

พอลิเล็กทริกแอซิด/พอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทรฟแทเลตคอมพอสิตเดิมด้วยผงไม้และโวลลาสโทไนต์



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

POLY(LACTIC ACID)/POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) COMPOSITES
FILLED WITH WOOD FLOUR AND WOLLASTONITE

Miss Sarinya Srasomsub



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

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พอลิแล็กติกแอซิด/พอลิবিวทีลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลต
	คอมพอสิตเติมด้วยผงไม้และโพลลาสโพนต์
โดย	นางสาวศรินทร์ญา สระสมทรัพย์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โปธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิถรัตน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

ศรินทร์ญา สระสมทรัพย์ : พอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพแทเลตคอมพอสิตเติมด้วยผงไม้และโวลลาสโทไนต์ (POLY(LACTIC ACID)/POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) COMPOSITES FILLED WITH WOOD FLOUR AND WOLLASTONITE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.อัญญาพร บุญมทิตธิสุทธิ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.พศวรรณ์ ชัยวุฒินันท์, 95 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ ไฮบริดคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพแทเลต (พีแบต) ได้ถูกพัฒนาด้วยการใส่ผงไม้และโวลลาสโทไนต์ โดยชั้นแรกพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พีแบตที่อัตราส่วนต่างๆ (พีแบต 10-50% โดยน้ำหนัก) ได้ถูกเตรียมเพื่อวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ซึ่งพบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีความทนแรงกระแทก และการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพีแบตที่ใส่เข้าไป หากแต่ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสการดัดโค้งมีค่าลดลงตามปริมาณของพีแบตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิแล็กติกแอซิดล้วน โดยพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 มีสมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดี (มีความทนแรงกระแทก และการยืดตัว ณ จุดขาดสูง) ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมนี้จึงถูกเลือกเพื่อนำไปเตรียมไฮบริดคอมพอสิตกับสารตัวเติมปริมาณ 30 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินผสม 100 ส่วน โดยมีอัตราส่วนผงไม้/โวลลาสโทไนต์เท่ากับ 0/30, 10/20, 15/15, 20/10 และ 30/0 ผลจากการทดลอง พบว่า ความทนแรงกระแทก ยังสัมพันธ์ มอดุลัสการดัดโค้ง เสถียรภาพทางความร้อน และการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อใส่สารตัวเติมไฮบริด ในขณะที่ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด และความทนแรงดัดโค้งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับของพอลิแล็กติกแอซิดล้วน ซึ่งจากการพิจารณาสมบัติเชิงกล พบว่า ไฮบริดคอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10/20 พอลิแล็กติกแอซิด/พีแบต/ผงไม้/โวลลาสโทไนต์มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีกว่าของพอลิแล็กติกแอซิดล้วนและไฮบริดคอมพอสิตอื่นๆ อย่างไรก็ตาม สมบัติด้านการติดไฟของทั้งพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสม 70/30 พอลิแล็กติกแอซิด/พีแบตไม่ได้รับการปรับปรุงเมื่อใส่สารตัวเติมไฮบริด

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5772157823 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: POLY(LACTIC ACID) / POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) / WOOD FLOUR / WOLLASTONITE / HYBRID COMPOSITE

SARINYA SRASOMSUB: POLY(LACTIC ACID)/POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) COMPOSITES FILLED WITH WOOD FLOUR AND WOLLASTONITE. ADVISOR: ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D., CO-ADVISOR: PHASAWAT CHAIWUTTHINAN, Ph.D., 95 pp.

In this work, hybrid composites of poly(lactic acid)/(PLA)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blend were developed with wood flour (WF) and wollastonite (WT). A series of PLA/PBAT blends (10–50 wt% PBAT) were first prepared to analyze in terms of mechanical properties. The blends showed a PBAT-dose-dependent increase in the impact strength and elongation at break, but a decrease in the tensile strength, Young's modulus, flexural strength and flexural modulus with increasing PBAT content as compared to those of the neat PLA. Among the investigated PLA/PBAT blend compositions, the 70/30 wt% blend exhibited a good combination of the mechanical properties (high impact strength and elongation at break). As a consequence, this blend was further selected for preparing hybrid composites with a fix filler content of 30 parts by weight per hundred parts of blend resin, and the WF/WT ratios were 0/30, 10/20, 15/15, 20/10 and 0/30. It was found that the impact strength, Young's modulus, flexural modulus, thermal stability and biodegradability were enhanced with hybrid filler, while the tensile strength, elongation at break and flexural strength were decreased compared to those of the neat PLA. From the mechanical properties, it was revealed that the 70/30/10/20 PLA/PBAT/WF/WT hybrid composite exhibited a better combination of the mechanical properties than the neat PLA and the other hybrid composites. However, the flammability of PLA and 70/30 PLA/PBAT blend was not improved with the addition of hybrid filler.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Academic Year: 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์อย่างสมบูรณ์ได้ เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการ ตลอดจนความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ในการทำงานวิจัยจากท่านผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนามต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร และอาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมทิตธิสุทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัยอย่างดียิ่งตลอดการทำงานวิจัยนี้ รวมถึงการแนะนำแนวทางในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และ ดร.พศวรรษน์ ชัยวุฒินันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำ และอำนวยความสะดวกต่างๆ ในด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำงานวิจัยอย่างดียิ่ง

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนและเอื้อเฟื้อด้านวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือทดสอบต่างๆ รวมไปถึงสถานที่ในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือต่างๆ ในระหว่างการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastics).....	3
2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ.....	3
2.1.2 กระบวนการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ.....	4
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติก.....	4
2.2 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA).....	5
2.2.1 การผลิต PLA.....	5
2.2.2 สมบัติของ PLA.....	6
2.2.3 การนำไปใช้งานของ PLA.....	7
2.3 พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT).....	7
2.4 คอมพอสิต (Composites).....	8
2.4.1 ไฮบริดคอมพอสิต (Hybrid composite).....	8
2.5 สารตัวเติม (Fillers).....	9
2.6 ผงไม้ (Wood flour).....	11
2.6.1 การผลิตผงไม้.....	11

2.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงไม้.....	12
2.7 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite).....	13
2.7.1 การผลิตโวลลาสโทไนต์.....	13
2.7.2 สมบัติของโวลลาสโทไนต์.....	14
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	17
3.1 วัตถุประสงค์.....	17
3.2 เครื่องผสมและเครื่องขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	17
3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ.....	17
3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง.....	19
3.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	20
3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	20
3.5.2 การเตรียมคอมพอสิต.....	21
3.6 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	21
3.7 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	22
3.7.1 วิเคราะห์ดรรชนีการหลอมไหล (MFI).....	22
3.7.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact strength).....	23
3.7.3 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties).....	24
3.7.4 การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง (Flexural properties).....	25
3.7.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC).....	25
3.7.6 การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (TGA).....	27
3.7.7 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (DMA).....	28

3.7.8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	28
3.7.9 วิเคราะห์ดรรชนีออกซิเจนจำกัด (LOI).....	29
3.7.10 การทดสอบการลุกไหม้ไฟ (Flammability test).....	30
3.7.11 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	31
3.7.12 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	32
4.1 ลักษณะขึ้นทดสอบ	32
4.2 ดรรชนีการหลอมไหล (MFI).....	33
4.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	35
4.3.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength).....	36
4.3.2 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties).....	37
4.3.3 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง (Flexural properties).....	41
4.4 พฤติกรรมการเกิดผลึก	43
4.5 เสถียรภาพทางความร้อน	47
4.6 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical properties).....	50
4.7 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	51
4.8 ดรรชนีออกซิเจนจำกัด (LOI)	54
4.9 การลุกไหม้ไฟ (Flammability)	55
4.10 การดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	56
4.11 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน.....	57
4.11.1 สัณฐานวิทยา.....	57
4.10.2 สมบัติด้านแรงดึง	59

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลการทดลอง	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
รายการอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก ดรรชนีการหลอมไหล	69
ภาคผนวก ข สมบัติเชิงกล	72
ภาคผนวก ค เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC	79
ภาคผนวก ง เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA.....	87
ภาคผนวก จ อัตราการลามไฟ.....	91
ภาคผนวก ฉ เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ.....	93
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	95

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	สมบัติของ PBAT เกรด Ecoflex® F Blend C1200.....	8
ตารางที่ 2.2	ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์	9
ตารางที่ 2.3	ผลของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิเมอร์	10
ตารางที่ 2.4	ขนาดของผงไม้ในหน่วยเมซตามมาตรฐานอเมริกาเปรียบเทียบกับขนาดในหน่วย ไมโครเมตร.....	12
ตารางที่ 2.5	สมบัติโดยทั่วไปของโพลลาสโตน.....	15
ตารางที่ 3.1	อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม	20
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนของคอมพอสิต	21
ตารางที่ 4.1	สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต.....	35
ตารางที่ 4.2	พฤติกรรมการเกิดผลึกของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต	43
ตารางที่ 4.3	เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, PBAT, WF, WT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต.....	48

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ	4
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของ PLA	5
รูปที่ 2.3	กระบวนการสังเคราะห์ PLA	6
รูปที่ 2.4	โครงสร้างทางเคมีของ PBAT	7
รูปที่ 2.5	อนุภาคของผงไม้	11
รูปที่ 2.6	โครงสร้างผลึกรูปเข็มของโพลลาสโตน	14
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการทดลอง	19
รูปที่ 3.2	เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่	20
รูปที่ 3.3	เครื่องฉีดแบบ	22
รูปที่ 3.4	เครื่องวัดทรชนีการหลอมไหล	22
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256	23
รูปที่ 3.6	เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก	23
รูปที่ 3.7	ขนาดของขั้นตอนทดสอบและขั้นตอนทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1	24
รูปที่ 3.8	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล	25
รูปที่ 3.9	ขั้นตอนทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D790	25
รูปที่ 3.10	เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์	27
รูปที่ 3.11	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)	27
รูปที่ 3.12	เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต	28
รูปที่ 3.13	ขั้นตอนทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต	28
รูปที่ 3.14	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
รูปที่ 3.15	เครื่องวัดทรชนีออกซิเจนจำกัด	29

รูปที่ 3.16	ขั้นตอนทดสอบหาระชนีออกซิเจนจำกัดตามมาตรฐาน ASTM D2863.....	29
รูปที่ 3.17	ขั้นตอนทดสอบการลุกลามไฟ.....	30
รูปที่ 3.18	เครื่องทดสอบการเผาไหม้.....	30
รูปที่ 3.19	ขั้นตอนทดสอบการดูดซึมน้ำ	31
รูปที่ 4.1	ขั้นตอนทดสอบของ (a) PLA, (b) PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30, (f) 60/40 และ (g) 50/50	32
รูปที่ 4.2	ขั้นตอนทดสอบของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต ในอัตราส่วน WF/WT: (a) 0/30, (b) 10/20, (c) 15/15, (d) 20/10 และ (e) 30/0.....	33
รูปที่ 4.3	ดรชนีการหลอมไหลของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT.....	34
รูปที่ 4.4	ดรชนีการหลอมไหลของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต.....	34
รูปที่ 4.5	ความทนแรงกระแทกของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT	36
รูปที่ 4.6	ความทนแรงกระแทกของของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต	37
รูปที่ 4.7	สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT.....	38
รูปที่ 4.8	สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัสและ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต	40
รูปที่ 4.9	สมบัติด้านแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง (b) มอดุลัสการดัดโค้ง ของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT.....	41
รูปที่ 4.10	สมบัติด้านแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง (b) มอดุลัสการดัดโค้ง ของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต.....	42
รูปที่ 4.11	DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT	44
รูปที่ 4.12	DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต.....	45
รูปที่ 4.13	DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT.....	46

รูปที่ 4.14	DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต	47
รูปที่ 4.15	TGA เทอร์โมแกรมของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT	48
รูปที่ 4.16	TGA เทอร์โมแกรมของ WF, WT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต	49
รูปที่ 4.17	สมบัติเชิงกลพลวัต: (a) มอดุลัสสะสม, (b) แทนเจนต์สูญเสีย ของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต	50
รูปที่ 4.18	สัณฐานวิทยาของ (a) WF ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ (b) WT ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	51
รูปที่ 4.19	สัณฐานวิทยาของ (a) PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน (b) 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30 และ (e) 50/50 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	52
รูปที่ 4.20	สัณฐานวิทยาของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน WF/WT: (a) 0/30, (b) 10/20, (c) 15/15, (d) 20/10 และ (e) 30/0 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า	53
รูปที่ 4.21	ดรรชนีออกซิเจนจำกัดของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต	54
รูปที่ 4.22	ลักษณะขึ้นทศสอบภายหลังการทดสอบหาค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัดของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต	54
รูปที่ 4.23	อัตราการลามไฟของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต	55
รูปที่ 4.24	การดูดซึมน้ำของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต	56
รูปที่ 4.25	สัณฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) PBAT, (c) พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตที่มีอัตราส่วน WF/WT เท่ากับ (d) 0/30, (e) 10/20, (f) 15/15, (g) 20/10 และ (h) 30/0 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 60 และ 120 วัน	58
รูปที่ 4.26	สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งสัมมอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต ภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 วัน	60

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันพลาสติกได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เพิ่มมากขึ้น ความต้องการใช้งานพลาสติกจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากพลาสติกแทบทั้งสิ้น จึงทำให้มีปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเนื่องจากพลาสติกที่เตรียมจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมส่วนใหญ่มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งอาจต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายนานนับร้อยปีจึงก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา โดยปัจจุบัน ประเทศไทยมีขยะพลาสติกเกิดขึ้นประมาณปีละ 2.7 ล้านตัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่สามารถนำไปรีไซเคิลได้เพียงปีละ 0.7 ล้านตัน ที่เหลือจะถูกนำไปเผาทิ้งหรือทำการฝังกลบ ซึ่งวิธีการเหล่านี้อาจมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ค่อนข้างสูง รวมทั้งที่ดินที่ใช้ในการฝังกลบหาได้ยาก เนื่องจากผู้ที่อาศัยอยู่ในบริเวณใกล้เคียงอาจทำการต่อต้าน และที่ดินในปัจจุบันมีราคาแพง นอกจากนี้ การกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีการเผายังก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกจนนำไปสู่การเกิดสภาวะโลกร้อนอีกด้วย ดังนั้น การใช้พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradable plastics) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่งจากนักวิทยาศาสตร์ ตลอดจนนักอุตสาหกรรมทั่วโลก โดยพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบันได้แก่ พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) ซึ่งเป็นแอลิฟติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) ที่สามารถผลิตจากวัสดุชีวมวล (biomass) ที่ได้จากพืชที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (renewable resource) นอกจากนี้ ยังใช้พลังงานต่ำ และสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติภายหลังจากการใช้งาน โดยพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรง ความแข็งตึง และความใสใกล้เคียงกับพอลิสไตรีนและพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต โดยพอลิแล็กติกแอซิดส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์ ซึ่งในอนาคตมีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการค้นคว้าและพัฒนากระบวนการผลิตที่ทำให้พลาสติกมีราคาต่ำลงและมีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น การมีกฎข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อม รวมทั้งการที่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม พอลิแล็กติกแอซิดยังมีข้อเสียและข้อจำกัดในการใช้งานบางประการ เช่น ความเปราะ การมีความทนแรงกระแทกต่ำ และมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ เป็นต้น ซึ่งปัญหาเหล่านี้ได้ถูกนำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติและแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยการผสมพอลิแล็กติกแอซิดกับพลาสติกประเภทอื่นที่มีความยืดหยุ่นสูง ได้แก่ พอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟทาเลต หรือพีแบด

(poly-(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) นอกจากนี้ ยังผสมกับสารตัวเติม 2 ชนิด ซึ่งได้แก่ ผงไม้ (wood flour) และวอลลาสโทไนต์ (wollastonite)

พีแบตเป็นแอลิปติก-แอโรแมติกโคพอลิเอสเทอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกับพอลิแล็กติกแอซิด หากแต่สังเคราะห์ได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ซึ่งพีแบตเป็นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นและความเหนียวเช่นเดียวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) ดังนั้น การผสมพีแบตกับพอลิแล็กติกแอซิดจึงมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความยืดหยุ่นและทนแรงกระแทกได้มากขึ้น ในขณะที่ยังคงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพเอาไว้ได้

ผงไม้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส (cellulose) ถูกใช้อย่างกว้างขวางเป็นสารตัวเติมในการผลิตคอมพอสิตไม้พลาสติก (wood plastic composite, WPC) เพราะมีราคาถูก และใช้งานได้ง่าย นอกจากนี้ ยังสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ส่วนวอลลาสโทไนต์เป็นแร่แคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate, CaSiO_3) ที่มีโครงสร้างผลึกรูปเข็ม (needle-like) ที่ถูกนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในพลาสติกหลายประเภท ได้แก่ พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีน และพีวีซี เป็นต้น เนื่องจากมีความทนทานสารเคมี และเสถียรภาพทางความร้อนสูง มีสมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ มีระดับความขรุขระและความแข็งสูง ไม่มีพิษ และราคาถูก

งานวิจัยนี้ ได้นำพอลิแล็กติกแอซิดมาผสมกับพีแบตเพื่อปรับปรุงความทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์ จากนั้นได้เตรียมไฮบริดคอมพอสิตของพอลิเมอร์ผสมด้วยผงไม้/วอลลาสโทไนต์ พร้อมทั้งตรวจสอบสมบัติเชิงกล เสถียรภาพทางความร้อน และสัญญาณวิทยาเพื่อหาแนวทางพัฒนาผลิตภัณฑ์สู่อุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) [1]

เนื่องจากความต้องการในการใช้พลาสติกทั่วโลกเพิ่มสูงขึ้นเป็นอย่างมาก อีกทั้งคุณสมบัติของพลาสติกที่สังเคราะห์จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมก็มีความคงทนและไม่สามารถย่อยสลายได้ในเวลาอันสั้น จึงส่งผลต่อขยะพลาสติกที่เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว การกำจัดด้วยการฝังกลบหรือเผาทำลายก็ทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งทางดินและทางอากาศ ด้วยเหตุนี้ทำให้หลายประเทศทั่วโลกหันมาให้ความสนใจกับพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพมากขึ้น หลายๆ องค์กรทั่วโลกก็ได้มีการจัดทำมาตรฐานเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพและได้ให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพขึ้นมา ซึ่งตามมาตรฐาน ISO 472:1998 พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ หมายถึง พลาสติกที่ถูกออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนด ทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกเสื่อมลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐานที่เหมาะสมกับชนิดและการใช้งานของพลาสติก โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติเท่านั้น นอกจากนี้แล้วยังมีมาตรฐานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพอีก เช่น ASTM D6400-99, BPS Japan (1994), DIN FNK103.2 (1993) และ CEN (1993) เป็นต้น

2.1.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ [2]

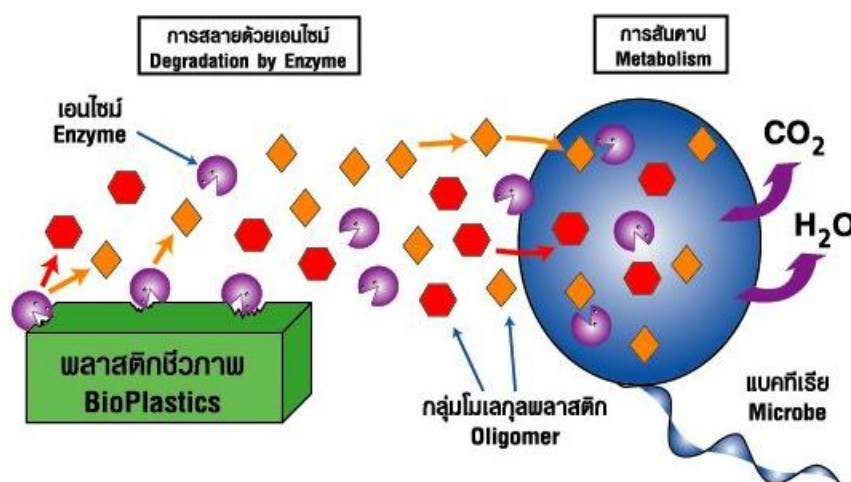
พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพสามารถแบ่งประเภทตามวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้ 2 ประเภท ดังนี้

1. วัตถุดิบจากแหล่งธรรมชาติ (biological source) ซึ่งเป็นวัตถุดิบจากธรรมชาติที่สามารถเกิดทดแทนใหม่ได้ (renewable resources) เช่น ข้าวเจ้า อ้อย มันสำปะหลัง และข้าวโพด เป็นต้น โดยตัวอย่างพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพที่ใช้วัตถุดิบจากแหล่งธรรมชาติ ได้แก่ พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (poly(hydroxybutyrate), PHB), พอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) และพอลิไฮดรอกซีอัลคานอเอต (polyhydroxyalkanoate, PHA) เป็นต้น
2. วัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเลียม (petroleum-source) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ได้จากน้ำมันดิบหรือแก๊สธรรมชาติ ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้ไม่สามารถเกิดขึ้นทดแทนใหม่ได้ ตัวอย่างพลาสติกย่อยสลายทาง

ชีวภาพที่ใช้วัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเลียม ได้แก่ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol), PVA), พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT), พอลิคาร์โปแลคโตน (polycaprolactone, PCL) และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เป็นต้น

2.1.2 กระบวนการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพ [3]

การย่อยสลายทางชีวภาพแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลักๆ 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการย่อยสลายภายนอกเซลล์ โดยจุลินทรีย์ปลดปล่อยเอนไซม์ออกมา ทำให้สายโพลิเมอร์ขนาดใหญ่ของพอลิเมอร์เกิดการแตกตัวจนมีขนาดเล็กลง ทำให้พอลิเมอร์มีขนาดและน้ำหนักโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปของ โอลิโกเมอร์ (oligomers), ไดเมอร์ (dimers) และมอนอเมอร์ (monomers) และเมื่อพอลิเมอร์เกิดการแตกตัวจนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปก็จะเกิดการย่อยสลายในขั้นที่ 2 ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเกิดภายในเซลล์ ในขั้นตอนนี้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็น น้ำ เกลือแร่ ธาตุ แก๊สและชีวมวล ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ [4]

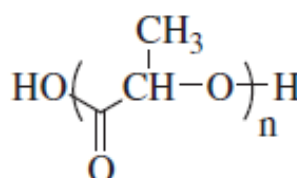
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติก [5]

สมบัติของพลาสติกมีความสัมพันธ์กับการย่อยสลายทางชีวภาพ ทั้งสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพส่งผลต่อกลไกการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติก โดยพอลิเมอร์หรือพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ช้ากว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ สันฐานวิทยาก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ นอกจากนี้

ระดับการเกิดผลึก (degree of crystallinity) เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากเอนไซม์ส่วนใหญ่จะจู่โจมส่วนที่เป็นอสัณฐานของพอลิเมอร์ ซึ่งโมเลกุลที่อยู่ในส่วนนี้มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่หนาแน่น จึงง่ายต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการย่อยสลาย อุณหภูมิการหลอมเหลวก็เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ของพอลิเมอร์ โดยพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำกว่าจะมีการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีกว่าพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูง

2.2 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)

พอลิแล็กติกแอซิด [6-8] หรือ PLA เป็นแอลิฟาติกพอลิเอสเตอร์แบบเส้น (linear aliphatic polyester) ที่ผลิตจากวัตถุดิบทางธรรมชาติที่สามารถเกิดทดแทนใหม่ได้ โดยมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.2 PLA ถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในปี 1932 โดย W.H. Carothers ซึ่งเป็นนักวิจัยของบริษัท Dupont สหรัฐอเมริกา โดยสังเคราะห์ได้จากกระบวนการให้ความร้อนแก่กรดแล็กติก (lactic acid) ภายใต้ความดันสุญญากาศ แต่เนื่องจาก PLA ที่ผลิตได้มีต้นทุนสูงและน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงเน้นใช้งานในทางการแพทย์เท่านั้น หลังจากนั้นจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนสามารถผลิต PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สามารถใช้งานในเชิงพาณิชย์ได้ การใช้งานจึงเริ่มขยายออกไปมากขึ้น

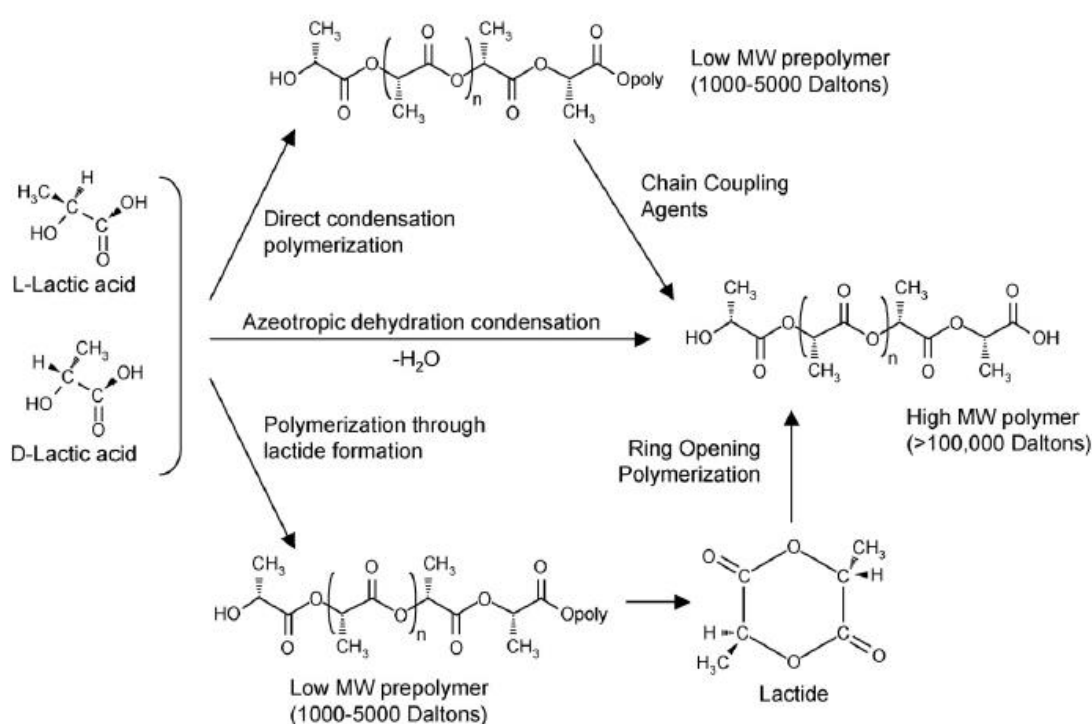


รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของ PLA [6]

2.2.1 การผลิต PLA [9, 10]

กระบวนการผลิต PLA เริ่มจากนำพืชผลทางการเกษตรที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และข้าวสาลี เป็นต้น มาบดให้ละเอียดจนเป็นแป้ง จากนั้นย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล แล้วนำไปหมักด้วยจุลินทรีย์ ได้เป็นกรดแล็กติก แล้วนำกรดแล็กติกที่ได้มาผ่านกระบวนการสังเคราะห์ให้เป็นพอลิเมอร์ กระบวนการสังเคราะห์ PLA สามารถแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ การสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเชื่อมต่อกันระหว่างกรดแล็กติก เป็นสายโซ่ยาว ได้เป็น PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และอีกกระบวนการคือ การสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (ring-opening

polymerization, ROP) ของแล็กไทด์ (lactide) โดยเริ่มจากการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นของกรดแล็กติก เกิดเป็นสารประกอบแบบวงที่เรียกว่าแล็กไทด์ จากนั้นทำการเปิดวงแล็กไทด์และนำมาสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ยาว โดยวิธีการนี้จะได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง นอกจากวิธีการหลักที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีอีกวิธีการหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจากกรดแล็กติกได้โดยตรง เรียกว่า กระบวนการสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นแบบอะซิโตรีปิด (azeotropic dehydrative condensation) ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ PLA ด้วยวิธีต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการสังเคราะห์ PLA [11]

2.2.2 สมบัติของ PLA [10]

PLA มีความโปร่งใส มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกโดยทั่วไป สมบัติด้านความแข็ง ความแข็งดึง ความทนแรงกระแทก และความยืดหยุ่นของ PLA มีความใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (poly(ethylene terephthalate), PET) มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ 60 องศาเซลเซียส และเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว ในสถานะที่มีความชื้นสูง แต่ไม่สลายตัวในสภาวะแวดล้อมทั่วไป มีจุดหลอมเหลวประมาณ 120-170

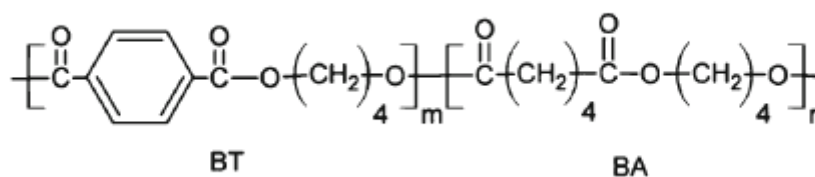
องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังสามารถกักเก็บกลิ่นและรสชาติได้ดี และมีความทนทานต่อไขมันและน้ำมันอีกด้วย

2.2.3 การนำไปใช้งานของ PLA [7]

- โหมเย็บแผล วัสดุปิดแผล วัสดุนำพาหรือปลดปล่อยตัวยา
- ภาชนะปลูกพืช
- บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้ง ภาชนะบรรจุอาหาร ขวดน้ำ ถังพลาสติก ฟิล์มสำหรับหีบห่อ
- เครื่องนุ่งห่ม ผ้าอ้อม ผ้านาไมย
- ส่วนประกอบในรถยนต์
- ชิ้นส่วนในโทรศัพท์มือถือ

2.3 พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต (Poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) [3, 12]

พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรพทาเลต หรือ PBAT เป็นแอลิฟาติก-แอโรมาติกโคพอลิเอสเทอร์ ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.4 มีชื่อทางการค้าว่า Ecoflex สามารถสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาการควบแน่น (polycondensation) โดยมีสารตั้งต้นคือ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) กรดเทเรพทาเลติก (terephthalic acid) และกรดแอดิพิค (adipic acid)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT [13]

PBAT มีอุณหภูมิการหลอมเหลว 110-120 องศาเซลเซียส มีค่าดัชนีการหลอมไหลที่ 190 องศาเซลเซียส น้ำหนักทดสอบ 2.16 กิโลกรัม เท่ากับ 2.7-4.9 กรัม/10 นาที ความหนาแน่น 1.25-1.27 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มีความยืดหยุ่นสูง มีความต้านทานต่อการสึกหรอ (wear) และการแตกหัก สามารถต้านทานต่อน้ำและน้ำมันได้ และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพในภาวะที่เหมาะสม โดยการย่อยสลายทางชีวภาพของ PBAT ขึ้นอยู่กับหมู่บิวทิลีนแอดิเพต (butylene adipate group) ส่วนเสถียรภาพและสมบัติเชิงกลของ PBAT ขึ้นอยู่กับหมู่เทเรพทาเลต (terephthalate group) PBAT มี

ต้นทุนในการผลิตสูงเนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นวัตถุดิบและมีมอดุลัสต่ำ จึงทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ส่วนใหญ่แล้ว PBAT ถูกนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร ฟิล์มทางการแพทย์และถุงย่อยสลายได้เป็นต้น สมบัติต่างๆ ของ PBAT เกรด Ecoflex® F Blend C1200 ซึ่งเป็นเกรดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ PBAT เกรด Ecoflex® F Blend C1200 [14]

Property	Unit	Test method	Ecoflex® F Blend C1200
Mass density	g/cm ³	ISO 1183	1.25-1.27
Melt flow rate MFR 190°C, 2.16 kg	g/10 min	ISO 1133	2.7-4.9
Melt volume rate MVR 190°C, 2.16 kg	ml/10 min	ISO 1133	2.5-4.5
Melting point	°C	DSC	110-120
Shore D hardness	-	ISO 868	32
Vicat VST A/50	°C	ISO 306	91

2.4 คอมพอสิต (Composites) [15, 16]

คอมพอสิต คือ วัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ที่ไม่ละลายซึ่งกันและกัน มารวมตัวกันเพื่อให้สมบัติโดยรวมของวัสดุดีขึ้น โดยทั่วไปแล้วคอมพอสิตประกอบด้วยวัสดุที่เป็นเนื้อหลักซึ่งเป็นส่วนที่ต่อเนื่องกัน เรียกว่า เนื้อพื้นหรือเมทริกซ์ (matrix) และส่วนที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ เรียกว่า เฟสกระจาย (dispersed phase) หรือเฟสเสริมแรง (reinforced phase) โดยเมทริกซ์ทำหน้าที่ห่อหุ้มเฟสกระจายเอาไว้ ส่วนเฟสกระจายทำหน้าที่เสริมสมบัติให้กับเมทริกซ์ ทำให้คอมพอสิตมีสมบัติตามที่ต้องการ วัสดุที่นำมาใช้เป็นเมทริกซ์ ได้แก่ พอลิเมอร์ โลหะและเซรามิก ส่วนเฟสกระจายอาจมีทั้งที่เป็นแบบแผ่น อนุภาคหรือเส้นใย

2.4.1 ไฮบริดคอมพอสิต (Hybrid composite)

ไฮบริดคอมพอสิต [16] เป็นคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติมที่แตกต่างกันมากกว่าหนึ่งชนิดขึ้นไป ลงในเมทริกซ์เดียวกัน เพื่อเสริมสมบัติซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น ไฮบริดคอมพอสิตระหว่างเส้นใยไม้ (wood fiber) และทัลค์ (talc) ซึ่งมีพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรตโควาเลอเรต (polyhydroxybutyrate-co-valerate, PHBV) เป็นเมทริกซ์ โดยเส้นใยไม้เป็นสารอินทรีย์ที่มีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถย่อย

สลายทางชีวภาพได้ ส่วนทัลค์เป็นสารอนินทรีย์ที่ช่วยลดการหดตัวและเพิ่มความแข็งแรงให้กับพลาสติก จึงมักนำมาใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลในอุตสาหกรรมคอมพอสิต ดังนั้นจึงนำสารตัวเติมทั้งสองชนิดมาใช้ผสมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมพอสิต ขณะที่ยังคงสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของ PHBV ไว้ได้และช่วยลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย [17]

2.5 สารตัวเติม (Fillers) [18]

สารตัวเติม เป็นสารเติมแต่งที่เป็นของแข็งที่ใช้ใส่ในพอลิเมอร์ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตหรือใช้ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ ซึ่งมีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่ส่วนใหญ่แล้วนิยมนำสารตัวเติมอนินทรีย์มาใช้กับเทอร์โมพลาสติก ขณะที่สารตัวเติมอินทรีย์มักนำไปใช้กับพลาสติกเทอร์โมเซต ตัวอย่างของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ที่ใช้ในพอลิเมอร์ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิดของสารตัวเติมที่ใช้ในพอลิเมอร์ [18]

สารตัวเติมอนินทรีย์ (Inorganic fillers)	สารตัวเติมอินทรีย์ (Organic fillers)
แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate)	ผงไม้ (wood flour)
ไมกา (mica)	เยื่อไม้ (wood pulp)
ทัลค์ (talc)	แป้ง (starch)
เคอลิน (kaolin)	
วอลลาสโทไนต์ (wollastonite)	
ใยหิน (asbestos)	
ซิลิกา (silica)	
ซิงก์ออกไซด์ (zinc oxide)	
อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide)	
ผงโลหะ เช่น Al, Zn, Cu, Ni	
คาร์บอนแบล็ก (carbon black)	

สำหรับสารตัวเติมที่ใช้เพิ่มเนื้อให้กับพอลิเมอร์และใช้ในการลดต้นทุนการผลิต เรียกว่า เอกซ์เทนเดอร์ (extenders) ตัวอย่างเช่น ผงไม้, หินปูน (limestone) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต และเคอลิน เป็นต้น ซึ่งสารตัวเติมประเภทนี้ก็ช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย ส่วนสารตัวเติมที่ใช้ปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ เรียกว่า ฟังก์ชันแนลฟิลเลอร์ (functional fillers) โดยส่วนใหญ่จะมี

ใช้เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สารเสริมแรง (reinforcing fillers) ซึ่งผลของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.3 โดยข้อมูลที่แสดงในตารางอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับเกรดและปริมาณของสารตัวเติมรวมทั้งชนิดของพอลิเมอร์ด้วย

ตารางที่ 2.3 ผลของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ [18]

Fillers	Cost reduction	Reduced shrinkage	Tensile strength	Impact strength	Modulus of elasticity	Hardness	Dimension stability	Thermal resistance	Electrical resistance	Chemical resistance	Electrical conductivity	Thermal conductivity	Machine abrasion
Calcium carbonate	+	+		+ -	+	+							o
Kaolin	+	+				+		+	+	+			
Talc	+	+	o		+	+	+	+	+	+			o
Mica	+	+	+	+ -	+	+	+	+	+	+			
Wollastonite	+	+	+		+	+	+	+	+	+			
Asbestos	+	+	+	-	+	+	+	+		+			o
Silica	+	+		-	+	+	+	+	+				-
Glass spheres	+	+		-	+		+	+	+	+			o
Zinc oxide		+		-	+	+		+	+				
ATH		+	-	-	+	+			+				
Metallic powders		+		+	+	+					+	+	
Carbon black		+		+	+		+				+		o
Wood flour	+	+		+ -	+		+						o

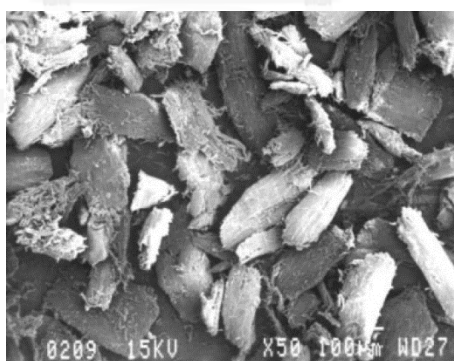
หมายเหตุ: + อธิธิพลในทางบวก, - อธิธิพลในทางลบ, o ไม่มีอิทธิพล

2.6 ผงไม้ (Wood flour)

ผงไม้ [19] มีลักษณะเป็นผง ซึ่งได้จากการนำซีลี้อย เซซไม้หรือแผ่นไม้บางๆ มาบดให้เป็นผง โดยผงไม้ถูกนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ ไม่ทำความเสียหายให้กับเครื่องจักรในระหว่างกระบวนการผลิต สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ มีความแข็งตึง (stiffness) สูง ดูดซับเสียงได้ เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก ซึ่งการนำผงไม้มาใช้เป็นสารตัวเติมนอกจากช่วยลดต้นทุนในการผลิตแล้วยังช่วยลดการหดตัวและเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์อีกด้วย

2.6.1 การผลิตผงไม้ [20]

ขั้นตอนหลักในการผลิตผงไม้ ได้แก่ การลดขนาดและคัดแยกขนาด โดยถ้าวัตถุดิบที่ใช้มีขนาดใหญ่ จะทำการลดขนาดโดยใช้อุปกรณ์อย่างเช่น เครื่องบดแบบค้อนเหวี่ยง (hammer mill) หรือ เครื่องย่อยไม้ (chipper) บดให้ไม้กลายเป็นผงเล็กๆ ซึ่งเป็นอนุภาคที่ประกอบด้วยกลุ่มของเส้นใย ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อนุภาคเหล่านี้มักจะมี aspect ratio อยู่ที่ประมาณ 1-5 เท่านั้น เมื่อไม้ถูกบดจนแตกเป็นผงแล้วจะถูกนำมาคัดแยกขนาดโดยใช้ตะแกรงกรอง โดยทั่วไปแล้วมักจะบอกขนาดของผงไม้เป็น เมช (mesh) ขนาดของผงไม้ในหน่วยเมชตามมาตรฐานอเมริกา (US standard) ซึ่งสามารถนำมาเทียบกับขนาดในหน่วยไมโครเมตรได้ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยผงไม้ที่ใช้เป็นสารตัวเติมในเทอร์โมพลาสติกจะมีขนาดไม่เกิน 425 ไมโครเมตร หรือ 40 เมช



รูปที่ 2.5 อนุภาคของผงไม้ [20]

ตารางที่ 2.4 ขนาดของผงไม้ในหน่วยเมชตามมาตรฐานอเมริกาเปรียบเทียบกับขนาดในหน่วยไมโครเมตร [20]

Mesh (US standard)	Particle diameter (μm)
20	850
25	710
30	600
35	500
40	425
45	355
50	300
60	250
70	212
80	180
100	150
120	125
140	106
170	90
200	75
230	63
270	53
325	45
400	38

2.6.2 องค์ประกอบทางเคมีของผงไม้ [20]

ไม้เป็นพอลิเมอร์คอมพอสิตที่สร้างจากองค์ประกอบพื้นฐานคือ เซลลูโลส (cellulose), เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายสามมิติและรวมตัวกันเป็นผนังเซลล์ เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุดในเนื้อไม้และเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความแข็งแรงและเสถียรภาพทางโครงสร้างของไม้ โดยโครงสร้างของเซลลูโลสประกอบไปด้วยผลึก 60-90% โดยน้ำหนัก เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายโซ่กิ่งที่ประกอบด้วยน้ำตาลที่มีคาร์บอนห้าและหกอะตอม มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส แต่ก็ยังคงเป็นส่วนประกอบหลักที่เป็น

โครงสร้างของไม้ ส่วนลิกนินเป็นพอลิเมอร์ออสถฐานที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีความเป็นขั้วน้อยกว่า เซลลูโลส ทำหน้าที่เป็นตัวยึดภายในและระหว่างเส้นใยเซลลูโลส นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบอินทรีย์ ที่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ ที่เรียกว่า สารแทรก (extractives) ซึ่งมีอยู่ประมาณ 3-10% โดยน้ำหนัก ไม้แห้งที่ปลูกในภูมิภาคเขตอบอุ่น และพบในปริมาณมากกว่านี้ในไม้ที่ปลูกใน ภูมิภาคเขตร้อนชื้น สารแทรกประกอบด้วยสารจำพวกกรดเรซิน (resin acid) กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) น้ำมันระเหย (volatile oil) สารประกอบเทอร์ฟีนอยด์ (turphenoid compounds) และ สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds) เป็นต้น สารเหล่านี้มีผลต่อสี กลิ่น และความทนทาน ต่อการผุพังของไม้

ผงไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อทางการค้าว่า Lignocel เกรด C120 ซึ่งเป็นผงไม้สนที่มีขนาด อนุภาค 70-150 ไมโครเมตร มีความหนาแน่นรวม 100-135 กรัม/ลิตร โดยมีองค์ประกอบเป็น เซลลูโลส 41.0%, เฮมิเซลลูโลส 27.5%, ลิกนิน 28.1% และสารแทรก 3.4% [21]

2.7 โวลลาสโทไนต์ (Wollastonite)

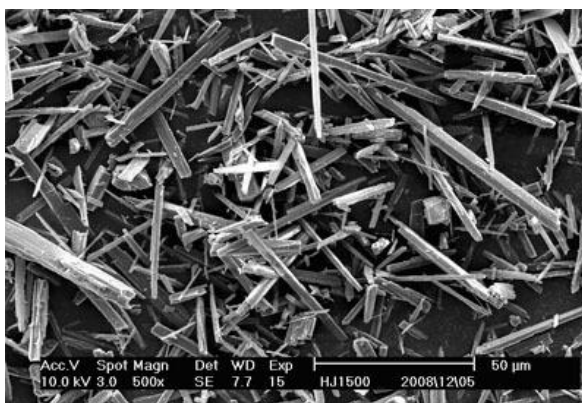
โวลลาสโทไนต์ [22, 23] เป็นแร่ที่เป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกต (calcium silicate, CaSiO_3) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยมีผลึกรูปเข็ม ถูกตั้งชื่อตาม W. H. Wollaston. ซึ่งเป็นนักเคมี ชาวอังกฤษในปี 1822 โวลลาสโทไนต์บริสุทธิ์มีสีขาว เมื่อมีสิ่งเจือปนจะเปลี่ยนเป็นสีครีม ชมพูหรือสี แดง ซึ่งสิ่งเจือปนที่อยู่ในโวลลาสโทไนต์ ได้แก่ Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 , K_2O และ Na_2O แร่โวลลาสโท- ไนต์สามารถเกิดได้ทั่วไปบนผืนโลก โดยมักเกิดร่วมกับแร่ calcite, diopside, dolomite และ quartz ซึ่งพบมากที่โรมาเนีย อิตาลี นอร์เวย์ ฟินแลนด์ เยอรมัน อเมริกา สเปน จีน แคนาดาและ เม็กซิโก โวลลาสโทไนต์เป็นแร่ที่สำคัญในอุตสาหกรรมซึ่งถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมสีและการเคลือบสี อุตสาหกรรมวัสดุก่อสร้าง อุตสาหกรรมเซรามิก และอุตสาหกรรมผ้าเบรค และวัสดุขัดถู เป็นต้น

2.7.1 การผลิตโวลลาสโทไนต์ [23]

ในขั้นตอนแรกเป็นการบดและโม่แร่ให้ได้ขนาด เพื่อแยกสิ่งเจือปนออก โดยใช้วิธีการแยกด้วย แม่เหล็กไฟฟ้าหรือวิธีการลอยแร่ (flotation) เพื่อแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกไป โวลลาสโทไนต์เกรดที่มี aspect ratio สูง (10:1 ถึง 20:1) จะผลิตในเครื่องบดเสียดสี (attrition mill) โดยมีความยาวเฉลี่ย เท่ากับ 20-200 ไมโครเมตร ซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นฟลักซ์ชั้นเนลฟิลเลอร์สำหรับพลาสติก ส่วนโวลลาส- โทไนต์เกรดผงมี aspect ratio ต่ำ (3:1 ถึง 5:1) ผลิตในเครื่องบดกระแทก (impact mill) โดยเกรด ผงมีขนาด 325-400 เมช

2.7.2 สมบัติของโพลีเอสเตอร์ [23]

โพลีเอสเตอร์บริสุทธิ์ประกอบด้วย CaO 48.3% และ SiO₂ 51.7% มีโครงสร้างเป็นผลึกรูปเข็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ลักษณะเฉพาะของโพลีเอสเตอร์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นสารตัวเติมใน พอลิเมอร์ผสม คือ มีสีขาว, การดูดซึมน้ำต่ำ, มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี, สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ นอกจากนี้ยังมีลักษณะอื่นๆ อีก เช่น ความแข็งสูง, ความเป็นต่างสูงและสามารถแยกออกจากกันได้โดยกรดอินทรีย์ (mineral acids) โพลีเอสเตอร์มีมอดูลัสประมาณ 30,000 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับแร่ซิลิเกตอื่นๆ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโพลีเอสเตอร์ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกรูปเข็มของโพลีเอสเตอร์ [24]

ตารางที่ 2.5 สมบัติโดยทั่วไปของโวลลาสโทไนต์ [23]

Property	
Color	white
Crystal system	triclinic
Specific gravity	2.8–2.9
Coefficient of thermal expansion, K^{-1}	6.5×10^{-6}
Specific heat, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	1003
Melting point, $^{\circ}C$	1540
Transition temperature, $^{\circ}C$ (to pseudowollastonite)	1200
Hardness (Mohs)	4.5-5
Refractive index	1.63-1.67
pH (10 wt% slurry)	9.0-11
Loss on ignition, % ($950^{\circ}C$)	0.1-6
Thermal conductivity, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$	2.5
Dielectric constant, $10^4\ Hz$	6

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jiang และคณะ [25] ได้ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBAT โดยมีอัตราส่วนของ PBAT เป็นร้อยละดังนี้ 0, 5, 10, 15, 20 และ 100 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความทนแรงดึง และมอดุลัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง แต่มีการยืดตัว ณ จุดขาดและความเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการเติม PBAT ส่งผลให้การแตกหักของชิ้นงานเปลี่ยนจากการแตกแบบเปราะเป็นการแตกแบบเหนียว ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการทดสอบการดึงยืดและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Farsetti และคณะ [26] ได้ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBAT โดยมีอัตราส่วนของ PBAT ร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 100 โดยน้ำหนัก พบว่า มอดุลัสและความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมค่อยๆ ลดลงเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น แต่การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อมีการเติม PBAT ในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น และจากการศึกษาด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analysis) พบว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วของ PLA ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติม PBAT ลงไป แสดงว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBAT ไม่สามารถเข้ากันได้

Petinakis และคณะ [27] ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงยึดเกาะระหว่าง PLA และผงไม้ต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอสิต โดยมีอัตราส่วนของผงไม้เป็นร้อยละ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่า การเติมผงไม้มีผลทำให้มอดูลัสแรงดึงของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 95 เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ แต่ไม่มีผลต่อความทนแรงดึงของคอมพอสิต เนื่องจากการยึดเกาะกันที่ไม่ดีระหว่างเมทริกซ์ PLA และอนุภาคของผงไม้ อย่างไรก็ตาม การเติมสารคู่ควบเมทิลีนไดฟีนิลไดไอโซไซยานาต (methylene diphenyl diisocyanate) ทำให้ความทนแรงดึงและมอดูลัสของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และ 135 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการยึดเกาะที่ดีระหว่าง PLA และผงไม้ ซึ่งสามารถยืนยันผลจากการตรวจสอบสัญญาณวิทยาของคอมพอสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Chuayjuljit และคณะ [28] ได้ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพ็ทรีไซเคิล (recycled PET) กับ PBAT โดยมีอัตราส่วนของ PBAT ร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนของ PBAT ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จะมีความทนแรงดึงและความเป็นผลึกสูงสุด แต่มีมอดูลัสแรงดึงและเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าเพ็ทรีไซเคิล จากนั้นจึงทำการเตรียมคอมพอสิตระหว่างเพ็ทรีไซเคิลกับ PABT และโพลลาสโตน โดยที่มีอัตราส่วนของโพลลาสโตนร้อยละ 10-40 โดยน้ำหนัก พบว่า การเติมโพลลาสโตนช่วยปรับปรุงสมบัติแรงดึงและเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิต นอกจากนี้ การใส่โพลลาสโตนยังช่วยลดความสามารถในการติดไฟของคอมพอสิตอีกด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบ

1. เม็ดพอลิแล็กติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เกรด 4043D จากบริษัท Nature Works LLC
2. เม็ดพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) เกรด Ecoflex® F Blend C1200 จากบริษัท BASF
3. ผงไม้สน (WF) เกรด Lignocel C120 ขนาดอนุภาค 70-150 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 100-135 กรัม/ลิตร จากบริษัท J. Rettenmaier and Söhne Co.
4. โวลลาสโทไนต์ (WT) เกรด HJ-2000 ขนาดอนุภาค 12 ไมโครเมตร จากบริษัท H&J Mineral Fiber Technology

3.2 เครื่องผสมและเครื่องขึ้นรูปขั้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (twin screw extruder) รุ่น LW-20-32 ของบริษัท LabTech Engineering (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
2. เครื่องฉีดแบบ (injection molding machine) รุ่น Battenfeld BA 250 CDC ขนาด 40 ตัน (ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ฝ่ายพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน)

3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ

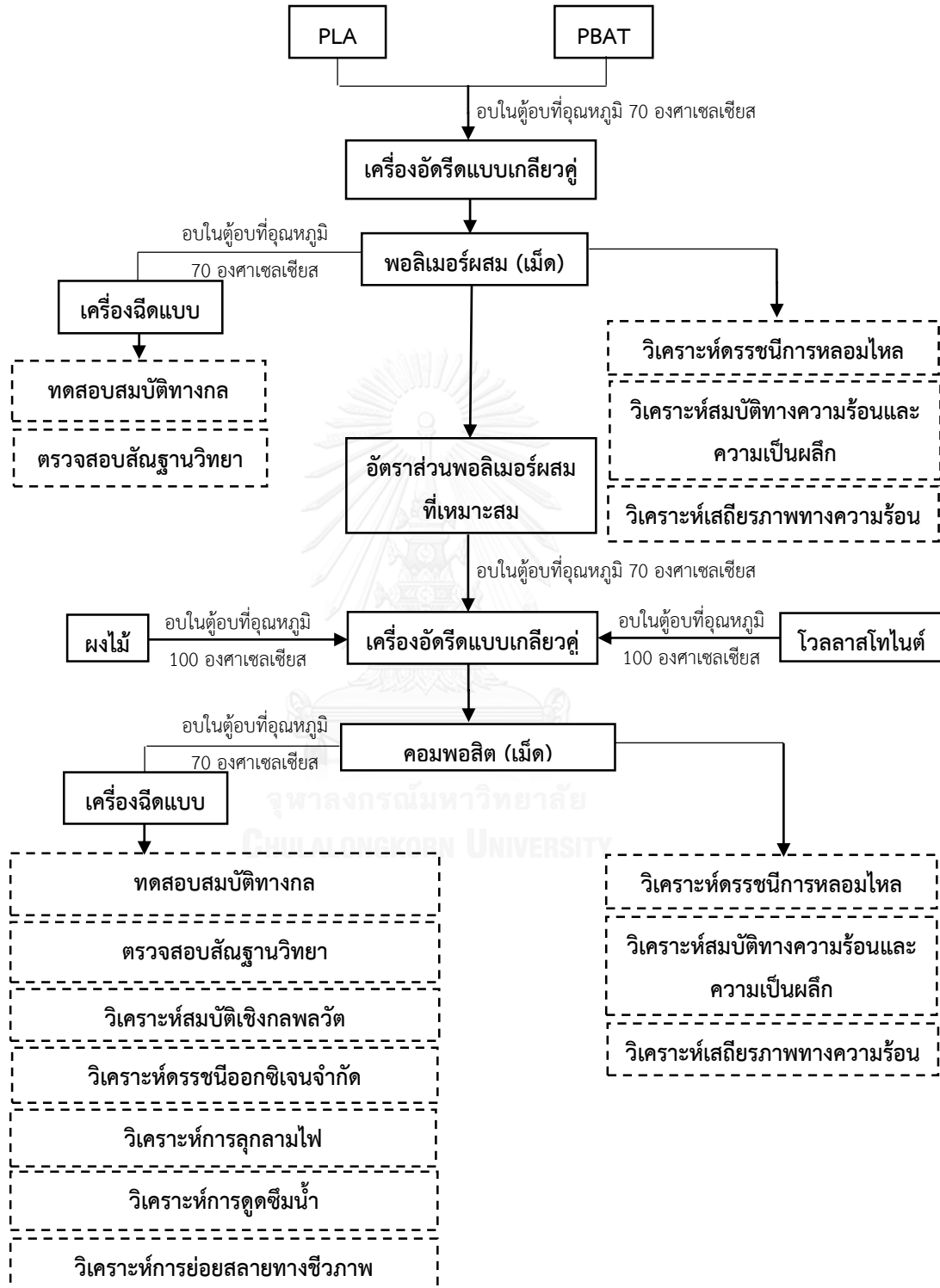
1. เครื่องทดสอบดรรชนีการหลอมไหล (melt flow indexer) รุ่น Kayeness 7053 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine) รุ่น Ceast, Resil Impactor (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
3. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) รุ่น Instron 5500R (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
4. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) รุ่น Mettler Toledo DSC 1 Star System (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

5. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Mettler Toledo TGA/SDTA 851^e (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
6. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analyzer, DMA) รุ่น Netzsch DMA 242 E (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL-JSM 6480 LV (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
8. เครื่องวัดดัชนีออกซิเจนจำกัด (limit oxygen index, LOI) รุ่น Stanton Redcroft (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
9. เครื่องทดสอบการเผาไหม้ รุ่น HVUL 2 UL-94 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

แผนภูมิขั้นตอนการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลอง

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

นำเม็ด PLA และ PBAT มาอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการผสม PLA และ PBAT ตามอัตราส่วนต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รูปที่ 3.2) ภายใต้สภาวะดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ: 160-175 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบสกรูหมุน: 60 รอบ/นาที

ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (L/D): 32

ความเร็วรอบตัด: 11 รอบ/นาที

ระยะที่ตัด: 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม

องค์ประกอบ	1	2	3	4	5	6	7
PLA (wt%)	100	0	90	80	70	60	50
PBAT (wt%)	0	100	10	20	30	40	50



รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่

พอลิเมอร์ผสมที่ได้จะถูกอัดรีดผ่านหัวตาย (die) แล้วถูกตัดเป็นเม็ด (pelletized) ก่อนนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ

3.5.2 การเตรียมคอมพอสิต

นำเม็ด PLA และ PBAT มาอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ส่วนผงไม้และโพลลาสโตนิตนำมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการผสม PLA, PBAT, ผงไม้และโพลลาสโตนิตตามอัตราส่วนต่างๆ ที่แสดงในตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ภายใต้สภาวะดังต่อไปนี้

อุณหภูมิ: 160-175 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบสกรูหมุน: 60 รอบ/นาที

ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (L/D): 32

ความเร็วรอบตัด: 11 รอบ/นาที

ระยะที่ตัด: 3 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของคอมพอสิต

องค์ประกอบ	1	2	3	4	5
PLA (wt%)	70	70	70	70	70
PBAT (wt%)	30	30	30	30	30
ผงไม้ (WF) (phr)	0	10	15	20	30
โพลลาสโตนิต (WT) (phr)	30	20	15	10	0

คอมพอสิตที่ได้จะถูกอัดรีดผ่านหัวตายแล้วตัดเป็นเม็ด ก่อนนำไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ

3.6 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตที่เตรียมได้ในขั้นตอนที่ 3.5.1 และ 3.5.2 ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องฉีดแบบ (รูปที่ 3.3) โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 160-175 องศาเซลเซียส

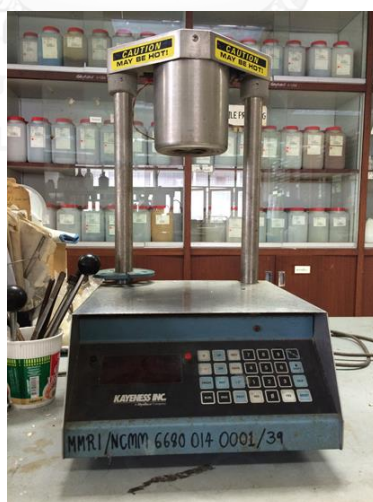


รูปที่ 3.3 เครื่องฉีดแบบ

3.7 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.7.1 วิเคราะห์ดรรชนีการหลอมไหล (MFI)

ทดสอบหาค่าดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต ด้วยเครื่องทดสอบดรรชนีการหลอมไหล (รูปที่ 3.4) โดยใช้สภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ด้วยน้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม จากนั้นคำนวณและบันทึกผลในหน่วย กรัม/10 นาที ตามมาตรฐาน ASTM D1238



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดดรรชนีการหลอมไหล

3.7.2 การทดสอบความทนแรงกระแทก (Impact strength)

ทำการทดสอบหาค่าความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตแบบไอซอด (Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด $63.5 \times 12.7 \times 3.2$ มิลลิเมตร (รูปที่ 3.5) และทำรอยบากเป็นรูปตัววี (V-notch) แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (รูปที่ 3.6) ภายใต้สภาวะการทดสอบดังนี้: น้ำหนักค้อน 1 จูล ทดสอบที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 48



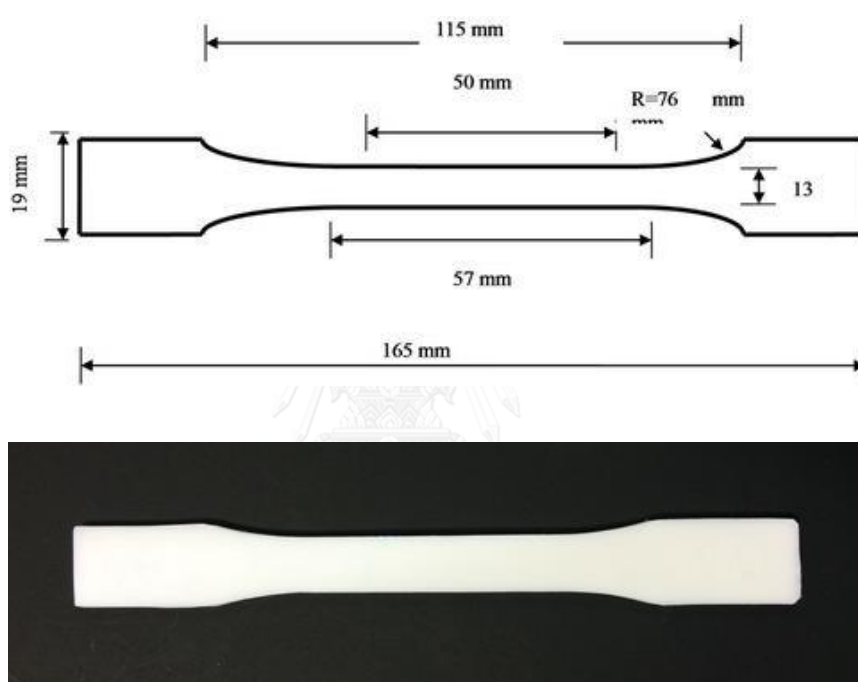
รูปที่ 3.5 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก

3.7.3 การทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)

ทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1 (รูปที่ 3.7) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.8) เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) โดยมีระยะดึง (gauge length) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร ขนาด load cell เท่ากับ 10 กิโลนิวตัน และดึงด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 50 มิลลิเมตร/นาที ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.7 ขนาดของชิ้นทดสอบและชิ้นทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภทที่ 1 [29]



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

3.7.4 การทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้ง (Flexural properties)

ทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตแบบแรงกระทำสามจุด (three-point bending) ตามมาตรฐาน ASTM D790 โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด $127 \times 12.7 \times 3.2$ มิลลิเมตร (รูปที่ 3.9) ด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (รูปที่ 3.8) เพื่อหาค่าความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) โดยมีระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 50 มิลลิเมตร ขนาด load cell เท่ากับ 10 กิโลนิวตัน และดึงด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 1.3 มิลลิเมตร/นาที ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบสมบัติด้านแรงดัดโค้งตามมาตรฐาน ASTM D790

