

สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) FILLED WITH CELLULOSE-*GRAFT*-POLYSTYRENE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science  
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน
โดย	น.ส.วิมาลา กรินทร์ไตรทิพย์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นवलพรรณ จันทร์ศิริ)	
.....	กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)	

วิมาลา กรินทร์ไตรทิพย์ : สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน. ( PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) FILLED WITH CELLULOSE-GRAFT-POLYSTYRENE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.กาวี ศรีกุลกิจ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและศึกษาสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน โดยสังเคราะห์เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนด้วยวิธีแบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน การดัดแปรพื้นผิวของเซลลูโลสสามารถยืนยันได้จากการทดสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิคเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี และความเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) จากนั้นนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ที่ร้อยละ 1 3 5 และ 10 โดยมวล นำคอมพอสิตที่ได้ขึ้นรูปเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา ความร้อน การย่อยสลาย และการดูดซึมน้ำ จากการศึกษาพบว่า การเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนมีผลต่อความทนแรงกระแทก ความทนแรง ยังสัมพันธ์กับการยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น โดยการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่ร้อยละ 3 โดยมวล ให้ค่าความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตสูงสุด แต่ค่าการยืด ณ จุดขาดลดลง เมื่อนำมาศึกษาสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต พบว่าความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ สำหรับสมบัติการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ และสมบัติการดูดซึมน้ำ พบว่า ปริมาณของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละน้ำหนักที่หายไปของวัสดุคอมพอสิตเมื่อถูกฝังกลบเพิ่มขึ้น และดูดซึมน้ำได้มากขึ้นเมื่อถูกแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา ปีเตอร์เคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต .....

เมอร์

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6072179223 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: cellulose, polystyrene, poly(lactice acid), polymer blends, emulsion polymerization

Wimala Karintrithip : PROPERTIES OF POLY(LACTIC ACID) FILLED WITH CELLULOSE-*GRAFT*-POLYSTYRENE. Advisor: Assoc. Prof. KAWEE SRIKULKIT, Ph.D.

The main aims of this research was to prepare and study the properties of the poly(lactice acid) filled with cellulose-*g*-polystyrene. The cellulose modification was prepared via emulsion polymerization. The modification of cellulose filler was confirmed by characteristic peaks obtained from Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis and the shifting of thermogravimetric analysis (TGA) thermogram. The polymer blends with cellulose/polystyrene contents of 1, 3, 5 and 10wt% were prepared through the twin screw extruder. The mechanical, morphology, thermal, degradation and water absorption properties were examined. The mechanical properties of polymer blends increased with the addition of cellulose-*g*-polystyrene. The composite with 3%wt of cellulose-*g*-polystyrene showed the optimum value of impact strength but caused the decreasing in elongation at break of the composite. The thermal stability of the composites was increased with the increasing in cellulose/polystyrene content. Moreover, degradation and water absorption properties of the composites were improved as the content of the fillers increased.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์ เพราะได้รับความร่วมมือจากบุคคลหลายท่าน ทั้งคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิด้านต่าง ๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวิ ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา สนับสนุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยอย่างดีตลอดการทำวิจัยนี้ และแนะแนวทางในการดำเนินทางในการดำเนินงานรวมถึงการแก้ไขปัญหาเมื่อเกิดข้อผิดพลาด ในการทำวิจัยได้อย่างถูกต้อง รวมถึงการแนะนำแนวทางในการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ ที่สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร. นवलพรรณ จันทศิริ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนและเอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมืออุปกรณ์ทำวิจัย และเครื่องมือทดสอบต่าง ๆ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนการไปเสนองานวิชาการในต่างประเทศ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อนที่คอยสนับสนุน เป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาในการทำวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า

วิมาลา กรินทร์ไตรทิพย์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 พลาสติกชีวภาพ.....	3
2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลาย.....	3
2.2 พอลิแล็กติกแอซิด.....	5
2.2.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด .....	6
2.3 เซลลูโลส (cellulose).....	7
2.3.1 สมบัติของเซลลูโลส.....	7
2.3.2 การดัดแปรพื้นผิวของเซลลูโลส .....	7
2.4 พอลิสไตรีน (polystyrene).....	10
2.5 คอมพอสิตชีวภาพ (biocomposite) .....	10
2.6 การทำพอลิเมอร์ผสม (polymer blend).....	11
2.6.1 ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ (miscibility of polymers) .....	12
2.6.2 ชนิดของพอลิเมอร์ผสม .....	12

2.6.3 สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer).....	13
2.7 กระบวนการเตรียมคอมพอสิตและขึ้นรูปชิ้นงาน .....	14
2.7.1 การผสม (mixing).....	14
2.7.2 การคอมพาวด์ (compounding).....	14
2.7.3 การขึ้นรูป .....	15
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	19
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	20
3.3 ขั้นตอนการทดลอง .....	21
3.3.1 การเตรียมไมโครคริสตัลไลน์เซลลูโลส .....	21
3.3.2 การเตรียมเซลลูโลสเจล.....	21
3.3.3 การสังเคราะห์เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนโดยกระบวนการแบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน .....	22
3.3.4 การทดสอบหาระยะเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน .....	23
3.3.5 การเตรียมพอลิเล็กทริกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน .....	23
3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล .....	24
3.3.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน .....	26
3.3.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	27
3.3.8 ทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ.....	27
3.3.9 ทดสอบการดูดซึมน้ำ.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	29
4.1 การสังเคราะห์เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนโดยกระบวนการแบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน .	29
4.1.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR.....	29



4.1.2 การวิเคราะห์ความเสถียรภาพทางความร้อนด้วยทีจีเอ (TGA).....	30
4.1.3 การหาลักษณะการกราฟต์.....	32
4.1.3 ลักษณะสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	33
4.2 ลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด.....	35
4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเล็กทิกคอมพอสิต .....	36
4.3.1 สมบัติความทนแรงกระแทก.....	36
4.3.2 สมบัติความทนแรงดึง .....	37
4.4 สมบัติความร้อนของพอลิเล็กทิกคอมพอสิต .....	39
4.4.1 เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคทีจีเอ.....	39
4.4.2 พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC.....	40
4.5 สมบัติการย่อยสลายของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิต .....	41
4.5.1 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอสิต .....	41
4.5.2 สมบัติการย่อยสลายด้วยวิธีฝึงกลบ .....	44
4.5.3 ลักษณะสัญญาณวิทยาของพอลิเล็กทิกแอซิดและคอมพอสิตที่ผ่านการย่อยสลายด้วยวิธีการ ฝึงกลบ .....	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	47
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	48
บรรณานุกรม.....	49
ภาคผนวก.....	52
ประวัติผู้เขียน.....	72

## สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด.....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแล็กติกแอซิด .....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส .....	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีน .....	10
รูปที่ 2.5 ประเภทจากการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรง.....	11
รูปที่ 2.6 การหมุนในทิศทางเดียวกัน และทิศทางตรงกันข้าม.....	15
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีด .....	15
รูปที่ 2.8 กระบวนการฉีดขึ้นรูป.....	16
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมเซลลูโลสเจล.....	21
รูปที่ 3.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี รุ่น Nicolet 6700.....	22
รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน รุ่น DSC3+ .....	22
รูปที่ 3.4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่.....	23
รูปที่ 3.5 รูปตัวอย่างขึ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 .....	24
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH.....	25
รูปที่ 3.7 รูปตัวอย่างขึ้นทดสอบในรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D638 .....	25
รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล .....	26
รูปที่ 4.1 FT-IR สเปกตรัมของเซลลูโลส เซลลูโลสดัดแปร และเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ตามลำดับ.....	30
รูปที่ 4.2 เทอร์โมแกรม (a) TGA และ (b) DTG ของเซลลูโลส พอลิสไตรีน เซลลูโลส/พอลิสไตรีนผสม แบบแห้ง และเซลลูโลสดัดแปร.....	31
รูปที่ 4.3 ปฏิกริยาการสังเคราะห์เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน .....	33

รูปที่ 4.4 SEM micrograph พื้นผิวของ (a) ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (b) เซลลูโลสเจล และ (c) เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ที่กำลังขยาย (1) 300 และ (2) 3000 .....	34
รูปที่ 4.5 SEM micrograph ตามขวางของ (a) PLA และคอมพอสิต (b)1wt%MC (c) 3wt%MC (d) 5wt%MC (e) 10wt%MC (f) 3wt%UMC ที่กำลังขยาย 1000 .....	36
รูปที่ 4.6 สมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 1-10 โดยมวล (เส้นทึบ) และเซลลูโลสบริสุทธิ์ ร้อยละ 3 โดยมวล (เส้นปะ).....	37
รูปที่ 4.7 สมบัติความทนแรงดึงของพอลิแล็กติกแอซิดที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 1 3 5 และ 10 โดยมวล ตามลำดับ (เส้นทึบ) และเซลลูโลสบริสุทธิ์ ร้อยละ 3 โดยมวล (เส้นปะ).....	38
รูปที่ 4.8 ยั่งสัมมูล์ของพอลิแล็กติกแอซิดที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 1 3 5 และ 10 โดยมวล ตามลำดับ (เส้นทึบ) และเซลลูโลสบริสุทธิ์ ร้อยละ 3 โดยมวล (เส้นปะ).....	38
รูปที่ 4.9 สมบัติการยึดตัว ณ จุดขาดของพอลิแล็กติกแอซิดที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 1 3 5 และ 10 โดยมวล ตามลำดับ (เส้นทึบ) และเซลลูโลสบริสุทธิ์ ร้อยละ 3 โดยมวล (เส้นปะ) .....	38
รูปที่ 4.10 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกคอมพอสิต .....	40
รูปที่ 4.11 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิแล็กติกแอซิดและคอมพอสิตที่ 1 5 10 20 30 40 50 และ 100 วัน .....	43
รูปที่ 4.12 สมบัติการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดและคอมพอสิตเป็นเวลา 30 60 และ 90 วัน ด้วยวิธีการฝังกลบ .....	44

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	19
ตารางที่ 3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	20
ตารางที่ 3.3	อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับมาสเตอร์แบทช์ .....	24
ตารางที่ 4.1	อุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสบริสุทธิ์ พอลิสไตรีน เซลลูโลสตัดแปร และเซลลูโลส/ พอลิสไตรีนผสมแบบแห้ง .....	31
ตารางที่ 4.2	อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกคอมพอสิต .....	39
ตารางที่ 4.3	เอกลักษณ์ทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกคอมพอสิต .....	41
ตารางที่ 4.4	SEM micrograph ของพอลิแล็กติกแอซิดและคอมพอสิตที่ผ่านกระบวนการย่อยสลาย ด้วยวิธีการฝังกลบ ที่กำลังขยาย 500 .....	45

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุที่ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนทำให้อุตสาหกรรมพลาสติกเติบโตอย่างรวดเร็ว ผลกระทบพลาสติกที่ถูกทิ้งภายหลังการใช้งานได้กลายเป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่สลายตัวได้ยาก และอาจต้องใช้เวลานานนับร้อยปีกว่าจะสลายตัวได้หมด สาเหตุมาจากการที่พลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก จึงทนทานต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ หรือพลาสติกมีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือมีลักษณะไม่เป็นรูพรุน ซึ่งส่งผลให้เอนไซม์ที่ปลดปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ซึมผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำเข้าไปย่อยสลายพลาสติกได้ยาก ซึ่งการกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีไซเคิลเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดปริมาณขยะพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่จากข้อมูลทางสถิติ พบว่า แต่ละปีประเทศไทยมีขยะพลาสติกรวมประมาณ 2.7 ล้านตัน ซึ่งได้ถูกนำไปรีไซเคิลเพียง 0.2 ล้านตัน [1] ที่เหลือจะถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ เผาทำลาย หรือเผาให้ได้สารเชื้อเพลิง เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้อาจมีปัญหาด้านต้นทุนการดำเนินการที่สูง รวมทั้งที่ดินที่นำไปฝังกลบหาได้ยากและมีราคาสูง และอาจได้รับการต่อต้านจากประชาชนที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ตลอดจนก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยสารพิษเมื่อพลาสติกถูกเผาทำลาย จึงอาจกล่าวได้ว่ายังไม่มีวิธีกำจัดขยะพลาสติกที่ได้ผลและมีประสิทธิภาพเพียงพอ ดังนั้นจึงยังคงมีขยะพลาสติกตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมอีกเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันได้มีนักวิจัยจำนวนมากพยายามหาแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว รวมถึงการพัฒนาพลาสติกชีวภาพ (bioplastics) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable) ซึ่งมีแนวโน้มในการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากกระแสอนุรักษ์ธรรมชาติและ การตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อม อีกทั้งกฎข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อมที่ผลักดันให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นความต้องการ พลาสติกชีวภาพในตลาดโลกจึงมีอัตราเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พลาสติกชีวภาพยังมีข้อจำกัดด้านคุณภาพและราคาของผลิตภัณฑ์ โดยงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) ซึ่งเป็นพลาสติกชีวภาพประเภทหนึ่งที่เกิดโดยวัตถุดิบมวลชีวภาพ (biomass) จากพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น มันสำปะหลัง อ้อย และข้าวโพด เป็นต้น เนื่องจากพอลิแล็กติกแอซิดยังมีข้อจำกัดในการใช้งานและการย่อยสลาย เพราะเป็นเทอร์โมพลาสติกที่แข็งและเปราะ และมีความทนความร้อนต่ำ อีกทั้งยังใช้เวลานานในการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบ โดยการทำให้เป็นคอมพอสิตชีวภาพ (biocomposite) จากวัสดุธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เช่นกัน ซึ่งได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) ที่มีอยู่

เป็นจำนวนมากในธรรมชาติและราคาถูก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ด้วยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อม โดยสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้จะเปลี่ยนเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือแก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่ในขั้นตอนสุดท้าย ดังนั้นคอมพอสิตชีวภาพที่ได้จึงมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในขณะที่สมบัติบางอย่างได้รับการปรับปรุงให้เหมาะกับการใช้งานมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ทั้งปริมาณขยะพลาสติกตกค้างและการใช้ทรัพยากรธรรมชาติจากปิโตรเลียมลดลงอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้เซลลูโลส (Cellulose) สามารถดูดซึมน้ำได้ดี หากแต่จะเกิดการเกาะกลุ่มระหว่างเส้นใยได้ง่าย เนื่องจากมีอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลผ่านทางพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีผลทำให้พื้นผิวสัมผัสและการกระจายตัวในเมทริกซ์ของพอลิแล็กติกแอซิดลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองตัดแปรพื้นผิวของเซลลูโลสด้วยการกราฟต์ด้วยพอลิสไตรีน (polystyrene) ก่อนนำไปผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) และขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ (injection molding) ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. สังเคราะห์เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนโดยกระบวนการแบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน
2. เตรียมพอลิแล็กติกแอซิด/เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนคอมพอสิตเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพทาง ความร้อน และการย่อยสลายทางชีวภาพ

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้พอลิแล็กติกแอซิด/เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนคอมพอสิตที่มีสมบัติทางความร้อน และการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดี

## บทที่ 2

### วารสารปริทรรศน์

#### 2.1 พลาสติกชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพ (bioplastic) หรือพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (biodegradable plastic) หมายถึงพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นพืช สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (biodegradable) ช่วยลดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อม โดยแหล่งที่มาของพลาสติกชีวภาพนั้นสามารถแบ่งตามแหล่งที่มาของสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตเป็น 3 กลุ่มหลักๆ ดังนี้ [2]

- **พลาสติกชีวภาพจากทรัพยากรทดแทน (renewable resource-based bioplastics)** สามารถสังเคราะห์ได้จากพืช สัตว์ และทรัพยากรทดแทนอื่นๆ เช่น แป้ง โปรตีน ไคโตซาน เซลลูโลส และ พอลิแล็กติกแอซิด เป็นต้น

- **พลาสติกชีวภาพจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม (petroleum based bioplastics)** สามารถสังเคราะห์ได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น พอลิคาโพรแลคโตน (polycaprolactone, PCL) พอลิบิวทิลีนแอดิเพต-โค-เทเรพทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) เป็นต้น

- **พลาสติกชีวภาพจากแหล่งผสม (bioplastics from mixed sources)** ได้จากการผสมกันระหว่างวัสดุธรรมชาติดกับมอนอเมอร์จากปิโตรเลียม เช่น พอลิไตรเมททิลีนเทเรพทาเลต (poly(trimethylene terephthalate), PTT) เป็นต้น

#### 2.1.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลาย

การออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกนั้นก็ควรต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งมีระบบจัดการที่รองรับกับพลาสติกหลังการใช้งาน โดยประเภทของพลาสติกย่อยสลายจะแบ่งประเภทของการย่อยสลายออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ [2] คือ

- **การย่อยสลายได้โดยแสง (photodegradation)** การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือ

สภาวะแวดล้อมอื่นที่มีด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

- **การย่อยสลายทางกล (mechanical degradation)** โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

- **การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation)** การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานซิลิซัน ซึ่งทำหน้าที่คะตะลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

- **การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation)** การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดริค พอลิคาร์บอนเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (catalytic hydrolysis) และไม่ใช่คะตะลิสต์ (non-catalytic hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (enzyme) เช่น depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อย



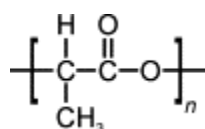
สลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้ หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

- **การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation)** การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของ จุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของ จุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายใน สายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของ พันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมี ขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ ในขั้นตอนสุดท้าย (ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรใน ธรรมชาติ (mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวล ชีวภาพ (biomass)

## 2.2 พอลิแล็กติกแอซิด

พอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ได้จากการทำปฏิกิริยา พอลิเมอร์ไรเซชันของกรดแล็กติก (lactic acid) มีชื่อทางเคมีคือ 2-Hydroxy propionic acid สามารถ ผลิตได้จากการหมักสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง พอลิ แล็กติกแอซิดมีโครงสร้างเคมีดัง **Error! Reference source not found.** โดยในช่วงแรกถูกนำมา ประยุกต์ใช้งานแค้ในด้านการแพทย์ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูง สั้เคราะห์ได้ปริมาณน้อย และมี น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ตัวอย่างเช่น การนำไปใช้เป็นวัสดุค้ำจุนสำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (tissue scaffolds) อุปกรณ์ปลูกถ่าย (medical implants) ไหมเย็บแผลที่ใช้ในร่างกาย (internal sutures) และทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี การสังเคราะห์พอลิแล็กติกแอซิดสามารถทำได้ หลายวิธี เช่น การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาการควบแน่นแบบ azeotropic dehydration condensation ซึ่งจะทำได้พอลิแล็กติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึงระดับมากกว่า 100,000 ดาล ตัน และปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรงของกรดแล็กติก (direct condensation polymerization) จะได้ เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ประมาณ 1,000–5,000 ดาลตัน บางครั้งเรียกว่าพรีพอลิเมอร์

นอกจากนั้น เมื่อนำพรีพอลิเมอร์ดังกล่าวไปผ่านปฏิกิริยาแตกตัวย้อนกลับ (depolymerization) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแล็กไทด์ซึ่งมีโครงสร้างไอโซเมอร์หลายแบบ เช่น LL, LD, และ DD ซึ่งสารดังกล่าวสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ได้เป็นพอลิแล็กติกแอซิดอีกครั้ง ซึ่งจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงในระดับมากกว่า 100,000 ดาลตัน เช่นเดียวกัน [3, 4]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแล็กติกแอซิด [5]

### 2.2.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด

สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและอัตราส่วนของมอนอเมอร์ 2 ชนิด แอล-แล็กติกแอซิด (L-lactic acid) และดี-แล็กติกแอซิด (D-lactic acid) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นอิแนนซีโอเมอร์ (enantiomer) ที่มีความว่องไวต่อแสง (optical active) ต่างกัน กล่าวคือสูตรเคมีเหมือนกัน แต่การจัดเรียงตัวในสามมิติไม่เหมือนกัน โดยอัตราส่วนนี้จะส่งผลต่อสมบัติความเป็นผลึก (crystallinity) ของพอลิแล็กติกแอซิดโดยตรง ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรง สมบัติเชิงกล โมดูลัส และสมบัติด้านต่างๆของพอลิเมอร์

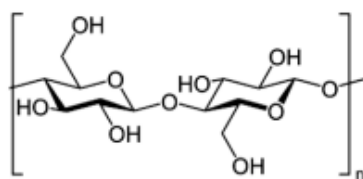
สมบัติที่โดดเด่นของพอลิแล็กติกแอซิด คือขึ้นรูปง่าย โปร่งใส สามารถสลายตัวได้ในธรรมชาติ มีความเป็นพิษต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โมดูลัสและความแข็งแรงสูง แต่พอลิแล็กติกแอซิดมีข้อจำกัด คือ ความเปราะสูง และอัตราการตกผลึกช้า ส่งผลให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน โดยข้อจำกัดเหล่านี้สามารถปรับปรุงได้หลายวิธี เช่น การเติมสารก่อผลึก (nucleating agent) การทำพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) และการให้แรงดึงเพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ โดยวิธีที่ได้รับความนิยมสูงสุดคือการทำพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและต้นทุนต่ำ [6, 7]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของแล็กติกแอซิด [8]

## 2.3 เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลส เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ตั้งโครงสร้างเคมีในรูปที่ 2.3 โดยเป็นโพลิเมอร์ของกลูโคสโมโนเมอร์ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่งบีต้า-1,4 ( $\beta$ -1,4 linkage) เซลลูโลส เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ มักพบในผนังเซลล์ของพืช ไร อามีบา และแบคทีเรียบางชนิด เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักที่ทำให้ความแข็งแรงและความเสถียรภาพแก่โครงสร้างของผนังเซลล์ [9, 10]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [11]

### 2.3.1 สมบัติของเซลลูโลส

เซลลูโลสจัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ละลายน้ำ มีองค์ประกอบทางเคมีคือ น้ำตาล เช่นเดียวกับแป้ง โครงสร้างของเซลลูโลสประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคสต่อเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งสาขา เซลลูโลสและแป้งมีสมบัติบางประการคล้ายคลึงกัน เช่น สมบัติโครงสร้าง โดยสายโซ่เซลลูโลสจะมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลและออกซิเจนและไม่มีพันธะกิ่ง จึงทำให้สายโซ่เซลลูโลสสามารถจัดเรียงตัวซ้อนกันได้เป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยโครงสร้างส่วนที่เป็นระเบียบและอสัณฐาน โดยเซลลูโลสมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบมากกว่า ทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงมากกว่าและมีความเป็นผลึกสูงกว่า เกิดโครงสร้างร่างแห หรือฟอร์มเจลที่มีเสถียรภาพดี และยังพบว่าความต้านทานแรงดึงขาด ค่าความยืดหยุ่น และอุณหภูมิการหลอมตัวสูงมาก มีความคงตัวต่อความร้อนและมีความสามารถในการละลายต่ำ

