร้อยละ 1 2 3 4 5 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ พบว่าค่าแรงดึงสูงสุด ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ผ่านการ ปรับปรุงสมบัติมีค่าต่ำที่สุด เมื่อเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นส่งผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเส้นใยนุ่นมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกันคือ มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้าง เหมือนกัน จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ผลที่ได้สอดคล้องกับ FT-IR (รูปที่ 4.1(ก) - 4.1(ข)) พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติ และ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น ตำแหน่งของการสั่นแบบ O-H Stretching และ O-H Bending มีการเคลื่อนตำแหน่งของเลขคลื่นไปยังตำแหน่งที่ลดลง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับ ผลของสัญญาณวิทยา (รูปที่ 4.2 (ก) – (ข)) พบว่าเส้นใยนุ่นมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของ เทอร์โมพลาสติกสตาโรล และไม่มีช่องว่างระหว่างวัฏภาคเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและเส้นใยนุ่น จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ค่าแรงดึงสูงสุด ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณกรดสเตียริกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของกรดสเตียริกประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว ส่งผลให้มีความเกะกะ และเข้ากันได้ไม่ดีของกรดสเตียริกกับวัฏภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ซึ่งสอดคล้องกับผลของ สัญญาณวิทยา (รูปที่ 4.2 (ค) – (ฉ)) พบว่ามีช่องว่างระหว่างวัฏภาคของของเส้นใยนุ่นกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

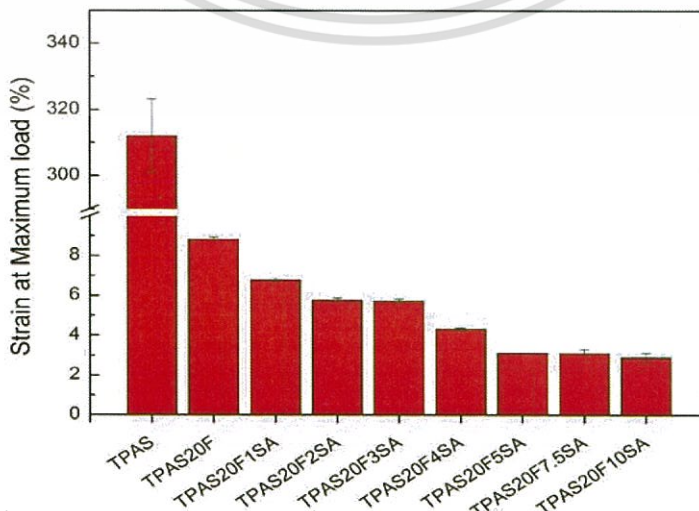
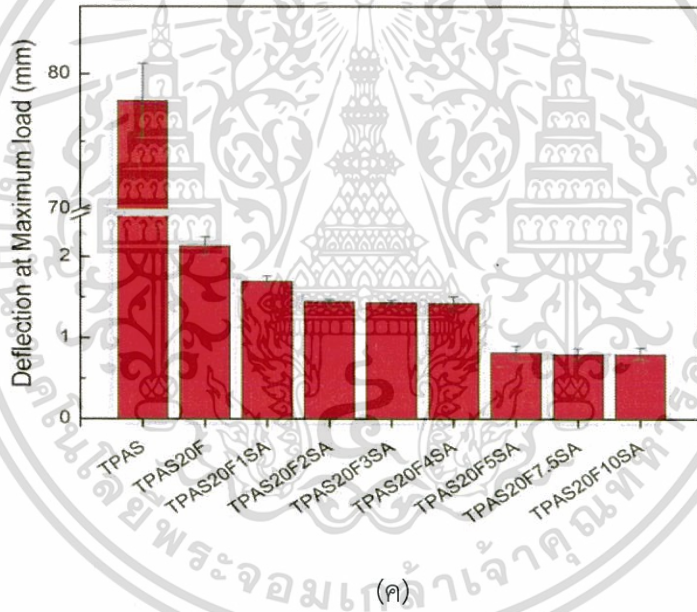
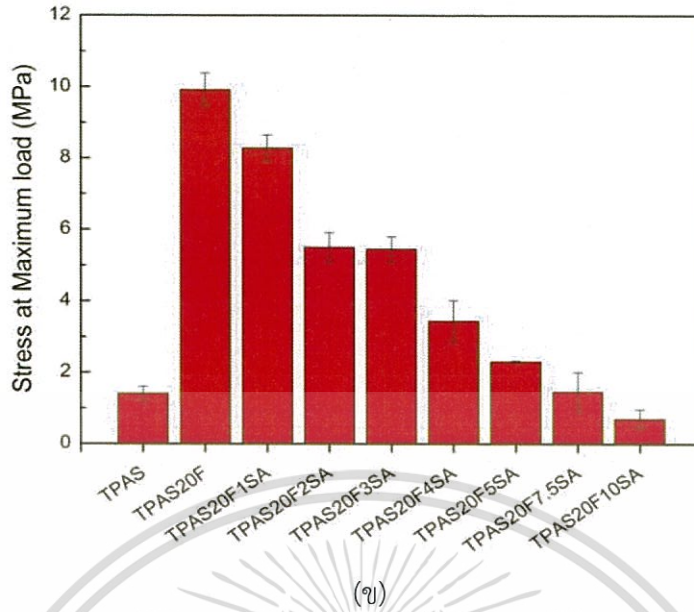
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จึงส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความแข็งแรงลดลงเมื่อปริมาณกรดเตียริกเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยพบว่า TPAS20F มีความแข็งแรงมากที่สุด

รูปที่ 4.3(ค) – 4.3(ง) แสดงค่าการดึงยึด และร้อยละการดึงยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติ และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ปรับปรุงด้วยกรดเตียริกร้อยละ 1 2 3 4 5 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักของแป้ง ตามลำดับ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติมีค่าสูงที่สุด โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น และปริมาณกรดเตียริกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและเส้นใยนุ่นมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน คือ มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเหมือนกัน จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล ส่งผลให้ชิ้นงานมีลักษณะแข็งเพิ่มขึ้นและความยืดหยุ่นลดลง การยึดตัวจึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของปัญญาญ สุขการ และคณะ [6] พบว่าค่าแรงดึงสูงสุด ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ มอดุลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ค่าการดึงยึด และร้อยละการดึงยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณเส้นใยนุ่นที่เพิ่มขึ้น

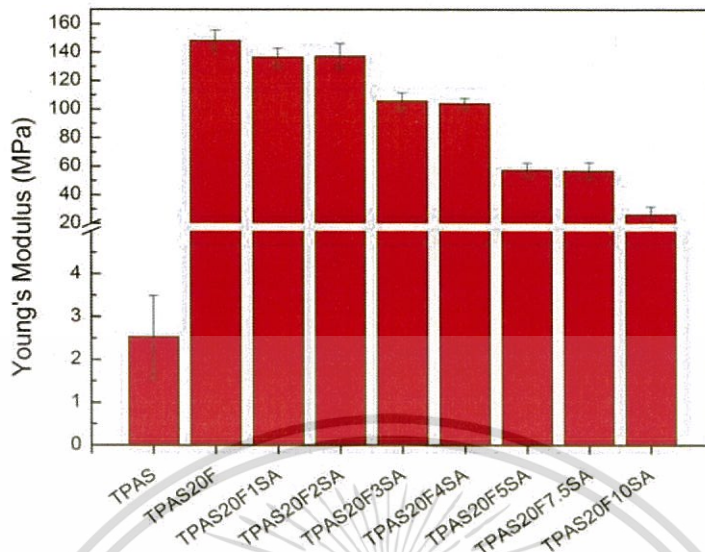


(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง(ง)อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

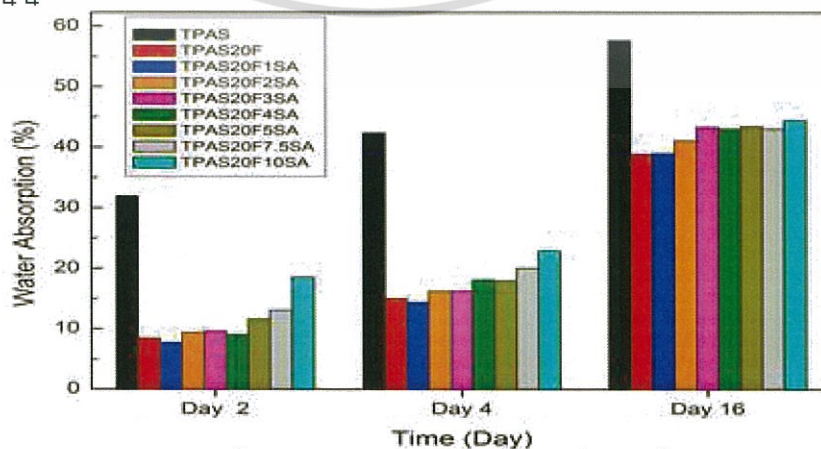


(จ)

