

ผลของกรดซิตริกที่มีผลต่อสมบัติของ
คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม
เสริมแรงด้วยเส้นใยขนุน

EFFECT OF CITRIC ACID ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH/KAPOK FIBER
COMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ผลของกรดซิตริกที่มีผลต่อสมบัติของ
คอมพอลิเมอร์โม่พลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม
เสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น

EFFECT OF CITRIC ACID ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH/KAPOK FIBER
COMPOSITES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF CITRIC ACID ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH/KAPOK FIBER
COMPOSITES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

ผลของกรดซิตริกที่มีผลต่อสมบัติคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติก
สตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่ม
EFFECT OF CITRIC ACID ON PROPERTIES OF
THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH/KAPOK
FIBER COMPOSITES

ชื่อนักศึกษา

นางสาวนารถณัฐา ช่างเจริญ รหัสนักศึกษา 57050436
นางสาวนรินทร์รัตน์ สิริรัมย์ รหัสนักศึกษา 57050442
นางสาวอัจฉรา คำดี รหัสนักศึกษา 57050559

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี




ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี
อุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช ประธานกรรมการ	
ดร. กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ กรรมการ	
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ผลของกรดซิตริกที่ส่งผลต่อสมบัติคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนารถณัฐา ช่างเจริญ รหัสนักศึกษา 57050436 นางสาวนรินทร์รัตน์ สิริรัมย์ รหัสนักศึกษา 57050442 นางสาวอัจฉรา คำดี รหัสนักศึกษา 57050559
ปริญญา ภาควิชา คณะ	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) เคมี วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อม (Thermoplastic arrowroot starch, TPAS) ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดซิตริก และเส้นใยนุ่น โดยใช้เครื่องผสมระบบปิดและเครื่องขึ้นรูปแบบอัด สังเกตได้ว่า เมื่อใส่กรดซิตริกลงในเทอร์โมพลาสติกคอมพอลิเมอร์สตาร์ช พบพีคใหม่ที่ตำแหน่ง 1742 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบ C=O stretching ของเอสเทอร์ ที่บ่งบอกถึงการเกิดเอสเทอร์ฟิเคชัน และเกิดพันธะไฮโดรเจนเมื่อคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยนุ่น สำหรับการทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก พบว่า กรดซิตริกส่งผลให้ความเป็นผลึกลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อใส่เส้นใยนุ่น ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น โดยคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 20 phr มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ต่ำที่สุด สำหรับการทดสอบสองสัญญาณวิทยา พบว่า เส้นใยนุ่นมีการกระจายตัวที่ดี เมื่อใส่กรดซิตริก ทำให้พื้นผิวของเมทริกซ์มีความเรียบมากขึ้น รวมถึงทำให้เส้นใยนุ่นมีการกระจายตัวที่ดี นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณเส้นใยนุ่น ทำให้คอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชทุกสูตร สามารถย่อยสลายได้ด้วยการฝังดิน และสูตรที่ย่อยสลายได้เร็วที่สุด คือ TPAS/2CA นอกจากนี้คอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริกและเส้นใยนุ่นยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน

คำสำคัญ : กรดซิตริก คอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ช แป้งท้าวยาย่ม่อม เส้นใยนุ่น

Title	EFFECT OF CITRIC ACID ON PROPERTIES OF THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH/KAPOK FIBER COMPOSITES
Students	Miss Natnuttha Changcharoen Student ID 57050436 Miss Nirunrat Siriratsamee Student ID 57050442 Miss Atchara Khamdee Student ID 57050559
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2017
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Jutarat Prachayawarakorn

Abstract

This research focused on thermoplastic arrowroot starch (TPAS) composites modified by citric acid (CA) and kapok fibers (KF) using internal mixer and compression molding machine. It was observed that new C=O stretching of ester bond was found at the peak position of 1742 cm^{-1} , the evidence of esterification, when CA was added into TPAS composite. New hydrogen bond formation was also detected for TPAS composite modified by KF. For X-ray diffraction, CA caused the decrease of crystallinity; however, KF led to the increase of the crystallinity. TPAS composite with 20 % KF showed the lowest water uptake. For morphology, KF was well distributed into TPAS matrix and surface wetting was also noticed. The incorporation CA caused the smoothness of the TPAS matrix including the well distribution of KF in the TPAS matrix. In addition, the increase of KF content resulted in the improvement of stiffness for different TPAS composite. Moreover, all TPAS composites could degrade by burying in soil and the formula biodegradable fastest is TPAS/2CA. Furthermore, TPAS composites modified by CA and KF showed the improvement of thermal stability.

Keywords : Citric acid, Thermoplastic starch composite, Arrowroot starch, Kapok fiber

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากความกรุณาและความร่วมมือของ
ทุกๆ ท่าน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรีชญาวรรการ ที่เป็นอาจารย์ให้คำปรึกษา ดูแลอย่าง
ใกล้ชิด และให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง เกี่ยวกับการทำโครงการ
พิเศษนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ปานไพลิน สีหาราช และดร. กิตติมนต์ จิระกิตติดุศลย์ ที่กรุณาเป็น
กรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ โดยกรุณาช่วยตรวจทาน ให้ข้อคิดเห็น และคำแนะนำในการ
ทำโครงการพิเศษนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณภุชษณ เกษประดิษฐ์ และคุณสุจิต สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทาง
อุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือ รวมถึงให้คำแนะนำ
ในการใช้เครื่องมือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะ
วิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือ อาคารจุฬารณณ์วลัยลักษณ์ 2 คณะวิทยาศาสตร์
ที่ให้ความช่วยเหลือ และการสอนเทคนิคต่างๆ เกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ได้รับการศึกษา ตลอดจนคอยเลี้ยงดู อบรม
สั่งสอน และเป็นกำลังใจ เป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึง
เพื่อน ๆ และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึง คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

นารณัญญา ช่างเจริญ
นิรันดร์รัตน์ สิริรัมย์
อัจฉรา คำดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
Abstract.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญตาราง (ต่อ)	ซ
สารบัญรูป	ฅ
สารบัญรูป (ต่อ).....	ญ
สารบัญรูป (ต่อ).....	ฎ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	4
2.1.1. ประเภทของกระบวนการย่อยสลาย.....	5
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	6
2.2 การเปลี่ยนแปลงให้เป็นพลาสติก	7
2.2.1 การเปลี่ยนแปลงแบ่งให้เป็นพลาสติก	7
2.2.2 ความหมายของเทอร์โมพลาสติกสตา์ช	9
2.2.3 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตา์ช.....	9
2.3 แป้ง.....	9
2.3.1 องค์ประกอบภายในแป้ง	10
2.3.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง	12
2.3.3 สมบัติของแป้ง	13
2.3.4 แป้งดัดแปร.....	16
2.4 แป้งท้าวายม่อม.....	17
2.5 กรดซิตริก (Citric acid).....	19
2.6 เส้นใย (Fiber).....	20
2.6.1 ประเภทของเส้นใย.....	20
2.6.2 สมบัติของเส้นใย	21
2.6.3 ประโยชน์ของเส้นใย.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เส้นใยนุ่น (Kapok fiber).....	21
2.8 วัสดุเชิงประกอบ.....	22
2.8.1 นิยามของวัสดุเชิงประกอบ	22
2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของคอมพอสิต	23
2.9 พลาสติกไซเซอร	23
2.9.1 กลีเซอรอล (Glycerol)	24
2.10 สารหล่อลื่น (Lubricants).....	24
2.10.1 แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium Stearate)	24
2.11 เครื่องผสมระบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer).....	24
2.12 การอัดขึ้นรูป (Compression molding).....	25
2.13 การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย	26
2.13.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน	26
2.13.2 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้น	26
2.13.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	26
2.13.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด.....	26
2.13.5 การวิเคราะห์ทางความร้อน	27
2.13.6 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของโครงสร้างผลึก.....	27
2.13.7 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน	27
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	32
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	32
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	34
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	36
3.3.1 การเตรียมกรดซิตริก.....	36
3.3.2 การเตรียมเส้นใยนุ่น.....	36
3.3.3 การเตรียมคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งทำวยายม่อม	36
3.3.4 การขึ้นรูปคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งทำวยายม่อม	36
3.3.5 การปรับปรุงสมบัติคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชพ ด้วยกรดซิตริกและเส้นใยนุ่น	36
3.3.6 การทดสอบสมบัติต่าง ๆ	37
3.3.6.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)	37
3.3.6.2 การทดสอบการวัดค่าความหนืด	38
3.3.6.3 การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงสร้างผลึก (XRD)	38
3.3.6.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)	38
3.3.6.5 กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนส์แบบหัวกลับ (Invert microscope with Fluorescence system).....	38
3.3.6.6 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)	38
3.3.6.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6.8 การทดสอบสมบัติการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable).....	39
3.3.6.9 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	41
4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR).....	41
4.2 การทดสอบการวัดค่าความหนืด	43
4.3 การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (XRD).....	44
4.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology).....	46
4.5 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture uptake).....	49
4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	51
4.7 การทดสอบย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradation properties).....	53
4.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA).....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการวิจัย	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	72
ภาคผนวก ค.....	78
ภาคผนวก ง.....	79
ภาคผนวก จ.....	83
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	86



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	10
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลสและสีของสารประกอบเชิงซ้อน ของอะไมโลสกับไอโอดีน	11
2.3 องค์ประกอบทางเคมีร้อยละน้ำหนักแห้งของแป้งท้าวยายม่อม	18
2.4 สมบัติของแป้งท้าวยายม่อม	18
2.5 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังและแป้งท้าวยายม่อม	18
2.6 สมบัติทางเคมีของกรดซิตริก	19
2.7 องค์ประกอบของเส้นใยนุ่น	22
3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งท้าวยายม่อม	32
3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนุ่น	32
3.3 รายละเอียดและลักษณะเฉพาะ (Specification) ของกรดซิตริก	33
3.4 ส่วนผสมต่างๆที่ใช้ในการทำคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก และเส้นใยนุ่น	37
3.5 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ช ที่เตรียมได้	39
4.1 ปริมาณผลึกของคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ใส่กรด และใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น	46
4.2 เปอร์เซ็นต์การสลายตัวของคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม ปรับปรุงด้วยการไม่ใส่และใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นในอัตราส่วนต่าง ๆ	56
4.3 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (°C) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (แป้ง) ของ เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุง สมบัติด้วยการใส่กรดซิตริกและไม่ใส่กรดซิตริก และเส้นใยนุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr.....	60
ก.1 แสดงค่า Aspect ratio (L/D ratio) ของเส้นใยนุ่น.....	70
ข.1 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชจาก แป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไม่ใส่กรดซิตริก และเส้นใยนุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1%.....	72
ข.2 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของคอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ช จากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใช้กรดซิตริก 2 และเส้นใยนุ่น ในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1%.....	74
ข.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ปริมาณความชื้น 99±1% ของ คอมพอลิเมอร์โพลอสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไม่ใส่กรดซิตริก และเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ปริมาณความชื้น $99 \pm 1\%$ ของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr.....	77
ค.1 ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยึดของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่มอมที่ใส่กรดซิตริกและไม่ใส่กรดซิตริกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr	78
ง.1 สมบัติเชิงกลของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งท้าวยาย่มอมที่ปรับปรุงด้วยการไม่ใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ทำการฝังดินเป็นเวลา 0 และ 3 วัน.....	79
ง.2 สมบัติเชิงกลของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งท้าวยาย่มอมที่ปรับปรุงด้วยการใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ทำการฝังดินเป็นเวลา 0 และ 3 วัน.....	80



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของอะไมโลส	11
2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน	12
2.3 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน	14
2.4 ระยะเวลาในการเกิดเจลลาทีนเซชันของเม็ดแป้ง	15
2.5 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (รูปซ้าย) และกลไกการคืนตัวของแป้ง (รูปขวา)	16
2.6 ดันท้าวายม่อม	17
2.7 โครงสร้างกรดซิตริก	19
2.8 โครงสร้างกลีเซอรอล.....	24
2.9 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)	25
2.10 การอัดขึ้นรูป (Compression molding)	25
3.1 แผนผังการดำเนินงานของงานวิจัยนี้	35
4.1 สเปกตรัมร้อยละการส่งผ่านแสงของเส้นใยนุ่ม	41
4.2 สเปกตรัมร้อยละการส่งผ่านแสงของ (ก) TPAS (ข) TPAS/5KF (ค) TPAS/10KF (ง) TPAS/15KF และ (จ) TPAS/20KF	42
4.3 สเปกตรัมร้อยละการส่งผ่านแสงของ (ก) TPAS/2CA (ข) TPAS/2CA/5KF (ค) TPAS/2CA/10KF (ง) TPAS/2CA/15KF และ (จ) TPAS/2CA/20KF.....	42
4.3 ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) TPAS และ (ข) TPAS/2CA	44
4.4 ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) TPAS (ข) TPAS/5KF (ค) TPAS/10KF (ง) TPAS/15KF และ (จ) TPAS/20KF.....	45
4.5 ดิฟแฟรกโทแกรมของ (ก) TPAS/2CA (ข) TPAS/2CA/5KF (ค) TPAS/2CA/10KF (ง) TPAS/2CA/15KF และ (จ) TPAS/2CA/20KF.....	45
4.6 (ก)-(ง) แสดงลักษณะภาพตัดขวางของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งท้าวายม่อม ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไมใส่กรดซิตริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่ม ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายภาพ 300 เท่า และ 1000 เท่าตามลำดับ.....	47
4.7 (ก)-(จ) แสดงลักษณะภาพตัดขวางของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งท้าวายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่ม ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 300 เท่า และ 1000 เท่า ตามลำดับ.....	48
4.8 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวายม่อม ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไมใส่กรดซิตริก และเส้นใยนุ่มในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1 %.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 เเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริก และเส้นใยถั่วในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1%.....	50
4.10 สมบัติเชิงกลของคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ใส่ กรดซิตริกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยถั่วในอัตราส่วนต่างๆ.....	52
4.11 สมบัติเชิงกลของคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่ กรดซิตริกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยถั่วในอัตราส่วนต่างๆ.....	52
4.12 สมบัติเชิงกลของคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุง สมบัติด้วยการไม่ใส่กรดซิตริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่ว ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ทดสอบ การย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 วัน (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) มอดูลัส และ (ค) เเปอร์เซ็นต์การดึงยืด.....	54
4.13 สมบัติเชิงกลของคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุง สมบัติด้วยการใส่กรดซิตริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่ว ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ทดสอบ การย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 วัน (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) มอดูลัส และ (ค) เเปอร์เซ็นต์การดึงยืด.....	55
4.14 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไม่ใส่กรดซิตริก และเส้นใยถั่วในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr.....	58
4.15 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริก และเส้นใยถั่วในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr.....	59
ก.1 ลักษณะสัญญาณวิทยาของเส้นใยถั่ว ใช้กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนส์แบบหัวกลับ ที่กำลังขยายภาพ 4 เท่า	69
ง.1 คอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วย การไม่ใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่ว ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ทดสอบการย่อยสลาย ด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 วัน.....	81
ง.2 คอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วย การใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่ว ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ทดสอบการย่อยสลาย ด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 วัน.....	82
จ.1 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วย การไม่ใส่กรดซิตริก และไม่ใส่เส้นใยถั่ว.....	83
จ.2 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วย การไม่ใส่กรดซิตริก และเส้นใยถั่วในอัตราส่วน 10 phr.....	83
จ.3 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วย การไม่ใส่กรดซิตริก และเส้นใยถั่วในอัตราส่วน 20 phr.....	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.4 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วยการใส่กรดซัลฟูริก และไม้ไผ่เส้นใย.....	84
จ.5 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วยการใส่กรดซัลฟูริก และเส้นใยในอัตราส่วน 10 phr.....	85
จ.6 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วยการใส่กรดซัลฟูริก และเส้นใยในอัตราส่วน 20 phr.....	85



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
TPS	เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
TPAS	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม
AS	แป้งท้าวยายม่อม
CA	กรดซิตริก
KF	เส้นใยนุ่น
TPAS/0 5 10 15 และ 20KF	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ใส่กรดซิตริก และปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr
TPAS/2CA/0 5 10 15 และ 20KF	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริก และปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr
TPAS/5KF	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ได้ใส่กรดซิตริกและปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 5 phr
TPAS /10KF	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ได้ใส่กรดซิตริกและปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 10 phr
TPAS /15KF	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ได้ใส่กรดซิตริกและปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 15 phr
TPAS /20KF	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ได้ใส่กรดซิตริกและปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 20 phr
TPAS/2CA	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริก 2 phr และไม่ได้ปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น
TPAS/2CA/5KF	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริก 2 phr และปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 5 phr
TPAS/2CA/10KF	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริก 2 phr และปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 10 phr
TPAS/2CA/15KF	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริก 2 phr และปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 15 phr
TPAS/2CA/20KF	คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริก 2 phr และปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่น 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาในด้านของทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เป็นปัญหาสำคัญของผลิตภัณฑ์เทอร์โมพลาสติก จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถนำมาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ง่าย มีน้ำหนักเบา ทนทานต่อสารเคมี แต่เมื่อก้าวถึงการย่อยสลายหรือการกำจัดแล้วจะทำได้ยาก หรือใช้เวลาสลายตัวนาน ส่งผลถึงเมื่อมีการใช้ผลิตภัณฑ์แล้วทิ้งเป็นขยะจะตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมนาน ทำให้ยากต่อการกำจัด เพราะเมื่อเผาก่อให้เกิดแก๊สพิษ อีกทั้งแก๊สพิษยังส่งผลให้เกิดภาวะเรือนกระจกเพิ่มมากขึ้นด้วย หากนำไปฝังกลบอาจทำให้ดินบริเวณนั้นเสื่อมสภาพตามไปด้วย ไม่สามารถใช้พื้นที่ส่วนนั้นเพาะปลูกพืชได้ นอกจากนี้ถ้าขาดการจัดการที่ดีกับขยะพลาสติก อาจส่งผลให้เกิดปัญหาด้านต่างๆตามมาได้

โดยในปัจจุบันทางด้านหน่วยงานที่อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ได้มีแนวทางในการแก้ปัญหาด้านขยะพลาสติก นั่นคือ มีการรณรงค์ให้ใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic) [1] แทนการใช้พลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ (Non-biodegradable plastic) ซึ่งผลิตจากวัตถุดิบที่สามารถสร้างขึ้นทดแทนขึ้นใหม่ได้ทางธรรมชาติ (Renewable resources) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ รวมทั้งมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ โดยใช้จุลินทรีย์ในธรรมชาติ ซึ่งแป้ง (Starch) [2] เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ย่อยสลายได้เองโดยธรรมชาติ หาง่าย ราคาถูก และสามารถขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ จึงเป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างมากในการนำมาผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

โดยทั่วไปสตาร์ชในรูปของเม็ดแป้ง ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงหรือขึ้นรูปโดยเทคโนโลยีที่ใช้กับพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกได้ เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวของเม็ดแป้ง ($T_m = 220-240\text{ }^{\circ}\text{C}$) สูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัว ($T_d = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$) ส่งผลให้เม็ดสตาร์ชสลายตัวก่อนการหลอมเหลว การผสมเม็ดสตาร์ชกับพลาสติกไซเซออร์ (เช่น น้ำ กליเซอรอล เป็นต้น) ในภาวะที่มีการให้ความร้อน ความดัน และแรงเฉือนทำให้วัสดุที่เรียกว่า เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) [3] ซึ่งสามารถขึ้นรูปโดยกระบวนการหลอมหรือการใช้ความร้อนเข้าช่วย อย่างไรก็ตามเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความว่องไวต่อความชื้น ความแข็งแรง และการทนต่อความร้อน

แป้งมีหลายชนิด เช่น แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot flour) ผลิตจากหัวท้าวยายม่อมมีสมบัติคล้ายแป้งมันสำปะหลัง คือเมื่อทำให้สุกแล้วจะใส แต่ให้ความหนืดสูงกว่าและคืนรูปยากกว่าเมื่อต้มนานหรือให้ความร้อนสูง โดยเม็ดแป้งมีลักษณะเม็ดใหญ่ เป็นเกล็ดหยาบ [4]

การปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชอาจทำได้ โดยการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมี (Chemical modification) หรือทางกายภาพ (Physical modification) สำหรับการดัดแปลงทางเคมี สามารถทำได้หลายวิธี เช่น ทำเป็นแป้งแอซิเตต (Acetated starch) หรือแป้งดัดแปรโดยใช้กรด (Acid-modified starch) โดยกรดที่นิยมใช้คือ กรดซิตริก (Citric acid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดซิตริก มีสูตรโมเลกุล $C_6H_{10}O_8$ เป็นกรดอินทรีย์ที่เป็นกรดอ่อน นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่มเพื่อเป็นสารให้กลิ่น รส ในผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารลดความฟาด ลดการตกผลึกของน้ำผลไม้และสามารถควบคุม pH ในผลิตภัณฑ์อาหาร [5] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การเติมกรดซิตริกและกรดมาลิก ลงในเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลัง ทำให้การดัดยัดเพิ่มขึ้น และการย่อยสลายเร็วขึ้น

สำหรับการปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ โดยวิธีทางกายภาพสามารถทำได้โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยเซลลูโลส เช่น เส้นใยฝ้าย [7-8] เส้นใยไหม [8] หรือ เส้นใยนุ่น (Kapok fiber) [9] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า การใช้เส้นใยนุ่นปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น และดูดซับน้ำได้น้อยลง [9]

คณะผู้วิจัยจึงได้มีการนำงานวิจัยดังกล่าวมาเป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยาย่ม่อม โดยใส่กรดซิตริกและไม้ใส่กรดซิตริก เพื่อปรับปรุงโครงสร้างของแป้ง และทำการปรับปรุงสมบัติคอมพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสตาโรซ โดยเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่นในปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งเป็นวิธีการปรับปรุงทางกายภาพ คณะผู้วิจัยคาดว่า เมื่อได้ทำการปรับปรุงคอมพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ทำจากแป้งท้าวยาย่ม่อม โดยมีการใส่กรดซิตริก และไม้ใส่กรดซิตริก และเส้นใยนุ่นปริมาณต่างกันจะส่งผลทำให้คอมพอลิเมอร์เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้มี สมบัติเชิงกลดีขึ้น และการดูดซับความชื้นลดลง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเตรียมคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อม เพื่อทดแทนพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อม โดยใส่กรดซิตริก และไม่ใส่กรดซิตริก และเส้นใยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 เตรียมคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งท้าวยายม่อม โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์

1.3.3 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรล โดยใส่กรดซิตริก และไม่ใส่กรดซิตริก และเส้นใยุ่นในปริมาณที่แตกต่างกัน

1.3.4 ศึกษาและวิเคราะห์สมบัติต่างๆของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ดังนี้

1.3.4.1 การทดสอบการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

1.3.4.2 การทดสอบการวัดค่าความหนืด

1.3.4.3 การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (XRD)

1.3.4.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

1.3.4.5 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

1.3.4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

1.3.4.7 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable properties)

1.3.4.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ได้จากการใส่กรดซิตริก และเส้นใยุ่น

1.4.2 ส่งเสริมการนำวัสดุธรรมชาติไปใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พอลิเมอร์หรือพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable polymer) คือ พอลิเมอร์หรือพลาสติกที่ย่อยสลายมีกลไกการย่อยสลาย ด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในช่วงเวลาที่กำหนดอย่างสมบูรณ์ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น น้ำ มวลชีวภาพ แก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนที่เหลือหรือตกค้างต้องไม่มีความเป็นพิษ หรือเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช ซึ่งรวมถึงมันสำปะหลังและ ข้าวโพด ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะมีสมบัติต่างๆ ในการใช้งาน เช่นเดียวกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะซึ่งจะอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมคือมีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จะเกิดการย่อยสลายได้ โดยเฉพาะเมื่อถูกฝังกลบในสภาวะที่เหมาะสมกับการย่อยสลาย พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแนวโน้มทางการทำตลาดที่ดี และมีการผลิตเพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ พอลิแลคติก (Polylactic Acid, PLA) และ พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ได้จากธรรมชาติ คือใช้กระบวนการทางชีวเคมีในการเปลี่ยนสภาพจากแป้งที่ได้จากมันสำปะหลังและข้าวโพด ให้เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ นอกจากพลาสติก 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีพลาสติกย่อยสลายอีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมในตลาดเช่นกัน นั่นคือพอลิบิวทิลีนอดิเปตร่วม เทเรฟทาเลต (Poly (butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากวัตถุดิบปิโตรเคมี มีสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกับพลาสติกทั้ง 2 ชนิดข้างต้น ซึ่งได้มาจากพืชธรรมชาติ [10]

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ

พอลิเมอร์ที่ได้จาก พืช สัตว์หรือจุลินทรีย์รวมถึงอนุพันธ์ของพอลิเมอร์ชีวภาพเหล่านี้ เช่น ยาง แป้ง เซลลูโลส ไคติน ไคโตซาน เคซีน และวุ้น โดยมากอยู่ในจำพวกพอลิแซคคาไรด์และโปรตีน ซึ่งพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทนี้มักชอบความชื้น

2. พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์โมโนเมอร์ชีวภาพ

พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์โมโนเมอร์ชีวภาพ ได้แก่ พอลิแลคติก ที่ได้จากการดแลคติก ที่ได้จากแป้งและพอลิยูรีเทนจากน้ำมันมะพร้าว พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) พอลิคาโพรแลคโตน (Polycaprolactone) พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) เป็นต้น พอลิเมอร์ดังกล่าวมีสมบัติที่ดีกว่าพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น แป้ง และเมื่อนำไปผสมกับแป้งทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความสามารถต้านทานความชื้นได้ดีขึ้น

3. พอลิเมอร์ที่สร้างจากจุลินทรีย์หรือแบคทีเรีย

พอลิเมอร์ที่สร้างจากจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียที่ผ่านการตัดแต่งทางพันธุกรรม เช่น เซลลูโลส จากแบคทีเรียและพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานของแบคทีเรีย

2.1.1. ประเภทของกระบวนการย่อยสลาย

1. การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) การย่อยสลายโดยแสง มักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ หรือสถานะแวดล้อมอื่นที่มืด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการด้วยหมึกที่หนาบบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

2. การย่อยสลายทางกล (Mechanical degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติก ทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

3. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation) การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกล เป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติม สารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (Stabilizing additive) แสงและความร้อน ทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (RO และ OH) ที่ไม่เสถียร และเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิชัน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ เป็นอนุมูลอิสระ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

4. การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดริด พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา (Non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยา จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น เอนไซม์ย่อยสายโซ่พอลิเมอร์ (Depolymerase) เอนไซม์ย่อยไขมัน (Lipase) เอนไซม์ตัดสายโซ่หมู่เอสเทอร์ (Esterase) ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (Alkaline metal) เบส (Base) และกรด (Acid) ที่มีอยู่ในสถานะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายใน

โมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

5. การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้เอนโดเอนไซม์ (Endo-enzyme) หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบเอกโซเอนไซม์ (Exo-enzyme) หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนนี้สุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือแร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (Biomass)

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ

การย่อยสลายพอลิเมอร์หรือพลาสติกชีวภาพเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วมีปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา คือ โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์และสภาวะแวดล้อมดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์

พอลิเมอร์หรือพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะต้องมีโครงสร้างโมเลกุลที่เอื้ออำนวยต่อการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่มักต้องมีเฮเทอโรอะตอม (Hetero atom) เช่น อะตอมของธาตุออกซิเจน หรือไนโตรเจนอยู่บนโครงสร้างหลักของสายโซ่พอลิเมอร์ หรือมีพันธะอีเทอร์ เอไมด์ หรือเอสเทอร์ ซึ่งง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและมีน้ำหนักโมเลกุลเล็กลงเรื่อยๆ ทำให้สามารถละลายได้ดีในน้ำและสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านจะย่อยสลายได้ช้ากว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง เนื่องจากกิ่งก้านจะกีดขวางการเข้ามาสัมผัสของเอนไซม์และจุลินทรีย์ พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะย่อยสลายได้ง่าย เนื่องจากถูกส่งผ่านเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง นอกจากนี้ ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ยังส่งผลโดยตรงต่ออัตราการย่อยสลายได้เช่นกัน โดยอัตราการย่อยสลายจะลดลงตามความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้น