เซลลูโลสสามารถหาได้ง่ายในธรรมชาติ มีปริมาณมากสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้เรื่อยๆ และมีราคาถูกกว่าเส้นใยสังเคราะห์ จึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในพลาสติก โดยมักนิยมใช้เป็นสารตัวเติมและสารเสริมแรง เพื่อลดต้นทุน และเพิ่มปริมาณการผลิต [12, 13]

### 2.3.2 การดัดแปรพื้นผิวของเซลลูโลส

เซลลูโลสถูกนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุในการเสริมแรงของพอลิเมอร์ เนื่องจากเซลลูโลสสามารถถ่ายโอนความเค้นระหว่างเมทริกซ์และเส้นใยได้ดี จึงส่งผลให้วัสดุมีความแข็งแรง แต่มีข้อเสีย

หลักคือ เส้นใยธรรมชาติยึดเกาะกับวัฏภาคของพอลิเมอร์ได้ไม่ดี เนื่องจากความเป็นขี้และชอบน้ำของเส้นใยเอง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการดัดแปรพื้นผิว เพื่อปรับปรุงสมบัติยึดเกาะของเส้นใยเสริมแรงในวัสดุก่อนที่จะนำมาใช้เสริมแรงในวัสดุผสม เพื่อให้ได้วัสดุผสมที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความแข็งแรงสูง โดยกระบวนการที่ใช้ในการดัดแปรผิวเส้นใย สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธีการทางกล และวิธีการทางเคมี [14]

### 2.3.2.1 การดัดแปรพื้นผิวเส้นใยด้วยวิธีการทางกล (physical method)

วิธีการดัดแปรเส้นใยทางกลนี้จะรวมถึงการยืด การรีด การผ่านกระบวนการทางความร้อน (thermo-treatment) ซึ่งวิธีการดัดแปรเส้นใยทางกลเหล่านี้จะเปลี่ยนโครงสร้างและสมบัติพื้นผิวของเส้นใยและมีอิทธิพลต่อการสร้างพันธะกับวัฏภาคของพอลิเมอร์ แต่ไม่ได้เปลี่ยนองค์ประกอบของเส้นใยแต่อย่างใด ดังนั้นการดัดแปรพื้นผิวเส้นใยจะช่วยทำให้การยึดเกาะของเส้นใยกับเมทริกซ์ดีขึ้น วิธีดัดแปรเส้นใยทางกลนั้นมีหลายวิธี ได้แก่

- **การปรับสภาพผิวด้วยโคโรนา (corona treatment)** เป็นวิธีการดัดแปรพื้นผิวทางกลที่อุณหภูมิต่ำ โดยในการทำโคโรนาทรีทเมนต์นั้น พลาสมาโคโรนาจะถูกสร้างจากการประกบยูทไฟฟ้าศักย์สูงให้แก่อิเล็กโทรดปลายแหลม (tips) ทำให้เกิดรูปแบบ (form) ของพลาสมาขึ้นตรงบริเวณปลายแหลมนั้น การประกบยูทโคโรนาลงบนพื้นผิวของเส้นใยที่เป็นกลุ่มฟังก์ชันที่มีขี้ เช่น เส้นใยเซลลูโลสนั้นจะไปปรับปรุงสมบัติความชอบน้ำของเส้นใย จากการดัดแปรเส้นใยพบว่า การอาบพลาสมาบนผิวของเส้นใยเซลลูโลสมีผลทำให้การยึดเกาะกันของเส้นใยที่ชอบน้ำและเมทริกซ์ที่ไม่ชอบน้ำดีขึ้น

- **การปรับสภาพผิวด้วยพลาสมา (plasma treatment)** เป็นวิธีการดัดแปรพื้นผิวเส้นใยที่คล้ายกับโคโรนาทรีทเมนต์ โดยการทำพลาสมาทรีทเมนต์นั้น สามารถทำได้โดยการสร้างประจุขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุ การดัดแปรพื้นผิวของวัสดุนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิด และธรรมชาติของแก๊สที่ใช้ อนุมูลอิสระที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive free radical) และกลุ่มฟังก์ชัน (functional group) ซึ่งสามารถสร้างขึ้นได้ โดยที่พลังงานพื้นผิวสามารถเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงข้ามพื้นผิว (surface cross-linking) ขึ้น

### 2.3.2.2 การตัดแปรพื้นผิวเส้นใยด้วยวิธีการทางเคมี (chemical method)

เนื่องจากเซลลูโลสมีความเป็นขั้วสูง ส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะของเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์ซึ่งมีสมบัติความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) นั้นไม่ดี การปรับปรุงให้การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ให้ดีขึ้นได้โดยอาศัยวิธีการทางเคมี คือการเติมวัสดุภาคที่สามลงไป ซึ่งวัสดุภาคที่สามนี้จะเป็ยวัสดุภาคที่อยู่ระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ การตัดแปรเส้นใยธรรมชาติด้วยวิธีการทางเคมีสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

- **การปรับสภาพผิวด้วยไซเลน (silane treatment)** วิธีนี้จะใช้ไซเลน (silane) เป็นสารคู่ควบ (coupling agent) ซึ่งไซเลนที่เติมเข้าไปนี้จะอยู่ที่ระหว่างบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นผิวเส้นใยกับเมทริกซ์ โดยไซเลนจะเข้าไปปรับสภาพความชอบน้ำ ณ บริเวณรอยต่อระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ โดยเฉพาะเมื่อใช้กับพอลิเมอร์ที่มีกลุ่มฟังก์ชันอะมิโนของไซเลน (amino-functional silane) เช่น อีพอกซี (epoxy) และยูรีเทน (urethane) เป็นต้น ไซเลนและกลุ่มฟังก์ชันอะมิโนของไซเลนนี้จะทำให้เกิดกลุ่มฟังก์ชันเอมีน (amine) ได้มากขึ้น ทั้งนี้กลุ่มฟังก์ชันเอมีนที่อยู่ในเมทริกซ์พอลิเมอร์ ซึ่งเติมที่ทาปฏิกิริยากับน้ำได้ยาก จะสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาตรงรอยต่อได้มากขึ้น เพราะไซเลนไปปรับสภาพตรงบริเวณรอยต่อให้มีกลุ่มฟังก์ชันเอมีนเพิ่มขึ้น ทำให้การยึดเกาะดีขึ้น

- **การปรับสภาพผิวด้วยอัลคาไลน์ (alkaline treatment)** เป็นวิธีตัดแปรเส้นใยทางเคมีที่นิยมใช้ โดยอาศัยการใช้สารอัลคาไลน์เข้าไปทำลาย (disruption) พันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างโครงข่าย (network structure) ทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีความหยาบเพิ่มขึ้นและแรงตึงผิว (surface tension) ลดลง ส่งผลให้ลักษณะการยึดเกาะของเส้นใยดีขึ้น

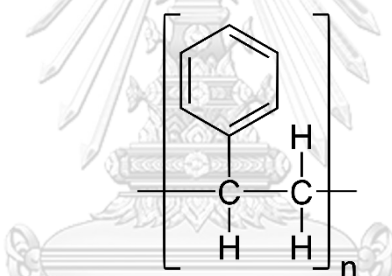
- **การปรับสภาพผิวด้วยกระบวนการอะซิไทลชัน (acetylation treatment)** เป็นวิธีการตัดแปรผิวเส้นใยให้มีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น โดยอาศัยการเติมกลุ่มฟังก์ชันของอะซิไทล (acetyl) ลงไปเคลือบหมู่ไฮดรอกซี (hydroxy group, -OH) ของเซลลูโลส ส่งผลลักษณะความชอบน้ำของเส้นใยเปลี่ยนแปลงไป

- **การปรับสภาพผิวด้วยสารคู่ควบมาเลอิก (maleated coupling)** เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เส้นใยธรรมชาติที่จะนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุผสม โดยการตัดแปรเส้นใยด้วยวิธีนี้จะต่างจากวิธีอื่น ๆ คือมาเลอิก แอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) จะเข้าไปทำปฏิกิริยาทั้งที่ผิวเส้นใยและผิวเมทริกซ์พอลิเมอร์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุผสมดีขึ้น

- การปรับสภาพผิวด้วยเอนไซม์ (enzyme treatment) ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีเอนไซม์ในการตัดแปรพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติมากขึ้น เนื่องจากเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีงานวิจัยศึกษาถึงผลของเอนไซม์ที่มีต่อเส้นใยอะบาคา (abaca) พบว่า สมบัติความต้านแรงดึงของวัสดุผสมที่ใช้เส้นใยอะบาคาเป็นเส้นใยเสริมแรงจะมีเพิ่มขึ้น 5-45 เปอร์เซ็นต์ หลังจากทำการปรับสภาพผิวเส้นใย

## 2.4 พอลิสไตรีน (polystyrene)

พอลิสไตรีน [15] เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากสไตรีนมอนอเมอร์ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนผ่านปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบแขวนลอย (suspension polymerization) ดังโครงสร้างทางเคมีในรูปที่ 2.4 พอลิสไตรีนเป็นเทอร์โมพลาสติกอสัณฐานที่ให้สมบัติหลอมเหลวที่ดี ง่ายต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่างๆ เมื่อเริ่มแข็งตัวพอลิสไตรีนจะใสไม่มีสีอ่อนเจือปน ผู้ผลิตจึงสามารถนำสีที่ต้องการมาใส่ได้เพื่อให้เกิดสีสนที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้

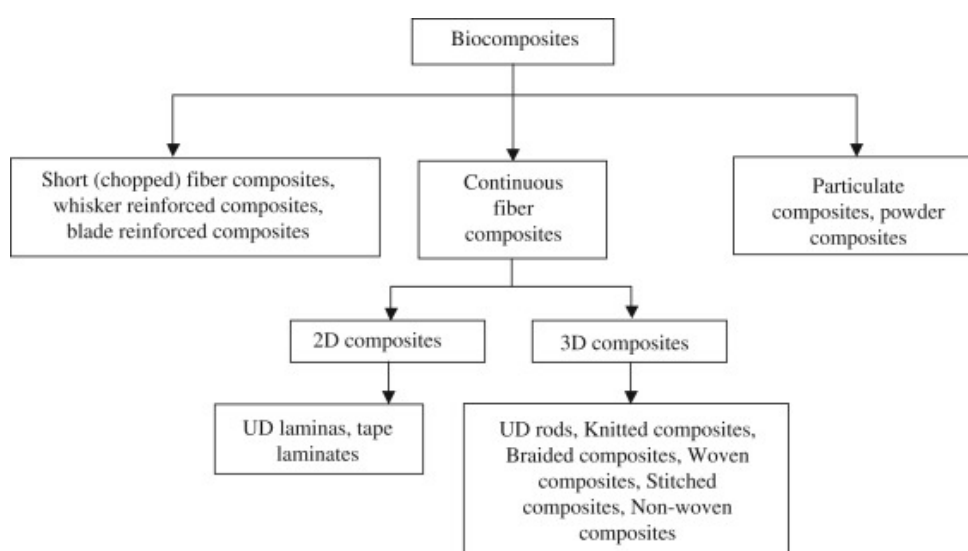


รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีน [15]

## 2.5 คอมพอสิตชีวภาพ (biocomposite)

คอมพอสิตเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้งานหลากหลาย วัสดุคอมพอสิตเกิดจากการรวมสมบัติเชิงเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุพื้นฐานอย่างน้อย 2 ชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้โครงสร้างใหม่ที่มีสมบัติดีขึ้น โดยวัสดุคอมพอสิตจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่เป็นวัสดุเนื้อหลักเรียก เมทริกซ์ และส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรง (reinforcement) เป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงแก่วัสดุคอมพอสิต วัสดุคอมพอสิตส่วนใหญ่มีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง และมีสมบัติเฉพาะในการใช้งานเฉพาะ สำหรับวัสดุที่เสริมแรงด้วยเส้นใยเกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1908 โดยผสมเส้นใยเซลลูโลสกับฟีนอลิกส์ จากนั้นมีการเปลี่ยนชนิดของพลาสติกเป็นยูเรีย และเมลามีน จนกระทั่งปี ค.ศ. 1940 มีการผลิตพลาสติกคอมพอสิต โดยใช้พอลิเมอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (unsaturated polyesters) และเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว (glass fiber) เพื่อผลิตสินค้าหลายประเภท เช่น ชิ้นส่วนของรถยนต์ เครื่องบิน และอิเล็กทรอนิกส์

วัสดุคอมพอสิตชีวภาพจัดเป็นคอมพอสิตที่เตรียมได้จากเส้นใยธรรมชาติและพอลิเมอร์ที่ได้จากปิโตรเลียม เช่น อีพอกซี (epoxy) พอลิโพรไพลีน (polypropylene, PP) หรือพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เช่น พอลิแล็กติกแอซิด นอกจากนี้คอมพอสิตชีวภาพยังรวมไปถึงคอมพอสิตที่เตรียมจากพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ เช่น เส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน เป็นต้น วัสดุคอมพอสิตชีวภาพสามารถแบ่งประเภทจากการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรงได้ดังนี้ แบบเส้นใยต่อเนื่อง (continuous fibers) แบบเส้นใยสั้นไม่ต่อเนื่อง (discontinuous fibers/whiskers) และแบบอนุภาค (particles) [16, 17] ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ประเภทจากการจัดเรียงตัวของสารเสริมแรง [17]

## 2.6 การทำพอลิเมอร์ผสม (polymer blend)

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยม โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ สารละลาย (solution) หรือสารหลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดนั้นเป็นไปได้ยาก โดยพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไม่ละลายเข้ากันอย่างแท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะต้องกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้น จะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (defects) ของชิ้นงาน และส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (compatibility) [18]

### 2.6.1 ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ (miscibility of polymers)

ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamic) เป็นหลักการที่ได้มีการนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางการค้าเพื่อพิจารณาความเข้ากันได้ของการผสมนั้น โดยในการพิจารณาจากสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับพอลิเมอร์ที่สามารถผสมกันได้เป็นเนื้อเดียว นั้นจะต้องมีค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม (Gibbs free energy,  $\Delta G_{\text{mix}}$ ) เป็นลบ โดยสามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}}$$

โดยในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั้นจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม (entropy,  $\Delta S_{\text{mix}}$ ) น้อยมาก ดังนั้นหากค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมมีค่าเป็นลบได้ สามารถเกิดขึ้นได้แค่กรณีเดียวคือจะต้องมีค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการผสม (enthalpy,  $\Delta H_{\text{mix}}$ ) เป็นลบ นั่นแสดงว่าในกระบวนการผสมจะต้องมีการคายความร้อน (exothermic) เกิดขึ้น

### 2.6.2 ชนิดของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่

- **ผสมกันได้อย่างสมบูรณ์ (completely miscible blend)** กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่ผสมมีค่า  $\Delta H_{\text{mix}}$  น้อยกว่า 0 เนื่องจากเกิดอันตรกิริยา (interaction) ที่จำเพาะขึ้น ซึ่งสำนักงานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมนี้จะมีความเป็นเนื้อเดียวกันในระดับนาโนเมตร แต่ไม่ถึงในระดับโมเลกุล

- **ผสมกันได้บางส่วน (partially miscible blends)** โดยพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันนั้นมีส่วนหนึ่งที่สามารถละลายกับพอลิเมอร์อีกตัวหนึ่งได้ ซึ่งจะทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสำนักงานวิทยาที่ละเอียดและสมบัติที่ยอมรับได้ มักจะเรียกพอลิเมอร์ผสมชนิดนี้ว่า “compatible polymer blend” ซึ่งพอลิเมอร์ที่ผสมได้ จะมีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature) ของพอลิเมอร์แต่ละตัวปรากฏอยู่ แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์บริสุทธิ์แต่ละตัว

- **ผสมกันไม่ได้ (fully immiscible)** พอลิเมอร์ชนิดนี้จะมีสำนักงานวิทยาที่หยาบ มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาค (phase) ที่ไม่ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมแย่ง แต่สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมชนิดนี้ด้วยการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer)



### 2.6.3 สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer)

สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้คือ พอลิเมอร์หรือโคพอลิเมอร์ ที่นิยมใช้เป็นสารเติมแต่ง เพื่อเพิ่มความเข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ผสมที่ไม่สามารถเข้ากันได้เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติของช่วยเพิ่มสมบัติของพอลิเมอร์ผสม หรือใช้เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของสารตัวเติม (fillers) ในการเตรียมคอมพอสิต โดยสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่

- **บล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (block or graft copolymer)** การใช้บล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ในการทำให้เกิดการเข้ากันได้นั้นจะมีกระบวนการคือ โคพอลิเมอร์นี้จะเข้าไปบริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์เพื่อลดแรงตึงผิว โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้จะต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างวัฏภาคของพอลิเมอร์แต่ละชนิด เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม บล็อกพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่าการกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่มาผสมกัน

- **พอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วแต่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (nonreactive polymers containing polar group)** หลักการทำงานของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดนี้คือ โคพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วอยู่บนโมเลกุลจะเกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ เช่น พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) โดยถ้าหากอันตรกิริยานี้เกิดขึ้นมากจะทำให้การยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์กับโคพอลิเมอร์นี้มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้เกิดความเข้ากันได้ดีและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยทั่วไปสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ นั้นจะต้องเข้ากันได้กับหนึ่งวัฏภาคในระบบ ซึ่งมักจะเป็นวัฏภาคที่ไม่มีขั้ว และจะต้องทำให้เกิดอันตรกิริยากับวัฏภาคอื่นในระบบ

- **พอลิเมอร์ที่มี หมู่ ฟังก์ชัน หรือ ส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (functional/reactive polymers)** หลักการทำงานของสารเพิ่มความเข้ากันได้ชนิดนี้คือ สารเพิ่มความเข้ากันได้จะเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันซึ่งสามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง ส่วนหมู่ฟังก์ชันของโคพอลิเมอร์นั้นจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของวัฏภาคที่กระจายตัว ซึ่งสารกลุ่มนี้จะประกอบด้วยส่วนของโมเลกุลที่มีขั้วแต่ไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและหมู่ฟังก์ชันที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิโอเลฟินส์ โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้

## 2.7 กระบวนการเตรียมคอมพอสิตและขึ้นรูปชิ้นงาน

ขั้นตอนการเตรียมคอมพอสิตพอลิเมอร์จัดเป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการแปรรูปวัตถุดิบให้พร้อมนำมาผลิตเป็นชิ้นงานได้และถือเป็นอุตสาหกรรมปลายน้ำของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ ขั้นตอนการผสม การขึ้นรูป และการหล่อเย็น

### 2.7.1 การผสม (mixing)

การผสมเป็นการนำวัสดุต่างชนิดมารวมกันและเฉลี่ยให้เข้ากัน เช่น การผสมสารเติมแต่งกับพลาสติก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการผสมของแข็งกับของแข็งหรือของแข็งกับของเหลวเข้าด้วยกัน โดยการทำให้อุณหภูมิเกิดการเคลื่อนที่กระแทก เสียตีสี และคลุกเคล้ากันจนได้สภาพการผสมที่ต้องการ ผลของการผสมทำให้เกิดการกระจายตัวของวัสดุต่างชนิดกันเข้ากันอย่างทั่วถึง แต่ยังคงสามารถแยกอนุภาคของสารแต่ละชนิดได้อย่างชัดเจน เครื่องผสมที่ใช้ในการผสมมีลักษณะการผสมแบบรุ่ม (batch mixer) ซึ่งเกิดการผสมโดยทำให้อุณหภูมิเกิดการคลุกเคล้ากัน โดยไม่ทำให้พอลิเมอร์ได้รับแรงเฉือนมากนัก

### 2.7.2 การคอมพาวด์ (compounding)

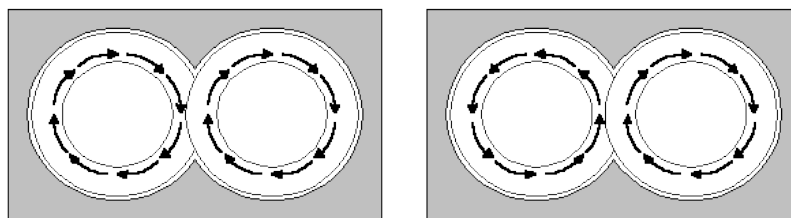
การคอมพาวด์ เป็นขั้นตอนการผสมสารเติมแต่งเข้ากับพอลิเมอร์ โดยให้ความร้อนจนอยู่ในสภาวะหลอม จากนั้นสารเติมแต่งและพอลิเมอร์ที่หลอมแล้วจะถูกนวดผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เทคนิคการคอมพาวด์ถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การคอมพาวด์แบบรุ่ม (batch compounding) และการคอมพาวด์แบบต่อเนื่อง (continuous compounding)

#### 2.7.2.1 เครื่องอัดรีด (extruder)

เครื่องอัดรีด หรือเครื่องนวดผสมร่วม (co-kneader) จัดเป็นเครื่องที่ใช้ในการคอมพาวด์แบบต่อเนื่อง ซึ่งประกอบด้วยสกรูหรือฟันนวดที่หมุนอยู่ภายในกระบอกรีด การหมุนของสกรูทำให้เกิดแรงเฉือนและการเคลื่อนตัวไปทุกทิศทางของการผสมซึ่งทำให้เกิดการผสมขึ้นในระดับที่ละเอียดกว่าการคอมพาวด์แบบรุ่ม เครื่องอัดรีดที่ใช้ในการคอมพาวด์ในอุตสาหกรรมมักใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่เป็นหลัก ส่วนเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวจะใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการความพิถีพิถันในการคอมพาวด์มากนัก