รูปที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชแสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงสมบัติ และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่มร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ปรับปรุงด้วยกรดสเตรียกร้อยละ 1 2 3 4 5 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักของแป้งตามลำดับ (ก) แรงดึงสูงสุด (ข) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ค) การดึงยืด (ง) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (จ) มอดุลัส

#### 4.4 การดูดซับความชื้น

การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่มและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตรียก ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์  $93 \pm 1\%$  ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ความชื้นสัมพัทธ์  $93 \pm 1\%$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

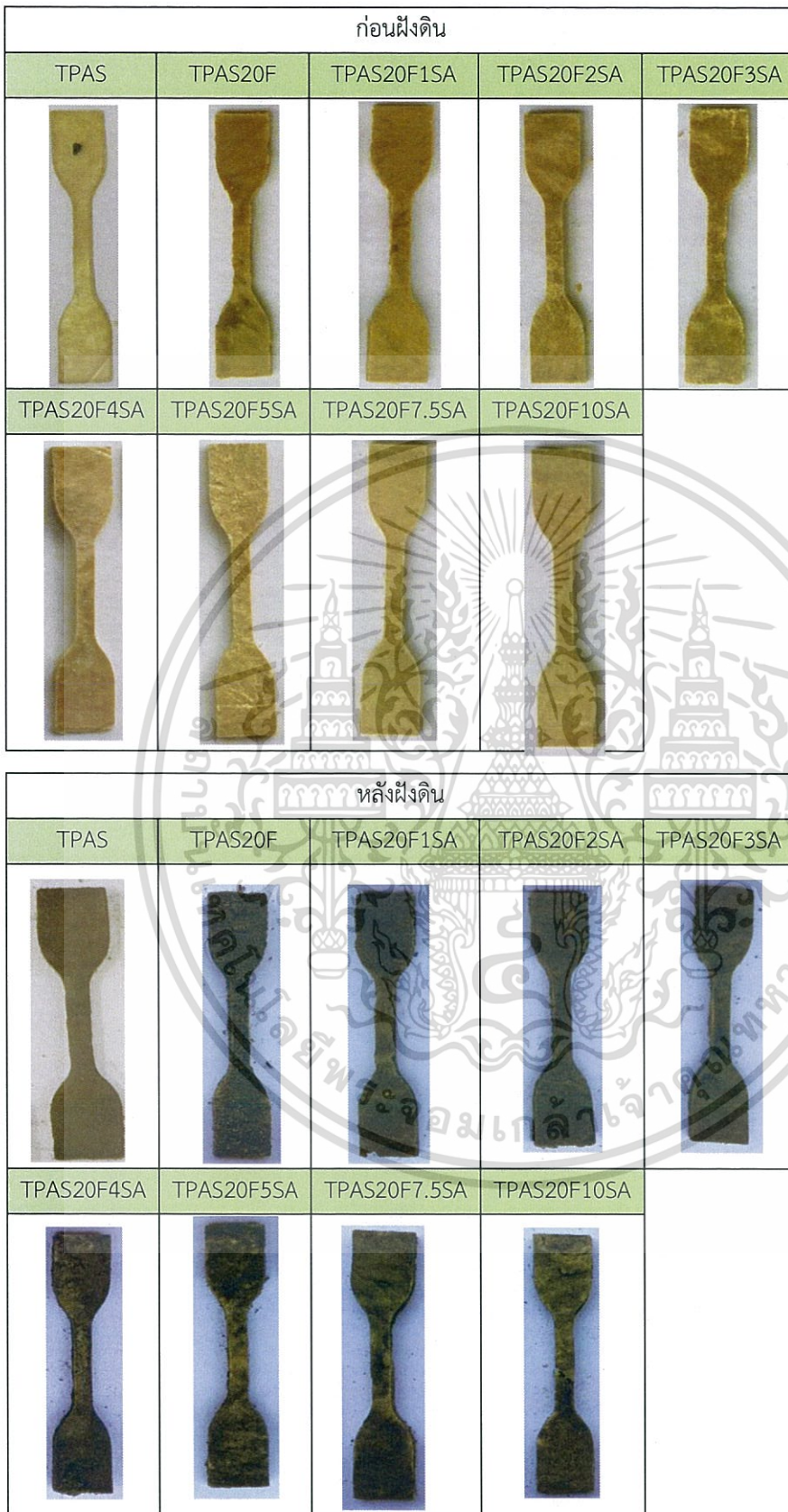
จากรูปที่ 4.4 แสดงการดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใย หนุนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกในปริมาณร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนัก ที่ความชื้นสัมพัทธ์  $93\pm 1\%$  ภายในระยะเวลา 16 วัน พบว่า ชิ้นงานมีการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในทุกตัวอย่าง และความแตกต่างของการดูดซับความชื้นในแต่ละตัวตัวอย่างของชิ้นงานมีแนวโน้มลดลง โดยเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีความชื้นสัมพัทธ์  $93\pm 1\%$  ของ TPAS, TPAS20F, TPAS20F, TPAS20F1SA, TPAS20F2SA, TPAS20F3SA, TPAS20F4SA, TPAS20F5SA, TPAS20F7.5SA และ TPAS20F10SA ในวันที่ 16 มีค่าเท่ากับ 57.7%, 38.9%, 39.0%, 41.1%, 43.4%, 43.1%, 43.8%, 43.1% และ 44.5% ตามลำดับ

เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยหนุน (TPAS20F) และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยหนุนและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (TPAS20F1SA) พบว่า มีค่าการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับเส้นใยหนุนมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน คือ มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเหมือนกัน จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล นอกจากนี้เส้นใยหนุนมีส่วนประกอบของ Wax อยู่จำนวนมากจึงช่วยในส่วนของ การดูดซับความชื้น ซึ่งโดยปกติเส้นใยหนุนไม่ดูดซับน้ำแต่ดูดซับน้ำมัน [4] เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสูตร TPAS พบว่า สูตร TPAS20F และ TPAS20F1SA มีการดูดซับความชื้นลดลงอย่างมาก

เทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยหนุนและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกที่ใส่ในปริมาณเพิ่มขึ้น (2% - 10%) ส่งผลให้การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก โครงสร้างของกรดสเตียริกประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว มีความเกาะก่ จึงทำให้กรดสเตียริก เข้ากันได้ไม่ดีกับวัสดุของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ซึ่งเห็นได้จากผลสัมฤทธิ์ทางวิทยาศาสตร์ (หัวข้อที่ 4.2) เมื่อปริมาณกรดสเตียริกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างวัสดุของเส้นใยหนุนกับ เทอร์โมพลาสติกสตาโรลและกรดสเตียริกมากขึ้น ทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากงานวิจัยนี้ พบว่า สูตร TPAS20F และ TPAS20F1SA ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นน้อยที่สุด และเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ (TPAS) ให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นสูงที่สุด

#### 4.5 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

สมบัติการย่อยสลาย ทำการทดสอบโดยการฝังดินสามารถทำได้โดยนำ เทอร์โมพลาสติกสตาโรล มาฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตรและควบคุมความชื้นของดิน อยู่ในช่วง 5-10% เป็นเวลา 3 วัน ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.5 ลักษณะของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชก่อนและหลังฝังดินเป็นเวลา 3 วัน ซึ่งด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