2. ชนิดของจุลินทรีย์

ในธรรมชาติมีความหลากหลายของจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะสามารถสังเคราะห์เอนไซม์ที่มีความจำเพาะเหมาะสมต่อการย่อยสลายพอลิเมอร์ประเภทใดประเภทหนึ่ง โดยเฉพาะในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์หรือพลาสติกสามารถเกิดขึ้นโดยการทำงานของจุลินทรีย์มากกว่า 1 สายพันธุ์ ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีจุลินทรีย์ การย่อยสลายทางชีวภาพแทบจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย

3. สภาวะแวดล้อม

สภาวะแวดล้อมเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพอีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากการปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายพอลิเมอร์หรือพลาสติกชีวภาพได้ จะส่งผลให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มีดังนี้ อุณหภูมิ อุณหภูมิที่เหมาะสมส่งผลให้ทั้งกระบวนการทางเคมีทางกายภาพ หรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว จุลินทรีย์ส่วนใหญ่มักจะเป็นกลุ่มที่เจริญได้ดีในอุณหภูมิปานกลาง (Mesophile) ช่วงอุณหภูมิ 25-45 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเร่งอัตราการย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส จัดเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ปริมาณแก๊สออกซิเจน โดยแก๊สออกซิเจนช่วยให้เกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ ทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้รวดเร็วและสมบูรณ์ สำหรับการย่อยสลายของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นช้า และทำให้เกิดกลิ่นเหม็น ดังนั้นสภาพการระบายอากาศของดินจึงมีผลกระทบต่อกิจกรรมการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยตรง ในขณะที่ดินที่อยู่ในสภาพขาดอากาศหรือมีน้ำขัง อัตราการย่อยสลายจะลดลงเป็นอย่างมากและเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ส่วนใหญ่จะเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกำขมิเทน [11]

2.2 การเปลี่ยนแปลงให้เป็นพลาสติก

การเปลี่ยนแปลงให้เป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) แบ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีกลูโคสเป็นมอนอเมอร์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งหลากหลายชนิด เนื่องจากแป้งเป็นวัตถุดิบที่สามารถหาได้ง่าย พบมากในธรรมชาติ และมีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดพลาสติก ในระยะเริ่มต้นมีการใช้แป้งเป็นสารเพิ่มเนื้อ (Filler) ในพอลิโอเลฟิน (Polyolefin) ต่อมาจึงได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของแป้ง ให้สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการอัดรีด เป็นแผ่นฟิล์มที่มีสมบัติคล้ายกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่สามารถนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ตามวิธีการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป เพราะแป้งจะยังไม่เกิดการไหลขึ้นเมื่อให้ความร้อนในกระบวนการขึ้นรูป ดังนั้นการจะนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จึงจำเป็นที่จะต้องเติมพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล เอทานอลามีน ฟอร์มาไมด์ และซอร์บิทอล ลงไปภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 90-180 องศาเซลเซียส และได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอที่จะสามารถทำให้แป้งหลอมและไหลจนสามารถนำมาขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการต่างๆ ได้ [12]

2.2.1 การเปลี่ยนแปลงแป้งให้เป็นพลาสติก

งานวิจัยเพื่อพัฒนาการนำแป้งมาใช้ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ เกิดขึ้นครั้งแรกในราว 40 ปีที่แล้ว (ในช่วงทศวรรษที่ 1970) ซึ่งในระยะแรก งานวิจัยด้านนี้ยังไม่ได้รับความสนใจมากนัก อย่างไรก็ตามด้วยสภาวะโลกร้อนและปัญหามลพิษประกอบกับภาวะขาดแคลนเชื้อเพลิงและวัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเคมีที่เกิดขึ้นในโลกขณะนี้ ทำให้ระยะหลัง งานวิจัยในการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ เพื่อทดแทนพลาสติกที่มาสลายย่อยสลายได้ได้รับความสนใจ และมีความก้าวหน้าอย่างมาก ทั้งในแง่ของการวิจัยด้านเทคโนโลยีการผลิตและพัฒนาด้านการตลาด ถึงแม้จะมีราคาที่สูงกว่าพลาสติกที่ใช้กันอยู่ทั่วไปอย่างมากมาย แต่เนื่องจากความตื่นตัวของผู้บริโภคที่มีต่อสิ่งแวดล้อม การยอมรับของผู้บริโภคต่อพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพจึงมีแนวโน้มที่ดีขึ้น ซึ่งพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพนั้น หมายถึง พลาสติกที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้ความแข็งแรงทนทาน และมีสมบัติการใช้ประโยชน์ที่ใกล้เคียงกับพลาสติกทั่วไป (Conventional plastic) แต่มีโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเคมีที่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยน้ำย่อย (Enzyme) จากเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อสิ้นอายุการใช้งานของพลาสติกแล้ว จะสามารถย่อยสลายได้ เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม [12]

ถึงแม้ว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อาจผลิตได้จากวัตถุดิบกลุ่มปิโตรเคมี (Petroleum-based resource) แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ จะมุ่งเน้นการพัฒนาการผลิตจากวัตถุดิบชีวมวลจากธรรมชาติ (Bio-based materials) เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้ (Renewable) และถือเป็นแนวทางที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า ในบรรดาชีวมวลจากธรรมชาติทั้งหลาย แบ่งจัดเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพสูงและได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีปริมาณมาก หาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถย่อยสลายได้ [12]

จากการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลในเบื้องต้นของสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ สามารถสรุปได้ว่า วัสดุชีวภาพ ซึ่งมีโอกาสพัฒนาเป็นธุรกิจนวัตกรรมในเชิงรุก เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัตถุดิบทางการเกษตรของประเทศไทย 3 ชนิด

1. พอลิแลคติกแอซิด (PLA) วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพอลิแลคติกแอซิด คือ แป้งที่มาจากทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (Renewable resource) ซึ่งได้แก่ พืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง โดยมีกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดหรือม่พืชชั้นให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาลและนำไปหมัก (Fermentation) ด้วยจุลินทรีย์เกิดเป็นกรดแลคติก ซึ่งมีกรรมวิธีคล้ายกับการหมักเบียร์ จากนั้นนำกรดแลคติกที่ได้ มาผ่านกระบวนการทางเคมี เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นสารใหม่ที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวน เรียกว่าแลคไทด์ (Lactide) หลังจากนั้นนำมากลับในระบบสุญญากาศ เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างได้พอลิเมอร์ของแลคไทด์ที่เป็นสายยาวขึ้น เรียกว่า PLA ซึ่งกำหนดความยาวของสายพอลิเมอร์ให้ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากเป็นสิ่งที่ทำให้สมบัติของ PLA เปลี่ยนไปตามลักษณะการใช้งาน ทั้งนี้ PLA สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกได้เช่นเดียวกับเม็ดพลาสติกจากปิโตรเลียม อีกทั้ง PLA ยังมีคุณสมบัติพิเศษ คือ มีความใส ไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดิน นอกจากนี้ยังมีพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิเอสเตอร์ (Polyester) ที่ผลิตมาจากมอนอเมอร์หลัก 2 ชนิด คือ กรดซัคซินิก (Succinic acid) ที่ผลิตมาจากพืช และบิวเทนไดออล (1,4-Butanediol) ที่ผลิตมาจากปิโตรเลียม โดย PBS มีคุณสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีน มีลักษณะขุ่น สามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายในหลากหลายกระบวนการ โดยเฉพาะการฉีดขึ้นรูปและการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ซึ่ง PBS สามารถทนความร้อนได้ตั้งแต่ 80-95 องศาเซลเซียส และมีความยืดหยุ่นที่ดี อีกทั้งยังสามารถนำไปผสมกับ PLA เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์หลายประเภทได้

2. พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอท (PHAs) เป็นสารพอลิเมอร์ตั้งต้นที่สามารถนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ย่อยสลายได้ คือ แป้งหรือน้ำตาลที่มาจากทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (Renewable resource) ซึ่งได้แก่ พืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยมีกระบวนการผลิต เริ่มต้นจากการบดหรือม่พืชชั้นให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาลและนำไปหมัก (Fermentation) ด้วยจุลินทรีย์ชนิดพิเศษ ชื่อเอสเชอริเชีย โคลิ (*Escherichia Coli*) ซึ่งกินน้ำตาลเป็นอาหารและสามารถเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลภายในตัวจุลินทรีย์เองเป็น PHAs ซึ่งสามารถแยกออกมาได้ โดยการกะเทาะแยกเปลือกนอกหุ้มจุลินทรีย์ออก เนื่องจาก PHAs มีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กว้างตั้งแต่ 50-180 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีสมบัติในการนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกได้หลากหลาย

3. โพรเพนไดออล (Propanediol, PDO) เพื่อผลิตเส้นใยชีวภาพสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ PDO มอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งผลิตขึ้นโดยอาศัยแบ่งจากทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ เช่น ข้าวโพดและมันสำปะหลัง ซึ่งกระบวนการผลิตจะคล้ายกับการผลิต PLA โดยเริ่มจากการย่อยแบ่งให้เป็นน้ำตาลและทำการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดชีวภาพ (Biocatalyst) เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็น PDO ซึ่งสามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเส้นใยชีวภาพได้ [13]

2.2.2 ความหมายของเทอร์โมพลาสติกสตา์ช

เทอร์โมพลาสติกสตา์ช หมายถึง พลาสติกที่มีแบ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานหรือวัสดุที่สามารถหลอมตัวและนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ได้โดยการใช้ความร้อนและความดันสูง โดยธรรมชาติแล้ว แบ่งไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก แต่จะสามารถทำได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) คือ พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแบ่งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินเป็นอิสระมากยิ่งขึ้น แล้วนำแบ่งมาทำการขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างๆ ได้ จึงทำให้สามารถเรียกพลาสติกที่ผลิตได้ด้วยวิธีนี้ว่า เทอร์โมพลาสติกสตา์ช [12]

2.2.3 การผลิตเทอร์โมพลาสติกสตา์ช

การนำแบ่งมาใช้ในการผลิตพลาสติก มีข้อจำกัด คือ โครงสร้างผลึกในเม็ดแบ่ง (Starch granule) มีความแข็งแรงมาก เม็ดแบ่งโดยธรรมชาติไม่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จึงไม่สามารถหลอมละลายได้ หากเราให้ความร้อนแก่แบ่งที่ปราศจากความร้อน แทนที่จะหลอมเหลวแต่จะเกิดการเผาไหม้และสลายตัว หากมีการเติมสารเติมแต่งที่เรียกว่า พลาสติกไซเซอร์ จะช่วยทำให้เม็ดแบ่งเกิดการหลอมละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและแรงเชิงกล ได้เทอร์โมพลาสติกสตา์ช เม็ดเทอร์โมพลาสติกสตา์ชที่ผลิตได้ สามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องมือ และกระบวนการผลิตมาตรฐานที่ใช้สำหรับพลาสติกทั่วไป เช่น เครื่องอัดรีด เครื่องฉีด และเครื่องเป่าฟิล์ม เป็นต้น ถึงแม้ว่าจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ของแบ่งได้ดี แต่เนื่องจากน้ำระเหยง่าย จึงทำให้พลาสติกที่ได้มีลักษณะเปราะ จึงไม่นิยมใช้น้ำในการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตา์ช สารที่นิยมใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ในการผลิตเทอร์โมพลาสติกสตา์ช ได้แก่ กลีเซอรอล เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตา์ชสามารถหลอมตัวได้ เมื่อได้รับความร้อน และแรงเชิงกลที่เหมาะสม จึงสามารถใช้เทอร์โมพลาสติกสตา์ชเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตพลาสติก อย่างไรก็ตามพลาสติกที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตา์ช มีข้อจำกัดที่สำคัญ 2 ประการคือ มีสมบัติเชิงกลไม่ดีและไม่ทนน้ำ จึงทำให้งานวิจัยและพัฒนาส่วนใหญ่มุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงสมบัติทั้ง 2 ด้านของเทอร์โมพลาสติกสตา์ชให้ดีขึ้น ซึ่งแนวทางที่นิยมได้แก่ การดัดแปลงโครงสร้างของแบ่งด้วยกระบวนการทางเคมีและการผสมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชกับพลาสติกสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ [12]

2.3 แบ่ง

แบ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์ (ในใบ) และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร เช่น เมล็ดและหัว [14] ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เป็นกลูโคสทั้งหมด แบ่งในการผลิตนั้น หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือ อยู่เล็กน้อย ส่วนแบ่งที่ผลิตโดยทั่วไปที่ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อยู่มาก เรียกว่า ฟลาวัวร์ (Flour) แต่เมื่อสกัดสิ่งเจือปน ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และเกลือแร่อื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็น แป้งสตาร์ช (Starch) และแป้งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ถูกทำการดัดแปรหรือแปรรูปแล้วที่เรียกว่า แป้งดัดแปร (Modified starch) [14] ซึ่งแป้งที่พบในธรรมชาติ จะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง ขนาด 1-100 ไมครอน [15]

2.3.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

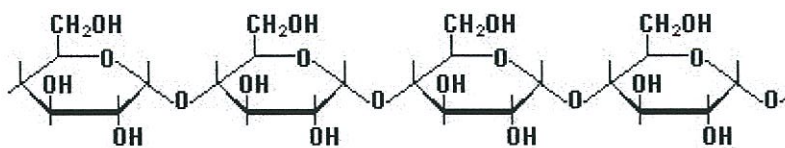
โดยทั่วไป เม็ดแป้ง (Starch granule) ประกอบด้วยโมเลกุลของแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ยังมี โปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส สารอินทรีย์อื่นๆ และน้ำในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของพืช แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ แป้งมีหน่วยพื้นฐานเป็นแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose unit) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา ไกลโคซิดิก (α -glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคสกับคาร์บอนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ถัดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมีโนเมอร์ริค (Anomeric carbon (C1)) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลายที่มีสมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) นั่นคือ แป้งหนึ่งโมเลกุลจะมีตำแหน่งด้านปลายที่สมบัติรีดิวซ์ (Reducing end) 1 ตำแหน่ง โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาดโมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส (Amylose) ซึ่งมีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียงเล็กน้อย และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบโมเลกุลแป้งอีกชนิดหนึ่งที่มีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลส แต่เล็กกว่าอะไมโลเพคติน เรียกว่า วัสดุขั้วกลาง (Intermediate material) แต่พบในปริมาณไม่มากนัก อะไมโลส และอะไมโลเพคตินมีสมบัติที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลส และอะไมโลเพคติน [14]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะ α -1, 4	1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4 และมีการแตกกิ่งด้วยพันธะ α -1, 6
2. ประกอบด้วยกลูโคส 200-6000 หน่วย	2. แต่ละกิ่งมีกลูโคส 20-25 หน่วย
3. ละลายน้ำได้น้อยกว่า	3. ละลายน้ำได้ดีกว่า
4. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย	4. ข้นหนืดมากและใส
5. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	5. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลายไอโอดีน
6. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้	6. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง

2.3.1.1 อะไมโลส (Amylose)

อะไมโลส เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000 – 6,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา ไกลโคซิดิก (α -1, 4-glycosidic linkage) ดังรูปที่ 2.1 อาจพบกิ่งในโมเลกุลของอะไมโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย [14]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของอะไมโลส [14]

โดยทั่วไปแบ่งจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี แป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 22-30% ส่วนแป้งจากรากและหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง แป้งสาकुจะมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า คือ อยู่ในช่วง 18-24% น้ำหนักโมเลกุลอะไมโลสอยู่ในช่วง 105 ถึง 106 ดาลตัน โดยอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีองศาการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะไมโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะไมโลส อยู่ในช่วง 1,000 ถึง 6,000 สูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี ซึ่งมี DP ของอะไมโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีสายของอะไมโลสยาวมากจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง

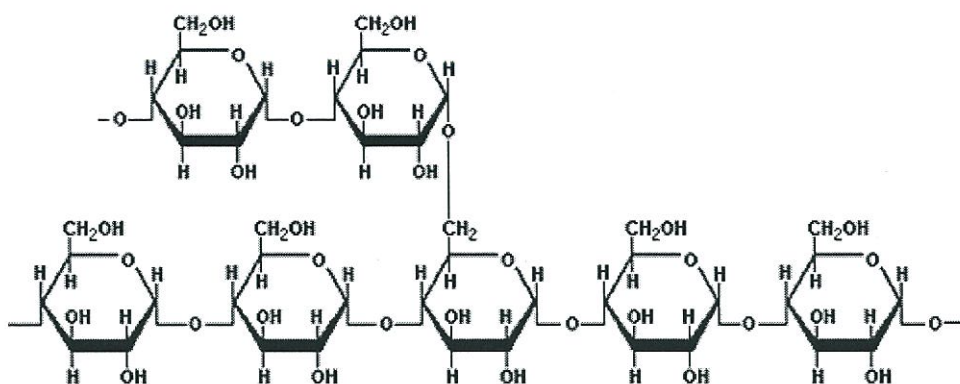
อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนและสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เช่น บิวทานอล (Butanol) กรดไขมัน (Fatty acid) สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) ฟีนอล (Phenol) และ ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ จะไม่ละลายในน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ อะไมโลสที่มีความยาวสายโซ่มากกว่า 45 หน่วย กลูโคสเมื่อรวมตัวกับไอโอดีนจะให้สีน้ำเงินม่วง ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งใช้เป็นลักษณะเฉพาะที่บ่งบอกถึงแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ และใช้ในการตรวจสอบปริมาณอะไมโลสในแป้ง [14]

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของอะไมโลส และสีของสารประกอบเชิงซ้อนของอะไมโลสกับไอโอดีน [14]

ความยาวของสายโซ่ (หน่วยกลูโคส)	จำนวนเกลียวที่ล้อมรอบ	สี
12	2	ไม่มีสี
12-15>	2	น้ำตาล
20-30	3-5	แดง
35-40	6-7	ม่วง
>45	9	น้ำเงิน

2.3.1.2 อะไมโลเพคติน (Amylopectin)

อะไมโลเพคติน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วย พันธะแอลฟา ไกลโคซิดิก (α -1, 4-glycosidic linkage) และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้นมี DP อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา ไกลโคซิดิก (α -1, 6-glycosidic linkage) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอะไมโลเพคติน [14]

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะแอลฟา ไกลโคซิดิก (α -1, 6-glycosidic linkage) มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพคตินทั้งหมด อะไมโลเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส คือ ประมาณ 107 ถึง 109 ตาลตัน และมีการคั่นตัวต่ำเนื่องจากอะไมโลเพคตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง อะไมโลเพคตินทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเม็ดแป้ง ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียว จึงยังสามารถรวมตัวเป็นเม็ดแป้งได้

2.3.1.3 ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในแป้ง

- ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) เช่น โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
- ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Surface material) สามารถสกัดออกได้โดยไม่ทำลายเม็ดแป้ง
- ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดแป้ง เช่น สารประกอบไนโตรเจนในแป้ง ไขมันในแป้งธัญพืช และหมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง [14]

2.3.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้งขนาดเล็ก ซึ่งมีลักษณะของเม็ดแป้งที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแป้งชนิดนั้น เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะไมโลส และอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้ง เป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous หรือ gel phase) ส่วนสายโซ่สั้นของอะไมโลเพคตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพคติน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ [14]

2.3.3 สมบัติของแป้ง

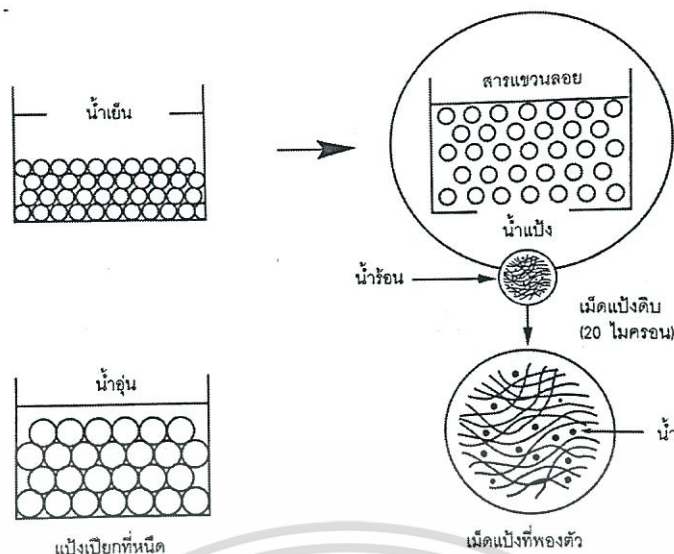
2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่ภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10-17% น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งมี 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึกน้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bound water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8-10% สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่า เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สตราซโมโนไฮเดรต $[n(C_6H_{10}O_5 \cdot H_2O)]$ โดยแป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลของแป้งที่อยู่ใกล้ๆ กันมีการเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น สมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปรแป้งทางเคมี รูปแบบในการ พองตัว และการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว และบางส่วนของแป้งจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของแป้งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อเม็ดแป้งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ [14]

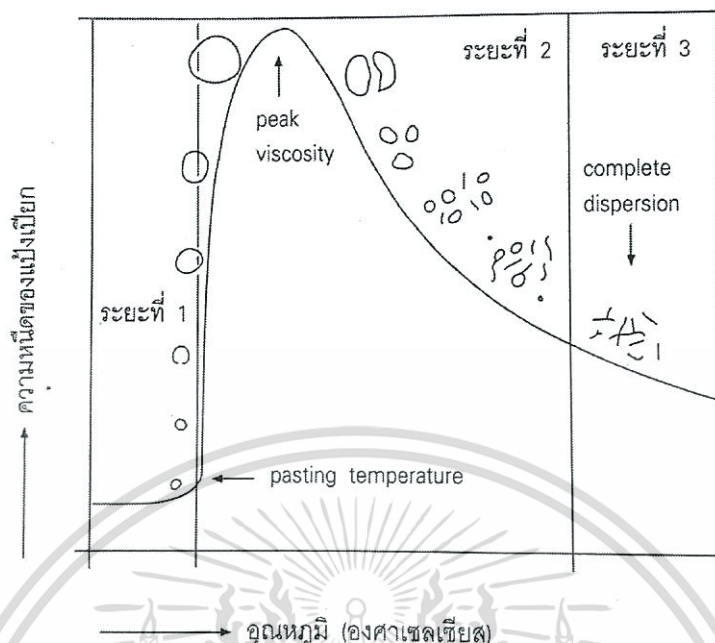
2.3.3.2 การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้น การจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้น ในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า การเกิดเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืด เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ เมื่อตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด แป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่งจะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาติไนซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิจากแป้งธัญพืช [14]



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [14]

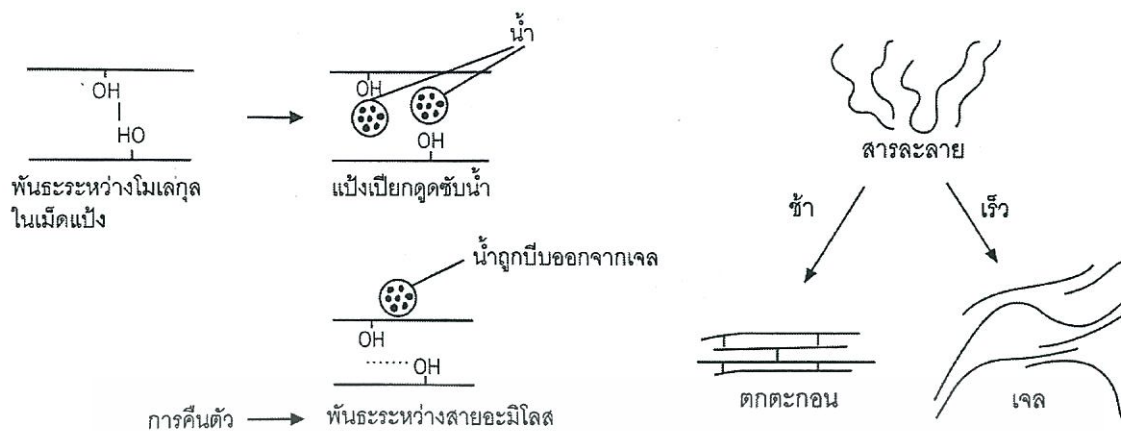
การเกิดเจลลาทีนในเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลล์ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่าง และโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามาและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลลาทีนในเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบิดแสงระนาบโพลาไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้นเมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลลาทีนในเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่าง ๆ ได้ดีกว่า



รูปที่ 2.4 ระยะในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของเม็ดแป้ง

2.3.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาทีโนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลส ขนาดเล็ก จะกระจายออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่ดูดน้ำเข้ามาในโครงสร้างอีก มีความหนืดคงตัวเพิ่มขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์ม เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก การจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นขึ้น โมเลกุลของน้ำอิสระที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล เรียกว่า การหดตัว (Syneresis) เจลจะมีลักษณะขาวขุ่น และมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ ดังรูปที่ 2.9 (ด้านซ้าย) การคืนตัวของแป้งเปียก และสารละลายแป้ง ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจลและโมเลกุลของน้ำถูกบีบให้ออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น ดังรูปที่ 2.9 (ด้านขวา)



รูปที่ 2.5 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (รูปซ้าย) และกลไกการคืนตัวของแป้ง (รูปขวา) [14]

ปัจจัยในการคืนตัวของแป้ง ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพคติน และองค์ประกอบอื่นๆ ในแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง เกิดการคืนตัวได้มาก และเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูง อะไมโลเพคตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก และการคืนตัวของแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดี เมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้น ในแป้งแต่ละชนิดจึงมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกันไป [14]

2.3.4 แป้งดัดแปร

แป้งดัดแปร หมายถึงแป้งที่ได้จากการนำแป้งธรรมชาติมาผ่านกรรมวิธีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้มีสมบัติเปลี่ยนไปตามที่ต้องการ เช่น ความหนืด (Viscosity) ลดลง คงตัวต่อความร้อน กรด และแรงเฉือน กรรมวิธีการผลิตแป้งดัดแปรโดยวิธีทางเคมี กายภาพ เอนไซม์ หรือโดยจุลินทรีย์ แป้งที่นำมาใช้แปรรูปเป็นแป้งดัดแปร ได้แก่ แป้งจากมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า ซึ่งชนิดของแป้งดัดแปรแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. แป้งดัดแปรด้วยกระบวนการทางเคมี เป็นแป้งดัดแปรส่วนใหญ่ที่มีการผลิตและใช้ในระดับอุตสาหกรรม เป็นแป้งที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างด้วยกระบวนการทางเคมี มีหลายชนิด ขึ้นกับชนิดของสารเคมีที่ใช้ และระดับการดัดแปร (Degree of substitution, DS) เช่น แป้งไฮดรอกซีโพรพิล (Hydroxypropyl starch) แป้งครอสลิง (Cross-linked starch) แป้งแอซิเตต (Acetate starch) แป้งคาร์บอกซีเมทิล (Carboxymethyl starch) เป็นต้น

2. แป้งดัดแปรทางกายภาพ เป็นการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโดยทำให้โครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ใช้พลังงานความร้อน หรือพลังงานจลน์ หรือทั้งสองอย่างประกอบกัน เมื่อโครงสร้างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งได้ถูกเปลี่ยนแปลงไป สมบัติของแป้งก็เปลี่ยนไปเช่นกัน แป้งในกลุ่มนี้ ได้แก่ แป้งพรีเจลาติไนซ์ (Pregelatinized starch) เป็นต้น

2.3.4.1 จุดประสงค์ในการตัดแปรแป้ง

แป้งมีสมบัติเฉพาะตัว ซึ่งบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการใช้ในระดับอุตสาหกรรม หรือยังไม่เหมาะสมกับสภาวะบางอย่าง จึงมีการนำแป้งมาปรับเปลี่ยนสมบัติ ลักษณะจำเพาะของแป้งนั้นอาจเป็นลักษณะพิเศษมาจากแหล่งที่ผลิต เช่น ขนาด รูปร่าง และการพองตัว แต่สิ่งที่แป้งทุกชนิดมีคล้ายกัน คือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีปัจจัยความร้อน แรงเฉือน และเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะแสดงการเปลี่ยนแปลงคล้าย ๆ กัน ถ้าสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติเหล่านี้ได้ จะทำให้เราสามารถนำแป้งไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มากขึ้น

แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่าง ๆ ต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำ ดังนั้นจึงมีการตัดแปรสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน [16]

