

สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ผงไม้ที่แตกสลายทาง
ชีวภาพได้



นางสาวชุตินา ว่องไววัฒนกุล

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 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHYSICAL PROPERTIES OF BIODEGRADABLE POLY(LACTIC ACID)/POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/WOOD FLOUR BLENDS

Miss Chutima Wongwaiwattanakul



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ผงไม้ที่แตกสลายทางชีวภาพได้
โดย	นางสาวชุติมา ว่องไววัฒนกุล
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เก่งวลี พลุกษาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิมลรัตน์ ตระการพุกฤษ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อัญญาพร บุญมหิตธิสุทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. เข็มชัย เหมะจันทร์)

ชุตติมา ว่องไววัฒนกุล : สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ผงไม้ที่แตกสลายทางชีวภาพได้ (PHYSICAL PROPERTIES OF BIODEGRADABLE POLY(LACTIC ACID)/POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/WOOD FLOUR BLENDS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร, 75 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงความเหนียวและเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดด้วยการใส่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตและผงไม้ ชั้นแรกพอลิแล็กติกแอซิดถูกผสมแบบหลอมเหลวกับพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 5 อัตราส่วน (ร้อยละ 10-50) ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ตามด้วยการอัดแบบ ซึ่งสมบัติที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ได้แก่ ความทนแรงกระแทก (ร้อยละ 30 สูงที่สุด) การยืดตัว ณ จุดขาด (ร้อยละ 30 สูงที่สุด) ระดับความเป็นผลึก (ร้อยละ 20 สูงที่สุด) และเสถียรภาพทางความร้อน (ร้อยละ 50 สูงที่สุด) เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิด แต่ความทนแรงดึง ยังสม่ำเสมอ และความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลงตามปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่อัตราส่วน 70/30 มีความทนแรงกระแทกและการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุด จึงเลือกไปเตรียมคอมพอสิตด้วยผงไม้ 5 อัตราส่วน (5-30 ส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม 100 ส่วน) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ผงไม้ช่วยปรับปรุงยังสม่ำเสมอ (เฉพาะใส่ผงไม้ 15 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม 100 ส่วน) และการยืดตัว ณ จุดขาด (เฉพาะใส่ผงไม้ 5 โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม 100 ส่วน) ขณะที่ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง ความทนแรงดัดโค้ง และเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตลดลงตามปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตที่เพิ่มขึ้น และระดับความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ ยังนำผงไม้ที่ถูกดัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนักของผงไม้ เพื่อเตรียมคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ผงไม้ที่อัตราส่วน 70/30/10 และ 70/30/15 ซึ่งพบว่า การใส่ผงไม้ที่ถูกดัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลน (ส่วนใหญ่ที่ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของผงไม้) ทำให้คอมพอสิตมีความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด ความทนแรงดัดโค้ง และเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ไม่ถูกดัดแปรในปริมาณเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างผงไม้และเมทริกซ์

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5472233523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: POLY(LACTIC ACID) / POLY(BUTYLENE SUCCINATE) / WOOD FLOUR / MECHANICAL PROPERTIES / THERMAL BEHAVIOR / BIODEGRADABLE PLASTICS

CHUTIMA WONGWAIWATTANAKUL: PHYSICAL PROPERTIES OF BIODEGRADABLE POLY(LACTIC ACID)/POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/WOOD FLOUR BLENDS. ADVISOR: PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHAUYJULJIT, 75 pp.

This research aimed to improve the toughness and thermal stability of poly(lactic acid) (PLA) by incorporating poly(butylene succinate) (PBS) and wood flour (WF). PLA was first melt mixed with five loadings of PBS (10-50 wt%) in a twin screw extruder, followed by compression molding. The PLA/PBS blends provided a dose-dependent increase in the impact strength (optimal at 30 wt%), elongation at break (optimal at 30 wt%), degree of crystallinity (optimal at 20 wt%) and thermal stability (optimal at 50 wt%) as compared with those of the neat PLA, but the tensile strength, Young's modulus and flexural strength were deteriorated with increasing PBS content. Based on the optimum impact strength and elongation at break, the 70/30 PLA/PBS blend was selected for preparing composites with five loadings of WF (5-30 phr). The results showed that the composites exhibited an improvement in the Young's modulus (only at 15 phr) and elongation at break (only at 5 phr), while the impact strength, tensile strength, flexural strength and thermal stability decreased with increasing WF content; and the degree of crystallinity was slightly increased compared to those of the neat 70/30 PLA/PBS blend. In addition, the WF was also modified with 1-3 wt% silane coupling agent to prepare the 70/30/10 and 70/30/15 PLA/PBS/WF composites. It was found that the composites filled with a modified WF (mostly at 3 wt% silane coupling agent) showed an improve in the impact strength, tensile strength, elongation at break, flexural strength and thermal stability compared to those filled with the unmodified WF at the same loading level. This was due to the increased interfacial adhesion between WF and matrix.

Field of Study: Petrochemistry and Student's Signature

Polymer Science Advisor's Signature

Academic Year: 2014 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เพราะได้รับความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องตั้งรายนาม ต่อไปนี้

ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ การแก้ไขปัญหา การสนับสนุนทุนในการวิจัย รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ดร.พศวรรษน์ ชัยวุฒินันท์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกด้านต่างๆ ระหว่างดำเนินการวิจัย อาจารย์ในภาควิชาวัสดุศาสตร์ที่อบรมความรู้และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์สำหรับการดำเนินงานวิจัย

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ และ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้คำปรึกษาที่ให้การสนับสนุนในการวิจัย ด้านวัสดุ อุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ ระหว่างดำเนินการวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง และครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และให้ช่วยเหลือด้านต่างๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)	4
2.1.1 ข้อดีของ PLA	4
2.1.2 ข้อเสียของ PLA.....	5
2.1.3 สมบัติของ PLA.....	6
2.1.4 การใช้งานของ PLA.....	6
2.1.5 การผสม (Blending)	6
2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS).....	7
2.2.1 สมบัติของ PBS.....	7
2.2.2 การใช้งานของ PBS	8
2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics).....	8

2.4 คอมพอสิต (Composites)	9
2.4.1 พอลิเมอร์คอมพอสิต (Polymer composites).....	9
2.4.2 ผงไม้ (Wood flour).....	10
2.5 สารคู่ควบ (Coupling agents).....	11
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	15
3.1 วัตถุประสงค์.....	15
3.2 เครื่องผสมและเครื่องขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	16
3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ	16
3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง	17
3.5 การทดลอง.....	18
3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม	18
3.5.2 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ	19
3.5.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	21
3.5.4 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต	26
3.5.5 การเตรียมการดัดแปรผิวผงไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลน	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	28
4.1 ลักษณะขึ้นทดสอบ	28
4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และคอมพอสิต PLA/PBS/WF	29
4.2.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength).....	30
4.2.2 สมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile properties).....	32
4.2.3. ความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength)	38
4.3 พฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และคอมพอสิต PLA/PBS/WF	40

4.3.1. วิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)	40
4.3.2. วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (TGA)	43
4.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption).....	48
4.5 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	50
4.6 การทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน	54
4.6.1 สัณฐานวิทยา.....	54
4.6.2 สมบัติเชิงกล	56
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุปผลการทดลอง	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
รายการอ้างอิง	60
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC.....	65
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA.....	69
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบสัณฐานวิทยา SEM.....	72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	75

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PLA.....	4
รูปที่ 2.2 การผลิต PLAจากกระบวนการเปิดวงของแล็กไทด์	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ PBS.....	7
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PBS จากกรดซัคซินิก และ 1,4 บิวเทนไดออล	7
รูปที่ 2.5 ผงไม้ Lignocel (เกรด C120).....	10
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบไซเลน	11
รูปที่ 2.7 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างวัสดุอนินทรีย์และสารคู่ควบไซเลน	12
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ..	17
รูปที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่รุ่น Scientific LW-100	19
รูปที่ 3.3 แม่แบบสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดแบบ	20
รูปที่ 3.4 ขึ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ	20
รูปที่ 3.5 เครื่องอัดแบบรุ่น LP S-20.....	20
รูปที่ 3.6 ขนาดขึ้นทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256	22
รูปที่ 3.7 ขึ้นทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก	23
รูปที่ 3.8 ขนาดขึ้นทดสอบดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภท IV.....	23
รูปที่ 3.9 ขึ้นทดสอบรูปดัมเบลล์สำหรับทดสอบความทนแรงดึง	24
รูปที่ 3.10 ขึ้นทดสอบสำหรับทดสอบความทนแรงดัดโค้ง.....	24
รูปที่ 3.11 ขึ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ	25
รูปที่ 3.12 ขึ้นทดสอบสำหรับการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ	26
รูปที่ 4.1 ขึ้นทดสอบของ (a) PLA, (b) PBS และ (c-g) พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 90/10,	28

รูปที่ 4.2 ชั้นทดสอบของพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน (a) 70/30/5, (b)..... 28

รูปที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกของ PLA, PBS และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ 30

รูปที่ 4.4 ความทนแรงกระแทกของ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ 31

รูปที่ 4.5 ความทนแรงกระแทกของ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่เตรียมจากผงไม้ที่ตัดแปรรและไม้ตัดแปรร 32

รูปที่ 4.6 สมบัติด้านความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งสัมมอดูลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด 33

รูปที่ 4.7 สมบัติด้านความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งสัมมอดูลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด 35

รูปที่ 4.8 สมบัติด้านความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งสัมมอดูลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด 37

รูปที่ 4.9 ความทนแรงดัดโค้งของ PLA, PBS และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ 38

รูปที่ 4.10 ความทนแรงดัดโค้งของ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ 39

รูปที่ 4.11 ความทนแรงดัดโค้งของ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่เตรียมจากผงไม้ที่ตัดแปรร 39

รูปที่ 4.12 TGA เทอร์โมแกรมของ (a) PLA, PBS และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS อัตราส่วนต่างๆ . 43

รูปที่ 4.13 TGA เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตที่ใช้ผงไม้ที่ตัดแปรรและไม้ตัดแปรรด้วยสารคู่ควบไซเลน..... 46

รูปที่ 4.14 ปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมและจำนวนวันที่แช่น้ำของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม..... 48

รูปที่ 4.15 ปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมและจำนวนวันที่แช่น้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิต 49

รูปที่ 4.16 สันฐานวิทยาของผงไม้ภายใต้กำลังขยาย (a) 100 เท่า และ (b) 500 เท่า..... 50

รูปที่ 4.17 สันฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชั้นทดสอบของ (a) PLA, (b) PBS และ (c-g) 51

รูปที่ 4.18 สันฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน . 52

รูปที่ 4.19 สันฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน . 53

รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) PBS, (c) พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 70/30, 55

รูปที่ 4.21 (a) ความทนแรงดึง (b) ยิงสัสมอดูลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA, PBS,..... 57



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของผงไม้ Lignocel (เกรด C120)	11
ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด เกรด 4043D	15
ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เกรด FZ91P	16
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม	18
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ไม่ได้ตัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน.....	26
ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ตัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบ ...	26
ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	29
ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมทางความร้อนและระดับการเกิดผลึกของ PLA ล้วน และของ PLA.....	40
ตารางที่ 4.3 พฤติกรรมทางความร้อนและระดับการเกิดผลึกของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ตัดแปร	42
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัวและปริมาณชาร์ของผงไม้, PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม	44
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวและปริมาณชาร์ของ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ตัดแปร.....	47
ตารางที่ 4.6 สมบัติด้านความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์ และ การยืดตัว ณ จุดขาด) ของพอลิเมอร์.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุที่ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์เพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยได้ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์ จนทำให้อุตสาหกรรมพลาสติกเติบโตอย่างรวดเร็ว จึงก่อให้เกิดปัญหาของขยะพลาสติกที่ถูกทิ้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมภายหลังการใช้งานตามมา จนกลายเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดมลพิษด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากพลาสติกส่วนใหญ่มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมและการย่อยสลายทางชีวภาพสูงมาก [1] ซึ่งอาจจำเป็นต้องใช้เวลานานนับร้อยปีกว่าจะสลายตัวได้หมด ทั้งนี้เพราะพลาสติกเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก จึงทำให้มีความทนทานต่อการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ นอกจากนี้ พลาสติกที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และมีความพรุนตัวต่ำจะทำให้เอนไซม์ที่ปลดปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ซึมผ่านตัวกลางที่เป็นน้ำเข้าไปสัมผัสภายในของพลาสติกได้น้อย จึงเป็นการยากที่พลาสติกเหล่านี้จะถูกทำให้ย่อยสลายทางชีวภาพ ซึ่งการกำจัดขยะพลาสติกด้วยวิธีรีไซเคิล (recycle) จัดเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดขยะพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่จากข้อมูลทางสถิติ พบว่า ในแต่ละปีประเทศไทยมีขยะพลาสติกรวมกันได้ประมาณ 2.7 ล้านตัน ซึ่งถูกนำไปรีไซเคิลเพียง 0.2 ล้านตันเท่านั้น [2] โดยขยะพลาสติกที่เหลือจะถูกนำไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ เผาทิ้ง และเผาให้ได้สารเชื้อเพลิง เป็นต้น นอกนั้นยังคงตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมอีกเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม การกำจัดด้วยวิธีดังกล่าวเหล่านี้จำเป็นต้องเผชิญกับปัญหาด้านต้นทุนการดำเนินการที่สูง รวมทั้งที่ดินที่จะนำขยะพลาสติกไปฝังกลบจะหาได้ยากขึ้นและมีราคาสูงอีกด้วย และยังอาจได้รับการต่อต้านจากประชาชนที่อยู่บริเวณใกล้เคียง ตลอดจนก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศซึ่งได้จากการปลดปล่อยสารพิษในขณะที่ขยะพลาสติกถูกเผาทำลาย ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่ายังไม่มีวิธีที่ได้ผลดีและมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะกำจัดขยะพลาสติกที่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นในแต่ละวัน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้นักวิจัยจำนวนมากพยายามหาแนวทางแก้ไขหรือลดปัญหาต่างๆ เหล่านี้ รวมถึงการพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) ซึ่งกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในหลายๆ ประเทศ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสอนุรักษ์ธรรมชาติและ ความตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังมีกฎระเบียบข้อบังคับด้านสิ่งแวดล้อมที่ได้ผลักดันให้เกิดการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะส่งผลให้ความต้องการพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในตลาดโลกมีอัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น การค้นคว้า พัฒนาและปรับปรุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้มีคุณภาพที่ใช้งานได้ดีและมีความหลากหลาย รวมทั้งมี

ต้นทุนการผลิตที่ต่ำลงจึงควรได้รับการสนับสนุนทั้งจากทางภาครัฐและเอกชนเพื่อให้สามารถนำไปใช้ทดแทนพลาสติกเชิงพาณิชย์ (conventional plastics) และต่อยอดสู่อุตสาหกรรม ทั้งนี้เพื่อให้ก้าวทันกระแสโลกและสอดคล้องกับนโยบายและแนวทางอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม ขณะนี้ได้มีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้ในทางการค้าบ้างแล้ว ซึ่งได้รับความสนใจและประสบความสำเร็จในระดับหนึ่ง ทั้งนี้อาจเนื่องจากข้อจำกัดด้านคุณภาพและราคาของผลิตภัณฑ์ที่ทำให้ยังไม่มี การนำมาใช้แพร่หลายมากนัก โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด [poly(lactic acid), PLA] ซึ่งเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุชีวมวล (biomass) ที่ได้จากพืชที่มีแป้งและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และอ้อย เป็นต้น โดยการนำไปเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสม (polymer blends) และ/หรือพอลิเมอร์คอมพอสิต (polymer composites) จากวัตถุดิบที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้เช่นกัน ซึ่งได้แก่ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [poly(butylene succinate), PBS] และผงไม้ (wood flour) ทั้งนี้เพื่อเตรียมผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยจะสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้อย่างสมบูรณ์เมื่อถูกทิ้งเข้าสู่ระบบนิเวศน์วิทยาภายหลังการใช้งานด้วยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อม เช่น แแบคทีเรีย รา และสาหร่าย เป็นต้น โดยสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้จะถูกทำให้เปลี่ยนเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือแก๊สมีเทน และวัสดุชีวมวลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำในขั้นตอนสุดท้าย นอกจากนี้ ประเทศไทยยังมีศักยภาพและความพร้อมในการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพเหล่านี้ได้เป็นอย่างดี เพราะเป็นประเทศที่มีทรัพยากรทางการเกษตรจำนวนมากที่สามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพอลิแล็กติกแอซิด ซึ่งนอกจากจะได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมแล้วยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตผลทางการเกษตรของประเทศอีกด้วย นอกจากนี้ ผงไม้ที่ใช้เป็นสารตัวเติม (filler) ยังเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานค้าไม้ที่มีเป็นจำนวนมาก และมีราคาถูกเมื่อเทียบกับสารตัวเติมประเภทอื่น ๆ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางหรือทางเลือกในการนำผงไม้ไปเพิ่มมูลค่าและใช้ให้เกิดประโยชน์ รวมทั้งมีส่วนร่วมในการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งถ้างานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากวัตถุดิบหลักดังกล่าว (พอลิแล็กติกแอซิด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และผงไม้) ที่มีทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนเหมาะสมกับการใช้งานโดยจะยังสามารถขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกทั่วไปอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เตรียมพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิแล็กติกแอซิด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และ ผงไม้
2. ศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพลาสติกที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เม็ดพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ พอลิแล็กติกแอซิด ชื่อทางการค้า Ingeo เกรด 4032D ผลิตโดยบริษัท NatureWorks LLC , พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ชื่อทางการค้า GS Pla® เกรด FZ91PD ผลิตโดยบริษัท Mitsubishi Chemical Performance Polymers, Inc. , ผงไม้ ชื่อทางการค้า Lignocel เกรด C120 ผลิตโดยบริษัท J. Retenmaier & Sohne Co. (Rosenberg, Germany)
2. สารคู่ควบไซเลน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ไซเลน ความบริสุทธิ์ 80% ผลิตจากบริษัท Aldrich นำมาใช้ทันทีโดยไม่ผ่านการทำบริสุทธิ์และการปรับปรุงใดๆทั้งสิ้น
3. การศึกษาปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จะใช้พอลิแล็กติกแอซิดเป็นเฟสหลัก โดยปรับเปลี่ยนปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต 10, 20, 30, 40 และ 50% โดยน้ำหนัก
4. การศึกษาปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยการเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต จะเลือกเฉพาะพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ได้รับการปรับปรุงให้มีสมบัติเชิงกลเหมาะสมที่สุดสำหรับพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต มาปรับเปลี่ยนผงไม้เป็น 0, 5, 10, 15, 20 และ 30 โดยน้ำหนักต่อเรซิน 100 ส่วน (phr)
5. การศึกษาปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยการเตรียมคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ผงไม้ จะเลือกเฉพาะพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ได้รับการปรับปรุงให้มีสมบัติเชิงกลเหมาะสมที่สุดสำหรับคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ผงไม้ โดยดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 1, 2, 3% โดยน้ำหนักผงไม้

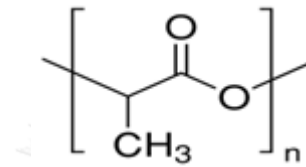
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

ได้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิแล็กติกแอซิด พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และผงไม้ที่มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนที่ดี

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิแล็กติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)

พอลิแล็กติกแอซิด หรือ PLA [3, 4] เป็นแอลิฟาติกพอลิเอสเตอร์แบบเส้น (linear aliphatic polyester) มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) อยู่ในช่วง 55-90 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการหลอมเหลวประมาณ 175 องศาเซลเซียส โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1



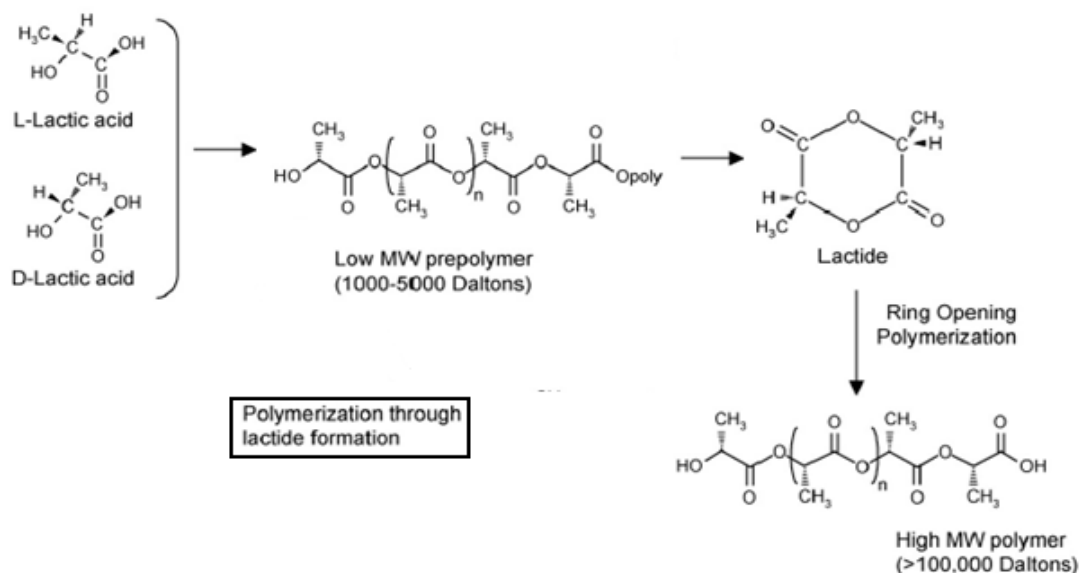
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของ PLA

กระบวนการผลิต PLA เกิดจากกรดแล็กติก (lactic acid) ที่ได้จากกระบวนการหมักสารประเภทแป้งและน้ำตาล ซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง และข้าวสาลี เป็นต้น โดยใช้จุลินทรีย์เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นกรดแล็กติกก่อน แล้วจึงผ่านกระบวนการทางเคมีได้เป็นแลกไทด์ (lactide) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีเป็นวงแหวนไดเมอร์ แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์แบบเปิดวง (ring opening polymerization) โดยการกลั่นในระบบสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็นพอลิแล็กติกแอซิด ดังแสดงในรูปที่ 2.2