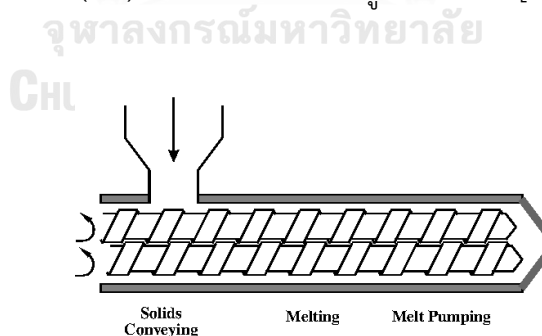
- เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) เป็นเครื่องคอมพาวด์ที่มีประสิทธิภาพในการผสมสูงกว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดจากการหมุนของสกรูคู่สูงกว่า โดยลักษณะการหมุนของสกรูคู่มี 2 แบบ ได้แก่ การหมุนในทิศทางเดียวกัน (co-rotating screw) และทิศทางการหมุนสวนทางกัน (counter-rotating screw) ดังรูปที่ 2.6 โดยใน

การทำคอมพาวด์พอลิเมอร์มักใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่มีลักษณะการหมุนของสกรูแบบในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.6 การหมุนในทิศทางเดียวกัน และทิศทางการหมุนสวนทางกัน

ตัวเครื่องอัดรีดนั้นจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ ดังรูปที่ 2.7 ได้แก่ ส่วนที่ 1 ส่วนของถังบรรจุวัตถุดิบสำหรับป้อน หรือฮอปเปอร์ (feed hopper) เป็นรูปทรงกระบอกหรือกรวย ใช้สำหรับบรรจุพอลิเมอร์โดยที่ก้นถังมีสกรูป้อน (screw feeder) ทำหน้าที่หมุนพาพอลิเมอร์ให้เครื่องสู่กระบวนการอย่างสม่ำเสมอ ส่วนที่ 2 ส่วนอัดรีด ประกอบด้วยบาร์เรลหรือปลอกเหล็ก (barrel) ลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวงที่วางตัวตามแนวนอน โดยภายในบาร์เรลจะมีสกรู (screw) ทำหน้าที่ลำเลียงพอลิเมอร์ป้อนสู่ภายใน และคลุกเคล้าให้ผสมเข้ากันในช่องว่างระหว่างครีบกวาด (flight) กับกระบอก เมื่อพอลิเมอร์ถึงช่วงที่ระยะครีบกวาดสั้นลงจะถูกบีบให้เคลื่อนที่อยู่ในที่ว่างลดลง ความดันสูงขึ้น ทำให้เกิดแรงเฉือน (shear force) ระหว่างพอลิเมอร์ที่ถูกป้อนด้วยตัวเอง และระหว่างพอลิเมอร์กับพื้นผิวของกระบอกและสกรู เกิดการนวดให้ผสมรวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน ก่อนจะลำเลียงไปยังส่วนที่ 3 ส่วนของหน้าแปลน (die) เป็นส่วนที่พอลิเมอร์ถูกฉีดออกมา [19]



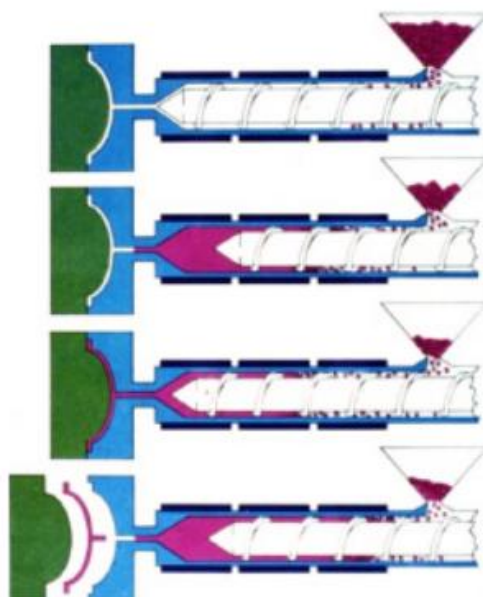
รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดรีด [20]

### 2.7.3 การขึ้นรูป

กระบวนการขึ้นรูปเป็นกระบวนการแปรรูปหรือเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ หรือชิ้นงานที่มีรูปร่างตามความต้องการ โดยใช้แม่พิมพ์หรือเครื่องมือเฉพาะในการขึ้นรูป ในการขึ้นรูปนั้นวัตถุดิบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบภายในของวัสดุนั้น ๆ

### 2.7.3.1 กระบวนการฉีดขึ้นรูป (injection molding)

เป็นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปจัดเป็นเทคนิคที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย โดยหลักการทำงาน คือ ฉีดพอลิเมอร์ที่กำลังหลอมอยู่เข้าสู่แม่แบบด้วยความดันสูง ดังรูปที่ 2.8 ส่วนประกอบสำคัญของเครื่อง ได้แก่ ส่วนที่ 1 ฮอปเปอร์ เป็นส่วนที่ใช้บรรจุเม็ดพลาสติก เพื่อป้อนเข้าเครื่องฉีดพลาสติก ส่วนที่ 2 กระบอกลูกฉีดและสกรู (injector and screw) เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของเครื่องฉีดพลาสติก ทำหน้าที่ลำเลียงพอลิเมอร์หลอมเหลวและสร้างแรงดัน เพื่อฉีดพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ ภายในกระบอกลูกฉีดมีเครื่องให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ และสกรูที่มีความยาวสั้นกว่ากระบอกลูกฉีดน้อย มีลักษณะเป็นเกลียวหยาบหมุน สามารถเคลื่อนถอยหลังและดันกลับ เพื่อเพิ่มแรงดันให้กับพอลิเมอร์หลอมเหลวให้ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ ส่วนที่ 3 หัวฉีด (nozzle) เป็นส่วนต่อปลายกระบอกลูกฉีดเข้ากับแม่พิมพ์ โดยหัวฉีดมีขนาดรูที่เล็ก เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ด้วยความรวดเร็ว ส่วนที่ 4 แม่พิมพ์ (mold) เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นช่องว่าง ที่มีรูปร่างตามผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานที่ต้องการ [21]



รูปที่ 2.8 กระบวนการฉีดขึ้นรูป

### 2.7.3.2 กระบวนการอัด (compression molding)

กระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ด้วยการอัดเป็นเทคนิคการแปรรูปที่เก่าแก่ที่สุดอีกเทคนิคหนึ่ง เป็นเทคนิคการแปรรูปพอลิเมอร์ที่ไม่ซับซ้อน โดยหลักการทำงาน คือ การนำเม็ดหรือผงพลาสติกมาอัดในแม่แบบ (mold) ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อให้พอลิเมอร์หลอม

และไหลเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่แบบ (cavity) ส่วนประกอบหลักของเครื่อง ได้แก่ แผ่นเหล็กอัด (platens) จำนวน 2 ชุด แผ่นหนึ่งจะสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ (movable platen) ส่วนอีกแผ่นจะถูกยึดติดกับที่ (fixed platen)

ระยะเวลาการทำงานต่อวัฏจักรของการอัดนั้นขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตที่เป็นตัวนำความร้อนที่ไม่ดี และในการอัดต้องให้อุณหภูมิถึงจุดที่เกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลได้ ซึ่งหากเติมเม็ดหรือผงพลาสติกลงในแม่แบบโดยตรงจะทำให้ระยะเวลาในการอัดนานมาก ดังนั้นจึงควรมีการให้ความร้อนแก่พลาสติกก่อนนำเข้าแม่แบบ เพื่อให้พลาสติกสามารถไหลได้ดีขึ้น เพื่อลดระยะเวลาในการทำงานต่อวัฏจักรให้สั้นลง

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kowalczk และคณะ [22] ทดลองผสมพอลิแล็กติกแอซิดและเส้นใยนาโนเซลลูโลส (cellulose nanofibers) และเส้นใยเซลลูโลสขนาดมาตรฐาน (cellulose standard size fibers) โดยขึ้นรูปผ่านการอัดแบบ (compression molding) จากการทดสอบสัญญาณวิทยา พบว่า เส้นใยนาโนเซลลูโลสและเส้นใยเซลลูโลสขนาดมาตรฐานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ช่วง 200-300 nm และ 10-17  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ มีการกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของพอลิแล็กติกแอซิดและเมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic-mechanical analysis) ของคอมพอสิต พบว่า เมื่อใส่เส้นใยเซลลูโลสทั้ง 2 ชนิด ในอัตราส่วนโดยมวลที่ร้อยละ 2 เท่ากัน เส้นใยนาโนเซลลูโลสส่งผลให้ค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus) ของคอมพอสิตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 14 เป็น 25 ในขณะที่เส้นใยเซลลูโลสขนาดมาตรฐานไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดุลัสสะสมเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ไม่ได้ใส่สารเติมแต่งใดๆ

Jonoobi และคณะ [23] ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยนาโนเซลลูโลสต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอสิต โดยเตรียมคอมพอสิตที่มีปริมาณเส้นใยร้อยละ 1, 3 และ 5 โดยมวล โดยการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ พบว่า ความทนแรงดึง (tensile strength) และยังสัมมอดุลัส (Young's modulus) ของคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเส้นใยเซลลูโลสในพอลิแล็กติกแอซิดที่เพิ่มขึ้น โดยคอมพอสิตที่มีปริมาณเส้นใยเซลลูโลสร้อยละ 5 โดยมวล ทำให้ความทนแรงดึงและยังสัมมอดุลัสเพิ่มจาก 58 MPa เป็น 71 MPa และจาก 2.9 GPa เป็น 3.6 GPa ตามลำดับ

Lv และคณะ [24] ศึกษาการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดที่ผสมด้วยแป้งและผงไม้บดด้วยวิธีฝังดิน (soil burial test) จากการวิเคราะห์น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงหลังการย่อยสลาย พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตสามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิแล็กติกแอซิดล้วน ภายหลังจากฝังดินในวันที่ 60 พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์เริ่มมีรอยดำสีขาวบนชิ้นงานเล็กน้อยซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับน้ำหนักที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 0.05 ในขณะที่ชิ้นงานที่เป็นพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตจำนวน 3 ชิ้น เกิดเป็นจุดสีดำและรอยแตกอย่างชัดเจน และเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่สูงกว่าที่ร้อยละ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ โดยร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแป้งที่เติมลงไป ผู้ทำวิจัยพบว่าแป้งและผงไม้บดสามารถเร่งอัตราการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolytic degradation) ได้เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวและเป็นโมเลกุลมีความชอบน้ำ (hydrophilic) สูงกว่าพอลิแล็กติกแอซิด แต่แป้งเป็นเซลลูโลสที่มีความเป็นผลึกน้อยกว่าผงไม้บด ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกตัวเข้าภายในโครงสร้างได้มากกว่า

Li และคณะ [25] ได้ทำการสังเคราะห์พอลิส์ไตรีนนาโนคอมพอสิตโดยการกราฟต์พอลิส์ไตรีนบนเซลลูโลสไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดระดับนาโนด้วยวิธีแลกเปลี่ยนสารทำละลาย (solvent-exchange) จากการทดสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy) พบพีกที่แสดงถึงความถี่ในการสั่นแบบยืดหด (stretching) ของพันธะ C-H ในวงเบนซีนที่ตำแหน่ง  $3025\text{ cm}^{-1}$ , การสั่นแบบยืดหดและงอ (bending) ของหมู่  $\text{CH}_2$  ที่ตำแหน่ง  $2850$  และ  $1450\text{ cm}^{-1}$  นอกจากนี้ ยังพบพีกที่แสดงถึงการสั่นนอกระนาบ (out-of-plane) ของวงเบนซีนที่ตำแหน่ง  $902\text{ cm}^{-1}$  และหลังจากการสกัดสไตรีนจากคอมพอสิตด้วยซอกเลต (soxhlet-extraction) แล้วพบว่า ยังคงพบพีกที่ตำแหน่ง  $1452$  และ  $899\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงวงเบนซีนในพอลิส์ไตรีนส่วนที่ถูกกราฟต์บนพื้นผิวของเซลลูโลส

**บทที่ 3**  
**วิธีการดำเนินการวิจัย**

**3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง**

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบ/สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต/ประเทศ
พอลิแล็กติกแอซิด	2003D	Nature Works Company/ ประเทศสหรัฐอเมริกา (USA)
ผ้าฝ้าย (cotton)	-	Guy Laroche/ประเทศไทย
สไตรีนมอนอเมอร์	Technical	IRPC Co., Ltd/ประเทศไทย
กรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น ร้อยละ 37	AR	Quality Reagent Chemical/ ประเทศนิวซีแลนด์
โซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ด	Technical	Chemiall Co.,Ltd/ประเทศไทย
ยูเรีย	Technical	Hefei TNJ Co., Ltd ประเทศ จีน
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	Technical	กรุงเทพเคมี/ประเทศไทย
โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต	AR	Quality Reagent Chemical/ ประเทศนิวซีแลนด์
เอทานอล	AR	Quality Reagent Chemical/ ประเทศนิวซีแลนด์

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อเครื่องมือ/อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต/รุ่น
ตู้อบ (hot air oven)	Memmert/UNB 400
เครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยมสองตำแหน่ง (digital balance)	Ohaus/Scout
เครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยมสี่ตำแหน่ง (digital balance)	Ohaus/Pioneer
เครื่องกวนสารแบบใช้ความร้อน (hot plate)	MTOPS/MS300HS
เครื่องกวนแบบเชิงกล (mechanical stirrer)	IKA Labortechnik
เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder)	Labtech Engineering
เครื่องฉีดขึ้นรูป (injection molding)	Sumitomo/SE-DUZ
เครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding)	Labtech Engineering/LP20-b
เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR)	Thermo Scientific/Nicolet 6700
เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC)	Mettler Toledo/STARe
เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analysis, TGA)	Mettler Toledo/DSC3+
เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine)	Tinius Olsen/model 5 ST
เครื่องทดสอบแรงกระแทก (impact testing machine)	Gotech/GT-7045-MDH
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)	JOEL/HT-7700



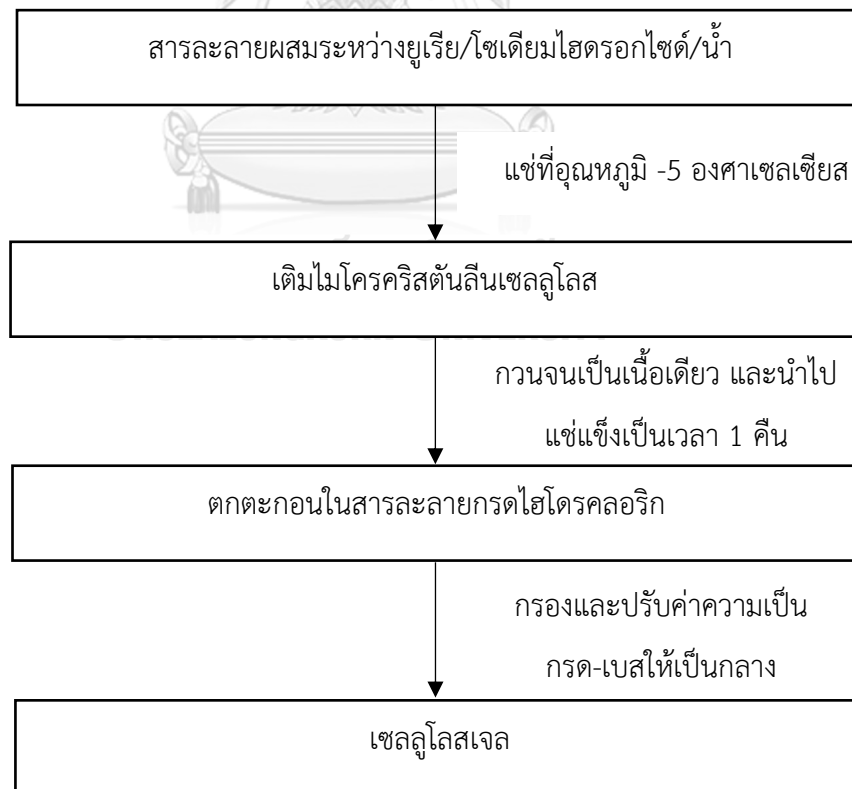
### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

นำผ้าฝ้ายมาตัดให้มีขนาดเล็ก จากนั้นมาผ่านกระบวนการตัดสายโซ่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) 2.5N ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะได้ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส โดยไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่ได้จะอยู่ในรูปของตะกอนสีขาวในสารละลายกรด จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีภาวะเป็นกลางและนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน

#### 3.3.2 การเตรียมเซลลูโลสเจล

เตรียมสารละลายระหว่างยูเรีย/โซเดียมไฮดรอกไซด์/น้ำที่อัตราส่วน 12:7:81 โดยมวล นำไปแช่จนอุณหภูมิของสารเท่ากับ -5 องศาเซลเซียส แล้วจึงเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส กวนจนเป็นเนื้อเดียวกันก่อนจะนำไปแช่แข็งเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำสารละลายไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมาตกตะกอนในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก แล้วจึงนำไปล้างกรดออกจนมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่าเป็นกลาง [24] ดังรูปที่ 3.1



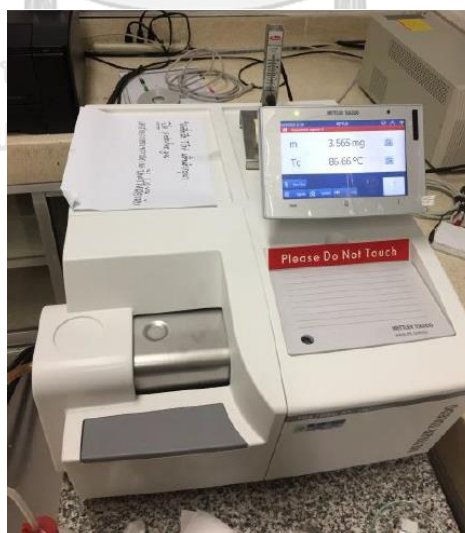
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมเซลลูโลสเจล

### 3.3.3 การสังเคราะห์เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนโดยกระบวนการแบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน

ทำการผสมเซลลูโลสและสไตรีนมอนอเมอร์ในสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol)) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยมีโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulfate) เป็นตัวริเริ่ม (initiator) ให้ความร้อนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนได้เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนในรูปอิมัลชัน ทิ้งไว้ให้แห้งในอุณหภูมิห้อง และนำไปบดให้เป็นผง พิสูจน์เอกลักษณ์ของคอมพอสิตด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (infrared spectroscopy, FTIR) และหาปริมาณกราฟต์โคพอลิเมอร์ (grafting content) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analysis, TGA) แสดงดังรูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี รุ่น Nicolet 6700



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน รุ่น DSC3+

### 3.3.4 การทดสอบหาหาร้อยละเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน

การหาปริมาณการกราฟต์ของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนด้วยการแช่ในโทลูอีนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 สัปดาห์ หลังจากนั้นกรองเพื่อแยกส่วนคอมพอสิตออก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำน้ำหนักที่ได้คำนวณตามสมการ 3.1

$$\text{ร้อยละกราฟต์โคพอลิเมอร์ (grafting yield, \%G)} = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

3.1

โดย  $m_1$  คือ น้ำหนักสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา

$m_2$  คือ น้ำหนักหลังแช่โทลูอีน

### 3.3.5 การเตรียมพอลิแล็กติกแอซิดผสมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน

นำเม็ดพอลิแล็กติกแอซิดไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเตรียมคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ แสดงดังรูป 3.4 โดยกำหนดภาวะที่ใช้ดังนี้ อุณหภูมิจากส่วนที่ป้อนสาร (hopper) ถึงหน้าแปลน (die) ที่ 160 – 175 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ทำการผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดด้วยอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3 นำเส้นพอลิเมอร์คอมพอสิตไปตัดให้เป็นเม็ด (pelletize) เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบสมบัติทางความร้อน และการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยกระบวนการฉีดแบบต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CU



รูปที่ 3.4 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่

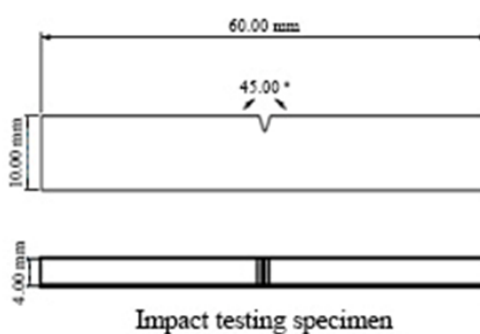
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดกับมาสเตอร์แบทช์

พอลิเมอร์คอมพอสิต	น้ำหนัก (กรัม)	
	พอลิแล็กติกแอซิด	มาสเตอร์แบทช์
พอลิแล็กติกแอซิด (pure PLA)	1000	-
พอลิแล็กติกแอซิด/เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 1 โดยมวล (composite 1%wt)	990	10
พอลิแล็กติกแอซิด/เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 3 โดยมวล (composite 3%wt)	970	30
พอลิแล็กติกแอซิด/เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 5 โดยมวล (composite 5%wt)	950	50
พอลิแล็กติกแอซิด/เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 10 โดยมวล (composite 10%wt)	900	100

### 3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

#### 3.3.5.1 สมบัติความทนแรงกระแทก

หาความทนแรงกระแทกของของชิ้นงาน โดยนำชิ้นงานทดสอบขนาดตามมาตรฐาน ASTM D256 ดังรูปที่ 3.5 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact tester) แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยกำหนดภาวการณ์ทดสอบดังนี้ ค้อนขนาด 1 จูล ความเร็วค้อน 3.460 เมตรต่อวินาที และบากชิ้นงานแบบไอซอด (Izod notched)



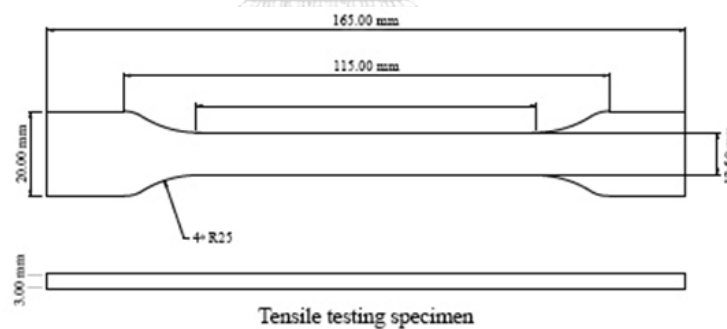
รูปที่ 3.5 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก รุ่น GT-7045-MDH