2.4 แป้งท้าวยายม่อม

แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot starch) เป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในอเมริกาใต้ Arrowroot ในภาษาพื้นเมืองชื่อว่า Zulu มีพืชอีกชนิดหนึ่งที่มีลักษณะใกล้เคียงกับ Arrowroot คือ Amaranth มีภาษาพื้นเมืองว่า Sagu เนื่องจากพืชสองชนิดนี้มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก แป้งท้าวยายม่อมเป็น แป้งที่ทำมาจากหัวท้าวยายม่อม (*Tacca leontopetaloides*) ซึ่งเก็บหัวได้ปีละครั้ง จึงทำให้เป็นแป้งที่มีราคาแพง ลักษณะของแป้งเป็นผงสีขาวมีเม็ดสีเหลี่ยมเล็ก ๆ ทำให้ขนมมีลักษณะใส เช่นเดียวกับแป้งถั่ว เมื่อทำให้สุกด้วยการกวนกับน้ำด้วยไฟอ่อนปานกลาง แป้งละลายง่าย สุกง่าย เมื่อสุกจะเริ่มใส มีเงาในเนื้อแป้ง เหนียวปานกลาง เมื่อเย็นแล้ว แป้งรวมตัวเป็นก้อน ล่อนออกจากภาชนะได้ดี [17]



รูปที่ 2.6 ต้นท้าวยายม่อม [17]

ส่วนของต้นท้าวยายม่อมที่เก็บแป้งจะเป็นส่วนราก (Rhizome) และเป็นส่วนที่ขยายพันธุ์ได้ ต้นท้าวยายม่อมเป็นพืชล้มลุก อายุ 1 ปี ในฤดูร้อนใบจะแห้งหยุดการเจริญเติบโตสามารถเก็บเกี่ยวได้ เมื่อฝนตกใหม่ก็จะงอกเจริญเติบโตต่อไป ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง แต่ต้องผ่านขั้นตอนการล้างมากกว่า เพื่อหลีกเลี่ยงรสขมจากเปลือกนอกของหัว เม็ดแป้งมีขนาด 13-70 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีขนาด 5-35 ไมครอน สามารถสกัดแป้งได้ 25-30 % ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีร้อยละน้ำหนักแห้งของแป้งท้าวยายม่อม ดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีร้อยละน้ำหนักแห้งของแป้งท้าวยายม่อม [17]

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

ในประเทศไทยมีการปลูกต้นท้าวยายม่อมกันทั่วไปแต่ยังไม่ใช้พืชหลัก และยังไม่มีการผลิตแป้งในระดับอุตสาหกรรมท้องถิ่น มักเรียกว่า รากสาคุ ลักษณะพิเศษของแป้งท้าวยายม่อม คือ มีเม็ดแป้งที่ใหญ่และมีความแข็งแรงของเม็ดสูง ทำให้มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสภาวะ (Pasting temperature) สูง สมบัติของแป้งท้าวยายม่อม ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติของแป้งท้าวยายม่อม [17]

สมบัติ	แป้งท้าวยายม่อม
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	13-70
ขนาดอะไมโลส	3430
Pasting temperature	76.20
Peak viscosity (RVU)	420
Final viscosity (RVU)	271
Trough viscosity (RVU)	188
Onset temperature	71.12
Peak temperature	76.06
Enthalpy	16.60

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังและแป้งท้าวยายม่อม [17]

องค์ประกอบ (ร้อยละ) ชนิดของแป้ง	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งท้าวยายม่อม
อะไมโลส	16.4-17.0	18.0-24.5
อะไมโลเพคติน	83.0-83.6	75.4-81.0
ความชื้น	0.5	0.2
โปรตีน	0.3	0.05
คาร์โบไฮเดรต	85.0	99.3
ไขมัน	1.1	0.03
เถ้า	0.2	0.1
อื่นๆ	0.6	0.5

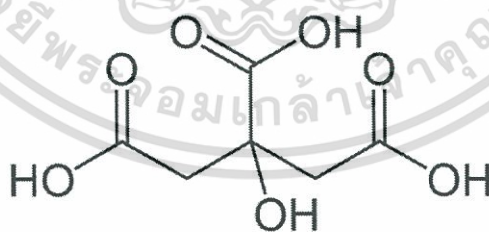
2.5 กรดซิตริก (Citric acid)

กรดซิตริก เป็นกรดอ่อน ใช้ประโยชน์เพื่อการถนอมอาหารโดยมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มรสชาติให้กับอาหารให้มีรสเปรี้ยว และมีกลิ่นหอมชวนรับประทาน ได้รับการยอมรับ โดยทั่วไปว่ามีความปลอดภัยในการบริโภค สามารถเติมลงไปในการปรุงอาหารโดยไม่เกิดอันตราย และสามารถย่อยสลายได้ง่ายและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม กรดซิตริกพบได้ตามธรรมชาติโดยทั่วไปในผักและผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว โดยเฉพาะพืชตระกูลมะนาว สับปะรด และส้ม ซึ่งมีสัดส่วนกรดซิตริกเป็นองค์ประกอบสูง ในระยะแรกๆ การผลิตกรดซิตริกทำโดยคั้นมะนาวโดยตรงเพื่อให้ได้น้ำมะนาว ซึ่งมีส่วนประกอบมีกรดซิตริกประมาณร้อยละ 7-9 แต่ในปัจจุบันมีโรงงานผลิตกรดซิตริกจำนวนน้อยกว่า 100 โรงงานทั่วโลก ซึ่งนิยมผลิตด้วยวิธีการสังเคราะห์กรดซิตริกจากน้ำตาลกลูโคสผ่านวิถีไกลโคไลซิส (Glycolysis pathway) ได้เป็นสารออกซาโลอะซิเตท (Oxaloacetate) แล้วสะสมเป็นกรดซิตริก โดยจุลินทรีย์ที่นิยมใช้ในการผลิตแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เชื้อรา (*Aspergillus Niger*) และยีสต์ (*Candida Lypolitica*) [18]

กรดซิตริกที่ผลิตในปัจจุบันอยู่ในรูปผลึกโมโนไฮเดรต (Monohydrate ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$)) ซึ่งมีน้ำประกอบอยู่ 1 โมเลกุล มีสีใส ไม่มีกลิ่น มีรสเปรี้ยว มีความสามารถละลายในน้ำเย็นมากกว่าการละลายในน้ำร้อน โดยกรดซิตริกมีสมบัติทางเคมี ดังตารางที่ 2.6 และโครงสร้างของกรดซิตริก ดังรูปที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางเคมีของกรดซิตริก [18]

รายละเอียด	ผลึกในรูปที่ปราศจากน้ำ	โมโนไฮเดรต
น้ำหนักโมเลกุล	192.12	210.14
ความถ่วงจำเพาะ	1.665	1.542
จุดหลอมเหลว	153 °C	70-75 °C
จุดเดือด	-	175 °C



รูปที่ 2.7 โครงสร้างกรดซิตริก [19]

กรดซิตริกมีคุณสมบัติที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ในหลายทาง นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม เพื่อเป็นสารให้กลิ่นรสในผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูป นอกจากนั้นยังใช้เป็นสารลดความฝืด ลดการตกผลึกของน้ำผลไม้ และสามารถควบคุมระดับค่า pH ในผลิตภัณฑ์อาหารทำให้จุลินทรีย์ที่เป็นโทษไม่สามารถเติบโตได้จึงเป็นที่นิยมใช้เพื่อการถนอมอาหารและเครื่องดื่มกรดซิตริกยังมีสมบัติแก้น้ำกระด้างโดยกรดซิตริกจะจับกับโลหะหนักในน้ำโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน กลายเป็นตะกอนซิตริกที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Citric Complex) ด้วยสมบัติดังกล่าวจึงนิยมนำมาใช้ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำสบู่และน้ำยาล้างจาน กรดซิตริกยังมีสมบัติในการขจัดคราบสนิม คราบสกปรกที่พื้น และผนัง จึงนิยมนำมาใช้ขจัดสนิมในอุปกรณ์วัสดุเหล็กในภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ด้วย [18]

2.6 เส้นใย (Fiber)

เส้นใย หมายถึง สิ่งที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวเรียวยาว องค์ประกอบของเซลล์ ส่วนใหญ่เป็น เซลลูโลส เกิดจากการรวมตัวของพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) ของกลูโคส (glucose) ซึ่ง โมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัวกันในผนังเซลล์ของพืชเป็นหน่วยเส้นใยขนาดเล็กมาก เกิดการเกาะจับตัว กันเป็นเส้นใยขึ้น

2.6.1 ประเภทของเส้นใย

เส้นใยจากธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยที่มีอยู่ในธรรมชาติ

-เส้นใยจากพืช ได้แก่ เส้นใยจากเซลลูโลส เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ซึ่งได้จากส่วน ต่างๆของพืช เช่น ป่าน ปอ ลินิน ใยสับปะรด ใยมะพร้าว ฝ้าย หนุ่น เป็นต้น

-เส้นใยจากสัตว์ ได้แก่ เส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ (Wool) ไหม (Silk) ผม (Hair) เล็บ เขา ใย ไหม เป็นต้น เส้นใยเหล่านี้ มีสมบัติ คือ เมื่อเปียกน้ำ ความเหนียวและความแข็งแรงจะลดลง ถ้าสัมผัส แสงแดดนานๆ จะสลายตัว

-เส้นใยจากสินแร่ เช่น แร่ใยหิน (Asbestos) ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี ทนไฟ ไม่นำ ไฟฟ้า

เส้นใยสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารอนินทรีย์หรือสารอินทรีย์ใช้ ทดแทนเส้นใยจากธรรมชาติ

-เส้นใยพอลิเอสเตอร์ เช่น เทโตรอน ใช้บรรจุในหมอน เพราะมีความฟูยืดหยุ่นไม่เป็นอันตราย ต่อผิวหนัง สำหรับดาครอน (Dacron) เป็นเส้นใยสังเคราะห์พวกพอลิเอสเตอร์อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกอีก ชื่อหนึ่งว่า Mylar มีประโยชน์ทำเส้นใยทำเชือก และฟิล์ม

-เส้นใยพอลิเอไมด์ เช่น ไนลอน (Nylon) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์มีหลายชนิด เช่น ไนลอน 6,6 ไนลอน 6,10 ไนลอน 6 ซึ่งตัวเลขที่เขียนกำกับหลังชื่อแสดงจำนวนคาร์บอนอะตอมในมอนอเมอร์ ของเอมีนและกรดคาร์บอกซิลิก ไนลอนจัดเป็นพวกเทอร์มอพลาสติก มีความแข็งแรงมากกว่าพอลิเมอร์ แบบเติมชนิดอื่น เพราะมีแรงดึงดูดที่แข็งแรงของพันธะเพปไทด์ เป็นสารที่ติดไฟยาก เพราะไนลอนมี พันธะ C-H ในโมเลกุลน้อยกว่าพอลิเมอร์แบบเติมชนิดอื่น ไนลอนสามารถทดสอบโดยผสมโซดาหลอม (NaOH + Ca(OH)₂) หรือเผาจะให้ก๊าซแอมโมเนีย ประโยชน์ของไนลอน ใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีตาร์ สายเอ็น ไม้แร็กเก็ต เป็นต้น

-เส้นใยอะคริลิก เช่น ใช้ในการทำเสื้อผ้า ผ่านววม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคากันแดด ผ้าม่าน พรหม เป็นต้น

-เซลลูโลสแอซีเตต เป็นพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากการใช้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับกรดอะซิติก เข้มข้น โดยมีกรดซัลฟูริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้ประโยชน์จากเซลลูโลสอะซีเตต เช่น ผลิตเป็นเส้น ใยอาร์แนล 60 ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ

เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เป็นเส้นใยที่ได้จากการนำสารจากธรรมชาติ มาปรับปรุงโครงสร้างให้เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น การนำเซลลูโลสจากพืชมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีบางชนิด เส้นใยกึ่งสังเคราะห์ นำมาใช้ประโยชน์ได้มากกว่าเส้นใยธรรมชาติ ตัวอย่างเส้นใยกึ่งสังเคราะห์ เช่น วิสคอสเรยอน (Viscose rayon) เป็นต้น

2.6.2 สมบัติของเส้นใย

โครงสร้างทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และการเรียงตัวของโมเลกุลของเส้นใย เป็นสมบัติที่มีผลโดยตรงต่อสมบัติของผ้าที่ทำขึ้นจากเส้นใยนั้นๆ เส้นใยโดยทั่วไปควรมีสมบัติดังนี้

- มีความแข็งแรง และทนทาน (Strength and durability)
- สามารถปั่นได้ (Can be spun)
- มีความสามารถในการดูดซับดี (Absorbency)

โดยทั่วไปผ้าที่ผลิตจากเส้นใยที่แข็งแรงจะมีความแข็งแรงทนทานตามไปด้วย หรือผ้าที่ผลิตขึ้นจากเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้ดีจะส่งผลให้ผ้าสามารถดูดซับน้ำและความชื้นได้ดี เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในส่วนที่มีการสัมผัสกับผิวและดูดซับน้ำ เช่น ผ้าเช็ดตัว ผ้าอ้อม เป็นต้น ดังนั้น การทราบสมบัติของเส้นใย จะทำให้สามารถทำนายสมบัติของผ้าที่มีเส้นใยนั้นๆ ได้ และทำให้ผู้ใช้สามารถเลือกชนิดของผลิตภัณฑ์ประเภทได้ถูกต้องตามความต้องการที่จะนำไปใช้งาน

2.6.3 ประโยชน์ของเส้นใย

ประโยชน์ของเส้นใยธรรมชาติ

1. เส้นใยที่ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ คือ พืชที่ให้เส้นใยที่สามารถนำไปปั่นเป็นด้าย เช่น ฝ้าย ปอแก้ว ปอกระเจา ป่านลินิน ป่านรามี่ กระชง
2. เส้นใยที่ชั้ยดเป็นเส้นใย เช่น ส่วนของหมอน พูก ที่นอน ฝ้านวม ได้แก่ นุ่น ฝ้าย จี๊ว มะพร้าว
3. เส้นใยที่ใช้ทำกระดาษ หรือเยื่อกระดาษ เช่น ปอแก้ว ปอกระเจา ปอแก้วควบา ใผ่ ยูคาลิปตัส สน พางข้าว หญ้าจอร์จบ
4. เส้นใยที่ใช้ทำเชือก เป็นลักษณะรวมเส้นใย หรือกลุ่มเส้นใยขนาดใหญ่ ทำเกลียวถัก หรือพัน ทำเป็นเชือก เช่น ปอแก้ว มะพร้าว ป่านศรนารายณ์
5. ใช้ทำแปรง ทอเป็นผืนแบบเสื่อ เช่น ป่านศรนารายณ์ กก มะพร้าว

ประโยชน์ของเส้นใยสังเคราะห์

1. เส้นใยพอลิเอสเตอร์ ใช้ในการทำเชือก ด้าย แห อวน
2. เส้นใยพอลิเอไมด์ ใช้ในการทำเสื้อผ้า ถุงเท้า ถุงน่อง ขนแปรงต่างๆ สายกีต้าร์ สายเอ็น ไม้แร็กเก็ต
3. เส้นใยอะคริลิก ใช้ในการทำเสื้อผ้า ฝ้านวม ผ้าขนแกะเทียม ร่มชายหาด หลังคากันแดด ฝ้าน่าน
4. เซลลูโลสอะซิเตด ใช้ผลิตเป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ทำแผงสวิทช์และหุ้มสายไฟ

2.7 เส้นใยนุ่น (Kapok fiber)

ใยนุ่น ได้จากส่วนที่เป็นเมล็ดของต้นนุ่น (Seed fiber) ปุยนุ่นมีลักษณะเช่นเดียวกับปุยฝ้าย เป็นไม้ยืนต้นชอบขึ้นอยู่ในแถบร้อน ต้นสูงประมาณ 50 ฟุต หรือมากกว่านั้น มีผลที่เรียกว่า ฝัก มีลักษณะยาวและใหญ่ ปลายเรียวเล็กลง เมื่อฝักแก่หรือสุกกก็หล่นเองและแตกออก แล้วนำปุยนุ่น แยกออกจากเมล็ด เมล็ดแยกออกจากปุยได้ง่าย นุ่นมีน้ำหนักเบา ไม่เปียกน้ำง่าย นิยมใช้เป็นวัสดุใส่หมอน ที่นอน และเครื่องเรือนอื่น ๆ เนื่องจากเส้นใยมีความเหนียวน้อย และมีเส้นใยสั้นมาก ไม่สามารถนำมาปั่นเป็นด้ายหรือทอผ้าได้ดี จึงไม่นิยมนำเส้นใยมาทอผ้า [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบของเส้นใยุ่น [21]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
เซลลูโลส	64
เฮมิเซลลูโลส	23
ลิกนิน	13
ความชื้น	8.6
ซีเถ้า	1.4-3.5
การละลายน้ำ	4.7-9.7
แวกซ์	0.8

2.8 วัสดุเชิงประกอบ

2.8.1 นิยามของวัสดุเชิงประกอบ

วัสดุเชิงประกอบหรือคอมพอสิต (Composite) คือ วัสดุที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปโดยไม่เกิดการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้สมบัติของคอมพอสิตที่เกิดขึ้นมีสมบัติร่วมกันของวัสดุที่เป็นองค์ประกอบ คอมพอสิตจะประกอบด้วยวัสดุที่เป็นเนื้อหลักและเป็นวัสดุภาคต่อเนื้อเรียกว่า เมทริกซ์ (Matrix) และวัสดุส่วนเหลือที่กระจายตัวอยู่ในวัสดุเนื้อหลักนั้นเรียกว่า สารเสริมแรง (Reinforcement) โดยเมทริกซ์จะทำหน้าที่ห่อหุ้มสารเสริมแรง และทำให้คอมพอสิตเป็นรูปร่างขึ้น ส่วนสารเสริมแรงจะทำหน้าที่เสริมสมบัติให้เมทริกซ์และทำให้คอมพอสิตมีสมบัติตามต้องการ จำแนกคอมพอสิตตามชนิดของวัสดุที่เป็นเมทริกซ์สามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภท

1. คอมพอสิตพอลิเมอร์ (Polymer matrix composite, PMC)

PMC มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์ และมีเส้นใยที่เป็นแก้ว เซรามิกส์ และ โลหะเป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของเมทริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์ให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น โดยเส้นใยเสริมแรงทำหน้าที่เป็นตัวรับแรง ในขณะที่เนื้อพอลิเมอร์ทำหน้าที่ในการกระจายแรงไปให้เส้นใยต่างๆ

2. คอมพอสิตโลหะ (Metal matrix composite, MMC)

MMC มีโลหะเป็นเมทริกซ์ และมีเส้นใยหรืออนุภาคที่ทำมาจากแก้วและเซรามิกส์ เป็นวัสดุเสริมแรง โดยใช้ลักษณะเด่นของเซรามิกส์ที่มีความแข็งแรงสูงและมีสมบัติที่ดีที่อุณหภูมิสูงมาเสริมให้กับเมทริกซ์ที่เป็นโลหะให้มีความต้านทานการสึกหรอที่ดีขึ้นและเพิ่มสมบัติที่อุณหภูมิสูงให้โลหะ

3. คอมพอสิตเซรามิกส์ (Ceramic matrix composite, CMC)

CMC เซรามิกส์เป็นเมทริกซ์ และมีเส้นใยที่เป็นโลหะและพอลิเมอร์เป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อเพิ่มความแกร่งให้กับเมทริกซ์ที่เป็นเซรามิกส์ ซึ่งเดิมมีความแข็งแรงอยู่แล้วทำให้ความแกร่งเพิ่มขึ้น และยากต่อการวิบัติ [22-23]

และสามารถจำแนกตามลักษณะของสารเสริมแรง ได้ 3 ประเภท

1. คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยอนุภาค

คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยอนุภาค คือ มีอนุภาคของวัสดุใดๆกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง ซึ่งวัสดุเสริมแรงนี้มีรูปร่างได้หลายแบบ เช่น เป็นแผ่นบาง (Flake) เป็นอนุภาค (Particle) หรือ เป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น

2. คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย

คอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใย เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนัก ลักษณะเฉพาะดังกล่าวสามารถแสดงได้ในรูปของค่าความแข็งแรงจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างความต้านทานแรงดึงกับความถ่วงจำเพาะ และในรูปของมอดุลัสจำเพาะ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมอดุลัสยืดหยุ่นกับความถ่วงจำเพาะ

3. คอมพอสิตโครงสร้าง

คอมพอสิตโครงสร้างสามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียวและสมบัติของคอมพอสิต โครงสร้างนี้ ขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้นและรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกัน สามารถแบ่งวัสดุเชิงประกอบโครงสร้างได้เป็น 2 ประเภท คือ คอมพอสิตแบบชั้น (Laminar composite) และ คอมพอสิตแบบประกบ (Sandwich panel) [24]

2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของคอมพอสิต

1. สมบัติของเส้นใยเสริมแรง

2. สมบัติของพอลิเมอร์

3. สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง (Fibre Volume Fraction : FVF) เนื่องจากวัสดุที่เป็นเส้นใยเสริมแรง มักมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าพอลิเมอร์ ดังนั้นหากคอมพอสิตมีเส้นใยเสริมแรงมากขึ้น จะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่การผสมเส้นใยเสริมแรงกับพอลิเมอร์ มีข้อจำกัดเนื่องจากเส้นใยเสริมแรงควรมีเนื้อพอลิเมอร์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ

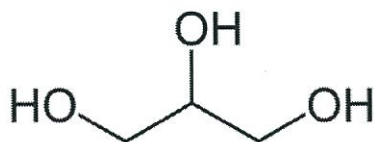
4. โดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์คอมพอสิต เช่น เรือไฟเบอร์กลาสจะนิยมขึ้นรูปด้วยวิธีที่เรียกว่า แฮนด์เลย์อัป (Hand lay-up) ซึ่งมีสัดส่วนของเส้นใยเสริมแรงประมาณ 30-40 % แตกต่างจากชิ้นงานคอมพอสิตที่ใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศที่มีสัดส่วนของเส้นใยประมาณ 70 % การจัดเรียงตัว (Orientation) ของเส้นใยในคอมพอสิต เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงให้ค่าสมบัติเชิงกลตามแนวยาวสูงกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากเส้นใยในคอมพอสิตมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตที่แสดงออกมาจะมีค่าแตกต่างกัน ตามแนวแรงที่กระทำ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาตั้งแต่การออกแบบคือ ขนาดและลักษณะแรงที่กระทำต่อชิ้นงาน [25]

2.9 พลาสติไซเซอร์

พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารที่ใส่ในพอลิเมอร์หรือผลิตภัณฑ์พลาสติก เป็นการลดอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ให้ต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ทำให้พอลิเมอร์มีความยืดหยุ่น อ่อนตัวมากขึ้น ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหล และลดความหนืดของพอลิเมอร์ ส่งผลให้ขึ้นรูปง่าย อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ทนต่อการกัดกร่อน น้ำมัน และผงซักฟอก พลาสติไซเซอร์จึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างยิ่ง [26]

2.9.1 กลีเซอรอล (Glycerol)

กลีเซอรอล อาจเรียกว่า กลีเซอริน (Glycerine หรือ Glycerin) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นพอลิโออล (polyol) เป็นสารที่เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวานเล็กน้อย ในโครงสร้างโมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) 3 หมู่ ดังรูปที่ 2.7 จึงทำให้ละลายในน้ำได้ดี มีสมบัติในการดูดจับน้ำได้ดี (Hydroscopic) [27]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของกลีเซอรอล [28]

2.10 สารหล่อลื่น (Lubricants)

สารหล่อลื่น เป็นสารที่ช่วยทำให้แรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลลดลง ช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ ช่วยลดอุณหภูมิของกระบวนการ ทำให้ลดการเสียหายจากแรงเฉือน โดยสารหล่อลื่นจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricants)

เป็นสารที่ละลายได้ในพอลิเมอร์ มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ช่วยทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อยลง เกิดการไหลได้ดี ส่งผลให้ความหนืดลดลง เช่น โกลคอลล มอนอสเตียเรท (Glycol monostearate : GMS)

2. สารหล่อลื่นภายนอก (External lubricants)

เป็นสารที่ละลายเข้ากับพอลิเมอร์ได้เพียงครึ่งหนึ่งหรือไม่เข้ากันเลย (Semi-compatible หรือ Incompatible) ทำหน้าที่ช่วยลดแรงเสียดทานและการยึดเกาะระหว่างพอลิเมอร์ และผิวของอุปกรณ์ เช่น พาราฟินแวกซ์ (Paraffin wax) กรดสเตียริก (Stearic acid) [29]

2.10.1 แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium Stearate)

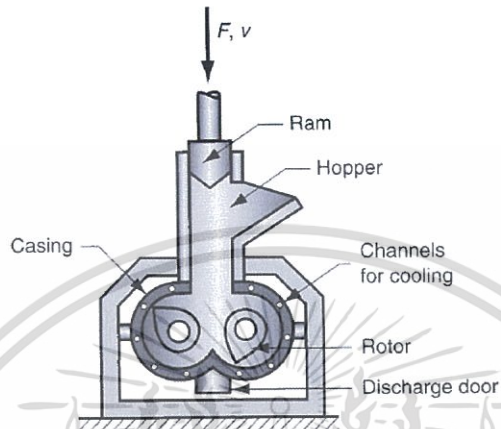
แมกนีเซียมสเตียเรท อาจเรียกว่า กรดสเตียริก (Octadecanoic acid) หรือเกลือแมกนีเซียม (Magnesium salt) มีลักษณะเป็นผงสีขาว เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง มีสูตรทางเคมีคือ $Mg(C_{18}H_{35}O_2)_2$ ซึ่งเป็นเกลือของกรดสเตียริก (Stearic acid) ในรูปของแมกนีเซียม (Mg^{2+}) มีจุดหลอมเหลวที่ 120 องศาเซลเซียส ไม่ละลายในน้ำ มีการใช้งานทางด้านเภสัชกรรม ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง และด้านอาหาร [30]

2.11 เครื่องผสมระบบปิดหรือเครื่องผสมภายใน (Internal mixer)

โดยทั่วไปเครื่องผสมระบบปิดมีองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วนได้แก่ ห้องผสม (Chamber) ตัวบดผสมหรือโรเตอร์ (Rotor) แท่งกดหรือแรม (Ram) และระบบหล่อเย็น (Cooling system) หลักการคือ โรเตอร์ทั้งสองของเครื่องผสมระบบปิดจะเป็นแบบไม่คาบเกี่ยวกัน ที่เรียกว่า “Non-intermeshing” หมุนด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน การทำงานของเครื่องผสมเพื่อให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

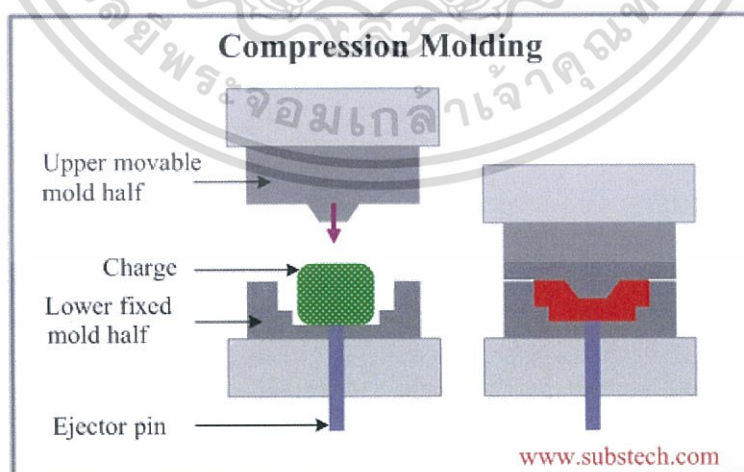
การผสมคลุกเคล้าของสารส่วนใหญ่จะมาจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างปีกของโรเตอร์กับผนังของห้องผสม สารจะถูกบีบขนาดผสมกันในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมอย่างเหมาะสม ทำให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 2.9 [31]



รูปที่ 2.9 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) [31]

2.12 การอัดขึ้นรูป (Compression molding)

กระบวนการขึ้นรูปโดยการอัดขึ้นรูปที่นิยมใช้กับใช้พลาสติกชนิดเทอร์โมเซต เช่น เมลามีน (Melamine) และใช้ในการผลิตชิ้นงานที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก โดยจะนำวัตถุดิบใส่ลงในแม่พิมพ์แล้ว ทำการปิดแม่พิมพ์โดยใช้ความดันสูงพร้อมกับให้ความร้อน เพื่อให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลวและแพร่ตัวไปตามช่องว่างของแม่พิมพ์ เมื่อพลาสติกแข็งตัวจึงปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 2.10 [32]



รูปที่ 2.10 การอัดขึ้นรูป (Compression molding) [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 การวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย

2.13.1 การวิเคราะห์สมดุลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสถานะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสถานะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนที่สามารถวิเคราะห์ได้ โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ใช้ในการหาน้ำหนักแห้ง สมดุลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถทำได้ดังนี้ [33]