3.7.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (รูปที่ 3.10) โดยใส่เม็ดชิ้นทดสอบประมาณ 3-5 มิลลิกรัม ในจานอะลูมิเนียมแล้วปิดผนึกด้วยฝาอะลูมิเนียมที่เจาะรู แล้วทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนภายใต้สภาวะการทดสอบดังนี้:

- เริ่มต้นการทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 10 นาที
- ลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียส จนถึง -50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 10 นาที
- เพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งจาก -50 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนสามารถทำได้โดยนำเทอร์โมแกรม (thermogram) ที่ได้จากเทคนิค DSC ไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) เอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization enthalpy, ΔH_{cc}) อุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}) โดยคำนวณหาระดับการเกิดผลึก (degree of crystallization, X_c) ได้จากสมการที่ 3.1 [30]

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m - \Delta H_{cc}}{w \times \Delta H_m^0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย ΔH_m คือ เอนทัลปีการหลอมเหลว

ΔH_{cc} คือ เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น

ΔH_m^0 คือ เอนทัลปีการหลอมเหลวของพอลิเล็กทิกแอซิดที่เกิดผลึก 100% = 93.7 J/g [3]

w คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเล็กทิกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต



รูปที่ 3.10 เครื่องตักฟอเรนเซียสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์

3.7.6 การวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (TGA)

วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (รูปที่ 3.11) โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียส/นาที่ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยเทอร์โมแกรมที่ได้แสดงน้ำหนักที่สูญหายไป (weight loss) เมื่อเมื่อดำเนินการทดสอบได้รับความร้อน รวมทั้งปริมาณเถ้า (char) ที่เหลือ



รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

3.7.7 การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (DMA)

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตของพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (รูปที่ 3.12) โดยใช้โหมตคานยื่นเดี่ยว (single cantilever) ชิ้นทดสอบมีขนาด $40 \times 10 \times 3$ มิลลิเมตร (รูปที่ 3.13) สภาวะที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในช่วง -60 ถึง 100 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อนที่ 2 องศาเซลเซียส/นาที ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 3.12 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต [31]



รูปที่ 3.13 ชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต

3.7.8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

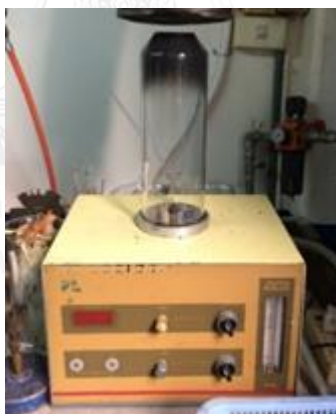
ตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบจากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.14) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า กำลังไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ โดยทำการเคลือบทองบริเวณพื้นผิวรอยแตกหักก่อนทำการตรวจสอบ



รูปที่ 3.14 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.7.9 วิเคราะห์อัตราชึ้นออกซิเจนจำกัด (LOI)

วิเคราะห์หาปริมาณออกซิเจนในบรรยากาศที่น้อยที่สุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบเกิดการติดไฟ ด้วยเครื่องวัดอัตราชึ้นออกซิเจนจำกัด (รูปที่ 3.15) ตามมาตรฐาน ASTM D2863 โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด $100 \times 6.5 \times 3$ มิลลิเมตร (รูปที่ 3.16)



รูปที่ 3.15 เครื่องวัดอัตราชึ้นออกซิเจนจำกัด



รูปที่ 3.16 ชิ้นทดสอบหาอัตราชึ้นออกซิเจนจำกัดตามมาตรฐาน ASTM D2863

3.7.10 การทดสอบการลุกลามไฟ (Flammability test)

การทดสอบการลุกลามไฟเป็นไปตามมาตรฐาน UL-94 โดยใช้ชิ้นทดสอบขนาด $130 \times 13 \times 3$ มิลลิเมตร (รูปที่ 3.17) ด้วยเครื่องทดสอบการเผาไหม้ (รูปที่ 3.18) โดยจับยึดชิ้นงานในแนวตั้ง แล้วลนไฟเป็นเวลา 10 วินาที โดยใช้ความสูงของเปลวไฟ 20 มิลลิเมตร หลังจากนั้นรอให้ชิ้นทดสอบถูกเผาจนถึงระยะอ้างอิงที่ 1 แล้วจับเวลาจนกว่าชิ้นทดสอบจะถูกเผาจนถึงระยะอ้างอิงที่ 2 ตามรูปที่ 3.17 โดยปล่อยให้ส่วนที่เกิดการเผาไหม้หยดลงบนสำลีที่รองไว้ด้านล่าง จากนั้นทำการหาอัตราการลามไฟที่เกิดขึ้นในช่วง 100 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.17 ชิ้นทดสอบการลุกลามไฟ



รูปที่ 3.18 เครื่องทดสอบการเผาไหม้

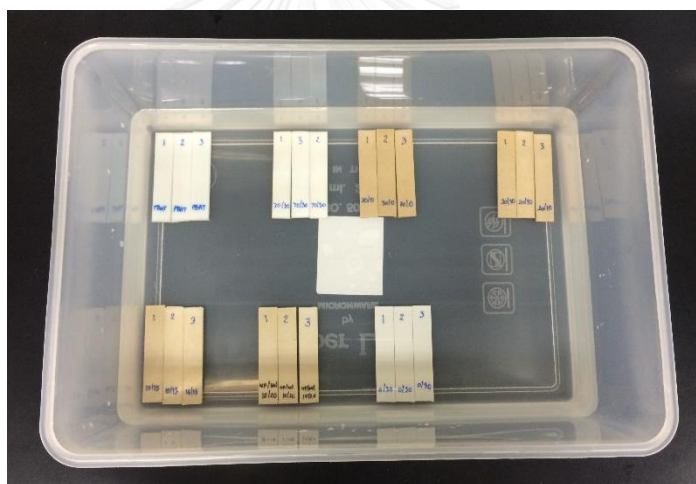
3.7.11 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

นำชิ้นทดสอบขนาด $63.5 \times 12.7 \times 3.2$ มิลลิเมตร (รูปที่ 3.19) ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในตู้อบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้น (W_0) จากนั้นนำชิ้นทดสอบไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง หลังจากแช่น้ำแล้วชิ้นทดสอบจะถูกนำออกมาชั่งน้ำหนักทุกวันในช่วง 7 วันแรก และชั่งต่อไปอีกทุกๆ 2 สัปดาห์ ทำการบันทึกค่าน้ำหนักหลังจากแช่น้ำ แล้วนำค่าน้ำหนักที่บันทึกได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำตามสมการที่ 3.2 [30]

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.2)$$

โดย W_0 คือ น้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ

W_1 คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังจากนำไปแช่น้ำ



รูปที่ 3.19 ชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ

3.7.12 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

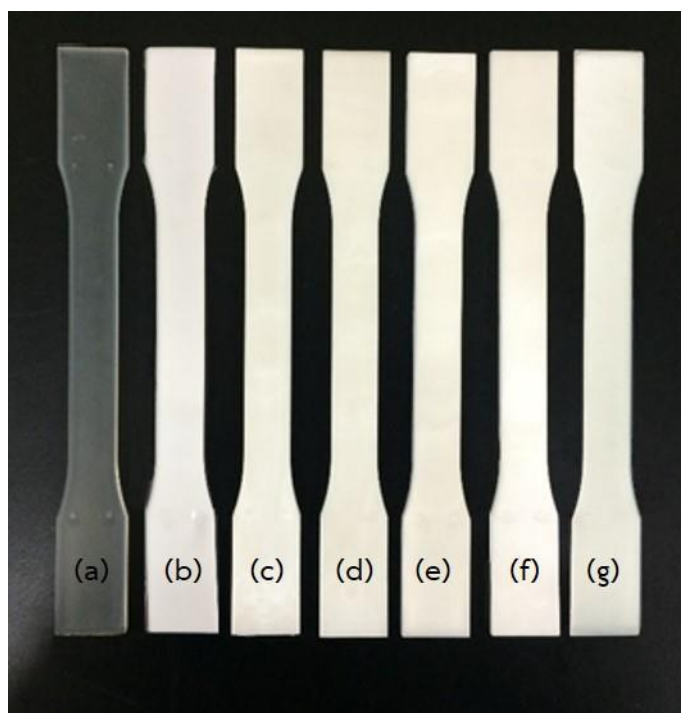
ทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยนำชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (รูปที่ 3.7) ไปฝังดินที่ความลึก 20 เซนติเมตร เป็นเวลา 120 วัน ทำการเก็บชิ้นทดสอบทุกๆ 30 วัน แล้วนำมาล้างน้ำ เช็ดให้แห้ง และอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อนำมาทดสอบสมบัติด้านแรงดึงและตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของชิ้นทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

บทที่ 4

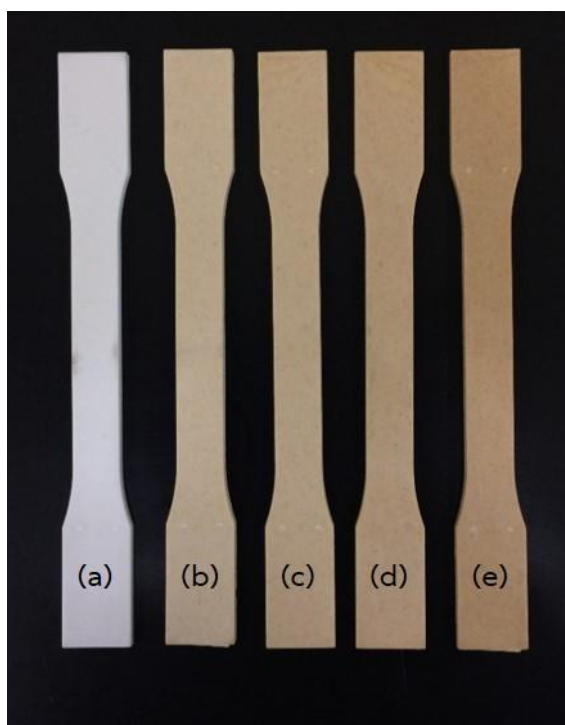
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะชิ้นทดสอบ

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงลักษณะของชิ้นทดสอบของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 wt%/wt%) และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตจากสารตัวเติมผสมผงไม้ (WF) และโพลลาสโทไนต์ (WT) ด้วยปริมาณรวมเท่ากับ 30 phr ที่มีอัตราส่วน WF/WT ต่างๆ (0/30, 10/20, 15/15, 20/10 และ 30/0) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดแบบ



รูปที่ 4.1 ชิ้นทดสอบของ (a) PLA, (b) PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน (c) 90/10, (d) 80/20, (e) 70/30, (f) 60/40 และ (g) 50/50



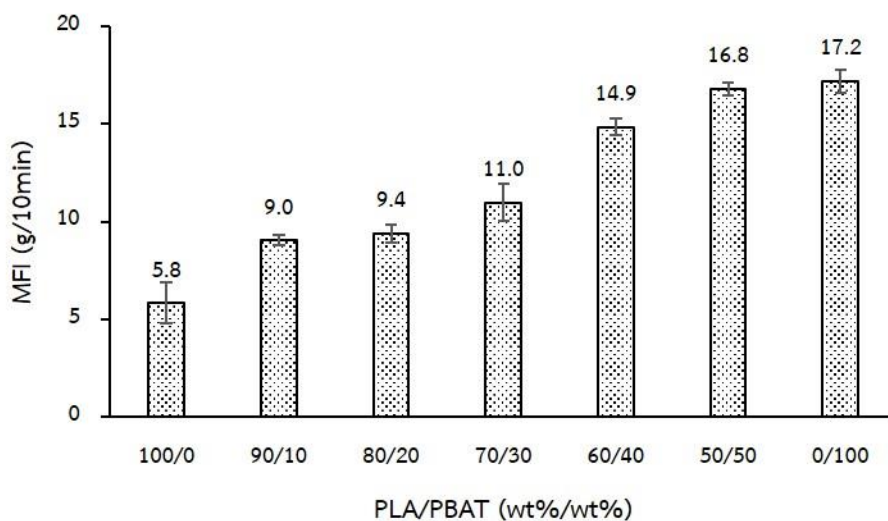
รูปที่ 4.2 ชิ้นทดสอบของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอลิเมอร์ ในอัตราส่วน WF/WT:

(a) 0/30, (b) 10/20, (c) 15/15, (d) 20/10 และ (e) 30/0

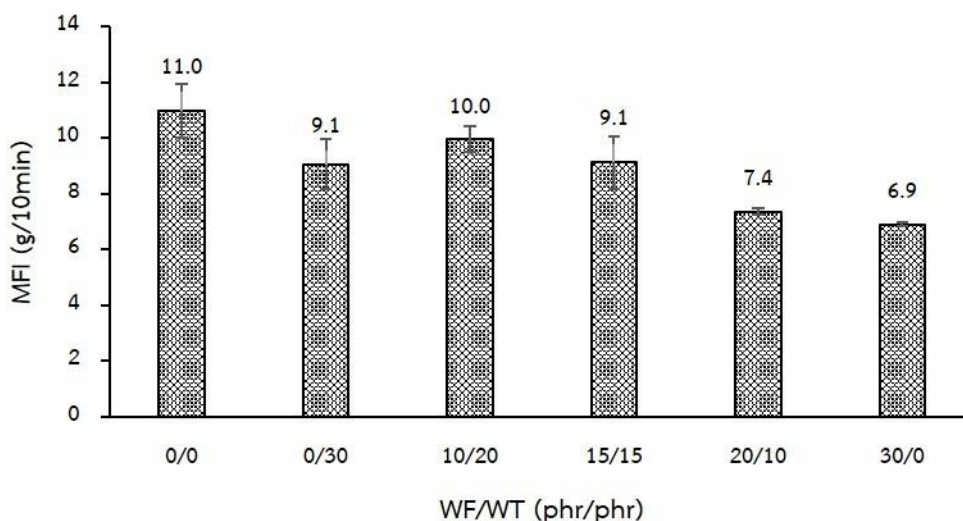
จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า ชิ้นทดสอบ PLA (รูปที่ 4.1(a)) มีลักษณะใส โปร่งแสง และมีความแข็งแรง ขณะที่ชิ้นทดสอบ PBAT (รูปที่ 4.1(b)) มีสีขาวขุ่น ทึบแสง ยืดหยุ่นและสามารถโค้งงอได้ซึ่งเมื่อผสม PLA กับ PBAT พบว่า ชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT (รูปที่ 4.1(c-g)) มีสีขาวออกเหลืองและทึบแสง เมื่อเพิ่มองค์ประกอบของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม พบว่า ชิ้นทดสอบสามารถโค้งงอได้ และเมื่อนำพอลิเมอร์ผสมตามอัตราส่วนที่เลือกไว้ 70/30 PLA/PBAT ไปผสมกับสารตัวเติมผสมระหว่าง WF และ WT ปริมาณรวม 30 phr ด้วย WF/WT ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า คอมพอลิเมอร์มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นสำหรับคอมพอลิเมอร์ที่เติม WF ล้วน (0/30WF/WT) พบว่า มีสีขาวออกเทา (รูปที่ 4.2(a)) และมีเฉดสีน้ำตาลคล้ำไม่เข้มขึ้นตามปริมาณของ WF ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.2(b-e))

4.2 ดรรชนีการหลอมไหล (MFI)

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลการทดสอบหาดรรชนีการหลอมไหลตามมาตรฐาน ASTM D1238 เมื่อใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม และอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอลิเมอร์



รูปที่ 4.3 ดรรชนีการหลอมไหลของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT



รูปที่ 4.4 ดรรชนีการหลอมไหลของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

จากรูปที่ 4.3 พบว่า ดรรชนีการหลอมไหลของ PLA และ PBAT มีค่าเท่ากับ 5.8 และ 17.2 กรัม/10 นาที ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่า PBAT สามารถไหลได้ง่ายกว่า PLA ดังนั้น การผสม PBAT ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงและไหลง่ายกับ PLA มีผลทำให้ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และมีค่าอยู่ในช่วง 9.0–16.8 กรัม/10 นาที เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีความหนืดลดลง โดย PBAT ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ PLA อาจทำหน้าที่คล้ายกับเป็นพอลิเมอร์พลาสติกไซเซอร์ (polymeric plasticizer) ช่วยให้พอลิเมอร์ผสมสามารถไหลได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ พบว่า คอมพอสิตของ 70/30 PLA/PBAT ด้วย WF และ/หรือ WT มีดรรชนีการหลอมไหลต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT เนื่องจากคอมพอสิตมีความหนืดเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.4) ซึ่ง

เกิดจากอนุภาคของ WF และ WT ขัดขวางการเคลื่อนไหวยของสายโซ่พอลิเมอร์ในคอมพอสิต จึงทำให้ดรชนีการหลอมไหลของคอมพอสิตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT โดยไฮบริดคอมพอสิตมีดรชนีการหลอมไหลลดลงตามปริมาณ WF ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก WF มีอนุภาคนขนาดใหญ่และพื้นผิวที่ขรุขระของ WF ขัดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ได้มากกว่าอนุภาคนขนาดเล็กของ WT ทำให้คอมพอสิตมีความหนืดมากขึ้นตามปริมาณ WF ที่เพิ่มขึ้น

4.3 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต ในเทอมของความทนแรงกระแทก (impact strength, IS), ความทนแรงดึง (tensile strength, TS), ยังส์มอดุลัส (Young's modulus, E), การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB), ความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength, FS) และมอดุลัสการดัดโค้ง (flexural modulus, FM) ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.1

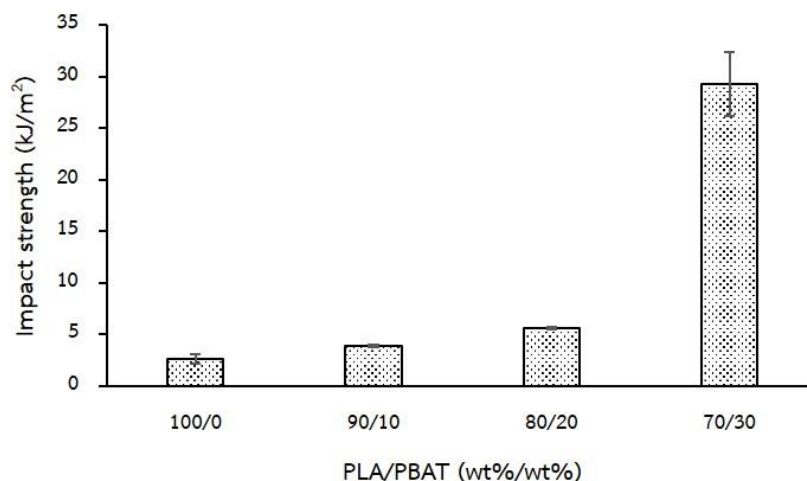
ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
PLA	2.7±0.4	67.3±1.4	2912±54.3	4.1±0.5	100.5±2.0	3634±82.6
PBAT	N/B*	15.8±0.1	83±2.7	N/B*	4.3±0.1	95±1.8
PLA/PBAT (wt%/wt%)						
90/10	3.9±0.2	64.1±0.6	2573±46.8	3.8±0.2	89.6±3.3	3274±171.7
80/20	5.6±0.1	54.6±0.8	2268±57.7	10.5±1.4	77.3±2.1	2820±77.6
70/30	29.3±3.1	43.3±1.5	1962±80.6	21.0±6.1	59.7±1.4	2234±65.9
60/40	N/B*	32.2±0.7	1562±32.5	N/B*	45.6±0.8	1657±35.7
50/50	N/B*	23.9±0.8	1130±51.8	46.6±7.4	34.8±1.5	1197±47.4
PLA/PBAT/WF/WT (wt%/wt%/phr/phr)						
70/30/0/30	5.1±0.4	37.0±0.4	2932±245.1	11.2±0.8	63.0±0.8	4257±99.9
70/30/10/20	4.1±0.1	40.1±0.6	2950±106.5	3.3±0.3	63.8±1.1	4166±100.4
70/30/15/15	4.0±0.1	40.0±0.5	3107±81.5	3.5±0.3	61.5±0.3	3950±60.8
70/30/20/10	3.8±0.1	39.7±0.2	2957±62.6	3.2±0.3	62.6±0.7	3929±121.0
70/30/30/0	4.0±0.1	43.5±0.7	3067±89.2	3.2±0.2	65.2±1.1	4023±113.3

*หมายเหตุ: ขึ้นทดสอบไม่เกิดการแตกหัก

4.3.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

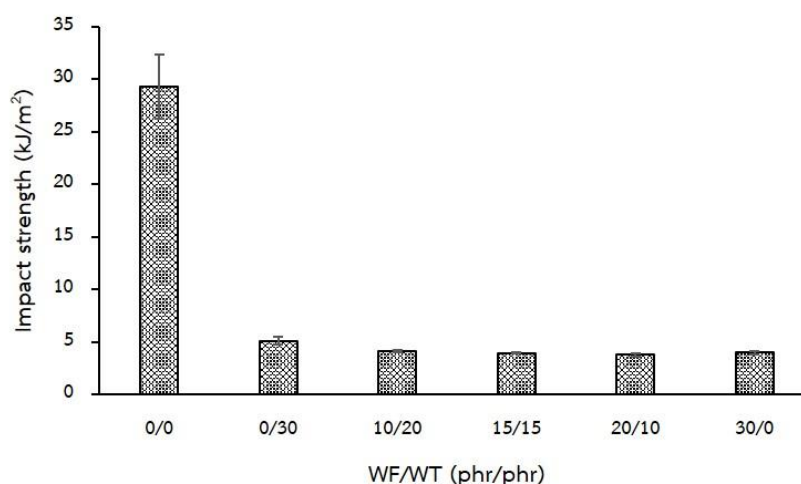
รูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงความทนแรงกระแทกของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต



รูปที่ 4.5 ความทนแรงกระแทกของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 พบว่า PLA มีค่าความทนแรงกระแทกที่ต่ำมาก (2.7 kJ/m^2) ซึ่งเป็นคุณลักษณะของพลาสติกที่แข็งเปราะ เนื่องจาก PLA มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ค่อนข้างสูง (ประมาณ 60 องศาเซลเซียส) ในขณะที่ขึ้นทดสอบ PBAT ไม่สามารถหาความทนแรงกระแทกภายใต้ภาวะการทดสอบนี้ เนื่องจากขึ้นทดสอบไม่เกิดการแตกหัก ซึ่งแสดงถึงสมบัติของพลาสติกที่เหนียว เนื่องจาก PBAT มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วต่ำ (ประมาณ -30 องศาเซลเซียส) และเมื่อใส่ PBAT ใน PLA พบว่า พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีความทนแรงกระแทกสูงขึ้นตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มเป็น 30 wt% พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก 2.7 kJ/m^2 เป็น 29.3 kJ/m^2 และเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มเป็น 40 และ 50 wt% พบว่า ไม่สามารถทำให้ขึ้นทดสอบเกิดการแตกหักได้เช่นเดียวกับ PBAT แสดงให้เห็นว่าการเติม PBAT ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงลงใน PLA สามารถช่วยปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ได้ อย่างไรก็ตาม ขึ้นทดสอบพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เกิดการแตกหัก เมื่อเติม PBAT ในปริมาณมาก (40 และ 50 wt%) อาจเนื่องจากเกิดการกลับเฟส (phase reversion) ระหว่าง PLA และ PBAT ทำให้ PLA เปลี่ยนเป็นเฟสกระจาย (dispersed phase) และ PBAT เปลี่ยนเป็นเมทริกซ์ (matrix)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 70/30 (wt%/wt%) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุด นำไปเตรียมเป็นคอมพอสิตกับ WF และ/หรือ WT ปริมาณทั้งหมด 30 phr โดยมีอัตราส่วนของ WF/WT เป็น 0/30, 10/20, 15/15, 20/10 และ 30/0

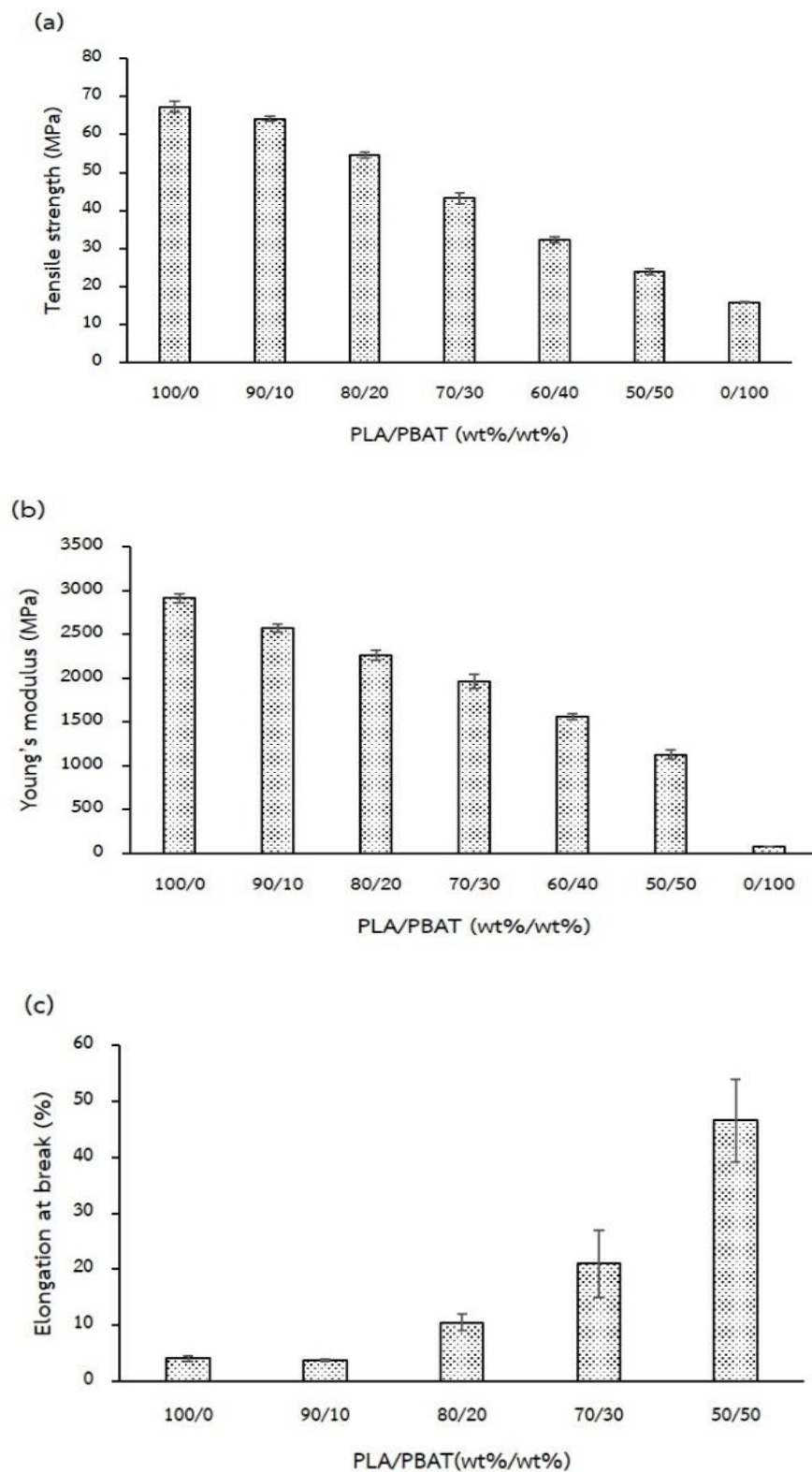


รูปที่ 4.6 ความทนแรงกระแทกของของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 พบว่า ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT เนื่องจากอนุภาคของสารตัวเติม WF และ WT มีความแข็งตึง (stiffness) สูง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีค่าลดลง หากแต่ยังมีค่าสูงกว่า PLA ล้วน นอกจากนี้ พบว่า คอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติม WT เพียงอย่างเดียว (WF/WT 0/30) มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุดคือ 5.1 kJ/m² ขณะที่เมื่อเติม WF ในคอมพอสิตส่งผลให้ความทนแรงกระแทกลดลง และมีค่าอยู่ในช่วง 3.8-4.1 kJ/m² ทั้งนี้ เนื่องจากสารตัวเติม WT มีอนุภาคขนาดเล็ก จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับพอลิเมอร์เมทริกซ์สูงกว่า WF ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ จึงเกิดการส่งผ่านแรง (stress transfer) ระหว่างเมทริกซ์กับ WT ได้ดีกว่า WF

4.3.2 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)

รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงสมบัติด้านแรงดึง (ความทนแรงดึง ย้ำสมอดุลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต



รูปที่ 4.7 สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส (c) การยืดตัว ณ จุดขาด
ของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7(a) พบว่า ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PLA ล้วน (67.3 MPa) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น (ลดลง 4.8% ที่ปริมาณ PBAT 10 wt% ถึง 64.5% ที่ปริมาณ PBAT 50 wt%) เนื่องจากความทนแรงดึงที่ต่ำของ PBAT (15.8 MPa)

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7(b) พบว่า ยังสัมมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่า PLA ล้วน (2912 MPa) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น (ลดลง 11.6% ที่ปริมาณ PBAT 10 wt% ถึง 61.2% ที่ปริมาณ PBAT 50 wt%) เนื่องจากยังสัมมอดูลัสที่ต่ำของ PBAT (8.8 MPa) นำไปสู่การลดความแข็งดึงของพอลิเมอร์ผสม