### 3.3.5.2 สมบัติความทนแรงดึง

นำชิ้นงานทดสอบขนาดตามมาตรฐาน ASTM D638 ชนิดที่ 1 แสดงดังรูปที่ 3.7 ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) แสดงดังรูปที่ 3.8 เพื่อหาค่าความทนแรงดึง ความทนแรงดึงการยึดตัว ณ จุดขาด และยังสัมมูลัส โดยกำหนดภาวการณ์ทดสอบ ดังนี้ ขนาด load cell เท่ากับ 5 กิโลนิวตัน และอัตราความเร็วในการดึงคงที่ 10 มิลลิเมตรต่อนาที



รูปที่ 3.7 รูปตัวอย่างชิ้นทดสอบในรูปดัมเบล ตามมาตรฐาน ASTM D638



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

### 3.3.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

#### 3.3.6.1 เสถียรภาพทางความร้อน

ทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์จากอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature) และปริมาณแก้ว (residual) ด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ขึ้นงานหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัม ใส่ลงในภาชนะที่ทำจากอะลูมินา ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50–700 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

#### 3.3.6.2 พฤติกรรมทางความร้อน

วิเคราะห์อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature,  $T_{cc}$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (melting temperature,  $T_m$ ) ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) แสดงดังรูป 3.9 นำสารหนักประมาณ 5-10 มิลลิกรัม วางบนจานอะลูมิเนียมที่อยู่ภายใต้เตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยภาวะที่ใช้ในการทดสอบแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นที่ 1 ให้ความร้อนเริ่มต้นจาก 25 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ขั้นที่ 2 ลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียส จนถึง 25 องศาเซลเซียส และขั้นที่ 3 ให้ความร้อนจาก 25 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัวที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที



รูปที่ 3.9 เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ รุ่น DSC1/STAR<sup>e</sup>

### 3.3.7 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของคอมพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยนำชิ้นงานทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น จากนั้นติดบนแท่นวางชิ้นงานแล้วฉาบผิวด้วยทองผ่านเครื่อง sputter-coater ที่มีศักย์ไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ ทำการทดสอบที่กำลังขยาย 500

### 3.3.8 ทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝักรวม

ขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (compression molding) จากนั้นนำชิ้นงานแผ่นฟิล์มที่ได้จากการอัดขึ้นรูปความหนา 0.1 เซนติเมตร ตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีขนาด 2 x 2 เซนติเมตร ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกทดสอบการย่อยสลายด้วยวิธีการฝักรวม โดยควบคุมภาวะในการทดลองดังนี้ ค่าความเป็นกรด-เบสของดินอยู่ในช่วง 5-6 ฝักรวมจากพื้นผิวดิน 10 เซนติเมตร และทำการรดน้ำทุกวันอย่างสม่ำเสมอ ชิ้นงานตัวอย่างจะถูกเก็บขึ้นมาเมื่อครบ 30 60 และ 90 วัน แล้วนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (weight loss percentage) ดังสมการ 3.2 และตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อดูลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างหลังผ่านการฝักรวม

$$\% \text{weight loss} = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100$$

โดยที่  $W_n$  คือน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

$W_0$  คือน้ำหนักเริ่มต้น

### 3.3.9 ทดสอบการดูดซึมน้ำ

ทดสอบการดูดซึมน้ำของชิ้นงานแผ่นฟิล์ม ขนาด 2 x 2 เซนติเมตร โดยกำหนด ภาวะการทดลองดังนี้แช่ชิ้นงานในน้ำน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้อง บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง ไปทุก ๆ 10 วันเป็นเวลา 100 วัน โดยนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักออกก่อนชั่งทุกครั้ง และคำนวณร้อยละการดูดซึมน้ำ (water absorption percentage) จากสมการ 3.3

$$\% \text{water absorption} = \frac{W_n - W_0}{W_0} \times 100$$

โดยที่  $W_n$  คือน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป

$W_0$  คือน้ำหนักเริ่มต้น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## บทที่ 4

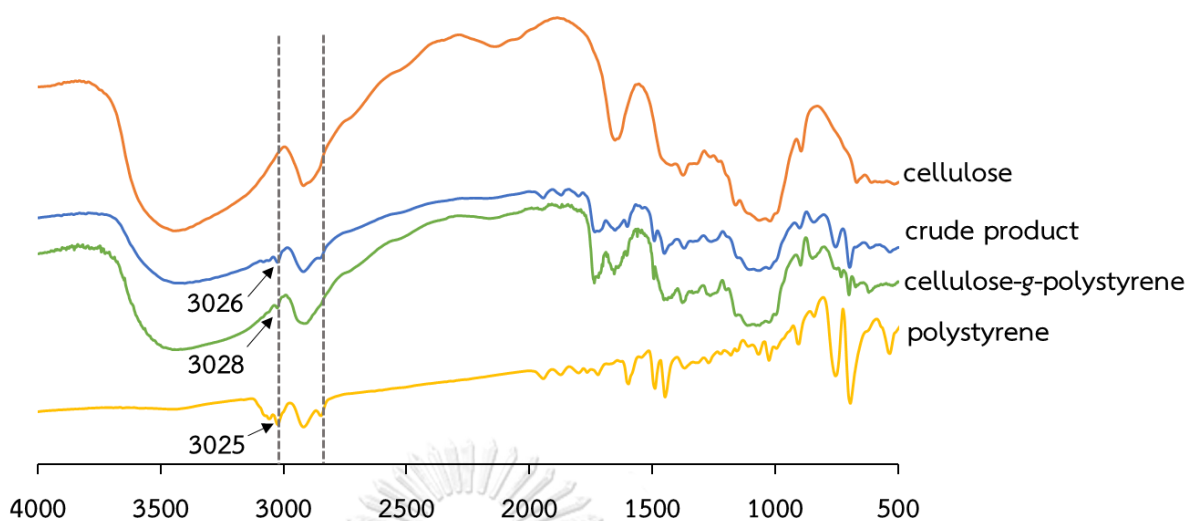
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การสังเคราะห์เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนโดยกระบวนการแบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน

##### 4.1.1 การวิเคราะห์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR

หมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลส เซลลูโลสดัดแปร (crude product) และเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีดังแสดงในรูปที่ 4.1 จากรูปพบว่าสเปกตรัมของเซลลูโลสบริสุทธิ์ปรากฏพีกขึ้นที่ตำแหน่ง  $3447\ 2920$  และ  $1160\ \text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับความถี่ในการสั่นแบบยืดหด (stretching) ของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) หมู่เมทิล (methyl group) และการยืดหดแบบไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของพันธะไกลโคไซด์ (C-O-C glycoside) ตามลำดับ โดยพีกที่ตำแหน่ง  $1652\ \text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการดูดซึมน้ำหรือความชื้นในโครงสร้างของเซลลูโลส [26] โดยสเปกตรัมของพอลิสไตรีนบริสุทธิ์จะปรากฏพีกที่แสดงถึงความถี่ในการสั่นแบบยืดหดของ C-H ในวงอะโรมาติก (aromatic) ที่ตำแหน่ง  $3069$  และ  $3025\ \text{cm}^{-1}$  พีกที่แสดงถึงความถี่ในการสั่นแบบยืดหดของ C-H ในหมู่แอลคิล (alkyl group) ที่ตำแหน่ง และพีกที่แสดงถึงความถี่ในการสั่นแบบยืดหดของ C=C ในวงอะโรมาติกที่ตำแหน่ง  $1598\ 1491$  และ  $1448\ \text{cm}^{-1}$

จากการทดลองพบว่าเซลลูโลสดัดแปร พบพีกที่แสดงถึงการมีหมู่เบนซิล (benzyl group) และหมู่แอลคิล (alkyl group) ที่ตำแหน่ง  $3026\ 1492$  และ  $2845\ \text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการมีองค์ประกอบของพอลิสไตรีนในสารตัวอย่าง นอกจากนี้เส้นสเปกตรัมของเซลลูโลสดัดแปรที่ผ่านการสกัดพอลิสไตรีนออกด้วยโทลูอีน พบว่า ยังคงปรากฏพีกที่มีลักษณะกว้างขึ้นที่ตำแหน่ง  $3028\ \text{cm}^{-1}$  และ  $1493\ \text{cm}^{-1}$  แสดงถึงหมู่เบนซิลของพอลิสไตรีน จึงคาดว่าเป็นส่วนของพอลิสไตรีนที่ถูกกราฟต์ลงบนเซลลูโลส เมื่อพิจารณาจากเส้นสเปกตรัมของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนเปรียบเทียบกับเส้นสเปกตรัมของเซลลูโลสบริสุทธิ์พบว่าพีกที่ช่วง  $3500\ \text{cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงความถี่ในการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลส มีลักษณะของพีกที่กว้างขึ้น จึงคาดว่าเป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสบางส่วนกราฟต์ด้วยพอลิสไตรีน



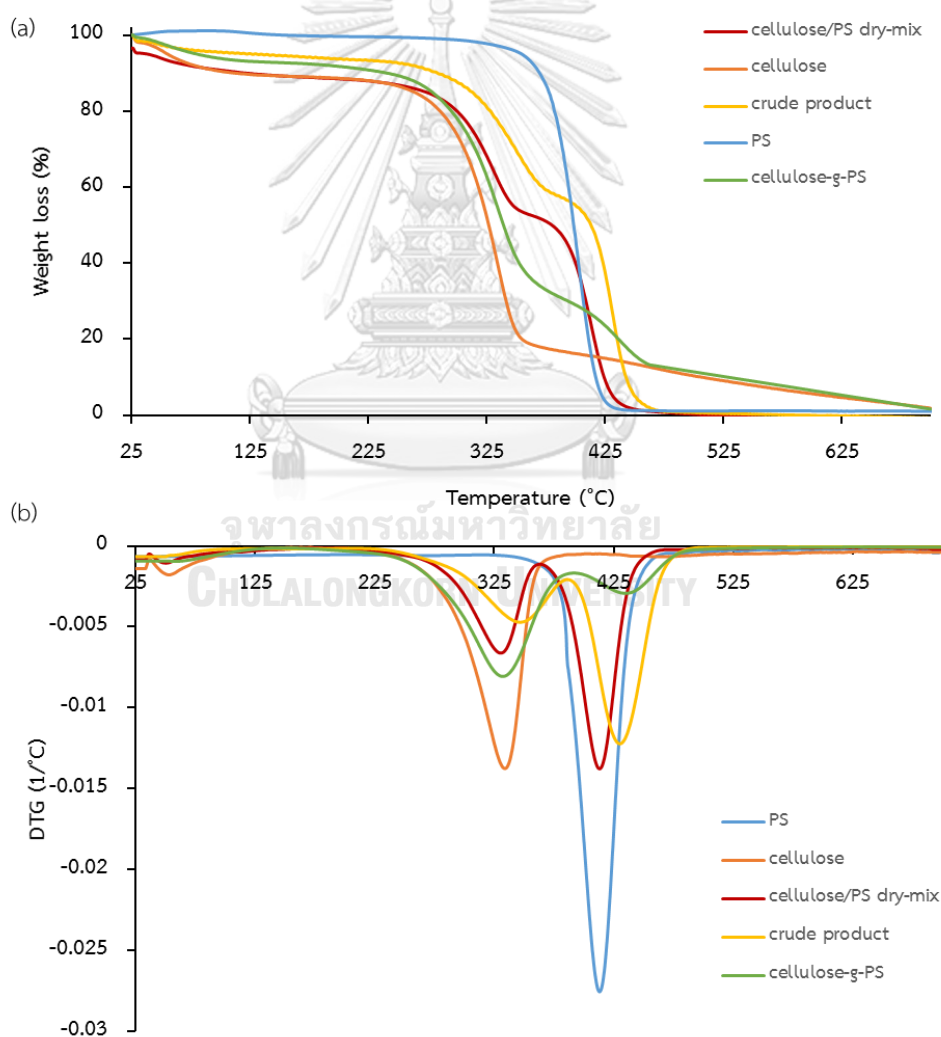
รูปที่ 4.1 FT-IR สเปกตรัมของเซลลูโลส เซลลูโลสดัดแปร และเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ตามลำดับ

#### 4.1.2 การวิเคราะห์ความเสถียรภาพทางความร้อนด้วยทีจีเอ (TGA)

จากเทอร์โมแกรมการสลายตัวแสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 พบว่า การสลายตัวในช่วงแรกที่อุณหภูมิก่อน 100 องศาเซลเซียส เกิดจากความชื้นในสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ โดยการสลายตัวของเซลลูโลสเจลและพอลิสไตรีนบริสุทธิ์มีลักษณะการสลายตัวแบบเป็นขั้นเดียวและมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่ 334 และ 424 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่เซลลูโลส/พอลิสไตรีนผสมแบบแห้ง เซลลูโลสดัดแปร และเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนมีลักษณะการสลายตัว 2 ขั้น กล่าวคือในขั้นแรกเป็นการสลายตัวของเซลลูโลส และขั้นที่สองคือการสลายตัวของพอลิสไตรีน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lessan และคณะ [27] โดยเซลลูโลส/พอลิสไตรีนแบบแห้งปรากฏอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของเซลลูโลส และพอลิสไตรีนที่ 333 และ 416 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับเซลลูโลสและพอลิสไตรีนก่อนผ่านกระบวนการดัดแปร โดยผลของการกราฟต์พอลิสไตรีนบนพื้นผิวของเซลลูโลส พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเซลลูโลส และอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของพอลิสไตรีนมีค่าสูงขึ้น เป็นผลมาจากในเซลลูโลสดัดแปร แสดงให้เห็นถึงความเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงขึ้นเมื่อดัดแปรด้วยพอลิสไตรีน เป็นผลจากมาจากการพันธะไฮโดรเจน ณ บริเวณที่เกิดการเชื่อมโยง (cross-linking) ในโครงสร้าง [28] นอกจากนี้ พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนและอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดของเซลลูโลสดัดแปรมีการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากในเซลลูโลสดัดแปรยังมีองค์ประกอบที่เป็นโฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) ที่ยังไม่ถูกสกัดออก ส่งผลให้สารตัวอย่างมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัวของเซลลูโลสบริสุทธิ์ พอลิสไตรีน เซลลูโลสตัดแปรร และเซลลูโลส/พอลิสไตรีนผสมแบบแห้ง

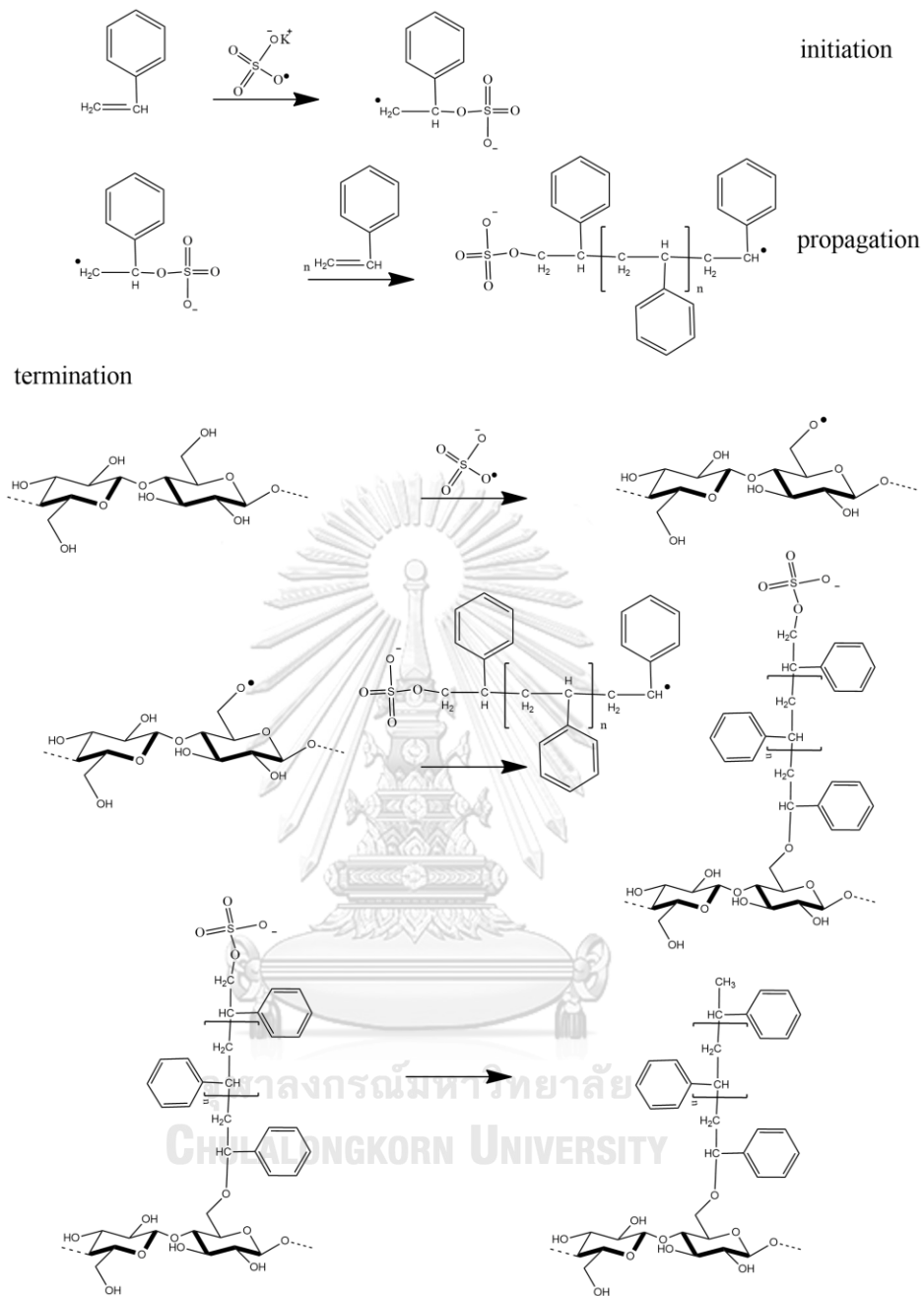
ตัวอย่าง	$T_{\text{onset}}^1 - T_{\text{endset}}^1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\text{max}}^1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\text{onset}}^2 - T_{\text{endset}}^2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\text{max}}^2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
cellulose	304-352	334	-	-
PS	396-458	424	-	-
crude product	294-383	348	401-467	433
cellulose/PS dry mix	304-343	333	399-431	416
cellulose-g-polystyrene	304-350		402-477	441



รูปที่ 4.2 เทอร์โมแกรม (a) TGA และ (b) DTG ของเซลลูโลส พอลิสไตรีน เซลลูโลส/พอลิสไตรีนผสมแบบแห้ง และเซลลูโลสตัดแปรร

#### 4.1.3 การหำร้อยละการกราฟต์

จากการเตรียมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน โดยมีโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งปริมาณกราฟต์โคพอลิเมอร์สามารถหาได้จากเทคนิคทีจีเอ และร้อยละเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของเซลลูโลสดัดแปรที่ผ่านการแช่ด้วยตัวทำละลายโทลูอิน เพื่อสกัดพอลิสไตรีนอิสระหรือพอลิสไตรีนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกจากเซลลูโลสดัดแปร จากการทดลอง พบว่า ในเซลลูโลสดัดแปรที่มีปริมาณของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่น้อย ส่งผลให้ร้อยละน้ำหนักของเซลลูโลสดัดแปรที่ได้หลังจากแช่ด้วยตัวทำละลายโทลูอินน้อยด้วยเช่นกันเซลลูโลสดัดแปรที่มีปริมาณกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ร้อยละ 18 และร้อยละกราฟต์โคพอลิเมอร์ที่ร้อยละ 30 โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่คาด แสดงดังรูปที่ 4.3 กระบวนการสังเคราะห์เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนเป็นการสังเคราะห์แบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน โดยในระบบจะประกอบไปด้วยตัวกลางที่เป็นน้ำ สไตรีนมอนอเมอร์ เซลลูโลสโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารลดแรงตึงผิว สารลดแรงตึงผิวจะล้อมรอบสไตรีนมอนอเมอร์ทำให้เกิดหยดสไตรีนมอนอเมอร์ และป้องกันการรวมตัวของหยดมอนอเมอร์ เมื่อปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการสังเคราะห์ถึงความเข้มข้นวิกฤตของไมเซลล์ (critical micelle concentration, CMC) ปริมาณสารที่เกินมาจะรวมตัวกันโดยหันส่วนที่ชอบน้ำออกข้างนอก และส่วนที่ไม่ชอบน้ำเข้าข้างในเพื่อรวมตัวกันเกิดเป็นไมเซลล์ เมื่อโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดการแตกตัวด้วยความร้อน เกิดเป็นอนุมูลอิสระ และเกิดพันธะโควาเลนต์กับสไตรีนมอนอเมอร์จะเกิดเป็นอนุมูลขนาดใหญ่ (macroradicals) หรือโอลิโกเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ (oligomeric radicals) เมื่อสายโซ่ยาวจนมีความไม่ชอบน้ำมากกว่าความชอบน้ำ ซึ่งเรียกว่า surface active ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่เข้าไปในไมเซลล์แล้วเกิดพอลิเมอไรเซชันในนั้นตลอดการสังเคราะห์ โดยอนุมูลพอลิสไตรีนจะทำการกราฟต์ที่ตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวเซลลูโลสผ่านกระบวนการถ่ายโอนสายโซ่สู่พอลิเมอร์ (chain transfer) ในขั้นยุติ (termination) [29]