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ C_g คือ คาร์บอนในสถานะก๊าซ

C_s คือ คาร์บอนที่ละลายได้

C_m คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้น ร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ C_i คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

2.13.2 การวิเคราะห์การดูดซับความชื้น

การดูดซับความชื้น เป็นการทดสอบการดูดซับความชื้นของส่วนผสม เนื่องจากความชื้นเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่จะต้องพิจารณา ดังนั้นจึงต้องมีการวิเคราะห์การดูดซับความชื้น เพื่อให้มีระดับความชื้น ที่เหมาะสมที่สุด

$$\text{ร้อยละการดูดความชื้น} = \frac{(W_1 - W_0)}{W_0} \times 100$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักแผ่นทดสอบหลังจากดูดซับความชื้น

W_0 คือ น้ำหนักแผ่นทดสอบเริ่มต้น [34]

2.13.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง เป็นการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่าง ที่ทำการสำรวจ ศึกษาสัญญาณและลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง ตรวจสอบการเรียงตัวของผลิตภัณฑ์ด้วยระบบการรับสัญญาณเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ ซึ่งภาพที่ได้นี้เป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ [35]

2.13.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสาร อาศัยหลักการการสั่น การหมุนของพันธะในโมเลกุลแล้วเกิดการดูดกลืนแสง เครื่องมือจะวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่ หรือความยาวคลื่น (Wave number) ได้เป็นสเปกตรัม โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงกลางอินฟราเรด ซึ่งในแต่ละพันธะของหมู่ฟังก์ชันจะแสดงค่าความยาวคลื่นเฉพาะตัว [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13.5 การวิเคราะห์ทางความร้อน

เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ เป็นกลุ่มเทคนิคที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุต่างๆ เช่น พอลิเมอร์ สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ เซรามิกส์ โลหะ และวัสดุทั่วไปอื่นๆ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุกับอุณหภูมิและเวลา ผลการวิเคราะห์จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติทางความร้อน เสถียรภาพต่อความร้อนโดยทำการศึกษาด้วยเทคนิคดังนี้

- เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeters, DSC) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับตัวอย่างทดสอบ เมื่อให้ความร้อนเข้าไปในระบบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง ใช้ในการศึกษาอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) การหลอมเหลว (Melting) กระบวนการตกผลึก (Crystallization process) และความจุความร้อน (Heat capacity)

- เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis, TGA) เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน ใช้ในการศึกษาสมบัติของตัวอย่าง เช่น วิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว การสูญเสียน้ำหนัก หาสารเจือปนในตัวอย่าง เป็นต้น [35]

2.13.6 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของโครงสร้างผลึก

เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของโครงสร้างผลึก (X-ray Diffractometer, XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง อาศัยหลักการของ Bragg's law คือ $2d \sin \theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้เครื่องตรวจจับรับความเข้มของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ ผลการวิเคราะห์ของ XRD จะสามารถหาค่าประกอบของตัวอย่าง ปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่าง คำนวณหาขนาดอนุภาคของแต่ละหน่วยเซลล์ ความเครียดของตัวอย่าง ค่าความเป็นผลึกของตัวอย่าง [35]

2.13.7 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

การย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน วิธีการชั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ตัดน้ำหนักที่หายไป เพื่อหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพคำนวณได้จากร้อยละน้ำหนักที่หายไป [36]

$$\text{ร้อยละน้ำหนักที่หายไป(\%)} = \frac{(W_0 - W_1)}{W_1} \times 100$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักแผ่นทดสอบเมื่อระยะเวลาผ่านไปตามที่กำหนด

W_0 คือ น้ำหนักแผ่นทดสอบเริ่มต้น

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.14.1 กัญญาภรณ์ แทนเพชร และคณะ ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกและกรดมาลิก โดยสัดส่วนของกรดซิตริก และกรดมาลิกเป็น 0 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 % ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากนั้นนำฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซไปศึกษาสมบัติต่างๆ จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน พบพีกที่ 1700 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีก C=O stretching ของหมู่คาร์บอนิลในกรดซิตริก และกรดมาลิก จากสัญญาณวิทยา พบว่า ชิ้นงานมีพื้นผิวที่เรียบขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซิตริก และกรดมาลิก จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า เมื่อปริมาณกรดซิตริกและกรดมาลิกเพิ่มขึ้น ความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุด มีค่ามากขึ้น และความเครียด ณ จุดแรงดึงสูงสุดของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกมีค่าสูงกว่ากรดมาลิก ส่วนการดูดซับน้ำ พบว่า มีการดูดซับน้ำเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การย่อยสลายโดยการฝังดิน มีการย่อยสลายที่เร็วกว่าฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ไม่ได้ปรับปรุง และการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่า กรดซิตริก และกรดมาลิก ไม่มีผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซ [6]

2.14.2 Awadhiya, A. และคณะ งานวิจัยนี้ศึกษาการเชื่อมโยงของพลาสติกชีวภาพอะกาโลส (Agarose) โดยใช้กรดซิตริก (Citric acid) เป็นตัวเชื่อมโยง โดยการเตรียมแผ่นฟิล์มอะกาโลส โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซิตริกต่างกันตั้งแต่ 0% ถึง 50% (W/W ของกรดซิตริก) และอุณหภูมิเชื่อมโยงตั้งแต่ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $165\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากการทดลองพบว่าความต้านทานแรงดึงของฟิล์มพลาสติกชีวภาพอะกาโลสเพิ่มขึ้น 25.1 MPa และมีความต้านทานแรงดึงสูงสุด 52.7 MPa ของฟิล์มที่มีกรดซิตริกที่เชื่อมขวาง พลาสติกชีวภาพของอะกาโลสที่เชื่อมโยงดูดซับน้ำ 11.5% ผลการตรวจวัดความร้อน (Thermogravimetric, TGA) พบว่าพลาสติกชีวภาพของอะกาโลสที่เชื่อมโยงสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ($> 450\text{ }^{\circ}\text{C}$) มากกว่าฟิล์มชีวภาพ นอกจากนี้ฟิล์มพลาสติกชีวภาพอะกาโลสที่เชื่อมโยงสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ อัตราการย่อยสลายต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่เชื่อมโยง [37]

2.14.3 Pornsuksomboon K. และคณะ ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของโฟมแป้งจากแป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรด้วยกรดซิตริก โดยในการทดลองนี้ทำการผสมแป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ที่ไม่ได้ดัดแปรกับแป้งมันสำปะหลังที่ถูกดัดแปรด้วยกรดซิตริก ในสัดส่วนต่างๆ คือ 100/0 80/20 60/40 50/50 40/60 20/80 และ 0/100 โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และแมกนีเซียมสเตียเรทเป็นสารหล่อลื่น ทำการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกดอัดขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 5 นาที ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สัญญาณวิทยา และการดูดซับน้ำ ผลการทดลองพบว่า การผสมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับแป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์ ไม่มีผลต่อสัญญาณวิทยา โดยโฟมแป้งที่ได้มีลักษณะเป็น 2 ชั้น ชั้นนอกประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นส่วนชั้นในมีรูพรุนขนาดใหญ่กว่า จากผลการดูดซับน้ำพบว่า แป้งมันสำปะหลังบริสุทธิ์มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำถึง 14% เมื่อปริมาณแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมากขึ้นส่งผลให้ การดูดซับน้ำลดลง โดยที่สัดส่วนระหว่างแป้งบริสุทธิ์กับแป้งดัดแปร 40/60 มีค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุด คือ 4.67% [38]

2.14.4 Yu, J. และคณะ ศึกษาผลของการใช้กรดซิตริกต่อสมบัติของ TPS ที่ปรับปรุงด้วยกลีเซอรอล โดยนำแป้งข้าวโพดมาผสมกับกลีเซอรอล สัดส่วนกลีเซอรอล : แป้งข้าวโพดเป็น 30 : 100 แล้วเก็บไว้ข้ามคืนได้แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ผสมกลีเซอรอล (Glycerol-plasticized TPS, GPTPS) นำมาผสมกับกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.6 1 2 3 (% w/w) ได้แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ดัดแปรด้วยกรดซิตริก (Citric acid-modified GPTPS, CATPS) โดยขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด ได้เป็นแผ่นซีทหนา 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่า กรดซิตริกสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับแป้งได้ดีกว่ากลีเซอรอล ทำให้กรดซิตริกสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับแป้งได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งช่วยป้องกันไม่ให้อ่างเกิดริ้วรอยแตกฉาน กรดซิตริกสามารถลดความหนืด และเพิ่มการไหลของ TPS อีกทั้งยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) และเปอร์เซ็นต์การยืด (Elongation) ของ GPTPS แต่ลดความเค้นแรงดึง (Tensile stress) [39]

2.14.5 Prachayawarakorn J. และคณะ ศึกษาผลของใช้เส้นใยปอและเส้นใยุ่นที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตแป้งมันสำปะหลัง (Thermoplastic cassava starch, TPCS) ได้จากการนำแป้งมันสำปะหลังมาผสมกับกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์แล้วใส่ส่วนเสริมแรงเป็นเส้นใยปอและเส้นใยุ่นผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด จากนั้นขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปเมื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า ความเค้น ณ แรงจุดสูงสุด (Stress at maximum load) และมอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น รวมถึงค่าความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Strain at maximum load) ลดลง แต่ TPCS ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น มีค่าความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และค่ามอดุลัสที่สูงกว่า TPCS ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปอ เพราะเส้นใยุ่นมีความหนาแน่นต่ำกว่าเส้นใยปอ จึงสามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ได้ดีกว่า พิจารณาได้จากการทดสอบทางสัณฐานวิทยา พบว่าเมทริกซ์ของแป้งและเส้นใยทั้งสองชนิดมีการยึดเกาะที่ดี นอกจากนี้คอมพอสิตที่ได้มีการดูดซับน้ำลดลง และเมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของ TPCS เพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการเติมเส้นใยทั้งสองชนิด โดยอุณหภูมิการสลายตัวของเมทริกซ์ TPCS นั้นไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อใส่เส้นใยปอ แต่ลดลงเมื่อใส่เส้นใยุ่น [9]

2.14.6 แพรวลลิตา บุญกัญหา และคณะ ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งถั่วเหลืองโดยใช้เส้นใยฝ้าย และเส้นไหม เป็นส่วนเสริมแรงโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งถั่วเหลือง และผลของปริมาณเส้นใยฝ้ายและเส้นใยไหมที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช การเตรียมทำได้โดยการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป นำเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติการดูดซับน้ำ และสมบัติการย่อยสลาย จากการทดสอบพบว่า การดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่อัตราส่วน 100 : 0 ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้ายมีค่าต่ำสุด เส้นใยฝ้าย และเส้นใยไหมสามารถเสริมแรงเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ และสมบัติเชิงกลโดยรวมสูงที่สุด พบได้ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังที่ผสมเส้นใยฝ้าย 10% โดยน้ำหนัก จากสัณฐานวิทยา พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งถั่วเหลือง ทำให้พื้นผิวชิ้นงานมีลักษณะขรุขระ นอกจากนี้สามารถพบเมทริกซ์ของแป้งปกคลุมพื้นผิวของเส้นใยฝ้ายและเส้นใยไหม จาก TGA เทอร์โมแกรม พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชทุกตัวอย่าง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการเติมเส้นใยฝ้ายหรือเส้นใยไหม นอกจากนี้โปรตีนที่มีอยู่ในแป้งถั่วเหลือง และเส้นใยไหมสามารถเพิ่มการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.7 Yu, J. และคณะ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของกรดซิตริก (Citric acid) ที่มีผลต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งข้าวโพด (Corn starch) โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear low-density Polyethylene, LLDPE) ในอัตราส่วน TPS : LLDPE : CA = 100 : 100 : 1 100 : 100 : 2 100 : 100 : 3 พบว่าการใช้กรดซิตริกช่วยปรับปรุงการแพร่กระจายและการพลาสติกไซเซชันของแป้ง ซึ่งแสดงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ในขณะเดียวกันการเพิ่ม CA ที่ 3% โดยน้ำหนักของ LLDPE ส่งผลให้สมบัติเชิงกลโดยรวมลดลง สำหรับการศึกษาสมบัติการไหลนั้น พบว่ากรดซิตริกมีผลทำให้ค่าความหนืดลดลง และช่วยปรับปรุงสมบัติทางการไหลของเทอร์โมพลาสติกที่ผสมด้วย LLDPE จากเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี พบว่ากรดซิตริกสามารถทำให้โมเลกุลของแป้งที่มีปฏิริยาต่อกันนั้นอ่อนลง และช่วยปรับปรุงสมบัติการพลาสติกไซเซชันของแป้ง นอกจากนี้กรดซิตริกสามารถปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำได้อีกด้วย [40]

2.14.8 Mei, J.Q. และคณะ ศึกษาผลของการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) ของกรดซิตริกที่มีผลต่อสมบัติการย่อยสลาย (Digestibility) ได้ โครงสร้างและสมบัติทางเคมีกายภาพ (Physicochemical properties) ของแป้งมันสำปะหลังใช้กรดซิตริก (10-40% ของน้ำหนักแห้งของแป้ง) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดซิตริกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับแป้งต้านทานการย่อย (Resistant starch, RS) และแป้งที่ถูกย่อยอย่างช้าๆ (Slowly digestible starch, SDS) เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้งถูกแทนที่ด้วยแอนไฮไดรด์ซิตริก เพื่อสร้างแป้งซิเทรต ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างแบบร่างแห (Cross-linked) ซึ่ง SDS และ RS สอดคล้องกับองศาการแทนที่ (Degree of substitution, DS) เมื่อ DS เพิ่มขึ้น โดยส่งผลให้การบวมตัวและการละลายของแป้งที่ผสมกรดซิตริกลดลง นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น เจลของแป้งที่ผสมกรดซิตริกนั้น มีการคงตัวหลังเกิดการแช่แข็งแล้วละลาย (Freeze-thaw Stability) ที่ดีขึ้น ผลการศึกษาเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดซิตริกทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีผลต่อการย่อยสลายได้[41]

2.14.9 Gilfillan, W.N. และคณะ ศึกษาคอมพอสิตแป้งที่มีกรดแอโคนิก (Aconitic acid, AcA) ซึ่งกรดแอโคนิกนั้น เป็นไตรคาร์บอกซิลิก (Tricarboxylic acid) เหมือนกับกรดซิตริก แต่มีพันธะคู่คาร์บอน/คาร์บอน (C=C) ด้วย ทำการเตรียมด้วย 0 2 5 10 และ 15 wt % AcA ของ % น้ำหนักแป้ง AcA ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยง และยังเป็นพลาสติกไซเซออร์ (Plasticizing agent) ที่ดีที่ 5% AcA มีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงได้ดีที่สุด มีความสามารถในการละลายได้น้อยที่สุด และลดสัมประสิทธิ์การบวมประมาณ 3 เท่าและ 2.4 เท่า นอกจากนี้การยืดตัวของฟิล์ม (Elongation) เพิ่มขึ้นประมาณ 35 เท่า (เมื่อเปรียบเทียบกับที่ควบคุม) ที่ 15% AcA เป็นผลมาจากการที่ AcA ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ อย่างไรก็ตาม พบว่าความต้านทานแรงดึงลดลง และเสถียรภาพทางความร้อนลดลงเมื่อ % AcA เพิ่มขึ้น [42]

2.14.10 จันจิรา จันทร์แจ่ม และคณะ ศึกษาสมบัติการย่อยสลายที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม (Thermoplastic arrowroot starch, TPAS) เสริมแรงด้วยเส้นใยพูนุ่ โดยใช้กรดสเตียริกในปริมาณที่แตกต่างกันด้วยเครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากการศึกษาหมู่ฟังก์ชันพบว่ามีการเกิดพันธะที่ตำแหน่งประมาณ 1738 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบ C=O stretching ที่พบในกรดสเตียริกและเส้นใยพูนุ่ที่มีขี้ผึ้ง (Wax) เป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ยังพบว่าการสั่นของ O-H stretching และ O-H bending มีการเคลื่อนไปยังตำแหน่งของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขคลื่นที่ลดลง แสดงถึงพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่ระหว่างแป้งท้าวยายม่อมกับเส้นใยนุ่น และกรดสเตียริก จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่า เส้นใยนุ่นมีการกระจายตัวและเข้ากันดีกับTPAS แต่การใช้กรดสเตียริกทำให้เข้ากันได้ไม่ดี จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า ปริมาณเส้นใยนุ่นมากขึ้น ทำให้แรงดึงความแข็งแรงดึง ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด และมอดุลัส สูงมากขึ้น จากการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำ พบว่าการใส่เส้นใยนุ่น ทำให้การดูดซับน้ำลดลง และปรับปรุงสมบัติด้วยกรดสเตียริกร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (TPAS20F1SA) มีการดูดซับความชื้นน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการปรับปรุงด้วยเส้นใยนุ่นทำให้อยู่สลายช้าลง และจากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน พบว่า การเพิ่มปริมาณของกรดสเตียริกและเส้นใยนุ่นไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ .

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 แป้งท้าวยายม่อม (Arrowroot flour) ตราปลาไทยห้าดาว ลักษณะสีขาว เม็ดหยาบ
 ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งท้าวยายม่อม

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
โปรตีน	0.05
ไขมัน	0.03
ความชื้น	0.2
ซีลีไฟ	0.15
คาร์โบไฮเดรต	
-อะไมโลส	18.0 – 24.5
-อะไมโลเพกติน	75.4 – 81.0

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.1.2 เส้นใยนุ่น (Kapok fiber) จากตลาดมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร
 ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยนุ่น [20]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
เซลลูโลส	64
เฮมิเซลลูโลส	23
ลิกนิน	13
ความชื้น	8.6
ซีลีไฟ	1.4-3.5
การละลายน้ำ	4.7-9.7
แฉีกซ์	0.8

3.1.3 กรดซิตริก (Citric acid) เกรดอาหาร ลักษณะเป็นผง สีขาว จากบริษัท รวมเคมี

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดและลักษณะเฉพาะ (Specification) ของกรดซิตริก

ITEM	UNIT	STANDARD DATA	ACTUAL DATA
DESCRIPTION	---	COLOURLESS CRYSTAL WHITE	AS STANDARD
IDENTIFICATION & SOLUBILITY	---	PASS TEST	PASS TEST
CLARITY & COLOR OF SOLUTION	---	PASS TEST	PASS TEST
READILY CARBONISATION SUBSTANCES	---	PASS TEST	PASS TEST
EVALUATION OF INSOLUBLES	---	PASS TEST	PASS TEST
ODER	---	PASS TEST	PASS TEST
BARIUM CONTENT	%	PASS TEST	PASS TEST
WATER	%	99.50-101.0	101.17
HEAVY METALS (AS PB)	PPM	7.5-9.0	8.56
OXALATE	PPM	≤ 5	1
ALUMINIUM	PPM	≤ 350	30
IRON	PPM	≤ 0.2	0.15
ARSENIC	PPM	≤ 50	1
MERCURY	PPM	≤ 1.0	0.1
LEAD	PPM	≤ 1.0	0.24
BACTERIAL ENDOTOXINS	I.U./MO	≤ 0.5	0.2
SULPHATED ASH	%	≤ 0.5	0.35
CHLORIDE	PPM	≤ 0.1	0.01
CALCIUM	PPM	≤ 50	1
SULFATES	PPM	≤ 200	5
		≤ 150	45

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

3.1.4 กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า ลักษณะเป็นของเหลว ไม่มีสี จากบริษัท Lab System

3.1.5 แมกนีเซียมสเตียเรท (Magnesium stearate) จากบริษัท รวมเคมี

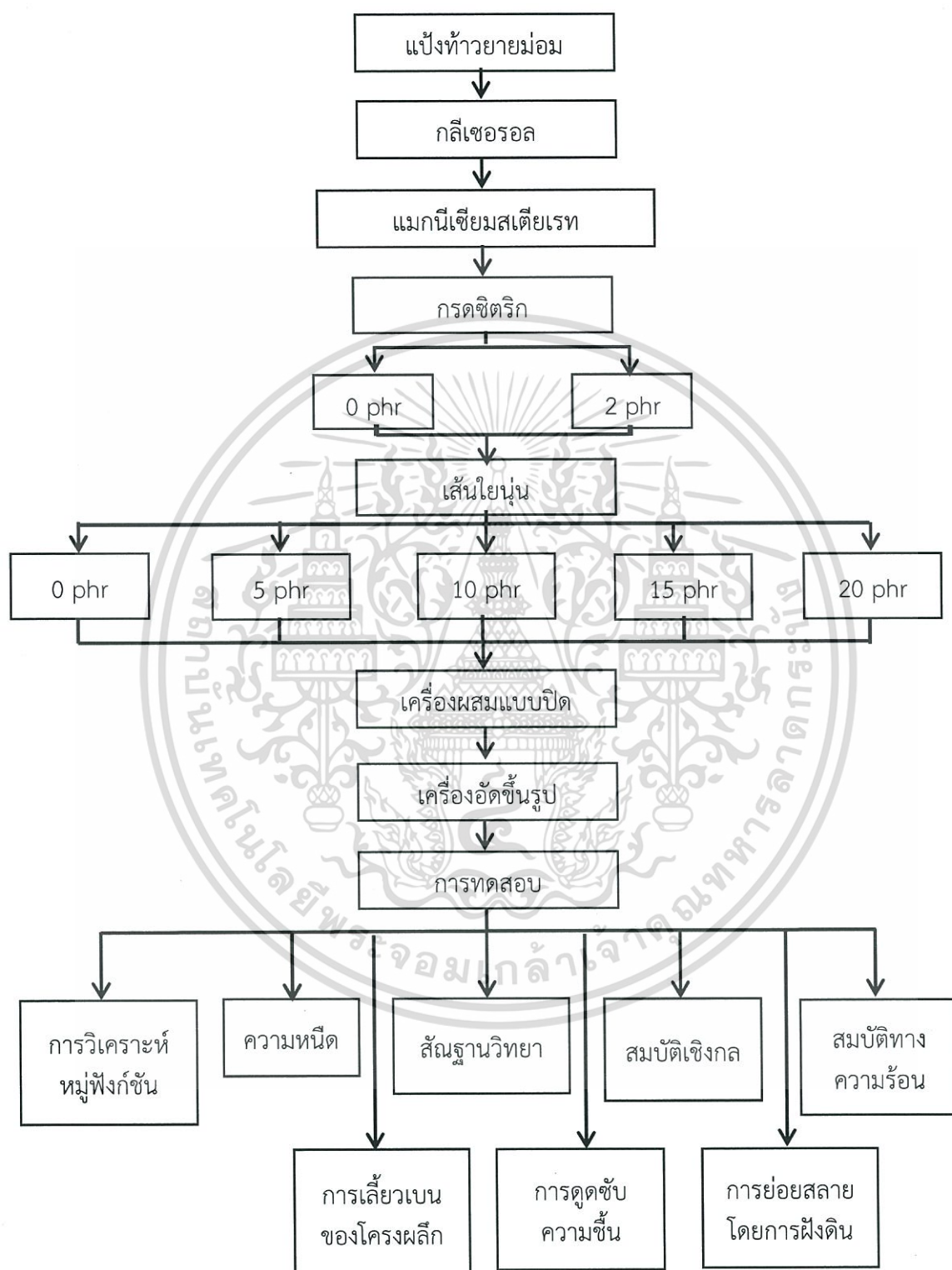
3.1.6 น้ำมันซิลิโคน จากบริษัท Dow Corning Corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.2.1 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) : BRABENDER รุ่น PL 2000/PL 2001
- 3.2.2 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding) : Model MGLP-20AT M/C NO.228
- 3.2.3 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : LLYOD INSTRUMENT LTD. รุ่น LR 5K
- 3.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) : FEI รุ่น QUANTA 250
- 3.2.5 เครื่องทดสอบทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer, TGA) : Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA HT
- 3.2.6 เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) : Perkin Elmer รุ่น FT-IR spectrum GX
- 3.2.7 เครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (X-ray diffractometer, XRD) : Bruker รุ่น D8 Advance
- 3.2.8 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield viscometer) : Model LVT Serial 71420
- 3.2.9 เครื่องชั่งแบบละเอียด (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง)
- 3.2.10 เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์ : CEAST 6052
- 3.2.11 โกร่งบดสาร
- 3.2.12 ตู้อบ
- 3.2.13 แม่พิมพ์ขนาด 2 มิลลิเมตร
- 3.2.14 ถังมือกันความร้อน
- 3.2.15 แผ่นฟิล์มใสถ่ายเอกสาร
- 3.2.16 ถาด
- 3.2.17 กรรไกร
- 3.2.18 กล้องปิดสนิท
- 3.2.19 เดซิเคเตอร์
- 3.2.20 ตู้อบ
- 3.2.21 แปรง

แผนผังการดำเนินงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินงานของงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมกรดซिटริก

3.3.1.1 นำกรดซिटริกที่เป็นผงมาบดให้ละเอียดด้วยครกบดสาร

3.3.1.2 นำกรดซिटริกที่บดเก็บไว้ในถุงซิปล็อค เพื่อเตรียมการผสมต่อไป

3.3.2 การเตรียมเส้นใยนุ่น

3.3.2.1 นำเส้นใยนุ่นมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.3.2.2 นำเส้นใยนุ่นที่อบแห้งแล้วมาทำให้มีขนาดเล็กลงโดยการตัดด้วยกรรไกรให้มีความยาวประมาณ 1 มิลลิเมตร

3.3.2.3 นำเส้นใยนุ่นที่ตัดได้เก็บไว้ในถุงซิปล็อค เพื่อเตรียมการผสมต่อไป

3.3.3 การเตรียมคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม

3.3.3.1 นำแป้งท้าวยายม่อมมาหมักกับกลีเซอรอล เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในเนื้อแป้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณแป้งท้าวยายม่อม 65 กรัม และกลีเซอรอล 35 กรัม

3.3.3.2 นำส่วนผสมที่เตรียมไว้มาชั่ง 50 กรัม แล้วนำมาผสมแมกนีเซียมสเตียเรท ซึ่งใช้ 2 phr นำมาทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

3.3.4 การขึ้นรูปคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม

3.3.4.1 ขึ้นรูปคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์ แล้วทาน้ำมันซิลิโคนลงไปบนแม่พิมพ์ด้านที่มีการสัมผัสกับคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แล้วประกบด้วยแผ่นใส

3.3.4.2 วางคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลงบนแม่พิมพ์ ประกบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน แล้วนำเข้าเครื่องอัดขึ้นรูปขึ้นรูปชิ้นงาน ที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิการผสมคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ที่ความดันเฉลี่ย 1700 psi จากนั้น หล่อเย็น 5 นาที

3.3.4.3 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปตัดเป็นรูปดัมเบลล์ เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

3.3.5 การปรับปรุงสมบัติคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยกรดซिटริกและเส้นใยนุ่น

ทำการปรับปรุงสมบัติคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยการผสมกรดซिटริก และเส้นใยนุ่นที่ปริมาณต่าง ๆ โดยตัดเส้นใยนุ่นให้มีความยาว 1-2 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมต่างๆ ที่ใช้ในการทำคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยการใส่กรดซิตริก และเส้นใยนุ่น

ชนิดแป้ง	ปริมาณ (กรัม)				
	แป้ง	กลีเซอรอล	กรดซิตริก	เส้นใยนุ่น	แมกนีเซียมสเตียเรท
แป้งท้าวยายม่อม	65	35	0	0	2.0
	65	35	0	5	2.0
	65	35	0	10	2.0
	65	35	0	15	2.0
	65	35	0	20	2.0
	65	35	2	0	2.0
	65	35	2	5	2.0
	65	35	2	10	2.0
	65	35	2	15	2.0
	65	35	2	20	2.0

3.3.5.1 นำคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ช ใส่กรดซิตริก ในปริมาณ 0 phr และ 2 phr จากนั้นนำมาใส่เส้นใยนุ่น แต่ละสูตรผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที

3.3.5.2 นำคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ในปริมาณ 0 phr และ 2 phr และเสริมแรงด้วยเส้นใยนุ่น ในปริมาณ 0 5 10 15 และ 20 phr ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ที่ความดันเฉลี่ย 1700 psi หลังจากนั้นหล่อเย็น 5 นาที