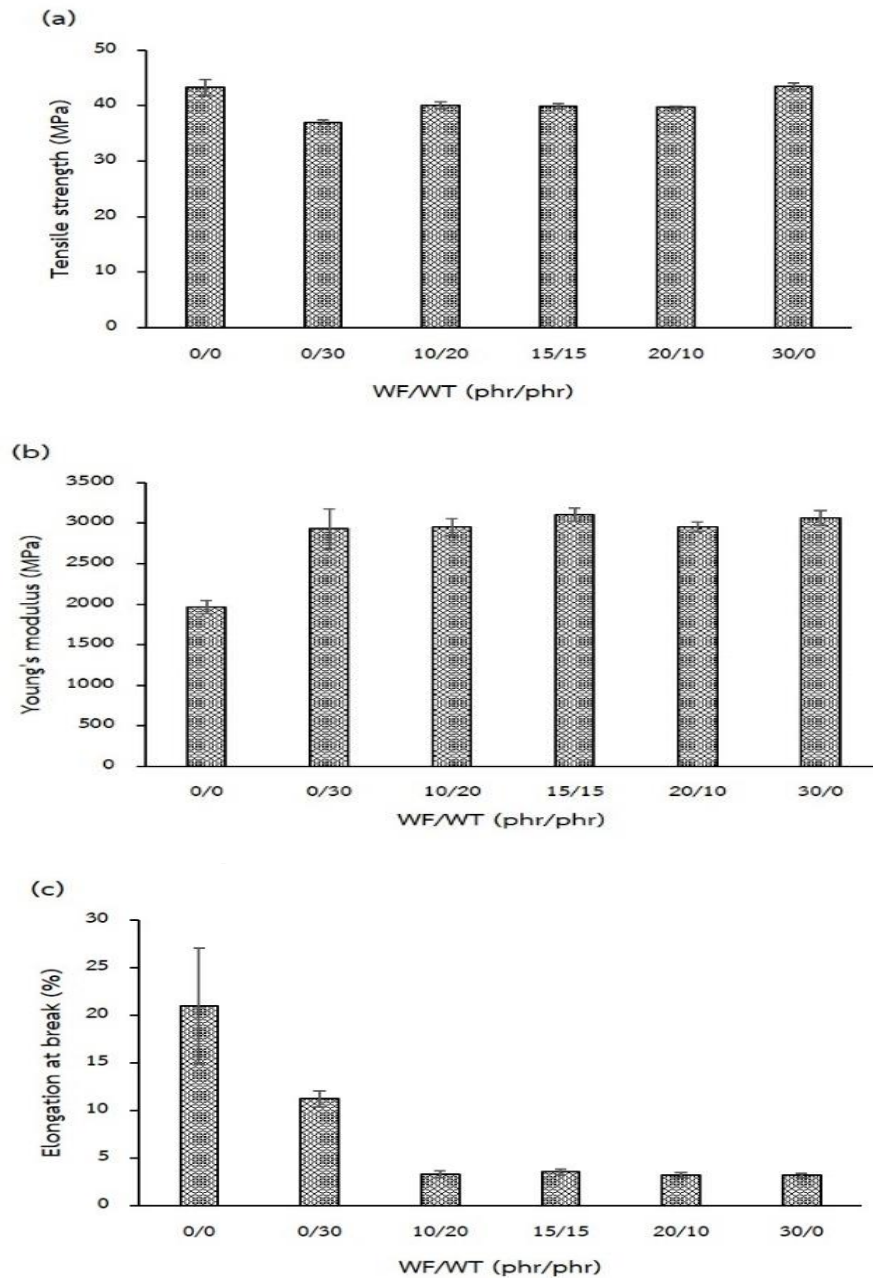
จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7(c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และมีค่ามากที่สุดที่ปริมาณ PBAT 30 wt% (เพิ่มขึ้น 80.5% ที่ปริมาณ PBAT 30 wt%) จากนั้นเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้นเป็น 40 wt% พบว่า ไม่สามารถหาค่าการยืดตัว ณ จุดขาดได้ เนื่องจากชิ้นทดสอบไม่ขาดภายใต้ภาวะการทดสอบนี้ อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ PBAT เป็น 50 wt% พบว่า ชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน และมีการยืดตัว ณ จุดขาดประมาณ 46.6%

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8(a) พบว่า ความทนแรงดึงของคอมพอสิตมีค่าลดลงจากพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT (43.3 MPa) เมื่อใส่สารตัวเติม WT และลดลงมากที่สุดที่ปริมาณ WT 30 phr (37 MPa) หากแต่เมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนของ WF เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความทนแรงดึงของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น และเพิ่มมากที่สุดที่ปริมาณ WF 30 phr (43.5 MPa) ทั้งนี้เนื่องจาก WT เป็นสารอินทรีย์ที่มีความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ดีเท่ากับ WF ที่เป็นสารตัวเติมอินทรีย์ จึงทำให้เกิดการส่งผ่านแรงได้ไม่ดี นอกจากนี้ลักษณะพื้นผิวที่มีขรุขระของ WF ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของ WF กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่า WT

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8(b) พบว่า ยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT (1962 MPa) เนื่องจากความแข็งดึงของสารตัวเติม WF และ WT ขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตได้รับการปรับปรุงสูงสุดเมื่อเติม WF และ WT อัตราส่วน 15/15 (3107 MPa)

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.8(c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT (21%) และลดลงมากที่สุดที่อัตราส่วน WF/WT 20/10 และ 30/0 (3.2%) เนื่องจากสารตัวเติม WF และ WT มีความแข็งดึงสูง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ อีกทั้งมีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ต่ำ อย่างไรก็ตาม

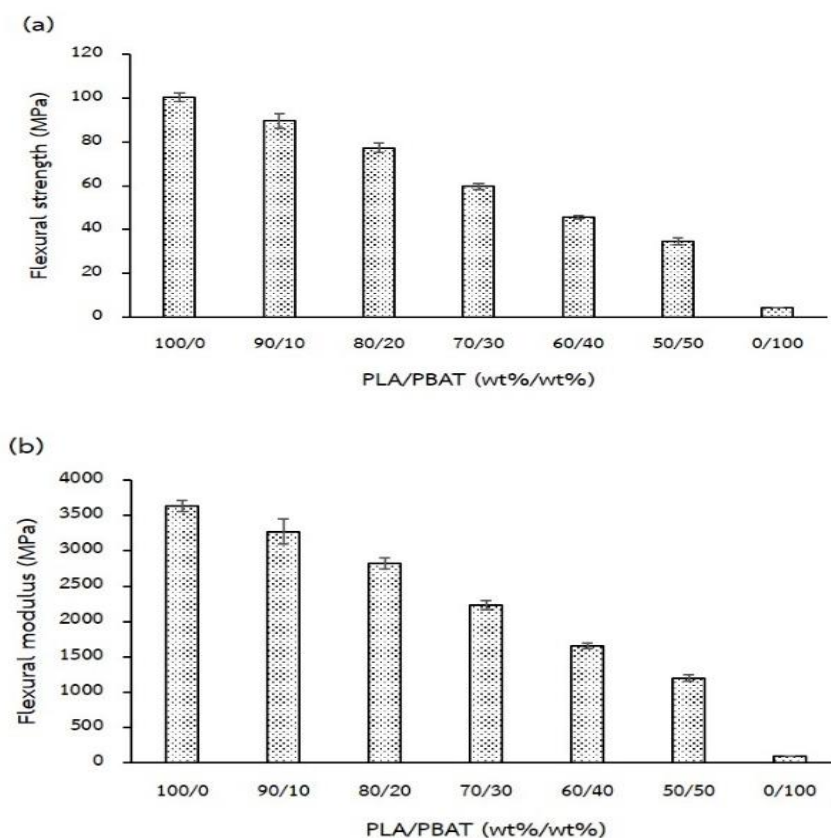
การเติม WT ที่ปริมาณ 30 phr ทำให้มีการยืดตัว ณ จุดขาดมากที่สุด (11.2%) ทั้งนี้อาจเนื่องจากช่องว่างระหว่างสารตัวเติม WT กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เกิดจากความไม่เข้ากัน ทำให้เพิ่ม free volume ซึ่งส่งผลให้คอมพอสิตยังมีการยืดตัว ณ จุดขาดที่ค่อนข้างสูง



รูปที่ 4.8 สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัสและ (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

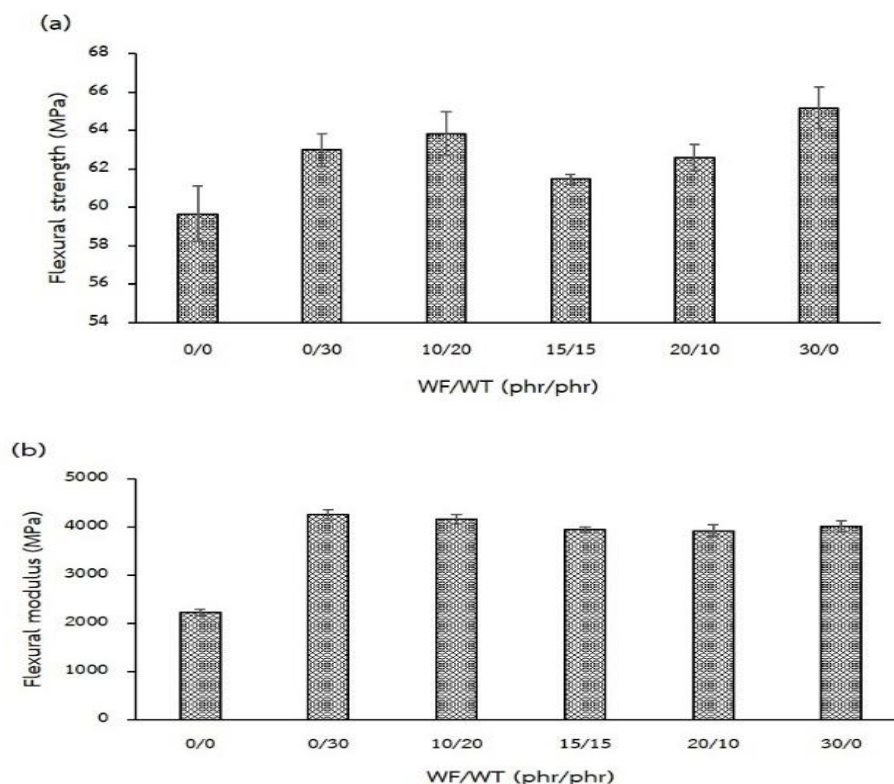
4.3.3 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง (Flexural properties)

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงสมบัติด้านแรงดัดโค้งของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต



รูปที่ 4.9 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง (b) มอดุลัสการดัดโค้ง ของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.9 พบว่า ความทนแรงดัดโค้ง (รูปที่ 4.9(a)) และมอดุลัสการดัดโค้ง (รูปที่ 4.9(b)) ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ปริมาณ PBAT 10-50 wt% มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ เนื่องจาก PLA มีความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสการดัดโค้งเท่ากับ 100.5 MPa และ 3634 MPa ตามลำดับ ขณะที่ PBAT มีค่าความทนแรงดัดโค้งและมอดุลัสการดัดโค้งเพียง 4.3 MPa และ 95 MPa ตามลำดับ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้พอลิเมอร์ผสมสามารถดัดโค้งได้ง่าย เมื่อเติม PBAT ที่มีความอ่อนนิ่มกว่าเข้าไปใน PLA ที่มีความแข็ง ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการทดสอบยังส์มอดุลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด ในการทดสอบความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทกที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.10 สมบัติด้านแรงดัดโค้ง: (a) ความทนแรงดัดโค้ง (b) โมดูลัสการดัดโค้ง
ของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.10(a) พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT (59.7 MPa) และสูงสุดเมื่อเติม WF ในปริมาณ 30 phr (65.2 MPa) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติม WT ที่ปริมาณ 10 และ 15 phr (ลดลง 4% ที่ปริมาณ WT 10 phr และ 5.7% ที่ปริมาณ WT 15 phr) ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งดิ่งของสารตัวเติม WF และ WT นอกจากนี้ WF มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่า WT จึงส่งผลให้เกิดการส่งผ่านแรงระหว่าง WF กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่า WT จึงมีความทนแรงดัดโค้งที่ดีกว่า หากแต่การเติม WT ที่ปริมาณ 20 และ 30 phr กลับทำให้ความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ (63.8 MPa และ 63.0 MPa ตามลำดับ)

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.10(b) พบว่า โมดูลัสการดัดโค้งของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT (2234 MPa) เนื่องจากการใส่สารตัวเติม WF และ WT มีความแข็งดิ่งสูง จึงเพิ่มความแข็งดิ่งให้กับคอมพอสิต ส่งผลให้คอมพอสิตมีความทนต่อการเสียรูปเมื่อถูกดัดโค้งสูงขึ้น

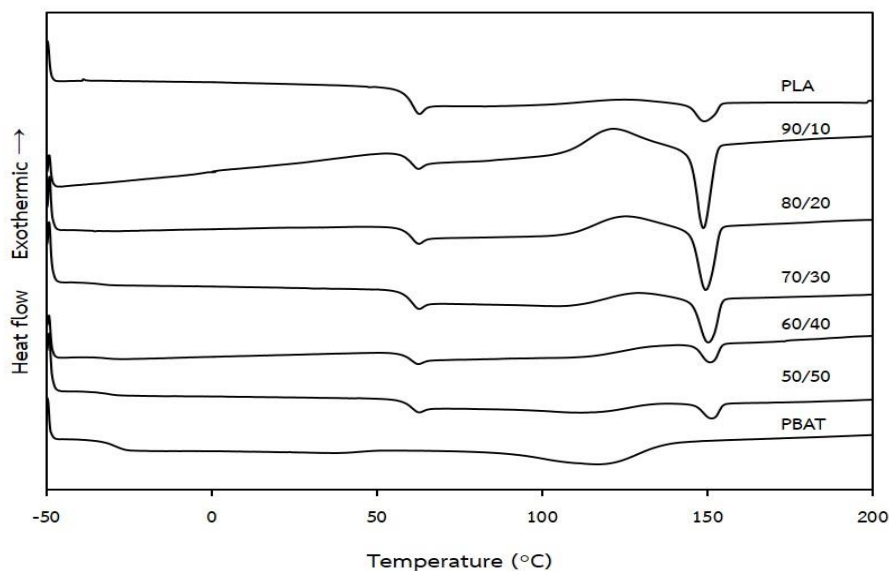
4.4 พฤติกรรมการเกิดผลึก

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดผลึกของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต ด้วยเทคนิค DSC ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัว (cooling scan) และอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}), อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m), เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization enthalpy, ΔH_{cc}) และเอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) ที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สอง (second heating scan) จากนั้นคำนวณหาระดับความเป็นผลึก (degree of crystallinity, X_c) จากสมการที่ 3.1 ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการให้ความร้อน/เย็นเท่ากับ 10 องศาเซลเซียส/นาที

ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมการเกิดผลึกของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

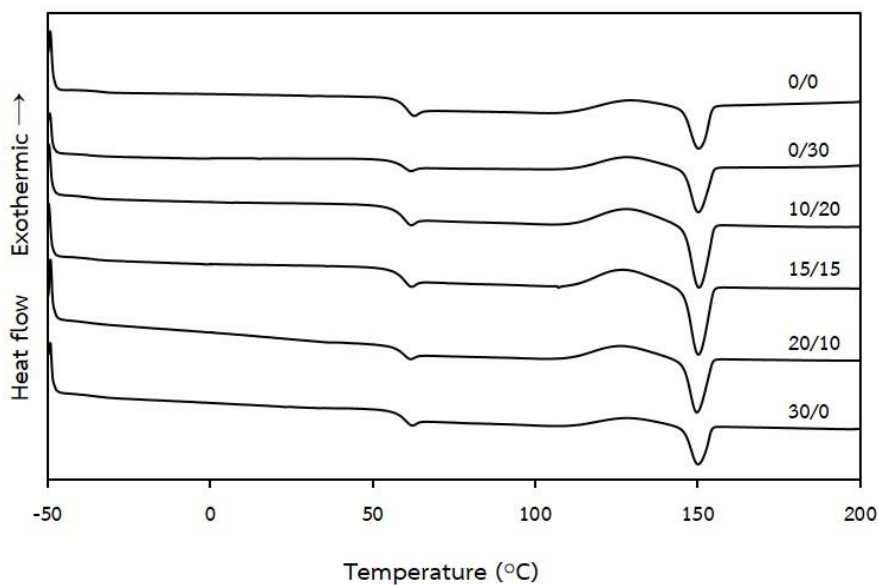
Sample	PBAT					PLA				
	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	T_g (°C)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)
PLA	-	-	-	-	-	59.4	123.3	1.4	149.0	2.7
PBAT	37.9	19.2	-30.0	118.0	16.0	-	-	-	-	-
PLA/PBAT (wt%/wt%)										
90/10	26.0	1.6	-	-	-	59.6	121.0	15.4	148.8	15.8
80/20	28.9	1.7	-	-	-	59.7	124.7	9.7	149.5	10.5
70/30	43.2	1.5	-31.5	-	-	59.6	128.5	4.8	150.1	5.3
60/40	56.0	6.5	-31.8	-	-	59.8	132.8	2.2	151.0	3.0
50/50	56.2	8.9	-30.7	112.3	1.9	59.8	136.6	1.3	151.5	1.7
PLA/PBAT/WF/WT (wt%/wt%/phr/phr)										
70/30/0/30	86.5	2.1	-	-	-	59.5	128.0	7.0	150.1	8.3
70/30/10/20	84.2	2.4	-	-	-	59.3	128.0	6.4	150.2	8.6
70/30/15/15	84.6	1.8	-	-	-	59.4	127.0	7.4	150.1	9.0
70/30/20/10	84.0	2.0	-	-	-	59.4	126.6	7.2	149.6	8.1
70/30/30/0	82.0	2.4	-	-	-	59.6	128.1	4.1	149.9	5.2

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต ในขั้นตอนให้ความร้อนครั้งที่ 2



รูปที่ 4.11 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

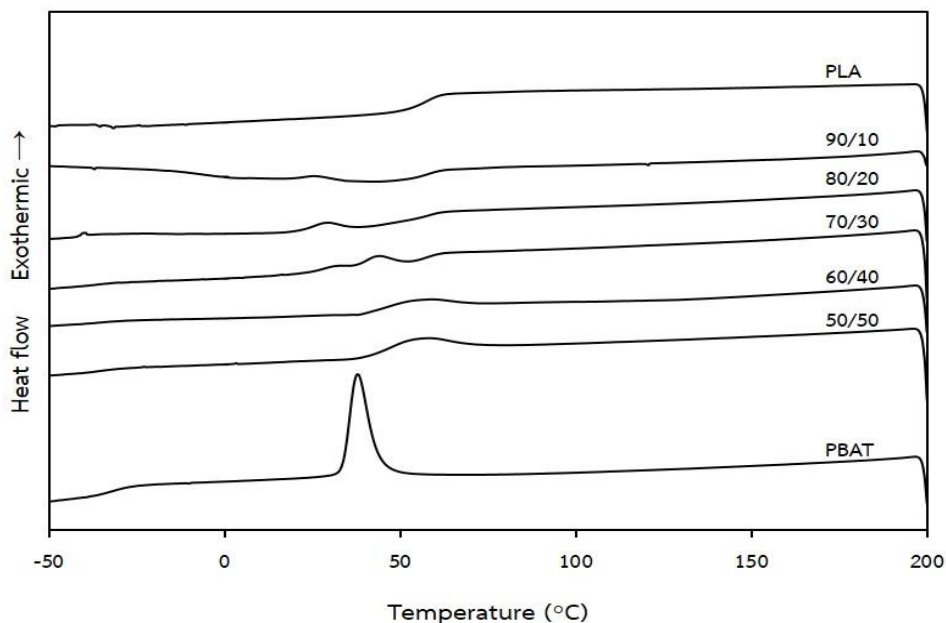
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.11 พบว่า PLA มี T_g และ T_m ที่ 59.4 และ 149 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ PBAT มี T_g และ T_m ที่ -30 และ 118.3 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อผสม PBAT กับ PLA พบว่า T_g ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ T_m ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่า PLA และ PBAT มีความไม่เข้ากัน (immiscible) ในพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม ไม่พบ T_g ของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมที่ใส่ PBAT ปริมาณ 10 และ 20 wt% เนื่องจากมีปริมาณน้อย แต่เมื่อปริมาณ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเป็น 30, 40 และ 50 wt% พบ T_g ของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมที่ประมาณ -31.8 ถึง -30.7 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่เปลี่ยนแปลงไปจาก PBAT มากนัก และไม่พบ T_m ของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม อาจเนื่องจากถูกบดบังโดยพีกของ T_{cc} ยกเว้นที่ปริมาณ PBAT 50 wt% พบ T_m ของ PBAT ที่ประมาณ 111.6 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ เมื่อพิจารณา T_{cc} พบว่า PLA มี T_{cc} เท่ากับ 123.3 องศาเซลเซียส และในพอลิเมอร์ผสม T_{cc} จะลดลงในช่วงแรกที่มีปริมาณ PBAT เป็น 10 wt% และจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติม PBAT ลงใน PLA ทำให้ PLA ในพอลิเมอร์ผสมเกิดผลึกในขณะหลอมเหลวได้ช้าลง เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิในการเกิดผลึกที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.12 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองของ
70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

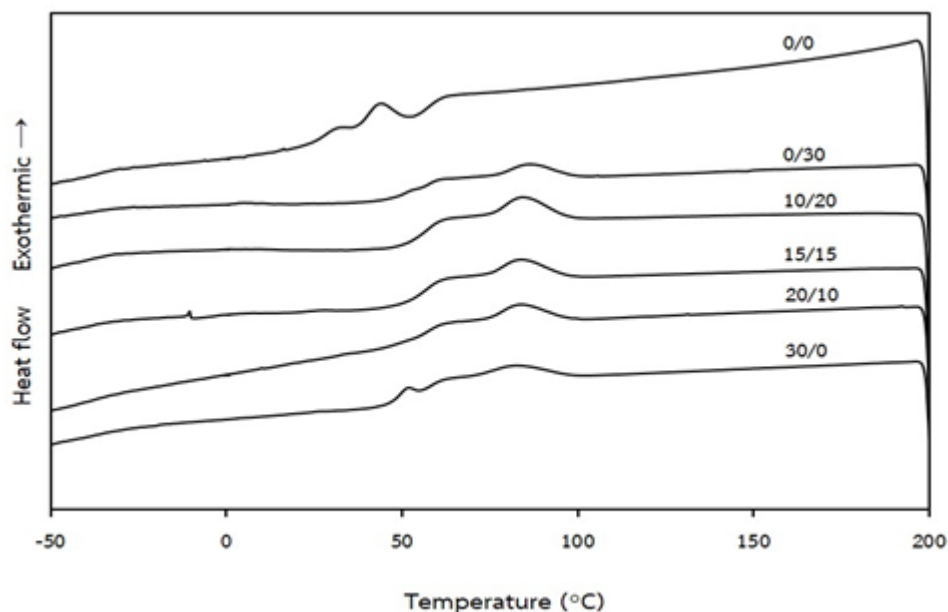
จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.12 พบว่า T_g และ T_m ของ PLA ในคอมพอสิตเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญไปจากพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT ขณะที่ T_{cc} ของ PLA ในคอมพอสิตอยู่ในช่วง 126.6–128.3 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT ซึ่งมี T_{cc} อยู่ที่ 128.5 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า PLA ในคอมพอสิตสามารถเกิดผลึกในขณะที่หลอมเหลวได้เร็วขึ้น

รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต ในขั้นตอนการเย็นตัวละแสดงค่าไว้ในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.13 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.13 แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวพบว่า PBAT มี T_c ที่ 37.9 องศาเซลเซียส แต่ไม่ปรากฏ T_c ของ PLA เนื่องจากอัตราการเกิดผลึกของ PLA ช้ามาก อีกทั้งการให้อัตราเร็วในการเย็นตัวค่อนข้างสูง (10 องศาเซลเซียส/นาท) จึงทำให้โมเลกุลของ PLA มีเวลาไม่มากพอที่จะจัดเรียงตัวเป็นผลึก นอกจากนี้ยังพบว่า T_c ของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณ PBAT 10 และ 20 wt% เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของ PLA ไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อปริมาณ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเป็น 30-50 wt% พบว่า T_c ของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ไปจัดเรียงตัวได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังไม่สามารถหาค่า X_c ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมได้ เนื่องจากการให้อัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไป จึงทำให้ PLA ในพอลิเมอร์ผสมไม่สามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ทัน



รูปที่ 4.14 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการเย็นตัวของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.14 พบว่า T_c ของ PBAT ในคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า PBAT ในคอมพอสิตสามารถเกิดผลึกขณะเย็นตัวได้เร็วขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเติม WT ในคอมพอสิต (WF/WT 0/30, 10/20, 15/15 และ 20/10) จะมี T_c สูงกว่าการเติม WF เพียงอย่างเดียว (WF/WT 30/0) แสดงให้เห็นว่าการเติม WT ส่งผลให้เกิดผลึกได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถหาค่า X_c ของ PLA ในคอมพอสิตได้ เนื่องจากการให้อัตราการเย็นตัวที่เร็วเกินไป จึงทำให้ PLA มีเวลาไม่มากพอในการจัดเรียงตัวเป็นผลึก

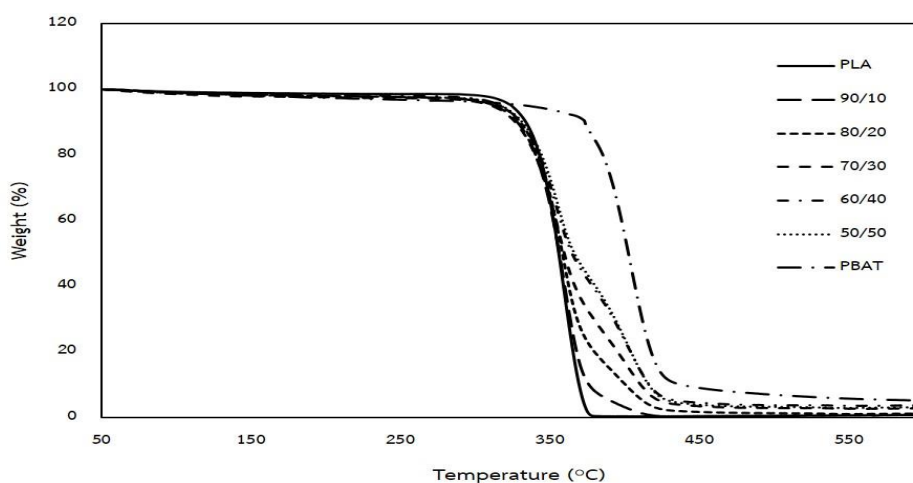
4.5 เสถียรภาพทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์หาเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}), อุณหภูมิการสลายตัวสูงสุด (T_{max}), อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (T_{endset}) และปริมาณเถ้า (char) ที่เหลืออยู่

ตารางที่ 4.3 เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, PBAT, WF, WT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

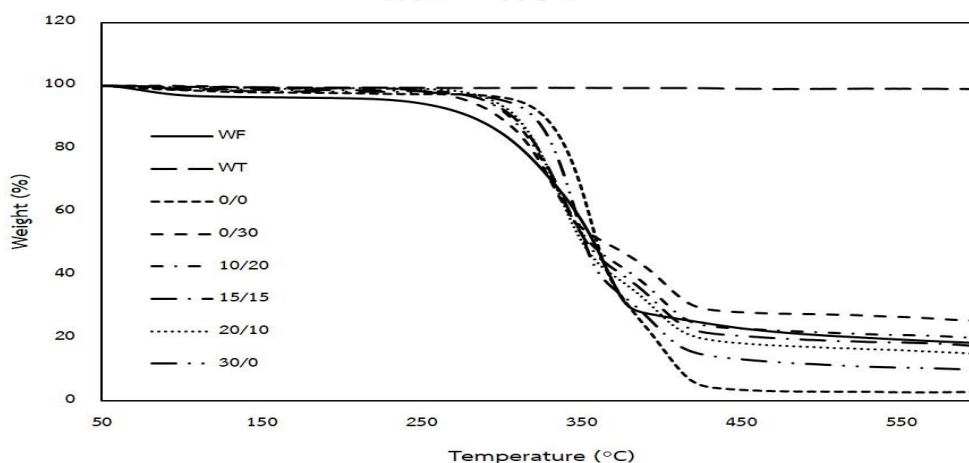
Sample	T_{onset} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{max} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{endset} ($^{\circ}\text{C}$)	Char (%)			
PLA	341.0	360.1	371.8	0.5			
PBAT	382.4	404.6	421.1	6.5			
WF	316.4	364.8	378.3	20.7			
WT	-	-	-	100			
PLA/PBAT (wt%/wt%)							
90/10	340.0	385.4	360.2	405.1	371.7	410.0	0.1
80/20	338.9	384.3	358.3	407.1	369.4	416.0	1.2
70/30	334.9	393.4	355.3	407.0	367.0	420.6	2.9
60/40	334.6	392.8	353.5	406.2	363.6	421.4	3.1
50/50	335.1	390.9	354.7	405.6	363.8	420.6	3.7
PLA/PBAT/WF/WT (wt%/wt%/phr/phr)							
70/30/0/30	300.6	389.3	331.9	403.8	345.9	419.3	27.4
70/30/10/20	304.1	387.8	334.5	402.1	352.2	417.5	21.8
70/30/15/15	308.0	388.7	335.9	400.5	353.7	416.0	19.2
70/30/20/10	308.0	386.7	335.9	399.7	352.6	416.4	17.1
70/30/30/0	324.8	387.2	345.6	399.5	357.7	415.4	11.7

รูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต



รูปที่ 4.15 TGA เทอร์โมแกรมของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.15 พบว่า PLA มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 341–372 องศาเซลเซียสและมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 360.1 องศาเซลเซียส ขณะที่ PBAT มีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 382–421 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 404.6 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า PBAT มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า PLA และเมื่อผสม PBAT ลงใน PLA พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัว 2 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นการสลายตัวของ PLA และชั้นที่สองเป็นการสลายตัวของ PBAT อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่า PLA ซึ่งอาจเกิดจากความไม่เข้ากันของ PLA และ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมจึงทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมไม่ได้รับการปรับปรุง นอกจากนี้ พบว่า PLA มีปริมาณแก่น้อยมากประมาณ 0.5% ส่วน PBAT มีปริมาณแก่นมากกว่า คือ ประมาณ 6.5% จึงทำให้พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีปริมาณแก่นเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PBAT ที่เพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์ผสม



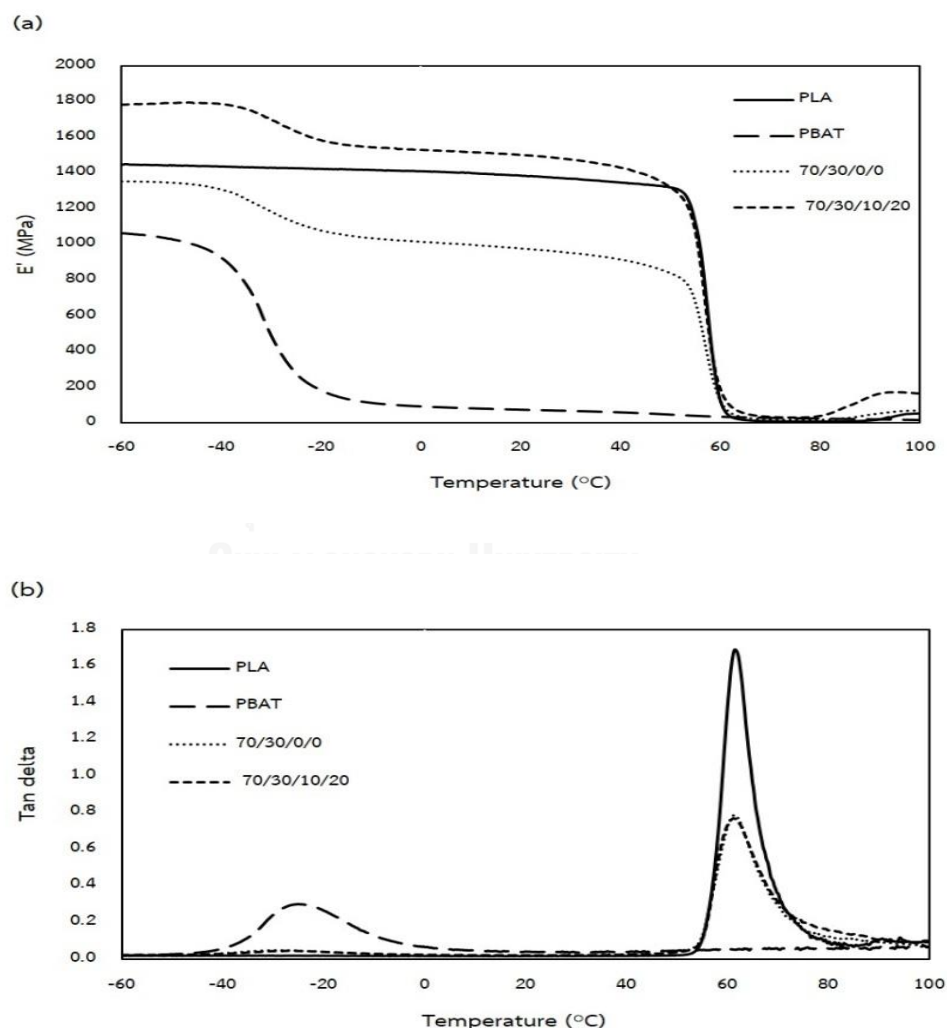
รูปที่ 4.16 TGA เทอร์โมแกรมของ WF, WT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.16 พบว่า WF มีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ที่ประมาณ 316–378 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงสุดที่ 364.8 องศาเซลเซียส ขณะที่ WT ไม่สามารถเกิดการสลายตัวในภาวะการทดสอบนี้ และเมื่อทำการเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT พบว่า คอมพอสิตมีช่วงอุณหภูมิในการสลายตัว 2 ชั้น เช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสม คือ ชั้นแรกเป็นการสลายตัวของ PLA และชั้นที่สองเป็นการสลายตัวของ PBAT อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของคอมพอสิตมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT ซึ่งอาจเกิดจากการใส่สารตัวเติม WF ที่มีอุณหภูมิในการสลายตัวต่ำ (316–378 องศาเซลเซียส) และอาจเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่ดีระหว่างเฟสของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยเฉพาะเมื่อทำการเติมปริมาณ WT เพิ่มมากขึ้น เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตลดลง นอกจากนี้ พบว่าคอมพอสิตในทุกอัตราส่วนมีปริมาณแก่นมากกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT โดยคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติม WT