2.1.1 ข้อดีของ PLA

1. มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (eco-friendly) เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีในธรรมชาติซึ่งสามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี และมันสำปะหลัง เป็นต้น โดย PLA สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งจะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา
2. มีความเข้ากันทางชีวภาพ (biocompatibility) ปัจจุบันมีการนำ PLA มาใช้ในทางการแพทย์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต และไม่เป็นพิษ นอกจากนี้ PLA ที่ถูกนำมาใช้ในร่างกายของมนุษย์ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อ

เซลล์และเนื้อเยื่อภายหลังการสลายตัว ดังนั้น PLA จึงเป็นอีกทางเลือกในการนำมาใช้ประโยชน์ในทางแพทย์ PLA



รูปที่ 2.2 การผลิต PLA จากกระบวนการเปิดวงของแลกไทด์ [5]

3. สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ (processability) โดย PLA สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดแบบ (injection molding) การอัดแบบ (compression molding) การอัดรีดฟิล์ม (film extrusion) การเป่าแบบ (blow molding) และเทอร์โมฟอร์ม (thermoforming) เป็นต้น
4. ประหยัดพลังงานในการผลิต (energy saving) โดยใช้พลังงานในการผลิต PLA น้อยกว่าการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียมประมาณ 20-25% และคาดว่าจะสามารถลดได้อีก 10% ในอนาคต

2.1.2 ข้อเสียของ PLA

1. PLA เป็นพอลิเมอร์ที่แข็งและเปราะ โดยมีความสามารถในการยืดตัวต่ำกว่า 10% ถึงแม้มีความทนแรงดึงและมอดุลัสเทียบได้กับพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตก็ตาม แต่มีสมบัติความเหนียวต่ำกว่า จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน
2. PLA มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ ไม่ชอบน้ำ และมีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความเป็นผลึก น้ำหนักโมเลกุล การกระจายน้ำหนักโมเลกุล สัณฐานวิทยา อัตราการดูด

ซีเมนน้ำ นอกจากนี้ PLA อาจแตกสลายด้วยความร้อนจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ดังนั้น ก่อนนำ PLA ไปใช้งานควรอบเม็ดให้แห้งเพื่อไล่ความชื้น

3. มีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) PLA เป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ มีมุมสัมผัสกับน้ำประมาณ 80° การใช้งานของ PLA ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตอาจก่อให้เกิดการอักเสบเนื่องจากไม่เกิดการไหลเวียนของของเหลวภายในเซลล์
4. การปรับปรุงพื้นผิวของ PLA ทำได้ยาก เนื่องจากมีความเฉื่อย
5. PLA มีราคาแพงเมื่อเทียบกับพลาสติกทางการค้าทั่วไป ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งานเชิงพาณิชย์ จึงได้มีการนำ PLA ไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ที่มีราคาต่ำกว่า ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติและลดต้นทุนการผลิต

2.1.3 สมบัติของ PLA

- มีความแข็งแรงสูง
- มีความใส
- มีความเป็นพิษต่ำ
- ไม่ย่อยสลายในสภาวะแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดิน

2.1.4 การใช้งานของ PLA

- ฟิล์มบรรจุภัณฑ์
- ผลิตภัณฑ์บรรจุอาหาร
- เส้นใยและสิ่งทอ เช่น ผลิตเป็นเสื้อผ้าและผ้าเบาะรถยนต์

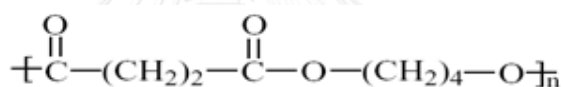
2.1.5 การผสม (Blending)

การผสม PLA กับพอลิเมอร์ประเภทอื่นเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย และไม่ซับซ้อน ซึ่งการผสม PLA กับพลาสติกไซเซออร์ (plasticizers) จะสามารถลด T_g ของ PLA ทำให้ความเปราะลดลง ซึ่งพลาสติกไซเซออร์ที่ใช้ ได้แก่ กลีเซอรอล (glycerol) ซิเตรตเอสเทอร์ (citrate ester) และพอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol) อย่างไรก็ตาม การเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ PLA กับพอลิเมอร์อื่นสามารถปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูปสมบัติของ PLA และจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ได้มีการผสม

PLA กับพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นมากกว่า เช่น พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต [poly(butylene succinate)] [6-9], พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตแอดิเพต [poly(butylene succinate adipate)] [10] พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทรฟทาเลต [11-13] และพอลิแคโพรแลกโทน [14, 15] เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการผสม PLA กับพลาสติกอื่นที่ไม่ย่อยสลายทางชีวภาพเพื่อลดความเปราะของ PLA ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

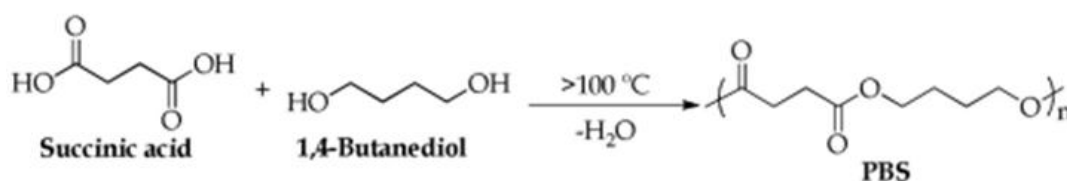
2.2 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS)

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต หรือ PBS [16] เป็นแอลิฟาติกพอลิเอสเตอร์แบบเส้นเช่นเดียวกับ PLA แต่มี T_g อยู่ในช่วง -45 ถึง -10 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการหลอมเหลว $90-120$ องศาเซลเซียส มีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ PBS

PBS สามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่นระหว่าง 1,4 บิวเทนไดออล (1,4 butane diol) ที่ผลิตได้จากสารปิโตรเลียม ดังปฏิกิริยาในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PBS จากกรดซัคซินิก และ 1,4 บิวเทนไดออล

2.2.1 สมบัติของ PBS

- มีความยืดหยุ่นสูง
- เป็นเรซินสีขาวขุ่น มีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์สูง

- ทนความร้อนได้ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยไม่เสียเสถียรภาพ
- สามารถย่อยสลายได้ดี
- สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

2.2.2 การใช้งานของ PBS

- ฟิล์มบรรจุภัณฑ์
- ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง เช่น หลอดฉีดยา
- ผลิตภัณฑ์อนามัย
- โฟม
- ใช้งานด้านวิศวกรรม เช่น เป็นส่วนประกอบของยานยนต์

2.3 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics)

ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเกือบทุกประเภทมีความคงทนและไม่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ จึงก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดเศษหรือขยะพลาสติกจำนวนมากที่ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ การเผาทำลายขยะพลาสติกยังทำให้มลภาวะเป็นพิษ เช่น ภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable plastics) มาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในงานด้านบรรจุภัณฑ์ การเกษตร และสิ่งทอ เป็นต้น โดยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเริ่มตั้งแต่การประสบความสำเร็จในการผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งได้แก่ บริษัท Cargill Dow และ NatureWorks ได้ใช้ข้าวโพดเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตกรดแลกติกและ PLA และบริษัท Metabolix ได้ทำการผลิตพอลิไฮดรอกซีอัลคานอเอต (polyhydroxyalkanoate) โดยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีแหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ธรรมชาติ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) โปรตีน (proteins) พอลิไฮดรอกซีอัลคานอเอต และ PLA เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีแหล่งกำเนิดจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี เช่น PBS พอลิบิวทิลีนแอดิเพตเทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate-co-terephthalate)) พอลิแคโพรแลกโตน (poly(ϵ -caprolactone)) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly(vinyl alcohol)) เป็นต้น ในอนาคตมีแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการค้นพบและพัฒนากระบวนการผลิตที่ทำให้ได้พลาสติกที่มีราคาต่ำลงและมีสมบัติดีขึ้น การมีมีกฎข้อบังคับ รวมถึงการมี

ค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น ทำให้บริษัทต่างๆ เร่งพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพให้มีสมบัติหลากหลายมากยิ่งขึ้น

การย่อยสลายทางชีวภาพเป็นกระบวนการย่อยสลายที่เกิดจากจุลินทรีย์ [17] โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการย่อยสลายที่เกิดภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอที่จะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นสุดท้าย คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน น้ำ กลีโกล แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

2.4 คอมโพสิต (Composites)

คอมโพสิต [18] คือ วัสดุผสมตั้งแต่ 2 กลุ่มวัสดุหลักขึ้นไป โดยวัสดุในคอมโพสิตต้องไม่ละลายซึ่งกันและกัน โดยมีวัสดุชนิดหนึ่งเป็นเมทริกซ์ (matrix) และวัสดุอีกชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดกระจาย (disperse) อยู่ในเมทริกซ์อย่างสม่ำเสมอ โดยสมบัติของคอมโพสิตเป็นการรวมสมบัติที่ดีของวัสดุแต่ละชนิดไว้ด้วยกัน ซึ่งองค์ประกอบของคอมโพสิต แบ่งออกเป็น

- เมทริกซ์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีความต่อเนื่อง โดยเมทริกซ์ที่นิยมใช้ ได้แก่ พอลิเมอร์ และโลหะ เป็นต้น
- ส่วนเสริมแรง (reinforcement phase) เป็นส่วนที่ทำให้คอมโพสิตมีความแข็งแรง มักเป็นส่วนที่ไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นแผ่น หรือเส้นใย ได้แก่ เส้นใยแก้ว หรือเส้นใยธรรมชาติ

2.4.1 พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composites)

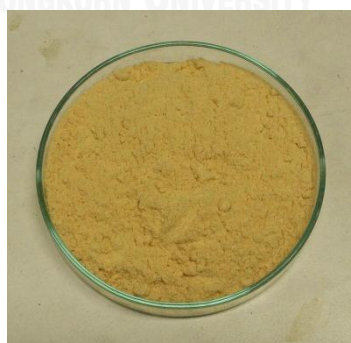
พอลิเมอร์คอมโพสิต [19] เป็นวัสดุที่มีบทบาทสำคัญเป็นอย่างมากในทางอุตสาหกรรม เนื่องจากพอลิเมอร์คอมโพสิตมีสมบัติด้านความแข็งแรงสูงและความหนาแน่นต่ำ ทำให้วัสดุที่ได้มีน้ำหนักเบา แต่สารเสริมแรงชนิดสังเคราะห์มักมีราคาแพง จึงส่งผลต่อต้นทุนที่ใช้ในการผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตให้สูงตามไปด้วย เช่น เส้นใยแก้ว และเส้นใยคาร์บอน เป็นต้น นอกจากนี้ พอลิเมอร์คอมโพสิตที่ใช้สารเสริมแรงสังเคราะห์จะย่อยสลายได้ยากก่อให้เกิดมลภาวะเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีการปรับปรุงพอลิเมอร์คอมโพสิต

ให้ย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยการใช้สารเสริมแรงที่เป็นเส้นใยธรรมชาติแทนสารเสริมแรงสังเคราะห์ เพราะส่วนประกอบหลักของเส้นใยธรรมชาติ คือ เซลลูโลส (cellulose) ที่มีระดับความเป็นผลึกสูง ซึ่งช่วยให้สมบัติของพอลิเมอร์คอมพอสิตเพิ่มขึ้นทั้งในด้านความทนความร้อน ความแข็งแรง และความเหนียวขณะที่มีความหนาแน่นต่ำ

2.4.2 ผงไม้ (Wood flour)

ผงไม้ [20] เป็นเส้นใยที่ได้มาจากธรรมชาติ โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ ซึ่งได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยผงไม้จะเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานและอุตสาหกรรมที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด ซึ่งปัจจุบันมีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ที่มีความละเอียดให้เลือกหลายเกรด จึงได้มีการนำผงไม้มาใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์คอมพอสิตอย่างแพร่หลาย ทั้งกับเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตพลาสติก นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป โดยไม่ทำให้เครื่องจักรสึกหรอเนื่องจากอนุภาคของผงไม้มีความแข็ง (hardness) ต่ำกว่าอนุภาคของสารอินทรีย์

ผงไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อทางการค้าว่า Lignocel (เกรด C120) ที่ผลิตโดยบริษัท J. Retenmaier & Sohne (Rosenberg, Germany) ซึ่งได้ทำการคัดเลือกจากไม้สนที่มีคุณภาพเดียวกันและมีองค์ประกอบหลักดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยมีลักษณะเป็นผงละเอียดสีน้ำตาลอ่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 มีขนาด 100-120 ไมครอน ขนาดเกรน 70-150 ไมโครเมตร และความหนาแน่นรวม 100-135 กรัม/ลิตร



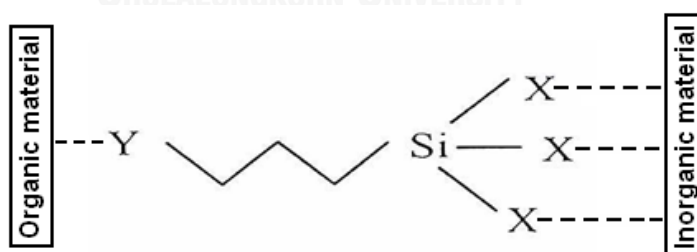
รูปที่ 2.5 ผงไม้ Lignocel (เกรด C120)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของผงไม้ Lignocel (เกรด C120) [20]

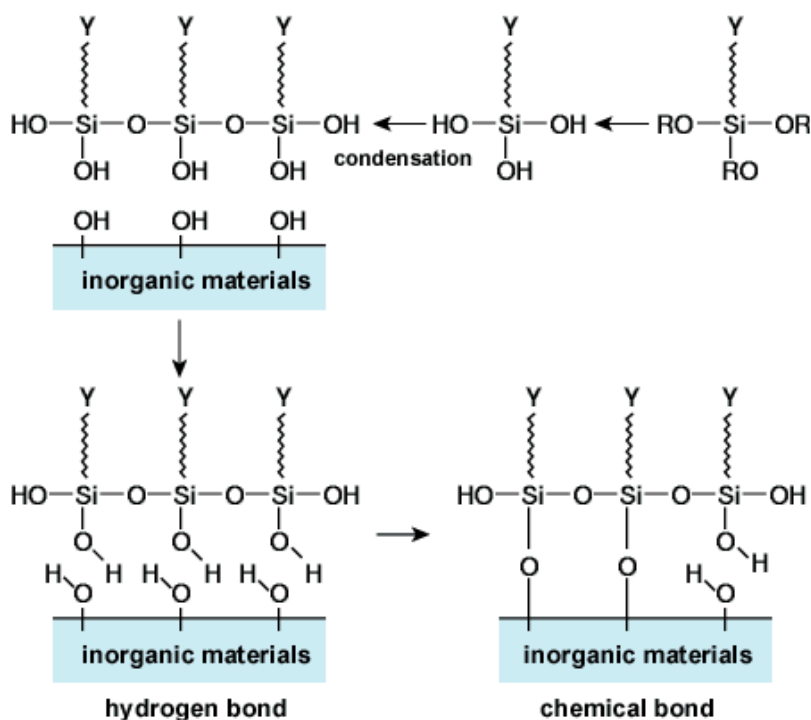
องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)
Cellulose	41.00%
Hemicellulose	27.50%
Lignin	28.10%
Extractives	3.40%

2.5 สารคู่ควบ (Coupling agents)

สารคู่ควบ [21] ที่นิยมใช้กับสารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) โดยเฉพาะซิลิกา (silica) และเส้นใยแก้ว (glass fiber) ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบซิลเลน (silane compound) ทั้งนี้เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างผิว (interfacial adhesion) ของสารตัวเติมและเมทริกซ์ ทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารตัวเติมเพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลของสารคู่ควบซิลเลน (silane coupling agent) ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาแตกต่างกัน 2 หมู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยหมู่เมทอกซี 3 หมู่ สามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของสารอนินทรีย์ผ่านพันธะไฮโดรเจนหรือพันธะเคมีเกิดพันธะ -O-Si ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ส่วนหมู่เอทอกซี 1 หมู่ จะสามารถเกิดพันธะที่เหมาะสมกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่มีหมู่ไวนิล เอมีน อีพอกซี หรือเมอร์แคปแทน เป็นต้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของสารคู่ควบซิลเลน [21]



รูปที่ 2.7 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างวัสดุอินทรีย์และสารคู่ควบไซเลน [21]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bhatia และคณะ [6] ได้ทดลองผสม PLA และ PBS ในอัตราส่วนต่างๆ และจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม พบว่า พอลิเมอร์ทั้งสองมีความเข้ากันได้เมื่อปริมาณ PBS ไม่เกิน 20% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ PBS สามารถลดความเปราะของ PLA แต่มีผลทำให้ความทนแรงดึงและมอดุลัสลดลง โดยการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น

Lee และคณะ [10] พบว่า การผสม PLA และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพตในอัตราส่วน 80/20 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น และถ้าใส่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพตในปริมาณมากกว่า 20% มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์มีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใส่พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพตใน PLA เพื่อให้มีการปรับปรุงแรงกระแทกนั้นไม่ควรใส่มากกว่า 20% นอกจากนี้ พอลิเมอร์ผสมเหล่านี้ยังมีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพตที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะการผสมทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟสของ PLA และพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตอะดิเพต เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันได้ไม่ดี จึงทำให้จุลินทรีย์สามารถเข้าไปทำการย่อยสลายได้ง่ายขึ้น

Jiang และคณะ [11] ได้ทดลองผสม PLA และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้สมบูรณ์ภายในเวลา 2-3 สัปดาห์ พบว่า เมื่อปริมาณของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตเพิ่มขึ้น ความทนแรงดึงและมอดุลัสจะมีความลดลงตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการแตกหักของชิ้นงานได้เปลี่ยนจากการแตกแบบเปราะเป็นการแตกแบบอ่อนเหนียว (ductile) นอกจากนี้ ยังได้เตรียมคอมพอสิตของพลาสติกย่อยสลายได้เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์แต่ให้คงสมบัติการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์เอาไว้ โดยการใช้สารตัวเติมประเภทเส้นใยจากธรรมชาติ

Nam และคณะ [22] ได้เตรียมคอมพอสิตของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจาก PBS และเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยอัลคาไลน์เพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างผิวกับพอลิเมอร์ เมทริกซ์และเส้นใยมะพร้าว โดยใช้เส้นใย 10-30% โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอมพอสิตที่ใช้เส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรผิวมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการดัดแปรผิวอย่างเห็นได้ชัด และมีค่าสูงที่สุดเมื่อใส่เส้นใยปริมาณ 25% โดยน้ำหนักโดยมีค่าความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น 54.5% มอดุลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น 141.9% ความทนแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 45.7% และมอดุลัสแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้น 97.4% เมื่อเปรียบเทียบกับของ PBS บริสุทธิ์ เนื่องจากมีแรงยึดเกาะระหว่างเส้นใยมะพร้าวและพอลิเมอร์ที่ยืนยันได้จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นทดสอบ

Petinakis และคณะ [23] ได้ทดลองเตรียมคอมพอสิตระหว่าง PLA และผงไม้ แล้วทำการศึกษาผลของแรงยึดเกาะระหว่าง PLA เมทริกซ์และผงไม้ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมพอสิตพบว่า ความทนแรงดึงของชิ้นงานไม่เพิ่มขึ้นภายหลังการเติมผงไม้ ซึ่งแสดงถึงการไม่มีแรงยึดเกาะที่ดีระหว่าง PLA และผงไม้ หากแต่การเติมผงไม้ไม่มีผลทำให้มอดุลัสของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 95% เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตาม การดัดแปรผงไม้ด้วยสารคู่ควบประเภทเมทิลไดเฟนิลไดไอโซไซยาเนตมีผลทำให้ความทนแรงดึงและมอดุลัสของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น 10% และ 135% ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงการมีแรงยึดเกาะที่ดีขึ้นระหว่าง PLA และผงไม้ ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Suryanegara และคณะ [24] ได้ทดลองเตรียมคอมพอสิตของ PLA/ไมโครไฟบริล (microfibril) ที่เตรียมจากเส้นใยเซลลูโลส โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการผสม PLA และไมโครไฟบริล จากนั้นขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ หลังการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า ไมโครไฟบริลที่เตรียมจากเส้นใยเซลลูโลสช่วยเร่งการเกิดผลึกของ PLA และการเติมไมโครไฟบริลยังทำให้มอดุลัสและความทนแรงดึงของ PLA

Kumar และคณะ [13] ได้ทดลองผสม PLA และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตโดยใช้ไกลซิديلเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) เป็นสารเพิ่มความกันน้ำ พบว่า ช่วยให้ PLA และพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตเข้ากันได้มากขึ้นโดยสมบัติความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตที่เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนของ PLA/พอลิบิวทิลีนแอดิเพตโคเทเรฟทาเลตที่ 75/25 ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความทนแรงกระแทกสูงที่สุด นอกจากนี้ การใส่ไกลซิديلเมทาคริเลตร่วมกับนาโนเคลย์ยังช่วยเพิ่มความทนแรงกระแทก และเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตอีกด้วย

Kobayashi และ Sugimoto [8] ได้ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล และการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสม โดยทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ผสมด้วยวิธีการฝังในดินเป็นเวลา 16 สัปดาห์ ซึ่งพบว่า ยังสัมมูลสัมค่าไม่เปลี่ยนแปลงภายใต้ภาวะของการทดสอบ ขณะที่ความทนแรงมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบ

1. เม็ดพอลิแล็กติกแอซิดเกรด 4043D ของบริษัท NatureWorks LLC ดังแสดงสมบัติในตารางที่ 3.1
2. เม็ดพอลิไวนิลิลีนซัคซิเนต เกรด FZ91P ของบริษัท Mitsubishi Chemical Performance Polymers, Inc. GS Pla® D ดังแสดงสมบัติในตารางที่ 3.2
3. ผงไม้สน (WF) เกรด Lignocel C120 ขนาดอนุภาค 100–120 เมช ความหนาแน่น 100-135 กรัม/ลิตร ของบริษัท J. Retenmaier & Sohne Co.
4. สารคู่ควบไซเลน (N-(2-aminoethyl)-3-aminopropyltrimethoxysilane) เกรด z-6020 ของบริษัท Dow Corning®

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิแล็กติกแอซิด เกรด 4043D [25]

สมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วย	PLA เกรด 4043D
ความหนาแน่น	ASTM D1505	g/cm ³	1.24
ดรชนีการหลอมไหล	ASTM D1238	g/10 min	6
ความทนแรงดึง	ASTM D882	MPa	110-145
ค่ามอดุลัส	ASTM D882	MPa	3309-3860
การยืดตัว	ASTM D882	%	100-160

ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต เกรด FZ91P [26]

สมบัติ	มาตรฐานการทดสอบ	หน่วย	PBS เกรด FZ91P
ความหนาแน่น	JIS K7112	g/cm ³	1.26
ดรรชนีการหลอมไหล	JIS K7210	g/10 min	4.5
ค่ามอดุลัส	JIS K7203	MPa	650
ความทนแรงดึง	JIS K6781	MPa	40
การยืดตัว	JIS K6781	%	250
ความทนแรงกระแทก	JIS K7110	MPa	9

3.2 เครื่องผสมและเครื่องขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) รุ่น Scientific LW-100 ของบริษัท LabTech Engineering (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
2. เครื่องอัดแบบ (compression molding machine) รุ่น LP S-20 ของบริษัท LabTech Engineering (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

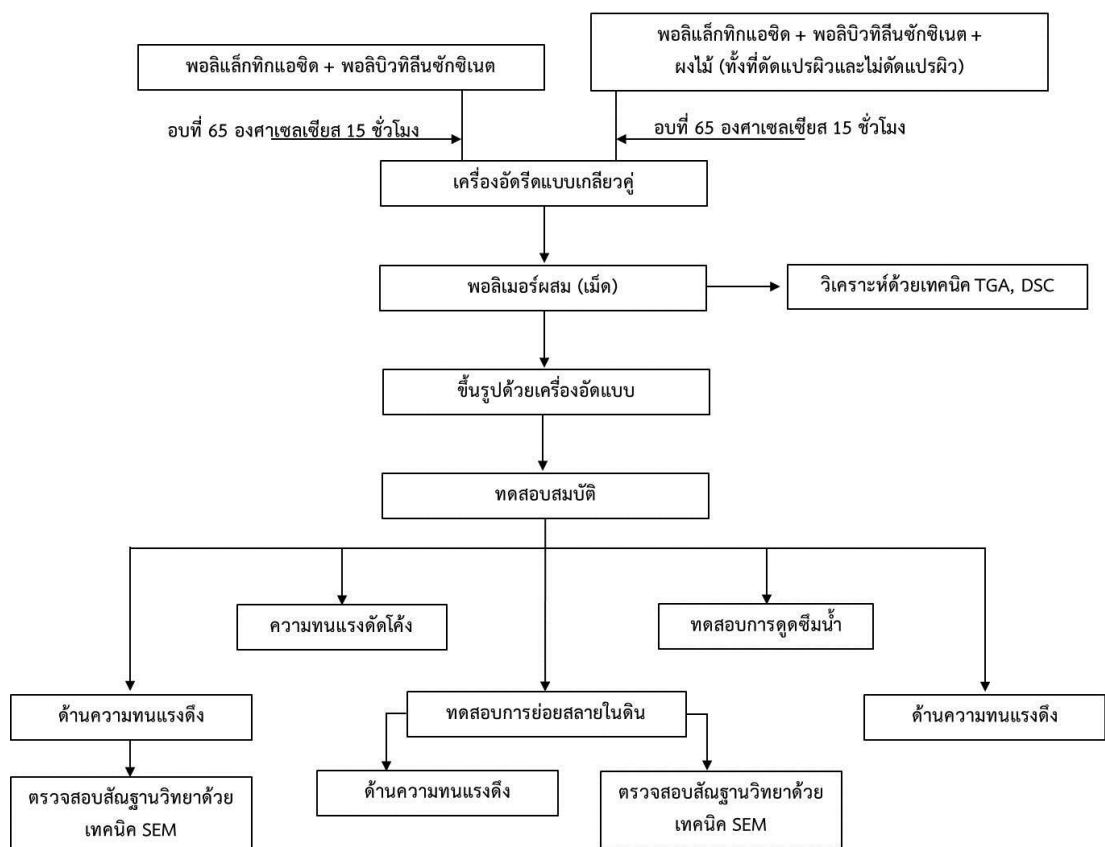
3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ

1. เครื่องดีพีเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (differential scanning calorimeter, DSC) รุ่น Netzsch 204 F1 Phoeni (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851^e (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (impact testing machine) รุ่น Resil Impactor 10K (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
4. เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (universal testing machine) รุ่น LLOYD LR 100K (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

5. เครื่องทดสอบความทนแรงดัดโค้ง (flexural testing machine) รุ่น LLOYD 500 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
6. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM 5410LV (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง

แผนภูมิขั้นตอนการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมและทดสอบพอลิเมอร์ผสมพอลิเอทิลีนไดออกไซด์/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต และคอมพอสิตของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ผงไม้

3.5 การทดลอง

3.5.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

นำเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตมาอบไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ก่อนนำไปผสมตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.3 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รูปที่ 3.3) ภายใต้ภาวะดังต่อไปนี้:

อุณหภูมิ: 120/170-180/170-180/170-180/170-180/170-180/170-

180/165-180 องศาเซลเซียส

ความเร็วรอบสกรูหมุน: 65 รอบ/นาที

ความเร็วรอบตัด: 14-16 รอบ/นาที

เส้นผ่านศูนย์กลาง: 2.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม

องค์ประกอบ	1	2	3	4	5	6	7
พอลิเอทิลีนทิกแอซิด	100	-	90	80	70	60	50
พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต	-	100	10	20	30	40	50

จากนั้นจึงนำเส้นพอลิเมอร์ผสม (extrudates) ที่ออกจากเครื่องอัดรีดไปตัดเม็ด (pelletized) ก่อนนำไปอบไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง แล้วนำไปทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยวิธีอัดแบบ



รูปที่ 3.2 เครื่องอัลตราซาวด์แบบเกลียวคู่รุ่น Scientific LW-100

3.5.2 การขึ้นรูปชิ้นทดสอบ

1. ด้วยกระบวนการอัดแบบ

นำเม็ดพลาสติกที่เตรียมได้ไปอบไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ก่อนใส่ในแม่แบบ (รูปที่ 3.4) แล้วอัดให้เป็นแผ่นที่มีขนาด $14 \times 19 \times 0.3$ เซนติเมตร (กว้าง \times ยาว \times หนา) (รูปที่ 3.5) ด้วยเครื่องอัดแบบ (รูปที่ 3.6) โดยใช้ภาวะการขึ้นรูปดังนี้:

อุณหภูมิ: 170 - 190 องศาเซลเซียส

เวลา Pre-heat: 8 นาที

เวลาอัดก่อนเปิดไล่อากาศ: 6 นาที

เวลากดอัดสุดท้าย: 6 นาที

เวลาหล่อเย็น: 5 นาที



รูปที่ 3.3 แม่แบบสำหรับขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดแบบ



รูปที่ 3.4 ชิ้นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดแบบร้อน LP S-20

3.5.3 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

1. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ โดยใส่เม็ดพอลิเมอร์ผสมประมาณ 10 มิลลิกรัม ในจานอะลูมิเนียมแล้วปิดผนึกด้วยฝาอะลูมิเนียมที่เจาะรู แล้วทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนภายใต้ภาวะการทดสอบดังนี้:

- เริ่มต้นการทดสอบที่อุณหภูมิ -50 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที แล้วคงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 5 นาที
- ลดอุณหภูมิจาก 200 องศาเซลเซียส จนถึง -50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที
- เพิ่มอุณหภูมิอีกครั้งจาก -50 องศาเซลเซียส จนถึง 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที

โดยนำเทอร์โมแกรม (thermogram) ที่ได้ไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) เอนทัลปีการหลอมเหลว (melting enthalpy, ΔH_m) เอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น (enthalpy of cold crystallization, ΔH_{cc}) และอุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (cold crystallization temperature, T_{cc}) โดยคำนวณระดับการเกิดผลึก (degree of crystallinity, X_c) ได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 [27, 28]

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

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m}{w \times \Delta H_m^\circ} \times 100 \quad (3.2)$$

โดย ΔH_m = เอนทัลปีของการหลอมเหลว

ΔH_{cc} = เอนทัลปีของการเกิดผลึกเมื่อให้ความร้อน

ΔH_m° = เอนทัลปีการหลอมเหลวของพอลิเอทิลีนทิกแอซิดที่เกิดผลึก 100% = 93 J/g [29]

w = สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีนทิกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม

2. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (TGA)

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) โดยใช้ภาวะการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 25-800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยเทอร์โมแกรมที่ได้แสดงน้ำหนักที่สูญเสียไป (weight loss) เมื่อเม็ดพอลิเมอร์ผสมได้รับความร้อน รวมทั้งปริมาณเถ้า (char) ที่เหลือ

3. การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก (Impact strength)

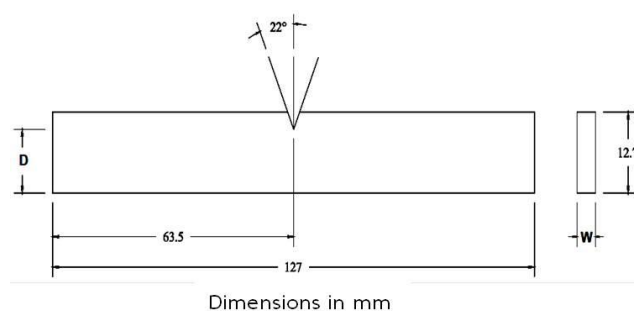
ทำการทดสอบหาค่าความทนแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact strength) ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยตัดแผ่นพลาสติกที่ได้จากกระบวนการอัดแบบให้มีขนาด $6.35 \times 12.70 \times 3.0$ มิลลิเมตร จากนั้นบากขึ้นทดสอบเป็นรูปตัววี (V-notch) (รูปที่ 3.7 และ 3.8) วัดความลึก (depth) และความกว้าง (width) ของรอยบาก เพื่อใช้คำนวณหาความทนแรงกระแทกจากสมการที่ 3.2 ซึ่งก่อนทดสอบให้เก็บชิ้นทดสอบในเดซิเคเตอร์ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลาอย่างน้อย 40 ชั่วโมง แล้วทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก ภายใต้ภาวะการทดสอบดังนี้: น้ำหนักค้อน 1 จูล ความเร็วค้อนเหวี่ยง 3.45 เมตร/วินาที ค้อนทำมุม 150 องศา ทดสอบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50

$$\text{Impact strength} = \frac{\text{Energy}}{D \times W} \quad (3.3)$$

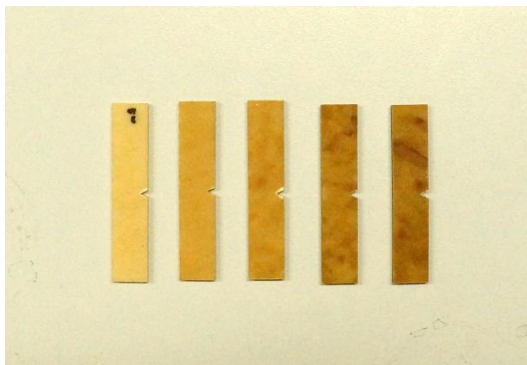
เมื่อ Energy = ค่าพลังงานกระแทก (กิโลจูล)

D = ความลึกด้านหลังรอยบาก (เมตร)

W = ความกว้างด้านหลังรอยบาก (เมตร)



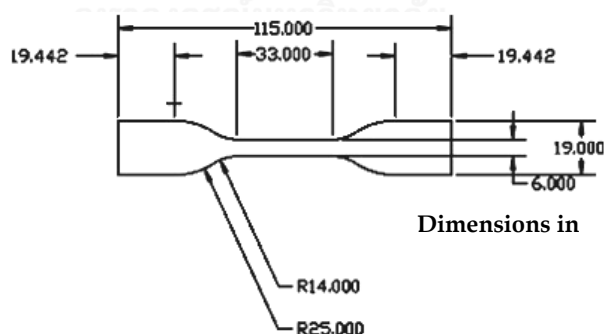
รูปที่ 3.6 ขนาดขึ้นทดสอบความทนแรงกระแทกตามมาตรฐาน ASTM D256



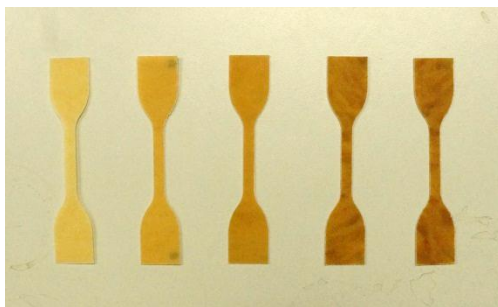
รูปที่ 3.7 ชิ้นทดสอบความทนแรงกระแทกแบบไอซอดที่มีรอยบาก

4. การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile properties)

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภท IV โดยตัดแผ่นพลาสติกที่ได้จากกระบวนการอัดแบบเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (รูปที่ 3.9 และ 3.10) แล้วเก็บชิ้นทดสอบในเตชี่เคเตอร์ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลาอย่างน้อย 40 ชั่วโมง ก่อนทดสอบด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลรุ่น LLOYD LR 100K เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) โดยมีระยะดึง (gauge length) เท่ากับ 65 มิลลิเมตร ขนาด load cell เท่ากับ 10 กิโลนิวตัน และดึงด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 50 มิลลิเมตร/นาที ที่อุณหภูมิห้อง



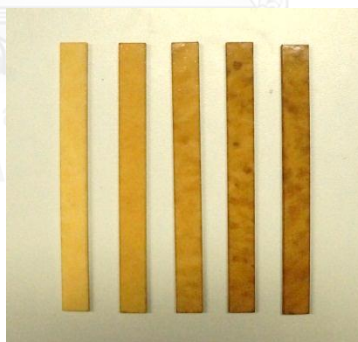
รูปที่ 3.8 ขนาดชิ้นทดสอบดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D638 ประเภท IV



รูปที่ 3.9 ชิ้นทดสอบรูปตั้มเบลล์สำหรับทดสอบความทนแรงดึง

5. การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้ง (Flexural properties)

ทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสมตามมาตรฐาน ASTM D790 ประเภท Rectangular โดยตัดแผ่นพลาสติกที่ได้จากกระบวนการอัดแบบเป็นชิ้นทดสอบรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (รูปที่ 3.11) แล้วเก็บชิ้นทดสอบในเดซีเคเตอร์ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 เป็นเวลาอย่างน้อย 40 ชั่วโมงด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลรุ่น LLOYD 500 เพื่อหาค่าความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) โดยได้ทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง น้ำหนักที่ใช้กดเท่ากับ 250 นิวตัน และความเร็วการกดขึ้นทดสอบเท่ากับ 15 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.10 ชิ้นทดสอบสำหรับทดสอบความทนแรงดัดโค้ง

6. การตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบที่ผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยทำการเคลือบทองบนพื้นผิวรอยแตกหักก่อนทำการตรวจสอบ และดำเนินการที่ 15 kV กำลังขยาย 1000 เท่า

7. การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

นำชิ้นทดสอบขนาด $5.10 \times 12.70 \times 3.0$ ไปอบไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บชิ้นทดสอบในเดซิเคเตอร์ ก่อนนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกค่าน้ำหนักเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (W_0) หลังจากนั้น นำชิ้นทดสอบแช่ลงในน้ำเป็นเวลา 23 วัน (รูปที่ 3.12) โดยหลังแช่นำชิ้นทดสอบเช็ดให้แห้งด้วยกระดาษทิชชูและบันทึกค่าน้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำในแต่ละวัน (W_1) และนำค่าน้ำหนักที่บันทึกได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซึมน้ำตามสมการที่ 3.4

$$\% \text{Water absorption} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.4)$$

W_0 คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนการดูดซึมน้ำ

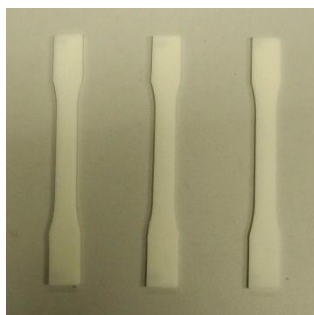
W_1 คือ น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังการดูดซึมน้ำ



รูปที่ 3.11 ชิ้นทดสอบการดูดซึมน้ำ

8. การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยการฝังดิน

ทำการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยนำชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ (รูปที่ 3.13) ไปฝังดิน ทำการเก็บชิ้นทดสอบหลังฝังดิน 30 วัน เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลและตรวจสอบสัญญาณวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 3.12 ชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

3.5.4 การเตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิต

นำเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนทิกแอซิด พอลิบิวทิลีนซึกซิเนต และผงไม้ (ทั้งที่ตัดแปรรวม และไม่ตัดแปรรวมด้วยสารคู่ควบไซเลน) มาอบไล่ความชื้นในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ก่อนนำไปผสมตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 ด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ ขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยกระบวนการอัดแบบ และวิเคราะห์ทดสอบเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ผสมในข้อ 3.5.1-3.5.3

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ไม่ได้ตัดแปรรวมด้วยสารคู่ควบไซเลน

องค์ประกอบ	8	9	10	11	12
พอลิเอทิลีนทิกแอซิด	70	70	70	70	70
พอลิบิวทิลีนซึกซิเนต	30	30	30	30	30
ผงไม้	5	10	15	20	30

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ตัดแปรรวมด้วยสารคู่ควบไซเลน

องค์ประกอบ	13	14	15	16	17	18
พอลิเอทิลีนทิกแอซิด	70	70	70	70	70	70
พอลิบิวทิลีนซึกซิเนต	30	30	30	30	30	30
ผงไม้	10	10	10	15	15	15
สารคู่ควบไซเลน	1	2	3	1	2	3

3.5.5 การเตรียมการตัดแปรรังผึ้งไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลน

นำรังผึ้งมาอบไล่ความชื้น 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ก่อนการนำไปใช้งาน เตรียมสารละลายของสารคู่ควบไซเลน 5 กรัม ที่หยดอย่างช้าๆลงในน้ำกลั่น 100 กรัม ที่ปรับความเป็นกรดด้วยกรดแอสติค 1% โดยปรับเพื่อให้มีความเป็นกรดที่ pH 3.5 – 6 และนำสารละลายไซเลนดังกล่าวผสมกับตัวทำละลายเอทานอล 2,000 กรัม หลังจากนั้นนำรังผึ้งไม้ 200 กรัม ใส่ลงปิกเกอร์ที่มีสารละลายผสมดังกล่าวข้างต้น และนำของผสมกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส หลังจากครบ 1 ชั่วโมง กวนของผสมต่อที่อุณหภูมิห้องอีก 30 นาที เพื่อให้สารคู่ควบไซเลนสร้างพันธะกับรังผึ้งไม้ นำรังผึ้งไม้ที่เตรียมได้ล้างด้วยน้ำกลั่นหลายๆครั้งเพื่อล้างสารคู่ควบไซเลนที่มากเกินไป และนำไปอบไล่ความชื้นที่ 105 องศาเซลเซียส [30]

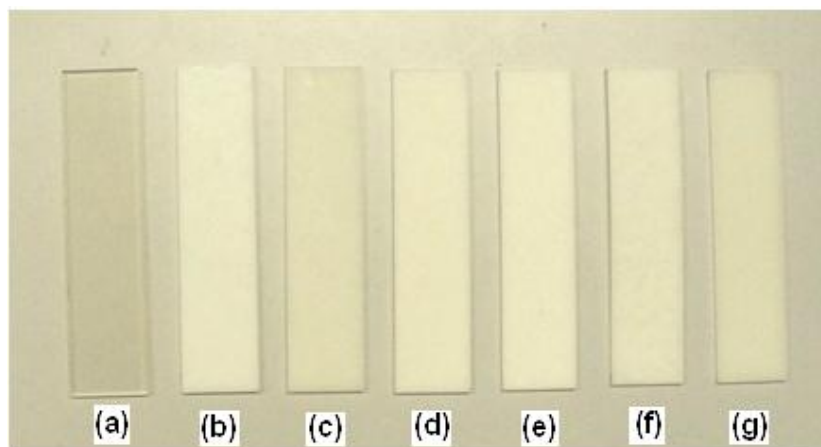


บทที่ 4

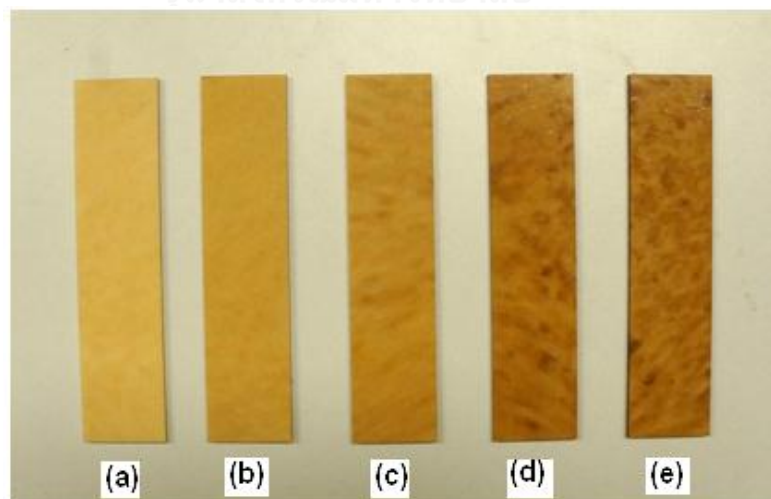
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะชิ้นทดสอบ

รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงตัวอย่างชิ้นทดสอบของพอลิแล็กติกแอซิด (PLA), พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) พอลิเมอร์ผสมของ PLA/PBS และพอลิเมอร์คอมพอสิตของ PLA/PBS/ผงไม้ (PLA/PBS/WF) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ



รูปที่ 4.1 ชิ้นทดสอบของ (a) PLA, (b) PBS และ (c-g) พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ตามลำดับ ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ



รูปที่ 4.2 ชิ้นทดสอบของพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน (a) 70/30/5, (b) 70/30/10, (c) 70/30/15, (d) 70/30/20 และ (e) 70/30/30 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบ

จากรูปแสดงให้เห็นว่าชั้นทดสอบของ PLA มีลักษณะใสและไม่มีสี ส่วนชั้นทดสอบของ PBS มีสีขาวขุ่นและทึบแสง และชั้นทดสอบของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ทุกอัตราส่วนมีสีขาวขุ่นและทึบแสงเช่นเดียวกับ PBS ขณะที่ชั้นทดสอบของพอลิเมอร์คอมพอสิตทุกอัตราส่วนมีลักษณะทึบแสง หากแต่เฉดสีเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น