3.3.5.3 นำคอมพอลิเมอร์โพลาสติกสตาร์ชที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.6 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.6.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared Spectroscopy) ทำการเตรียมสารตัวอย่าง โดยนำสารตัวอย่างไปให้ความร้อนจนอ่อนตัวกระทั่งเป็นฟิล์มบาง แล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารตัวอย่างมา 2 - 3 มิลลิกรัม มาบดรวมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่อบแห้งแล้วจำนวน 0.2-0.5 กรัม ให้เข้ากัน ใส่ลงในแม่พิมพ์แล้ว นำเข้าเครื่องอัดเม็ดภายใต้ความดัน 10^{-4} kg/cm² นาน 5 นาที แล้วนำเม็ดออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6.2 การทดสอบการวัดค่าความหนืด

หาค่าความหนืดของสารตัวอย่าง โดยใช้เครื่องวัดความหนืด (Brook field Viscometer) โดยนำสารตัวอย่างมาชั่ง 50 กรัม และละลายด้วยน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาวัดค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดค่าความหนืด (Brook field Viscometer) โดยใช้เข็มเบอร์ 1 ความเร็วรอบ 12 รอบ ต่อ 1 นาที

3.3.6.3 การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (XRD)

วิเคราะห์โครงสร้างผลึก โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มึ่มต่างๆกัน เพื่อระบุวัฏภาคองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม โดยนำพอลิเมอร์ผสมมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยเตรียมสารตัวอย่างที่มีความหนา 200 ไมโครเมตร และขนาดของมุมตกกระทบที่ใช้ (2θ) ในช่วง 5-60 องศา ด้วยอัตราเร็ว 1 องศา/นาที โดยใช้ $\text{CuK}\alpha$ แล้วปล่อยรังสีเอ็กซ์เข้าชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้เป็นช่วงเวลา (Step time) 5 นาที เพอร์เซ็นตองศาความเป็นผลึก สามารถคำนวณได้จาก

$$X_{\text{cry}} (\%) = A_c / A_c + A_a \times 100$$

เมื่อ X_{cry} คือ เพอร์เซ็นตองศาความเป็นผลึก
 A_c คือ พื้นที่ส่วนที่เป็นผลึก
 A_a คือ พื้นที่ส่วนเป็นอสัณฐาน

3.3.6.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และหักทันที หลังจากนั้นเคลือบด้วยทอง และนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยศึกษาถึงภาคตัดขวางของตัวอย่างผสมในสูตรต่าง ๆ เพื่อดูการกระจายตัวของเส้นใยในคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลของแป้งท้าวายม่อม และรอยต่อระหว่าง วัฏภาคในตัวอย่างผสม

3.3.6.5 กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนส์แบบหัวกลับ (Invert microscope with Fluorescence system)

เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) สามารถทำการเตรียมตัวอย่างโดยตัดเส้นใยในน้ำความยาว 1-2 mm เรียงบนลงบนสไลด์ จากนั้นหยดน้ำกลั่นและปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ แล้วนำเข้าเครื่อง โดยใช้กำลังขยายเลนส์ใกล้ตา 10 เท่า และกำลังขยายเลนส์ใกล้วัตถุ 4 เท่า เพื่อศึกษาความยาว ความกว้าง และอัตราส่วนระหว่างความกว้างและความยาว (Aspect ratio)

3.3.6.6 การทดสอบสมบัติการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

การทดสอบชิ้นงานแห้งจำนวน 3 ชิ้นงานต่อ 1 สูตร ที่ได้จากการอัดขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM E 104 นำชิ้นงานตัวอย่างที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จดน้ำหนัก จากนั้นนำไปเก็บในบรรยากาศที่อึมตัวด้วยน้ำกลั่น (Distilled water) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99 ± 1 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 14 วัน โดยนำชิ้นงานขึ้นมาบันทึกน้ำหนักทุก ๆ วัน โดยปริมาณการดูดซับความชื้น สามารถคำนวณได้จาก

$$M_t (\%) = (W_w - W_d) / W_d \times 100$$

เมื่อ M_t คือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น
 W_w คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ
 W_d คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังทดสอบ

3.3.6.7 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตา์ซที่เตรียมได้

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
ความเค้น ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส (Young 's modulus)	ASTM D 638	MPa
เปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดรับแรงดึงสูงสุด (% Strain at maximum load)	ASTM D 638	%

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60 ± 2 เปอร์เซ็นต์ ทดสอบดังสภาวะ ดังนี้

Test speed : 40 mm/min

Gauge length : 25 mm

Load cell : 1 kN

ความเค้น มอดุลัส และความเครียด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

ความเค้น = F/A

มอดุลัส = $(F/A) \div [(L-L_0) / L_0]$

ความเครียด = $[(L-L_0) / L_0] \times 100$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

L_0 คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

3.3.6.8 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradable properties)

โดยตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปดัมเบลล์ สูตรละ 5 ชิ้น ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 5 - 10 เปอร์เซ็นต์ ทำการฝังดิน เป็นระยะเวลา 5 และ 10 วัน จากนั้นนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ฝังดิน

3.3.6.9 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)

ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Degradation temperature) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักที่อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (% Weight loss at maximum degradation rate) ของตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer หรือ TGA โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิใน ช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้ว จึงนำมาทำเป็นอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram, DTG)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

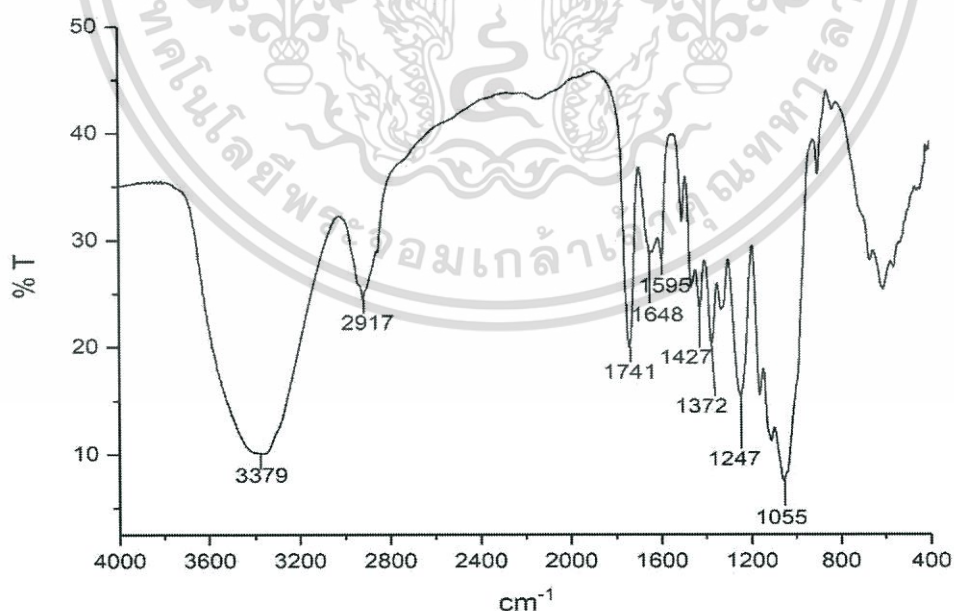
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริกและไม่ใส่กรดซิตริก โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วนต่างๆ ได้แก่ 0 5 10 15 และ 20 % โดยน้ำหนัก เป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป จากนั้นนำคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน การเลี้ยวเบนของโครงผลึก สันฐานวิทยา การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล การย่อยสลายโดยการฝังดิน และสมบัติทางความร้อน โดยรายละเอียดของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้ทั้งหมดแสดงไว้ที่ คำย่อ/สัญลักษณ์ และองค์ประกอบทางเคมีของแป้งท้าวยายม่อมและเส้นใยุ่นแสดงในตารางที่ 3.1-3.2

ผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่เตรียมได้จากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริกและไม่ใส่กรดซิตริกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วนต่างๆ ให้ผลการทดลอง ตามหัวข้อต่อไปนี้

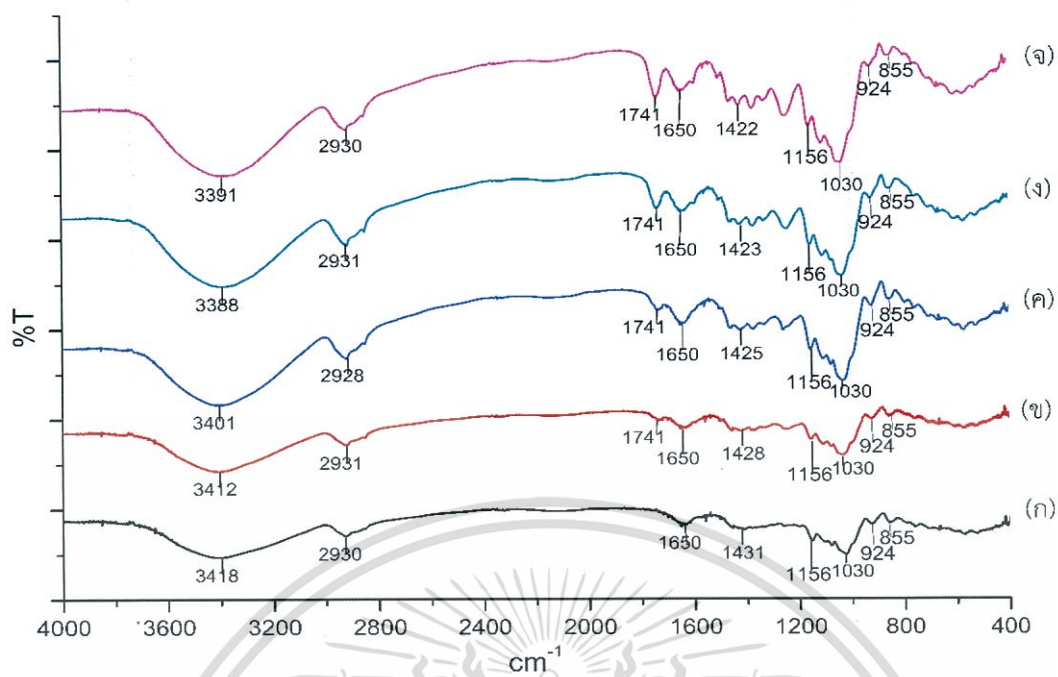
4.1 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริก และไม่ใส่กรดซิตริก ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr โดยใช้เครื่อง FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer) ได้ผลการทดลองเป็นดังนี้

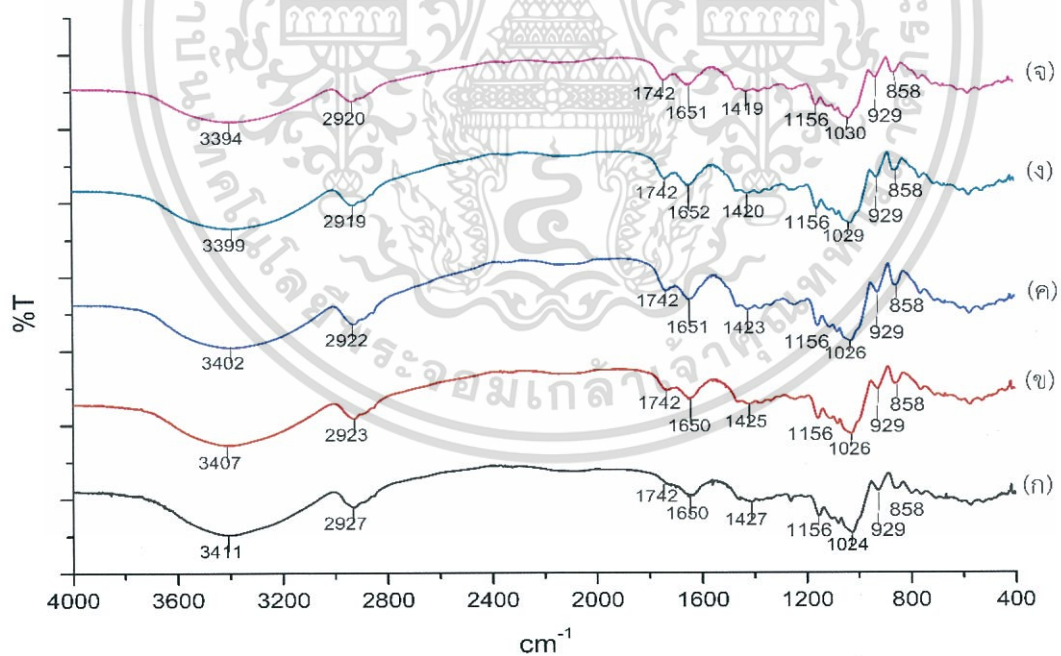


รูปที่ 4.1 สเปกตรัมร้อยละการส่งผ่านแสงของเส้นใยุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมร้อยละการส่งผ่านแสงของ (ก) TPAS (ข) TPAS/5KF (ค) TPAS/10KF (ง) TPAS/15KF และ (จ) TPAS/20KF



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมร้อยละการส่งผ่านแสงของ (ก) TPAS/2CA (ข) TPAS/2CA/5KF (ค) TPAS/2CA/10KF (ง) TPAS/2CA/15KF และ (จ) TPAS/2CA/20KF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของเส้นใยนุ่น พบว่า ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 1741 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C=O Stretching ของหมู่เอซเทิลที่อยู่ในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสหรือลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยนุ่น

จากรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของร้อยละการส่งผ่านแสงของ TPAS/0 5 10 15 และ 20KF พบว่า ปรากฏพีกช่วง $3391\text{-}3418\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบ O-H Stretching ของแป้ง และกลีเซอรอล พีกที่ตำแหน่ง 2930 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C-H Stretching ของแป้งและ กลีเซอรอล พีกที่ตำแหน่ง 1650 cm^{-1} เกิดจากน้ำในโมเลกุลของแป้งทำวยายม่อม พีกที่ตำแหน่ง 1156 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C-O Stretching จากแป้งทำวยายม่อม พีกที่ตำแหน่ง 1431 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ O-H Bending พีกที่ตำแหน่ง 1030 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C-O Bending และพีกช่วง $924\text{-}855\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบ C-H Bending [45]

สำหรับการเปรียบเทียบ TPAS และ TPAS/2CA จากรูปที่ 4.2 (ก) และ 4.3 (ก) พบว่า สเปกตรัมที่ปรากฏมีลักษณะคล้ายกัน แต่สเปกตรัมของรูปที่ 4.3 (ก) พบพีก ที่ตำแหน่ง 1742 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C=O Stretching ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ระหว่างโมเลกุลของแป้งทำวยายม่อม และโมเลกุลของกรดซิตริก ให้ผลการทดลอง เช่นเดียวกับงานวิจัยของจินตภา เต็มสีคราม ที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติก พบพีกใหม่ที่ตำแหน่ง 1737 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ C=O Stretching ของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของแป้งและกรดชนิดต่าง ๆ [44]

เมื่อเติมเส้นใยนุ่นในอัตราส่วน 5 10 15 และ 20 phr ดังรูปที่ 4.2 (ข) (ค) (ง) และ (จ) ได้สเปกตรัมที่ลักษณะคล้ายของแป้งทำวยายม่อม เนื่องจากแป้ง และเส้นใยนุ่นมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน พบว่า ปรากฏพีกช่วง $3391\text{-}3412\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบ O-H Stretching และพีกช่วง $1422\text{-}1428\text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นการสั่นแบบ O-H Bending ของแป้งที่เคลื่อน (shift) ไปยังตำแหน่งเลขคลื่นที่ลดลง แสดงให้เห็นว่า มีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นในระหว่างแป้งกับเส้นใยนุ่น และยังพบพีกที่ตำแหน่ง 1741 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการสั่นของ C=O Stretching ของหมู่เอซเทิลที่อยู่ในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสหรือลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของเส้นใยนุ่น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของสุดารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน และคณะ ที่ศึกษาการใส่เส้นใยนุ่นและเส้นใยปอ พบว่า พีกช่วง $3393\text{-}3411\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นแบบ O-H Stretching และ $1409\text{-}1419\text{ cm}^{-1}$ ที่เป็นการสั่นแบบ O-H Bending เกิดการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลง และปรากฏพีกใหม่ที่ตำแหน่ง 1735 cm^{-1} ที่เป็นการสั่นของ C=O Stretching เช่นกัน [9] แต่ในรูปที่ 4.3 (ข) (ค) (ง) และ (จ) ที่เป็นตัวอย่างของ TPAS/2CA พบว่า พีกที่ตำแหน่ง 1742 cm^{-1} เกิดจากการซ้อนทับกันของ C=O Stretching จากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน และ C=O Stretching ของหมู่เอซเทิลในโครงสร้างของเส้นใยนุ่น

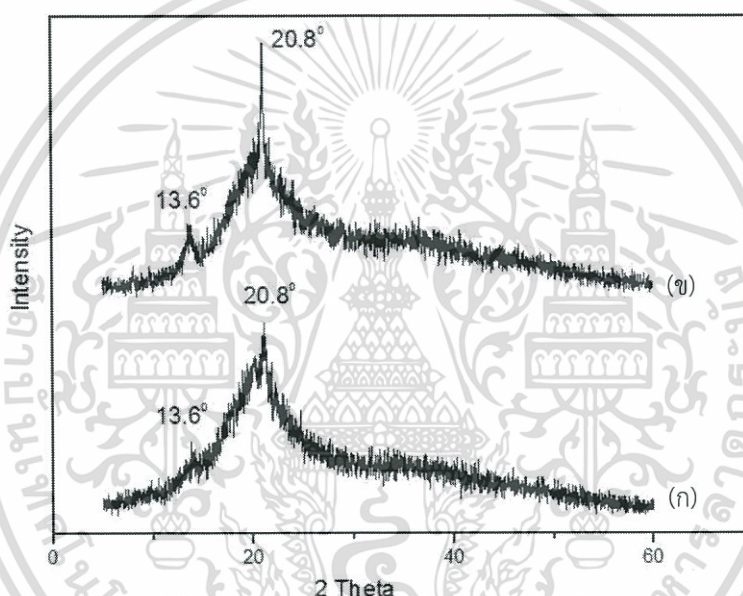
4.2 การทดสอบการวัดค่าความหนืด

การทดสอบการหาค่าความหนืดของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งทำวยายม่อมที่ไม่ใส่กรดและใส่กรดซิตริก 2 phr โดยใช้เครื่องวัดความหนืด (Brook field Viscometer) โดยใช้เข็มเบอร์ 1 ความเร็วรอบ 12 รอบ ต่อ 1 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ได้ผลการทดสอบดังนี้

TPAS และ TPAS/2CA มีความหนืดเท่ากับ 190 mPa·s และ 15 mPa·s ตามลำดับ จากการทดสอบการวัดค่าความหนืด พบว่า เมื่อใส่กรดซิตริก ทำให้ความหนืดลดลง เนื่องจากกรดซิตริก เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับแป้ง ทำให้แป้งมีสายโซ่สั้นลง ส่งผลให้ไหลง่ายขึ้น ความหนืดจึงลดลง

4.3 การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก (XRD)

การทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึกของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ใส่กรดและใส่กรด 2 phr เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ในอัตราส่วน 0 5 10 และ 20 phr โดยการใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ โดยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer โดยใช้ขนาดของมุมตกกระทบในช่วง $5-60^\circ$ ด้วยอัตราเร็ว $1^\circ/\text{นาที}$ ให้ผลการทดลองดังนี้

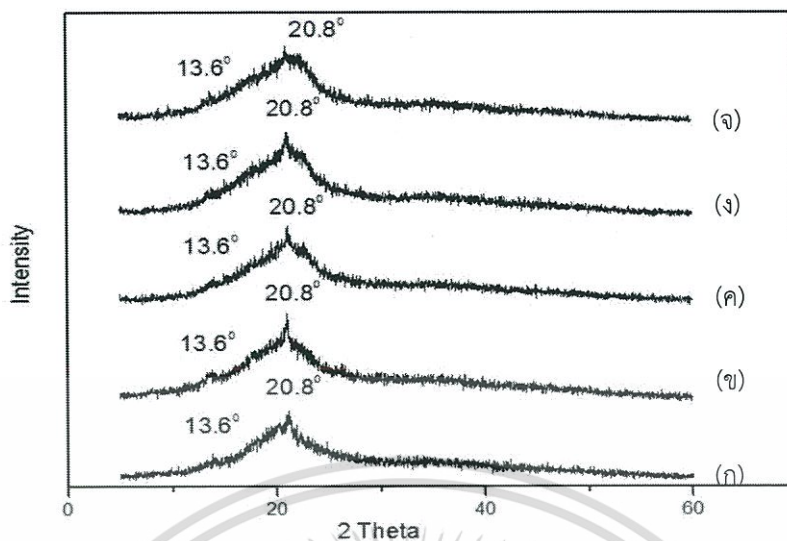


รูปที่ 4.4 ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (ก) TPAS และ (ข) TPAS/2CA

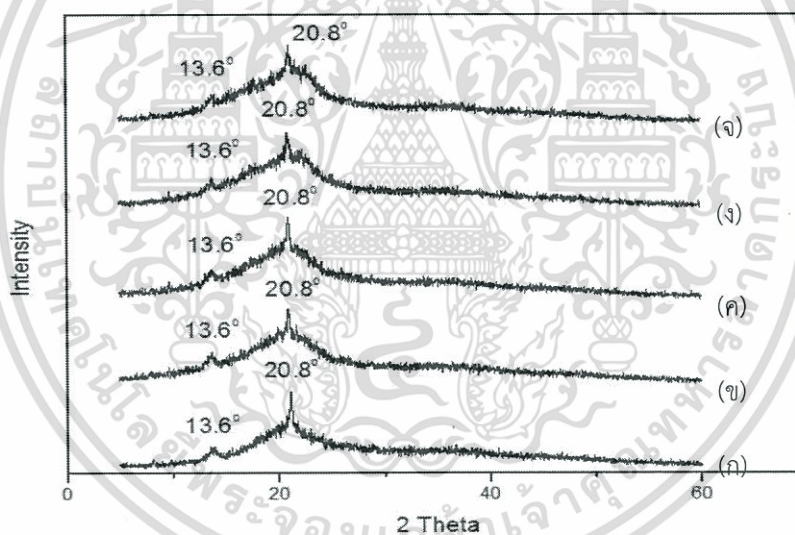
จากรูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างผลึกของ TPAS และ TPAS/2CA พบพีกที่มุม 2θ เท่ากับ 13.6° และ 20.8° ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะแบบ V_n -type ทั้งหมด เกิดจากการนำแป้งมาผสมกลีเซอรอล และผ่านการให้ความร้อนและแรงเฉือน ทำให้โครงสร้างผลึกของแป้งถูกทำลาย [46]

เมื่อนำผลมาวิเคราะห์หาคำนวนเปอร์เซ็นต์ปริมาณความเป็นผลึก พบว่า เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ TPAS และ TPAS/2CA มีค่าเท่ากับ 39.05 % และ 37.08 % ตามลำดับ ดังนั้น เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เมื่อปรับปรุงด้วยการใส่กรดซิตริก เนื่องจากกรดซิตริกเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับแป้ง ทำให้โครงสร้างมีความกะกวมมากขึ้น ความเป็นระเบียบลดลง ทำให้ความเป็นผลึกของ TPAS ลดลง และกรดซิตริกสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับแป้ง ทำให้สายโซ่ของแป้งสั้นลง จึงมีส่วนทำให้ผลึกของ TPAS ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (ก) TPAS (ข) TPAS/5KF (ค) TPAS/10KF (ง) TPAS/15KF และ (จ) TPAS/20KF



รูปที่ 4.6 ดิฟแฟร็กโทแกรมของ (ก) TPAS/2CA (ข) TPAS/2CA/5KF (ค) TPAS/2CA/10KF (ง) TPAS/2CA/15KF และ (จ) TPAS/2CA/20KF

จากรูปที่ 4.5-4.6 พบว่า โครงสร้างผลึกของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ใส่กรดและใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในปริมาณต่างๆ พบพิกที่มุม 2θ เท่ากับ 13.6° และ 20.8° โดยพิก 20.8° มาจากองค์ประกอบของแป้ง และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยุ่น พบพิกที่มุม 2θ เช่นเดียวกับ TPAS แสดงให้เห็นว่า เมื่อเติมเส้นใยุ่นไม่ทำให้โครงสร้างผลึกของแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.1 ปริมาณผลึกของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ใส่กรดซิตริกและใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่

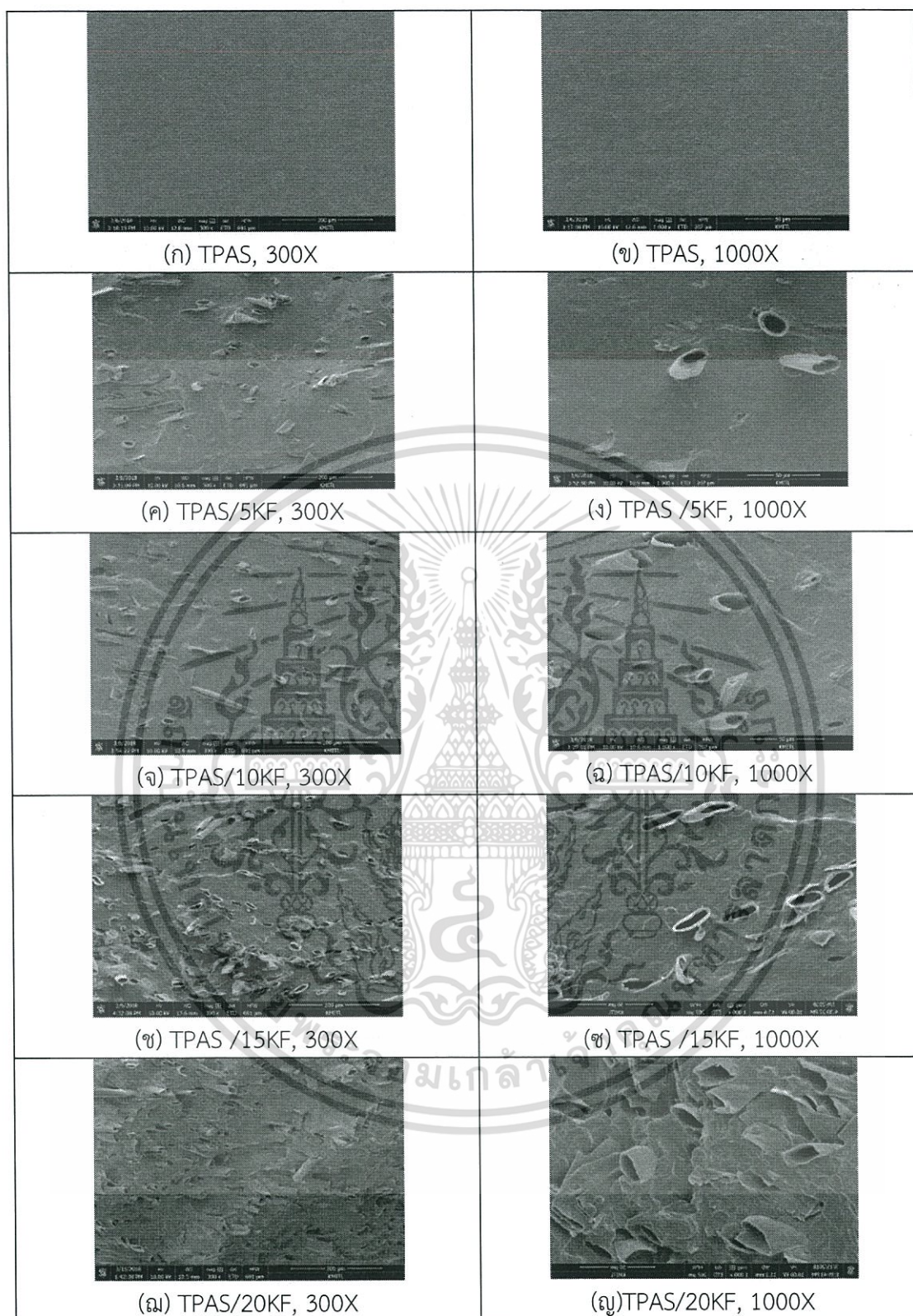
ตัวอย่าง	ปริมาณผลึก (%)
TPAS	39.05
TPAS/5KF	40.25
TPAS/10KF	41.21
TPAS/15KF	42.65
TPAS /20KF	42.61
TPAS/2CA	37.08
TPAS/2CA/5KF	40.91
TPAS/2CA/10KF	41.68
TPAS/2CA/15KF	42.45
TPAS/2CA/20KF	42.50

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณา TPAS/5 10 15 และ 20KF พบว่า เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยไผ่ เนื่องจากเส้นใยไผ่มีความเป็นผลึกสูงกว่าแป้ง สำหรับ TPAS/2CA/5 10 15 และ 20KF พบว่าการใส่กรดซิตริก ทำให้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากกรดซิตริกทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของแป้งได้ อีกทั้งกรดซิตริกเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับแป้ง ดังแสดงในผลการทดลองหัวข้อ 4.1 นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากการเพิ่มปริมาณเส้นใยไผ่