ในอัตราส่วนต่างๆ มีปริมาณเถ้ามากขึ้นตามปริมาณ WT ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก WT ไม่สามารถเกิดการสลายตัวในภาวะการทดสอบนี้ โดยเถ้าที่เกิดขึ้นสามารถปกป้องพื้นผิวของพอลิเมอร์ไม่ให้ออกซิเจนแพร่หรือซึมผ่านเข้าไปถึง ซึ่งมีผลทำให้คอมพอสิตมีความทนทานการลวกไหม้ได้

4.6 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical properties)

สมบัติเชิงกลพลวัตของ ของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 10/20 WF/WT ด้วยเทคนิค DMA ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 100 องศาเซลเซียส ได้แสดงในลักษณะ DMA เทอร์โมแกรม ในรูปที่ 4.17 ในเทอมของมอดุลัสสะสม (storage modulus, E') และแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, $\tan \delta$)



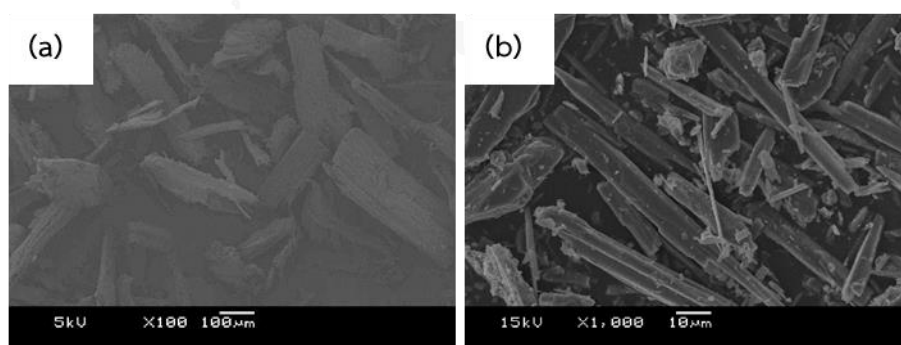
รูปที่ 4.17 สมบัติเชิงกลพลวัต: (a) มอดุลัสสะสม, (b) แทนเจนต์สูญเสีย ของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

จากรูปที่ 4.17(a) พบว่า มอดุลัสสะสมของ PLA มีค่าสูงกว่า PBAT เนื่องจาก PLA เป็นวัสดุที่มีความแข็งเปราะและเมื่อเติม PBAT ลงใน PLA 30 wt% (70/30 PLA/PBAT) พบว่า มอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่า PLA เนื่องจาก PBAT มีความยืดหยุ่นสูงจึงช่วยให้สายโซ่โมเลกุลของ PLA เกิดการเคลื่อนไหวได้มากขึ้นซึ่งให้ผลสอดคล้องกับยังส์มอดุลัสจากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT ที่เติม WF และ WT ในอัตราส่วน 10/20 (10/20 WF/WT) พบว่า มอดุลัสสะสมของคอมพอสิตมีค่าสูงกว่า PLA เนื่องจากสารตัวเติม WF และ WT ไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งสอดคล้องกับยังส์มอดุลัสจากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

จากรูปที่ 4.17(b) พบว่า พีคของแทนเจนต์สูญเสียแสดงถึง T_g ของ PLA ที่ประมาณ 60 องศาเซลเซียส และของ PBAT ที่ประมาณ -30 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ พอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตมี T_g ที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจาก PLA และ PBAT แสดงให้เห็นว่า PLA และ PBAT ไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันในพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิต

4.7 สัณฐานวิทยา (Morphology)

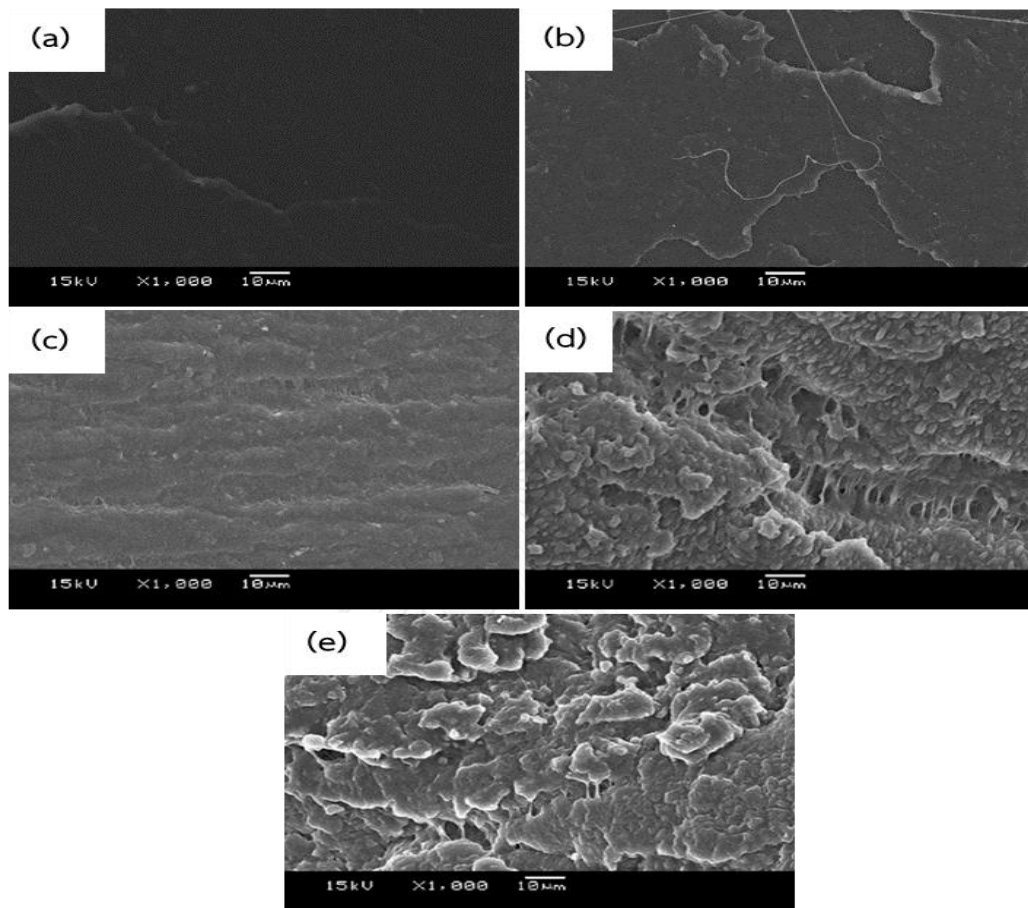
รูปที่ 4.18 แสดงสัณฐานวิทยาของ WF และ WT ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 100 และ 1000 เท่า ตามลำดับ พบว่า อนุภาคของ WF มีขนาดใหญ่และมีพื้นผิวขรุขระ (รูปที่ 4.18(a)) ขณะที่อนุภาคของ WT มีขนาดเล็กกว่าและมีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็ม (รูปที่ 4.18(b))



รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของ (a) WF ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ (b) WT ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

รูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักจากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของ PLA, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน

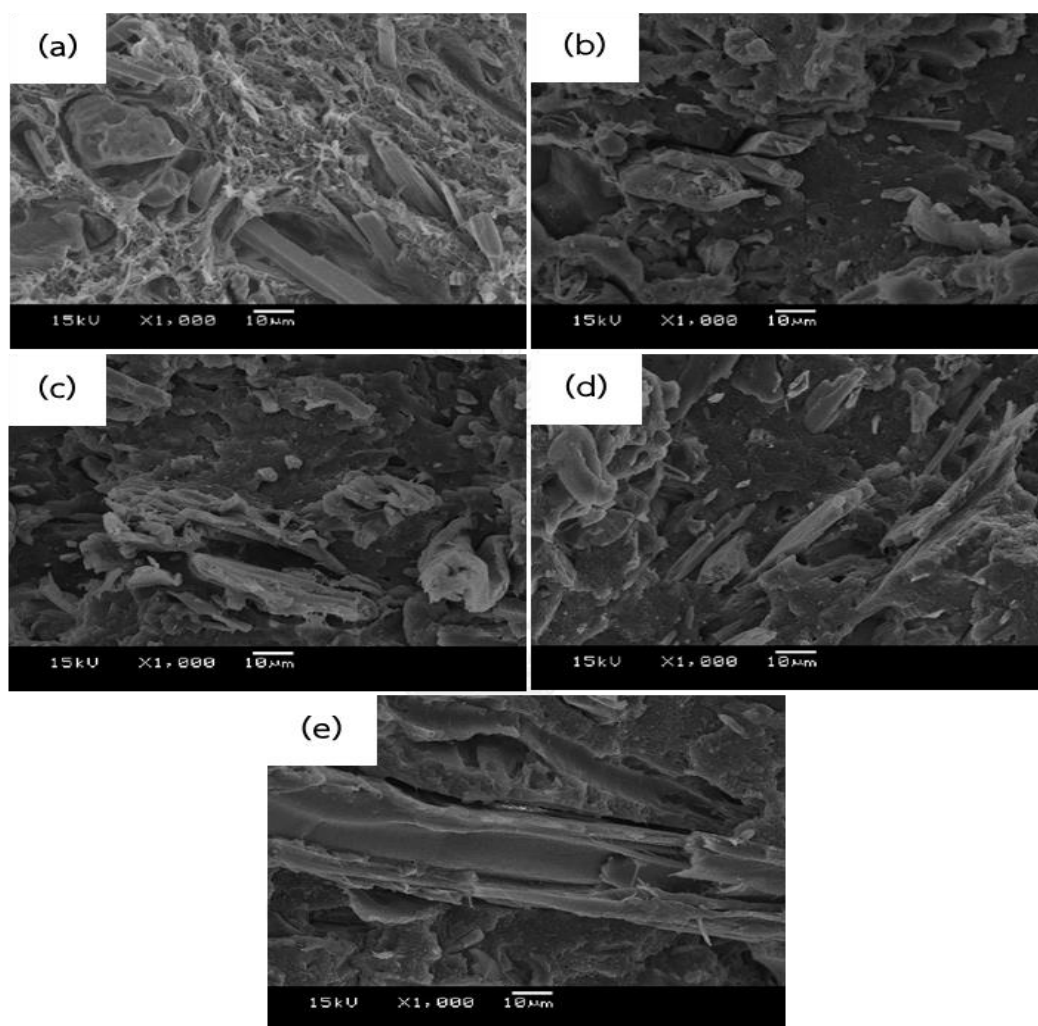
WF/WT ต่างๆ กันตามลำดับ ซึ่งตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ภายใต้กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน (b) 90/10, (c) 80/20, (d) 70/30 และ (e) 50/50 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.19(a) พบว่า PLA มีพื้นผิวรอยแตกหักค่อนข้างเรียบ ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความแข็งแรง ขณะที่ไม่สามารถตรวจสอบสัณฐานวิทยาของ PBAT ได้ เนื่องจาก PBAT เป็นวัสดุที่มีความเหนียว จึงไม่เกิดการแตกหักจากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง อย่างไรก็ตาม เมื่อเติม PBAT ลงใน PLA ปริมาณ 10 และ 20 wt% พบว่า พื้นผิวบริเวณรอยแตกหักค่อนข้างเรียบและเป็นคลื่นกระจายอยู่บางส่วน (รูปที่ 4.19(b) และ (c) ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวมากกว่า PLA และเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้นเป็น 30 และ 50 wt% พบว่า พื้นผิวบริเวณรอยแตกหักมีความขรุขระมากขึ้น (รูปที่ 4.19(d) และ (e) ตามลำดับ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเหนียวและยืดหยุ่นมากขึ้น จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมข้างต้นสามารถบ่งบอกได้ว่า PBAT สามารถเพิ่มความเหนียวให้กับ PLA ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

PLA/PBAT ที่ได้กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตาม พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 60/40 ไม่สามารถตรวจสอบสัณฐานวิทยาได้เช่นกัน เนื่องจากขึ้นทดสอบไม่เกิดการแตกหักจากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงในภาวะการทดสอบนี้

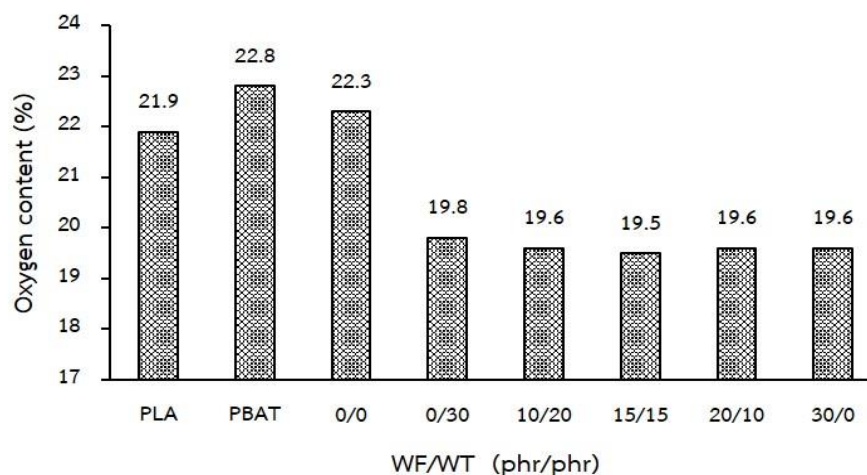


รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน WF/WT: (a) 0/30, (b) 10/20, (c) 15/15, (d) 20/10 และ (e) 30/0 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.20 พบว่า เกิดช่องว่างบริเวณพื้นผิวระหว่างพอลิเมอร์กับอนุภาคสารตัวเติม WF และ WT และการหลุดของอนุภาคสารตัวเติม ซึ่งแสดงถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่ไม่ดีระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์โดยเฉพาะสารตัวเติม WT ซึ่งสังเกตเห็นช่องว่างขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับ WF ซึ่งสอดคล้องกับผลความทนแรงดึงของคอมพอสิตที่ได้กล่าวมาข้างต้น

4.8 ดรรชนีออกซิเจนจำกัด (LOI)

รูปที่ 4.21 แสดงค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัดของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต



รูปที่ 4.21 ดรรชนีออกซิเจนจำกัดของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต



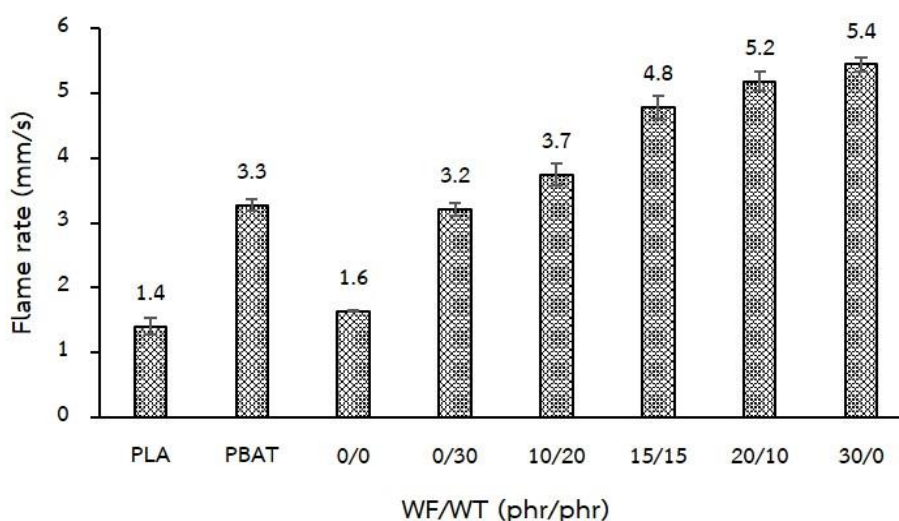
รูปที่ 4.22 ลักษณะชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบหาค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัดของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

จากรูปที่ 4.21 พบว่า PLA มีค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัดเท่ากับ 21.9 ขณะที่ PBAT มีค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัดเท่ากับ 22.8 เมื่อเติม PBAT ลงใน PLA ที่ปริมาณ 30 wt% (70/30 PLA/PBAT) พบว่า มีค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัดเท่ากับ 22.3 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมต้องการออกซิเจนในการเผาไหม้ที่สูงกว่า PLA เนื่องจากอิทธิพลของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม

เมื่อเติม WF ที่ปริมาณ 30 phr ในพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT พบว่า ค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดของคอมพอสิตมีค่าลดลงเหลือ 19.6 แสดงให้เห็นว่าคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติมผงไม้ต้องการออกซิเจนในการเผาไหม้ต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมและ PLA เนื่องจาก WF เป็นวัสดุที่สามารถติดไฟได้ง่าย และเมื่อใส่สารตัวเติม WT 30 phr พบว่า คอมพอสิตมีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดสูงขึ้นเล็กน้อย (19.8) แต่ยังคงมีค่าต่ำกว่า PLA เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของ WT และพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ดี จึงมีช่องว่างระหว่างเฟสเกิดขึ้น ทำให้คอมพอสิตมีพื้นผิวสัมผัสกับออกซิเจนมากขึ้น จึงต้องการออกซิเจนในการเผาไหม้ที่น้อยกว่า นอกจากนี้ คอมพอสิตที่ใส่ทั้ง WF และ WT (WF/WT เท่ากับ 10/20, 15/15 และ 20/20) ยังมีค่าดัชนีออกซิเจนจำกัดที่ใกล้เคียงกับ WF ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอิทธิพลของ WF ที่สามารถติดไฟได้ง่ายในคอมพอสิต และรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าชั้นทดสอบของ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT เมื่อเกิดการติดไฟแล้วมีการหลอมหดลงมาเป็นแนวยาว แต่เมื่อใส่สารตัวเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT จะสังเกตเห็นการหลอมหดที่ลดลง และมีฝ้าสีดำปกคลุมที่พื้นผิวของชั้นทดสอบ ทำให้คอมพอสิตเกิดการหลอมหดที่ลดลง

4.9 การลุกไหม้ (Flammability)

รูปที่ 4.23 แสดงค่าอัตราการลามไฟของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต ตามมาตรฐาน UL-94 โดยการทดสอบในแนวตั้ง (vertical burning test)

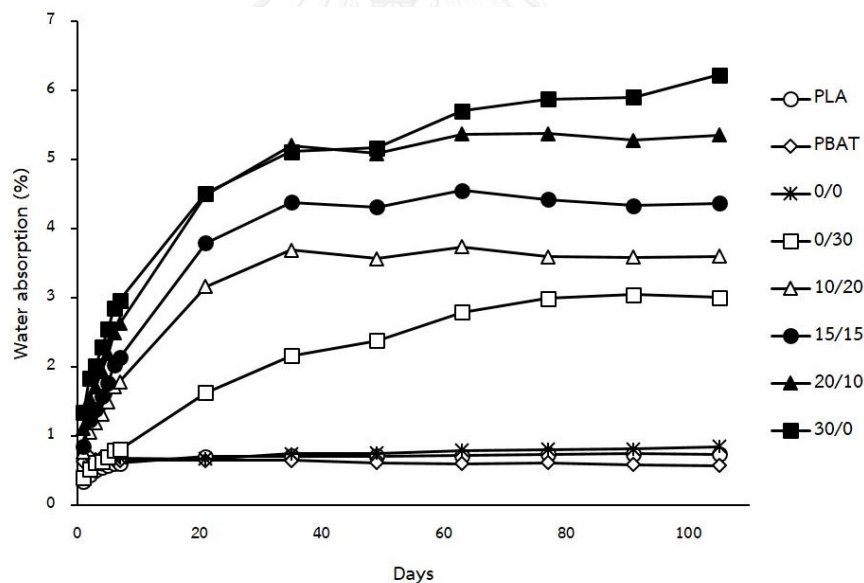


รูปที่ 4.23 อัตราการลามไฟของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

จากรูปที่ 4.23 พบว่า ชั้นทดสอบทุกตัวอย่างเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง และเกิดการหลอมหาย ดังนั้น จึงจัดอยู่ในเกณฑ์ V-2 ตามมาตรฐาน UL-94 นอกจากนี้ พบว่า PLA มีอัตราการลามไฟเร็วกว่า PBAT เมื่อผสม PBAT ลงใน PLA ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีอัตราการลามไฟเร็วกว่า PLA เล็กน้อย และเมื่อเติม WF ลงไปในพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT พบว่า อัตราการลามไฟของคอมพอสิตเร็วขึ้นตามปริมาณ WF ที่ใส่ลงไป เนื่องจาก WF เป็นวัสดุที่ติดไฟได้ง่าย แต่เมื่อใส่สารตัวเติม WT พบว่า คอมพอสิตมีอัตราการลามไฟที่ช้าลง เนื่องจาก WT จะทำให้เกิดฝ้าปกคลุมพื้นผิวของชั้นทดสอบ จึงสามารถยับยั้งการลามไฟได้บางส่วน หากแต่ยังมีอัตราการลามไฟที่เร็วกว่า PLA เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของ WT และพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ดี ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟสให้ออกซิเจนสามารถแทรกเข้าไปได้ จึงเป็นตัวช่วยที่ทำให้เกิดการลุกติดไฟ

4.10 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำและจำนวนวันที่ทำการทดสอบของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต



รูปที่ 4.24 การดูดซึมน้ำของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

จากรูปที่ 4.24 พบว่าชั้นทดสอบในทุกอัตราส่วนมีการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 7 วันแรกของการทดสอบ และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนวันที่เพิ่มขึ้น หลังจากนั้นการดูดซึมน้ำค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว นอกจากนี้ พบว่า PBAT มีการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด เนื่องจาก PBAT เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ขณะที่ PLA มีการดูดซึมน้ำสูงกว่าเล็กน้อยและเมื่อเติม

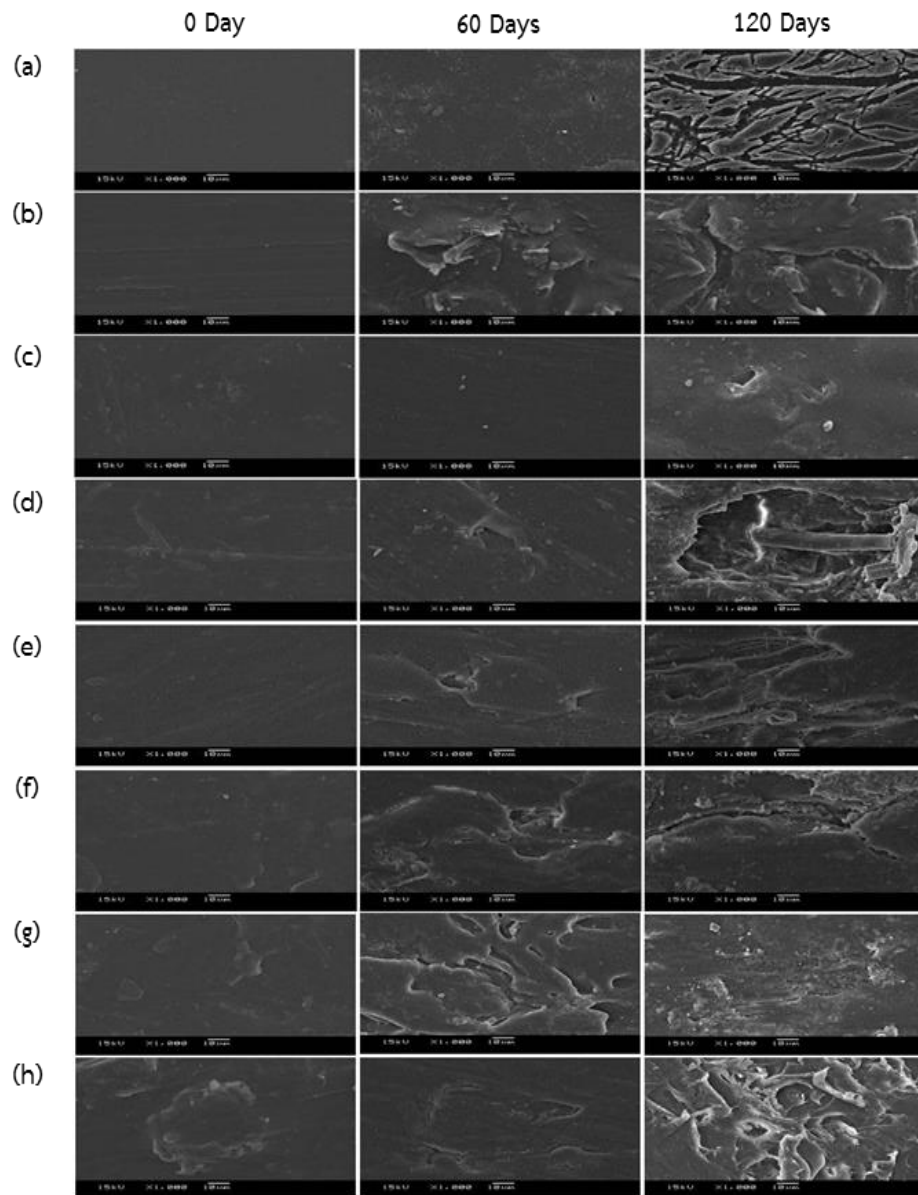
PBAT ปริมาณ 30 wt% ลงใน PLA พบว่า การดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกับ PLA อย่างไรก็ตาม คอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีการดูดซึมน้ำที่สูงกว่าพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT นอกจากนี้แล้ว การดูดซึมน้ำของคอมพอสิตยังเพิ่มขึ้นตามปริมาณ WF ที่เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจาก ช่องว่างระหว่างรอยต่อของสารตัวเติมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์รวมทั้งหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำโดยเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ ส่งผลให้คอมพอสิตสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น จากผลการดูดซึมน้ำแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติม WF ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดการย่อยสลายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่เคลื่อนตัวเข้าไปในผลิตภัณฑ์โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลางได้มากขึ้น

4.11 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

4.11.1 สันฐานวิทยา

รูปที่ 4.25 แสดงสันฐานวิทยานบนพื้นผิวขึ้นทดสอบของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 60 และ 120 วัน





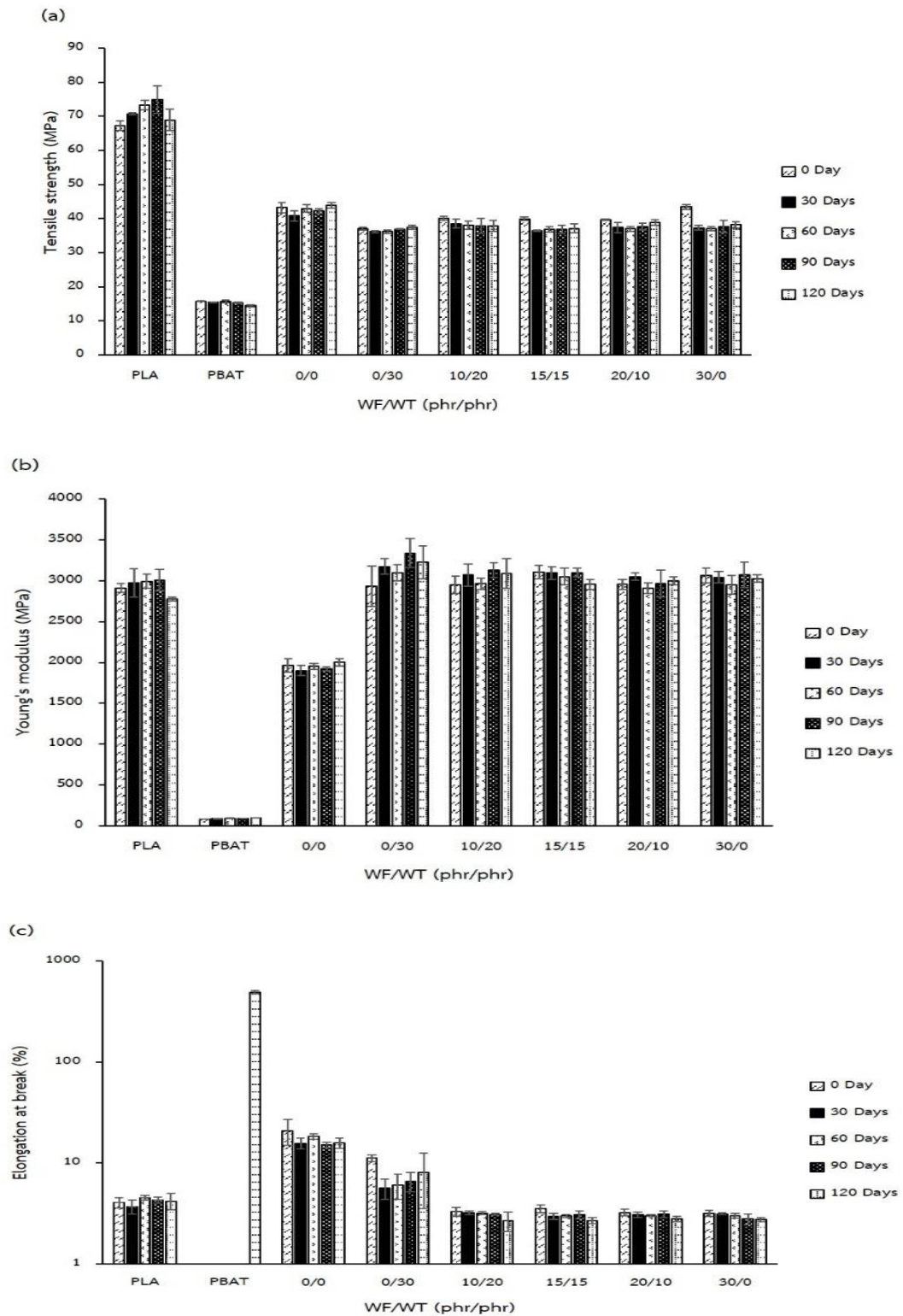
รูปที่ 4.25 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) PBAT, (c) โพลีเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตที่มีอัตราส่วน WF/WT เท่ากับ (d) 0/30, (e) 10/20, (f) 15/15, (g) 20/10 และ (h) 30/0 ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0, 60 และ 120 วัน