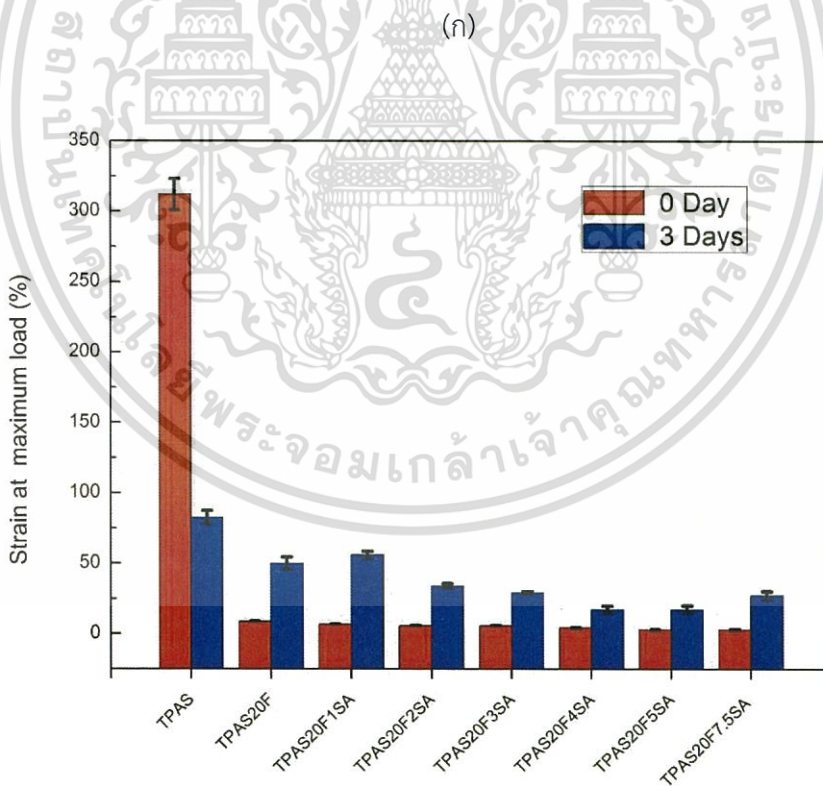
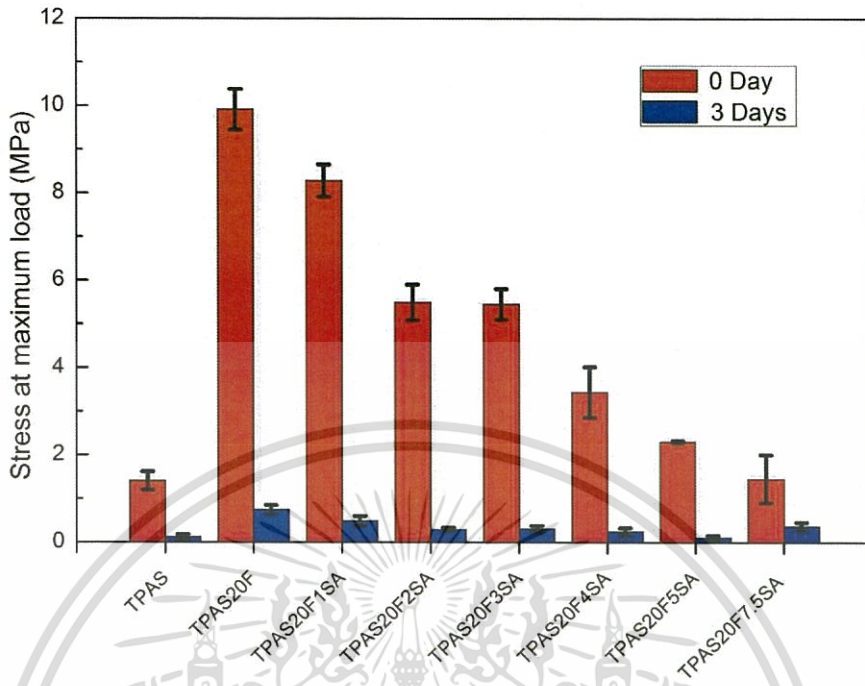
สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีองค์ประกอบของเส้นใยนุ่น ร้อยละ 20 ของน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก ในปริมาณร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

จากการนำชิ้นงานไปฝังดินและนำมาทดสอบ พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึง สูงสุดและมอดูลัสของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีองค์ประกอบของเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก ในปริมาณร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนัก หลังฝังดินมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฝังดิน (รูปที่ 4.6 (ก) และ (ค)) อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก ในดินมีความชื้น เทอร์โมพลาสติกสตาโรลสามารถดูดความชื้นจากดิน เพราะ เทอร์โมพลาสติกสตาโรล มีส่วนประกอบของแป้งซึ่งมีหมู่ OH มีความมีขั้วทำให้ชิ้นงานมีความชอบน้ำ และสเตียริกที่ใส่เข้าไปมีความเข้ากันได้ไม่ดีกับชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ดังจะเห็นได้จากผลจากสัณฐานวิทยา (หัวข้อที่ 4.2) จึงส่งผลให้ชิ้นงานสามารถดูดความชื้นได้มากยิ่งขึ้นตามปริมาณของกรดสเตียริกที่ใส่เข้าไป จากผลดังกล่าวทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีลักษณะบวมพอง ง่ายต่อการฉีกขาดเมื่อเทียบกับก่อนฝังดิน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดและมอดูลัสมีค่าลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณกรดสเตียริกที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.6 (ข) พบว่าร้อยละดิ่งยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ไม่มีการใส่เส้นใยและไม่มีกรดสเตียริกหลังฝังดิน มีค่าต่ำกว่าก่อนฝังดิน เนื่องจากชิ้นงานก่อนฝังดินมีความเหนียวทำให้ร้อยละการดิ่งยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดมีค่าสูง และชิ้นงานหลังฝังดินมีความสามารถในการดูดน้ำจากความชื้นที่มีอยู่ในดินทำให้ชิ้นงานมีความนิ่มเพิ่มมากขึ้น ค่าร้อยละการดิ่งยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดจึงมีค่าต่ำกว่าก่อนฝังดิน แต่เมื่อพิจารณาจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่มีเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และมีการปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกที่ร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าหลังฝังดินมีค่าร้อยละการดิ่งยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานก่อนฝังดินซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่า เนื่องจากชิ้นงานก่อนฝังดินมีลักษณะที่แข็ง เพราะ แต่เมื่อชิ้นงานผ่านการฝังดิน ชิ้นงานมีการดูดน้ำจากความชื้นที่มีอยู่ในดิน ทำให้ชิ้นงานเกิดการอ่อนตัว สามารถขาดได้ง่ายขึ้น จึงทำให้ค่าร้อยละการดิ่งยึด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุดหลังฝังดินมีค่าสูงขึ้นกว่าชิ้นงานก่อนการฝังดิน

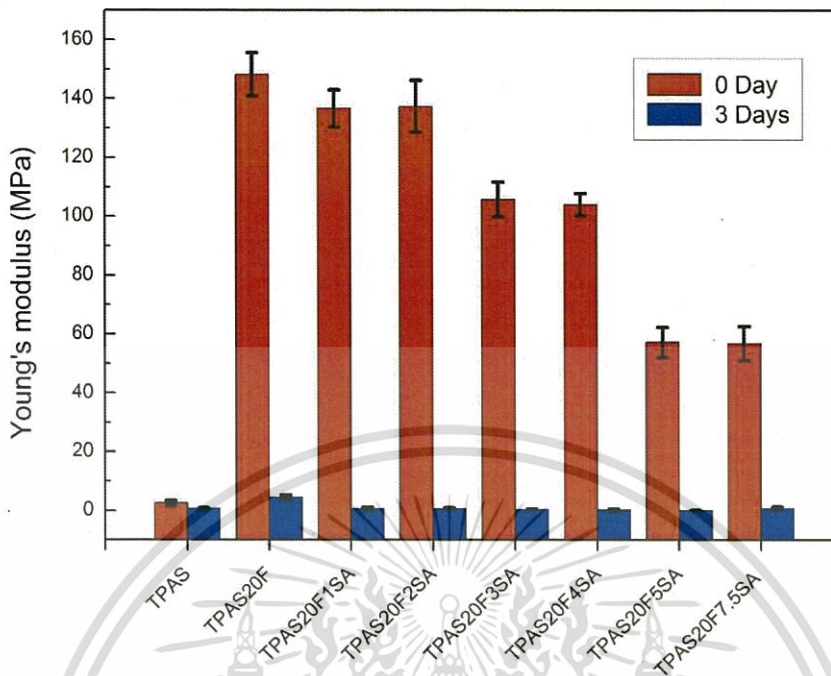
หลังจากการทดสอบด้วยการฝังดินชิ้นงานมีลักษณะนิ่ม อ่อนตัว บวมพอง ฉีกขาดได้ง่าย ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลของการดูดความชื้น (หัวข้อที่ 4.4) กล่าวคือ ชิ้นงานที่มีการใส่เส้นใยนุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และชิ้นงานที่มีเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและกรดสเตียริกที่ปริมาณ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีเปอร์เซ็นต์ของการดูดความชื้นที่ต่ำที่สุดทำให้ย่อยสลายได้ช้าที่สุดและเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นเพิ่มขึ้นตามกรดสเตียริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีการย่อยสลายได้เร็วขึ้นตามปริมาณกรดสเตียริกที่เพิ่ม และพบว่าชิ้นงานที่มีกรดสเตียริกร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก มีการย่อยสลายที่เร็วที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