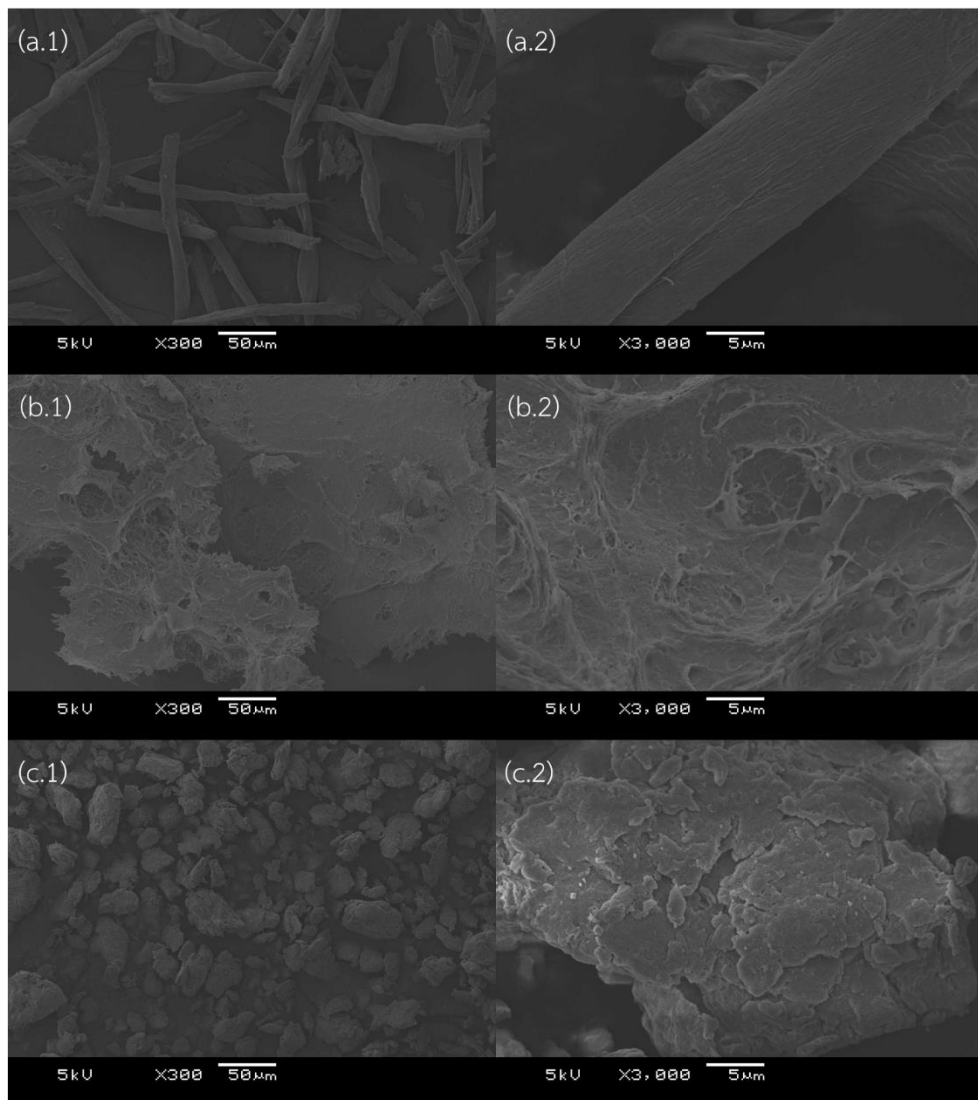


รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน

#### 4.1.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 4.4 ภาพ SEM แสดงถึงลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของไมโครคริสตัลลิน เซลลูโลส เซลลูโลสเจด และเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน จากผลการทดลอง พบว่า ไมโครคริสตัลลิน เซลลูโลสที่ได้จากการย่อยผ้าฝ้ายด้วยกรดไฮโดรคลอริก มีลักษณะเป็นเส้นใยแบน พันกันเป็นเกลียว (ribbon like structure) และที่กำลังขยาย 3000 พบว่า พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระ เมื่อพิจารณา

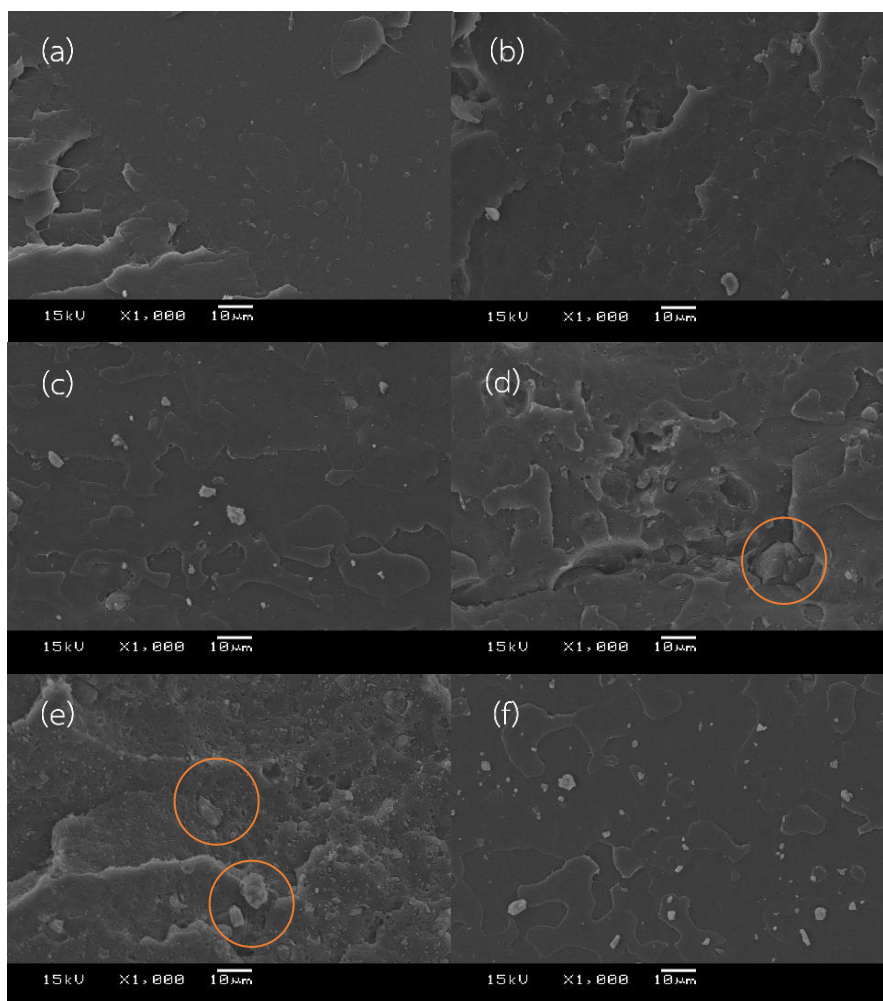
จากเซลลูโลสเจลที่ได้จากการนำไมโครคริสตลีนไปย่อยอีกครั้ง พบว่า เส้นใยเซลลูโลสมีขนาดที่เล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเส้นใยไมโครคริสตลีนเซลลูโลส และมีลักษณะเกาะกลุ่มกันจนเป็นแผ่นเกิดจากกระบวนการทำให้เซลลูโลสเจลแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) ก่อนนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ที่กำลังขยาย 300 พบว่า อนุภาคมีรูปทรงและขนาดที่หลากหลายไม่เหมือนกัน นอกจากนี้ยัง พบว่า อนุภาคของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนไม่มีการเกาะกลุ่มของตัวอนุภาค เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 3000 พบว่าอนุภาคมีพื้นผิวที่ขรุขระ



รูปที่ 4.4 SEM micrograph พื้นผิวของ (a) ไมโครคริสตลีนเซลลูโลส (b) เซลลูโลสเจล และ (c) เซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ที่กำลังขยาย (1) 300 และ (2) 3000

#### 4.2 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.5 ซึ่งเป็นภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเล็กทิกแอซิดคอมพอลิเมอร์ที่ถูกหักภายใต้สภาวะเย็นยิ่งยวดด้วยไนโตรเจนเหลว (cryogenic fracture) พบว่า ปริมาณของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนถูกเติมส่งผลต่อความเรียบของพื้นผิวและความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ โดยชิ้นงานที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งจะมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ เมื่อมีการเติมปริมาณสารเติมแต่งที่มากขึ้นพื้นผิวของชิ้นงานมีความขรุขระที่มากขึ้น โดยวัฏภาคของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนสามารถกระจายตัวได้ดีในวัฏภาคของพอลิเล็กทิกแอซิด อาจเป็นผลมาจากการลดความเป็นขั้วของพื้นผิวเซลลูโลส ส่งผลให้เซลลูโลสสามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้จากลักษณะสัณฐานวิทยาของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่มีความขรุขระ ดังรูปที่ 4.4 เป็นการช่วยเพิ่มแรงดึงผิวของคอมพอลิเมอร์และช่วยปรับปรุงการยึดติดระหว่างวัฏภาคพอลิเล็กทิกแอซิดและสารเติมแต่งได้ จากผลการลอง พบว่า ปริมาณของสารเติมแต่งที่มากขึ้นยังส่งผลต่อความเข้ากันได้ระหว่างสองวัฏภาคที่ลดลง สามารถสังเกตเห็นชัดเจนถึงการเกาะกลุ่มของสารเติมแต่งที่ 5wt%MC และ 10wt%MC ดังรูปที่ 4.5 (d) และ (e) โดยการเกาะกลุ่มของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนจะเกิดจากพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals force) ระหว่างอนุภาคของสารเติมแต่งและสารเติมแต่งด้วยตัวเอง [26]



รูปที่ 4.5 SEM micrograph ตามขวางของ (a) PLA และคอมพอสิต (b)1wt%MC (c) 3wt%MC (d) 5wt%MC (e) 10wt%MC (f) 3wt%UMC ที่กำลังขยาย 1000

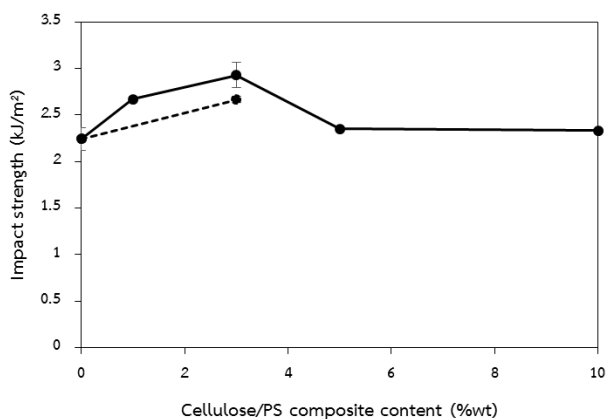
### 4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกคอมพอสิต

#### 4.3.1 สมบัติความทนแรงกระแทก

จากการทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทกแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนส่งผลให้ชิ้นงานมีความทนต่อแรงกระแทกได้เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย โดยคอมพอสิตที่สามารถทนต่อแรงกระแทกได้สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์คือ คอมพอสิตที่มีการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 3 โดยมวล (3wt%MC) ซึ่งความทนกระแทกเพิ่มขึ้นร้อยละ 30.57 โดยแนวโน้มของความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีค่าลดลงเมื่อเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนมากกว่าร้อยละ 3 ลดลง โดยการเติมที่ร้อยละ 5 และ 10 โดยมวล พบว่าความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตลดลงจนมีค่าใกล้เคียงพอลิแล็กติกแอซิด



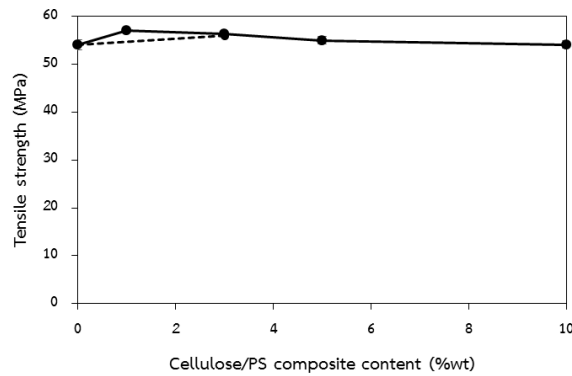
บริสุทธิ์ ซึ่งสอดคล้องกับภาพ SEM รูปที่ 4.5 เมื่อมีการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนมากกว่าร้อยละ 3 โดยมวล พบว่าเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคของสารเติมแต่งมากขึ้น



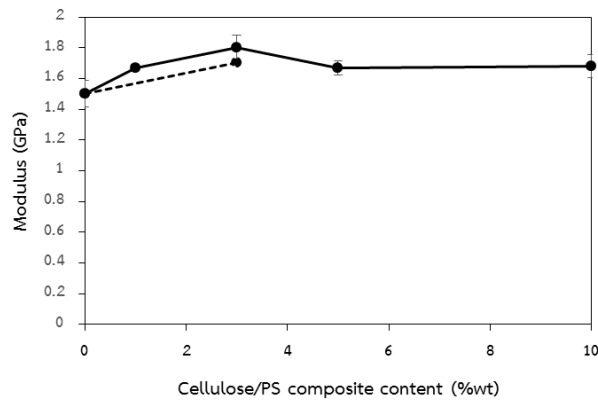
รูปที่ 4.6 สมบัติความทนแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 1–10 โดยมวล (เส้นทึบ) และเซลลูโลสบริสุทธิ์ ร้อยละ 3 โดยมวล (เส้นปะ)

#### 4.3.2 สมบัติความทนแรงดึง

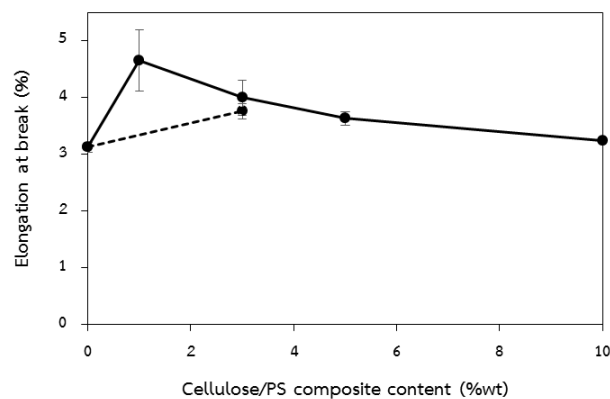
จากการทดสอบการทนแรงดึงของชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์เมื่อมีการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนสามารถวิเคราะห์หาสมบัติความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ และการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ พบว่า ความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด เมื่อมีการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่ร้อยละ 1 3 และ 5 โดยมวล ความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.35 4.89 และ 1.65 ตามลำดับ และการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นร้อยละ 48.99 27.98 และ 16.32 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนในพอลิแล็กติกแอซิดไม่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่ของพอลิแล็กติกแอซิด เป็นผลให้ไม่มีการเปลี่ยนของค่ายังสัมพันธ์ โดยเมื่อมีการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่ร้อยละ 1 3 และ 5 โดยมวล ค่ายังสัมพันธ์มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 11.21 19.68 และ 11.07 ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่าในปริมาณการเติมของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน (3wt%MC) และเซลลูโลสบริสุทธิ์ (3wt%UMC) ที่เท่ากันให้ผลของสมบัติแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน จึงคาดว่าเป็นผลมาจากปริมาณของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของเซลลูโลสดัดแปรนั้นเป็นปริมาณที่น้อยเกินไป ส่งผลให้สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่ได้จากการเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนกับเติมด้วยเซลลูโลสบริสุทธิ์ไม่ต่างกันมาก



รูปที่ 4.7 สมบัติความทนแรงดึงของพอลิเล็กทิกแอซิดที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 1 3 5 และ 10 โดยมวล ตามลำดับ (เส้นทึบ) และเซลลูโลสบริสุทธิ์ ร้อยละ 3 โดยมวล (เส้นปะ)



รูปที่ 4.8 ยัสมอดคูล์สของพอลิเล็กทิกแอซิดที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 1 3 5 และ 10 โดยมวล ตามลำดับ (เส้นทึบ) และเซลลูโลสบริสุทธิ์ ร้อยละ 3 โดยมวล (เส้นปะ)



รูปที่ 4.9 สมบัติการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเล็กทิกแอซิดที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ร้อยละ 1 3 5 และ 10 โดยมวล ตามลำดับ (เส้นทึบ) และเซลลูโลสบริสุทธิ์ ร้อยละ 3 โดยมวล (เส้นปะ)

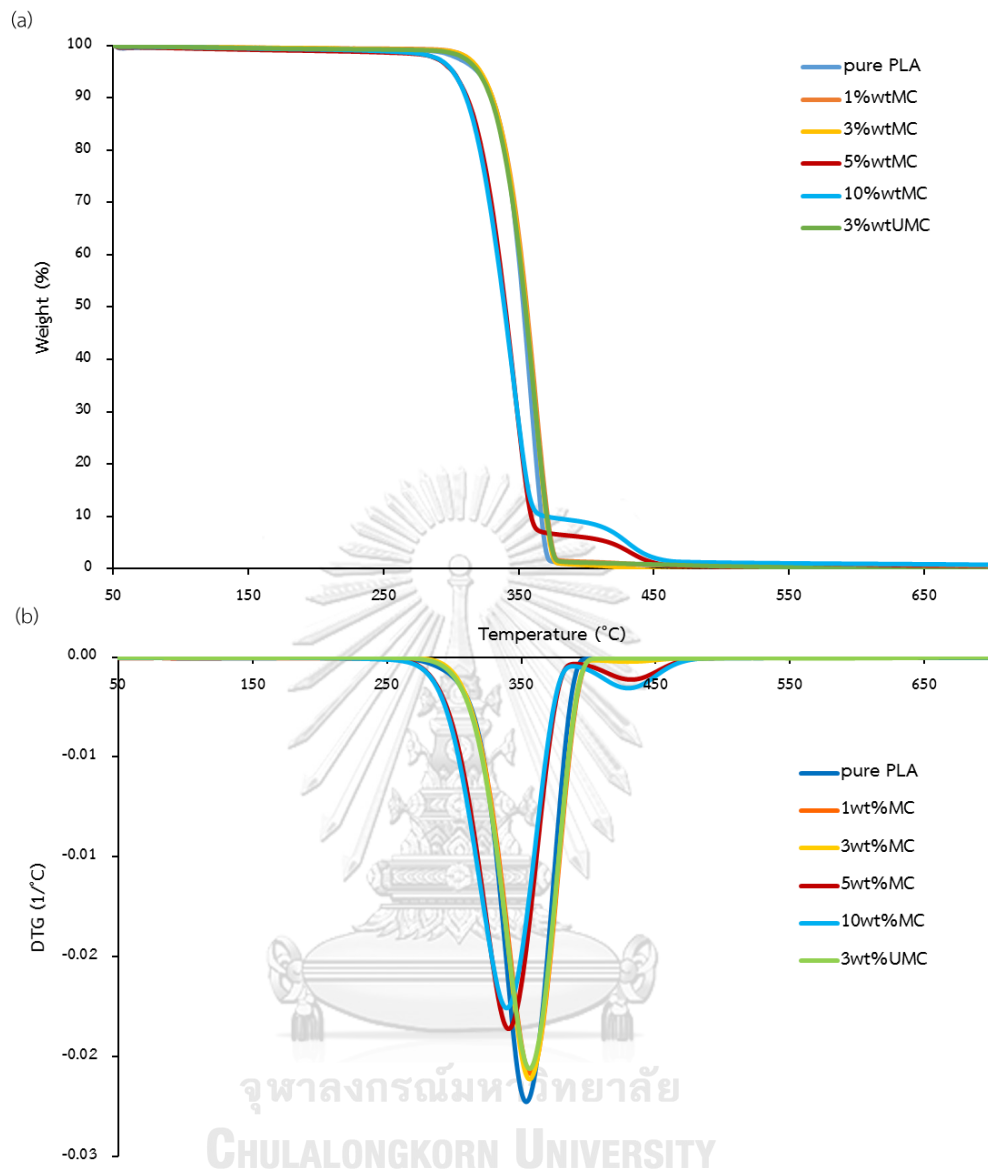
#### 4.4 สมบัติความร้อนของพอลิแล็กติกคอมพอสิต

##### 4.4.1 เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคทีจีเอ

พิจารณาจาก ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10 อุณหภูมิการสลายตัวของคอมพอสิตเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกบริสุทธิ์ พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เป็นผลมาจากปริมาณของพอลิสไตรีนที่กราฟต์บนเซลลูโลสมีปริมาณที่น้อย และในสารเติมแต่งที่เติมยังมีส่วนของไฮโมพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน ส่งผลให้สารเติมแต่งและพอลิแล็กติกแอซิดเข้ากันได้ไม่ดี โดยคอมพอสิตที่มีเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่ร้อยละ 5 และ 10 โดยมวล มีการสลายตัว 2 ชั้น ชั้นแรก คือการสลายตัวของพอลิเมอร์คอมพอสิตระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดและเซลลูโลส ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่ 338-374 องศาเซลเซียส และชั้นที่สอง คือ การสลายตัวของพอลิสไตรีน ซึ่งมีช่วงการสลายตัวที่ 318-359 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนลงในพอลิแล็กติกแอซิดมากกว่าร้อยละ 3 โดยมวล อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด ( $T_{max}$ ) มีแนวโน้มที่ต่ำลง เป็นผลมาจากการเติมที่เกินปริมาณที่เหมาะสม (optimum concentration) ส่งผลให้อุณหภูมิเกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกคอมพอสิต

ตัวอย่าง	$T_{onset}^1 - T_{endset}^1$ (°C)	$T_{max}^1$ (°C)	$T_{onset}^2 - T_{endset}^2$ (°C)	$T_{max}^2$ (°C)
pure PLA	340-371	356	-	-
1wt%MC	340-375	358	-	-
3wt%MC	340-374	358	-	-
5wt%MC	321-360	342	345-463	435
10wt%MC	318-359	340	423-444	433
3wt%UMC	338-374	357	-	-



รูปที่ 4.10 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกคอมพอสิต

#### 4.4.2 พฤติกรรมทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC

จากการทดสอบสมบัติความร้อนด้วยแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าการไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และอุณหภูมิการหลอม ( $T_m$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึก ( $T_c$ ) เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบพอลิแล็กติกแอซิดกับพอลิแล็กติกแอซิดที่เติมเซลลูโลสกราฟต์-พอลิสไตรีน พบว่า พอลิแล็กติกแอซิดที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 1 และ 3 โดยมวล พอลิแล็กติกแอซิดมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเดิมร้อยละ 1.68 เป็น 2.13 และ 2.22 ตามลำดับ เนื่องจากการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนเป็นการทำให้เกิดผลึกเร็วขึ้นเพราะเซลลูโลส

อาจเหนียวนำไปเกิดผลึก [30] จากการทดลองพบว่าพอลิแล็กติกแอซิดที่มีการเติมเซลลูโลสบริสุทธิ์ที่มีปริมาณผลึกสูงที่สุด เป็นผลมาจากพอลิสไตรีนที่นำมากราฟต์เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีผลึก อีกทั้งการกราฟต์พอลิสไตรีนบนเซลลูโลสยังเป็นการลดความเป็นระเบียบของโครงสร้างเซลลูโลสจึงเป็นผลให้ความเป็นผลึกของเซลลูโลสลดลงด้วยเช่นกัน เมื่อพิจารณาคอมพอสิต 5wt%MC และ 10wt%MC พบว่าปริมาณผลึกมีค่าลดลง เนื่องจากการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนเกินปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับผลสัณฐานวิทยา แสดงดังรูปที่ 4.5 มีการเกาะกลุ่มกันของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน ส่งผลให้ความเข้ากันได้ของทั้งสองวัสดุลดลง