จากรูปที่ 4.25 พบว่า พื้นผิวของชิ้นทดสอบก่อนทำการฝังดินมีลักษณะค่อนข้างเรียบ หลังจากฝังดินไปแล้ว 60 วัน ชิ้นทดสอบเริ่มมีการเปลี่ยนแปลง โดยพบหลุมเล็กๆ รอยแตกหรือรอยฉีกเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิว เนื่องจากเกิดการย่อยสลายที่ผิวของชิ้นทดสอบ อย่างไรก็ตาม พื้นผิวของ PLA เกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย (รูปที่ 4.25(a) คอลัมน์กลาง) เนื่องจาก PLA ใช้เวลาในการย่อย

สลายตามธรรมชาติค่อนข้างนาน ขณะที่ PBAT มีการกร่อนที่ผิว (surface erosion) มากกว่า (รูปที่ 4.25(b) คอลัมน์กลาง) อย่างไรก็ตาม เมื่อเติม PBAT ที่ปริมาณ 30 wt% (70/30 PLA/PBAT) ลงใน PLA พบว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงบริเวณพื้นผิว (รูปที่ 4.25(c) คอลัมน์กลาง) ซึ่งอาจเป็นเพราะ PLA มีการย่อยสลายช้าและ PBAT มีการดูดซึมน้ำได้น้อย จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการย่อยสลายได้ช้าลง นอกจากนี้ การใส่สารตัวเติม WF และ WT ในคอมพอสิต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะการใส่สารตัวเติม WF ที่มีองค์ประกอบที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน อีกทั้งการยึดเกาะระหว่างเฟสที่ไม่ดีของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้เกิดช่องว่างให้น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปในชั้นทดสอบได้ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วขึ้น และหลังจากการฝังดิน 120 วัน พบว่า ชั้นทดสอบเกิดการแพร่กระจายของความเสียหายต่างๆ บนพื้นผิวมากขึ้นโดยเฉพาะคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติม WT เพียงอย่างเดียว (WF/WT 0/30) จะพบหลุมขนาดใหญ่ (รูปที่ 4.25(d) คอลัมน์ด้านขวา) ซึ่งอาจเกิดจากการย่อยสลายที่พื้นผิวก่อนในช่วงแรก ทำให้เกิดความเสียหายบริเวณพื้นผิว น้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปในชั้นทดสอบได้ ประกอบกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสที่ไม่ดีของ WT และพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้เกิดช่องว่าง น้ำจึงสามารถแทรกเข้าไปง่ายขึ้น และนำพาเอนไซม์ของจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายชั้นทดสอบได้มากขึ้น

4.10.2 สมบัติด้านแรงดึง

สมบัติด้านแรงดึง (ความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60 และ 120 วัน แสดงไว้ในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 สมบัติด้านแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส, (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตภายหลังจากการฝังดินเป็นเวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 วัน

จากรูปที่ 4.26 พบว่า ความทนแรงดึงของ PLA มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากโดยปกติแล้ว PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีสายโซ่โมเลกุลยาว การจัดเรียงตัวของสายโซ่จึงเป็นไปได้ยาก เมื่อนำไปฝังดินแล้วเกิดการย่อยสลายทำให้สายโซ่โมเลกุลของ PLA สั้นลง จึงสามารถจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้ ทำให้ PLA มีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่ค่ายังสัมดูล์สและการยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก และเมื่อพิจารณา PBAT พบว่าความทนแรงดึงและยังสัมดูล์สเปลี่ยนแปลงจากเดิมไม่มากนัก และไม่สามารถหาค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเมื่อทำการฝังดินเป็นเวลา 0 ถึง 90 วัน เนื่องจากชั้นทดสอบไม่เกิดการแตกหักเมื่อทดสอบสมบัติด้านแรงดึง แต่หลังจากการฝังดิน 120 วัน พบว่าชั้นทดสอบเกิดการแตกหักจากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (รูปที่ 4.26(c)) เนื่องจากการย่อยสลายที่มากขึ้น จึงเกิดการแพร่กระจายของจุดบกพร่องในชั้นทดสอบมากขึ้น ทำให้ชั้นทดสอบเกิดการแตกหัก ส่วนพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT พบว่าความทนแรงดึงและยังสัมดูล์สไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก แต่การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการย่อยสลายของ PBAT ทำให้เกิดจุดบกพร่องในชั้นทดสอบ ทำให้ชั้นทดสอบเกิดการแตกหักและยืดตัวได้น้อยลงนอกจากนี้ เมื่อพิจารณาคอมพอสิตพบว่าค่าความทนแรงดึงและยังสัมดูล์สของคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติม WF ในทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการย่อยสลายของ WF ทำให้ความแข็งแรงของคอมพอสิตลดลง ขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และคอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติม WT 30 phr พบว่า ค่าความทนแรงดึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจาก WT เป็นสารอนินทรีย์ที่ไม่เกิดการย่อยสลายเมื่อเวลาผ่านไป จึงช่วยคงความแข็งแรงของคอมพอสิต แต่การย่อยสลายของพอลิเมอร์เมทริกซ์อาจทำให้ชั้นทดสอบโดยรวมมีจุดบกพร่องเกิดขึ้น ทำให้ยืดตัวออกไปได้น้อยลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของพอลิแล็กติกแอซิด (PLA) ด้วยการเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟทาเลต (PBAT) และไฮบริดคอมพอสิตของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 PLA/PBAT กับผงไม้ (WF) และโวลลาสโทไนต์ (WT) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ตามด้วยเครื่องฉีดแบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พอลิเมอร์ผสมมีดรชนีการหลอมไหลมากขึ้นตามปริมาณ PBAT ที่มากขึ้น และเมื่อเติมสารตัวเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT ทำให้คอมพอสิตมีดรชนีการหลอมไหลลดลง โดยเฉพาะการใส่สารตัวเติม WF ที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และมีพื้นผิวขรุขระ
2. การเติม PBAT ลงใน PLA ทำให้ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสการดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมลดลง แต่ความทนแรงกระแทกและการยึดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมกลับสูงขึ้นทุกอัตราส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA แสดงให้เห็นว่า PBAT ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความเปราะโดยธรรมชาติของ PLA โดยเฉพาะพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีความทนแรงกระแทกสูงที่สุด จึงนำไปเตรียมเป็นไฮบริดคอมพอสิตกับ WF และ WT โดยมีอัตราส่วนของ WF ต่อ WT เป็น 0/30, 10/20, 15/15, 20/10 และ 30/0 phr/phr ตามลำดับ
3. คอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีค่ายังสัมพันธ์ ความทนแรงดัดโค้ง และมอดุลัสการดัดโค้งที่สูงขึ้นเมื่อใส่ WF และ WF แต่ความทนแรงดึง การยึดตัว ณ จุดขาด และความทนแรงกระแทกมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT อย่างไรก็ตาม ความทนแรงกระแทก ยังสัมพันธ์ และมอดุลัสการดัดโค้งของคอมพอสิตทุกอัตราส่วนยังคงมีค่าสูงกว่า PLA โดยไฮบริดคอมพอสิตที่มีอัตราส่วนของ WF/WT เป็น 10/20 มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด
4. การเติม PBAT ลงใน PLA ทำให้ PLA ในพอลิเมอร์ผสมเกิดผลึกขณะหลอมเหลวได้ช้าลง แต่การเติม WF และ WT ทำให้ PLA ในคอมพอสิตเกิดผลึกในขณะหลอมเหลวได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ การเติม PBAT 30-50 wt% ใน PLA ทำให้ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมเกิดผลึกขณะเย็นตัวได้เร็วขึ้น และเมื่อเติม WF และ WT ในพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT ทำให้ PBAT ในคอมพอสิตสามารถเกิดผลึกขณะเย็นตัวได้เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม 70/30

PLA/PBAT ส่วนการเกิดผลึกของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตมีน้อยมากจนไม่สามารถคำนวณหาระดับการเกิดผลึกของ PLA ทั้งในพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตได้

5. พอลิเมอร์ผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลงจาก PLA และ PBAT และการใส่สารตัวเติม ทั้ง WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตลดลงเช่นกัน
6. การเติม PBAT ลงใน PLA ทำให้มอดูลัสสะสมของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงจาก PLA และเมื่อใส่สารตัวเติม WF และ WT ลงในพอลิเมอร์ผสม ทำให้มอดูลัสสะสมของคอมพอสิตเพิ่มขึ้น จนมีค่าสูงกว่า PLA ซึ่งสอดคล้องกับค่ายังสัมมอดูลัสจากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง
7. การเติม WF และ WT ทำให้คอมพอสิตมีค่าดรรชนีออกซิเจนจำกัดที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA, PBAT และพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT อย่างไรก็ตาม การเติม WT ช่วยให้อัตราการลุกลามไฟของคอมพอสิตลดลง
8. คอมพอสิตที่ใส่สารตัวเติม WF มีการดูดซึมน้ำสูง ซึ่งส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพที่มากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม การใส่สารตัวเติม WT ที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเฟสของสารตัวเติมกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ที่ต่ำกว่า WF ก็มีแนวโน้มที่จะเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพมากขึ้นเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรดัดแปรพื้นผิวของ WF และ WT ด้วยสารคู่ควบ (coupling agent) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมและเมทริกซ์พอลิเมอร์
2. ควรทดลองขึ้นรูปแบบอื่นด้วย เพื่อศึกษาวิธีการที่เหมาะสมสำหรับนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานจริงได้

รายการอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [2016, April 1]. Available from: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/bio_de_plas.html.
- [2] บริษัท พีทีที โพลีเมอร์มาร์เก็ตติ้ง จำกัด. พลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพทางเลือกใหม่ที่ใส่ใจสิ่งแวดล้อม [2016, April 1]. Available from: <http://polymersplace.com/pdf1-10/pdf10.pdf>.
- [3] Ray, S.S. 2 - Environmentally friendly polymer matrices for composites. Environmentally Friendly Polymer Nanocomposites: Woodhead Publishing; 2013. 25-40.
- [4] จุฬากานต์ บุญมี. พลาสติกชีวภาพทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม. วารสารสิ่งแวดล้อม. 2555; 16: 15-19.
- [5] Tokiwa, Y., Calabia, B.P., Ugwu, C.U. and Aiba, S. Biodegradability of plastics. International Journal of Molecular Sciences. 2009; 10: 3722-3742.
- [6] Dong, W., Zou, B., Ma, P., Liu, W., Zhou, X., Shi, D., et al. Influence of phthalic anhydride and bioxazoline on the mechanical and morphological properties of biodegradable poly(lactic acid)/poly[(butylene adipate)-co-terephthalate] blends. Polymer International. 2013; 62: 1783-1790.
- [7] สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กรมวิทยาศาสตร์บริการ, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [2016, May 15]. Available from: <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf>.
- [8] อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล. พอลิแลกติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้ [2016, May 29]. Available from: http://www.eng.ku.ac.th/e-journal_th/download.php?name=BGHaDcHMon24703.pdf&file_basename=99110%20CD%C1%C3%C3%D1%B5%B9%EC.pdf.
- [9] Garlotta, D. A literature review of poly(lactic acid). Journal of Polymers and the Environment. 2001; 9: 63-84.

- [10] European Commission Joint Research Centre. Feasibility of large-scale production of bio-based polymers in Europe 2005 [2016, Apr 1]. Available from: <http://ftp.jrc.es/EURdoc/eur22103en.pdf>
- [11] Lim, L.T., Auras, R. and Rubino, M. Processing technologies for poly(lactic acid). *Progress in Polymer Science*. 2008; 33: 820-852.
- [12] Niaounakis, M. 1 - Definitions of terms and types of biopolymers. *Biopolymers: Applications and Trends*. Oxford: William Andrew Publishing; 2015. 1-90.
- [13] Kasirajan, S. and Ngouajio, M. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2012; 32: 501-529.
- [14] BASF the chemical company. Product information ecoflex® F blend C1200 [2016, Apr 1]. Available from: <http://product-finder.basf.com/group/corporate/product-finder/en/literature-document:/Brand+Ecoflex-Product+Data+Sheet--Ecoflex+F+Blend+C1200-English.pdf>.
- [15] ทฤทภาค กิรติเสวี, ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และอภิรัตน์ เล่าห์บุตรี. ภาพรวมของวัสดุเชิงประกอบ [2016, May 15]. Available from: http://www.eng.ku.ac.th/e-journal_th/download.php?name=zoXKryVMon21201.pdf&file_basename=1832%20%CB%C4%B7%C0%D1%A4.pdf.
- [16] สุภาสินี ลิ้มปานภาพ. เอกสารประกอบการสอน บทที่ 10 คอมโพสิต [2016, May 15]. Available from: <http://www.physics.kku.ac.th/315205/sites/default/files/chapter10.pdf>.
- [17] Singh, S., Mohanty, A.K. and Misra, M. Hybrid bio-composite from talc, wood fiber and bioplastic: Fabrication and characterization. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010; 41: 304-312.
- [18] อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1 กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2546.
- [19] Wang, Y., Qi, R., Xiong, C. and Huang M. Effects of coupling agent and interfacial modifiers on mechanical properties of poly(lactic acid) and wood flour biocomposites *Iranian Polymer Journal* 2011; 20: 281-294.
- [20] Clemons, C.M. Wood flour. *Functional Fillers for Plastics: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.*; 2010. 269-290.

- [21] Gwon, J.G., Lee, S.Y., Chun, S.J., Doh, G.H. and Kim, J.H. Physical and mechanical properties of wood–plastic composites hybridized with inorganic fillers. *Journal of Composite Materials*. 2012; 46: 301-309.
- [22] คชินท์ สายอินทวงศ์. วัสดุพิเศษสำหรับเนื้อดินและสีเคลือบ โดโลไมท์และวอลลาสโตไนท์. *วารสารเซรามิกส์*. 2553; 14: 25-29.
- [23] Xanthos, M. Wollastonite. *Functional Fillers for Plastics: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.*; 2005. 241-247.
- [24] H&J Mineral Fiber Technology Co., Ltd. Wollastonite mineral fiber [2016, May 16]. Available from: <http://www.tradeindia.com/fp575963/Wollastonite-Mineral-Fiber.html>.
- [25] Jiang, L., Wolcott, M.P. and Zhang, J. Study of biodegradable polylactide/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends. *Biomacromolecules*. 2006; 7: 199-207.
- [26] Farsetti, S., Cioni, B. and Lazzeri, A. Physico-mechanical properties of biodegradable rubber toughened polymers. *Macromolecular Symposia*. 2011; 301: 82-89.
- [27] Petinakis, E., Yu, L., Edward, G., Dean, K., Liu, H. and Scully, A.D. Effect of matrix–particle interfacial adhesion on the mechanical properties of poly(lactic acid)/wood-flour micro-composites. *Journal of Polymers and the Environment*. 2009; 17: 83-94.
- [28] Chuayjuljit, S., Chaiwutthinan, P., Raksakri, L. and Boonmahitthisud, A. Effects of poly(butylene adipate-co-terephthalate) and ultrafinned wollastonite on the physical properties and crystallization of recycled poly(ethylene terephthalate). *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2015 [2015, October 10] Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/wol1/doi/10.1002/vnl.21489/full>.
- [29] Saad, N.A., Al-Maamory, M.H., Mohammed M.R., Hashim A.A. The effect of several service and weathering parameters on tensile properties of PVC pipe materials. *Materials Sciences and Applications*. 2012; 3: 784-792.
- [30] Chuayjuljit, S., Wongwaiwattanakul, C., Chaiwutthinan, P. and Prasassarakich, P. Biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene succinate)/wood flour composites: physical and morphological properties. *Polymer Composites*. 2016 [2016, April 14] Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pc.23886/epdf>.

- [31] ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. Dynamic Mechanical Analyzer [2016, May 28]. Available from: https://app.strec.chula.ac.th/application/instrument/instrument_info.php?instr=39.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ดรรชนีการหลอมไหล

ตาราง ก-1 ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

PLA/PBAT (wt%/wt%)	MFI (g/10 min)
PLA	6.50
	6.36
	4.62
Avg.	5.83
SD.	1.05
PBAT	16.76
	17.88
	16.96
Avg.	17.20
SD.	0.59
90/10	8.85
	9.35
	8.92
Avg.	9.04
SD.	0.27
80/20	9.64
	9.69
	8.83
Avg.	9.38
SD.	0.48

ตาราง ก-1 ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT (ต่อ)

PLA/PBAT (wt%/wt%)	MFI (g/10 min)
70/30	10.28
	12.08
	10.60
Avg.	10.99
SD.	0.96
60/40	14.36
	15.05
	15.15
Avg.	14.86
SD.	0.43
50/50	17.03
	16.96
	16.39
Avg.	16.80
SD.	0.35

ตาราง ก-2 ดรรชนีการหลอมไหลของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

PLA/PBAT/WF/WT (wt%/wt%/phr/phr)	ดรรชนีการหลอมไหล (กรัม/10 นาที)
70/30/0/30	8.15
	9.10
	9.93
Avg.	9.06
SD.	0.89
70/30/10/20	10.42
	9.50
	9.94
Avg.	9.96
SD.	0.46
70/30/15/15	10.16
	8.89
	8.32
Avg.	9.13
SD.	0.94
70/30/20/10	7.40
	7.22
	7.47
Avg.	7.36
SD.	0.13
70/30/30/0	6.96
	6.90
	6.84
Avg.	6.90
SD.	0.06

ภาคผนวก ข
สมบัติเชิงกล

ตารางที่ ข-1 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, โพลีเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT
คอมพอสิต

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
PLA	2.48	68.45	2999	3.87	99.53	3631
	2.23	65.46	2912	3.67	97.69	3537
	2.97	66.97	2930	3.82	100.73	3636
	2.35	65.50	2890	3.46	101.89	3603
	2.23	66.94	2855	4.22	102.6	3764
	3.19	68.28	2844	4.54	-	-
	3.20	69.12	2950	4.78	-	-
Avg.	2.67	67.25	2912	4.05	100.488	3634
SD.	0.44	1.44	54.32	0.48	1.951	82.59
PBAT	-	15.87	82	-	4.24	96
	-	15.82	85	-	4.27	95
	-	15.64	83	-	4.23	95
	-	15.83	84	-	4.39	98
	-	15.79	79	-	4.14	93
	-	15.80	82	-	-	-
	-	15.90	88	-	-	-
Avg.	-	15.81	83	-	4.254	95
SD.	-	0.08	2.70	-	0.090	1.79

ตารางที่ ข-1 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, โพลีเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT
คอมพอสิต (ต่อ)

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
PLA/PBAT (wt%/wt%)						
90/10	3.75	64.70	2562	4.09	89.42	3257
	4.11	64.68	2574	3.66	93.02	3466
	3.93	63.37	2544	3.87	91.76	3380
	3.71	63.63	2510	3.86	89.4	3257
	3.85	64.58	2640	3.53	84.32	3011
	4.06	64.43	2629	3.74	-	-
	4.02	63.46	2549	3.78	-	-
Avg.	3.92	64.12	2573	3.79	89.58	3274
SD.	0.15	0.60	46.75	0.18	3.33	171.68
80/20	5.66	55.10	2344	10.83	75.77	2782
	5.56	54.79	2282	11.58	75.53	2797
	5.68	55.77	2317	11.24	79.93	2901
	5.70	54.60	2269	9.49	76.09	2722
	5.63	54.82	2243	9.73	79.40	2897
	5.50	53.65	2255	12.38	-	-
	5.61	53.45	2164	8.21	-	-
Avg.	5.62	54.60	2268	10.49	77.34	2820
SD.	0.07	0.81	57.69	1.43	2.14	77.55
70/30	29.18	41.47	1870	25.72	59.47	2231
	32.28	42.47	1968	23.92	61.06	2318
	25.36	42.07	1965	14.55	61.21	2280
	31.45	43.14	1883	19.31	58.53	2180
	26.40	45.81	2110	30.82	58.06	2161
	33.27	43.74	1936	17.72	-	-
	27.23	44.05	2005	14.81	-	-
Avg.	29.31	43.25	1962	20.98	59.67	2234
SD.	3.09	1.45	80.63	6.07	1.43	65.85

ตารางที่ ข-1 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT
คอมพอสิต (ต่อ)

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
PLA/PBAT (wt%/wt%)						
60/40	-	31.93	1595	-	46.74	1698
	-	31.94	1574	-	44.70	1653
	-	32.37	1590	-	45.50	1649
	-	31.15	1541	-	46.00	1679
	-	32.53	1553	-	45.14	1604
	-	31.93	1577	-	-	-
	-	33.56	1502	-	-	-
Avg.	-	32.20	1562	-	45.62	1657
SD.	-	0.74	32.50	-	0.79	35.67
50/50	-	23.54	1124	39.85	36.51	1232
	-	24.97	1165	53.64	33.33	1127
	-	24.66	1201	50.18	36.41	1245
	-	24.09	1173	55.17	33.58	1177
	-	23.45	1062	37.76	34.21	1206
	-	24.24	1104	49.97	-	-
	-	22.55	1079	39.34	-	-
Avg.	-	23.93	1130	46.56	34.81	1197
SD.	-	0.82	51.81	7.34	1.54	47.36
PLA/PBAT/WF/WT (wt%/wt%/phr/phr)						
70/30/0/30	5.59	36.95	3191	10.93	62.22	4225
	4.59	36.66	3121	12.05	62.08	4159
	4.99	37.16	3077	10.53	62.98	4176
	5.01	36.74	2993	12.61	63.91	4370
	5.48	36.61	2471	10.24	63.73	4357
	4.85	37.50	2805	10.9	-	-
	5.24	37.52	2863	11.25	-	-
Avg.	5.11	37.02	2932	11.22	62.98	4257
SD.	0.35	0.38	245.14	0.84	0.84	99.91

ตารางที่ ข-1 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, โพลีเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT
คอมพอสิต (ต่อ)

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
PLA/PBAT/WF/WT (wt%/wt%/phr/phr)						
70/30/10/20	4.20	40.95	3078	2.81	63.6	4093
	4.18	39.99	2941	3.08	62.14	4040
	4.01	40.14	3030	3.05	65.15	4288
	4.20	39.97	2858	3.5	63.84	4183
	4.17	40.53	2862	3.58	64.46	4228
	4.07	39.07	3060	3.73	-	-
	4.02	40.11	2820	3.43	-	-
Avg.	4.12	40.11	2950	3.31	63.84	4166
SD.	0.08	0.58	106.45	0.33	1.12	100.43
70/30/15/15	3.93	39.40	3169	3.91	61.71	3988
	4.04	39.81	2954	3.59	61.7	4024
	3.91	39.76	3165	3.52	61.37	3865
	3.91	39.95	3126	3.94	61.11	3924
	3.99	39.63	3091	3.44	61.52	3948
	4.00	40.67	3060	3.01	-	-
	3.85	40.52	3187	3.33	-	-
Avg.	3.95	39.96	3107	3.53	61.48	3950
SD.	0.07	0.47	81.47	0.33	0.25	60.78
70/30/20/10	3.95	39.54	2838	3.28	63.09	3839
	3.70	39.55	3007	3.53	61.85	3804
	3.77	39.49	2943	3.41	61.91	3890
	3.63	39.94	2936	3.22	62.85	4029
	3.76	40.09	2958	3.01	63.33	4082
	3.89	39.71	2986	2.82	-	-
	3.59	39.78	3030	3.44	-	-
Avg.	3.76	39.73	2957	3.24	62.61	3929
SD.	0.13	0.22	62.60	0.25	0.68	121.00

ตารางที่ ข-1 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT
คอมพอสิต (ต่อ)

Sample	IS (kJ/m ²)	TS (MPa)	E (MPa)	EB (%)	FS (MPa)	FM (MPa)
PLA/PBAT/WF/WT (wt%/wt%/phr/phr)						
70/30/30/0	4.04	43.64	3072	3.09	66.36	3894
	3.69	43.22	3019	3.2	65.01	4093
	4.08	44.08	3097	3.5	65.53	4078
	4.07	43.30	2901	3.2	65.56	4140
	4.09	44.23	3169	3.27	63.42	3909
	3.98	43.55	3064	3.29	-	-
	4.03	42.23	3148	2.8	-	-
Avg.	4.00	43.46	3067	3.19	65.176	4023
SD.	0.14	0.66	89.17	0.21	1.094	113.30

ตารางที่ ข-2 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30
PLA/PBAT คอมพอสิตที่อัตราส่วน WF/WT ต่างกันภายหลังจากการฝังดิน
30, 60, 90 และ 120 วัน

Sample	TS				E				EB			
	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120
PLA	71.1	73.7	76.0	71.9	3142	3079	3102	2749	3.1	4.8	4.5	4.2
	70.6	74.4	78.3	65.8	2802	2989	3059	2792	4.1	4.4	3.9	3.4
	70.5	71.6	70.4	69.2	2977	2907	2857	2791	3.9	4.3	4.5	5.0
Avg.	70.7	73.3	74.9	69.0	2973	2992	3006	2778	3.7	4.5	4.3	4.2
SD.	0.3	1.5	4.1	3.0	170.0	86.0	130.9	24.8	0.6	0.3	0.3	0.8
PBAT	15.5	16.1	15.3	14.8	92	97	90	98	-	-	-	500.7
	15.4	15.6	15.6	14.4	85	90	92	99	-	-	-	503.0
	15.6	15.4	15.1	14.2	92	90	92	99	-	-	-	473.6
Avg.	15.5	15.7	15.3	14.4	90	93	91	99	-	-	-	492.4
SD.	0.1	0.3	0.2	0.3	3.9	4.1	1.0	0.6	-	-	-	16.4

ตารางที่ ข-2 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, โพลีเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตที่อัตราส่วน WF/WT ต่างกันภายหลังจากการฝังดิน 30, 60, 90 และ 120 วัน (ต่อ)

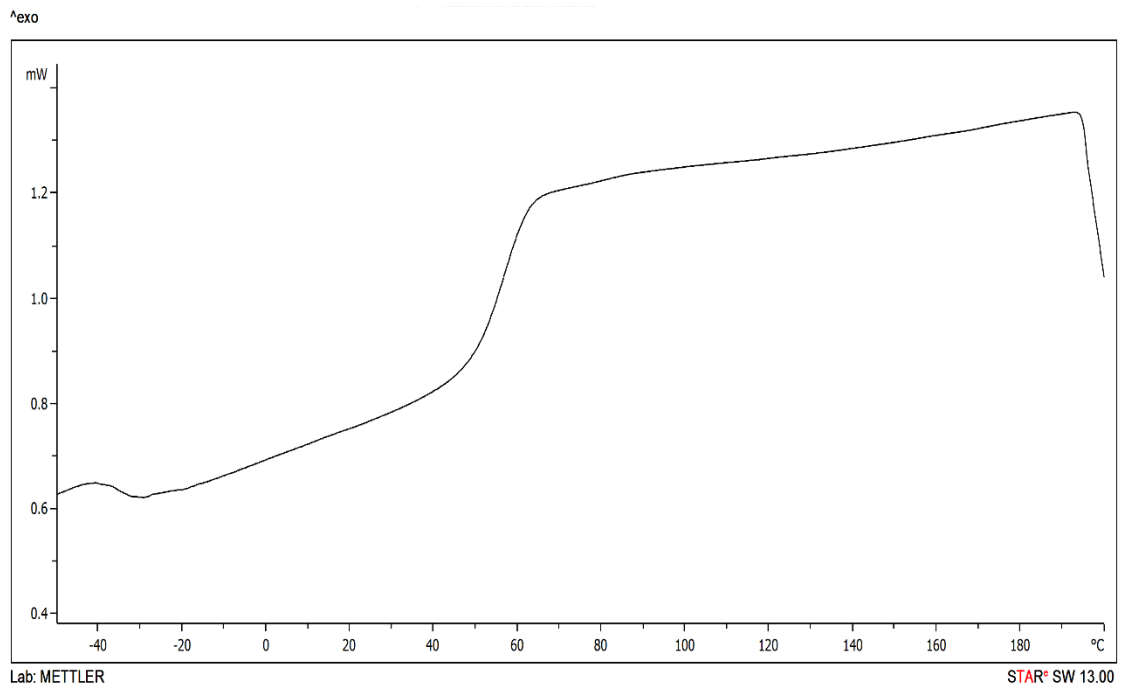
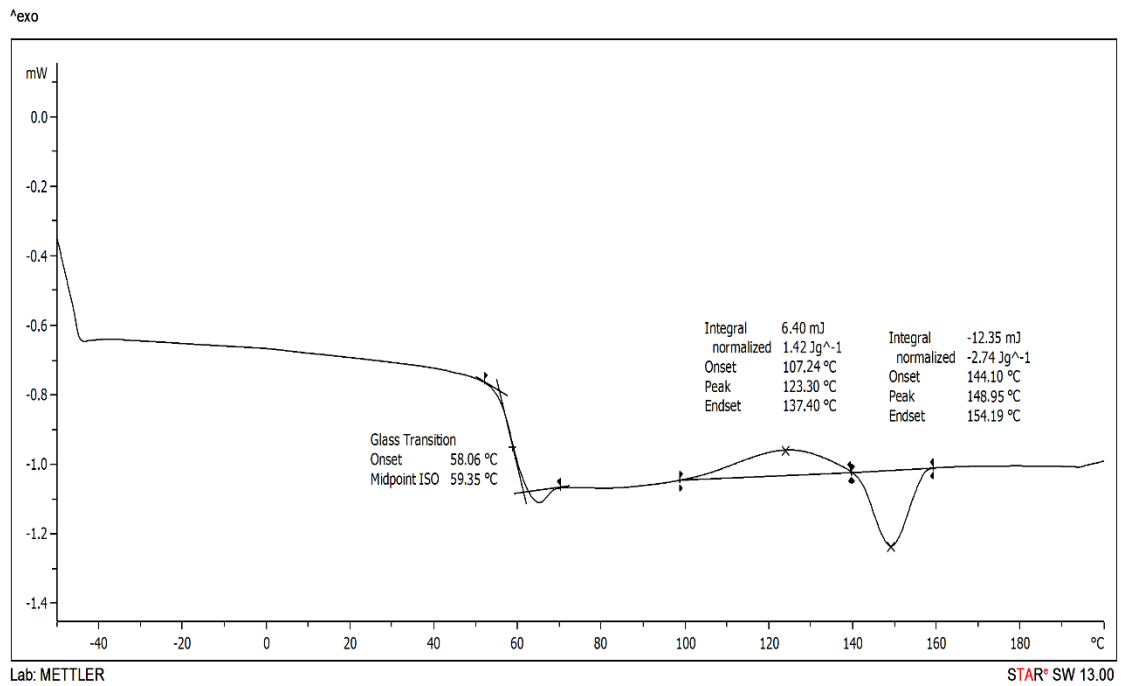
Sample	TS				E				EB			
	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120
0/0	39.1	42.5	42.8	44.0	1844	1948	1927	2037	16.4	17.5	16.3	18.0
	41.5	42.2	42.4	44.8	1894	1918	1946	2020	13.5	17.8	14.5	15.1
	41.8	44.4	41.5	43.2	1964	1992	1896	1949	17.1	19.7	14.9	14.5
Av.	40.8	43.0	42.2	44.0	1901	1953	1923	2002	15.7	18.3	15.2	15.9
SD.	1.5	1.2	0.7	0.8	60.5	37.5	24.8	46.3	1.9	1.2	0.9	1.9
0/30	35.9	35.9	36.9	36.9	3285	3072	3143	3002	4.9	5.5	6.6	12.9
	36.3	36.7	36.8	37.9	3125	3202	3383	3395	7.2	4.7	8.0	7.4
	36.4	36.0	37.1	37.8	3114	3011	3488	3284	5.0	8.0	5.2	3.9
Av.	36.2	36.2	36.9	37.5	3175	3095	3338	3227	5.7	6.1	6.6	8.1
SD.	0.3	0.5	0.1	0.6	95.7	97.5	177.1	202.3	1.3	1.7	1.4	4.5
10/20	40.0	39.2	40.1	36.4	3222	3033	3133	3190	3.1	3.3	3.2	2.2
	37.9	38.3	37.7	37.8	3032	2897	3223	2883	3.4	3.2	3.1	2.6
	37.8	36.7	35.8	39.5	2955	2962	3040	3192	3.2	3.1	3.1	3.3
Av.	38.6	38.1	37.9	37.9	3070	2964	3132	3088	3.2	3.2	3.1	2.7
SD.	1.2	1.3	2.1	1.6	137.6	68.2	91.5	178.0	0.1	0.1	0.1	0.6
15/15	36.8	37.4	37.9	38.6	3118	3146	3161	2951	3.2	2.9	3.4	2.9
	36.4	36.0	37.2	36.7	3008	2942	3059	3017	3.0	3.1	2.9	2.6
	36.3	37.4	35.6	36.1	3160	3068	3081	2894	2.8	3.0	3.0	2.7
Av.	36.5	36.9	36.9	37.1	3095	3052	3100	2954	3.0	3.0	3.1	2.7
SD.	0.2	0.8	1.2	1.3	78.6	103.0	53.3	61.7	0.2	0.1	0.3	0.2
20/10	37.9	37.4	38.5	39.4	2998	2847	3139	3004	3.2	3.0	3.2	2.9
	38.6	37.4	38.0	39.5	3089	2979	2948	2949	2.9	3.1	3.3	2.9
	35.6	36.3	36.5	38.0	3064	2908	2812	3041	3.2	3.0	2.9	2.6
Av.	37.4	37.0	37.7	38.9	3050	2911	2966	2998	3.1	3.0	3.1	2.8
SD.	1.6	0.7	1.0	0.8	46.8	66.2	164.6	46.5	0.2	0.1	0.2	0.2