4.4 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology)

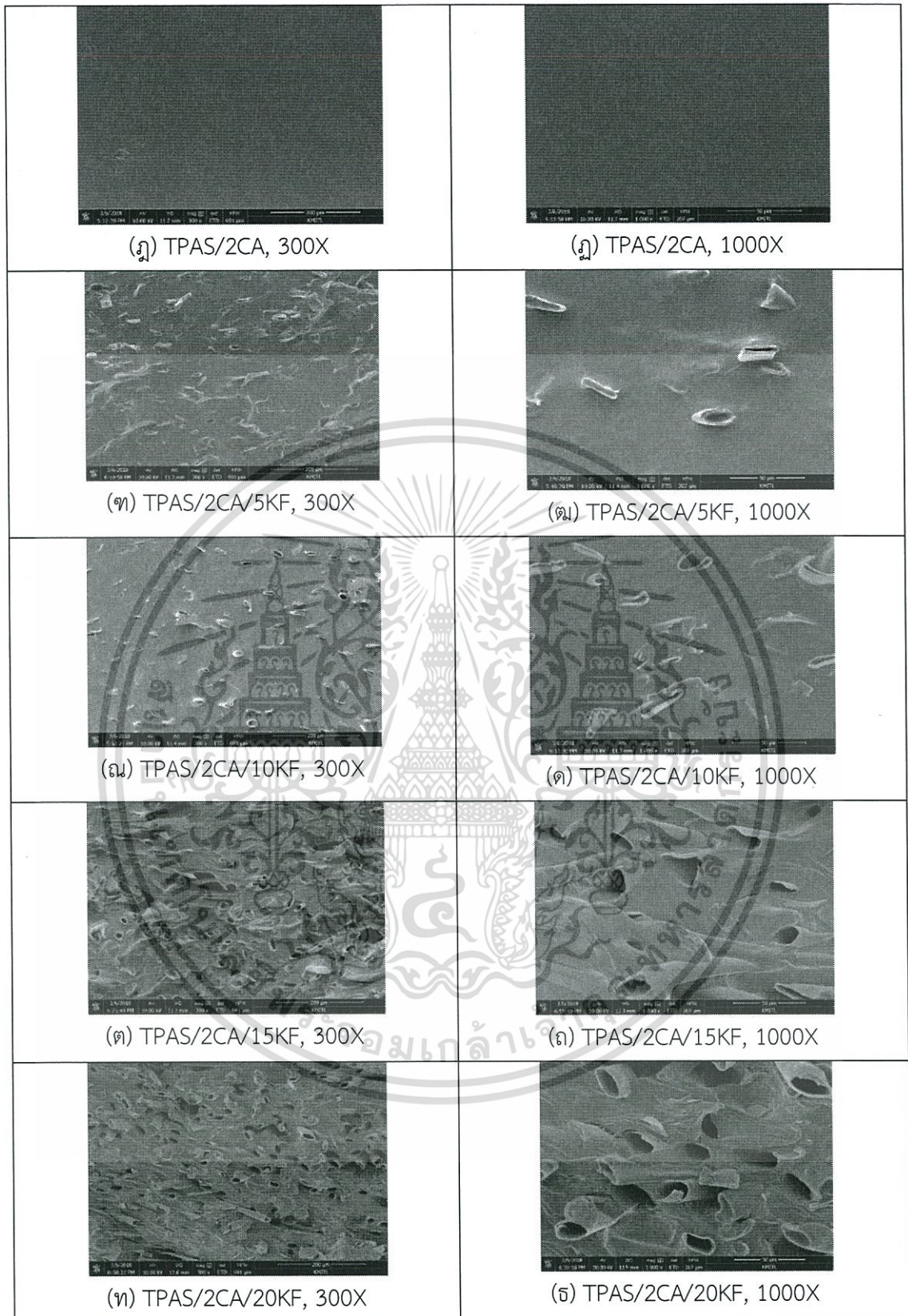
การทดสอบสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนชนิดต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา ลักษณะการกระจายตัว และความเข้ากันได้ของคอมพอลิเมอร์โพลีเอทิลีนจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไม่ใส่กรดและใส่กรดซิตริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ได้ผลการทดสอบดังนี้

ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยไผ่ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนส์แบบหัวกลับที่กำลังขยายเลนส์ใกล้ตา 10 เท่า และกำลังขยายเลนส์ใกล้วัตถุ 4 เท่า พบว่า เส้นใยไผ่มีลักษณะเป็นเส้นยาวมีความยาวเฉลี่ยเท่ากับ 986.20 ไมโครเมตร มีความกว้างเฉลี่ย 14.06 ไมโครเมตร และสามารถคำนวณหา Aspect ratio (L/D ratio) ได้เท่ากับ 71.84 ± 23.76 ไมโครเมตร ดังแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.7 (ก)-(ญ) แสดงลักษณะภาพตัดขวางของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไม่ใส่กรดซิตริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายภาพ 300 เท่า และ 1000 เท่า ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 (ก)-(จ) แสดงลักษณะภาพตัดขวางของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซัลฟริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่ว ในอัตราส่วนต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายภาพ 300 เท่า และ 1000 เท่า ตามลำดับ

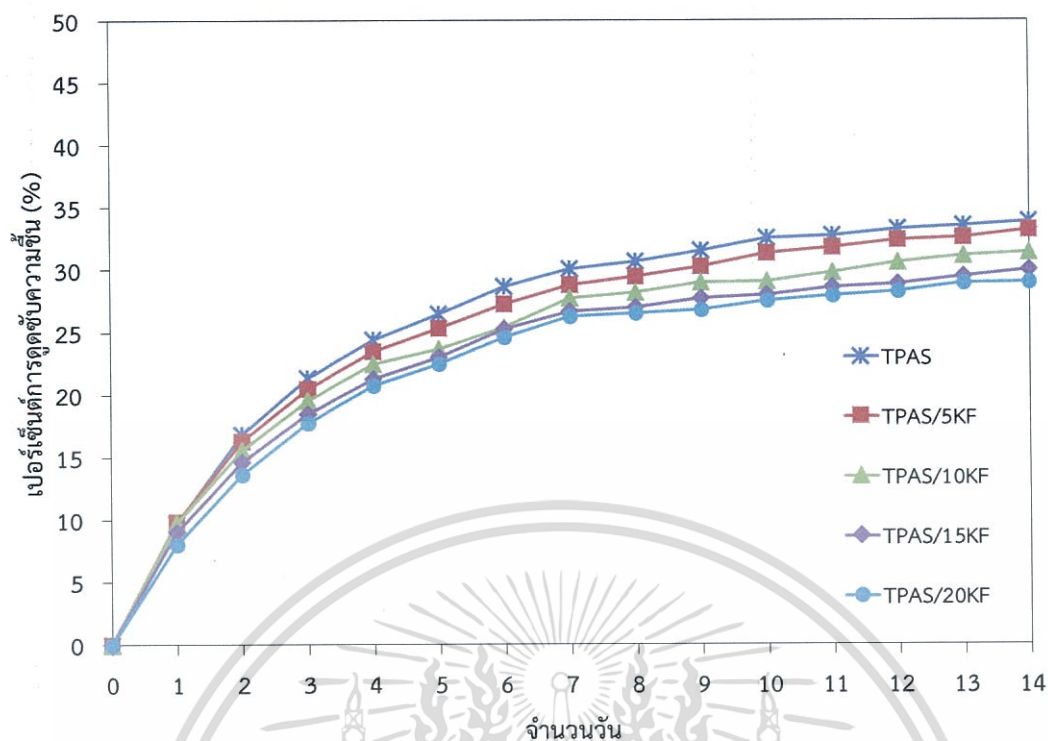
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7-4.8 (ก)-(ธ) พบว่า คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์มีลักษณะผิวเรียบ และเป็นเนื้อเดียวกัน โดย TPAS/2CA มีลักษณะผิวที่เรียบมากกว่า TPAS ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กัญญาภรณ์ แทนเพชร และคณะ ที่ใช้กรดซิดริกและกรดมาลิกในเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้ง มันสำปะหลัง พบว่ามีลักษณะผิวเรียบ แสดงให้เห็นว่าแป้งและกรดมีความเข้ากันได้ดี ทำให้ไม่เห็นรอย แยกของวิฎภาค [6]

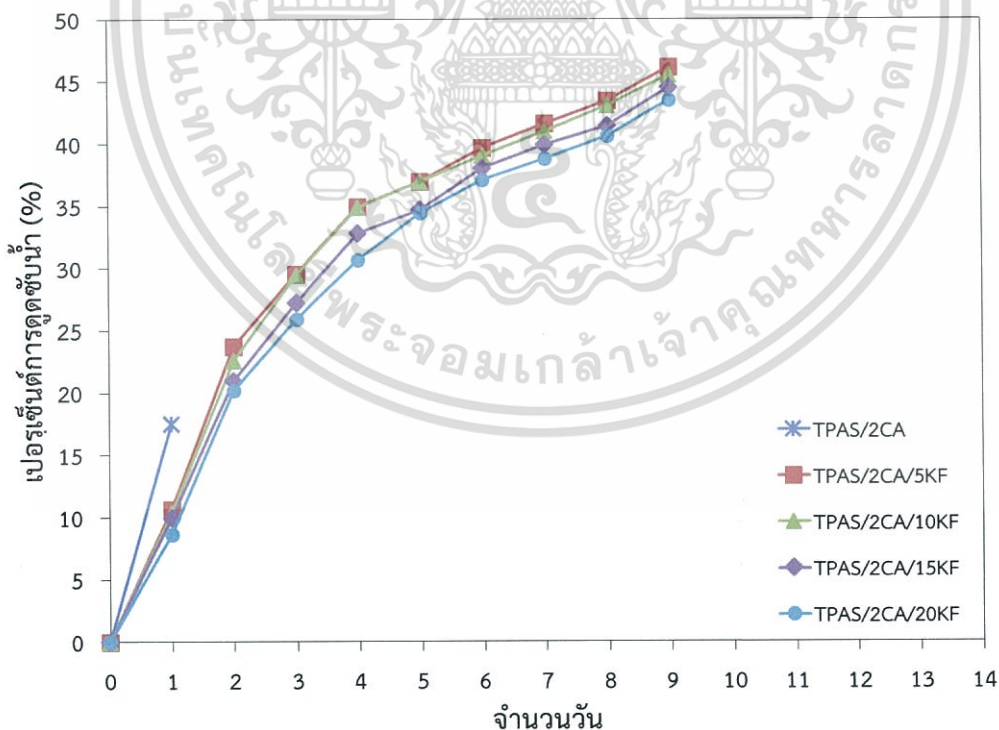
นอกจากนี้ลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งท้าวยาย่ม่อม เสริมแรงด้วยเส้นใยในปริมาณต่าง ๆ มีความคล้ายคลึงกัน คือ เส้นใยไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับ คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ แต่มีการกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติก สตาบิลิซเซอร์ทั่วทุกพื้นผิวแบบสุ่ม ไม่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนเพียงบริเวณใดบริเวณหนึ่ง อีกทั้งไม่พบรอย แยก ระหว่างวิฎภาคของทั้งสององค์ประกอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึง ความเข้ากันได้ระหว่างแป้ง และเส้นใย เนื่องมาจากมีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเหมือนกัน จึงเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ และมีความเป็นขั้วเหมือนกัน นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นช่องโพรงกลวงตรงกลางของเส้นใย อันเนื่องมาจากลักษณะเฉพาะของเส้นใย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุดารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน และคณะ ที่ศึกษาการปรับปรุงสมบัติเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ด้วยการใส่เส้นใย และเส้นใย พบว่า เมื่อปริมาณเส้นใย และเส้นใยปอมากขึ้น เกิดการยึดเกาะระหว่างแป้งกับเส้นใยด้วย หมู่ไฮดรอกซิลมากขึ้น ทำให้เส้นใยกับแป้งเข้ากันได้ดี ไม่มีรอยแยกระหว่างวิฎภาค และมีกระจาย ตัวที่ดี [9] นอกจากนี้ยังพบว่า การใส่กรดซิดริกทำให้การกระจายตัวของเส้นใยในวิฎภาคของ TPAS มีความสม่ำเสมอมากขึ้น

4.5 การทดสอบการดูดซับความชื้น (Moisture uptake)

จากการทดสอบการดูดซับความชื้น เพื่อทำการศึกษาสมบัติการดูดซับความชื้นของ คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์จากแป้งท้าวยาย่ม่อมที่ปรับปรุงสมบัติโดยใส่กรดซิดริก และไม่ใส่ กรดซิดริก และเส้นใยในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr โดยการนำไปเก็บในบรรยากาศที่อึดตัว ด้วยน้ำกลั่น มีความชื้นสัมพัทธ์ $99 \pm 1\%$ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 16 วัน ซึ่งให้ผลการทดลองเป็นดังนี้



รูปที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งท้าวยายม่อม ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไม่ใส่กรดซิตริก และเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $99 \pm 1\%$



รูปที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาเรชจากแป้งท้าวยายม่อม ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริก และเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $99 \pm 1\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

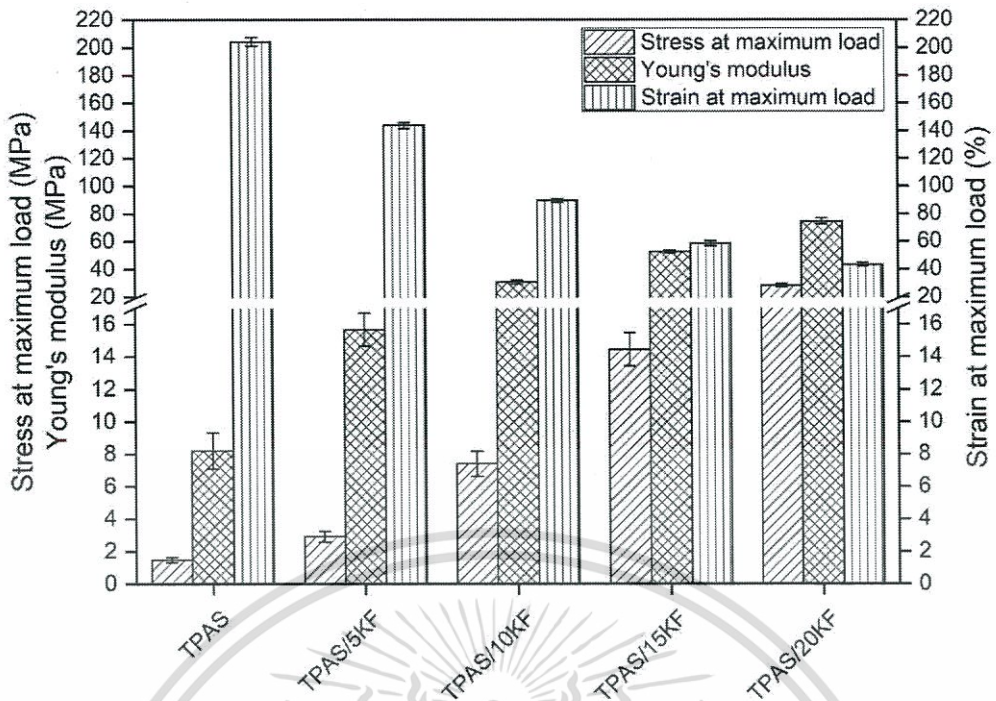
จากรูปที่ 4.9- 4.10 และภาคผนวก ข พบว่า TPAS/0 5 10 15 และ 20KF เพอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดลอง เนื่องจากโครงสร้างของแป้งที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระจำนวนมาก ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้ว มีสมบัติความชอบน้ำ จึงส่งผลให้สามารถดูดซับความชื้นได้เป็นอย่างดี หลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมีแนวโน้มคงที่ เนื่องจากมีการดูดซับความชื้นจนอิ่มตัว ไม่สามารถดูดซับความชื้นได้อีก และทดสอบที่ 15 วัน เนื่องจากชิ้นงานเกิดรา นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของ TPAS/2CA/0 5 10 15 และ 20KF พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากกรดซิตริกมีหมู่คาร์บอกซิลิก 3 หมู่ สามารถเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้บางส่วน ทำให้เหลือหมู่คาร์บอกซิลิกที่ดูดซับความชื้นได้ดี อีกทั้งกรดซิตริกสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้สายโซ่ถูกตัดให้สั้นลง หมู่ไฮดรอกซิลมากขึ้น จึงส่งผลให้ TPAS/2CA สามารถดูดซับความชื้นได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกัญญาภรณ์ แทนเพชร และคณะ [6] ซึ่งพบว่า การใส่กรดซิตริกและกรดมาลิกนั้น ทำให้มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นได้ดีกว่าที่ไม่ได้ใส่กรดซิตริกและกรดมาลิก จากรูปที่ 4.10 มีการทดสอบที่ 9 วัน และสูตร TPAS/2CA ทดสอบ ได้เพียง 1 วัน เนื่องจากชิ้นดูดซับความชื้นสูง จนไม่สามารถนำมาชั่งน้ำหนักได้ อาจเกิดการที่น้ำหนักหายไป

เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยุ่น พบว่า คอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์ที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นลดลง เนื่องจากเส้นใยุ่นมีสมบัติชอบน้ำน้อยกว่าแป้ง เพราะมีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลสที่มีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระน้อยกว่าแป้ง ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปได้ยาก นอกจากนี้เส้นใยุ่นมีลักษณะที่เป็นวงอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในปริมาณ 13 % โดยน้ำหนัก [20] และแฉีกซ์ที่มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่ยาว ซึ่งแสดงสมบัติความไม่มีขั้ว [20] อีกทั้งการเพิ่มปริมาณเส้นใยุ่น ยังเป็นการทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งและเส้นใยุ่นมากขึ้นอีกด้วย อันเป็นเหตุให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลอิสระของแป้งลดลงเป็นอย่างมาก จึงส่งผลให้คอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์ที่ปรับปรุงด้วยเส้นใยุ่นมีการดูดซับความชื้นลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของจันจิรา จันทร์แจ้ง และคณะ [43]

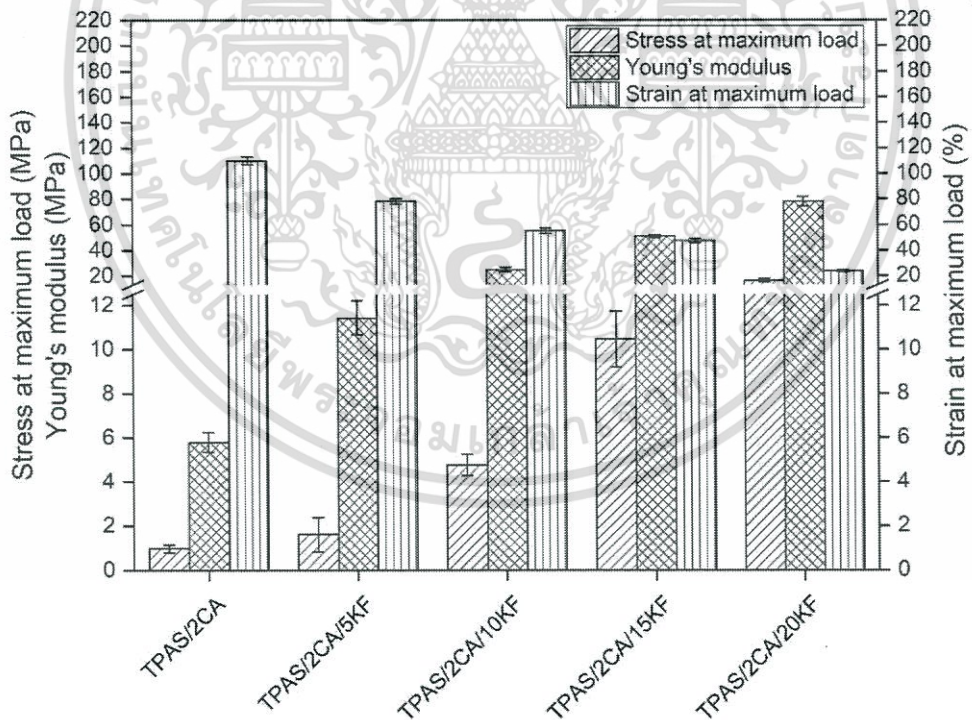
จากการทดสอบการดูดซับความชื้นของคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์ที่ใส่กรดซิตริกและไม่ใส่กรดซิตริก พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นของ TPAS/2CA/0 5 10 15 และ 20KF สูงกว่า TPAS/0 5 10 15 และ 20KF และการใส่เส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr พบว่า มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ลดลง ตามปริมาณเส้นใยุ่นที่เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ พบว่า สูตรที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมากที่สุด คือ TPAS/2CA และสูตรที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นน้อยที่สุด คือ TPAS/20KF

4.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

การทดสอบสมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความแข็งแรงดึง โมดูลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์จากแป้งท้าวายม่อมที่ใส่กรดซิตริก และไม่ใส่กรดซิตริกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.11 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ไม่ใส่กรดซิตริกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 4.12 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วนต่าง ๆ

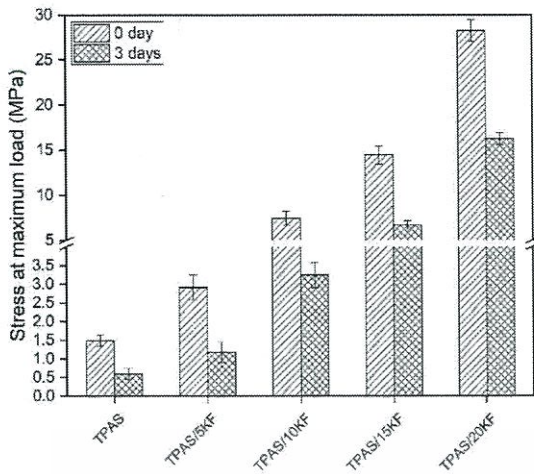
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11-4.12 และภาคผนวก ค แสดงสมบัติเชิงกลของ TPAS/0 5 10 15 และ 20KF และ TPAS/2CA/0 5 10 15 และ 20KF พบว่า ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสของ TPAS สูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยุ่น เนื่องจากเส้นใยุ่นทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับ TPAS ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งและเส้นใยุ่น และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งพีคที่ตำแหน่ง O-H stretching และ O-H bending เกิดการเคลื่อน (Shift) ไปยังเลขคลื่นที่ลดลง (รูปที่ 4.2-4.3) และเมื่อพิจารณาด้วยสัณฐานวิทยา (รูปที่ 4.7) แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ระหว่างสองวัฏภาคของแป้ง และอนุภาคของเส้นใยุ่น และผลจากการทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงผลึก พบว่ามีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.1) เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยุ่น เนื่องจากเส้นใยุ่นมีความเป็นผลึกสูงจากองค์ประกอบภายใน จึงสามารถรับและส่งผ่านแรงที่กระทำได้ดีขึ้น นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การดึงยึดของ TPAS มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใยุ่น เนื่องจากเส้นใยุ่นเป็นส่วนเสริมแรง ทำให้ TPAS มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ความสามารถในการยืดออกและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นไปได้ยากมากขึ้น

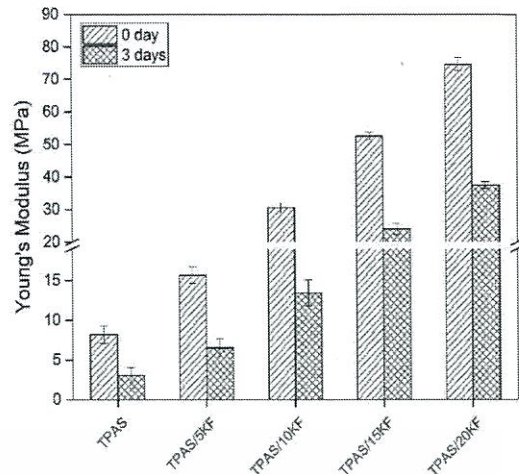
จากพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่าง TPAS/0 5 10 15 และ 20KF และ TPAS/2CA/0 5 10 15 และ 20KF พบว่า TPAS/20KF มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุด ดังแสดงได้จากความแข็งแรงดึงและมอดุลัสสูงสุด และสูตรที่มีสมบัติเชิงกลต่ำที่สุด คือ TPAS/2CA ดังแสดงได้จากความแข็งแรงดึงและ มอดุลัสต่ำที่สุด

4.7 การทดสอบย่อยสลายโดยการฝังดิน (Biodegradation properties)

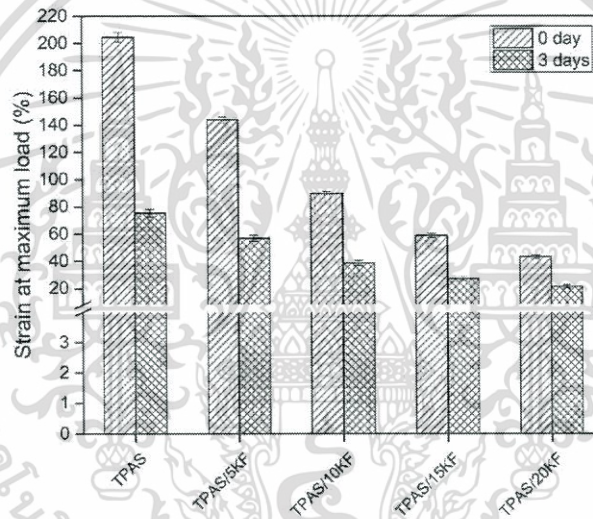
การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินโดยการนำคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งทำวายเป็นที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริก และไม่ใส่กรดซิตริกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr มาฝังดินเป็นเวลา 3 วัน ที่มีการควบคุมความชื้นของดินคงที่อยู่ที่ในช่วง 5-10 % ทำการศึกษาถึงสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ให้ผลการทดลองดังนี้



(ก)



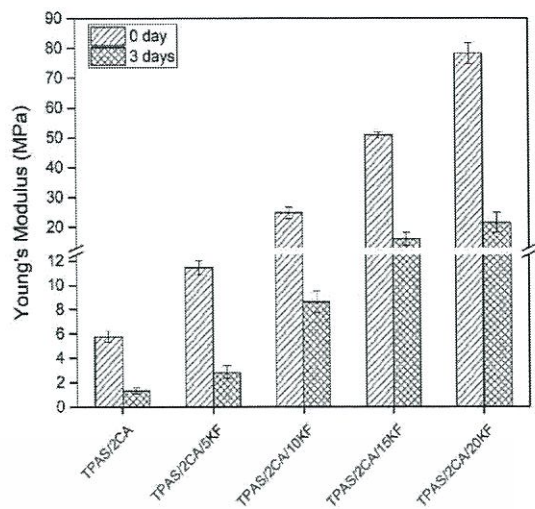
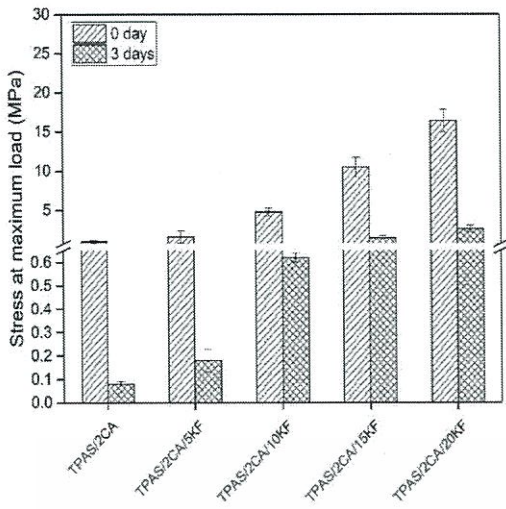
(ข)



(ค)