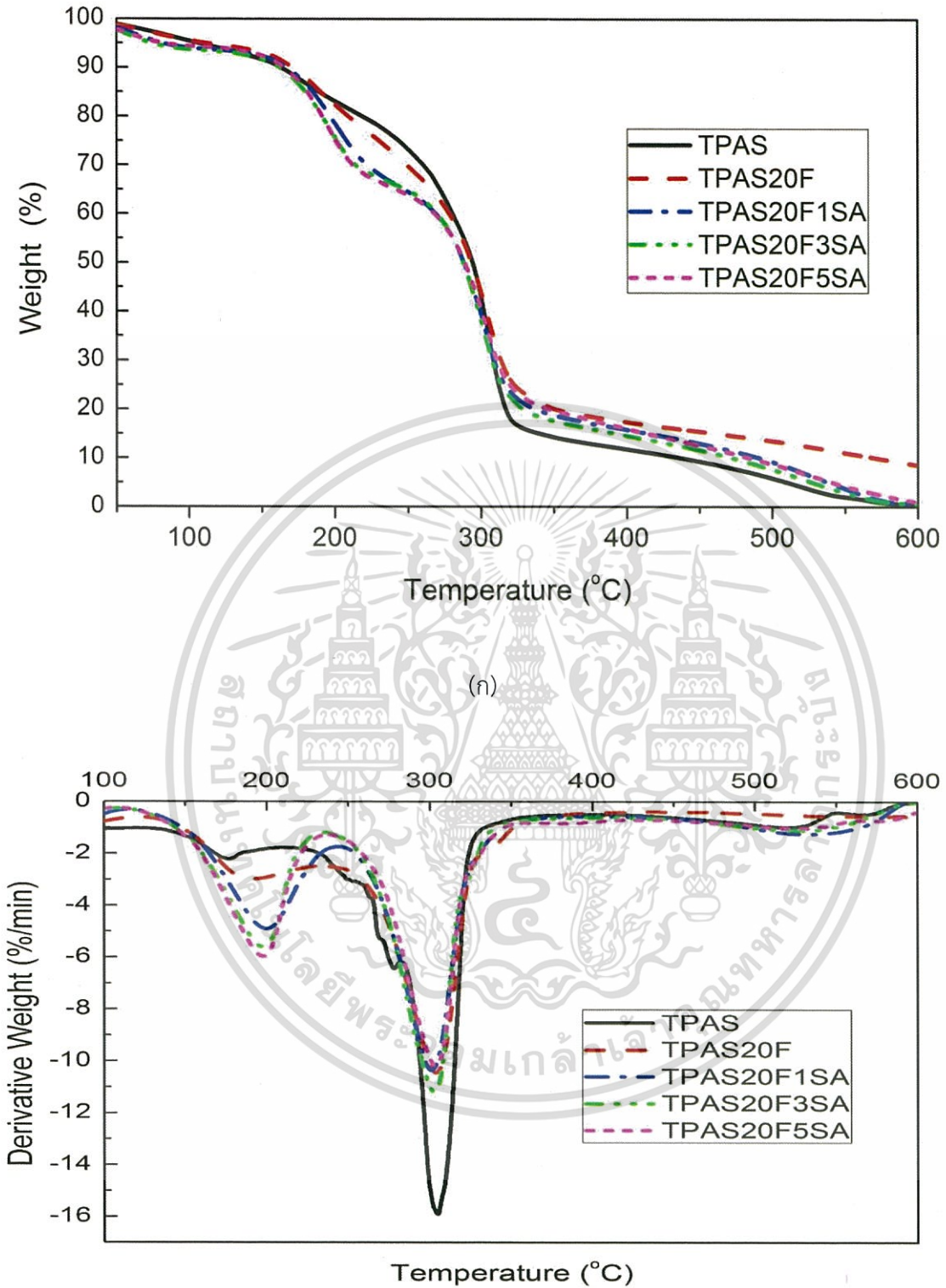
(ค)

รูปที่ 4.6 สมบัติเชิงกลก่อนและหลังฝังดินของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีองค์ประกอบของเส้นใยนุ่น ร้อยละ 20 ของน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก ในปริมาณร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนักตามลำดับ (ก) ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (ข) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และ(ค) มอดุลัส

#### 4.6 การศึกษาสมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (Degradation temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7.5 และ 10 โดยน้ำหนัก สมบัติทางความร้อนที่ทำการศึกษ ได้แก่ การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.7 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เสริมแรงด้วยเส้นใยและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดเตียริกด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	กลีเซอรอลและลิกนิน	แป้งและ เฮมิเซลลูโลส	เซลลูโลสและลิกนิน
TPAS	177.4	304.7	-
TPAS20F	190.1	303.9	338.4

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ ) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นและปรับปรุงด้วยกรดสเตียริก

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัว ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	กลีเซอรอล กรดสเตียริก และลิกนิน	แป้งและ เฮมิเซลลูโลส	เซลลูโลส และลิกนิน
TPAS20F1SA	200.1	302.7	335.1
TPAS20F3SA	197.9	302.7	330.1
TPAS20F5SA	197.9	303.3	336.2

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 177.4 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 304.7 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอล และแป้ง ตามลำดับ และเมื่อปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 190.1 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลและลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบของเส้นใยนุ่น [41] ช่วงที่ 2 ที่อุณหภูมิ 303.9 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งและเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของเส้นใยนุ่น [41] และช่วงที่ 3 ที่อุณหภูมิ 338.4 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิการสลายตัวของลิกนินและเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยุ่น [41] โดยอุณหภูมิของการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น มีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกมีอุณหภูมิการสลายตัว 3 ช่วง โดยช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิของการสลายตัวของกลีเซอรอล กรดสเตียริกและลิกนินซึ่งเป็นองค์ประกอบของเส้นใยุ่น [41] ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิของการสลายตัวของแป้งและเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของเส้นใยุ่น [41] และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิของการสลายตัวของลิกนินและเซลลูโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบของเส้นใยุ่น [41] ซึ่งพบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก ในปริมาณร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของแป้งไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซจากแป้งท้าวยาย่ม่อที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปชิ้นงานโดยวิธีการกดอัดขึ้นรูป เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันสเปกตรัมที่ได้ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่ปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น พบพีคที่ตำแหน่งประมาณ  $1738\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O Stretching ของหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งอยู่ในโครงสร้างของเส้นใยุ่นที่มีองค์ประกอบของขี้ผึ้ง (Wax) และพบว่าทุกตัวอย่าง พีคที่ตำแหน่งของ O-H Stretching และ O-H Bending มีการเคลื่อนไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งท้าวยาย่ม่อ เส้นใยุ่น และกรดสเตียริก

2. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าเส้นใยุ่นกระจายตัวได้ดีและมีความเข้ากันได้กับเทอร์โมพลาสติกสตาเรซเนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาเรซและเส้นใยุ่นมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน คือ มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเหมือนกัน จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล แต่เมื่อปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกพบว่าช่องว่างระหว่างภูมิภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซเพิ่มขึ้นตามปริมาณกรดสเตียริกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของกรดสเตียริกประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว ส่งผลให้มีความเกะกะจึงทำให้กรดสเตียริกเข้ากันได้ไม่ดีกับภูมิภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่มีความมีขั้วสูง

3. จากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (TPAS20F) มีความแข็งแรงมากที่สุด รองลงมาคือ เทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (TPAS20F1SA) และ เทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปรับปรุงด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (TPAS20F2SA) ตามลำดับ โดยเทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่ไม่ปรับปรุงสมบัติมีสมบัติเชิงกลต่ำที่สุด

4. จากการศึกษาการดูดความชื้น พบว่าการเติมกรดสเตียริกและเส้นใยุ่น ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาเรซมีการดูดซับความชื้นลดลง เนื่องจากแป้งและเส้นใยุ่นมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกัน คือ มีหมู่ไฮดรอกซิลเหมือนกัน จึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเรซที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (TPAS20F)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและปรับปรุงด้วยกรดเตียริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (TPAS20F1SA) มีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด

5. จากการศึกษาสมบัติการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและปรับปรุงด้วยกรดเตียริกร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก (TPAS20F10SA) มีแนวโน้มการย่อยสลายเร็วที่สุด เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีส่วนประกอบของแป้งซึ่งมีหมู่ OH มีความมีขี้ทำให้งานมีความชอบน้ำ และปริมาณกรดเตียริกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีความเข้ากันได้ไม่ดีกับชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (TPAS20F) และ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและปรับปรุงด้วยกรดเตียริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (TPAS20F1SA) มีการย่อยสลายช้าที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลของการดูดซับความชื้นที่น้อยที่สุด

6. จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมเส้นใยนุ่นและกรดเตียริกไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน

7. สูตรที่มีสมบัติเชิงกลด้านการรับแรงดึงที่ดีที่สุด จากงานวิจัยนี้ คือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (TPAS20F) สูตรที่มีสมบัติการดูดน้ำได้น้อยที่สุดและย่อยสลายช้าที่สุดคือ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (TPAS20F) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดเตียริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (TPAS20F1SA)

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่น เช่น การฉีดขึ้นรูป การอัดรีดขึ้นรูป เป็นต้น เพื่อศึกษาวิธีการขึ้นรูปที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงานในรูปแบบต่างๆ

2. ศึกษาวิธีการใส่กรดเตียริกวิธีการอื่น เช่น การนำไปเคลือบลงบนชิ้นงานเพื่อปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชหรือมีการปรับปรุงเส้นใยก่อนนำมาขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพื่อปรับปรุงสมบัติ

3. ศึกษาการเติมสารชนิดอื่นเพื่อลดการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เช่น พอลิเมอร์ที่มีความไม่ชอบน้ำ พาราฟิน แวกซ์ เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=28&chap=8&page=t28-8infodetail01.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 ต.ค. 2558.
- [2] [http://www.thaitapiocastarch.org/article26\\_th.asp](http://www.thaitapiocastarch.org/article26_th.asp). เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 ต.ค. 2558.
- [3] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543. “เทคโนโลยีของแป้ง”. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์เกษตรศาสตร์.
- [4] <http://202.28.48.140/isaninfo/?p=164>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 28 ต.ค. 2558.
- [5] <http://www.chemipan.com/home/index.php>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 29 ต.ค. 2558.
- [6] ปัญัญญ์ สุขการ วิไลวรรณ ใจเจน และศวิตา งามศิริสมสกุล. 2557. “การปรับปรุงสมบัติพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งท้าวายม่อมเสริมแรงด้วยเพคตินและเส้นใยนุ่น”. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] วรวรรณ พัฒนสิน. 2556. “การปรับปรุงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังด้วยเพคติน ไคโตซาน และเส้นใยฝ้าย”. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] <https://enchemcom1po.wordpress.com/plastic-พลาสติก/ความหมายและความสำคัญของ/> เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 ม.ค. 2559.
- [9] [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/type\\_and\\_usage\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_and_usage_plas.html). เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 ม.ค. 2559.
- [10] หฤภาค กิรติเสวี ฉัตรชัย วีระ นิติสกุล และอภิรัตน์ เลาะห์บุตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ . วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 70 ปีที่ 22 พฤศจิกายน 2552 - มกราคม 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] อธิพิพล แจ้งซัด. 2554. “พอลิเมอร์คอมโพสิต”. เอกสารประกอบคำสอนวิชาพอลิเมอร์คอมโพสิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [12] [www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/usage\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/usage_de_plas.html). เข้าถึงเมื่อวันที่ 21 ต.ค. 2558.
- [13] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. “เทคโนโลยีของแป้ง”. พิมพ์ครั้งที่ 4. สำนักพิมพ์ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [14] กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2544. แป้งและอนุพันธ์ของแป้ง: การผลิตและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. เอกสารประกอบคำบรรยายทางวิชาการ – มุลนิธิอานานิโระโมะโตะ. กรุงเทพฯ : 1-8.
- [15] สุปราณี แพศรีศรี. 2539. ตำราขนมหวาน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แสงแดด.
- [16] อรุษา สรวารี. 2546. “สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1”. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] <http://www.siamchemi.com/กิลีเซอร์รีน/> เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 ม.ค. 2559.
- [18] <http://www.plasticmart.co.th/images/1176038014/Additive.pdf>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 ม.ค. 2559.
- [19] <http://thaipolychemicals.weebly.com/stearic-acid.html>. เข้าถึงเมื่อวันที่ 26 ม.ค. 2559.
- [20] <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1644/stearic-acid> เข้าถึงเมื่อวันที่ 29 ต.ค. 2558.
- [21] [www.baanjomyut.com/library\\_2/extension-4/fiber/index.html](http://www.baanjomyut.com/library_2/extension-4/fiber/index.html) เข้าถึงเมื่อวันที่ 28 ต.ค. 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] M.A. Abdullah, Anisa Ur Rahmah and Z. Man. 2010. “Physicochemical and sorption characteristics of Malaysian *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. as a natural oil sorbent.” *Journal of Hazardous Materials*. 177(1-3) : 683–691.
- [23] <http://frynn.com/นุ่น> เข้าถึงเมื่อวันที่ 28 ต.ค. 2558.
- [24] <http://www.tcdc.or.th/src/13597> เข้าถึงเมื่อวันที่ 29 ต.ค. 2558.
- [25] J. Prachayawarakorn, P. Sangnitdej and P. Boonpasith. 2010. “Properties of thermoplastic rice starch composites reinforced by cotton fiber or low-density polyethylene.” *Carbohydrate Polymers*. 81(2) : 425–433.
- [26] วัลลดา หวานเสนาะ. 2553. “สมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคอมโพสิตจากแป้งข้าวเจ้า เสริมแรงด้วยเส้นใยต่างชนิด.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [27] สุดารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน สุวัฒน์ เมืองทะ และอารีญา หาญชนะ. 2554. “สมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปอและนุ่น.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [28] J. Prachayawarakorn and W. Pomdage. 2014. “Effect of carrageenan on properties of biodegradable thermoplastic cassava starch/low-density polyethylene composites reinforced by cotton fibers.” *Materials and Design*. 61 : 264-269.
- [29] K. Kaewtatip and J. Thongmee. 2013. “Effect of kraft lignin and esterified lignin on the properties of thermoplastic starch.” *Materials and Design*. 49 : 701-704.
- [30] Y. Zhang, S. Zhang, X. Wang, R. Chen and Y. Wang. 2009. “Effect of carbonyl content on the properties of thermoplastic oxidized starch.” *Carbohydrate Polymers*. 78(1) : 157-161.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [31] ยศธร ธเนศรุ่งโรจน์. 2557. “ผลของชนิดของแป้งต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ชและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [32] ปิติพร ฤทธิเรืองเดช ธงชัย สุวรรณสิขณน์ วิชัย หฤทัยธนาสันต์ และกล้าณรงค์ ศรีรอด. 2546. “พฤติกรรมด้านความหนืดและคุณสมบัติทางกลของแป้งเท้ายายม่อม.” เอกสารการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 41. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [33] V. Schmidt, L. Porto, J. Laurindo and F. Menegalli. 2013. “Water vapor barrier and mechanical properties of starch films containing stearic acid.” *Industrial crops and products*. 41 : 227-234.
- [34] M. Chiumarelli and M.D. Hubinger. 2014. “Evaluation of edible films and coatings formulated with cassava starch, glycerol, carnuba wax and stearic acid.” *Food hydrocolloids*. 38 : 20-27.
- [35] A. Jiménez, P. Talens and A. Chiralt. “Effect of saturated and unsaturated fatty acids on structural and optical properties of corn starch-glycerol based films.” Instituto Universitario de Ingeniería de Alimentos para el Desarrollo, Universitat Politècnica de València. Valencia, Spain.
- [36] E. P reez and M. lares. 2005. “Chemical Composition, Mineral Profile, and Functional Properties of Canna (*Canna edulis*) and Arrowroot (*Maranta spp.*) Starches.” *Plant foods of human nutrition*. 60(3) : 113-116.
- [37] D.S.F. Sarifah, D. Rusli, L.A Famiza and EL.M. Said. 2011. “Characterization and Thermal Decomposition Kinetics of Kapok (*Ceiba pentandra L.*)-Based Cellulose.” *Bioresources*, 9(1) : 475-488.
- [38] C. Chung and M. Lee. 2004. “Characterization of cotton fabric scouring by FT-IR ATR spectroscopy.” *Carbohydrate Polymers*. 58 (4): 417-420.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [39] J.M. Fang, P.A. Fowler, J. Tomkinson and C.A.S. Hill. 2002. "The preparation and characterization of a series of chemically modified potato starches." *Carbohydrate Polymers*. 47(3) : 245-252.
- [40] J. Prachayawarakorn, S. Chaiwatyothin, S. Mueangta and A. Hanchana. 2013. "Effect of jute and kapok fibers on properties of thermoplastic cassava starch composite." *Materials and Design*. 47 : 309-315.
- [41] M. Brebu and C. Vasile. 2010. "Thermal degradation of lignin." *Cellulose Chemistry and Technology*. 44(9) : 353-363.












เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ลักษณะชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติและปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยุ่นและกรดสแตียริกในปริมาณต่างๆ

TPAS	TPAS20F	TPAS20F1SA	TPAS20F2SA	TPAS20F3SA
				
TPAS20F4SA	TPAS20F5SA	TPAS20F7.5SA	TPAS20F10SA	
				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของเส้นใยนุ่น (L/D ratio)

ความยาว	ความกว้าง	อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง
2.22	0.02	111.0
2.67	0.02	133.5
2.78	0.02	139.0
2.47	0.01	247.0
2	0.01	200.0
2.75	0.02	137.5
2.44	0.02	122.0
2.31	0.02	115.5
2.28	0.02	114.0
2.13	0.02	106.5
1.94	0.02	97.0
1.85	0.03	61.7
2.42	0.02	121.0
1.5	0.02	75.0
2.01	0.01	201.0
1.91	0.08	23.9
1.15	0.04	28.8
2.38	0.08	29.8
2.11	0.08	26.4
1.81	0.03	60.3
2.5	0.02	125.0
3.5	0.02	175.0
2.59	0.02	129.5
1.92	0.02	96.0
2.04	0.01	204.0
1.77	0.02	88.5
1.77	0.02	88.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.08	0.02	104.0
2.38	0.02	119.0
$2.20 \pm 0.45$	$0.03 \pm 0.02$	$113.11 \pm 55.39$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริก

### แรงดึงสูงสุด

ชิ้นงานทดสอบ	Maximum Load (N)
TPAS	17.16 ± 2.50
TPAS20F	140.03 ± 7.33
TPAS20F1SA	129.43 ± 3.98
TPAS20F2SA	95.49 ± 3.22
TPAS20F3SA	94.58 ± 5.56
TPAS20F4SA	73.26 ± 0.48
TPAS20F5SA	35.14 ± 1.56
TPAS20F7.5SA	26.27 ± 8.44
TPAS20F10SA	22.56 ± 6.26

### ความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

ชิ้นงานทดสอบ	Stress at maximum load (MPa)
TPAS	1.41 ± 0.21
TPAS20F	9.92 ± 0.47
TPAS20F1SA	8.29 ± 0.37
TPAS20F2SA	5.49 ± 0.41
TPAS20F3SA	5.45 ± 0.35
TPAS20F4SA	3.44 ± 0.58
TPAS20F5SA	2.30 ± 0.03
TPAS20F7.5SA	1.46 ± 0.55
TPAS20F10SA	0.69 ± 0.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## มอดุลัส

ชิ้นงานทดสอบ	Young's Modulus (MPa)
TPAS	2.53 ± 0.97
TPAS20F	148.27 ± 7.34
TPAS20F1SA	136.67 ± 6.34
TPAS20F2SA	137.37 ± 8.82
TPAS20F3SA	105.78 ± 5.88
TPAS20F4SA	104.01 ± 3.81
TPAS20F5SA	57.18 ± 5.14
TPAS20F7.5SA	56.82 ± 5.86
TPAS20F10SA	26.22 ± 5.68

## การดิ่งยึด

ชิ้นงานทดสอบ	Deflection at maximum load (mm)
TPAS	78.01 ± 2.77
TPAS20F	2.13 ± 0.12
TPAS20F1SA	1.69 ± 0.07
TPAS20F2SA	1.44 ± 0.03
TPAS20F3SA	1.43 ± 0.03
TPAS20F4SA	1.42 ± 0.09
TPAS20F5SA	0.82 ± 0.08
TPAS20F7.5SA	0.79 ± 0.07
TPAS20F10SA	0.79 ± 0.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละการดึงยืด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด

ชิ้นงานทดสอบ	Strain at maximum load (%)
TPAS	312.05 ± 11.09
TPAS20F	8.81 ± 0.11
TPAS20F1SA	6.78 ± 0.08
TPAS20F2SA	5.77 ± 0.13
TPAS20F3SA	5.73 ± 0.11
TPAS20F4SA	4.31 ± 0.07
TPAS20F5SA	3.11 ± 0.02
TPAS20F7.5SA	3.10 ± 0.21
TPAS20F10SA	2.89 ± 0.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์  $93 \pm 1\%$  ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดเตียริก

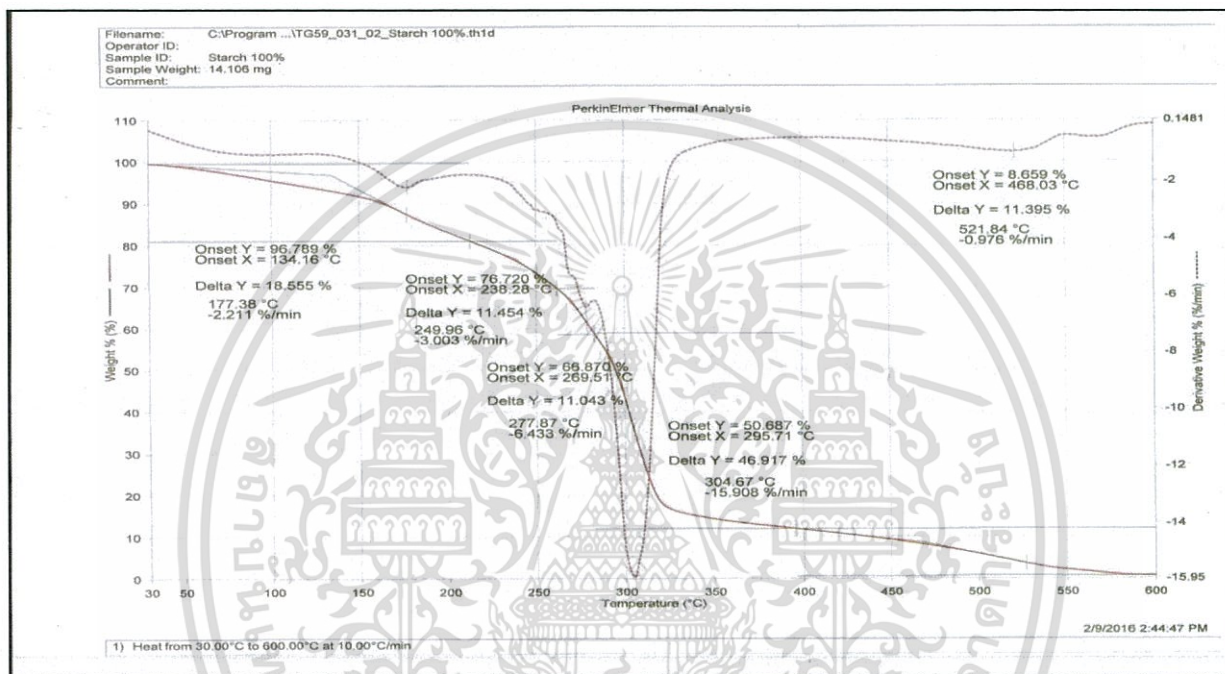
วันที่	TPAS	TPAS20F	TPAS20F 1SA	TPAS20F 2SA	TPAS20F 3SA	TPAS20F 4SA	TPAS20F 5SA	TPAS20F 7.5SA	TPAS20 F10SA
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	18.5	3.8	3.6	5.1	5.3	5.0	6.7	7.6	9.8
2	31.9	8.5	7.8	9.4	9.6	9.1	11.7	13.1	18.6
3	37.2	12.6	11.6	13.3	13.0	16.0	15.0	16.4	24.4
4	42.4	14.9	14.4	16.2	16.3	18.1	17.9	20.0	22.9
5	43.6	27.5	26.4	27.2	26.7	27.6	27.4	30.3	27.8
6	46.0	31.3	30.2	30.7	30.0	29.2	30.0	32.8	30.2
7	50.8	32.2	31.6	32.5	31.9	31.1	31.4	34.8	33.2
8	53.9	32.4	31.9	32.8	32.3	31.6	33.5	39.8	36.9
9	55.2	31.7	31.5	32.5	31.9	31.3	34.0	38.8	35.7
10	55.7	36.1	36.1	37.5	37.1	37.1	37.0	42.1	37.8
11	57.8	35.3	35.5	36.9	36.7	36.5	36.7	38.7	36.9
12	57.8	33.3	34.2	35.1	35.4	35.4	34.3	39.7	38.4
13	55.8	33.8	34.2	35.1	35.1	35.4	35.2	39.1	39.9
14	54.1	34.8	34.9	36.2	35.5	35.9	35.5	38.9	39.8
15	56.3	38.1	38.1	40.2	39.2	39.3	39.6	43.1	42.5
16	57.7	38.9	39.0	41.1	43.4	43.1	43.5	43.1	44.5
17	57.8	40.8	39.8	43.7	43.4	45.3	40.6	44.5	46.2
18	57.2	41.2	40.5	46.2	46.6	48.0	47.7	52.3	53.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