ตารางที่ ข-2 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBAT, โพลีเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตที่อัตราส่วน WF/WT ต่างกันภายหลังจากการฝังดิน 30, 60, 90 และ 120 วัน (ต่อ)

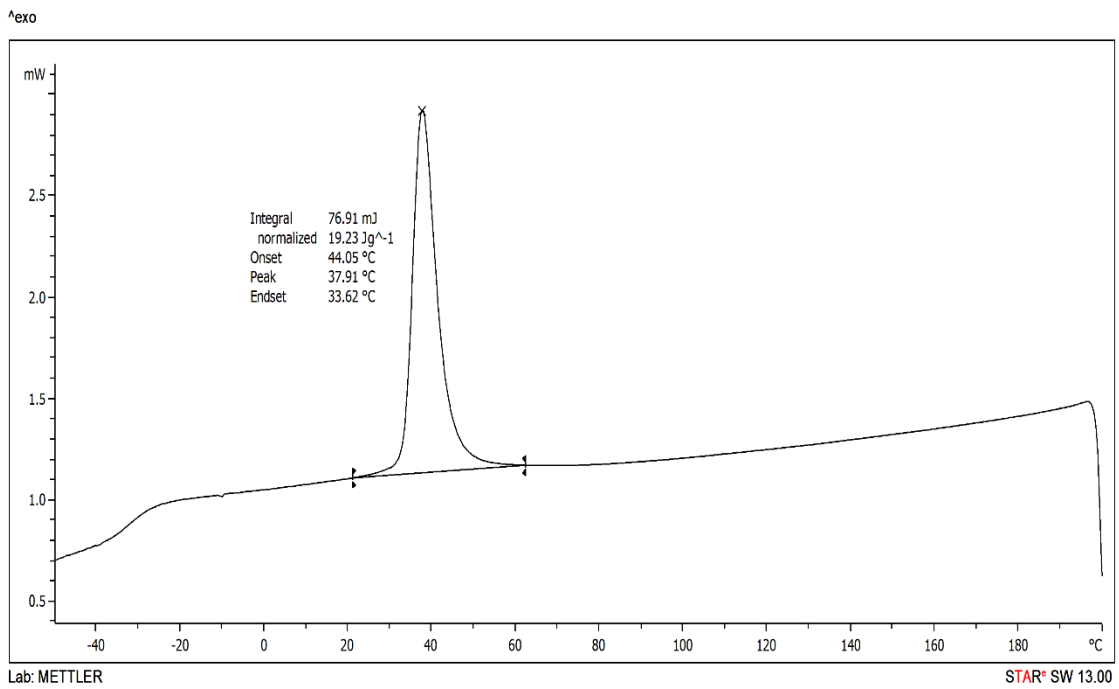
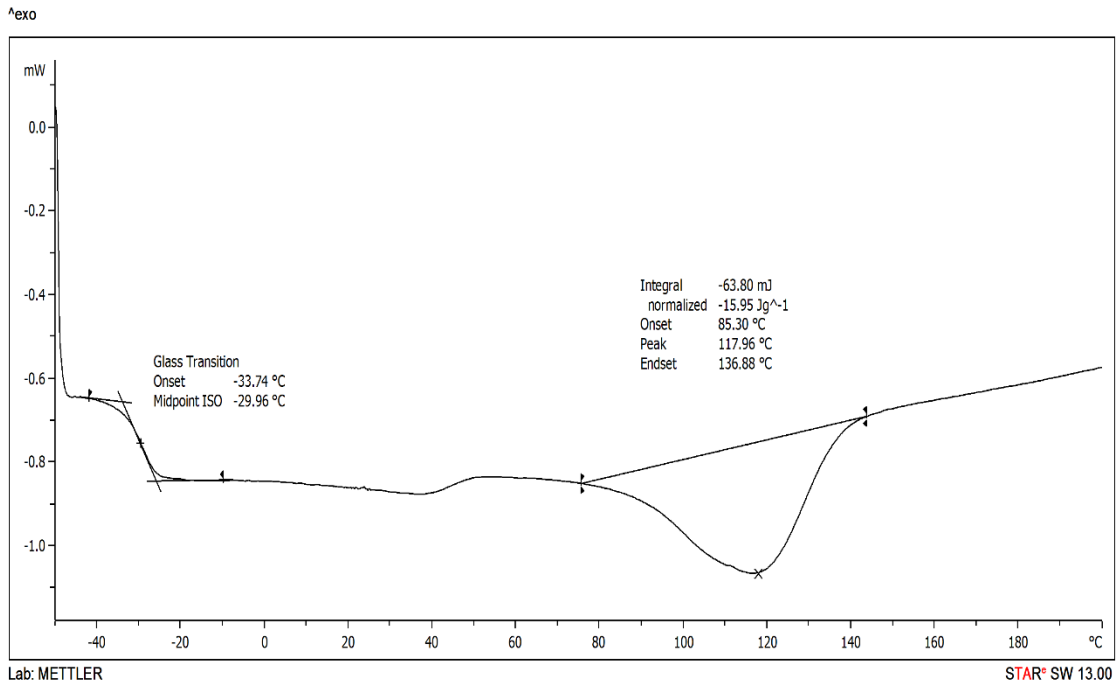
Sample	TS				E				EB			
	30	60	90	120	30	60	90	120	30	60	90	120
30/0	38.1	37.7	39.6	38.6	3101	3085	3245	3032	3.2	2.9	3.0	2.9
	36.7	36.7	37.6	38.8	3068	2899	3031	3068	3.2	3.0	3.0	2.7
	37.1	36.6	36.0	37.2	2963	2875	2941	2981	3.1	3.2	2.4	2.7
Avg.	37.3	37.0	37.7	38.2	3044	2953	3072	3027	3.1	3.0	2.8	2.8
SD.	0.7	0.6	1.8	0.9	71.5	114.9	156.2	43.6	0.1	0.2	0.4	0.1



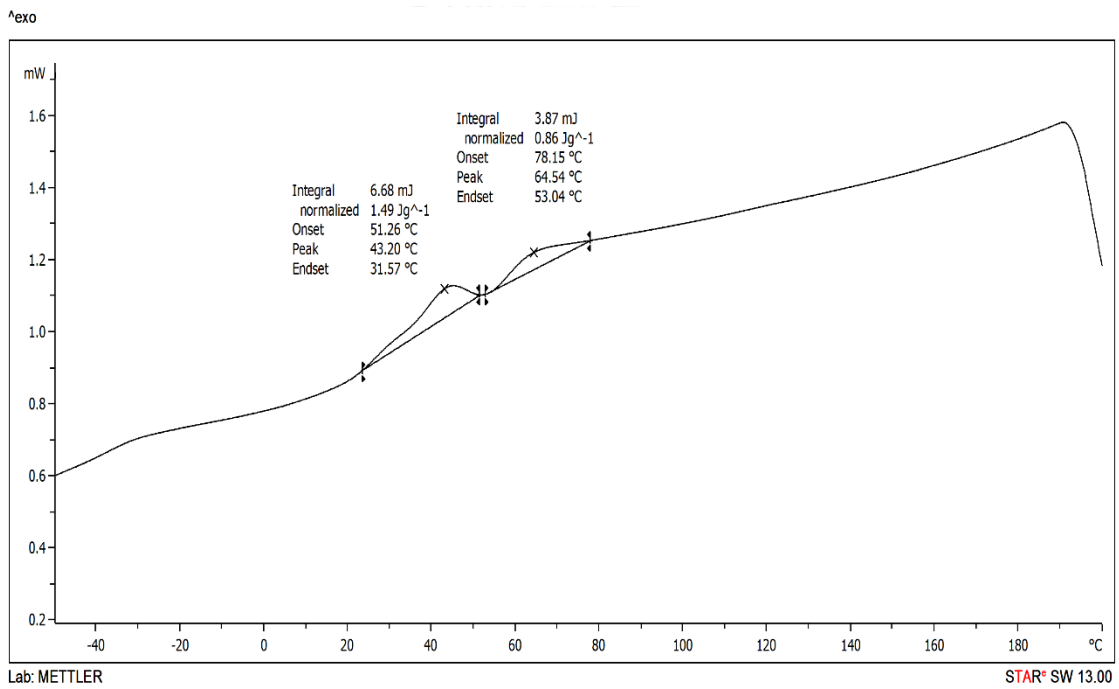
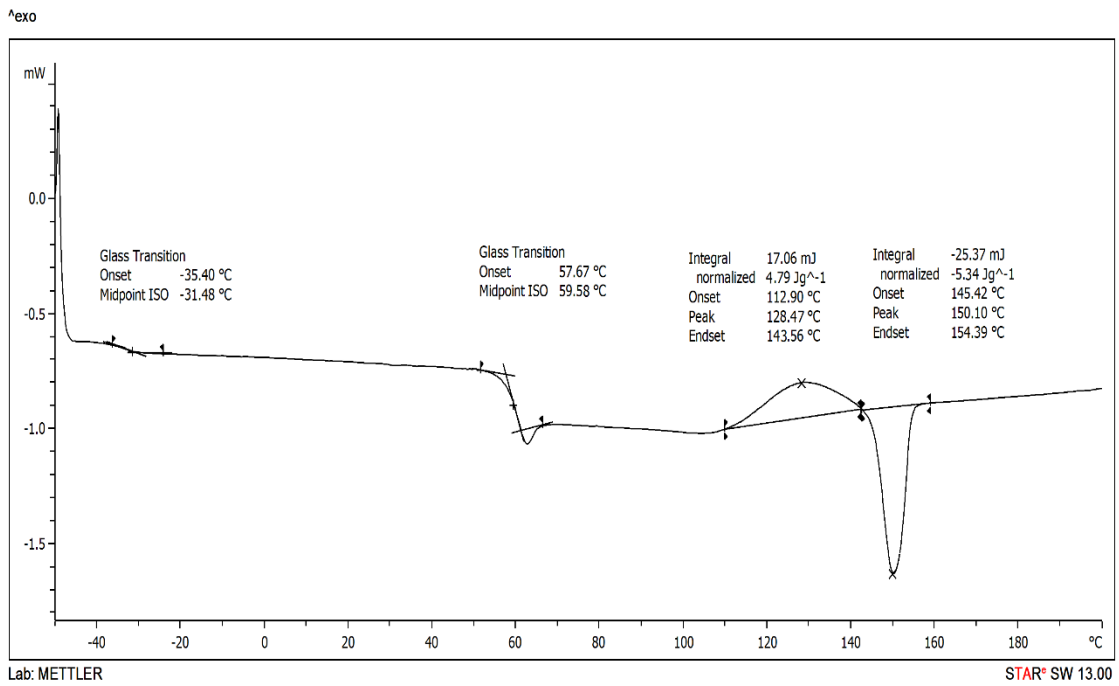
ภาคผนวก ค
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค DSC



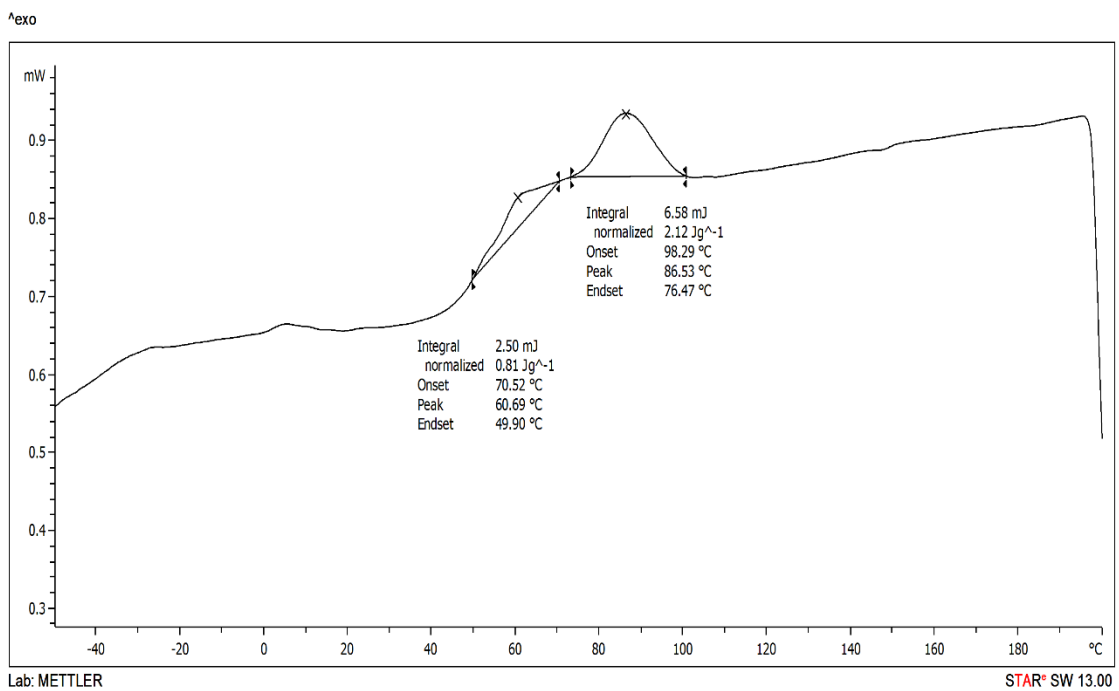
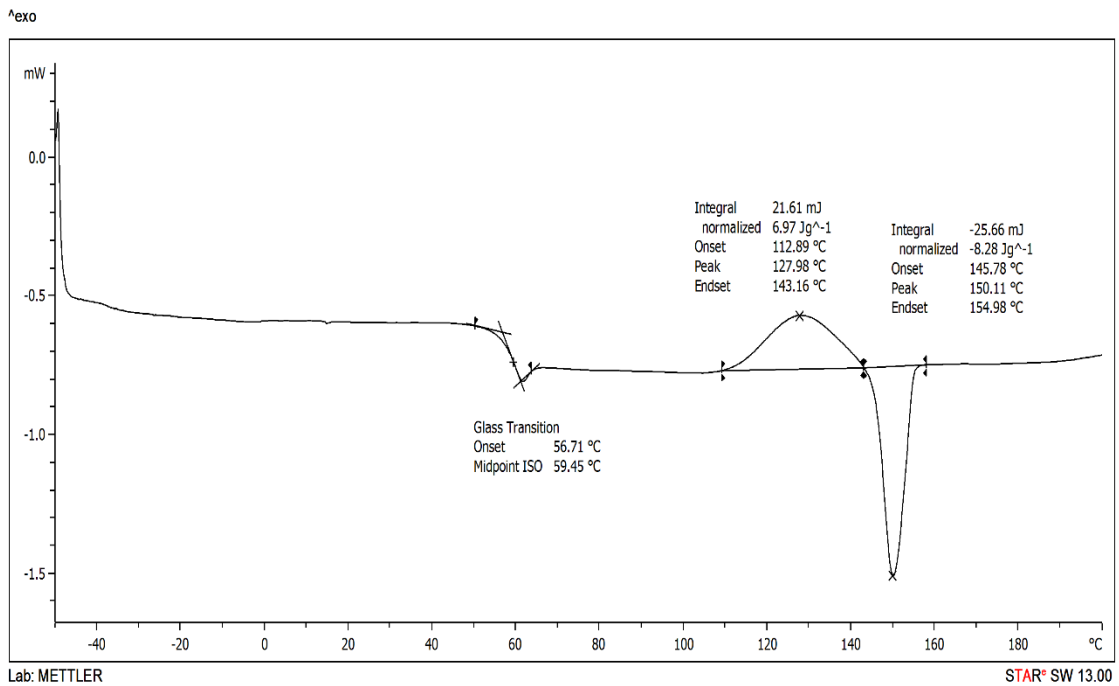
รูปที่ ค-1 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองและขั้นตอนการเย็นตัวของ PLA ตามลำดับ



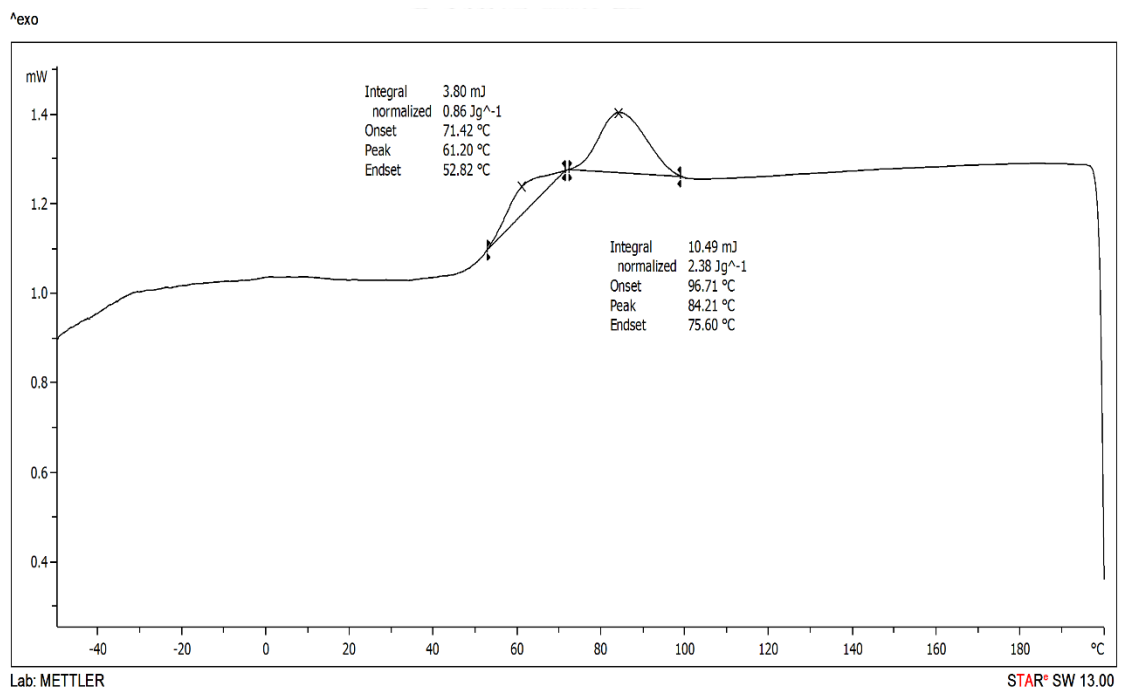
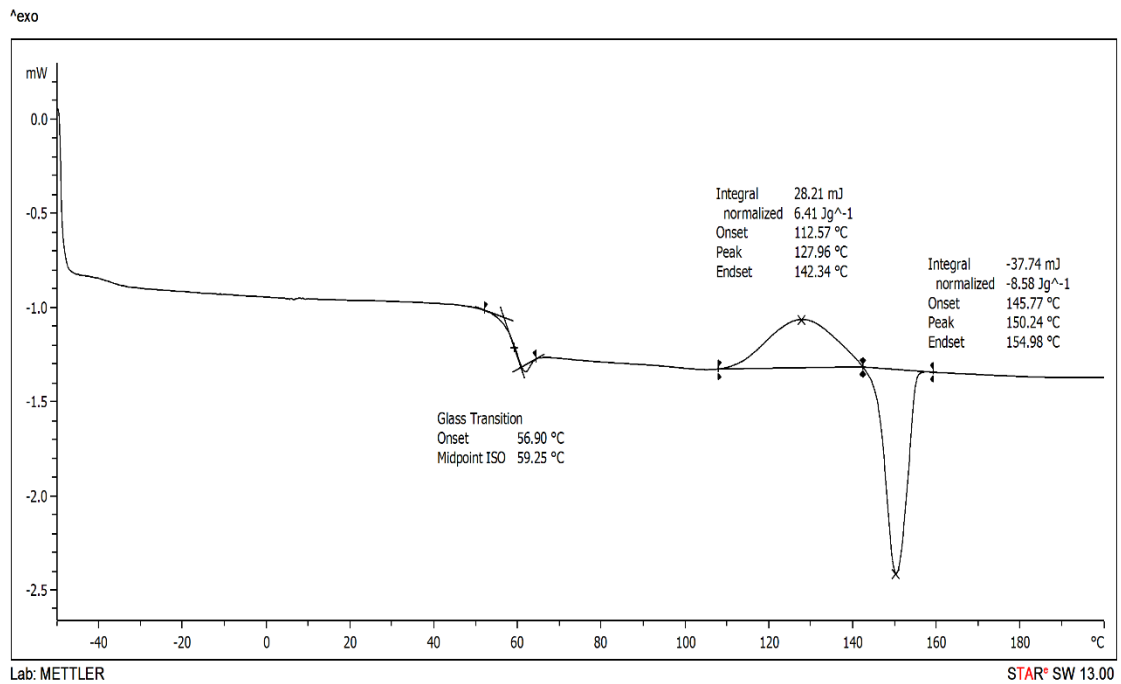
รูปที่ ค-2 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองและขั้นตอนการเย็นตัวของ PBAT ตามลำดับ



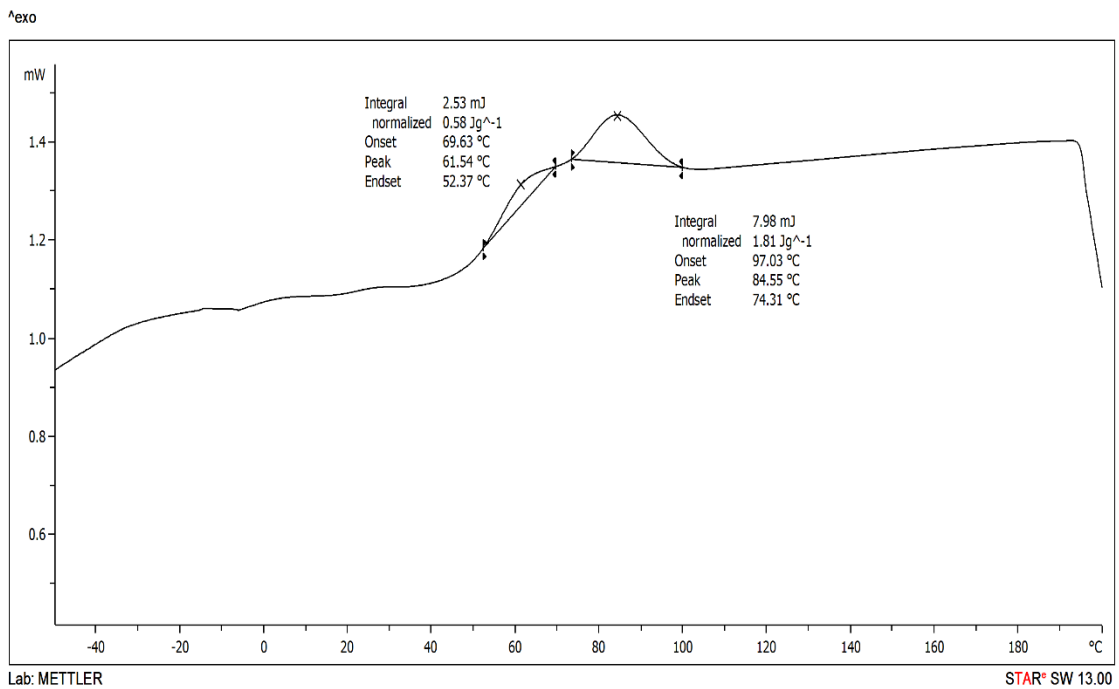
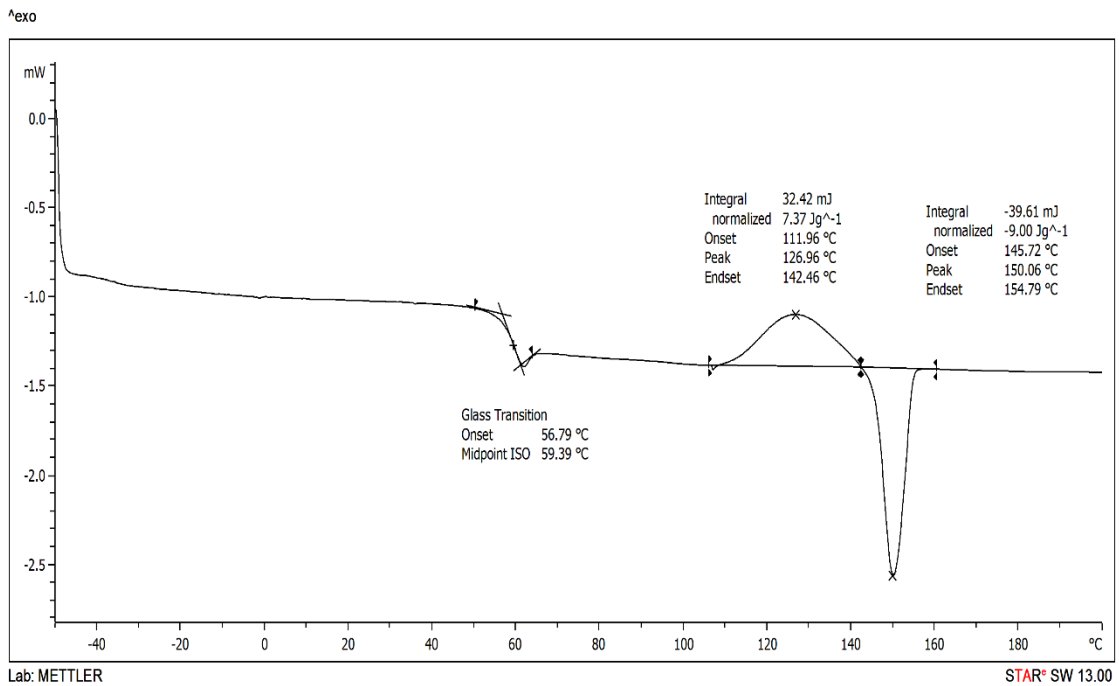
รูปที่ ค-3 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองและขั้นตอนการเย็นตัวของ
พอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT



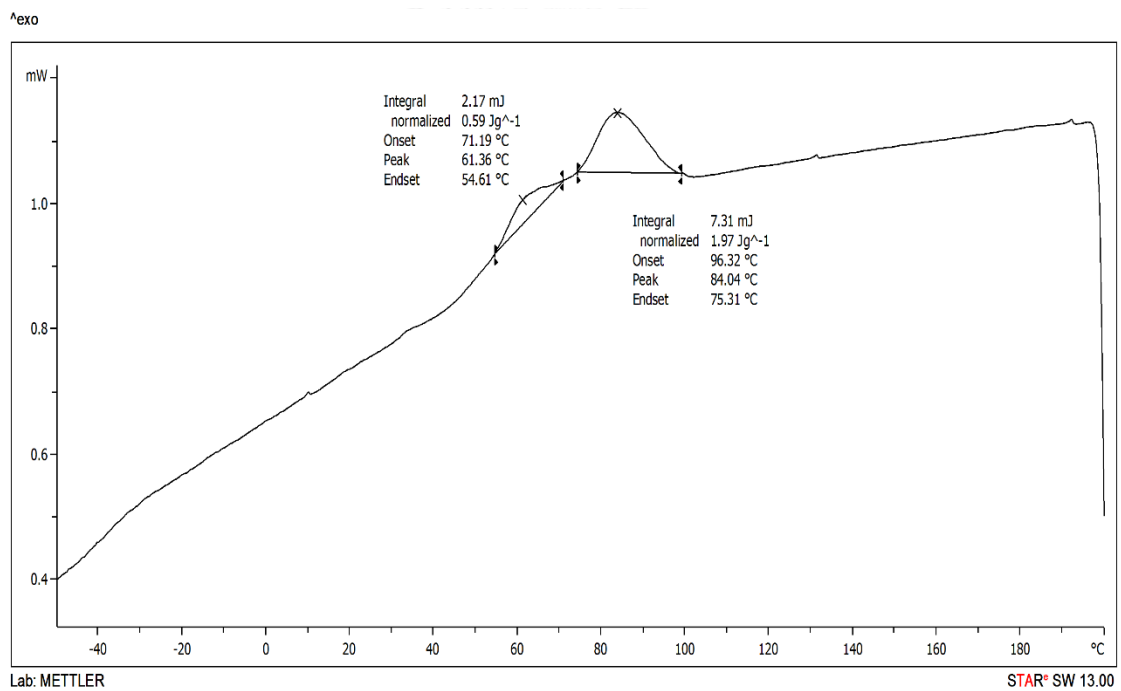
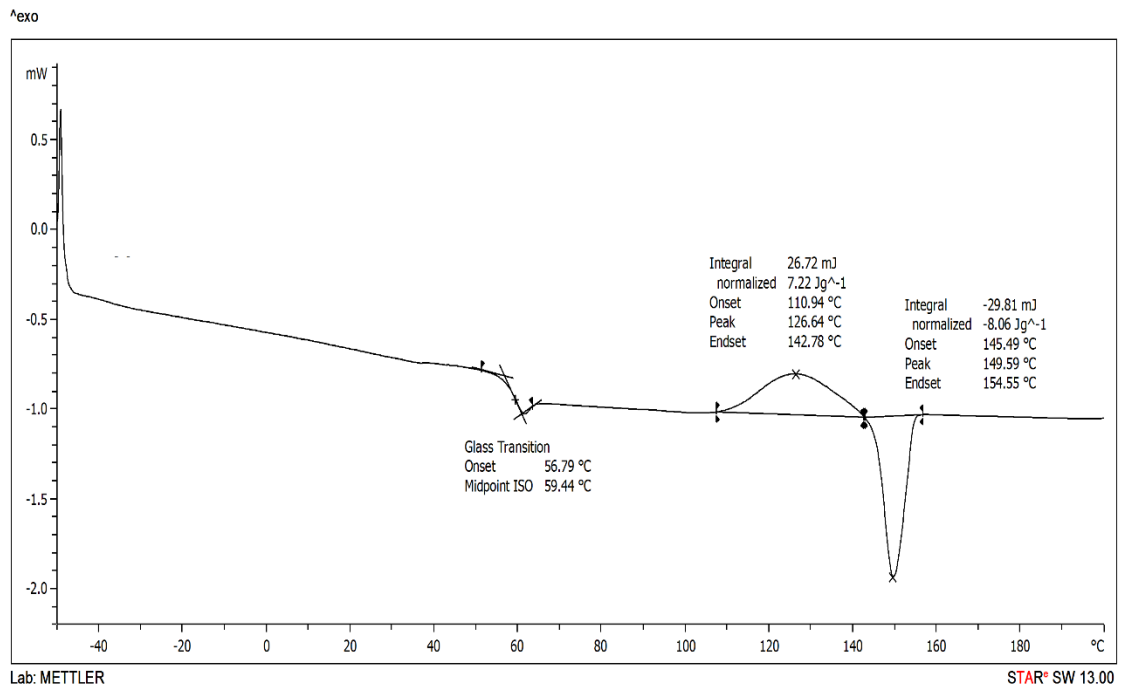
รูปที่ ค-4 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองและขั้นตอนการเย็นตัวของ
70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 0/30 WF/WT