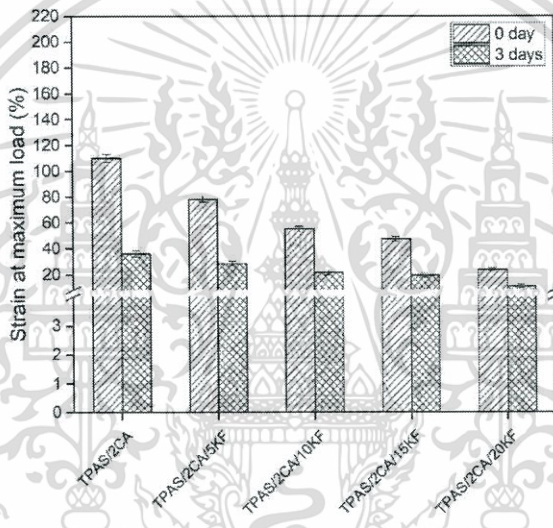
รูปที่ 4.13 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสไตรชจากแป้งท้าวายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไมใส่กรดซัลฟิวริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 วัน (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.14 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซัลฟิวริกและเสริมแรงด้วยเส้นใยไผ่ ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 วัน (ก) ความแข็งแรงดึง (ข) โมดูลัส และ (ค) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13-4.14 (ก)-(ค) และภาคผนวก ง แสดงถึงสมบัติเชิงกล TPAS/0 5 10 15 และ 20KF และ TPAS/2CA/0 5 10 15 และ 20KF ที่ฝังดินเป็นระยะเวลา 3 วัน พบว่า สมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด หลังการฝังดิน มีค่าน้อยกว่าสมบัติเชิงกล ก่อนฝังดินอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก TPAS มีส่วนประกอบของสารจำพวกแป้ง และกลีเซอรอล ซึ่งมีสมบัติชอบน้ำ TPAS จึงดูดซับความชื้นจากดินที่นำมาทดสอบเข้ามาในโครงสร้างแล้วเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในดิน โดยสัมพันธ์กับการทดสอบการดูดซับความชื้น ทำให้ TPAS มีสายโซ่สั้นลง มีความแข็งแรงลดลง เมื่อออกแรงดึง TPAS เกิดการขาดได้ง่ายขึ้น สมบัติเชิงกลจึงมีค่าลดลงหลังจากทำการฝังดิน

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด หลังการฝังดินของ TPAS มีค่าน้อยกว่า TPAS/2CA เนื่องจาก TPAS/2CA มีหมู่คาร์บอกซิลิกจึงทำให้ดูดซับความชื้นได้มาก ดังนั้น น้ำจึงทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับแป้ง สายโซ่ถูกตัดให้สั้นลง ทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็ว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกัญญาภรณ์ แทนเพชร และคณะ ที่นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงสมบัติด้วยกรดซิตริกและกรดมาลิกมาทำการฝังดินเป็นเวลา 10 วัน และนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า สมบัติเชิงกลหลังฝังดินมีแนวโน้มลดลง [6]

จากสมบัติเชิงกลหลังฝังดินของ TPAS/5 10 15 และ 20KF มีค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมากกว่า TPAS เนื่องจากเส้นใยุ่นมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ มีความเป็นผลึก จึงทำให้ความชื้นเข้าไปแทรกได้น้อยกว่า ดังนั้นทำให้ TPAS/5 10 15 และ 20KF ย่อยสลายได้ช้ากว่า TPAS ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุภารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน และคณะ ที่พบว่า เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันสำปะหลังที่ใส่เส้นใยุ่นที่เพิ่มขึ้น ทำให้การย่อยสลายช้าลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเส้นใยุ่นทำให้มีปริมาณแป้งในชิ้นงานลดลง ซึ่งแป้งย่อยสลายได้ง่ายกว่าเส้นใยุ่น จึงทำให้ชิ้นงานย่อยได้ช้าลง [9]

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยาย่ม่อมปรับปรุงด้วยการไม่ใส่และใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วนต่าง ๆ

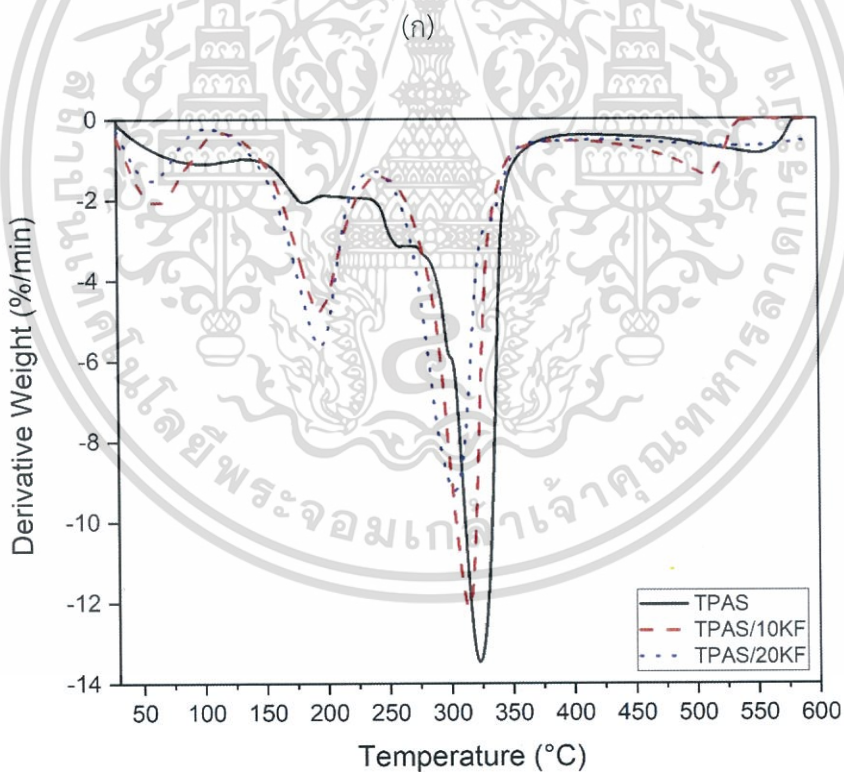
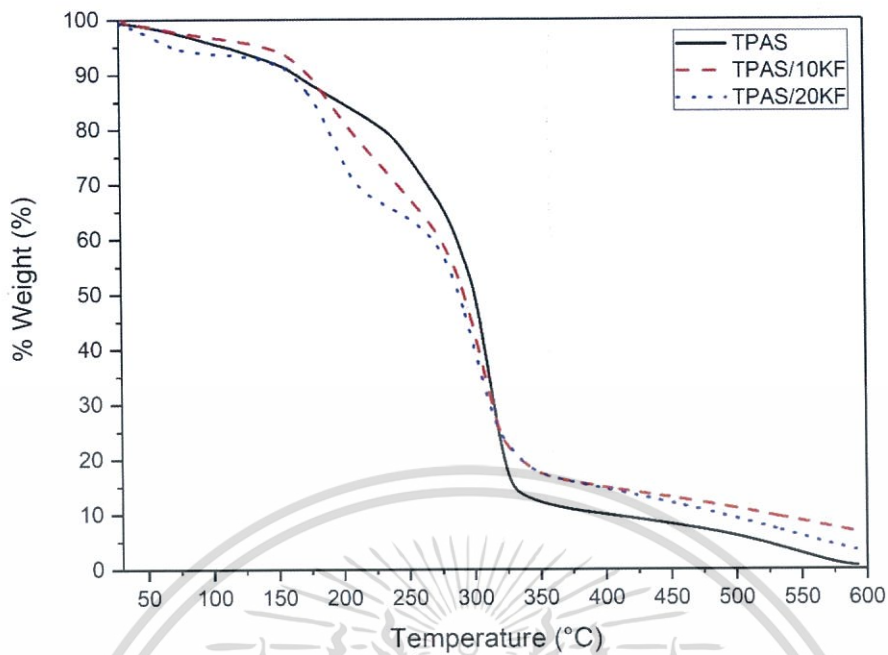
ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกล		
	Stress at maximum load (%)	Young's modulus (%)	Strain at maximum load (%)
TPAS	60.14	63.09	63.12
TPAS/5KF	59.79	58.46	60.55
TPAS/10KF	56.22	56.01	56.80
TPAS/15KF	53.85	54.23	53.64
TPAS/20KF	42.50	49.82	50.92
TPAS/2CA	91.84	76.86	67.33
TPAS/2CA/5KF	88.82	71.57	63.70
TPAS/2CA/10KF	86.97	69.29	61.14
TPAS/2CA/15KF	86.23	66.55	59.65
TPAS/2CA/20KF	84.15	62.35	54.84

จากตารางที่ 4.2 แสดงการลดลงของสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งท้าวยายม่อมปรับปรุงด้วยการใส่และไมใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น พบว่า TPAS/2CA มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลมากกว่า TPAS ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีการสลายตัวได้เร็วกว่า เมื่อพิจารณา TPAS/0 5 10 15 และ 20KF พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลที่มีแนวโน้มลดลง แสดงให้เห็นว่า TPAS/5 10 15 และ 20KF ย่อยสลายได้ช้าลง เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยุ่น ดังนั้น TPAS/2CA เกิดการย่อยสลายได้เร็วที่สุด และ TPAS/20%KF เกิดการย่อยสลายได้ช้าที่สุด

4.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อน (TGA)

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์จากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริกและไมใส่กรดซิตริก และเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr โดยพิจารณาถึงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด (Maximum degradation temperature) ด้วยการใช้เครื่อง TGA (Thermogravimetric analyzer) ภายใต้สภาวะไนโตรเจน (N_2) โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบอยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

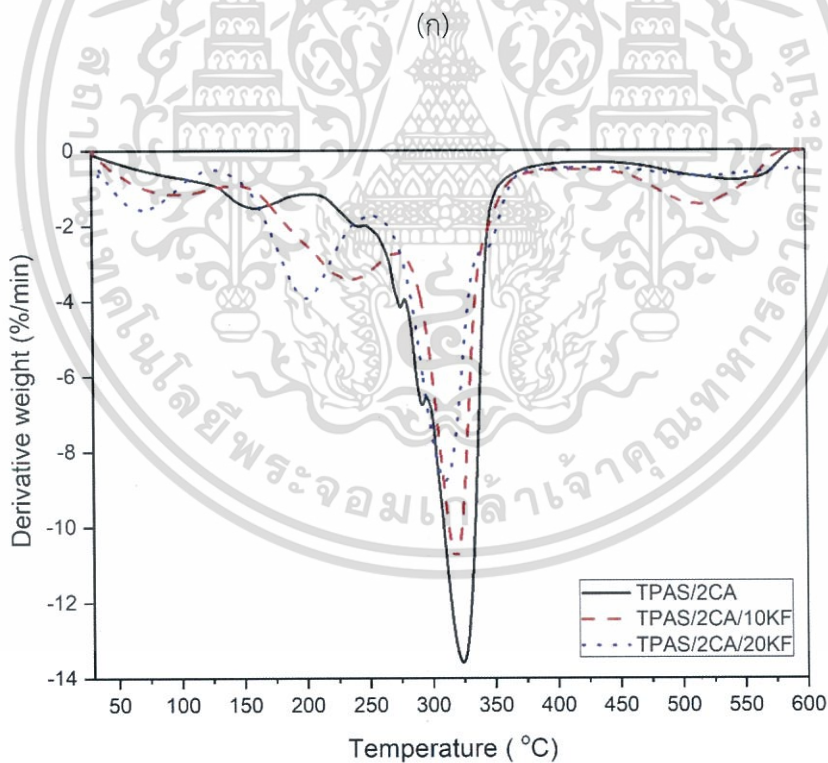
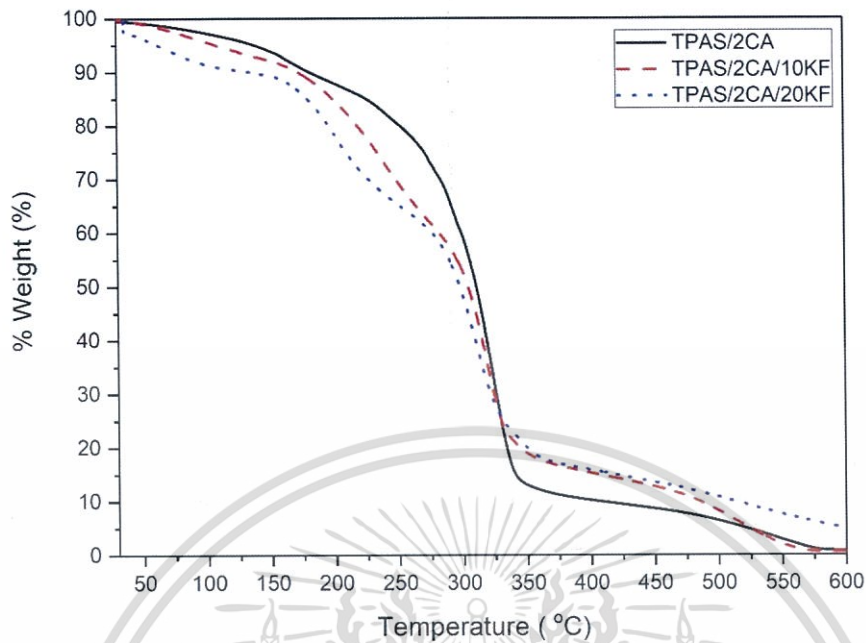




(ข)

รูปที่ 4.15 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไม่ใส่กรดซัลฟิวริก และเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 4.16 (ก) TG และ (ข) DTG เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิดริก และเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) และเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (แ่ง) ของเทอร์โมแกรมของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแ่งทำวยายมอมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิทริกและไม่ใส่กรดซิทริก และเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr

ตัวอย่าง	อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$)			เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป (แ่ง)
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 3	
	(กลีเซอรอล)	(แ่ง)	(เส้นใยุ่น)	
TPAS	182.9	322.7	-	54.4
TPAS/10KF	195.3	314.2	338.5	53.5
TPAS/20KF	193.5	310.5	338.7	52.9
TPAS/2CA	243.9	323.9	-	60.8
TPAS/2CA/10KF	238.2	318.9	338.4	46.6
TPAS/2CA/20KF	200.3	311.1	338.5	41.1

จากรูปที่ 4.15 -4.16 ตารางที่ 4.3 และภาคผนวก จ แสดงอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$) ของเทอร์โมแกรมของ TPAS/0 5 10 15 และ 20KF และ TPAS/2CA/0 5 10 15 และ 20KF พบว่า มีอุณหภูมิในการสลายตัว 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของกลีเซอรอล ช่วงที่ 2 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของแ่ง และช่วงที่ 3 เป็นอุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของเส้นใยุ่น ดังแสดงตารางที่ 4.2

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง TPAS และ TPAS/2CA พบว่า อุณหภูมิในการสลายตัวที่จุดสูงสุดของแ่งนั้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของกัญญาภรณ์ แทนเพชร และคณะ ที่พบว่า การใส่กรดซิทริกนั้น ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุด [6]

จากการปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่เส้นใยุ่น พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยุ่น อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของแ่งนั้นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเส้นใยุ่นมีการสลายตัว 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส ที่ 250-300 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 2 การสลายตัวของเซลลูโลส ที่ 342 องศาเซลเซียส และช่วงที่ 3 การสลายตัวของลิกนิน ที่ 400-600 องศาเซลเซียส [47] และจะเห็นได้ว่า เฮมิเซลลูโลสมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าแ่ง และเมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของแ่งที่หายไป พบว่า การใส่กรดซิทริก ทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของแ่งที่หายไปเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดซิทริกทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับแ่ง ทำให้โมเลกุลของแ่งเล็กลง สลายตัวได้ง่ายขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยุ่น ทำให้เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของแ่งที่หายไปลดลง ส่งผลให้คอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาซมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างแ่งและเส้นใยุ่น ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสุภารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน และคณะ ที่พบว่าการใส่เส้นใยุ่น ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวที่จุดสูงสุดของแ่งลดลง และเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น [9]

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่างๆของพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ที่เตรียมจากคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยาย่ม่อม โดยมีลิเซอร์อลเป็นพลาสติกไซเซอร์และปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่และไม่ใส่กรดซิตริก และใส่เส้นใยในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr เป็นส่วนเสริมแรง ซึ่งทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป นอกจากนี้ยังมีการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ซึ่งสรุปผลการวิจัยได้ ดังนี้

1. จากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน พบว่า การปรับปรุงสมบัติคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซด้วยการใส่กรดซิตริก ทำให้เกิดพีคใหม่ที่ตำแหน่ง 1742 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของ C=O stretching จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งกับกรดซิตริก จากการเติมเส้นใย พบว่า พีคช่วง $3391\text{-}3418\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ O-H stretching และพีคช่วง $1422\text{-}1428\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของ O-H bending ของแป้งมีการเคลื่อนไปยังเลขคลื่นที่ลดลง แสดงให้เห็นว่ามีเกิดพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นระหว่างแป้งกับเส้นใย นอกจากนี้พบพีคที่เกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่ง 1741 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C=O stretching ของหมู่อะเซทิลในโครงสร้างของเส้นใย
2. จากการทดสอบการเลี้ยวเบนของโครงสร้างผลึก พบว่า รูปแบบผลึกของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยาย่ม่อมมีโครงสร้างผลึกแบบ V_n -type การใส่กรดซิตริกมีผลต่อความเป็นผลึก โดยมีความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแป้งทำให้สายโซ่สั้นลง และเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เกิดกึ่ง ทำให้โครงสร้างเกาะกะ ความเป็นระเบียบลดลง ส่งผลให้ความเป็นผลึกลดลง และการเพิ่มปริมาณเส้นใย ทำให้ความเป็นผลึกมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากเส้นใยมีโครงสร้างแบบเซลล์โลสที่เป็นระเบียบ ซึ่งมีความเป็นผลึกมากกว่าแป้ง
3. จากการทดสอบสัณฐานวิทยา พบว่า คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยาย่ม่อมที่ใส่กรดซิตริกมีความเรียบของชิ้นงานมากกว่า และการกระจายตัวของเส้นใยในดิกว่าที่ไม่ใส่กรดซิตริก จากการที่กรดซิตริกไฮโดรไลซิสแป้ง ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมากขึ้น สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเส้นใยได้ดี นอกจากนี้เส้นใยมีการกระจายตัว อย่างสม่ำเสมอ แบบสุ่มทั่วทั้งชิ้นงาน และมีการยึดเกาะที่ดีระหว่างเส้นใยกับแป้ง
4. จากการทดสอบการดูดซับความชื้น พบว่า การปรับปรุงสมบัติคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซโดยใส่กรดซิตริก มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นมากกว่าการไม่ใส่กรดซิตริก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแป้ง ทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นหมู่ที่มีสมบัติชอบน้ำ และเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน เกิดกึ่ง ทำให้เกิดช่องว่าง น้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย และการปรับปรุงสมบัติโดยใส่เส้นใยในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของเส้นใย เนื่องจากเส้นใยเกิดพันธะไฮโดรเจนกับแป้ง ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลลดลง อีกทั้งในเส้นใยมีปริมาณของแวกซ์และลิกนินสูง ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่า คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวายม่อมที่ใส่กรดซิตริก มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าไม่ใส่กรดซิตริก ดังแสดงได้จากความเป็นผลึกลดลง การดูดซับความชื้นสูง และความหนืดต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยนุ่น จะเห็นได้ว่า มีค่าค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสสูงขึ้น แต่ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลง พิจารณาได้จากความเป็นผลึกลดลง การดูดซับความชื้นลดลง โดยสูตรที่มีค่าความเค้น ณ จุดแรงดึงสูงสุด และมอดูลัสสูงสุด คือ TPAS/20KF และสูตรที่มีเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงสุด คือ TPAS
6. จากการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน พบว่า สมบัติเชิงกลหลังการฝังดินมีค่าน้อยกว่าสมบัติเชิงกลก่อนการฝังดิน การใส่กรดซิตริก มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลสูง ทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็ว แต่การเพิ่มปริมาณเส้นใยนุ่น พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของสมบัติเชิงกลต่ำลง ทำให้เกิดการย่อยสลายช้า
7. จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่า การปรับปรุงสมบัติคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลด้วยการใส่กรดซิตริก อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนการปรับปรุงสมบัติคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลด้วยการใส่เส้นใยนุ่นในปริมาณเพิ่มขึ้น พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งนั้นลดลง เนื่องจากเอมิเซลลูโลสในเส้นใยนุ่นมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่าแป้ง นอกจากนี้ยังมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น พิจารณาได้จากค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปลดลง
8. พอลิเมอร์ที่เตรียมจากคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่มีสมบัติโดยรวมที่ดีที่สุด คือ TPAS/20KF โดยพิจารณาจากความเป็นผลึก การดูดซับความชื้น สมบัติเชิงกล และเสถียรภาพทางความร้อน และ TPAS/2CA โดยพิจารณาจากการย่อยสลายโดยการฝังดิน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ชิ้นงานมีความไวต่อความชื้นมาก อาจศึกษาเพิ่มเติมถึงการป้องกันความชื้น เช่น การใส่สารที่ไม่มีพิษ ได้แก่ แร่ซิลิเกตชนิดต่าง ๆ
2. ศึกษาการเตรียมแป้งที่มีองค์การแทนที่ (Degree of substitution) ต่างกัน จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้กรดซิตริกในปริมาณต่าง ๆ ก่อนนำมาขึ้นรูปชิ้นงานโดยการกดอัด
3. ในการปรับปรุงสมบัติของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิล ควรลดปริมาณกรดซิตริกให้ต่ำกว่า 2 phr เพื่อให้ชิ้นงานมีความคงตัวมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2551. ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้. [Online]. Available : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html สืบค้นข้อมูลวันที่ 13 พ.ย. 2560.
- [2] ศิริจรณา กันภัย. 2555. เคมีและสมบัติของแป้ง. [Online]. Available : <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html> สืบค้นข้อมูลวันที่ 13 พ.ย. 2560.
- [3] บุษยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์ ประภาวดี เกตุสุตา และวีรยา ธรรมมิกะ. 2550. “การเตรียมและปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งข้าวเจ้าด้วยเส้นใยฝ้าย และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2546. แป้งและอนุพันธ์ของแป้งการผลิตและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร.
- [5] สยามเคมีดอทคอม. 2560. กรดซิตริก/กรดมะนาว (Citric acid) ประโยชน์ และความเป็นพิษของกรดซิตริก. [Online]. Available : <http://www.siamchemi.com/กรดซิตริก> สืบค้นข้อมูลวันที่ 20 ธ.ค. 2560.
- [6] กัญญาภรณ์ แทนเพชร ขวัญชนก มโนภาพ และจินตมาศ สรรพทรัพย์ศิริ. 2557. “สมบัติต่างๆ ของฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งมันสำปะหลังที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกและกรดมาลิก.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] Prachayawarakom, J. Sangniyidej, P. Boonpasith, P. 2010. “Properties of Thermoplastic Rice Starch Composites Reinforced by Cotton Fiber or Low-density Polyethylene.” *Carbohydrate Polymers*. 81 : 425-433.
- [8] แพรววลลิตา บุญกัณหา, ศรีกัลยา ศรีปาน และ สุธาสิณี พันธุ์ประชา. 2553. “การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาarch จากแป้งผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งถั่วเหลือง โดยใช้เส้นใยฝ้ายและเส้นใยไหมเป็นส่วนเสริมแรง”. โครงการงานพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] สุภารัตน์ ชัยวัฒน์โยธิน สุวัฒน์ เมืองทะ และ อารียา หาญชนะ. 2554. “สมบัติต่างๆของเทอร์โมพลาสติกสตาarch คอมโพสิตจากแป้งมันสำปะหลังเสริมแรงด้วยเส้นใยปอและเส้นใยนุ่น.” โครงการงานพิเศษ คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [10] วชิระ ยมาภัย. 2554. **ไบโอพลาสติก**. [Online]. Available : <https://enchemcom1po.wordpress.com/bioplastics>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 18 พ.ย. 2560
- [11] อภิลิทธิ์ ศิริญาติ. 2555. **ปัจจัยการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ**. [Online]. Available : <http://compositfoam.blogspot.com/2012/08/polymer-biodegradable-polymer.html> สืบค้นข้อมูลวันที่ 18 พ.ย. 2560.
- [12] ปรรารถนา คำใส ลัดดาวัลย์ เณรยอด และศันสนีย์ เกตุอ่วม. 2556. “ผลของปริมาณและขนาดอนุภาคซีลีเยอที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ย่อยสลายที่เตรียมจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยาย่ม่อม.” ครงงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [13] อาสาสมัครวิกิพีเดีย. 2559. **พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 19 พ.ย. 2560.
- [14] กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2550. **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [15] ชยาภา วีระโพธิ์ประสิทธิ์. 2557. “ผลของสารก่อเจลที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยมีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นองค์ประกอบหลัก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. 2560. **แป้งดัดแปร modified-starch**. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/502/modified-starch>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 14 ธ.ค. 2560.
- [17] ทศนัย อรรถพรพิทักษ์, กัลยา เลาสงคราม และสายวรุฬ ชัยวานิชศิริ. 2546. “สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสตาร์ชท้าวยาย่ม่อม.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [18] นรินาม. 2560. **กรดซิตริก**. [Online]. Available : <http://www.ocsb.go.th/upload/journal/fileupload/146-6034.pdf>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 14 พ.ย. 2560
- [19] Wikipedia the free encyclopedia. 2561. **Citric acid**. [Online]. Available : https://en.wikipedia.org/wiki/Citric_acid. สืบค้นข้อมูลวันที่ 21 พ.ค. 2561
- [20] มณฑา จันทร์เกตุเล็กด. 2541. **เส้นใยธรรมชาติ**. พิมพ์ครั้งที่ 3. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [21] Ji, J. and Wang, R. 2013. “Properties and Product Development of the Kapok Fiber.” *Advanced Materials Research*. 627 : 62-66.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] หฤทภาค กิรีติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. 2552. “ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ”. *วิศวกรรมสาร มก.* 22(70) : 18-32.
- [23] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. 2560. **วัสดุผสม**. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/วัสดุผสม>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 22 พ.ย. 2560.
- [24] กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2557. **นิยามของคอมโพสิต**. [Online]. Available : http://thaitechno.net/dip/knowledge_detail.php?id=1849&uid=42939. สืบค้นข้อมูลวันที่ 22 พ.ย. 2560.
- [25] บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์. 2556. **สารน่ารู้ : วัสดุน้ำรู้ : โพลีเมอร์คอมโพสิต**. [Online]. Available : <https://www.mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/79-สารน่ารู้-วัสดุน้ำรู้-โพลีเมอร์คอมโพสิต>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 22 พ.ย. 2560.
- [26] อรุษา สรวารี. 2546. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่มที่ 1**. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [27] ภิชก รุ่งโรจน์ชัยพร. 2557. “กลีเซอรอล : การใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน”. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 23(2)
- [28] Wikipedia the free encyclopedia. 2560. **Glycerol**. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Glycerol>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 25 พ.ย. 2560.
- [29] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. **สารปรับแต่งพอลิเมอร์**. กรุงเทพฯ : บุกเน็ต.
- [30] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, เกียรติคุณ และนิธิยา รัตนานนท์. 2556. **แมกนีเซียมสเตียเรต**. [Online]. Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1926/glycerol-แมกนีเซียมสเตียเรต>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 25 พ.ย. 2560.
- [31] ME Mechanical Team. 2560. **Shaping Processes for Rubber Products**. [Online]. Available : <https://me-mechanicalengineering.com/shaping-processes/>. สืบค้นข้อมูลวันที่ 25 พ.ย. 2560.
- [32] Kopelovich, D. 2557. **Compression molding of polymers**. [Online]. Available: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=compression_molding_of_polymers. สืบค้นข้อมูลวันที่ 25 พ.ย. 2560.
- [33] American Standard for testing and materials. 1996. **Annual book of ASTM standard**. Philadelphia : West Conshohocken.
- [34] Trautmann, N. and Richard, T. 2539. **Moisture Content**. [Online]. Available : http://compost.css.cornell.edu/calc/moisture_content.html. สืบค้นข้อมูลวันที่ 26 พ.ย. 2560.
- [35] Campbell, D. 1989. **POLYMER CHARACTERIZATION PHYSICAL TECHNIQUES**. London : Chapman and Hall.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] สิรินันท์ วิริยะสุนทร และสงวนศักดิ์ ศรีพลัง. 2558. “การเตรียมแป้งมันสำปะหลัง/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต สำหรับเคลือบปุ๋ยที่ควบคุมการปลดปล่อย.” *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.* 43(3).
- [37] Awadhya, A. Kumar, D. and Verma, V. 2016. “Crosslinking of agarose bioplastic using citric acid.” *Carbohydrate Polymers.* 151 : 60–67.
- [38] Pornsuksomboon, K. Hollo, B. B. Szecsenyi, K. M. and Kaewtatip, K. 2016. “Properties of Baked Foams from Citric Acid Modified Cassava Starch and Native Cassava Starch Blends.” *Carbohydrate Polymers.* 136 : 107-112.
- [39] Yu, J. Wang, N. and Ma, X. 2005. “The Effects of Citric Acid on the Properties of Thermoplastic Starch Plasticized by Glycerol.” *Starch–Stärke.* 57(10) : 494–504.
- [40] Yu, J. Wang, N. Ma, X and Wang, Y. 2007. “The Influence of Citric Acid on the Properties of Thermoplastic Starch/ Linear Low- Density Polyethylene Blends.” *Carbohydrate Polymers.* 67 : 417-424.
- [41] Mei, J.Q. Zhou, D.N. Jin, Z.Y. Xu X.M. and Chen, H.Q. 2015. “Effects of Citric Acid Esterification on Digestibility, Structural and Physicochemical Properties of Cassava Starch.” *Food Chemistry.* 187 : 378–384.
- [42] Gilfillan, W.N. and Doherty, W.O.S. 2015. “Starch Composites with Aconitic Acid.” *Carbohydrate Polymers.* 141 : 60–67.
- [43] จันจิรา จันท์แจ้จ้ง เพียงฟ้า สิงห์อุดม และศศิกร ภูมิแก้ว. 2558. “การปรับปรุงสมบัติของคอมพอสิตย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชของแป้งท้าวายม่อมเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นและปรับปรุงสมบัติด้วยกรดซิตริก.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [44] จินตภา เต็มสีคราม. 2558. “สมบัติของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เชื่อมโยงด้วยกรดซิตริก กรดแลคติก และกรดมาลิก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [45] Gunzler, H. and Gremlich, H.U. 2002. *IR Spectroscopy.* German. WILEY-VCH.
- [46] Deryckea, V. Vandeputtea, G.E. Vermeylena, R. De Man, W. Goderis, B. Koch, M.H.J. and Delcour, J.A. 2002. “Starch Gelatinization and Amylose–Lipid Interactions during Rice Parboiling Investigated by Temperature Resolved Wide Angle X-ray Scattering and Differential Scanning Calorimetry.” *Journal of Cereal Science.* 42 : 334–343.