ตารางที่ 4.3 เอกลักษณะทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกคอมพอสิต

ตัวอย่าง	$T_g$ (°C)	$T_{cc}$ (°C)	$T_m$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)	$\Delta H_c$ (J/g)	$X_c$ (%)
PLA	62	106	149,156	21.67	23.22	1.68
1wt%MC	62	108	149,156	24.85	22.84	2.13
3wt%MC	62	103	149,156	25.55	23.49	2.22
5wt%MC	62	107	149,158	23.39	22.87	0.56
10wt%MC	62	107	149,156	20.76	19.56	1.29
3wt%UMC	62	105	149,156	23.81	19.68	4.44

#### 4.5 สมบัติการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

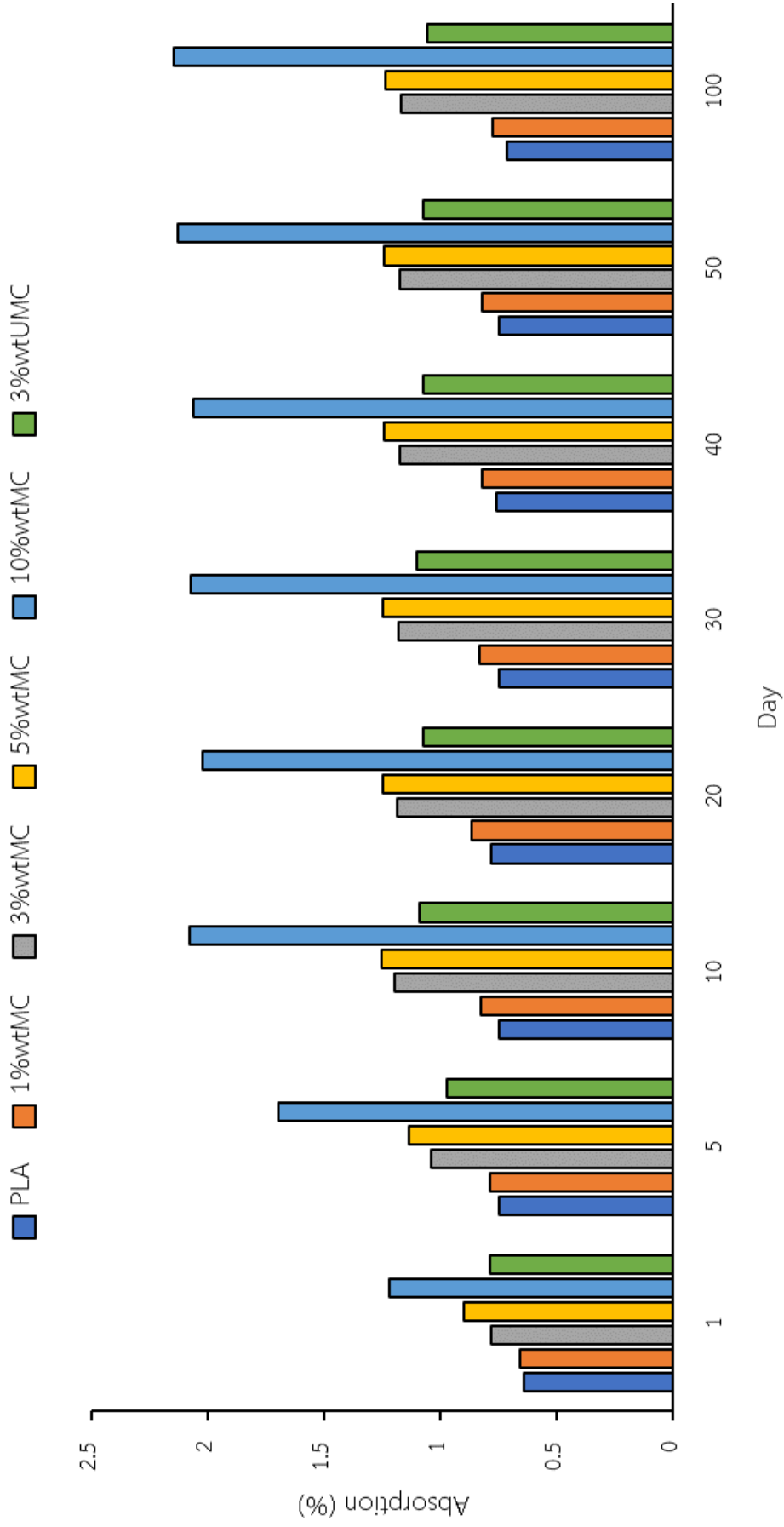
##### 4.5.1 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต

จากรูปที่ 4.11 แสดงแนวโน้มการดูดซึมน้ำของคอมพอสิตเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์จากร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานภายในระยะเวลาการทดลองดูดซึมน้ำ 100 วัน จากการทดลองพบว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์สามารถดูดซึมน้ำได้ในช่วงร้อยละ 0.64-0.72 จากร้อยละน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่เพิ่มอย่างไม่มีความสำคัญ พอลิแล็กติกแอซิดแสดงพฤติกรรมเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความไม่ชอบน้ำ โดยในระยะเวลาการแช่น้ำที่เท่ากันพอลิแล็กติกแอซิดที่เติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 10 โดยมวล (10wt%MC) สามารถดูดซึมน้ำได้มากที่สุด โดยภายในระยะเวลา 100 วัน 10wt%MC สามารถดูดซึมน้ำได้ในช่วงร้อยละ 1.22-2.20 แสดงความเป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความชอบน้ำมากขึ้น จากการทดลองนี้พบว่าถึงแม้การเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่มากขึ้นจะให้แนวโน้มความเป็นผลึกของคอมพอสิตที่ลดลงเป็นผลให้การแพร่เข้าของโมเลกุลน้ำนั้น

เป็นไปได้ง่ายขึ้น วัสดุจึงสามารถดูดซึมน้ำได้ในปริมาณที่มากขึ้นเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งในปริมาณที่มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบพอลิเล็กทริกแอซิดคอมพอสิตที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน (3wt%MC) กับพอลิเล็กทริกแอซิดคอมพอสิตที่เติมด้วยเซลลูโลสบริสุทธิ์ที่ร้อยละ 3 โดยมวล (3wt%UMC) พบว่าพอลิเล็กทริกแอซิดคอมพอสิตที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนสามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่าเป็นผลมาจากเซลลูโลสบริสุทธิ์มีความเป็นผลึกที่มากกว่า ส่งผลให้เป็นตัวกลางในการดูดซึมน้ำได้ไม่ดีเท่ากับเซลลูโลสตัดแปร



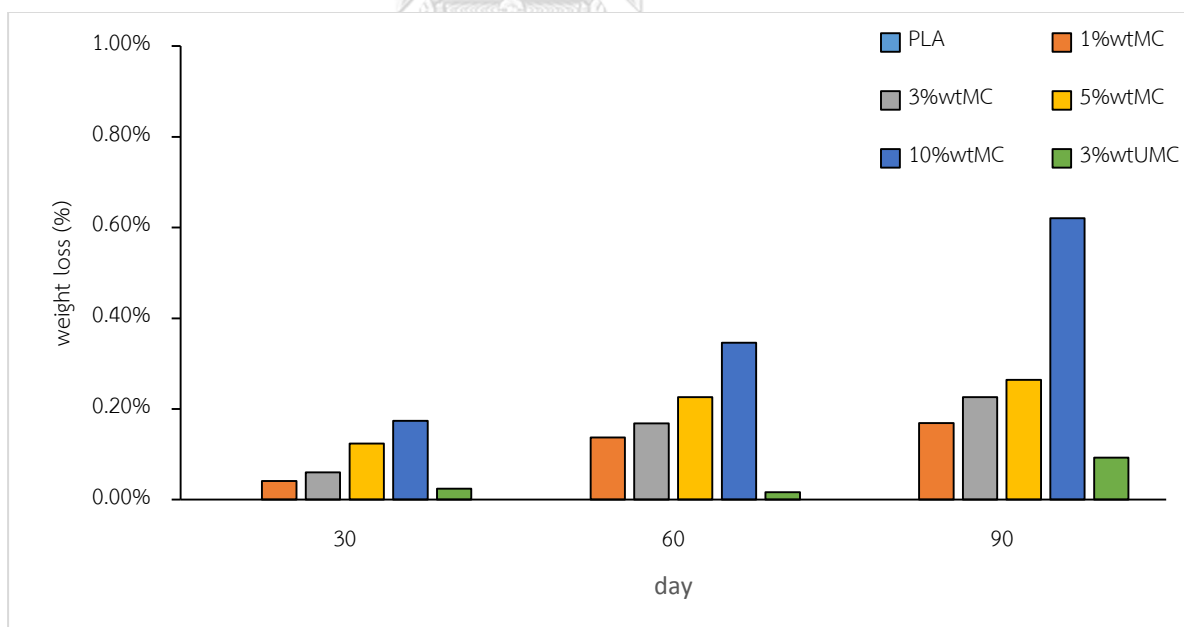
CC



รูปที่ 4.1.1 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิแล็กติกแอซิดและคอมพอลิสติที่ 1 5 10 20 30 40 50 และ 100 วัน

#### 4.5.2 สมบัติการย่อยสลายด้วยวิธีฝังกลบ

จากรูปที่ 4.12 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์และพอลิแล็กติกที่มีการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน พบว่าภายในเวลา 90 วัน ร้อยละน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจึงไม่พบข้อมูลของพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ในรูปที่ 4.12 ในขณะที่ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของคอมพอสิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารเติมแต่งที่เพิ่มขึ้น โดยพอลิแล็กติกแอซิดที่เติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่ร้อยละ 1 3 5 และ 10 โดยมวล มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปร้อยละ 0.17 0.23 0.26 และ 0.62 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากการทดลองการดูดซึมน้ำของชิ้นงาน พบว่าร้อยละการดูดซึมน้ำของชิ้นงานมีผลต่ออัตราการย่อยสลายของชิ้นงาน โดยพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่สามารถดูดซึมน้ำได้มากที่สุดมีร้อยละน้ำหนักที่หายไปมากที่สุดเช่นกัน อาจเป็นผลมาจากการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนเป็นตัวกลางดูดซึมน้ำผ่านชิ้นงาน เพื่อให้เกิดการย่อยสลายแบบ enzymatic hydrolysis และ hydrolytic degradation โดยมีกรดในธรรมชาติ (ในดิน) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.12 สมบัติการย่อยสลายของพอลิแล็กติกแอซิดและคอมพอสิตเป็นเวลา 30 60 และ 90 วัน ด้วยวิธีการฝังกลบ


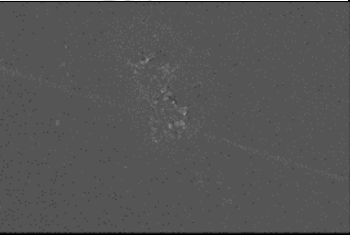
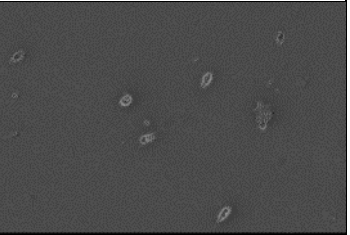
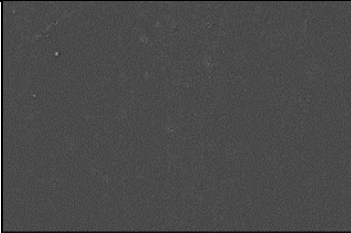

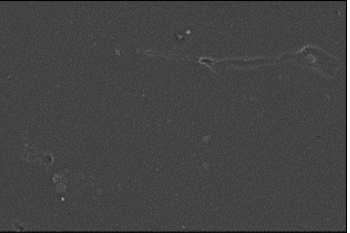


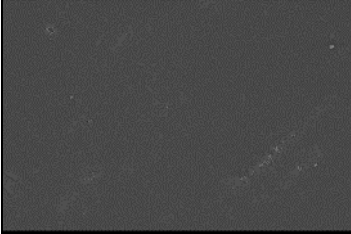
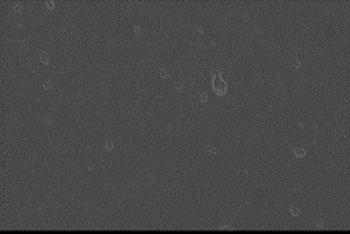
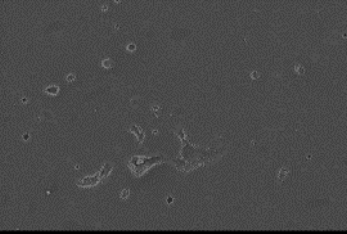

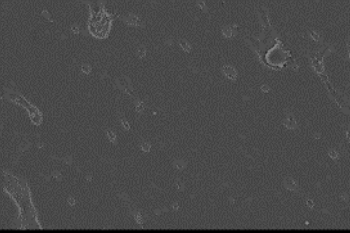
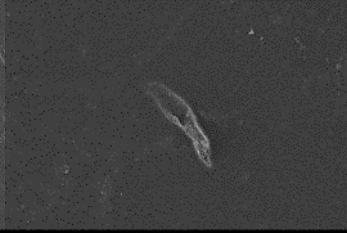
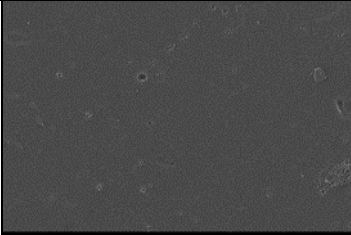
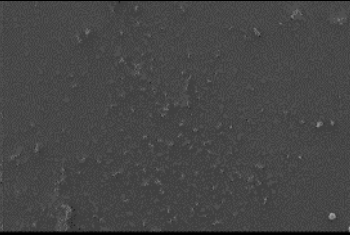
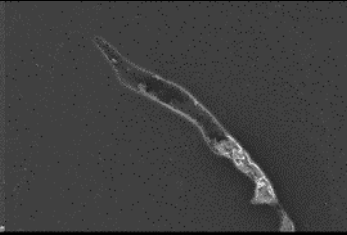
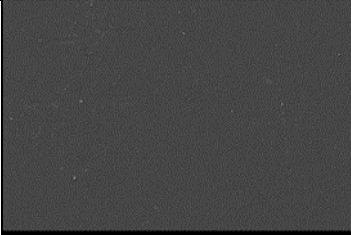
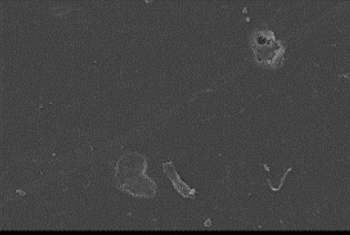
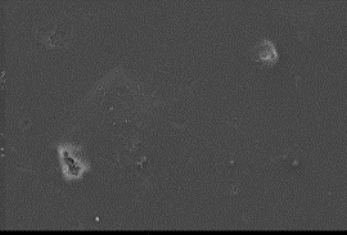
#### 4.5.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาของพอลิแล็กติกแอซิดและคอมพอลิเมอร์ที่ผ่านการย่อยสลาย

##### ด้วยวิธีการฝัองกลบ

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ผ่านการฝัองกลบเป็นเวลา 30 60 และ 90 วัน พบว่าเมื่อระยะเวลาการฝัองกลบที่มากขึ้นส่งผลต่อผิวหน้าของชิ้นงาน โดยที่ระยะเวลา 90 วันของการฝัองกลบชิ้นงานพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์เริ่มเกิดรอยและหลุมบนผิวหน้าของชิ้นงาน เมื่อพิจารณาที่ชิ้นงานวัสดุคอมพอลิเมอร์พบว่าการเติมปริมาณของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่มากขึ้นส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายให้เร็วขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบรอยแตกและหลุมบนผิวหน้าของชิ้นงานที่กำลังขยาย 500 เท่ากัน ผิวหน้าของชิ้นงานที่มีการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่ 10 โดยมวล ชิ้นงานเริ่มเกิดหลุมเล็ก ๆ ภายในระยะเวลา 30 วันแรก เกิดเป็นพื้นผิวขรุขระไม่เรียบในระยะเวลา 60 วันต่อมา และเกิดเป็นหลุมขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อฝัองเป็นระยะเวลา 90 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผลของน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน โดยระยะเวลาและปริมาณของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้นน้ำหนักของชิ้นงานหายไปมากขึ้น

ตารางที่ 4.4 SEM micrograph ของพอลิแล็กติกแอซิดและคอมพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยวิธีการฝัองกลบ ที่กำลังขยาย 500

ตัวอย่าง	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (%) และลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน		
	30 วัน	60 วัน	90 วัน
PLA			
	0.00	0.00	0.00
1wt%MC			
	0.04	0.14	0.17

ตัวอย่าง	ร้อยละน้ำหนักรักษาที่หายไป (%) และลักษณะสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน		
	30 วัน	60 วัน	90 วัน
3wt%MC			
	0.06	0.17	0.23
5wt%MC			
	0.12	0.23	0.26
10wt%MC			
	0.17	0.35	0.62
3wt%UMC			
	0.02	0.02	0.09

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเตรียมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนโดยกระบวนการแบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของเซลลูโลสและลดความเป็นขั้วของเซลลูโลสลง จากนั้นนำเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่ได้มาเป็นสารเติมแต่งในพอลิแล็กติกแอซิด ที่ร้อยละ 1 3 5 และ 10 โดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิด ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติความร้อน และสมบัติการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตที่เตรียมได้ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถเตรียมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนโดยกระบวนการแบบอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่ม ตั้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยการดัดแปรพื้นผิวของเซลลูโลสสามารถยืนยันได้จากการทดสอบเอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FTIR และความเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิคทีจีเอ

2. ผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของคอมพอสิต ปริมาณของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนส่งผลต่อความพื้นผิวของชิ้นงานที่หักภายใต้สภาวะเย็นยิ่งยวดด้วยไนโตรเจนเหลว โดยยิ่งปริมาณของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนมากขึ้นพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตจะมีความขรุขระมากขึ้นเช่นกัน ปริมาณการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิด เนื่องจากการเป็นปริมาณที่สารกระจายตัวได้ดีไม่เกาะกลุ่มเป็นก้อนแบบคลัสเตอร์ (cluster)

3. ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมพอสิต พบว่าการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนไม่ผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิต โดยการเติมที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิดทำให้ได้สมบัติความทนแรงกระแทกและค่า Young's Modulus สูงสุด

4. ผลการศึกษาสมบัติเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าการเติมเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนส่งผลต่อเสถียรภาพความร้อนของคอมพอสิตเพียงเล็กน้อย โดยการเติมที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของพอลิแล็กติกแอซิดทำให้ได้เสถียรภาพความร้อนสูงสุด

5. ผลการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อน พบว่าปริมาณการเติมของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น และอุณหภูมิการหลอม แต่ส่งผลให้ปริมาณผลึกของคอมพอสิตลดลง

6. ผลการศึกษาการดูดซึมน้ำของคอมพอสิต พบว่าปริมาณการเติมของเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นส่งผลให้วัสดุคอมพอสิตสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น โดยเทียบจากน้ำหนักของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นหลังจากแช่ในน้ำ

7. ผลการศึกษาการย่อยสลายด้วยวิธีการฝังกลบ พบว่าคอมพอสิตสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ จากการทดลอง พบว่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปของคอมพอสิตจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนในพอลิแล็กติกแอซิดมากขึ้น และพบรอยแตกหรือหลุมบนชิ้นงานมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการฝังกลบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสมกับเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีน เพื่อให้การกระจายตัวในพอลิแล็กติกแอซิดที่ดีขึ้น โดยจากการทดลอง พบว่า ปริมาณของกราฟต์โคพอลิเมอร์บนเซลลูโลสมีค่าเพียงร้อยละ 18 ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อย ส่งผลให้พบการเกาะกลุ่มกันของเซลลูโลสดัดแปรเมื่อเติมในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 3 โดยมวล

2. จากการหาร้อยละปริมาณของกราฟต์โคพอลิเมอร์ของเซลลูโลสดัดแปร พบว่า เซลลูโลสดัดแปรไม่เหมาะแก่การเติมเป็นสารเติมแต่งในพอลิแล็กติกแอซิดโดยตรง ควรมีการสกัดพอลิสไตรีนอิสระออกจากเซลลูโลสดัดแปรก่อนนำมาใช้ผสมลงในพอลิแล็กติกแอซิด เนื่องจากไฮโดรฟิลิซิตีของไฮโดรฟิลิเมอร์อาจมีส่วนที่ทำให้สมบัติเชิงกลและความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตคลาดเคลื่อนและลดลง

3. ควรหาภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปชิ้นงาน จากการทดลองนี้ พบว่า ในกระบวนการผสมและขึ้นรูปของพอลิแล็กติกแอซิดคอมพอสิตยังมีผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในคอมพอสิตที่ได้ โดยภาวะที่ไม่เหมาะสมในการขึ้นรูปจึงมีผลต่อสมบัติของคอมพอสิตที่ได้เช่นกัน

## บรรณานุกรม

- [1] (MTEC), N.M.a.M.T.C. เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน [Online]. 2007. Available from: [https://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/type\\_de\\_plas.html](https://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html) [10.10.2019]
- [2] Van Den Oever, M., Molenveld, K., van der Zee, M., and Bos, H.t. Bio-based and Biodegradable Plastics - Facts and Figures. in Wageningen Food and Biobased Research. 2017. 1-68.
- [3] Avinc, O. and Khoddami, A. Overview of Poly(lactic acid) (PLA) Fibre. Fibre Chemistry 41(6) (2010): 391-401.
- [4] ชีรภัทร์ สุภานิล. การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิดที่มีผ้าทอจากใยเส้นธรรมชาติเป็นวัสดุเสริมแรง. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2558.
- [5] Burg, K. Poly( $\alpha$ -ester)s. in Natural and Synthetic Biomedical Polymers, 115-121, 2014.
- [6] Farah, S., Anderson, D.G., and Langer, R. Physical and Mechanical Properties of PLA, and their Functions in Widespread Applications - a Comprehensive Review. Advanced Drug Delivery Reviews 107 (2016): 367-392.
- [7] Reddy, M.M., Vivekanandhan, S., Misra, M., Bhatia, S.K., and Mohanty, A.K. Biobased Plastics and Bionanocomposites: Current Status and Future Opportunities. Progress in Polymer Science 38(10-11) (2013): 1653-1689.
- [8] Casalini, T., Rossi, F., Castrovinci, A., and Perale, G. A Perspective on Polylactic Acid-Based Polymers Use for Nanoparticles Synthesis and Applications. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 7 (2019): 259.
- [9] Brigham, C. Biopolymers. in Green Chemistry, pp. 753-770, 2018.
- [10] Trache, D., et al. Microcrystalline Cellulose: Isolation, Characterization and Biocomposites Application-A Review. International Journal of Biological Macromolecules 93(Pt A) (2016): 789-804.