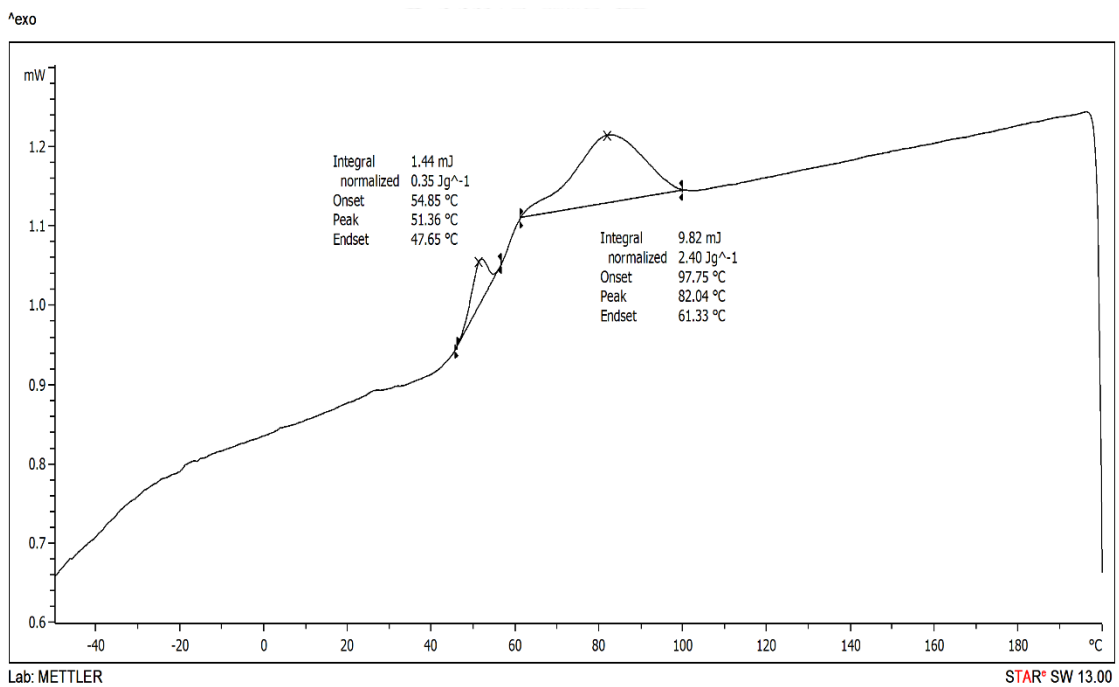
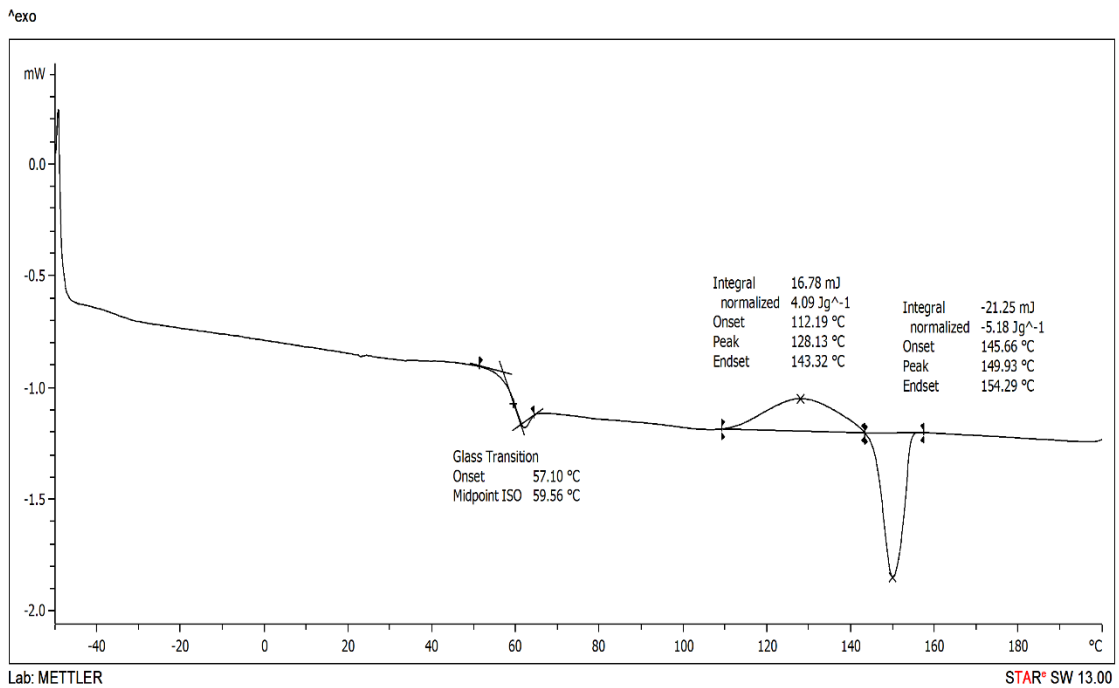
รูปที่ ค-5 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองและขั้นตอนการเย็นตัวของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 10/20 WF/WT



รูปที่ ค-6 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองและขั้นตอนการเย็นตัวของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 15/15 WF/WT

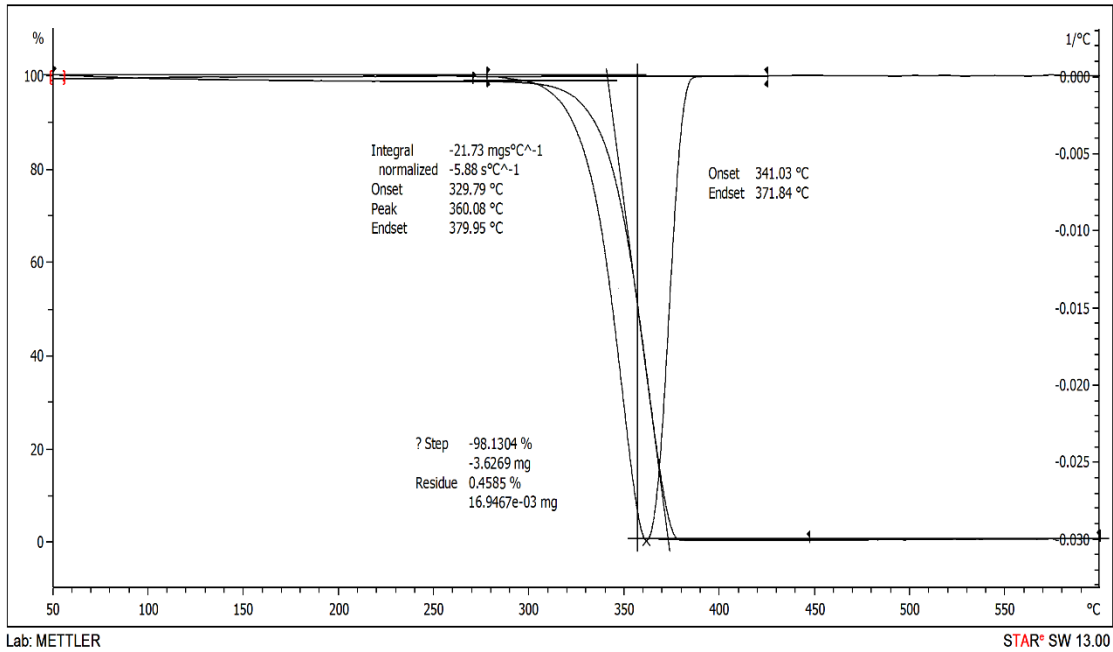


รูปที่ ค-7 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองและขั้นตอนการเย็นตัวของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 20/10 WF/WT

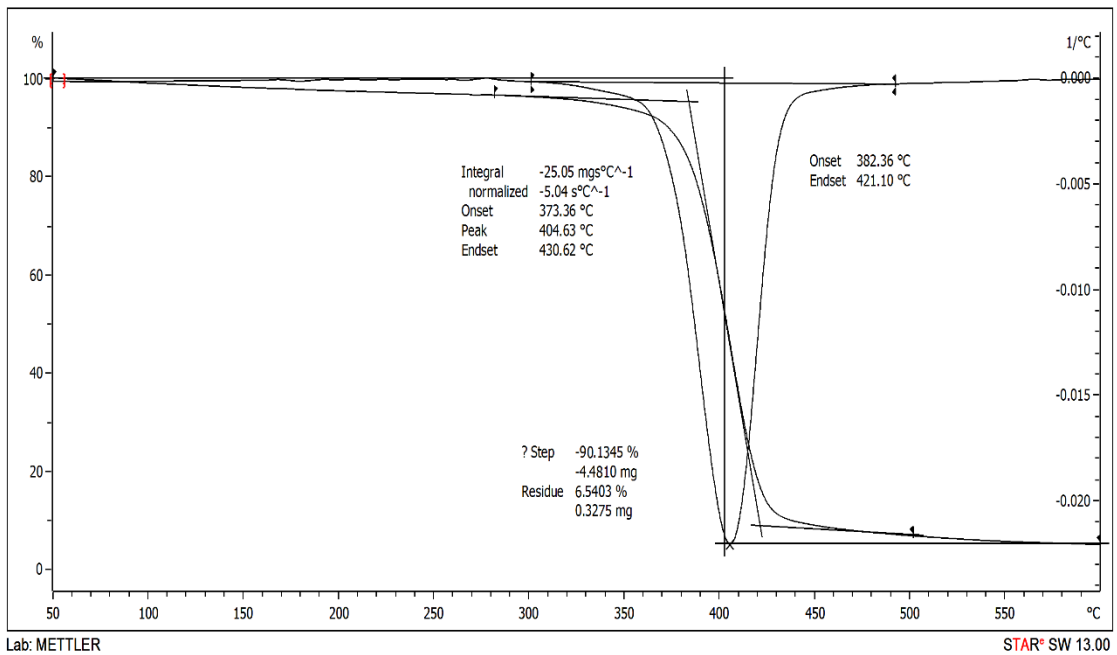


รูปที่ ค-8 DSC เทอร์โมแกรมในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่สองและขั้นตอนการเย็นตัวของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 30/0 WF/WT

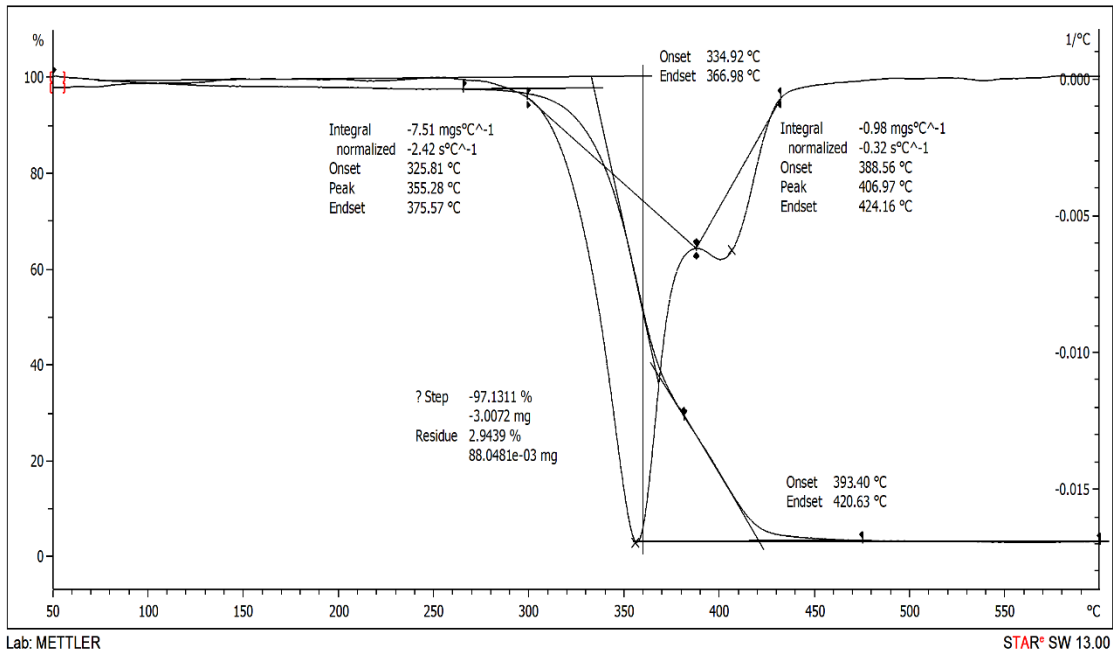
ภาคผนวก ง
เทอร์โมแกรมจากเทคนิค TGA



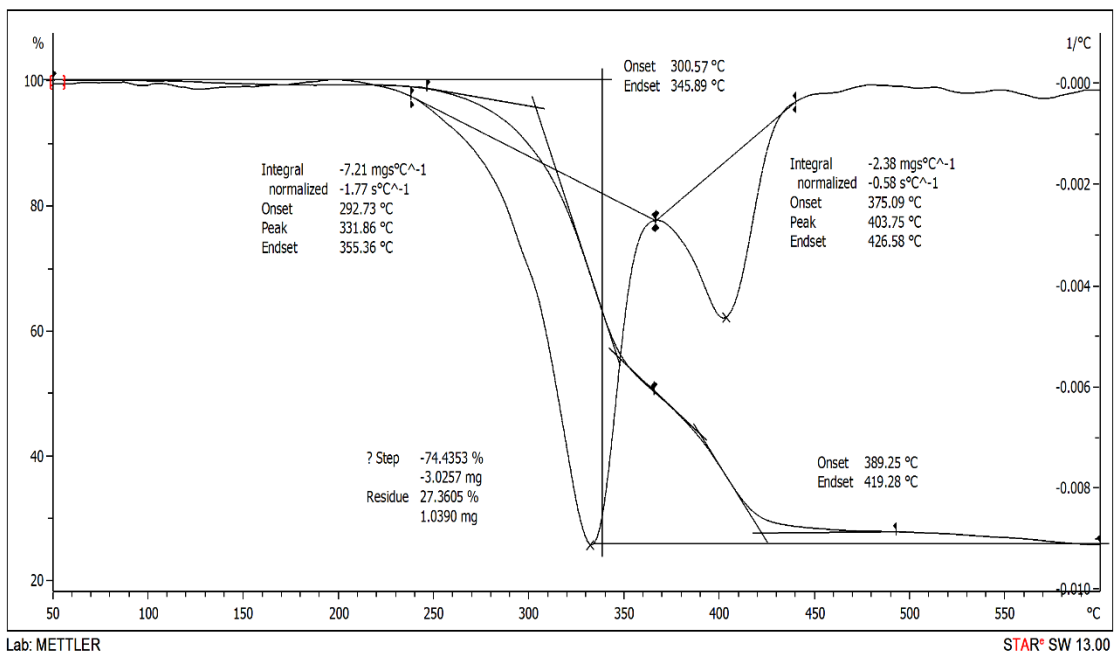
รูปที่ ง-1 TGA เทอร์โมแกรมของ PLA



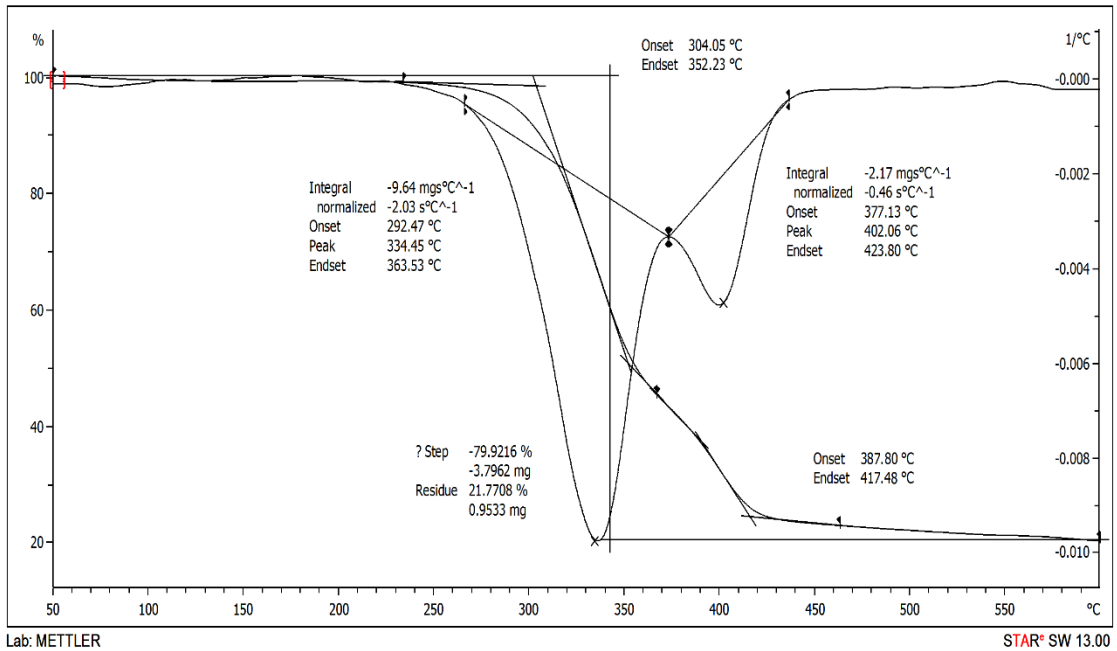
รูปที่ ง-2 TGA เทอร์โมแกรมของ PBAT



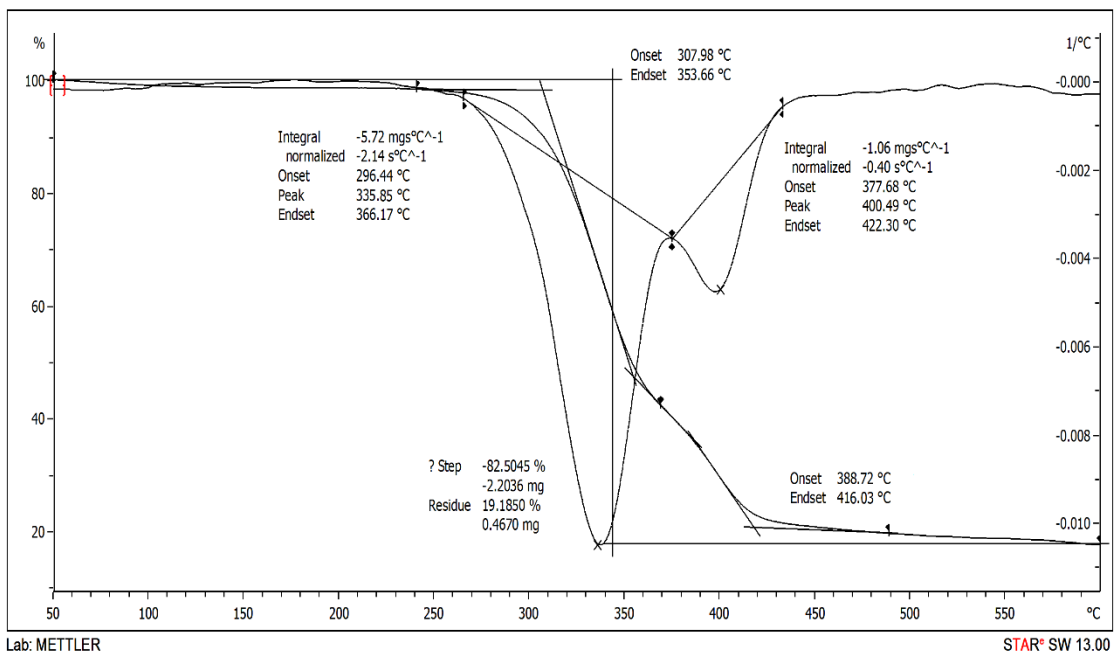
รูปที่ ง-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม 70/30 PLA/PBAT



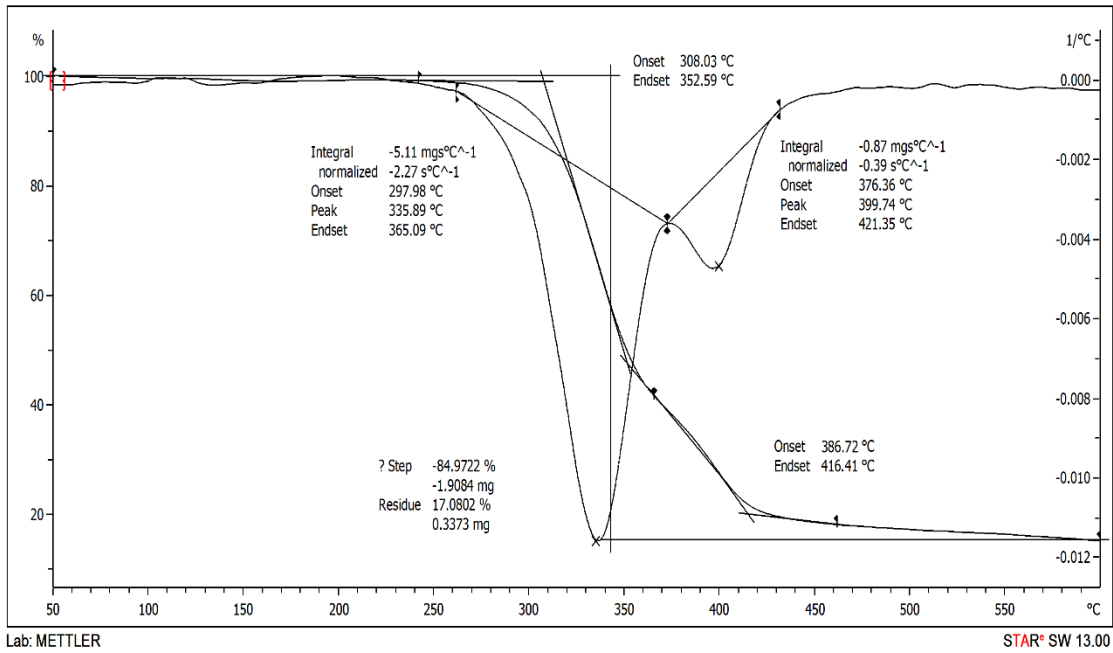
รูปที่ ง-4 TGA เทอร์โมแกรมของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 0/30 WF/WT



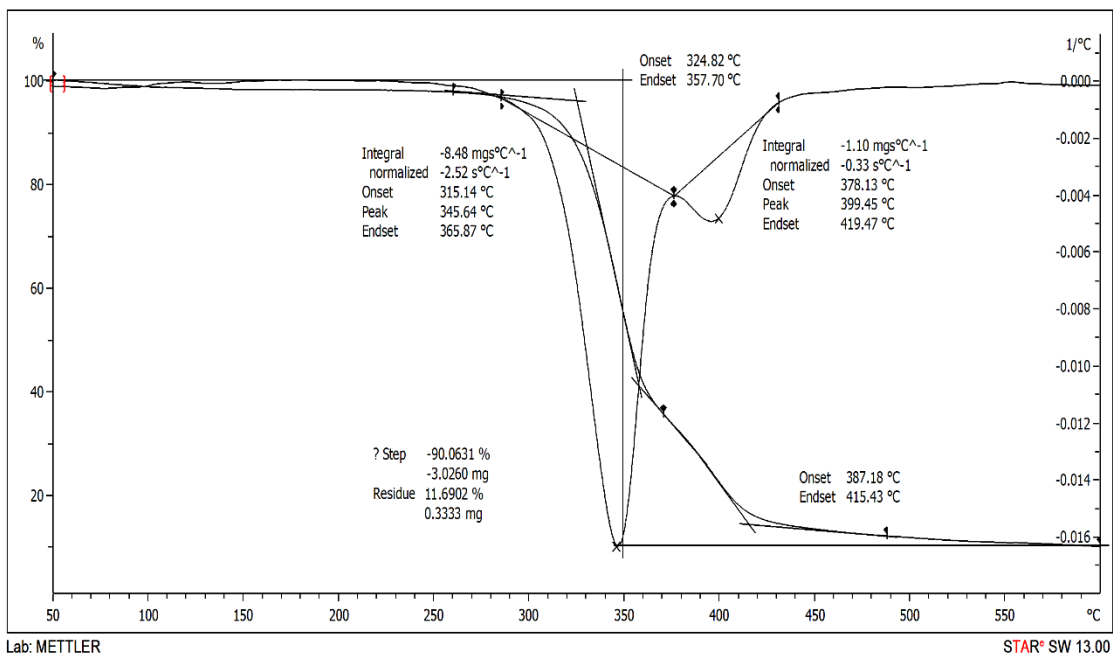
รูปที่ ง-5 TGA เทอร์โมแกรมของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 10/20 WF/WT



รูปที่ ง-6 TGA เทอร์โมแกรมของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 15/15 WF/WT



รูปที่ ง-7 TGA เทอร์โมแกรมของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 20/10 WF/WT



รูปที่ ง-8 TGA เทอร์โมแกรมของ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิตในอัตราส่วน 30/0 WF/WT

ภาคผนวก จ
อัตราการลามไฟ

ตาราง จ-1 อัตราการลามไฟของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT คอมพอสิต

PLA/PBAT/WF/WT (wt%/wt%/phr/phr)	Flame rate (mm/s)
PLA	1.53
	1.28
	1.42
Avg.	1.41
SD.	0.12
PBAT	3.17
	3.33
	3.32
Avg.	3.28
SD.	0.09
70/30/0/0	1.64
	1.66
	1.64
Avg.	1.64
SD.	0.01
70/30/0/30	3.29
	3.11
	3.23
Avg.	3.21
SD.	0.09

ตาราง จ-1 อัตราการลามไฟของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30 PLA/PBAT
คอมพอสิต

PLA/PBAT/WF/WT (wt%/wt%/phr/phr)	Flame rate (mm/s)
70/30/10/20	5.43
	5.56
	5.35
Avg.	5.45
SD.	0.10
70/30/15/15	5.15
	5.05
	5.35
Avg.	5.18
SD.	0.15
70/30/20/10	4.93
	4.59
	4.83
Avg.	4.78
SD.	0.17
70/30/30/0	3.94
	3.64
	3.66
Avg.	3.75
SD.	0.17

ภาคผนวก ฉ
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

ตาราง ฉ-1 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30
PLA/PBAT คอมพอสิตที่อัตราส่วน WF/WT ต่างกัน

Sample	Water absorption (%) /Days													
	1	2	3	4	5	6	7	21	35	49	63	77	91	105
PLA	0.3	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7
	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Avg.	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
PBAT	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.5
	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6
	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Avg.	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0/0	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9
Avg.	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
0/30	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	1.6	2.2	2.4	2.8	3.0	3.1	3.0
	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	1.6	2.2	2.4	2.8	2.9	3.0	2.8
	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	1.6	2.2	2.4	2.8	3.0	3.1	3.2
Avg.	0.4	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	1.6	2.2	2.4	2.8	3.0	3.0	3.0
10/20	0.8	1.1	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	3.2	3.7	3.5	3.6	3.5	3.4	3.4
	0.8	1.1	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	3.1	3.6	3.5	3.7	3.6	3.6	3.6
	0.7	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7	1.8	3.1	3.8	3.7	3.9	3.7	3.7	3.8
Avg.	0.8	1.1	1.2	1.3	1.5	1.7	1.8	3.2	3.7	3.6	3.7	3.6	3.6	3.6
15/15	0.8	1.2	1.3	1.5	1.7	2.0	2.1	3.7	4.2	4.1	4.4	4.2	4.2	4.2
	0.9	1.3	1.4	1.6	1.8	2.1	2.2	3.9	4.5	4.4	4.6	4.5	4.3	4.4
	0.9	1.3	1.4	1.6	1.8	2.1	2.2	3.8	4.5	4.5	4.7	4.6	4.5	4.5
Avg.	0.8	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.1	3.8	4.4	4.3	4.6	4.4	4.3	4.4

ตาราง ฉ-1 เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของ PLA, PBAT, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และ 70/30
PLA/PBAT คอมพอสิตที่อัตราส่วน WF/WT ต่างกัน (ต่อ)

Sample	Water absorption (%) /Days													
	1	2	3	4	5	6	7	21	35	49	63	77	91	105
20/10	1.2	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	2.7	4.5	5.1	4.9	5.2	5.2	5.1	5.2
	1.1	1.5	1.7	1.9	2.2	2.4	2.6	4.5	5.3	5.2	5.4	5.4	5.3	5.4
	1.1	1.5	1.7	1.9	2.2	2.5	2.6	4.5	5.3	5.2	5.5	5.5	5.4	5.4
Avg.	1.1	1.5	1.7	1.9	2.2	2.5	2.6	4.5	5.2	5.1	5.4	5.4	5.3	5.4
30/0	1.3	1.8	2.0	2.3	2.5	2.8	2.9	4.5	5.1	5.0	5.8	5.9	6.0	6.3
	1.4	1.9	2.1	2.4	2.6	3.0	3.1	4.6	5.1	5.2	5.6	5.8	5.8	7.9
	1.3	1.8	2.0	2.2	2.5	2.8	2.9	4.4	5.1	5.3	5.7	5.9	6.0	4.6
Avg.	1.3	1.8	2.0	2.3	2.5	2.9	3.0	4.5	5.1	5.2	5.7	5.9	5.9	6.2



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศรินทร์ญา สระสมทรัพย์ เกิดวันที่ 15 กันยายน 2533 สำเร็จการศึกษาปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและเทคโนโลยีการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2555
และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557