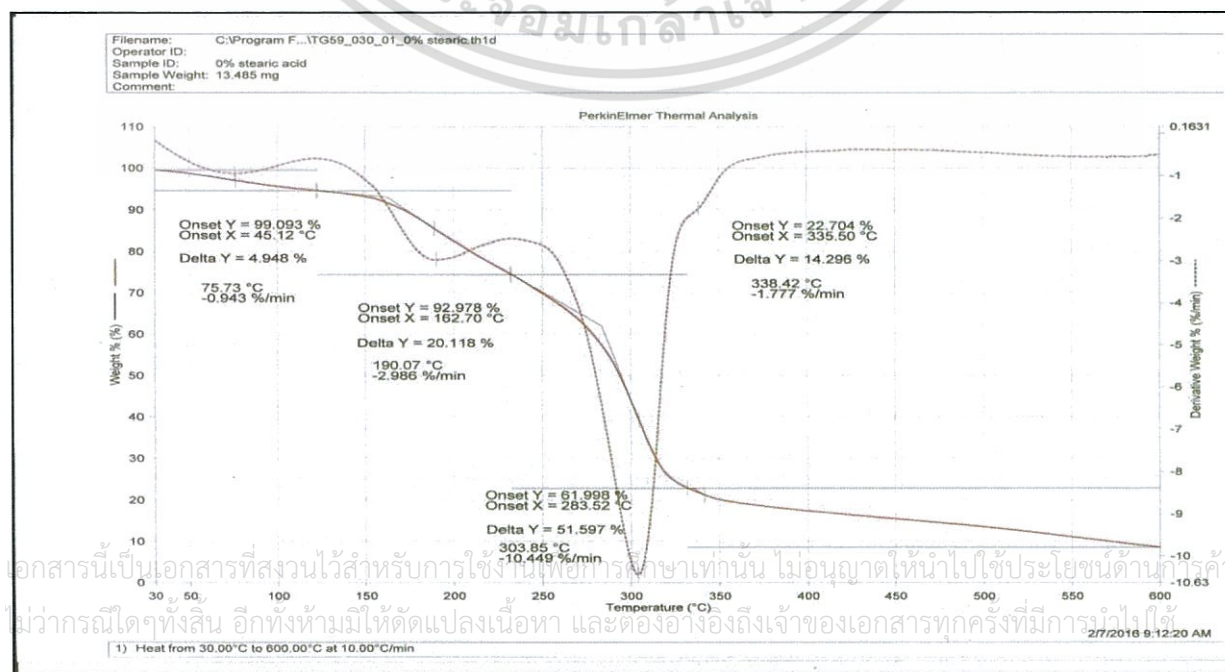
## ภาคผนวก จ

TG และ DTG เทอร์โมแกรมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดเตียริกในปริมาณต่างๆ

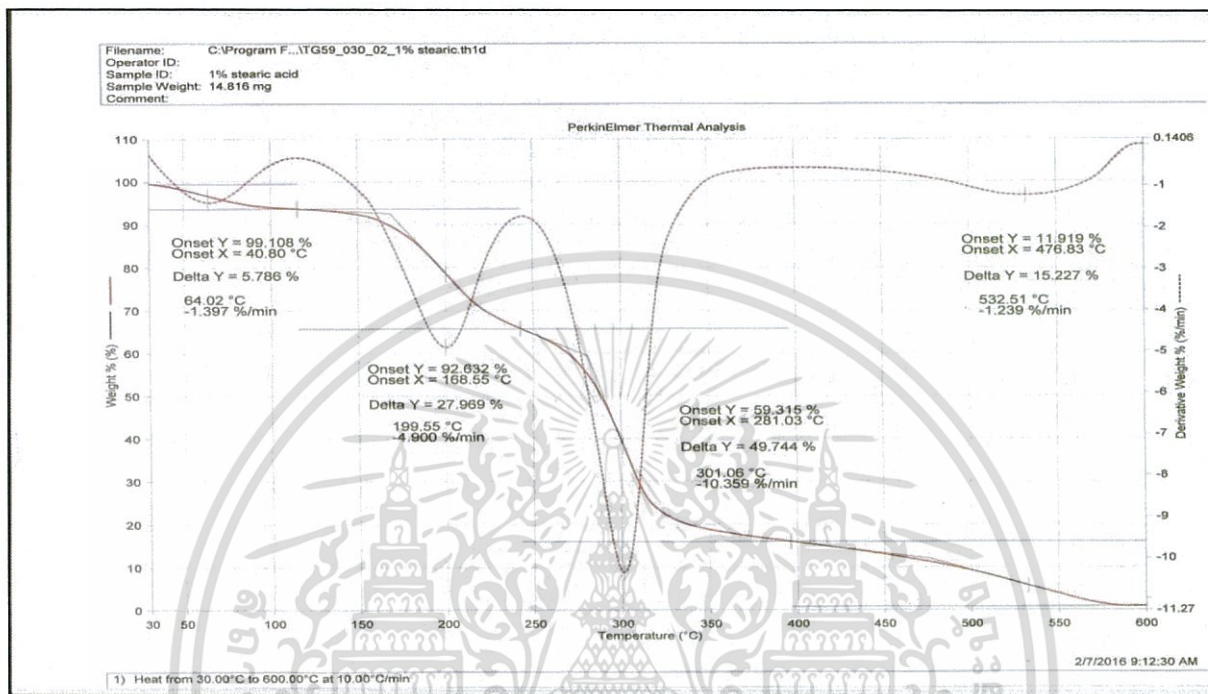
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อ้มที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติ (TPAS)



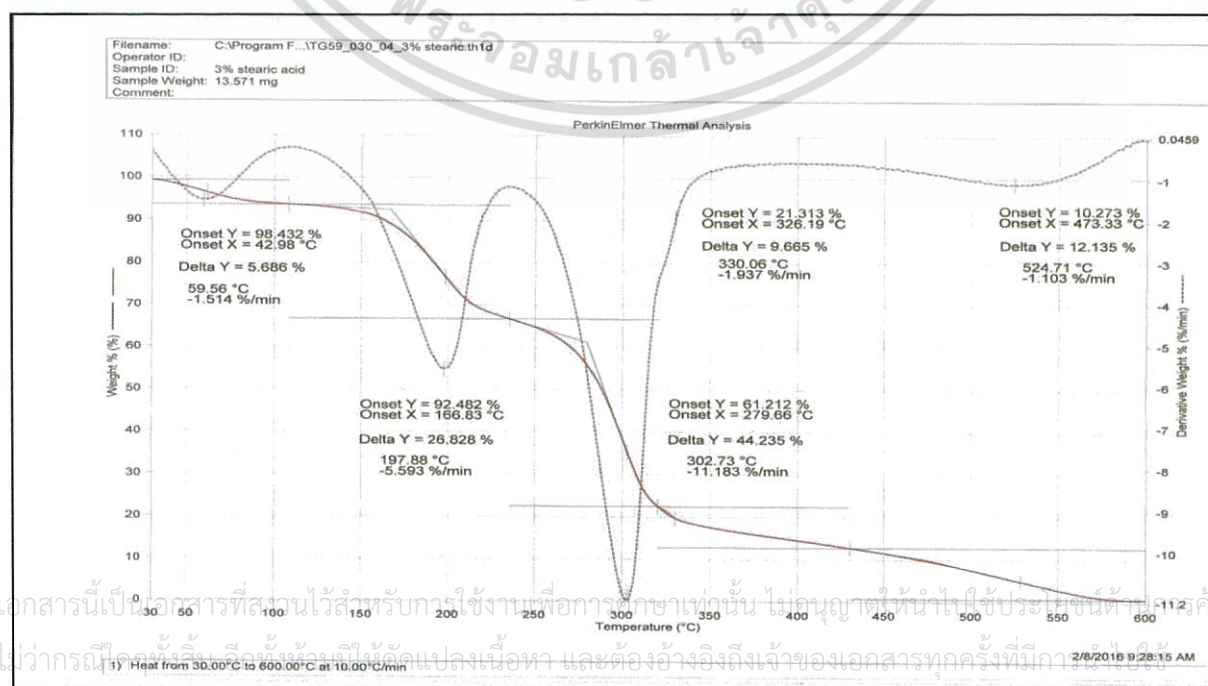
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อ้มที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (TPAS20F)