4.2 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และคอมพอสิต PLA/PBS/WF

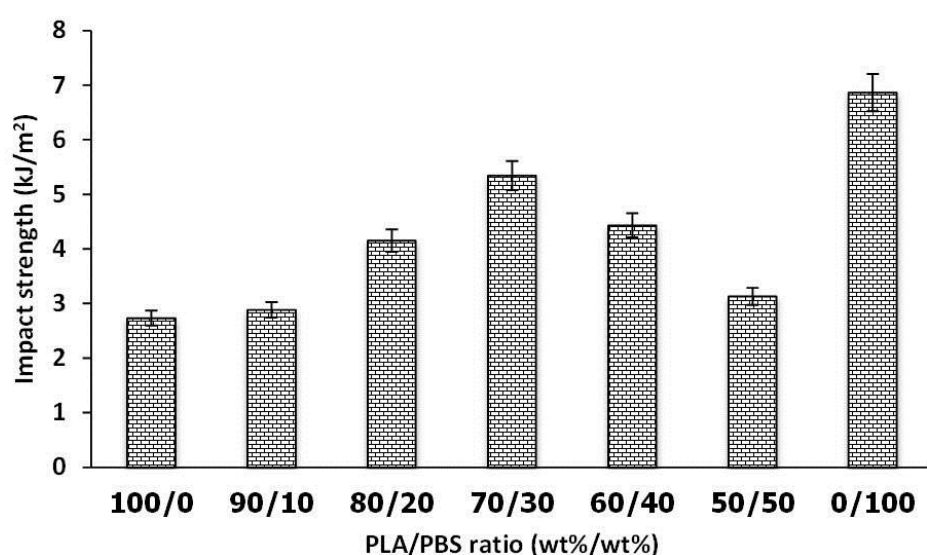
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบด้านความทนแรงกระแทก (impact strength), ความทนแรงดึง (tensile strength), ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus), การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) และความทนแรงดัดโค้ง (flexural strength) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF

PLA/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	Impact strength (kJ/m ²)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (N/mm)
100/0/0	2.7±0.1	86.2±2.1	4243.0±103.7	3.6±0.0	119.2±8.1
0/100/0	6.9±0.6	46.7±1.7	1135.3±118.6	8.6±0.3	20.0±2.8
90/10/0	2.9±0.1	85.4±3.2	4054.3±195.2	3.7±0.1	111.5±1.2
80/20/0	4.2±0.2	77.0±2.9	3557.8±170.2	3.7±0.1	88.7±2.6
70/30/0	5.3±0.4	75.9±3.1	3444.4±238.4	4.1±0.2	72.3±5.8
60/40/0	4.4±0.3	70.7±2.6	3425.2±93.8	3.7±0.2	56.3±4.3
50/50/0	3.1±0.3	58.0±4.1	2938.5±139.7	3.6±0.2	34.0±1.8
70/30/5	4.1±0.2	52.4±1.5	3167.1±297.6	4.4±0.1	70.2±4.4
70/30/10	3.6±0.2	44.0±1.0	2834.8±97.2	3.3±0.2	68.3±6.5
70/30/15	3.2±0.2	41.3±2.0	3520.8±208.6	3.1±0.1	62.0±4.0
70/30/20	2.8±0.1	30.7±0.6	3283.8±140.6	2.2±0.0	55.7±1.9
70/30/30	2.4±0.1	28.7±2.5	3279.7±173.6	2.2±0.2	52.3±1.9

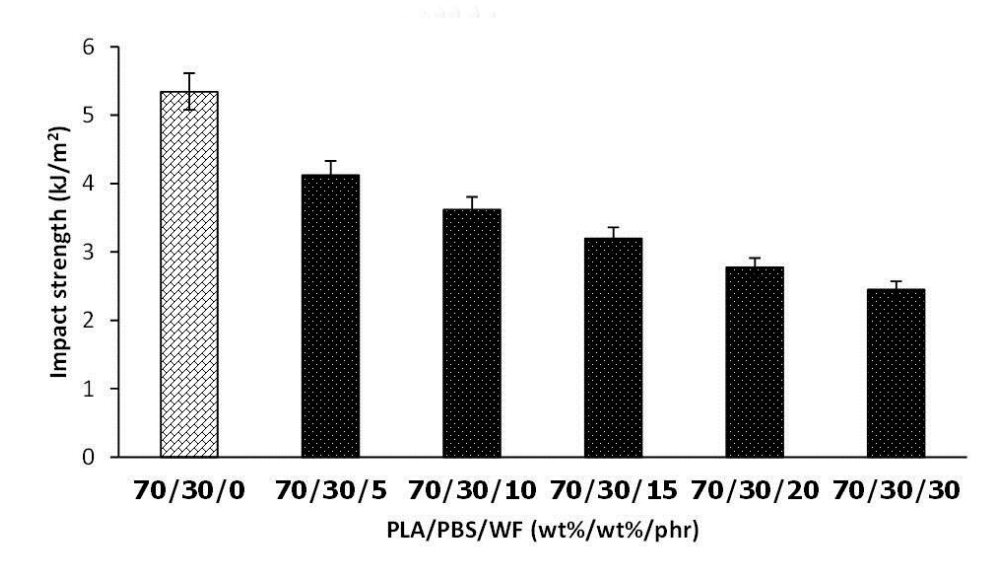
4.2.1 ความทนแรงกระแทก (Impact strength)

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าความทนแรงกระแทกของ PLA มีค่าต่ำมาก (ประมาณ 2.7 kJ/m^2) เนื่องจาก PLA มี T_g สูง (ประมาณ 60 องศาเซลเซียส) จึงเป็นพลาสติกที่มีความแข็งและเปราะที่อุณหภูมิห้อง ขณะที่ความทนแรงกระแทกของ PBS มีค่าสูงที่สุด (ประมาณ 6.9 kJ/m^2) เนื่องจาก PBS มี T_g ต่ำมาก (ประมาณ -40 องศาเซลเซียส) จึงเป็นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นสูงที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้น เมื่อผสม PLA และ PBS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีความทนแรงกระแทกสูงกว่า PLA โดยมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้นจนพอลิเมอร์ผสมมีอัตราส่วน 70/30 ซึ่งมีความทนแรงกระแทกประมาณ 5.3 kJ/m^2 (สูงกว่า PLA ~ 2 เท่า) และเมื่อปริมาณ PBS ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มต่อไปอีกจนมีอัตราส่วน 60/40 และ 50/50 พบว่า ความทนแรงกระแทกกลับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่ม (agglomeration) ของ PBS เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการเข้าร่วมตัวลดลง และพอลิเมอร์แต่ละชนิดต่างแสดงสมบัติของตัวเองออกมาเพราะมีปริมาณใกล้เคียงกัน รวมทั้งยังมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกเฟสและกลับเฟส (phase reversion) อีกด้วย ดังนั้น จึงได้เลือกพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 ไปใช้เตรียมพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยผงไม้ในปริมาณ 5, 10, 15, 20 และ 30 ส่วนโดยน้ำหนักต่อเรซินร้อยละ (parts by weight per hundred resin, phr) ต่อไป เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่มีการปรับปรุงความทนแรงกระแทกมากที่สุด ดังแสดงการเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกของ PLA, PBS และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ

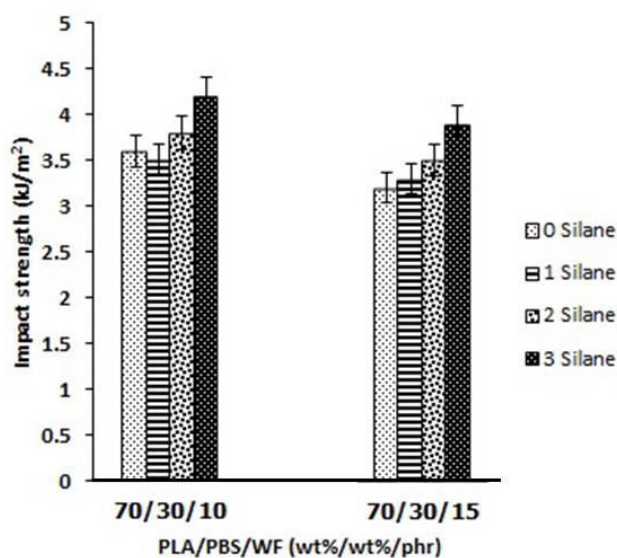
สำหรับความทนแรงกระแทกของพอลิเมอร์คอมสิตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เช่นเดียวกัน โดยพบว่าความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงการเปรียบเทียบความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตไว้ในรูปที่ 4.4 ซึ่งความทนแรงกระแทกมีค่าลดลงจากประมาณ 5.3 kJ/m^2 ลงมาต่ำสุดที่ 2.4 kJ/m^2 เมื่อใส่ผงไม้ปริมาณ 30 phr ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของผงไม้มีลักษณะเป็นแท่งที่มีความแข็งตึง (stiffness) สูง ซึ่งเมื่อใส่ในปริมาณมากอาจทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของทั้ง PLA และ PBS ทำให้ความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม คอมพอสิตที่ใส่ผงไม้น้อยกว่า 30 phr จะยังคงมีความทนแรงกระแทกสูงกว่า PLA



รูปที่ 4.4 ความทนแรงกระแทกของ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

นอกจากนี้ รูปที่ 4.5 แสดงความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 1, 2 และ 3% โดยน้ำหนักของผงไม้ เปรียบเทียบกับของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ไม่ผ่านการตัดแปรผิวเมื่อใส่ผงไม้ในคอมพอสิตปริมาณ 10 และ 15 phr ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการตัดแปรผิวช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกของวัสดุคอมพอสิต ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารคู่ควบไซเลนช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างผิว (interfacial adhesion) ของผงไม้และเมทริกซ์ อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตขึ้นกับปริมาณของทั้งผงไม้และสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ ซึ่งถ้าตัดแปรผิวผงไม้ด้วยสารคู่ควบปริมาณน้อยเกินไป (1%) อาจส่งผลให้การตัดแปรผิวเกิดได้ไม่สมบูรณ์ และไม่สามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทกของคอมพอสิตได้อีกด้วย ซึ่งจะเห็นจากรูปได้ว่าคอมพอสิตที่

ใส่ผงไม้ทั้ง 10 phr และ 15 phr ได้รับการปรับปรุงความทนแรงกระแทกมากที่สุดเมื่อตัดแปรรวมไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 3%

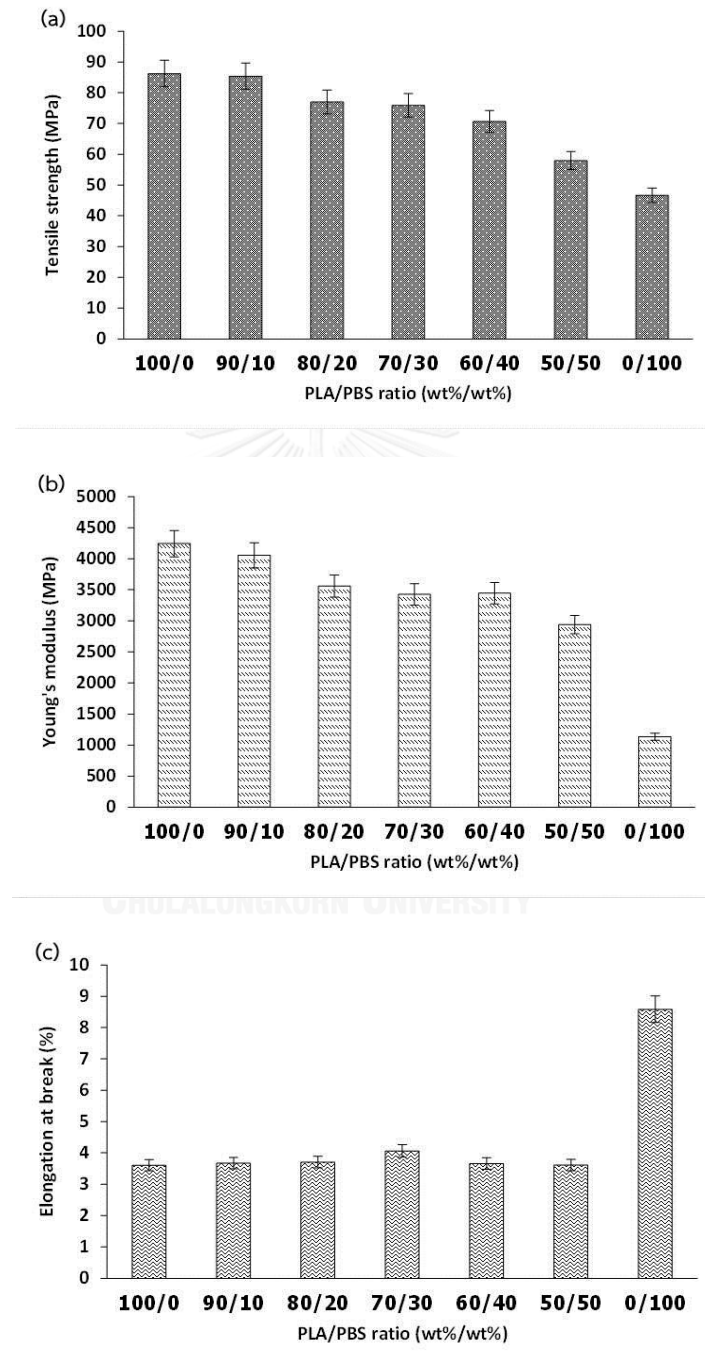


รูปที่ 4.5 ความทนแรงกระแทกของ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่เตรียมจากผงไม้ที่ตัดแปรรวมและไม้ตัดแปรรวมด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณต่างๆ

4.2.2 สมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile properties)

จากตารางที่ 4.1 พบว่า PLA มีความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัสประมาณ 86.2 MPa และ 4243 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ PBS มีความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัสเพียงประมาณ 46.7 MPa และ 1135 MPa ตามลำดับ ดังนั้น PBS จึงมีความแข็งแรงต่ำกว่าแต่มีความยืดหยุ่นสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA ซึ่งมีผลทำให้ทั้งความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มขึ้น โดยความทนแรงดึงและยังสัมมอดูลัสลดลงเหลือประมาณ 58 MPa และ 2938 MPa ตามลำดับ เมื่อใส่ PBS ปริมาณ 50% ส่วนการยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA และ PBS มีค่าประมาณ 3.6% และ 8.6% ตามลำดับ เนื่องจาก PBS มีความยืดหยุ่นมากกว่า PLA จึงทำให้สามารถยืดตัวได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม PBS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเกรดที่มีการยืดตัวไม่สูงมาก จึงไม่มีผลในการปรับปรุงการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมมากนัก โดยพอลิเมอร์ผสมยังมีการยืดตัว ณ จุดขาดใกล้เคียงกับของ PLA หากแต่พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 จะมีการยืดตัว ณ จุดขาดสูงสุดที่ประมาณ 4.1% (เพิ่มขึ้นประมาณ 13.9%) และมีแนวโน้มลดลงจนมีค่าเข้าใกล้ของ

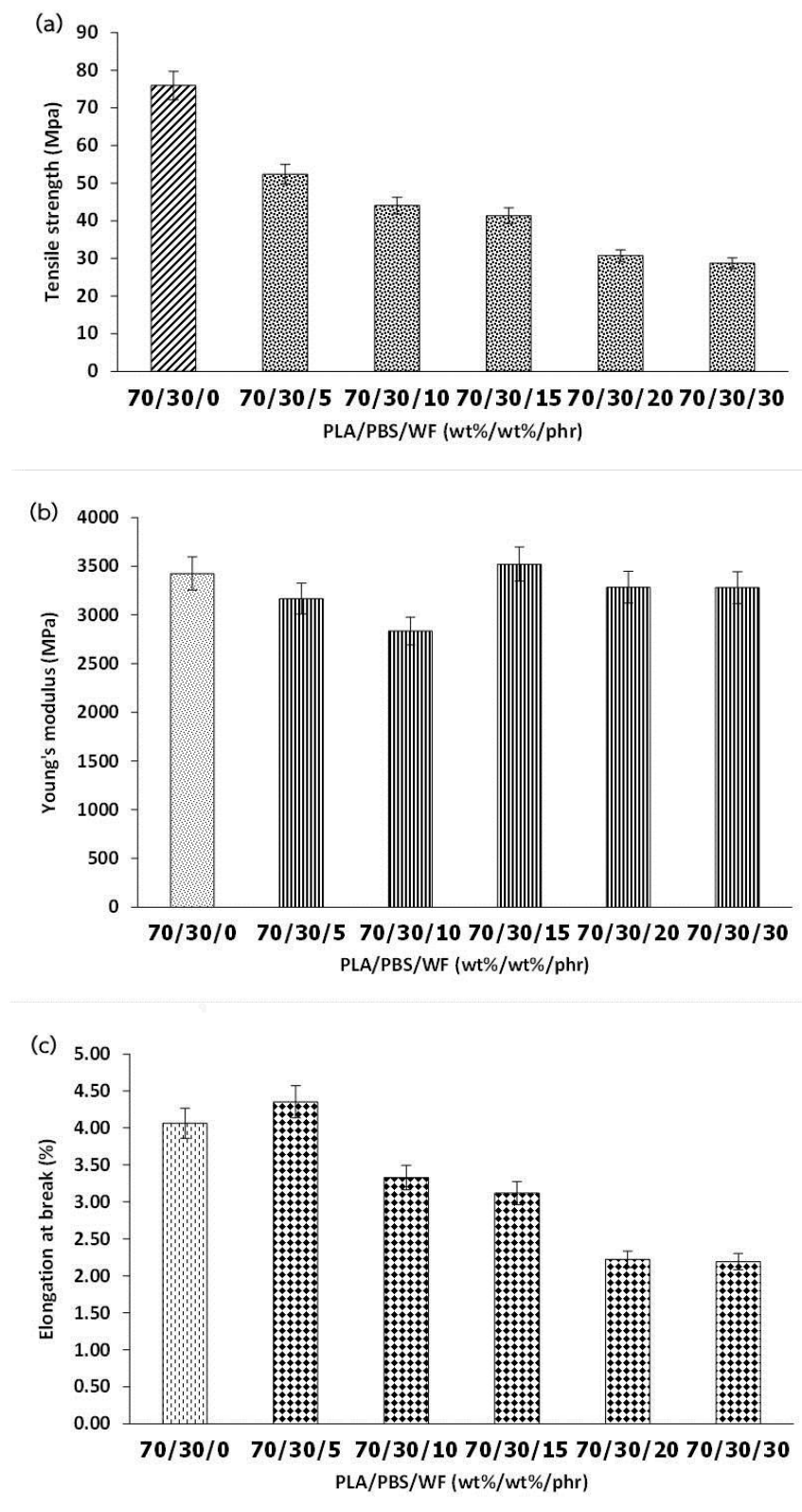
PLA เมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้นมากกว่า 30% เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มของ PBS ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงไม่มีผลช่วยปรับปรุงการยึดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม ดังแสดงการเปรียบเทียบสมบัติด้านความทนแรงดึงไว้ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สมบัติด้านความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส และ (c) การยึดตัว ณ จุดขาดของ PLA, PBS และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ

สำหรับสมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์คอมสิตที่รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการใส่ผงไม้ไม่ช่วยปรับปรุงความทนแรงดึงของคอมพอสิต หากแต่มีผลทำให้ความทนแรงดึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 75.9 MPa เหลือ 28.7 MPa เมื่อใส่ผงไม้ปริมาณ 30 phr ทั้งนี้เนื่องจากการไม่มีอันตรกิริยาระหว่างผิวของผงไม้และเมทริกซ์ ซึ่งส่งผลให้การส่งผ่านความเค้น (stress transfer) ข้ามช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างเฟสของ PLA และ/หรือ PBS ไปยังผงไม้เกิดได้ยากเมื่อได้รับแรงดึง ทำให้ความแข็งแรงของคอมพอสิตลดลง ดังแสดงการเปรียบเทียบผลของปริมาณผงไม้ในคอมพอสิตต่อความทนแรงดึงไว้ในรูปที่ 4.7(a) ส่วนยังสัมมอดูล์สของคอมพอสิตเมื่อใส่ผงไม้ปริมาณ 5 และ 10 phr กลับมีค่าต่ำกว่าที่ไม่ได้ใส่ผงไม้ เนื่องจากปริมาณผงไม้ที่ใส่เข้ายังมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ขีดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลิเมอร์ของ PLA และ PBS ได้ลดลง ทำให้โครงสร้างภายในเมทริกซ์เปิดมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ยังสัมมอดูล์สลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของผงไม้เพิ่มเป็น 15 phr มีผลทำให้ยังสัมมอดูล์สเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผงไม้สามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอในเมทริกซ์ จึงทำให้การเคลื่อนไหวของสายโซ่โพลิเมอร์ของ PLA และ PBS ถูกขัดขวางด้วยอนุภาคของผงไม้ และเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มมากกว่า 15 phr พบว่า ค่ายังสัมมอดูล์สมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของผงไม้ทำให้การขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โพลิเมอร์ของ PLA และ PBS ลดลง ดังแสดงผลการเปรียบเทียบค่ายังสัมมอดูล์สไว้ในรูปที่ 4.7(b)

สำหรับผลของการใส่ผงไม้ต่อการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตแสดงให้เห็นว่าการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้จะเป็นไปตามที่คาดไว้ เพราะการใส่อนุภาคที่แข็งดึงเข้าไปในเมทริกซ์ที่ยืดหยุ่นจะทำให้เกิดความเค้นสะสม (stress concentration) ภายในชิ้นทดสอบ ซึ่งส่งผลให้การยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตลดลง อย่างไรก็ตาม การยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ปริมาณ 5 phr ยังมีค่าสูงกว่าชิ้นทดสอบที่ไม่ใส่ผงไม้เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมีความเค้นสะสมไม่มากนักและมีโครงสร้างที่เปิดมากกว่าดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าการยึดตัว ณ จุดขาดแสดงไว้ในรูปที่ 4.7(c)