- [47] Draman, S.F.S Daik, R. Latif, S.A. and El-Sheikh, S.M. 2014. "Characterization and Thermal Decomposition Kinetics of Kapok (*Ceiba pentandra L.*) – Based Cellulose." *BioResources*. 9(1): 8-23.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

รูปที่ ก.1 ลักษณะสัณฐานวิทยาของเส้นใยนุ่น ใช้กล้องจุลทรรศน์ฟลูออเรสเซนส์แบบหัวกลับที่ทำการขยายเลนส์ใกล้ตา 10 เท่า และทำการขยายเลนส์ใกล้วัตถุ 4 เท่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 แสดงค่า Aspect ratio (L/D ratio) ของเส้นใยุ่น

ชั้นงานที่	ความยาว (L)	ความกว้าง (D)	อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (L/D)
1	1002.07	19.42	51.60
2	832.03	15.73	52.89
3	831.02	16.73	49.67
4	1315.49	20.40	64.48
5	812.83	12.32	65.98
6	891.38	9.42	94.63
7	1110.58	15.89	69.89
8	1234.21	14.43	85.53
9	1452.86	12.32	117.89
10	1425.86	13.06	109.18
11	826.37	14.89	55.50
12	666.07	15.73	42.34
13	1139.71	14.07	81.00
14	1072.4	11.24	95.41
15	715.91	9.95	71.95
16	583.94	11.24	51.95
17	764.16	12.36	61.83
18	1826.54	13.64	133.91
19	1295.36	14.13	91.67
20	737.12	11.16	66.05
21	1279.69	17.43	73.42
22	1357.60	12.04	112.76
23	903.44	12.93	69.87
24	683.78	12.86	53.17
25	972.78	17.03	57.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




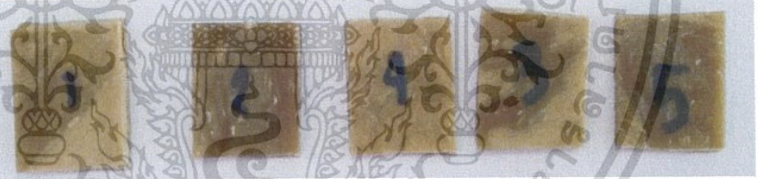



26	728.74	13.45	54.18
27	644.84	11.83	54.51
28	951.39	18.70	50.88
29	628.76	15.23	41.28
30	899.68	12.04	74.72
ค่าเฉลี่ย	986.20±301.26	14.06±2.74	71.84±23.76



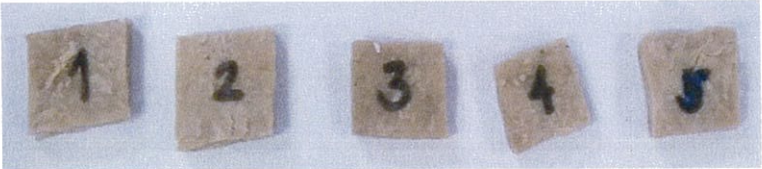






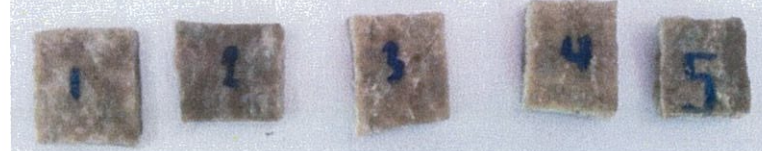
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจาก แป้งท้าวยาย่ม่อที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไมโครคริสตริก และเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1%

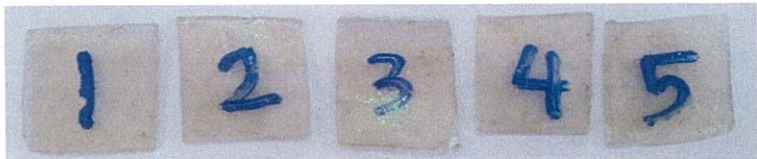
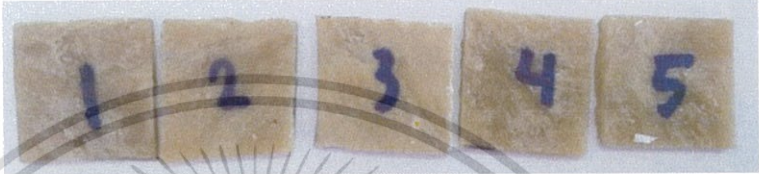





สูตร	วันที่	รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้น
TPAS	1	
	7	
	14	
TPAS /5KF	1	
	7	
	14	
TPAS /10KF	1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







TPAS /10KF	7	
	14	
TPAS /15KF	1	
	7	
	14	
TPAS /20KF	1	
	7	
	14	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้นของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งท้าวยาย่ม้อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใช้กรดซิตริก และเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 99±1%

สูตร	วันที่	รูปชิ้นงานที่ทดสอบการดูดซับความชื้น
TPAS/2CA	1	
TPAS/2CA /5KF	1	
	6	
	9	
TPAS/2CA /10KF	1	
	6	
	9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TPAS/2CA /15KF	1	
	6	
	9	
TPAS/2CA /20KF	1	
	6	
	9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ปริมาณความชื้น $99 \pm 1\%$ ของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไมโซเกรดซิริค และเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr

จำนวนวัน	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)				
	TPAS	TPAS/ 5KF	TPAS/ 10KF	TPAS/ 15KF	TPAS/ 20KF
0	0	0	0	0	0
1	9.68	9.8	9.77	9.06	8.03
2	16.82	16.31	15.54	14.63	13.6
3	21.37	20.49	19.54	18.48	17.72
4	24.4	23.46	22.48	21.29	20.77
5	26.47	25.31	23.7	23.01	22.47
6	28.65	27.28	25.43	25.28	24.61
7	30.04	28.79	27.74	26.66	26.25
8	30.66	29.47	28.19	27.01	26.52
9	31.51	30.29	28.97	27.75	26.81
10	32.53	31.33	29.04	27.99	27.55
11	32.71	31.76	29.77	28.58	27.94
12	33.24	32.37	30.57	28.87	28.27
13	33.53	32.62	31.11	29.47	28.91
14	33.88	33.17	31.41	30.01	29.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้นที่ปริมาณความชื้น $99 \pm 1\%$ ของคอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริก และเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr

จำนวนวัน	เปอร์เซ็นต์การดูดซับความชื้น (%)				
	TPAS/ 2CA	TPAS/ 2CA/ 5KF	TPAS/ 2CA/ 10KF	TPAS/ 2CA/ 15KF	TPAS/ 2CA/ 20KF
0	0	0	0	0	0
1	17.52	10.67	10.36	9.97	8.63
2		23.69	22.59	20.93	20.16
3		29.53	29.44	27.23	25.88
4		34.96	34.9	32.8	30.68
5		36.96	36.95	34.7	34.46
6		39.66	39.01	38.04	37.05
7		41.6	40.99	39.88	38.78
8		43.39	43.01	41.43	40.6
9		46.12	45.48	44.46	43.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืดของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งท้าวยายม่อมที่ใส่กรดซิตริกและไม่ใส่กรดซิตริกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr

ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
	ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
TPAS	1.48±0.15	8.21±1.12	204.34 ±3.28
TPAS/5KF	2.91±0.33	15.67±1.02	143.87±2.17
TPAS/10KF	7.4±0.77	30.53±1.45	89.59±1.54
TPAS/15KF	14.43±1.02	52.54±1.08	58.58±1.67
TPAS/20KF	28.21±1.2	74.61±1.99	43.15±1.3
TPAS/2CA	0.98±0.18	5.79±0.45	110.1±3.15
TPAS/2CA/5KF	1.61±0.78	11.43±0.78	78.23±2.15
TPAS/2CA/10KF	4.76±0.48	24.75±1.88	55.12±2.24
TPAS/2CA/15KF	10.46±1.27	50.79±1.11	47.44±1.77
TPAS/2CA/20KF	16.34±1.44	78.14±3.45	23.67±1.04

ภาคผนวก ง

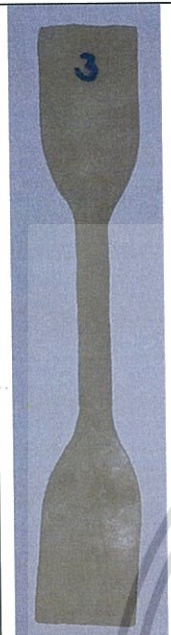

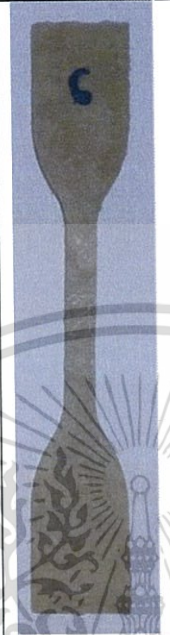



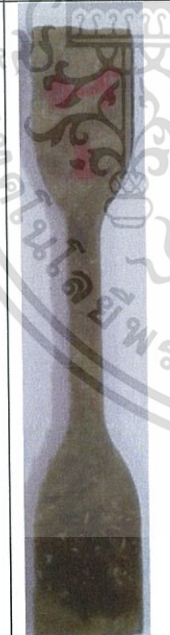



ตารางที่ ง.1 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่เตรียมได้จากแบ่งทำวายเป็นมอมที่ปรับปรุงด้วยการไมใส่กรดซิติริกเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ทำการฝังดินเป็นเวลา 0 และ 3 วัน

วัน	ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
		ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
0	TPAS	1.48±0.15	8.21±1.12	204.34 ±3.28
	TPAS/5KF	2.91±0.33	15.67±1.02	143.87±2.17
	TPAS/10KF	7.4±0.77	30.53±1.45	89.59±1.54
	TPAS/15KF	14.43±1.02	52.54±1.08	58.58±1.67
	TPAS/20KF	28.21±1.2	74.61±1.99	43.15±1.3
3	TPAS	0.59±0.15	3.03±1.01	130.35±2.98
	TPAS/5KF	1.17±0.27	6.51±1.12	48.75±2.14
	TPAS/10KF	3.24±0.34	12.43±1.65	18.7±1.85
	TPAS/15KF	6.66±0.45	19.05±1.8	15.16±1.44
	TPAS/20KF	16.22±0.65	25.44±1.1	13.18±1.2

ตารางที่ ง.2 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วยการใส่กรดซิตริกเสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ในอัตราส่วน 0 5 10 15 และ 20 phr ที่ทำการฝังดินเป็นเวลา 0 และ 3 วัน

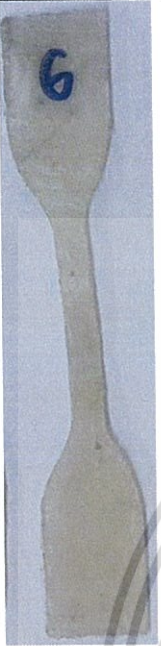




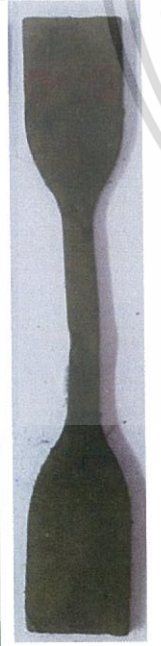




วัน	ตัวอย่าง	สมบัติเชิงกล		
		ความแข็งแรงดึง (MPa)	มอดุลัส (MPa)	เปอร์เซ็นต์การดึงยืด (%)
0	TPAS/2CA	0.98±0.18	5.79±0.45	110.1±3.15
	TPAS/2CA/5KF	1.61±0.78	11.43±0.78	78.23±2.15
	TPAS/2CA/10KF	4.76±0.48	24.75±1.88	47.44±2.24
	TPAS/2CA/15KF	10.46±1.27	50.79±1.11	55.12±1.77
	TPAS/2CA/20KF	16.34±1.44	78.14±3.45	23.67±1.04
3	TPAS/2CA	0.08±0.01	1.34±0.24	35.97±2.14
	TPAS/2CA/5KF	0.18±0.05	2.85±0.54	28.4±1.78
	TPAS/2CA/10KF	0.62±0.02	8.6±0.89	21.42±1.78
	TPAS/2CA/15KF	1.44±0.24	15.99±2.24	19.14±1.44
	TPAS/2CA/20KF	2.59±0.41	21.42±3.39	10.69±1.21

รูปที่ ง.1 คอมพอลิทีเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรซ์จากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการไม่ใส่กรดซัลฟิวริกเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่ว ในอัตราส่วนต่าง ๆ ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 วัน

					วัน 0
TPAS	TPAS/5KF	TPAS/10KF	TPAS/15KF	TPAS/20KF	
					วัน 3
TPAS	TPAS/5KF	TPAS/10KF	TPAS/15KF	TPAS/20KF	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

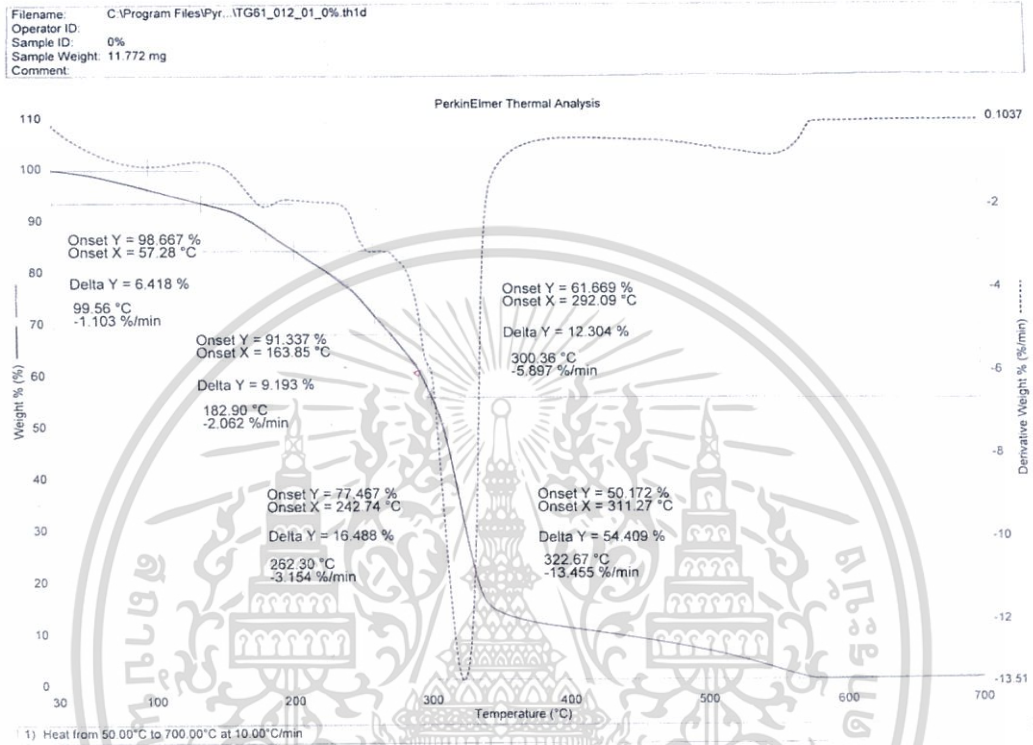
รูปที่ ง.2 คอมพอสีเทอร์โมพลาสติกทสตร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงสมบัติด้วยการใส่กรดซิตริก เสริมแรงด้วยเส้นใยุ่น ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดินเป็นระยะเวลา 3 วัน

					วัน 0
TPAS/2CA	TPAS/2CA/ 5KF	TPAS/2CA/ 10KF	TPAS/2CA/ 15KF	TPAS/2CA/ 20KF	
					วัน 3
TPAS/2CA	TPAS/2CA/ 5KF	TPAS/2CA/ 10KF	TPAS/2CA/ 15KF	TPAS/2CA/ 20KF	

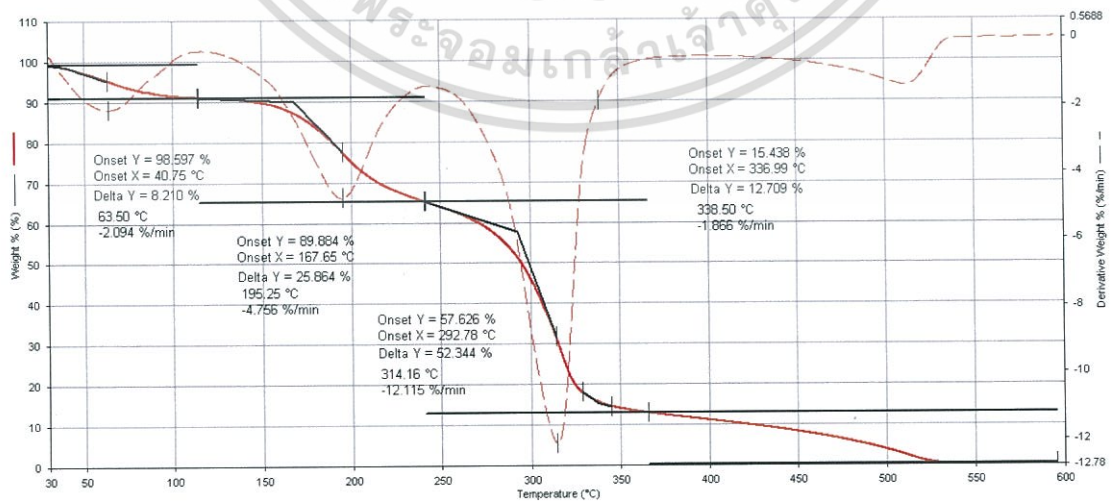
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

รูปที่ จ.1 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลีพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วยการไมโครคริสตริก และไมโครเส้นใย

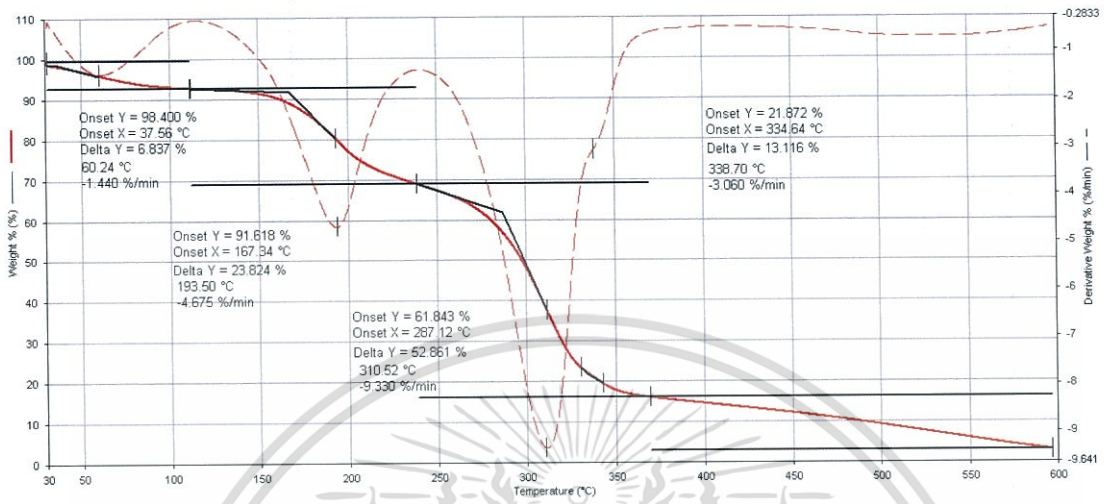


รูปที่ จ.2 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลีพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วยการไมโครคริสตริก และเส้นใยในอัตราส่วน 10 phr

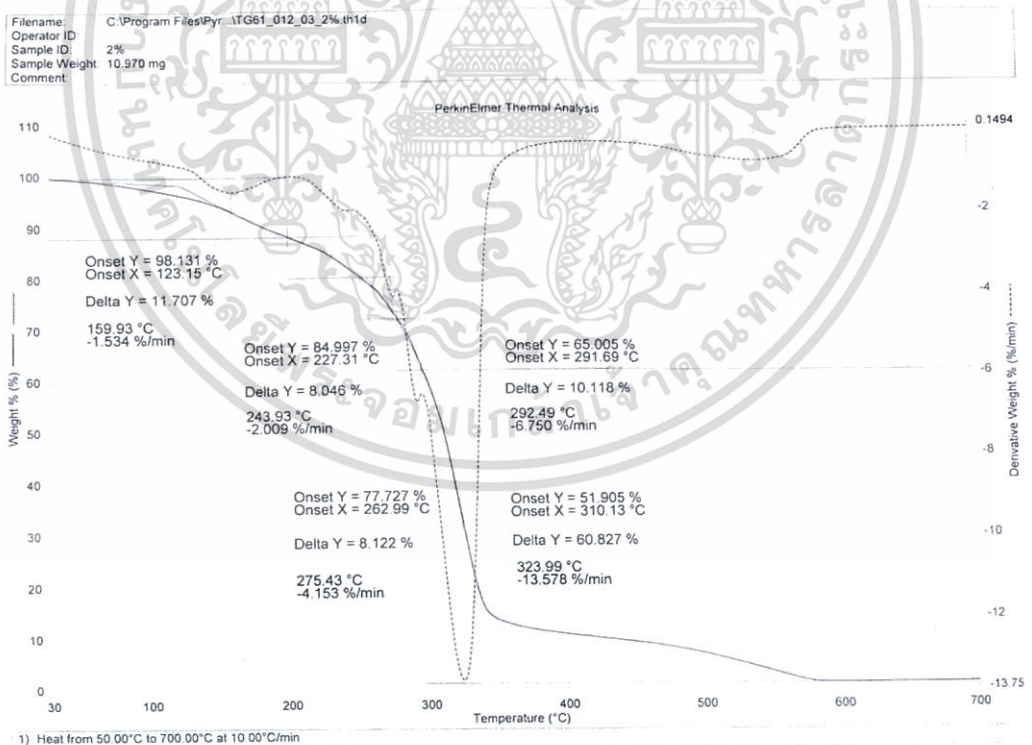


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ จ.3 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์จากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วยการไม่ใส่กรดซัลฟิวริก และเส้นใยในอัตราส่วน 20 phr

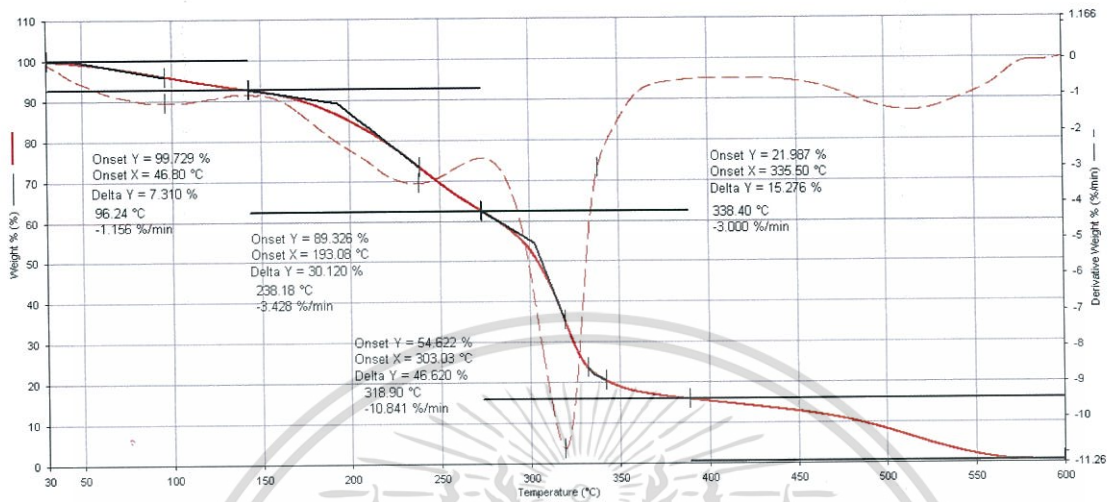


รูปที่ จ.4 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลีเอสเตอร์จากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วยการใส่กรดซัลฟิวริก และเส้นใยในอัตราส่วน 20 phr

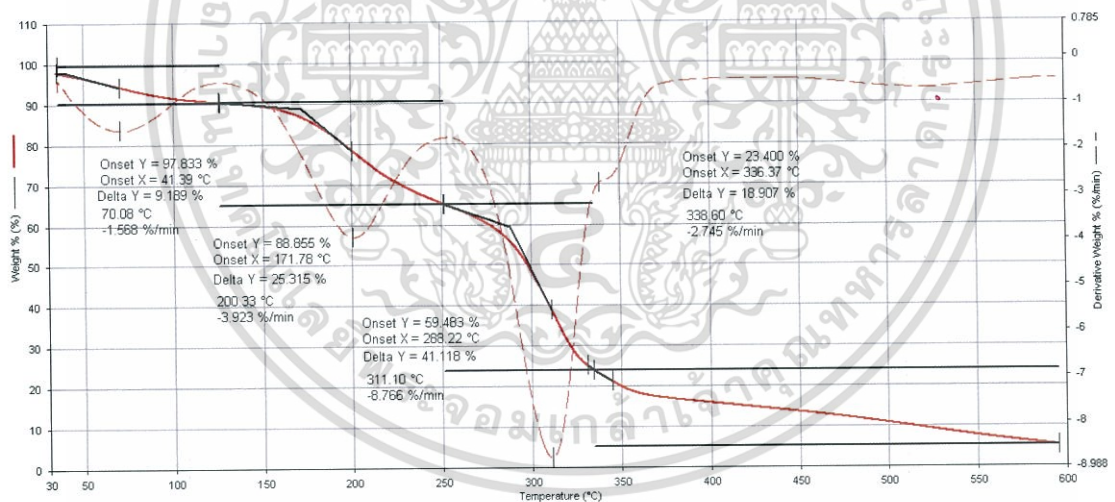


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ จ.5 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลีพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วยการใส่กรดซิตริก และเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 10 phr



รูปที่ จ.6 TG และ DTG ของคอมพอลิเมอร์โพลีพลาสติกสตาบิลจากแป้งท้าวยายม่อมที่ปรับปรุงด้วยการใส่กรดซิตริก และเส้นใยุ่นในอัตราส่วน 20 phr



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 14 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

ข้าพเจ้า นางสาว นารณัญญา ช่างเจริญ รหัสประจำตัว 57050436
นางสาว นิรันดร์รัตน์ สิริรัมย์ รหัสประจำตัว 57050442
นางสาว อัจฉรา คำดี รหัสประจำตัว 57050559

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย ผลของกรดซิตริกที่มีผลต่อสมบัติของคอมพอสิตเทอร์โมพลาสติกสตาซจากแป้งท้าวยายม่อม เสริมแรงด้วยเส้นใยหนู

ชื่อภาษาอังกฤษ EFFECT OF CITRIC ACID ON PROPERTIES OF THERMOPLASTIC ARROWROOT STARCH/ KAPOK FIBER COMPOSITES

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่มีได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว โปรแกรมอักษราวirus 5.57 %

ลงชื่อ นารณัญญา ช่างเจริญ

(นางสาว นารณัญญา ช่างเจริญ)

นักศึกษา

ลงชื่อ นิรันดร์รัตน์ สิริรัมย์

(นางสาว นิรันดร์รัตน์ สิริรัมย์)

นักศึกษา

ลงชื่อ อัจฉรา คำดี

(นางสาว อัจฉรา คำดี)

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร.จตุรรัตน์ ปรีชญาวรากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ ของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....

(รศ.ดร.จตุรรัตน์ ปรีชญาวรากร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้