- [11] H.P.S, A.K., et al. Nanofibrillated Cellulose Reinforcement in Thermoset Polymer Composites. in Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites, 1-24, 2017.
- [12] บุปผาชาติ ยศคันท, คมกฤต เล็กสกุล, มลทิรา ต๊ะบุญจง, and วลัยลักษณ์ ไชยสกุล. การศึกษาคุณสมบัติของเซลลูโลสแบบคทีเรียเพื่อการผลิตกระถางย่อยสลายได้. งานประชุมวิชาการหน่วยงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม (2555).
- [13] สวรรยา ปัญญานันท์, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, and กล้าณรงค์ ศรีรอด. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลลูโลสจากกากมันสำปะหลังเพื่อการประยุกต์ใช้ในอาหาร. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 36(2) (2561): 106-116.
- [14] วันดี ธรรมจारी. การตัดแปรพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ. วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี 39 (2013): 61-64.
- [15] Billmeyer, F.W. Textbook of Polymer Science, ed. 3rd. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [16] Tawakal, I.S.M.A., Tlib, R.A., Abdan, K., and Nyuk Ling, C. Mechanical and Physical Properties of Kenaf-derived Cellulose (KDC)-filled Polylactic Acid (PLA) Composites. Bioresources 7(2) (2012): 1643-1655.
- [17] Ramakrishna, S. and Huang, Z.M. Biocomposites. in Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016.
- [18] จารีนุช โรจน์เสถียร. ศึกษาการผสมระหว่างระหว่างสไตรีน อะครีโลไนไตรล์โคพอลิเมอร์ออฟเกรดและยางธรรมชาติ. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2554.
- [19] Coperion, G. Extruders for compounding. Plastics, Additives and Compounding 7(1) (2005): 20-25.
- [20] Patil, R.T., Jose De, J.B., Juming, T., James, P., and Barry, S. Physical Characteristics of Food Extrudates - A Review. in 2005 Tampa, FL July 17-20, 2005. 2005.
- [21] Kamal, M.R., Isayev, A.I., and Liu, S.-J. Injection Molding Technology and Application, ed. White, J.L.: Hanser, 2009.
- [22] Kowalczyk, M., Piorkowska, E., Kulpinski, P., and Pracella, M. Mechanical and Thermal Properties of PLA Composites with Cellulose Nanofibers and Standard Size Fibers. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 42(10) (2011): 1509-1514.

- [23] Jonoobi, M., Harun, J., Mathew, A.P., and Oksman, K. Mechanical properties of cellulose nanofiber (CNF) reinforced polylactic acid (PLA) prepared by twin screw extrusion. Composites Science and Technology 70(12) (2010): 1742-1747.
- [24] Lv, S., Zhang, Y., Gu, J., and Tan, H. Biodegradation behavior and modelling of soil burial effect on degradation rate of PLA blended with starch and wood flour. Colloids Surfaces B Biointerfaces 159 (2017): 800-808.
- [25] Li, K., Huang, J., Xu, D., Zhong, Y., Zhang, L., and Cai, J. Mechanically strong polystyrene nanocomposites by peroxide-induced grafting of styrene monomers within nanoporous cellulose gels. Carbohydrate Polymers 199 (2018): 473-481.
- [26] Fan, M., Dai, D., and Huang, B. Fourier Transform - Materials Analysis. 1st ed, ed. Salih, S.: IntechOpen, 2012.
- [27] Lessan, F. and Karimi, M. Selective Water-Permeable Channels Induced by Polystyrene Brushes within Hairy Nanocellulose/Cellulose Acetate Membrane. Polymers Advanced Technologies 28 (2017): 1357- 1365.
- [28] Jiang, Y., Zhang, Y., Ding, L., and De La Cruz, J.A. Regenerated cellulose-dispersed polystyrene composites enabled via Pickering emulsion polymerization. Carbohydrate Polymers 223 (2019): 115079.
- [29] Lele, V.V., Kumari, S., and Niju, H. Syntheses, Characterization and Applications of Graft Copolymers of Sago Starch - A Review. Starch - Stärke 70(7-8) (2018).
- [30] Blaker, J.J., Lee, K.-Y., Walters, M., Drouet, M., and Bismarck, A. Aligned unidirectional PLA/bacterial cellulose nanocomposite fibre reinforced PDLLA composites. Reactive and Functional Polymers 85 (2014): 185-192.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกคอมพอลิเมอร์

ตารางที่ ก.1 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิด

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)	ความทนแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )
Pure PLA	54.99	1534.38	3.03	2.25
	52.93	1567.36	3.15	2.04
	55.40	1416.62	3.26	2.29
	53.93	1593.64	3.07	2.36
	53.41	1406.62	3.10	2.27
ค่าเฉลี่ย	54.13	1503.72	3.12	2.24
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	1.04	86.74	0.09	0.12

ตารางที่ ก.2 สมบัติเชิงกลของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 1 โดยมวล

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)	ความทนแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )
1wt%MC	57.00	1702.43	3.92	2.71
	57.10	1676.47	4.43	2.67
	57.18	1643.64	4.57	2.66
	57.36	1671.30	5.07	2.63
	56.50	1667.42	5.28	2.67
ค่าเฉลี่ย	57.03	1672.25	4.65	2.67
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.32	21.04	0.54	0.03

ตารางที่ ก.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนที่อัดเต็มด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 3 โดยมวล

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)	ความทนแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )
3wt%MC	56.34	1792.42	4.17	2.99
	56.46	1748.24	3.65	2.69
	56.34	1947.09	4.25	3.02
	56.38	1776.97	3.67	2.96
	56.48	1733.72	4.25	2.96
ค่าเฉลี่ย	56.40	1799.69	4.00	2.93
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.07	85.58	0.31	0.13

ตารางที่ ก.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนที่อัดเต็มด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 5 โดยมวล

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)	ความทนแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )
5wt%MC	54.28	1718.94	3.62	2.33
	54.90	1680.39	3.44	2.34
	55.56	1701.36	3.75	2.34
	54.31	1612.18	3.73	2.38
	56.09	1638.36	3.63	2.36
ค่าเฉลี่ย	55.03	1670.24	3.63	2.35
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.79	44.25	0.12	0.02

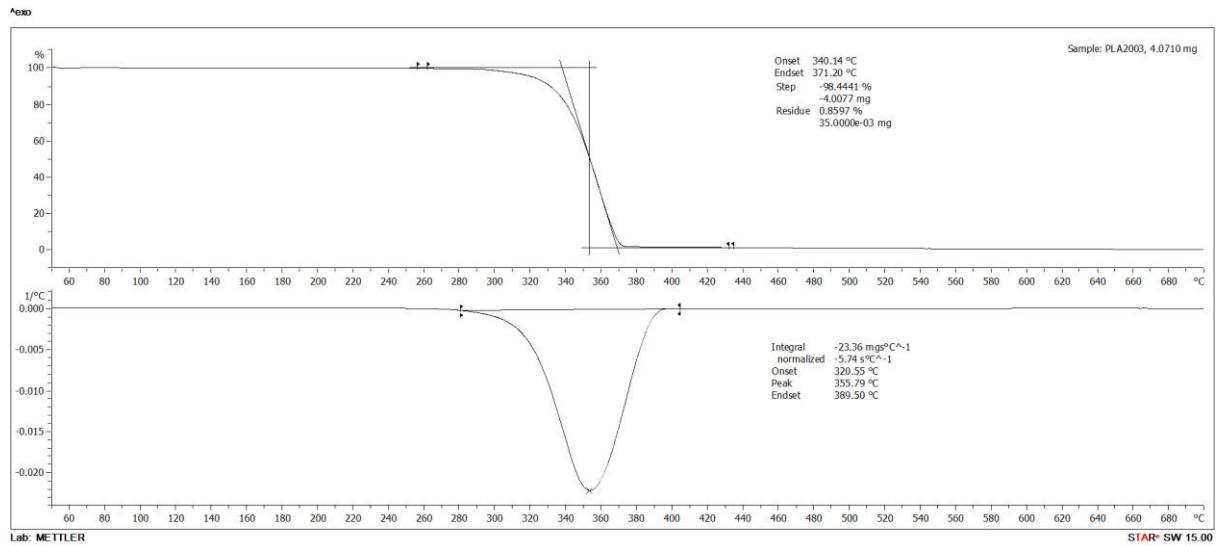
ตารางที่ ก.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนที่อัดเต็มด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 10 โดยมวล

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังลึ้มอดูลัส (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)	ความทนแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )
10wt%MC	54.81	1701.87	3.62	3.30
	54.52	1719.20	3.44	3.27
	53.08	1672.11	3.75	3.21
	53.38	1556.86	3.73	3.27
	54.78	1751.92	3.63	3.20
ค่าเฉลี่ย	54.11	1680.39	3.63	3.25
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.82	74.85	0.12	0.04

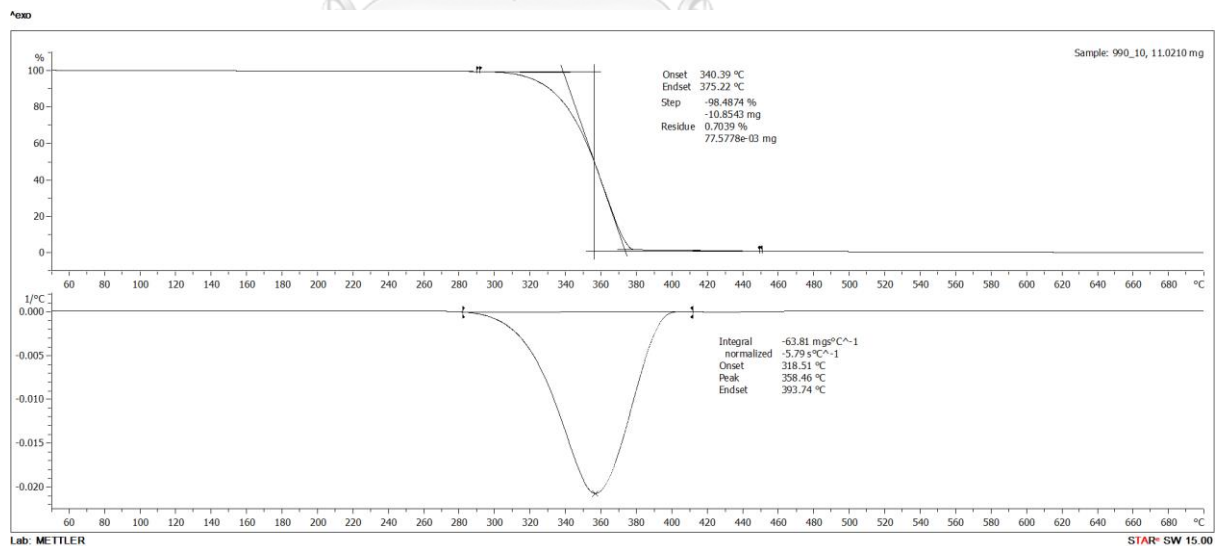
ตารางที่ ก.6 สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนที่อัดเต็มด้วยเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยมวล

ตัวอย่าง	ความทนแรงดึง (MPa)	ยังลึ้มอดูลัส (MPa)	การยืด ณ จุดขาด (%)	ความทนแรงกระแทก (kJ/m <sup>2</sup> )
10wt%MC	56.32	1644.81	3.62	2.68
	55.35	1663.21	3.96	2.68
	56.00	1654.11	3.73	2.70
	56.32	1913.53	3.68	2.62
	55.68	1654.83	3.83	2.64
ค่าเฉลี่ย	55.93	1706.10	3.76	2.66
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.42	116.14	0.14	0.03

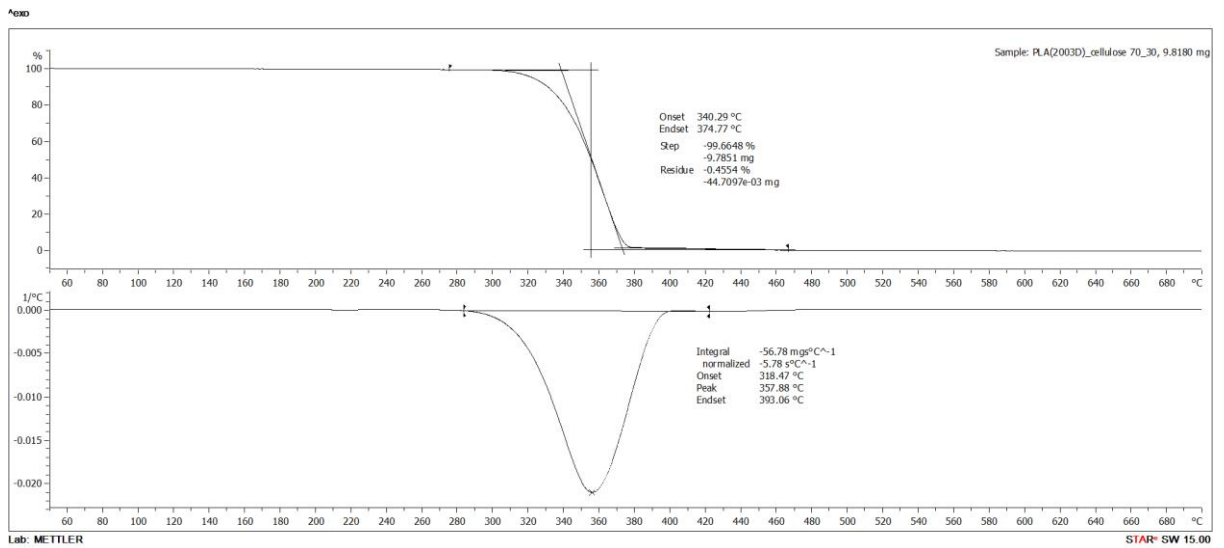
ภาคผนวก ข  
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA



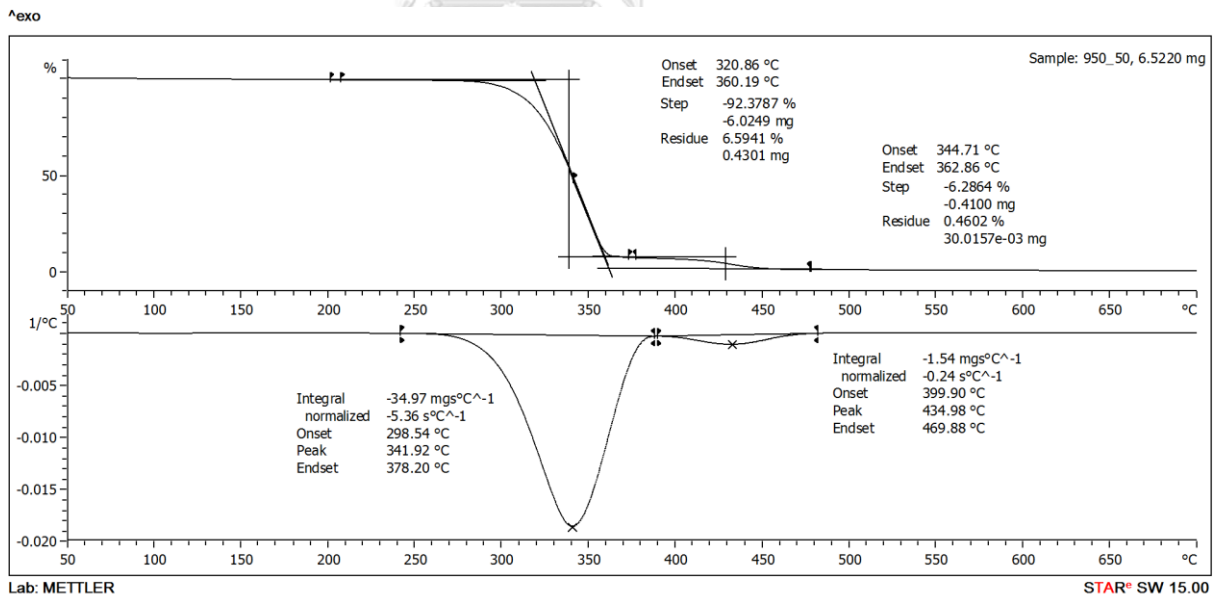
รูปที่ ข.1 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิแล็กติกแอซิด



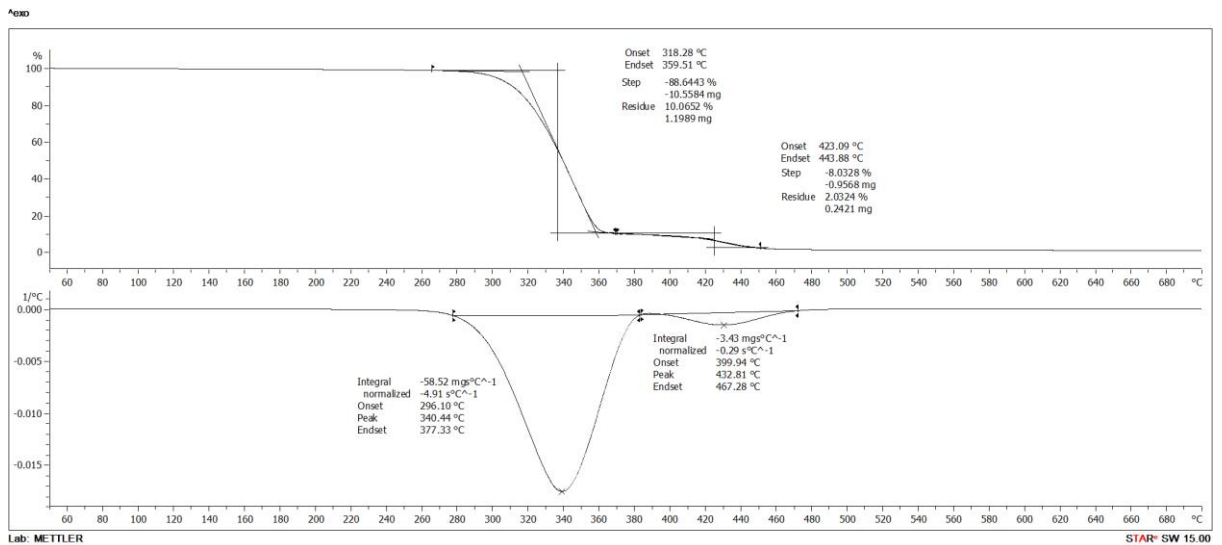
รูปที่ ข.2 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟท์-พอลิสไตรีนร้อยละ 1  
โดยมวล



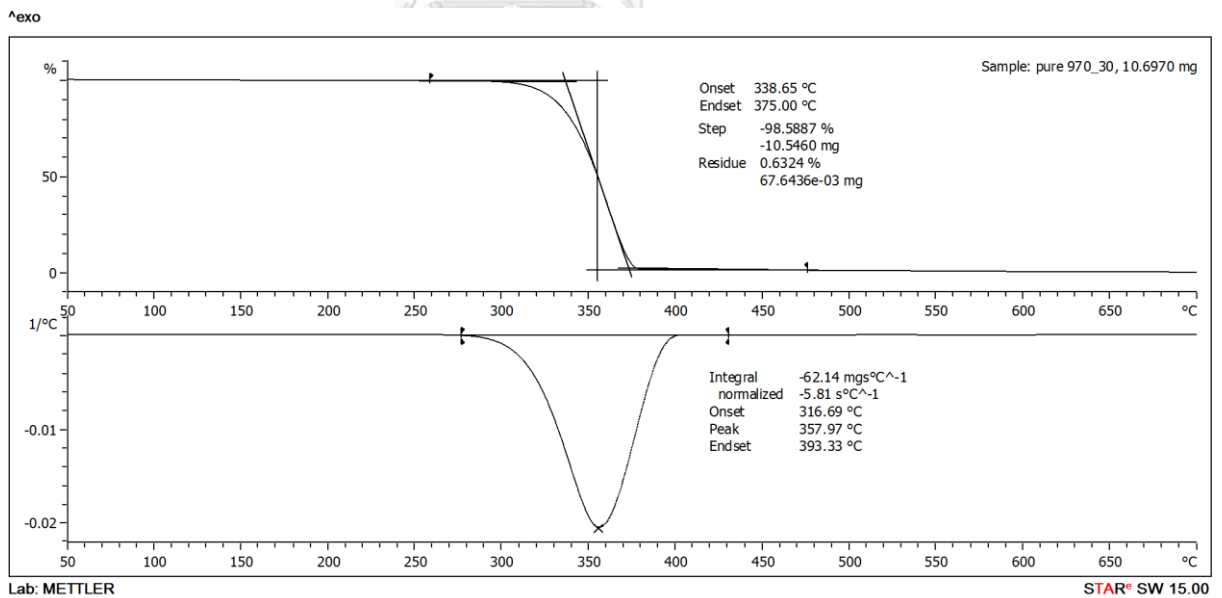
รูปที่ ข.3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 3  
โดยมวล



รูปที่ ข.4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 5  
โดยมวล

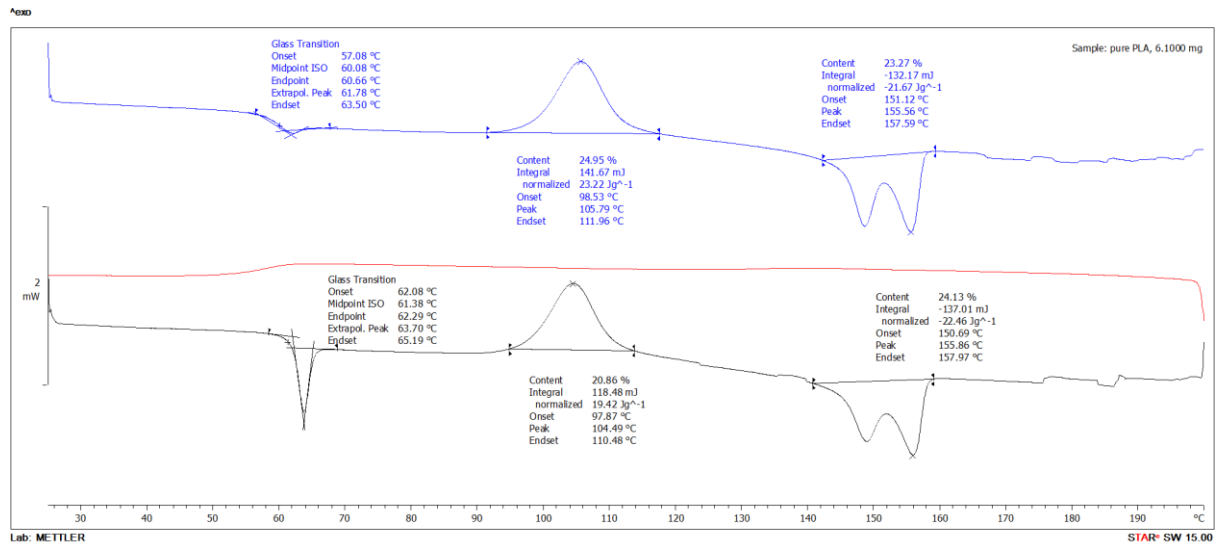


รูปที่ ข.5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนไกลคอล-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 10 โดยมวล