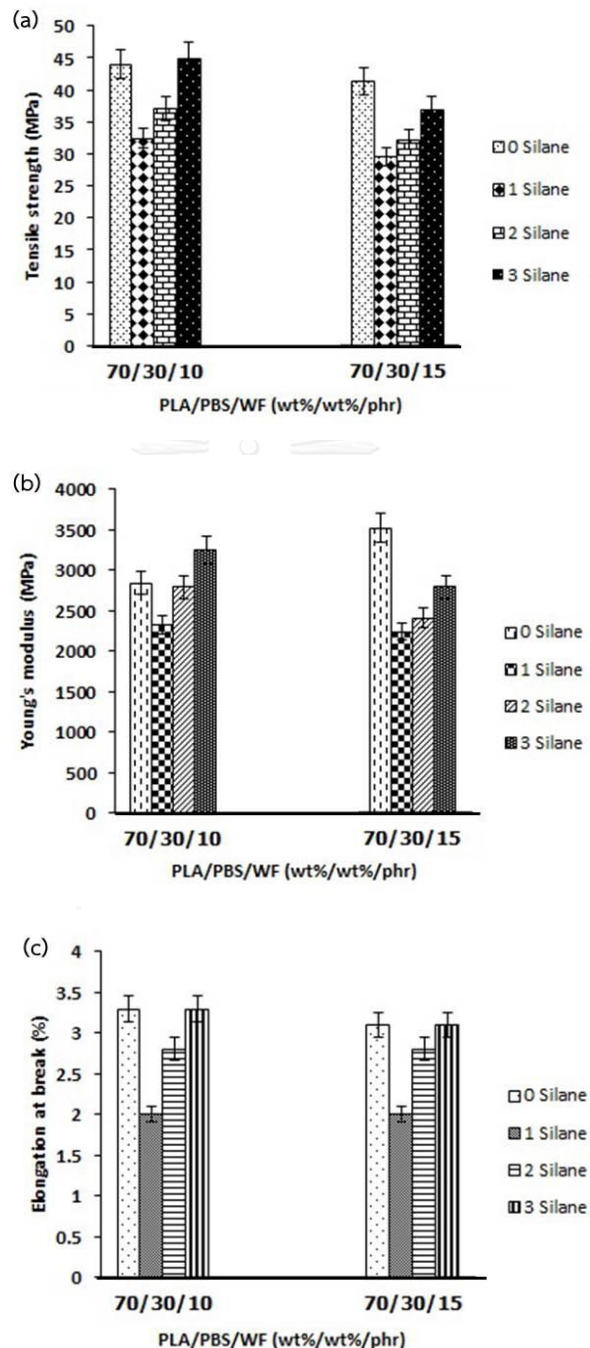


รูปที่ 4.7 สมบัติด้านความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยั่งส์มอดุลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตเมื่อใส่ผงไม้ที่ปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบกับที่ไม่ใส่ผงไม้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาความทนแรงดึงของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน พบว่า ความทนแรงดึงของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ตัดแปรผิวผงไม้ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะอาจมีการส่งผ่านความเค้นจากเมทริกซ์ไปยังผงไม้เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความทนแรงดึงของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรผิวในปริมาณ 15 phr กลับไม่ได้รับการปรับปรุงเมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ผงไม้ที่ไม่ผ่านการตัดแปรในปริมาณเท่าๆ กัน ไม่ว่าจะตัดแปรผงไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณเท่าใดก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องจากการที่สารคู่ควบไซเลนช่วยให้มีแรงยึดเกาะระหว่าง PLA กับผงไม้ และ/หรือ PBS กับผงไม้ กลับทำให้เกิดการแยกกลุ่มระหว่าง PLA-WF และ PBS-WF ซึ่งส่งผลให้ส่วนที่เป็นเมทริกซ์แยกจากกันได้ง่ายขึ้นเมื่อได้รับแรงดึง อย่างไรก็ตาม การใส่ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน 3% ปริมาณ 10 phr ในคอมพอสิต พบว่า มีการปรับปรุงความทนแรงดึงอย่างไม่มีนัยสำคัญ เพราะการแยกกลุ่มดังกล่าวอาจเกิดได้น้อยลงเมื่อปริมาณผงไม้ในเมทริกซ์ลดลง ซึ่งความทนแรงดึงของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรผิวได้แสดงการเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 4.8(a)

สำหรับยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตเมื่อใส่ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณต่างๆ กัน ในปริมาณ 10 phr และ 15 phr พบว่า ยังสัมมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัดแปรที่ใช้ตัดแปรผิวผงไม้ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ไม่ได้ตัดแปร พบว่า การใส่ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 1-2% ในปริมาณ 10 phr กลับมีผลทำให้ยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตมีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการตัดแปรไม่เพียงพอและทั่วถึงเพราะปริมาณสารคู่ควบไซเลนน้อยเกินไป ส่งผลให้แรงยึดเกาะระหว่างผิวผงไม้กับเมทริกซ์ไม่เพียงพอ จึงทำให้ได้โครงสร้างที่เปิดมากกว่าคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ตัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 3% ดังนั้น การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนเป็น 3% จึงมีผลทำให้ยังสัมมอดูลัสของชิ้นทดสอบมีค่าสูงกว่าคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ไม่ได้ตัดแปรเมื่อใส่ผงไม้ในปริมาณเท่ากัน ในขณะที่เมื่อใส่ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรปริมาณ 15 phr พบว่า ยังสัมมอดูลัสของคอมพอสิตไม่ได้รับการปรับปรุงไม่ว่าจะตัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณเท่าใดก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผงไม้ที่ไม่ผ่านการตัดแปร ทั้งนี้ก็ด้วยเหตุผลเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของค่าความทนแรงดึง ซึ่งผลของการใช้ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรต่อค่ายังสัมมอดูลัสเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้ตัดแปรได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8(b) สำหรับการยึดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ตัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 10 และ 15 phr จะแสดงผลไปในทำนองเดียวกัน คือ มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่เพิ่มขึ้น หากแต่จะไม่มี การปรับปรุงสมบัติของการยึดตัว ณ จุดขาดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผงไม้ที่ไม่ผ่านการตัดแปร อย่างไรก็ตาม คอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 3% ทั้งที่ใส่ในปริมาณ 10 และ

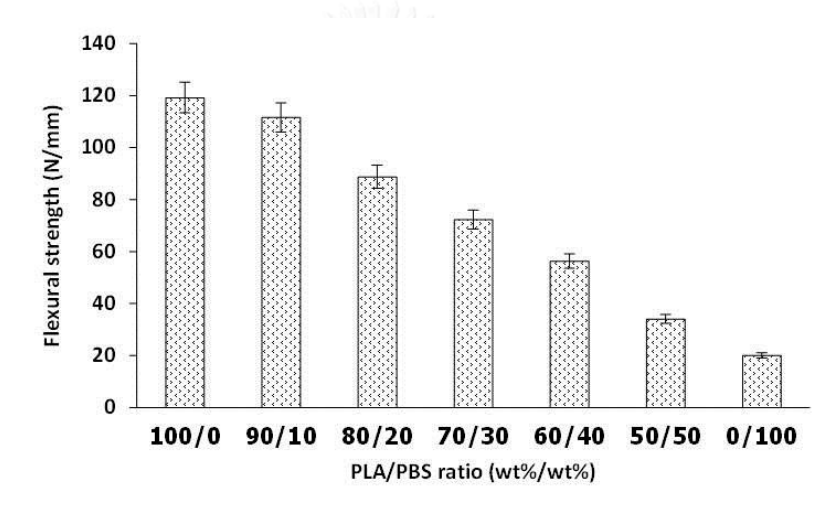
15 phr จะทำให้ได้คอมพอสิตที่มีค่าการยึดตัว ณ จุดขาดใกล้เคียงกับคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ไม่ได้ดัดแปรในปริมาณเท่ากัน ซึ่งผลการเปรียบเทียบค่าการยึดตัว ณ จุดขาดแสดงไว้ในรูปที่ 4.8(c)



รูปที่ 4.8 สมบัติด้านความทนแรงดึง: (a) ความทนแรงดึง, (b) ยังส์มอดุลัส และ (c) การยึดตัว ณ จุดขาดของPLA/PBS/WF คอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ดัดแปรและไม่ดัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลน ปริมาณต่างๆ

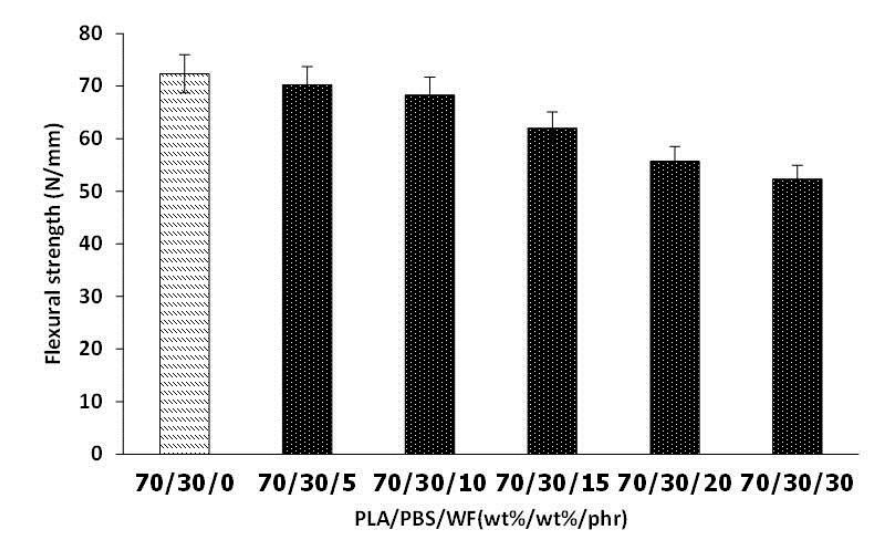
4.2.3. ความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength)

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าความทนแรงดัดโค้งของ PLA มีค่าสูงมาก (ประมาณ 119.2 N/mm) เมื่อเปรียบเทียบกับความทนแรงดัดโค้งของ PBS (ประมาณ 20 N/mm) เนื่องจาก PLA เป็นพลาสติกที่มีความแข็งตึงมากกว่า PBS ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น จึงทำให้ PLA มีความทนแรงดัดโค้งสูงกว่า PBS อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้จากการใส่ PBS เข้าไปใน PLA ในปริมาณต่างๆ ก็มีความทนแรงดัดโค้งลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ชั้นทดสอบสามารถโค้งงอได้มากขึ้นเมื่อได้รับแรงกด โดยรูปที่ 4.9 แสดงความทนแรงดัดโค้งของ PLA, PBS และพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ



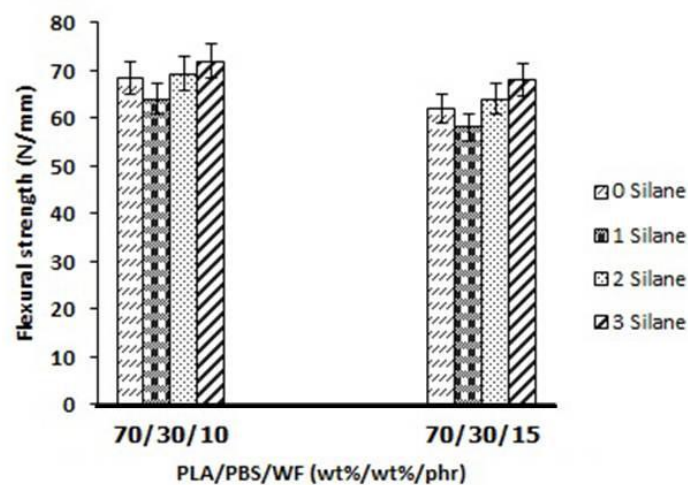
รูปที่ 4.9 ความทนแรงดัดโค้งของ PLA, PBS และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ

นอกจากนี้ เมื่อนำพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 70/30 ไปใส่ผงไม้ปริมาณต่างๆ พบว่า ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตมีค่าลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากทั้ง PLA และ PBS มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวกับผงไม้ต่ำ และการมีโครงสร้างที่เปิดซึ่งส่งผลให้ความทนแรงดัดโค้งมีค่าลดลง นอกจากนี้ การใส่ผงไม้จำนวนมาก (20 และ 30 phr) ยังมีผลทำให้ผงไม้เกิดการเกาะกลุ่ม ซึ่งทำให้มีพื้นผิวสัมผัสกับ PLA และ PBS ได้น้อยลง ดังนั้น ความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตจึงมีแนวโน้มลดลงเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงผลของปริมาณผงไม้ต่อความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตไว้ในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความทนแรงดัดโค้งของ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่อัตราส่วนต่างๆ

อย่างไรก็ตาม การใช้ผงไม้ที่ผ่านการดัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนในปริมาณที่เหมาะสม (2 และ 3%) อาจช่วยเพิ่มความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตได้ไม่ว่าจะใช้ผงไม้ปริมาณ 10 หรือ 15 phr ก็ตาม ซึ่งผลการเปรียบเทียบความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ดัดแปรและไม่ได้ดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณต่างๆ ไว้ในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความทนแรงดัดโค้งของ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่เตรียมจากผงไม้ที่ดัดแปรและไม่ได้ดัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณต่างๆ

4.3 พฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และคอมพอสิต PLA/PBS/WF

4.3.1. วิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC)

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมทางความร้อนของ PLA, พอลิเมอร์ผสมของ PLA/PBS และคอมพอสิตของ PLA/PBS/WF ด้วยเทคนิค DSC ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งสมบัติทางความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ ได้แก่ อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g), อุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m), อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น (T_{cc}), เอนทัลปีการหลอมเหลว (ΔH_m) และเอนทัลปีการเกิดผลึกเย็น (ΔH_{cc}) โดยสมบัติต่างๆ เหล่านี้อ่านได้จาก DSC เทอร์โมแกรมที่ปรากฏในขั้นตอนให้ความร้อนครั้งที่ 2 (second heating scan) ซึ่งระดับความเป็นผลึก (X_c) ของ PLA สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 สำหรับผลที่ได้ในขั้นตอนให้ความร้อนครั้งที่ 1 (first heating scan) ไม่ได้นำเสนอเนื่องจากเป็นขั้นตอนการล้างพฤติกรรมทางความร้อนที่ต่างจากกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งไม่ใช่พฤติกรรมทางความร้อนที่แท้จริงของชิ้นตัวอย่าง ส่วนขั้นตอนทำให้เย็น (cooling scan) ในงานวิจัยนี้ไม่พบอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) ของ PLA เนื่องจาก PLA เป็นพอลิเมอร์ที่มีอัตราการเกิดผลึกช้ามาก ดังนั้น เมื่อขึ้นตัวอย่างที่หลอมเหลวถูกทำให้เย็นด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที โมเลกุลของ PLA มีเวลาไม่มากพอที่จะจัดเรียงตัวเป็นผลึกเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมทางความร้อนและระดับการเกิดผลึกของ PLA ล้วน และของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC

PLA/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	$X_{c, PLA}$ (%)
100/0/0	60.4	-	-	154.1	0.4	0.4
90/10/0	58.1	117.0	3.2	149.1, 154.8	24.4	25.3
80/20/0	57.9	119.4	0.8	149.0, 155.0	23.6	30.7
70/30/0	57.8	118.9	1.4	148.6, 154.8	20.4	29.2
60/40/0	57.5	118.6	4.0	148.8, 154.8	16.0	21.4
50/50/0	57.2	119.0	5.2	149.2, 154.7	12.4	15.4
70/30/5	57.5	114.1	7.0	148.5, 155.1	20.7	21.9
70/30/10	57.2	118.9	1.6	148.7, 155.4	19.8	30.6
70/30/15	57.1	115.1	4.4	149.0, 155.2	22.0	31.0
70/30/20	57.1	119.1	2.0	149.2, 155.9	18.8	31.2
70/30/30	57.0	119.1	1.7	149.5, 156.3	17.7	31.9

ตารางที่ 4.2 แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรมของชิ้นตัวอย่างในขั้นตอนให้ความร้อนครั้งที่ 2 พบว่า PLA มี T_g เท่ากับ 60.4 องศาเซลเซียส ซึ่ง T_g ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก PBS มีความยืดหยุ่นสูงจึงช่วยให้ PLA เคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ T_g ของ PLA ในพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมจากผงไม้ที่ไม่ผ่านการตัดแปรผิวด้วยสารเคลือบไซเลนมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากผงไม้ไม่สามารถขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โพลีเมอร์ของ PLA เนื่องจากการไม่มีอันตรกิริยาระหว่างผงไม้และ PLA อีกทั้งคอมพอสิตที่เตรียมได้ยังมีโครงสร้างที่เปิดมากกว่า ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ อนุภาคของผงไม้ยังอาจเกาะกลุ่มกันเมื่อปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง PLA และผงไม้ลดลง อย่างไรก็ตาม ไม่ปรากฏ T_{cc} ให้เห็นสำหรับชิ้นตัวอย่าง PLA ซึ่งแสดงว่า PLA ที่เป็นของแข็งเมื่อถูกทำให้ร้อนอีกครั้งที่อุณหภูมิสูงกว่า T_g ไม่สามารถเกิดผลึกได้ เนื่องจากโพลีเมอร์ของ PLA มีความแข็งตึงจึงเคลื่อนไหวมาเรียงตัวเป็นผลึกได้ยาก อย่างไรก็ตาม PLA ในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนแสดง T_{cc} ในช่วงอุณหภูมิ 117-119 องศาเซลเซียส เมื่อได้รับความร้อนครั้งที่ 2 เนื่องจาก PBS ที่มีความยืดหยุ่นสูงในเฟสของ PLA ช่วยให้ PLA สามารถเคลื่อนที่ไปจัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้ง่ายขึ้น และยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึก (nucleating agent) ให้กับ PLA อีกด้วย นอกจากนี้ T_{cc} ของ PLA ในคอมพอสิตมีค่าอยู่ในช่วง 114.1-119.1 องศาเซลเซียส ซึ่งการที่ T_{cc} ลดลง แสดงว่า PLA ในคอมพอสิตสามารถเกิดผลึกได้เร็วขึ้นเพราะผงไม้ทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกให้กับ PLA แต่เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของผงไม้ลดลง เนื่องจากการเกาะกลุ่มของอนุภาคผงไม้ ซึ่งอาจขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โพลีเมอร์ของ PLA ทำให้ PLA ใช้เวลาในการเกิดผลึกเพิ่มขึ้น และจากตารางที่ 4.2 พบว่า PLA มี T_m เท่ากับ 154.1 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ยังปรากฏ T_m ของ PLA 2 แห่ง ในพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตทุกอัตราส่วน เนื่องจากผลึกที่มีความสมบูรณ์น้อยกว่าเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำกว่า แล้วพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) ที่มีโครงสร้างสมบูรณ์มากกว่า จึงเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่า

นอกจากนี้ จากตารางที่ 4.2 พบว่า PLA มีระดับความเป็นผลึกต่ำมาก แต่ระดับความเป็นผลึกของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ทั้งนี้จะขึ้นกับปริมาณของ PBS และผงไม้ ซึ่ง PBS ในพอลิเมอร์ผสมช่วยให้ PLA จัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้นและทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่เมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้นเป็น 40 และ 50 phr กลับทำให้ปริมาณผลึกลดลงอย่างมาก เนื่องจากการเกาะกลุ่มของ PBS และอาจเริ่มมีการกลับเฟส จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของ PBS ลดลง และเมื่อปริมาณผงไม้ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกในคอมพอสิตเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ระดับความเป็นผลึกของ PLA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม การใส่ผงไม้ปริมาณ 5 phr กลับทำให้ปริมาณผลึกลดลง เนื่องจากมีการกระจายตัวที่ไม่ดีพอ ซึ่งอาจขัดขวางการจัดเรียงตัวของ PLA และลดประสิทธิภาพของการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของ PBS อีกด้วย

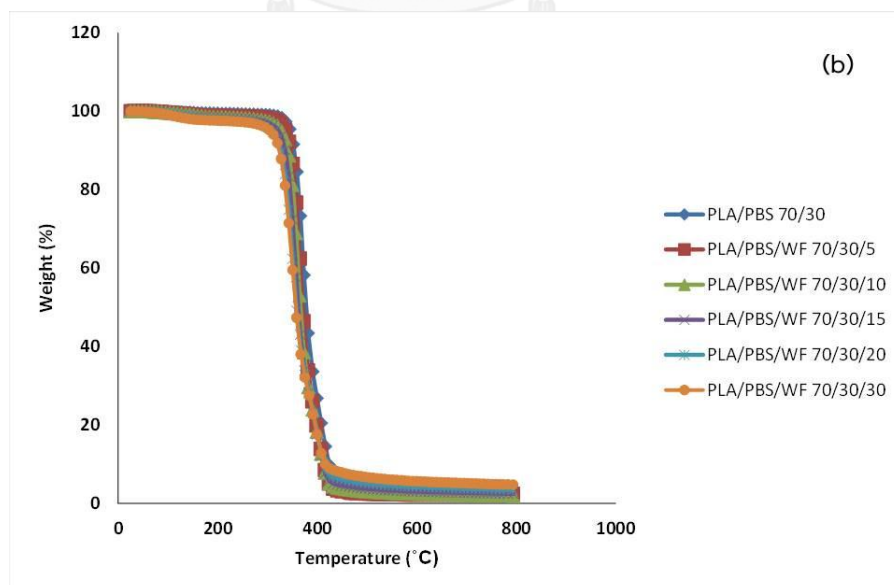
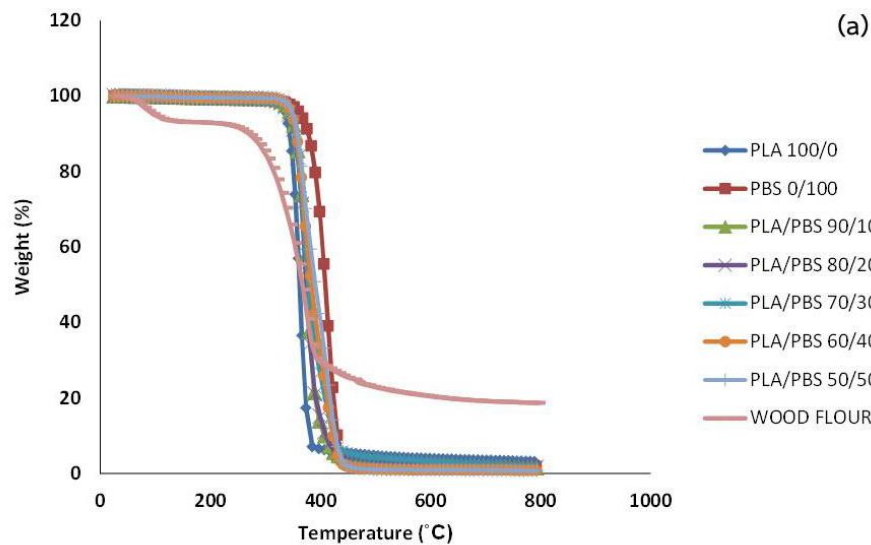
ตารางที่ 4.3 แสดงผลที่ได้จาก DSC เทอร์โมแกรม ในขั้นตอนการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของชิ้นตัวอย่างคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ถูกดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณต่างๆ กัน พบว่า การใส่ผงไม้ที่ผ่านการดัดแปรผิวไม่มีผลต่อ T_g และ T_m เมื่อเปรียบเทียบกับการใส่ผงไม้ที่ไม่ผ่านการดัดแปร ไม่ว่าจะใส่ผงไม้ปริมาณ 10 หรือ 15 phr ก็ตาม หากแต่ T_{cc} ของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ปริมาณ 10 phr มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการมีอันตรกิริยาระหว่าง PLA และผงไม้ทำให้ PLA เคลื่อนที่ไปจัดเรียงตัวได้ยากขึ้น รวมทั้งปริมาณผลึกของ PLA ที่ลดลงตามปริมาณของสารคู่ควบไซเลนที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ไม่ปรากฏ T_{cc} ของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ผ่านการดัดแปรผิวปริมาณ 15 phr ซึ่งปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้นและการมีอันตรกิริยาระหว่าง PLA และผงไม้อาจขัดขวางการจัดเรียงตัวของ PLA ทำให้ไม่สามารถเกิดผลึกเมื่อยังอยู่ในสถานะที่เป็นของแข็งได้ อย่างไรก็ตาม พบว่า ปริมาณผลึกของ PLA มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากพอลิเมอร์ที่ได้หลอมเหลวแล้วที่ T_m ต่ำสามารถเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวเกิดผลึกใหม่ได้โดยมีผงไม้ที่ผ่านการดัดแปรเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึก

ตารางที่ 4.3 พฤติกรรมทางความร้อนและระดับการเกิดผลึกของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ดัดแปรและไม่ดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณต่างๆ ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC

PLA/PBS/WF + silane (wt%/wt%/phr) + (% of WF)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	X_c, PLA (%)
70/30/10 + 0%	57.2	118.9	1.6	148.7, 155.4	19.8	30.6
70/30/10 + 1%	56.1	119.2	1.2	148.6, 153.9	19.0	30.5
70/30/10 + 2%	56.7	120.2	1.1	148.8, 154.1	18.4	29.7
70/30/10 + 3%	56.3	121.3	6.1	149.2, 154.1	19.1	27.3
70/30/15 + 0%	57.1	115.1	4.4	149.0, 155.2	22.0	31.0
70/30/15 + 1%	57.1	-	-	148.7, 155.1	23.1	40.7
70/30/15 + 2%	56.5	-	-	149.0, 154.1	23.6	41.6
70/30/15 + 3%	56.3	-	-	148.4, 155.4	23.8	41.9

4.3.2. วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (TGA)

รูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสมของ PLA/PBS และพอลิเมอร์คอมพอสิตของ PLA/PBS/WF ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA ในเทอมของอุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (T_{onset}), อุณหภูมิการสลายตัว 50% ($T_{50\%}$) และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (T_{endset}) และปริมาณชาร์ (char) ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.12 TGA เทอร์โมแกรมของ (a) PLA, PBS และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS อัตราส่วนต่างๆ และ (b) พอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF อัตราส่วนต่างๆ

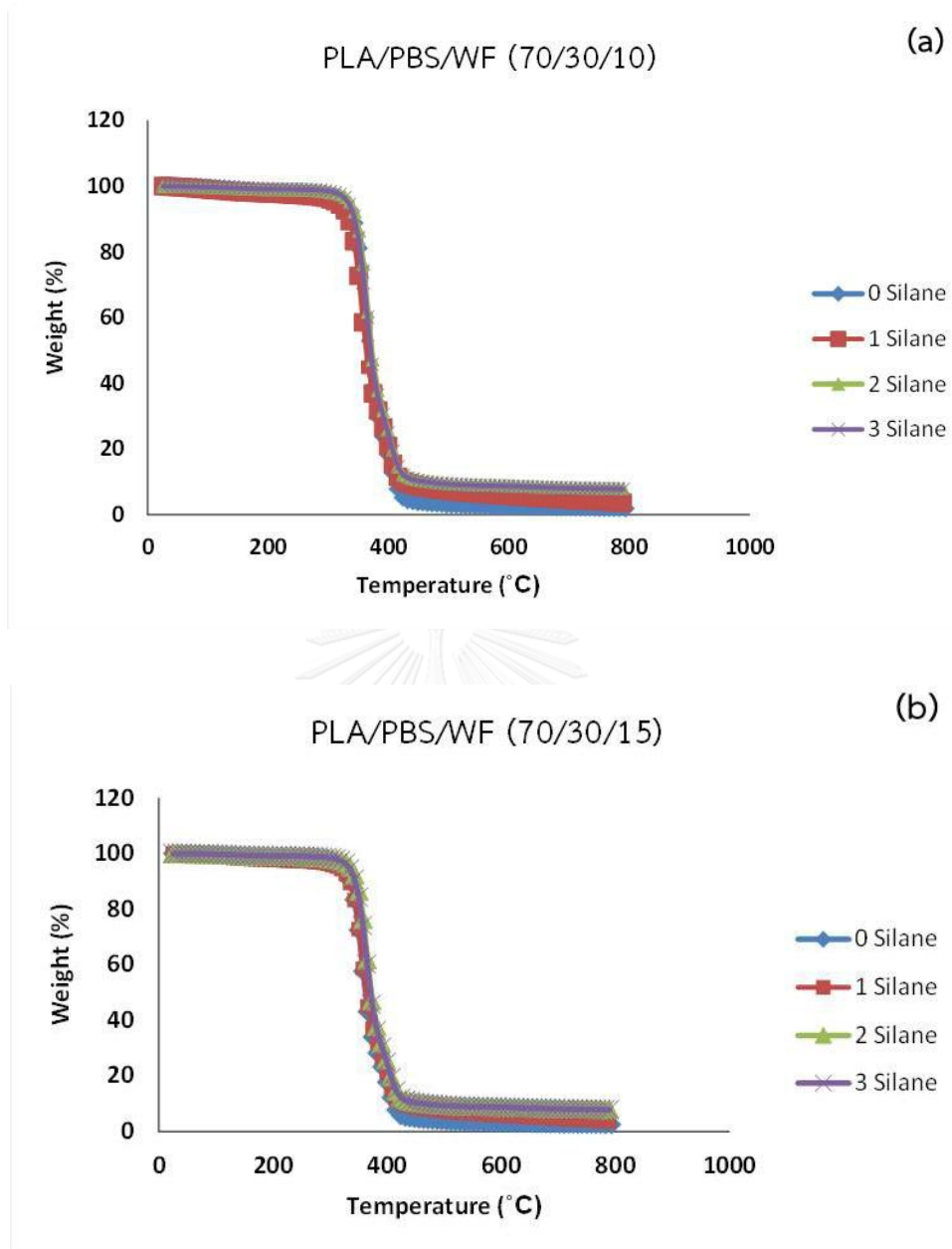
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัวและปริมาณชาร์ของผงไม้, PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสมของ PLA/PBS และคอมพอสิตของ PLA/PBS/WF ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA

PLA/PBS/WF (wt%/wt%/phr)	T_{onset} (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	T_{endset} (°C)	Char (%)
0/0/100	328.1	360.8	397.2	18.7
100/0/0	348.7	360.0	378.2	3.1
0/100/0	387.0	406.3	433.2	1.8
90/10/0	358.3	372.5	396.3	3.3
80/20/0	357.0	372.9	394.5	3.3
70/30/0	355.4	373.3	402.0	4.0
60/40/0	355.4	382.0	411.8	1.1
50/50/0	355.3	390.0	422.2	1.1
70/30/5	350.0	372.7	396.6	2.3
70/30/10	345.9	365.1	391.7	2.3
70/30/15	339.8	357.8	387.5	2.7
70/30/20	332.1	358.6	385.7	3.8
70/30/30	328.6	350.7	385.6	5.3

จากรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.4 พบว่า ผงไม้มีอุณหภูมิเริ่มการสลายตัวประมาณ 328.1 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับของ PLA (348.7 องศาเซลเซียส) และ PBS (387 องศาเซลเซียส) และมีอุณหภูมิการสลายตัว 50% ประมาณ 360.8 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับของ PLA (360 องศาเซลเซียส) และมีค่าต่ำกว่าของ PBS (406.3 องศาเซลเซียส) หากแต่มีอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวประมาณ 397.2 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าสูงกว่าของ PLA (378.2 องศาเซลเซียส) และยังคงมีค่าต่ำกว่าของ PBS (433.2 องศาเซลเซียส) โดยมีปริมาณชาร์มากที่สุดเท่ากับ 18.7% เมื่อเทียบการของ PLA (3.1%) และ PBS (1.8%) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PBS มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า PLA และผงไม้ยังเห็นได้ชัด นอกจากนี้ พบว่าเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ทุกอัตราส่วนสูงกว่าของ PLA ล้วน ซึ่งเห็นได้จากการที่ T_{onset} , $T_{50\%}$ และ T_{endset} ของพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าของ PLA อย่างไรก็ตาม การใส่ผงไม้ในพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน 70/30 กลับทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์คอมพอสิตลดลงตามปริมาณของผงไม้ที่เพิ่มขึ้น และถึงแม้ว่าเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตมีแนวโน้ม

ลดลง หากแต่คอมพอลิเมอร์ที่ใส่ผงไม้ปริมาณไม่เกิน 10 phr ยังมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าของ PLA ล้วน เพราะมี T_{onset} , $T_{50\%}$ และ T_{endset} สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ทั้งผงไม้, PLA, PBS, โพลีเออร์ผสม PLA/PBS และโพลีเออร์คอมพอลิเมอร์ของ PLA/PBS/WF จะไม่เกิดการสลายตัวภายใต้ภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิประมาณ 190 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.5 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของโพลีเออร์คอมพอลิเมอร์ของ PLA/PBS/WF ที่ใช้ผงไม้ทั้งที่ตัดแปรและไม่ตัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณต่างๆ ซึ่งพบว่า การตัดแปรผงไม้ในปริมาณที่เหมาะสมมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผงไม้ที่ไม่ได้ตัดแปรในปริมาณเท่ากัน ซึ่งการตัดแปรผงไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลน 2% และ 3% ส่งผลให้มีการปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ที่ใส่ผงไม้ปริมาณ 10 phr โดย T_{onset} , T_{endset} และปริมาณชาร์มีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่ $T_{50\%}$ มีค่าใกล้เคียงกับคอมพอลิเมอร์ที่ใส่ผงไม้ที่ไม่ได้ตัดแปร นอกจากนี้ การตัดแปรผงไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลนไม่ช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอลิเมอร์ที่ใส่ผงไม้ปริมาณ 15 phr มากนัก โดยมีเพียง T_{onset} เท่านั้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อตัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลน 3% ส่วน $T_{50\%}$ และ T_{endset} ไม่เพิ่มขึ้นไม่ว่าจะตัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณเท่าใดก็ตาม อย่างไรก็ตาม การใช้สารคู่ควบไซเลนช่วยให้ปริมาณชาร์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผงไม้ที่ไม่ได้ตัดแปร โดยชาร์ที่เกิดขึ้นอาจปกป้องพื้นผิวของโพลีเมอร์ไม่ให้ออกซิเจนแพร่หรือซึมผ่านเข้าไปข้างใน ซึ่งมีผลทำให้คอมพอลิเมอร์มีความต้านทานการลุกไหม้เพิ่มขึ้น



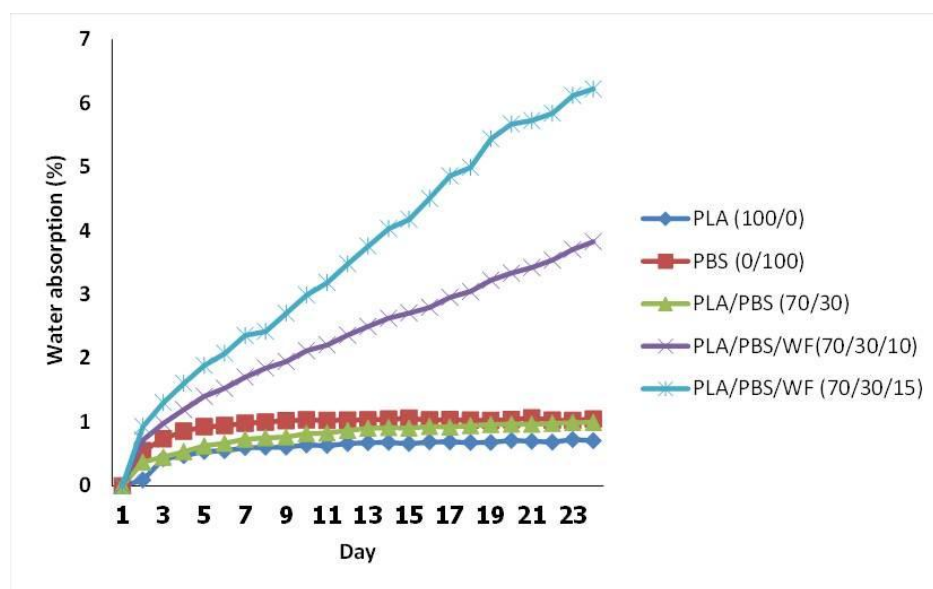
รูปที่ 4.13 TGA เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตที่ใช้ผงไม้ที่ดัดแปรและไม่ดัดแปรด้วยสารคู่ควบไซเลน ปริมาณต่างๆ เมื่อใส่ผงไม้ปริมาณ (a) 10 phr และ (b) 15 phr

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวและปริมาณชาร์ของ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ตัดแปร ด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณต่างๆ ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA

PLA/PBS/WF + silane (wt%/wt%/phr) + (% of WF)	T_{onset} (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	T_{endset} (°C)	Char (%)
70/30/10 + 0%	345.9	365.1	391.7	2.3
70/30/10 + 1%	339.4	357.8	386.7	5.0
70/30/10 + 2%	349.0	365.7	393.6	8.3
70/30/10 + 3%	346.5	364.9	394.0	8.0
70/30/15 + 0%	339.8	357.8	387.5	2.7
70/30/15 + 1%	328.4	343.7	371.6	5.6
70/30/15 + 2%	339.3	352.5	380.8	8.5
70/30/15 + 3%	340.1	352.8	382.4	8.4

4.4 การดูดซึมน้ำ (Water absorption)

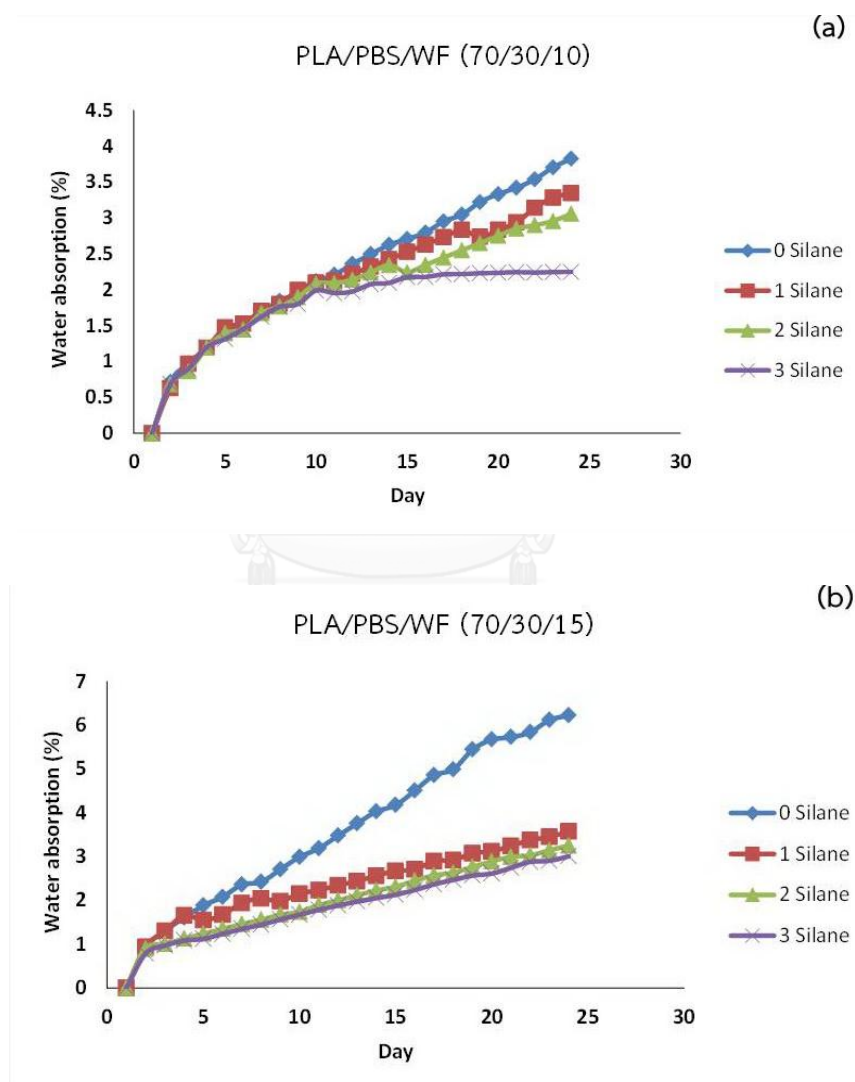
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมและจำนวนวันที่แช่น้ำของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.14 ปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมและจำนวนวันที่แช่น้ำของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 70/30 และ PLA/PBS/WF คอมพอสิตที่อัตราส่วน 70/30/10 และ 70/30/15

จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่ใส่ผงไม้สามารถดูดซึมน้ำได้มากกว่าพอลิเมอร์ผสม PLA และ PBS เมื่อพิจารณาจำนวนวันในการแช่น้ำที่เท่ากัน ซึ่งเมื่อพิจารณาในรายละเอียด พบว่า การดูดซึมน้ำของชิ้นทดสอบส่วนใหญ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนวันที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่า ทั้ง PLA, PBS และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS มีการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นในช่วง 3-5 วันแรก หลังจากนั้นชิ้นทดสอบมีการดูดซึมน้ำค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 สัปดาห์ เนื่องจากชิ้นทดสอบดูดซึมน้ำจนเริ่มถึงจุดอิ่มตัว และดูดซึมน้ำได้มากที่สุดประมาณ 0.075%, 1.0475 และ 0.995% ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 สัปดาห์ ในขณะที่ชิ้นทดสอบที่มีผงไม้เป็นองค์ประกอบ 10 และ 15 phr สามารถดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องได้มากที่สุดประมาณ 3.8267% และ 6.2224% ตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 สัปดาห์ เช่นกัน เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของผงไม้เป็นเซลลูโลสที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) อย่างรุนแรง โดยการดูดซึมน้ำมีผลทำให้เอนไซม์ของจุลินทรีย์เคลื่อนเข้าสู่ภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้เพิ่มขึ้น

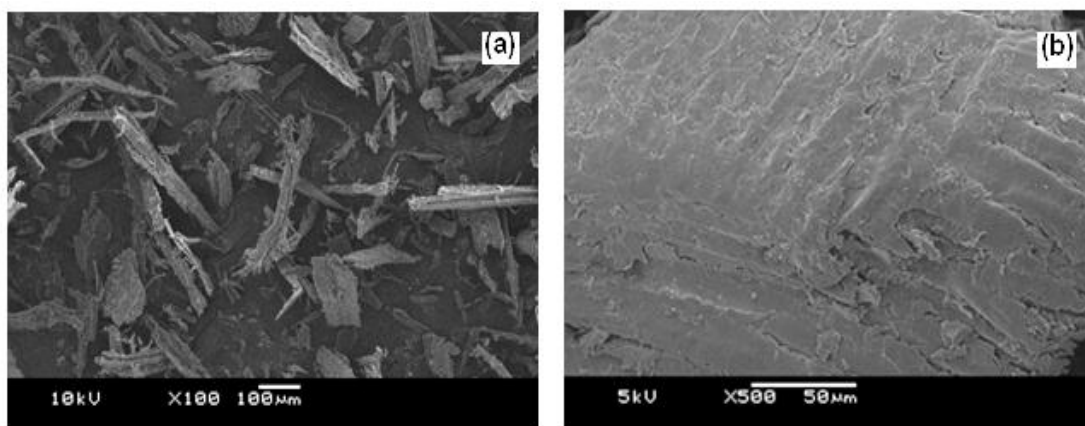
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมและจำนวนวันที่แช่น้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน 70/30/10 และ 70/30/15 โดยใช้ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณต่างๆ กัน ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้ผงไม้ที่ผ่านการตัดแปรทั้งปริมาณ 10 และ 15 phr มีผลทำให้คอมพอสิตดูดซึมน้ำลดลงตามปริมาณของสารคู่ควบที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ที่ไม่ผ่านการตัดแปรผิวปริมาณเท่ากันและจำนวนวันที่แช่น้ำในลำดับเดียวกัน เนื่องจากการตัดแปรผิวช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างผงไม้และเมทริกซ์ซึ่งทำให้คอมพอสิตมีความชอบน้ำลดลง จึงดูดซึมน้ำได้น้อยลง และอาจมีผลทำให้การย่อยสลายทางชีวภาพต่ำลงด้วย



รูปที่ 4.15 ปริมาณการดูดซึมน้ำสะสมและจำนวนวันที่แช่น้ำของพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน (a) 70/30/10 และ (b) 70/30/15