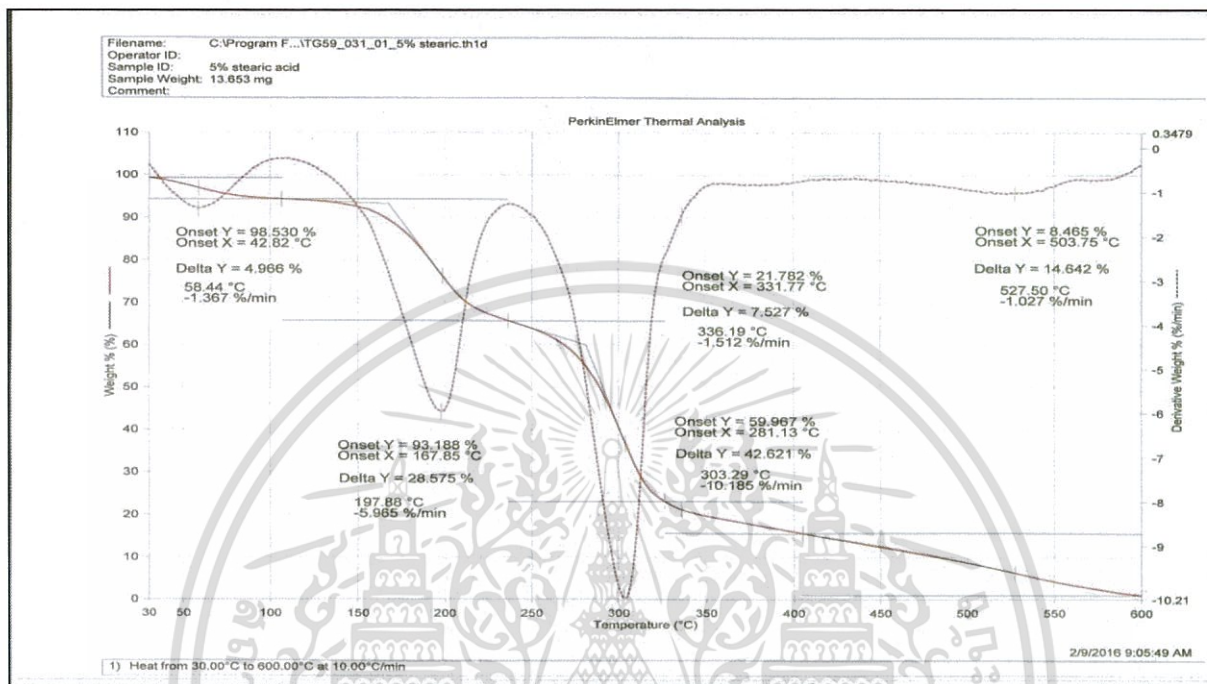
เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและ  
ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (TPAS20F1SA)



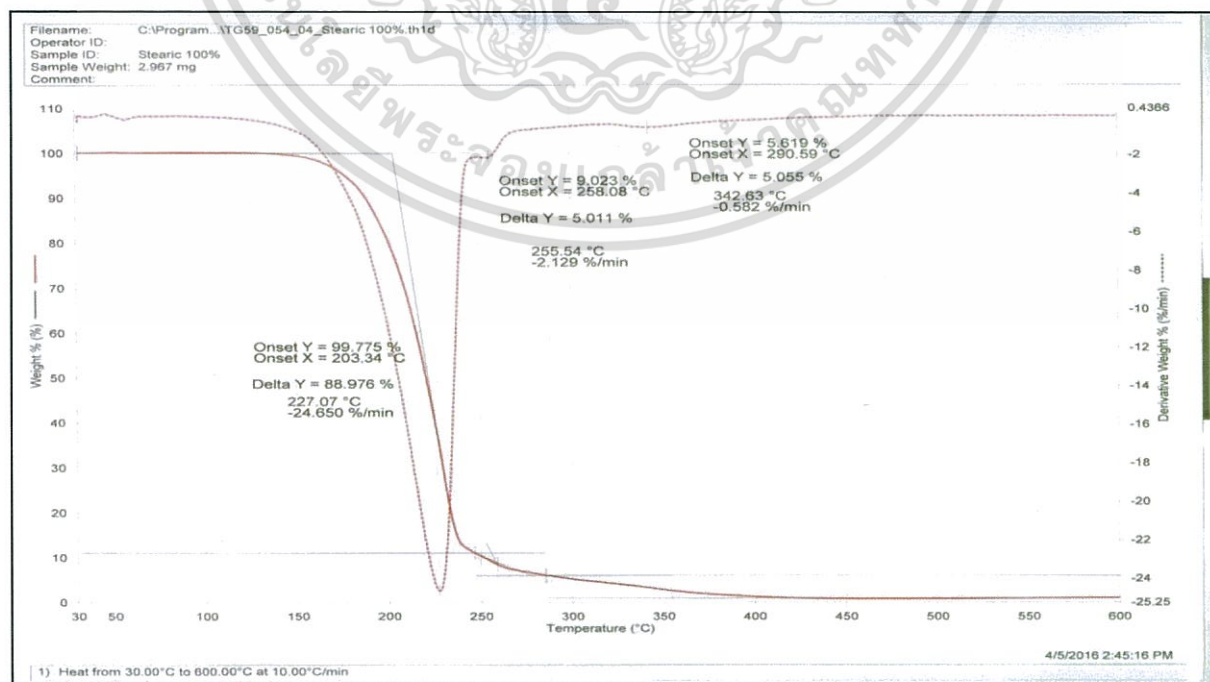
เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและ  
ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (TPAS20F3SA)



เทอร์โมพลาสติกสติกสารจากแป้งท้าวยายม่อมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักและ  
ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (TPAS20F5SA)

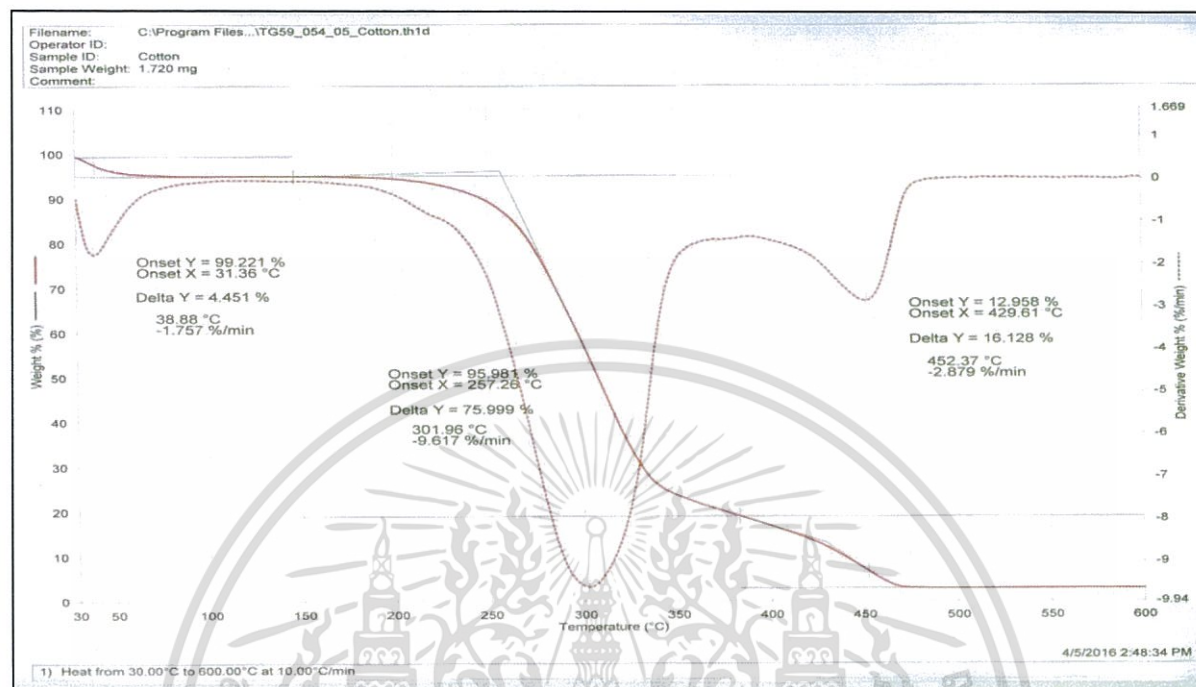


กรดสเตียริก (Stearic Acid)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เส้นใยนุ่น (Kapok Fiber)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้