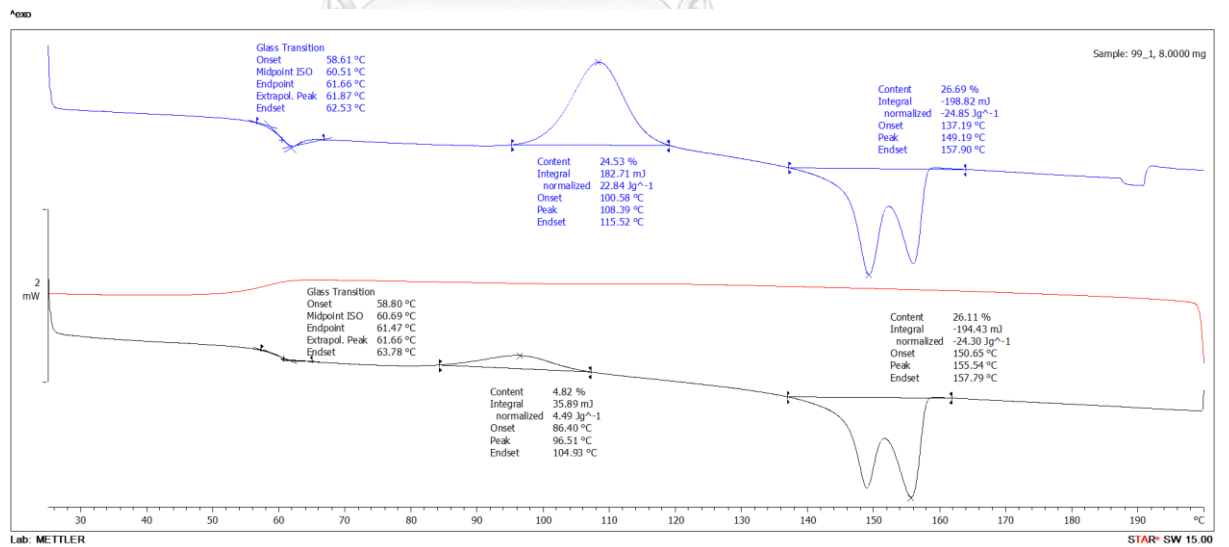


รูปที่ ข.6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเอทิลีนไกลคอลร้อยละ 3 โดยมวล

ภาคผนวก ค  
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC

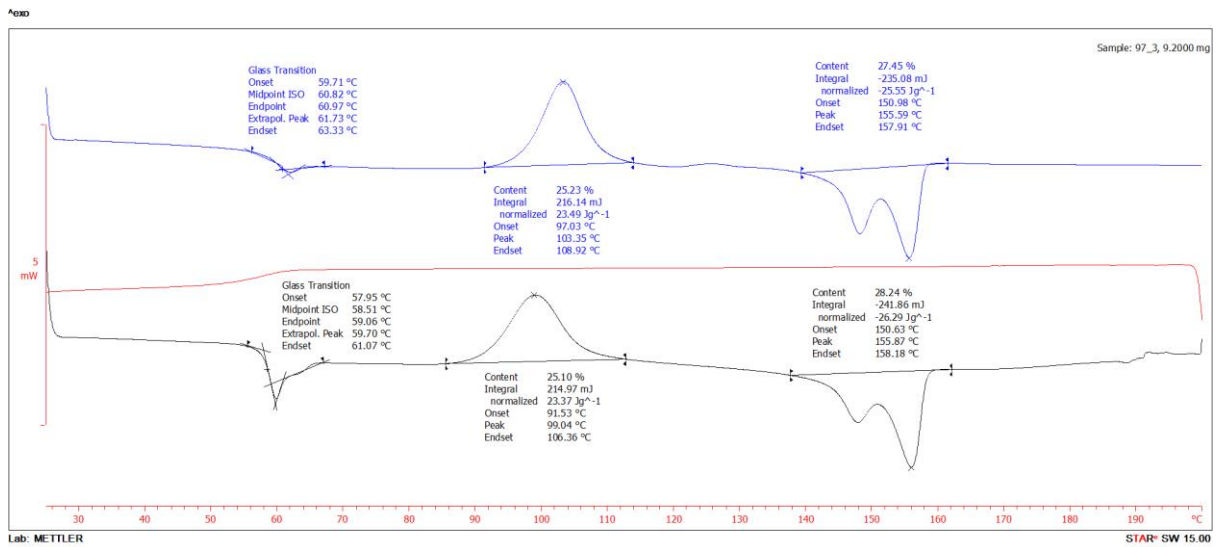


รูปที่ ค.1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิแล็กติกแอซิด



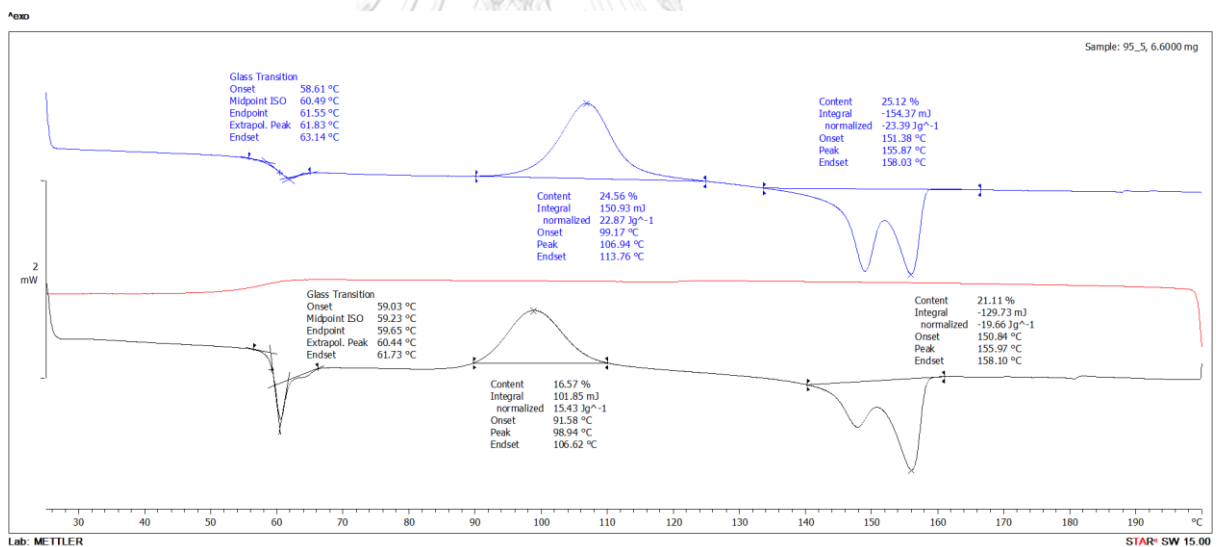
รูปที่ ค.2 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 1

โดยมวล



รูปที่ ค.3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเล็กทิกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 3

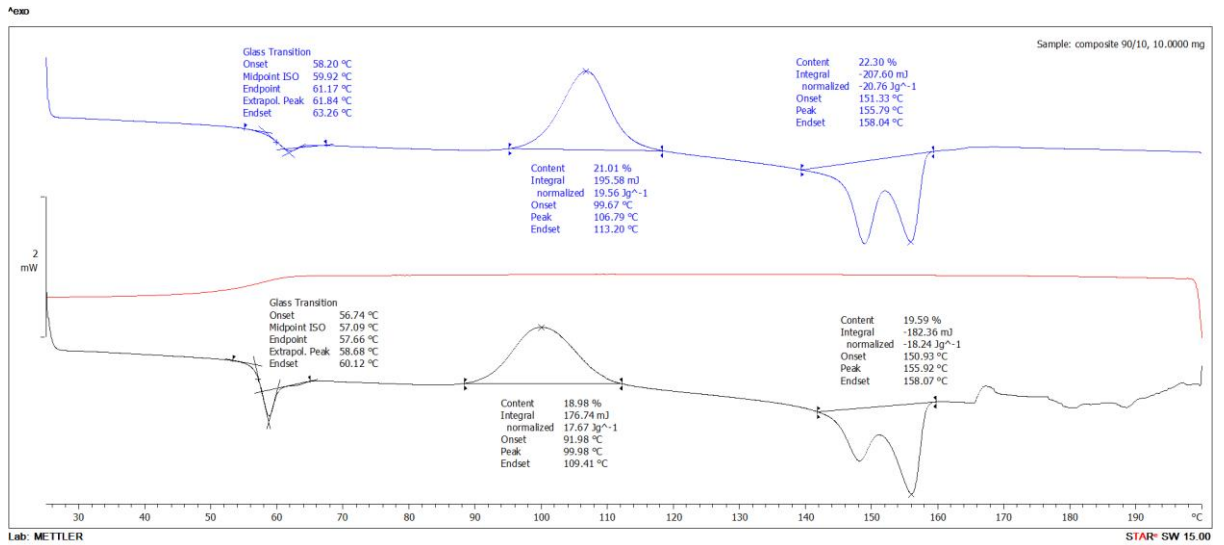
โดยมวล



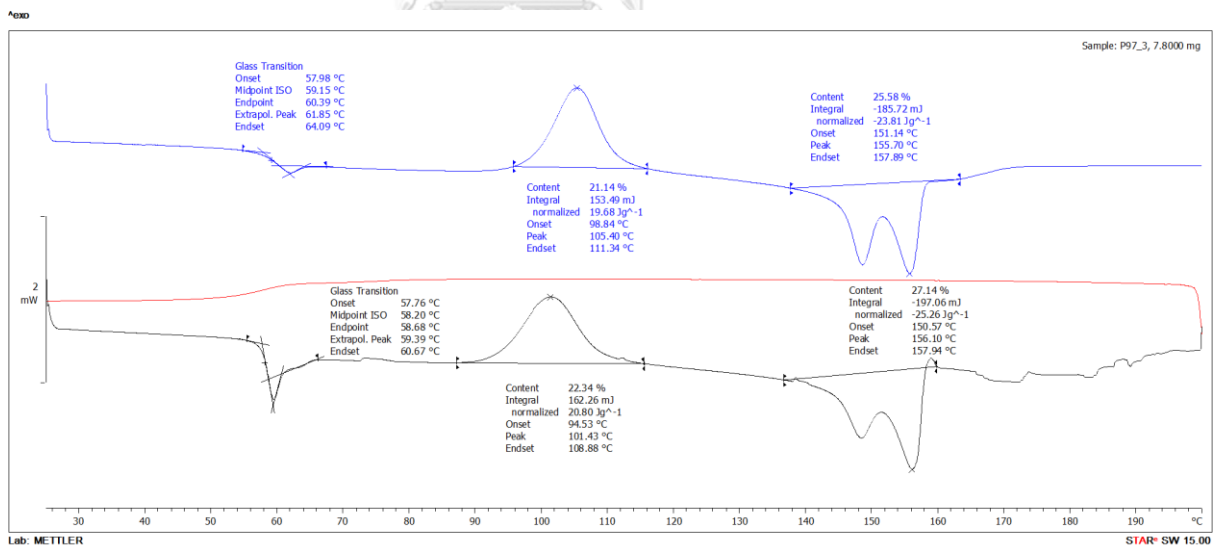
รูปที่ ค.4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเล็กทิกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 5

โดยมวล





รูปที่ ค.5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเล็กทิกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 10 โดยมวล



รูปที่ ค.6 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเล็กทิกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยมวล

ภาคผนวก ง  
สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิเล็กทริกคอมพอสิต

ตารางที่ ง.1 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิเล็กทริกแอซิด

ตัวอย่าง : พอลิเล็กทริกแอซิด							
วัน	น้ำหนัก (g)			การดูดซึมน้ำ (%)			เฉลี่ย
	1	0.4425	0.4009	0.3735	0.61	0.66	
5	0.4426	0.4013	0.3739	0.64	0.77	0.83	0.75
10	0.4427	0.4015	0.3737	0.66	0.83	0.77	0.75
20	0.4427	0.4016	0.3739	0.66	0.86	0.83	0.78
30	0.4427	0.4015	0.3737	0.66	0.83	0.77	0.75
40	0.4427	0.4015	0.3738	0.66	0.83	0.80	0.76
50	0.4426	0.4013	0.3739	0.64	0.77	0.83	0.75
60	0.4429	0.4016	0.3734	0.70	0.86	0.67	0.74
70	0.4427	0.4014	0.3738	0.66	0.80	0.80	0.75
80	0.4426	0.4013	0.3736	0.64	0.77	0.73	0.72
90	0.4426	0.4013	0.3736	0.64	0.77	0.73	0.72
100	0.4426	0.4013	0.3736	0.64	0.77	0.73	0.72

ตารางที่ ง.2 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิเล็กทริกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 1 โดยมวล

ตัวอย่าง : 1wt%MC							
วัน	น้ำหนัก (g)			การดูดซึมน้ำ (%)			เฉลี่ย
1	0.4284	0.4529	0.4196	0.62	0.69	0.62	0.64
5	0.4291	0.4534	0.4202	0.79	0.80	0.78	0.79
10	0.4292	0.4536	0.4204	0.82	0.84	0.83	0.83
20	0.4293	0.4539	0.4205	0.84	0.91	0.85	0.87
30	0.4293	0.4533	0.4206	0.84	0.78	0.88	0.83
40	0.4294	0.4533	0.4204	0.87	0.78	0.83	0.82
50	0.4290	0.4532	0.4202	0.77	0.76	0.78	0.77
60	0.4292	0.4535	0.4204	0.82	0.82	0.83	0.82
70	0.4290	0.4533	0.4203	0.77	0.78	0.80	0.78
80	0.4289	0.4532	0.4203	0.74	0.76	0.80	0.77
90	0.4290	0.4532	0.4203	0.77	0.76	0.80	0.78
100	0.4290	0.4532	0.4203	0.77	0.76	0.80	0.78

ตารางที่ ง.3 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิเล็กทริกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 3 โดยมวล

ตัวอย่าง : 3wt%MC							
วัน	น้ำหนัก (g)			การดูดซึมน้ำ (%)			เฉลี่ย
1	0.4012	0.4415	0.4426	0.80	0.73	0.82	0.78
5	0.4024	0.4428	0.4433	1.13	1.00	0.98	1.04
10	0.4028	0.4436	0.4441	1.25	1.19	1.16	1.20
20	0.4029	0.4434	0.4440	1.27	1.14	1.14	1.18
30	0.4028	0.4435	0.4440	1.25	1.16	1.14	1.18
40	0.4028	0.4434	0.4440	1.25	1.14	1.14	1.18
50	0.4020	0.443	0.4433	1.02	1.05	0.98	1.02
60	0.4024	0.4433	0.4436	1.13	1.12	1.05	1.10
70	0.4026	0.4434	0.4437	1.19	1.14	1.07	1.13
80	0.4028	0.4434	0.4439	1.25	1.14	1.12	1.17
90	0.4028	0.4434	0.4439	1.25	1.14	1.12	1.17
100	0.4028	0.4434	0.4439	1.25	1.14	1.12	1.17

ตารางที่ ง.4 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 5 โดยมวล

ตัวอย่าง : 5wt%MC							
วัน	น้ำหนัก (g)			การดูดซึมน้ำ (%)			เฉลี่ย
1	0.4377	0.4027	0.4214	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.4414	0.4062	0.4251	0.85	0.94	0.91	0.90
10	0.4420	0.4067	0.4255	0.98	1.08	1.01	1.02
20	0.4420	0.4067	0.4258	0.98	1.08	1.08	1.05
30	0.4420	0.4066	0.4259	0.98	1.05	1.11	1.05
40	0.4425	0.4070	0.4261	1.10	1.16	1.16	1.14
50	0.4428	0.4074	0.4268	1.17	1.27	1.33	1.25
60	0.4428	0.4074	0.4267	1.17	1.27	1.31	1.25
70	0.4426	0.4071	0.4267	1.12	1.19	1.30	1.20
80	0.4427	0.4073	0.4269	1.14	1.24	1.35	1.25
90	0.4425	0.4069	0.4265	1.10	1.13	1.26	1.16
100	0.4428	0.4073	0.4269	1.17	1.24	1.35	1.25

**ตารางที่ ง.5** สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิแล็กติกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลส-กราฟต์-พอลิสไตรีนร้อยละ 10 โดยมวล

ตัวอย่าง : 10wt%MC							
วัน	น้ำหนัก (g)			การดูดซึมน้ำ (%)			เฉลี่ย
1	0.4357	0.3671	0.4151	1.09	1.44	1.12	1.22
5	0.4375	0.3685	0.4173	1.51	1.90	1.68	1.70
10	0.4389	0.3699	0.4187	1.83	2.36	2.04	2.08
20	0.4389	0.3695	0.4186	1.83	2.23	2.02	2.03
30	0.4391	0.3699	0.4185	1.88	2.36	1.99	2.08
40	0.4391	0.3697	0.4186	1.88	2.29	2.02	2.06
50	0.4385	0.3692	0.4182	1.74	2.13	1.91	1.93
60	0.4402	0.37	0.4188	2.13	2.39	2.07	2.20
70	0.4402	0.37	0.4188	2.13	2.39	2.07	2.20
80	0.4394	0.37	0.4189	1.95	2.39	2.09	2.14
90	0.4394	0.37	0.4189	1.95	2.39	2.09	2.14
100	0.4394	0.37	0.4189	1.95	2.39	2.09	2.14




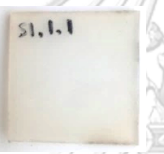






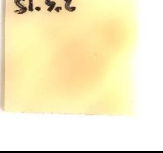
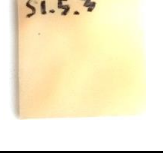



ตารางที่ ง.6 สมบัติการดูดซึมน้ำของพอลิเล็กทิกแอซิดเติมด้วยเซลลูโลสร้อยละ 3 โดยมวล

ตัวอย่าง : 3wt%UMC							
วัน	น้ำหนัก (g)			การดูดซึมน้ำ (%)			เฉลี่ย
1	0.3899	0.4324	0.4012	0.80	0.70	0.87	0.79
5	0.3905	0.4332	0.4019	0.97	0.88	1.06	0.97
10	0.3909	0.4337	0.4024	1.09	1.00	1.19	1.09
20	0.3907	0.4337	0.4024	1.03	1.00	1.19	1.08
30	0.391	0.4337	0.4024	1.12	1.00	1.19	1.10
40	0.3909	0.4336	0.4023	1.09	0.98	1.16	1.08
50	0.3906	0.433	0.4017	1.00	0.84	1.00	0.95
60	0.3909	0.4336	0.4023	1.09	0.98	1.16	1.08
70	0.3909	0.4336	0.4022	1.09	0.98	1.14	1.07
80	0.3908	0.4336	0.4022	1.06	0.98	1.14	1.06
90	0.3908	0.4336	0.4022	1.06	0.98	1.14	1.06
100	0.3908	0.4336	0.4022	1.06	0.98	1.14	1.06




## ภาคผนวก จ

## สมบัติการย่อยสลายของพอลิแล็กติกคอมพอลิเมอร์ด้วยวิธีการฝังกลบ




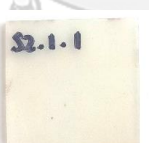
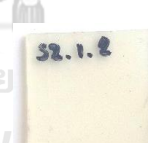
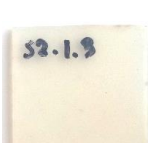



ตารางที่ จ.1 สมบัติการย่อยสลายเดือนที่ 1 ของคอมพอลิเมอร์










เดือนที่ 1	ตัวอย่าง		
ชื่อตัวอย่าง	1	2	3
Pure PLA			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.00	0.00	0.00
1wt%MC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.02	0.05	0.05
3wt%MC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.05	0.07	0.05
5wt%MC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.11	0.15	0.11
10wt%MC			



ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.13	0.18	0.21
3wt%UMC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.02	0.05	0.00


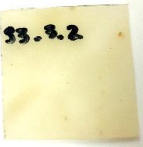





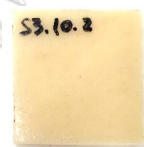




ตารางที่ จ.2 สมบัติการย่อยสลายเดือนที่ 2 ของคอมพอสิต

เดือนที่ 2	ตัวอย่าง		
ชื่อตัวอย่าง	1	2	3
Pure PLA			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.00	0.00	0.00
1wt%MC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.13	0.13	0.15
3wt%MC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.15	0.18	0.18

5wt%MC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.18	0.26	0.24
10wt%MC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.35	0.35	0.33
3wt%UMC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.05	0.00	0.00

ตารางที่ จ.3 สมบัติการย่อยสลายเดือนที่ 3 ของคอมพอสิต

เดือนที่ 3	ตัวอย่าง		
ชื่อตัวอย่าง	1	2	3
Pure PLA			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.00	0.00	0.00
1wt%MC			

ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.21	0.14	0.16
3wt%MC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.20	0.27	0.20
5wt%MC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.24	0.26	0.29
10wt%MC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.53	0.60	0.72
3wt%UMC			
ร้อยละน้ำหนักที่ หายไป (%)	0.09	0.12	0.07

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วิมาลา กรินทร์ไตรทิพย์
วัน เดือน ปี เกิด	30 กันยายน 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปี 2560 และได้เข้าการศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	49/16 ถ.รัตนธิเบศร์ บางรักใหญ่ บางบัวทอง นนทบุรี 11110
ผลงานตีพิมพ์	นำเสนอผลงานวิจัยแบบโปสเตอร์ในหัวข้อ Properties of Poly(lactic acid) Filled with Cellulose-Graft-Polystyrene จัดขึ้นโดยงาน 2019 International Conference on Functional Materials (ICFM 2019) วันที่ 4 กันยายน - 6 กันยายน พ.ศ. 2562 ณ เมืองเซนได ประเทศญี่ปุ่น