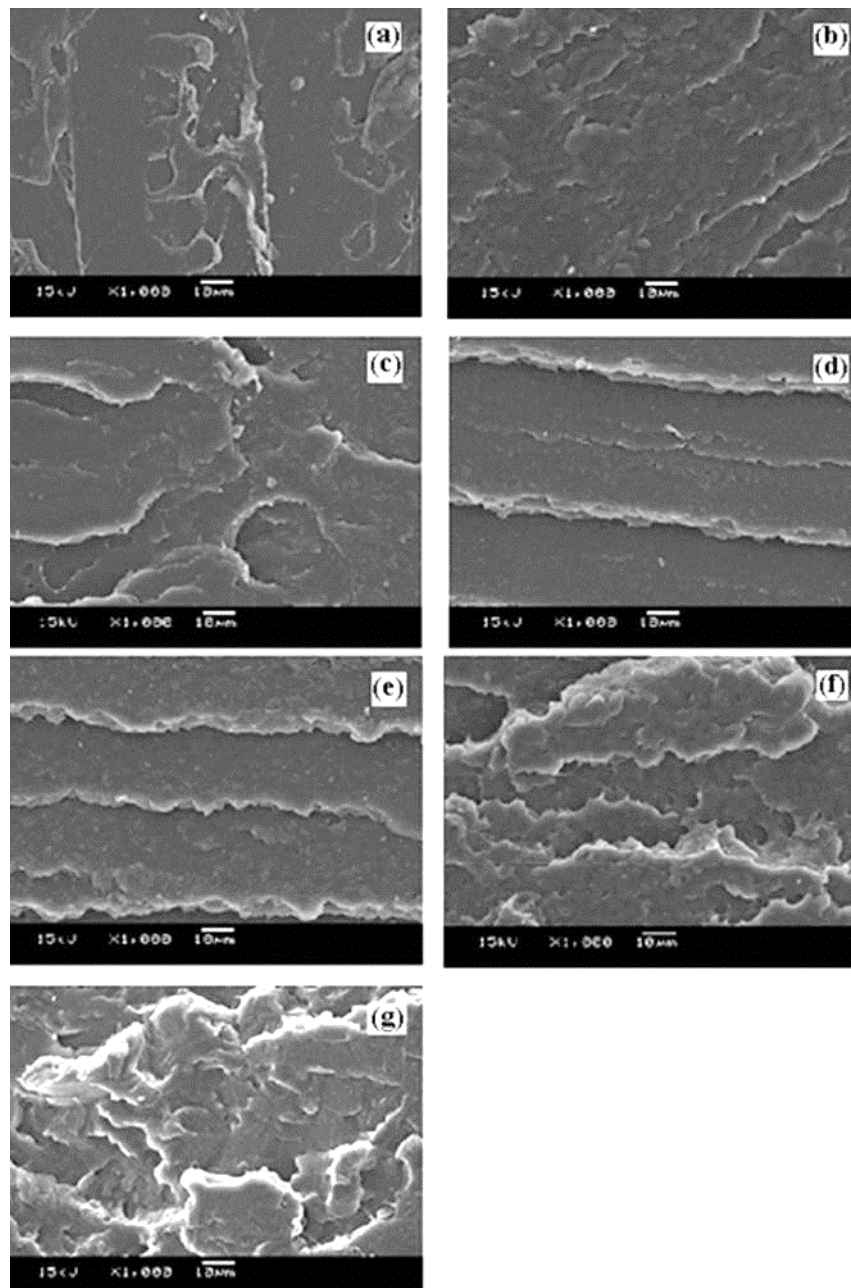
4.5 สัณฐานวิทยา (Morphology)

รูปที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของผงไม้ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า พบว่า อนุภาคของผงไม้ไม่มีการเกาะกลุ่มเป็นท่อน (bundles) หรือเส้นใย (fibril) สั้นๆ



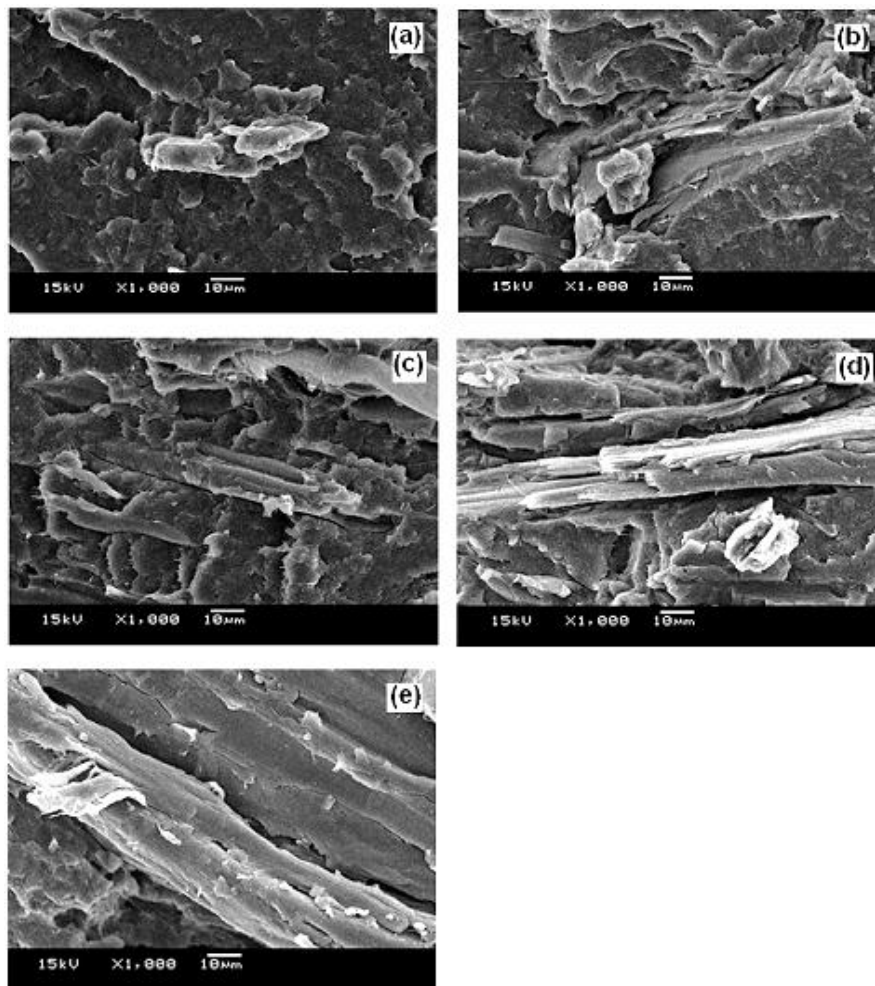
รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของผงไม้ภายใต้กำลังขยาย (a) 100 เท่า และ (b) 500 เท่า

รูปที่ 4.17 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของ PLA, PBS และพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วนต่างๆ หลังจากขึ้นทดสอบซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทก ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้กำลังขยาย 1000 เท่า โดยภาพ SEM ที่ได้แสดงให้เห็นว่า PLA มีพื้นผิวรอยแตกหักที่ค่อนข้างเรียบ [รูปที่ 4.17(a)] ซึ่งเป็นคุณลักษณะของวัสดุที่แข็งและเปราะ ในขณะที่ PBS มีพื้นผิวรอยแตกหักที่หยาบและมีคลื่นเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไป [รูปที่ 4.17(b)] ซึ่งเป็นคุณลักษณะของวัสดุที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า นอกจากนี้ พื้นผิวรอยแตกหักของพอลิเมอร์ผสมมีความหยาบและคลื่นกระจายอยู่ทั่วไปเช่นกัน [รูปที่ 4.17(c-g)] ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมจึงมีความยืดหยุ่นมากกว่า PLA อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ PBS เพิ่มขึ้นที่ประมาณ 40 และ 50% โดยน้ำหนัก จะเห็นการเกาะกลุ่มของ PBS ในพอลิเมอร์ผสม [รูปที่ 4.17(f-g)] ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบความทนแรงกระแทก



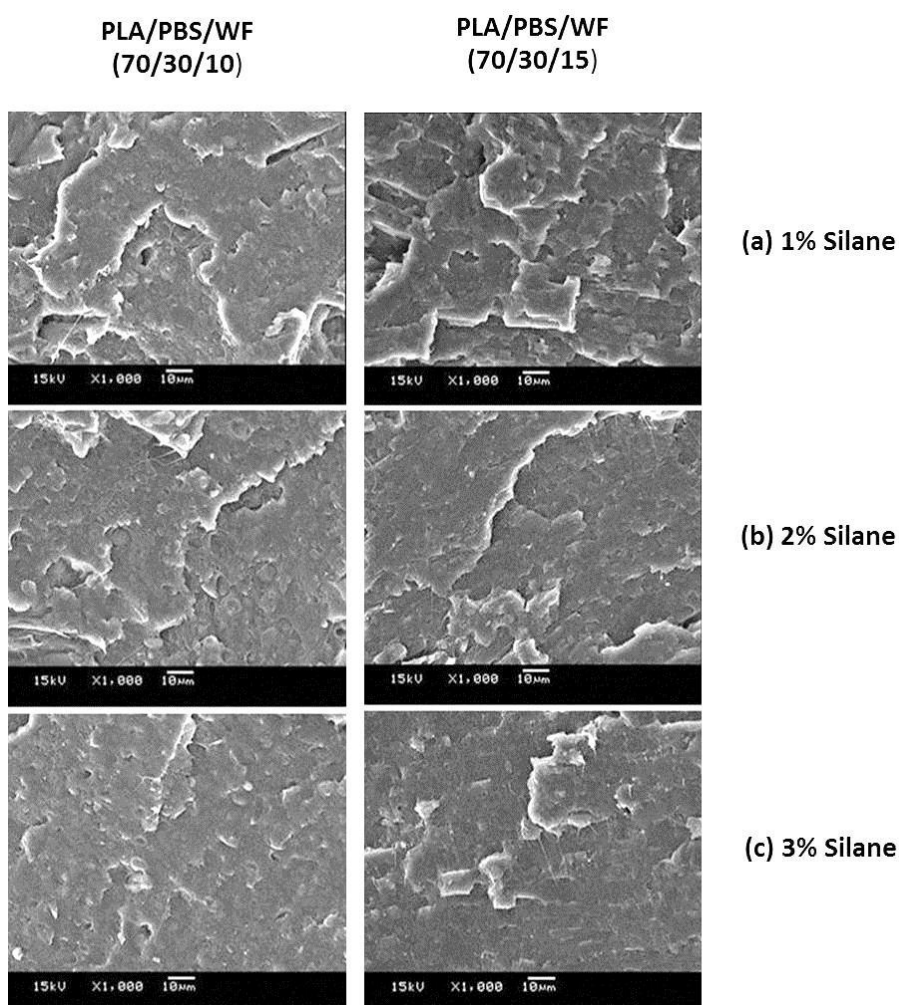
รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบของ (a) PLA, (b) PBS และ (c-g) พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ตามลำดับ

รูปที่ 4.18 แสดงสัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของคอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆหลังจากขึ้นทดสอบซึ่งขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดแบบผ่านการทดสอบความทนแรงกระแทกที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 1000 เท่า โดยภาพ SEM แสดงให้เห็นว่ามีช่องว่างระหว่างผิวของผงไม้และเมทริกซ์ เนื่องจากมีอันตรกิริยาระหว่างผงไม้และ PLA หรือ PBS ต่ำ ซึ่งเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้นจะเห็นการเกาะกลุ่มของอนุภาคผงไม้ ทั้งนี้เป็นเพราะบนพื้นผิวของผงไม้มีหมู่มีซัว (หมู่ OH) จำนวนมาก ทำให้ช่องว่างระหว่างผงไม้และเมทริกซ์กว้างมากขึ้น นอกจากนี้ ยังเห็นอนุภาคของผงไม้หลุดออกมาจากเมทริกซ์ ซึ่งจะส่งผลให้คอมพอสิตมีสมบัติเชิงกลลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน (a) 70/30/5, (b) 70/30/10, (c) 70/30/15, (d) 70/30/20 และ (e) 70/30/30

รูปที่ 4.19 แสดงสัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยแตกหักของคอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน 70/30/10 และ 70/30/15 ตามลำดับ เมื่อใส่ผงไม้ที่ได้ผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ปริมาณ 1, 2 และ 3% โดยน้ำหนักของผงไม้ จากรูปแสดงให้เห็นว่า การดัดแปรผงไม้ช่วยให้คอมพอสิตมี สัณฐานวิทยาที่ต่อเนื่องและแตกต่างจากการใช้ผงไม้ที่ไม่ผ่านการดัดแปรอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเมื่อ ปริมาณสารคู่ควบไซเลนเพิ่มมากขึ้นจะแทบไม่สังเกตเห็นรอยต่อระหว่างเฟส รวมทั้งอนุภาคของผงไม้ ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ภายในเมทริกซ์ จึงไม่พบเห็นอนุภาคของผงไม้หลุดออกมาถึงแม้ปริมาณของผงไม้จะ เพิ่มขึ้นก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะระหว่างผงไม้และเมทริกซ์

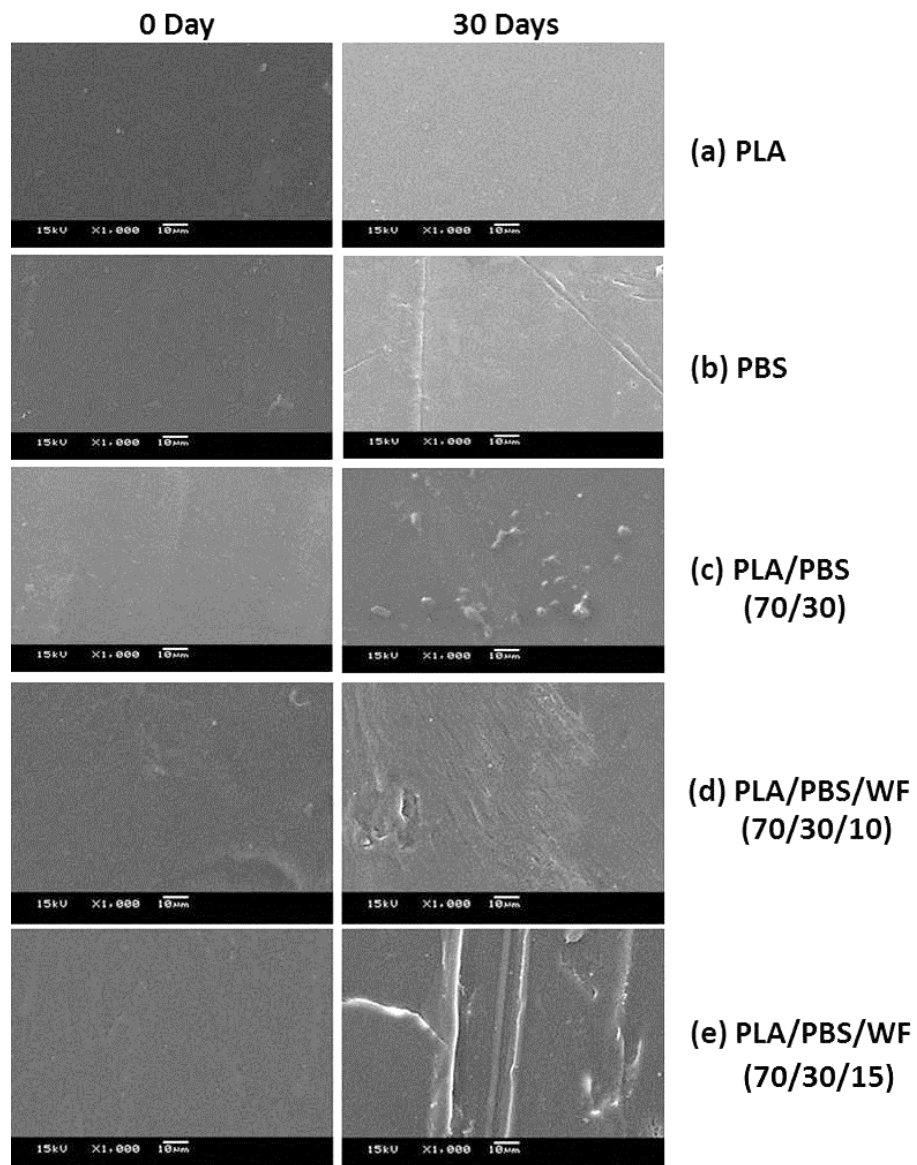


รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของพอลิเมอร์คอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน 70/30/10 และ 70/30/15 เมื่อใส่ผงไม้ที่ได้ผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน ปริมาณ (a) 1%, (b) 2% และ (c) 3% โดยน้ำหนักของผงไม้

4.6 การทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

4.6.1 สัณฐานวิทยา

รูปที่ 4.20 แสดงสัณฐานวิทยาบนผิวชั้นทดสอบของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิตของ PLA/PBS/ผงไม้ ที่อัตราส่วน 70/30/10 และ 70/30/15 ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 30 วัน จากรูปพบการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาบนผิวชั้นทดสอบ ลักษณะต่างๆ กัน ขึ้นกับประเภทและการย่อยสลายของแต่ละชั้นทดสอบ ซึ่งสามารถพบทั้งพื้นผิวที่ไม่เรียบ หยาบ รอยขีดข่วน หลุมตื้นๆ หรือรอยแตกเล็กๆ ซึ่งความบกพร่องบนชั้นทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการฝังดินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพของชั้นทดสอบ อย่างไรก็ตาม พบว่า PLA เกิดการเปลี่ยนแปลงบนผิวน้อยกว่า PBS เนื่องจาก PLA สามารถย่อยสลายในดินได้ค่อนข้างช้า หากแต่จะย่อยสลายได้ดีกว่าเมื่อตกอยู่ในกองขยะ อย่างไรก็ตาม การใส่ทั้ง PBS และผงไม้เข้าไปใน PLA มีผลทำให้เกิดความเสียหายบนผิวชั้นทดสอบเพิ่มขึ้น เนื่องจาก PBS สามารถย่อยสลายทางชีวภาพในดินได้ดีกว่า และผงไม้ยังมีความชอบน้ำจึงทำให้เอนไซม์ของจุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายชั้นทดสอบได้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA, (b) PBS, (c) พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 70/30, (d) คอมพอสิตของ PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน 70/30/10 และ (e) 70/30/15 ภายหลังจากฝังดินเป็นเวลา 0 วัน และ 30 วัน

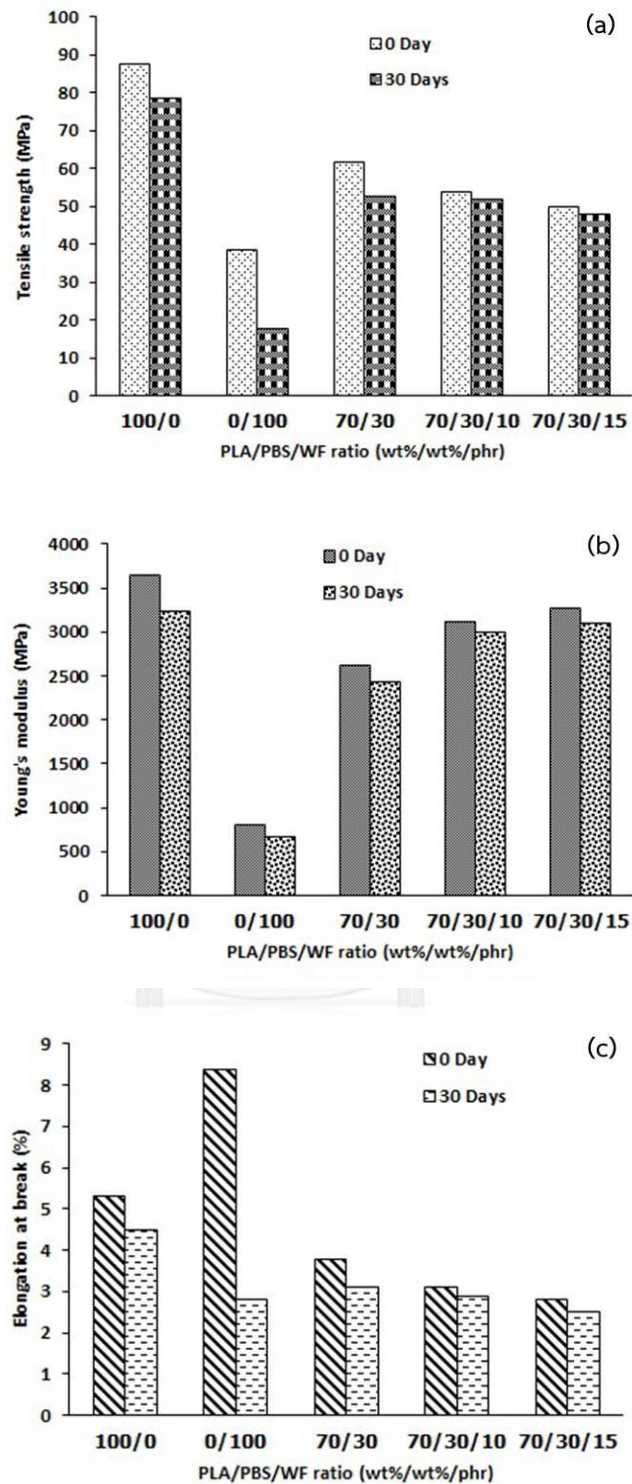
4.6.2 สมบัติเชิงกล

1. ความทนแรงดึง

ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.21 แสดงความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด ของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน 70/30/10 และ 70/30/15 ที่เปลี่ยนไปภายหลังฝังดินเป็นเวลา 30 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ภายหลังจากฝังดินขึ้นทดสอบมีสมบัติเหล่านี้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฝังดิน ทั้งนี้อาจเนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพภายในขึ้นทดสอบที่เกิดจากจุลินทรีย์ที่อยู่ในดิน

ตารางที่ 4.6 สมบัติด้านความทนแรงดึง (ความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาด) ของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน 70/30/10 และ 70/30/15 ที่เปลี่ยนไปภายหลังฝังดินเป็นเวลา 30 วัน

Sample	Tensile strength (MPa)		Young's modulus (MPa)		Elongation at break (%)	
	0 day	30 days	0 day	30 days	0 day	30 days
PLA/PBS (wt%/wt%)						
100/0	87.5 ± 1.8	78.6 ± 0.8	3641.1 ± 45.2	3230.0 ± 32.9	5.3 ± 0.9	4.5 ± 0.3
0/100	38.7 ± 0.7	17.9 ± 1.7	816.0 ± 8.7	674.9 ± 9.6	8.4 ± 0.1	2.8 ± 0.4
70/30	61.8 ± 0.8	52.8 ± 5.2	2624.1 ± 18.5	2428.4 ± 117.4	3.8 ± 0.3	3.1 ± 0.3
PLA/PBS/WF (wt%/wt%/phr)						
70/30/10	54.0 ± 1.3	52.1 ± 1.4	3118.4 ± 141.2	3002.0 ± 181.1	3.1 ± 0.2	2.9 ± 0.2
70/30/15	50.0 ± 2.6	47.8 ± 1.3	3271.1 ± 94	3102.2 ± 75.9	2.8 ± 0.3	2.5 ± 0.1



รูปที่ 4.21 (a) ความทนแรงดึง (b) ยั่งส์มอดุลัส และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA, PBS, พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 70/30 และคอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน 70/30/10 และ 70/30/15 ที่เปลี่ยนไปภายหลังฝังดินเป็นเวลา 30 วัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากการตรวจสอบสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง และความทนแรงดัดโค้งของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS พบว่า PBS สามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทก และการยืดตัว ณ จุดขาดของ PLA อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะกับพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 70/30 ซึ่งจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่า PBS สามารถกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของ PLA หากแต่พอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนนี้มีความทนแรงดึง ยังสัมพันธ์กับความทนแรงดัดโค้งลดลง อย่างไรก็ตาม พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่า PLA ล้วน
2. จากการตรวจสอบสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง และความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิต PLA/PBS/ผงไม้ พบว่า ผงไม้สามารถปรับปรุงการยืดตัว ณ จุดขาด และยังสัมพันธ์ของคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ปริมาณ 15 และ 5 phr ตามลำดับ หากแต่ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึงและความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่า ไม่มีแรงยึดเกาะระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมและผงไม้ จึงปรากฏช่องว่างจำนวนมากและอนุภาคของผงไม้ที่ถูกดึงออกจากพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม เสถียรภาพทางความร้อนของคอมพอสิตมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณผงไม้ที่เพิ่มขึ้น
3. จากการตรวจสอบสมบัติเชิงกลด้านความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง และความทนแรงดัดโค้งของคอมพอสิต PLA/PBS/ผงไม้ ที่ใช้ผงไม้ที่ดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน พบว่า การดัดแปรผิวผงไม้ปริมาณ 10 phr ด้วยสารคู่ควบไซเลนปริมาณ 3% โดยน้ำหนักของผงไม้ มีผลช่วยปรับปรุงความทนแรงกระแทกของคอมพอสิต เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตที่ใส่ผงไม้ปริมาณเท่ากัน นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงความทนแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดของคอมพอสิตอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่า การใส่ดัดแปรผิวผงไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลนมีผลปรับปรุงสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับผงไม้ที่ไม่ผ่านการดัดแปร อย่างไรก็ตาม การดัดแปรผงไม้ปริมาณ 10 phr ด้วยสารคู่ควบไซเลน 2% และ 3% ส่งผลให้มีการปรับปรุงเสถียรภาพทาง

ความร้อนของคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผงไม้ที่ไม่ได้ตัดแปรรูวในปริมาณที่เท่ากัน

4. จากการตรวจสอบการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และคอมพอสิต PLA/PBS/ผงไม้ ทั้งที่ตัดแปรรูวและไม่ตัดแปรรูวด้วยสารคู่ควบไซเลน พบว่า ระดับการดูดซึมน้ำของคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น หากแต่การตัดแปรรูวผงไม้ ทำให้ระดับการดูดซึมน้ำของคอมพอสิตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ผงไม้ที่ไม่ได้ตัดแปรรูวในปริมาณที่เท่ากัน
5. จากการตรวจสอบการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยการฝังดินของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และคอมพอสิต PLA/PBS/ผงไม้ พบว่า สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึง ยังสม่ำเสมอ และการยึดตัว ณ จุดขาดลดลงหลังการฝังดิน ซึ่งจากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่า พื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมทั้งขรุขระมีริ้วรอยเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมและคอมพอสิตก่อนการฝังดินที่มีพื้นผิวเรียบ นอกจากนี้พื้นผิวของคอมพอสิตมีริ้วรอยมากขึ้นเมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทดลองขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการอื่นๆ เช่น การอัดรีดเป็นแผ่น การฉีดแบบ และการเป่าฟิล์ม เป็นต้น เพื่อศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์
2. ควรปรับปรุงการตัดแปรรูวผงไม้ด้วยสารคู่ควบไซเลนด้วยวิธีอื่นเพื่อใช้เป็นสารเสริมแรง ได้แก่ การตัดแปรรูวผงไม้ด้วยการฉีดยา
3. ควรมีการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพในห้องปฏิบัติการเพื่อวัดปริมาณการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นการวัดอัตราการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของขึ้นทดสอบโดยตรง

รายการอ้างอิง

1. Nabil, H., Ismail, H. and Rashid, A.A. *Effects of partial replacement of commercial fillers by recycled poly(ethylene terephthalate) powder on the properties of natural rubber composites*. Journal of Vinyl & Additive Technology, 2012. **18**(2): p. 139-146.
2. สิ่งแวดล้อมไทย, สถาบัน. จับพลาสติกไร้ขีดเคิลเป็นน้ำมันดิบ (*Turning Plastic Waste into Crude Oil*)[ออนไลน์]. 2013; Available from: <http://teenet.tei.or.th/Knowledge/plastictooil.html>.
3. Garlotta, D. *A Literature Review of Poly(Lactic Acid)*. Journal of Polymers and the Environment, 2001. **9**(2): p. 63-84.
4. Rasal, R.M., Janorkar, A.V. and Hirt, D.E. *Poly(lactic acid) modifications*. Progress in Polymer Science, 2010. **35**(3): p. 338-356.
5. Jamshidian, M., Tehrany, E.A., Imran, M., Jacquot, M. and Desobry, S. *Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies*. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2010. **9**(5): p. 552-571.
6. Bhatia, A., Gupta, R.K., Bhattacharya, S.N. and Choi, H.J. *Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application*. Korea-Australia Rheology Journal, 2007. **19**(3): p. 125-131.
7. Park, J.W. and Im, S.S. *Phase behavior and morphology in blends of poly(L-lactic acid) and poly(butylene succinate)*. Journal of Applied Polymer Science, 2002. **86**(3): p. 647-655.
8. Kobayashi, S. and Sugimoto, S. *Biodegradation and Mechanical Properties of Poly(lactic acid)/Poly(butylenes succinate) Blends*. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2008. **2**(1): p. 15-24.
9. Yokohara, T. and Yamaguchi, M. *Structure and properties for biomass-based polyester blends of PLA and PBS*. European Polymer Journal, 2008. **44**(3): p. 677-685.

10. Lee, S. and Lee, J.W. *Characterization and processing of Biodegradable polymer blends of poly(lactic acid) with poly(butylene succinate adipate)*. Korea-Australia Rheology Journal, 2005. **17**(2): p. 71-77.
11. Jiang, L., Wolcott, M.P. and Zhang, J. *Study of Biodegradable Polylactide/Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Blends*. Biomacromolecules, 2006. **7**(1): p. 199–207.
12. Signoria, F., Coltellib, M.B. and Broncoa, S. *Thermal degradation of poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and their blends upon melt processing*. Polymer Degradation and Stability, 2009. **94**(1): p. 74–82.
13. Kumara, M., Mohantya, S., Nayakb, S.K. and Parvaiz, M.R. *Effect of glycidyl methacrylate (GMA) on the thermal, mechanical and morphological property of biodegradable PLA/PBAT blend and its nanocomposites*. Bioresource Technology, 2010. **101**(21): p. 8406–8415.
14. Dell'Erbaa, R., Groeninckxb, G., Maglioc, G., Malinconicoa, M. and Miglioziic, A. *Immiscible polymer blends of semicrystalline biocompatible components: thermal properties and phase morphology analysis of PLLA/PCL blends*. Polymer, 2001. **42**(18): p. 7831–7840.
15. Wang, L., Ma, W., Gross, R.A. and Mccarthy, S.P. *Reactive compatibilization of biodegradable blends of poly(lactic acid) and poly(ϵ -caprolactone)*. Polymer Degradation and Stability, 1998. **59**(1-3): p. 161–168.
16. Adamopoulou, E. *Poly(butylene succinate): A Promising Biopolymer*, in *Department Of Industrial Management and Technology*. 2012, School Of Chemical Engineering. p. 137.
17. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, สถาบัน. การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation)[ออนไลน์]. 2013; Available from: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html.
18. สุขอัศณา ลี. วัสดุรวม (Composites)[ออนไลน์]. 2014; Available from: web.eng.ubu.ac.th/~ie/metrial/1302212/c11%20Composite.ppt.

19. รังสิมา ชลคุป, รัตนา ต้นทเทอดธรรม, และ สุชาดา อุชชิน. การศึกษาสมบัติเชิงกลของคอมโพสิทของเส้นใยสับปะรดกับเอทิลีนไวนิลอะซิเตต, สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. 2553, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. p. 646.
20. 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, 2011. **46**(3): p. 301–309.
21. อิทธิพล แจ่มชัด. สารคู่ควบไซเลน[ออนไลน์]. 2012; Available from: <https://docs.google.com/file/d/0BzEBLU-Bc4MSODAwYWEzZTUtNGMzZC00N2FiLWFLZWItODBlMWUwYTlkMTk5/edit>.
22. Nam, T.H., Ogihara, S., Tung, N.H. and Kobayashi, S. *Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly(butylene succinate) biodegradable composites*. Composites: Part B, 2011. **42**(6): p. 1648–1656.
23. 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 Polymer and Environment, 2009. **17**(2): p. 83-94.
24. Suryanegara, L., Nakagaito, A.N. and Yano, H. *The Effect of Crystallization of PLA on the Thermal and Mechanical Properties of Microfibrillated Cellulose-Reinforced PLA Composites*. Composites Science and Technology, 2009. **69**(7-8): p. 1187-1192.
25. GOEX. *Quality custom plastic sheet*[Online]. 1989; Available from: http://www.goex.com/wp-content/uploads/GOEX_pla_datasheet.pdf.
26. Green Sustainable Plastics. *PBS*. 1999; Available from: <http://www.m-kagaku.co.jp/products/business/polymer/sustainable/gs-pla.pdf>.
27. จันทิมา ดีประเสริฐกุล. การศึกษาสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับยางธรรมชาติ, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์. 2554, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. p. 49.

28. พีรพจน์ เพทายพนากิจ, ณัฐพงศ์ เชื้อพล, และ สุรัตน์ อารีรัตน์. การศึกษาจลนพลศาสตร์การตกผลึกและสัณฐานวิทยาของเส้นใยเชิงเดี่ยวโพลีเอทิลีนโพรพิลีน. *Ladkrabang Engineering Journal*, 2014. **31**(1): p. 44-48.
29. Tsuji, W. and Llkada, Y. *Polymer*. *Polymer*, 1996. **37**(4): p. 595-602.
30. Yim, H. and Kim, D.S. *Physical properties of PVC/aminosilane-treated wood flour/organoclay composites*. *Polymers for Advanced Technologies*, 2012. **23**(11): p. 1441-1445.

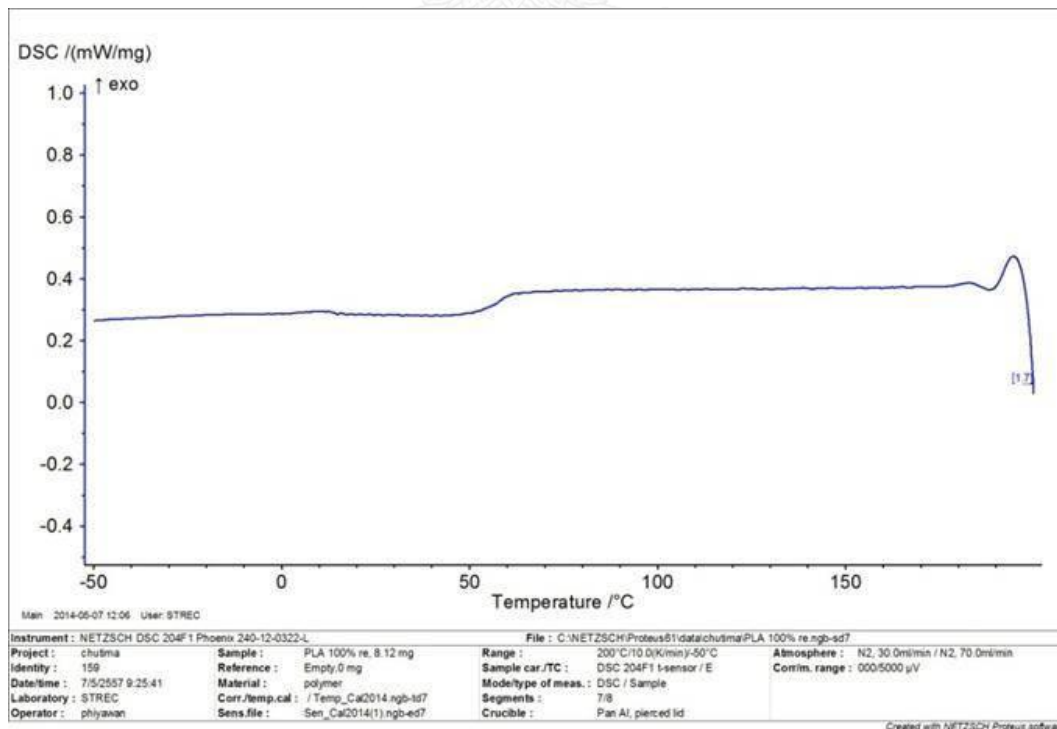
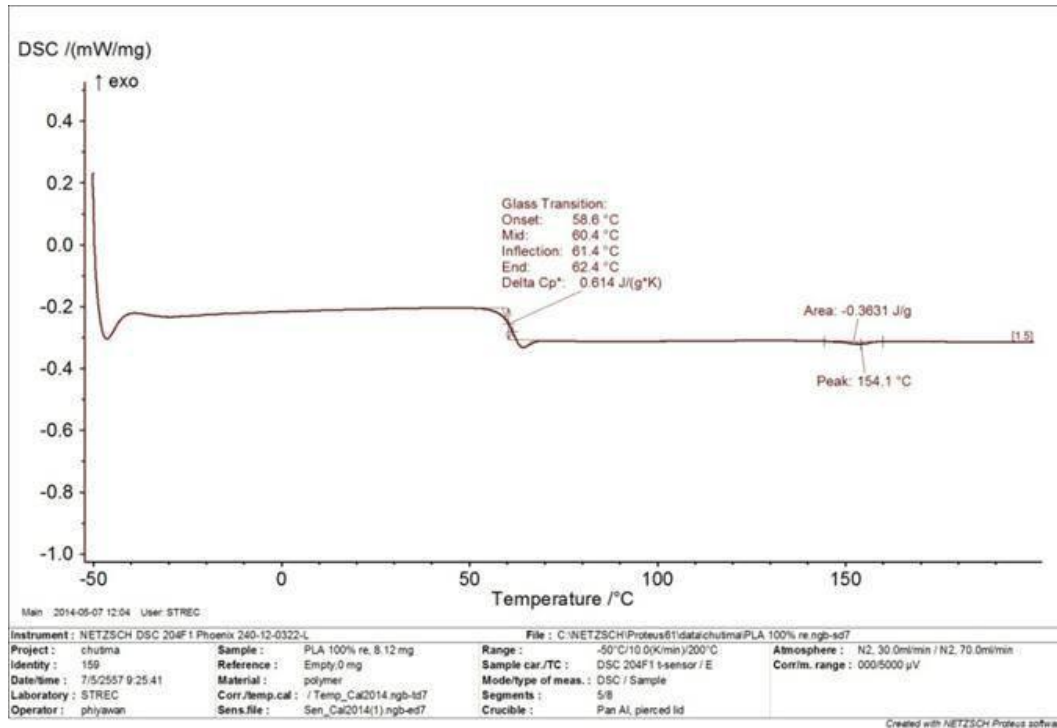




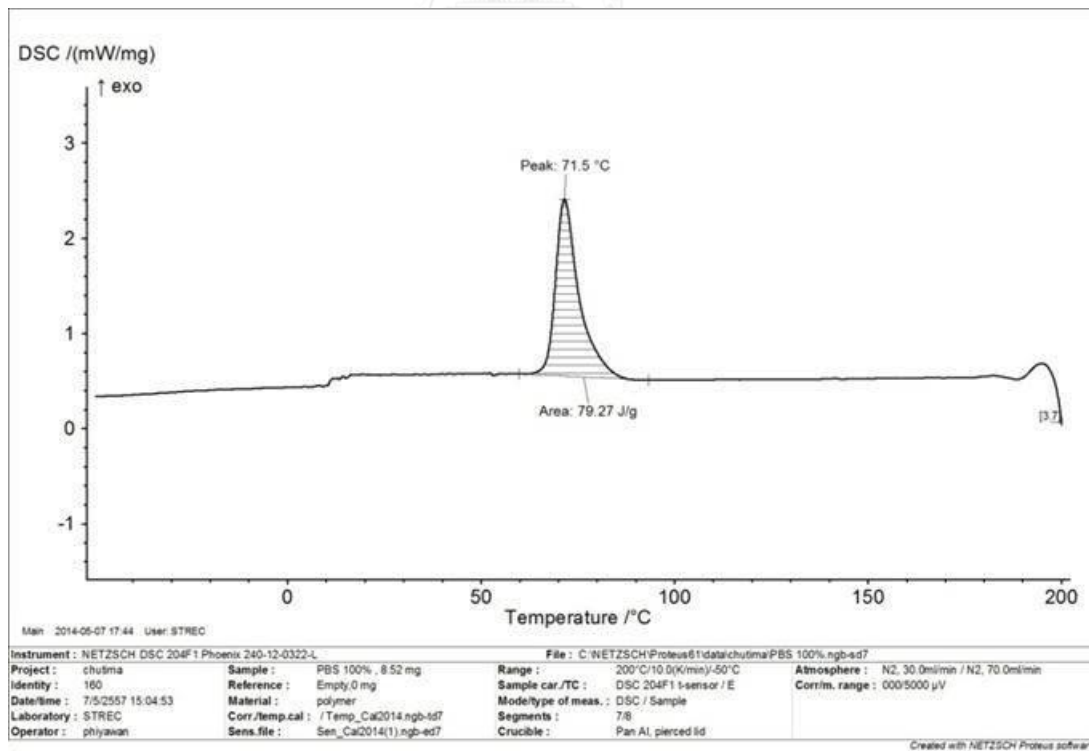
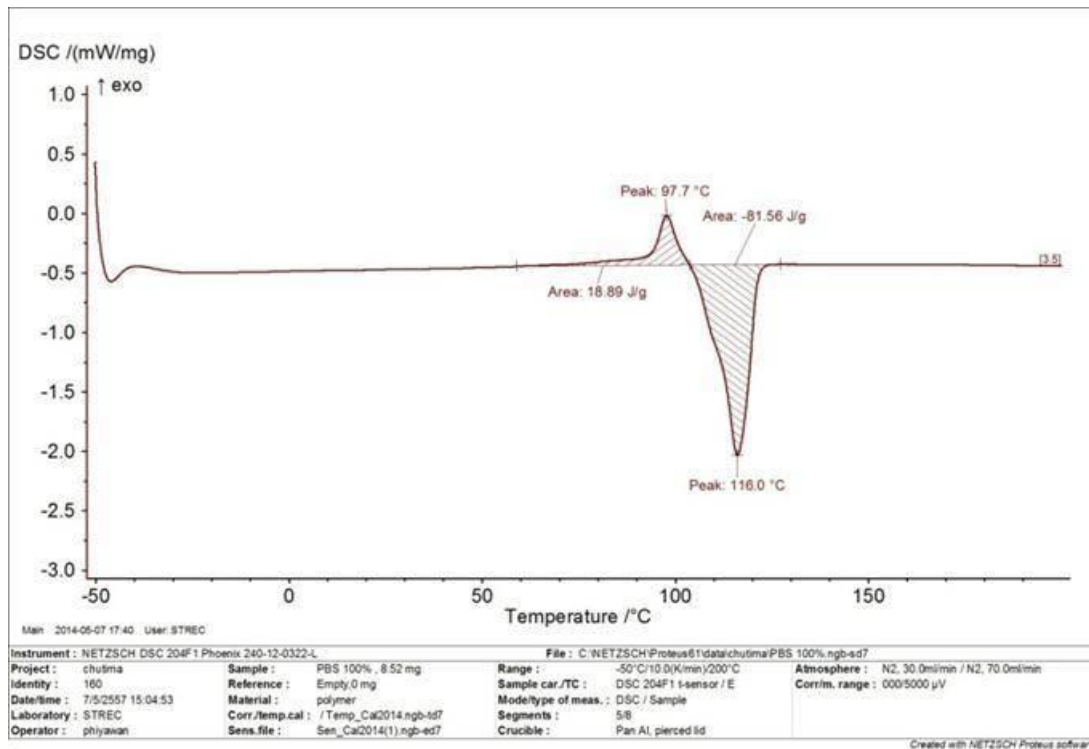
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

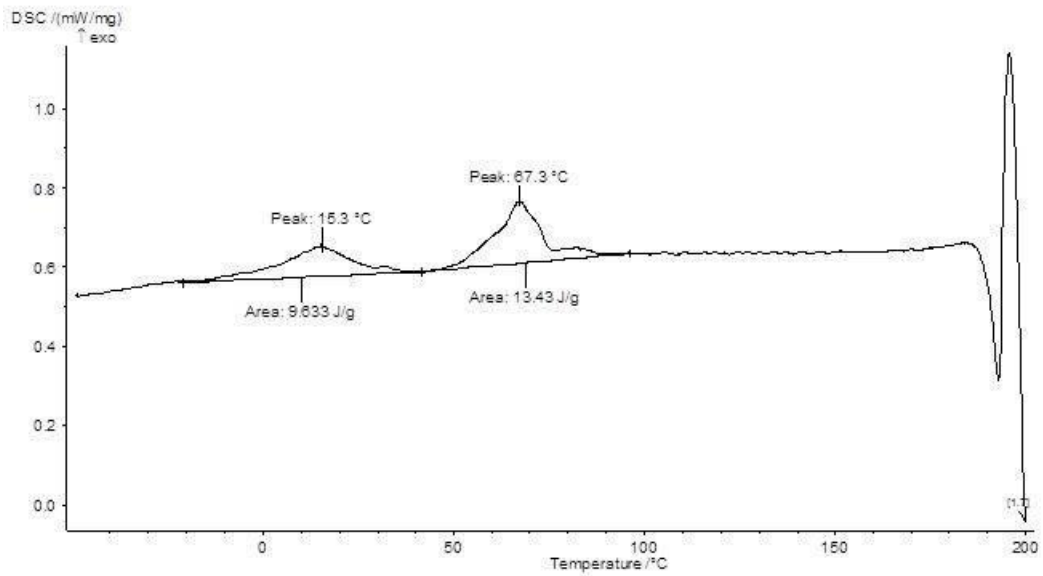
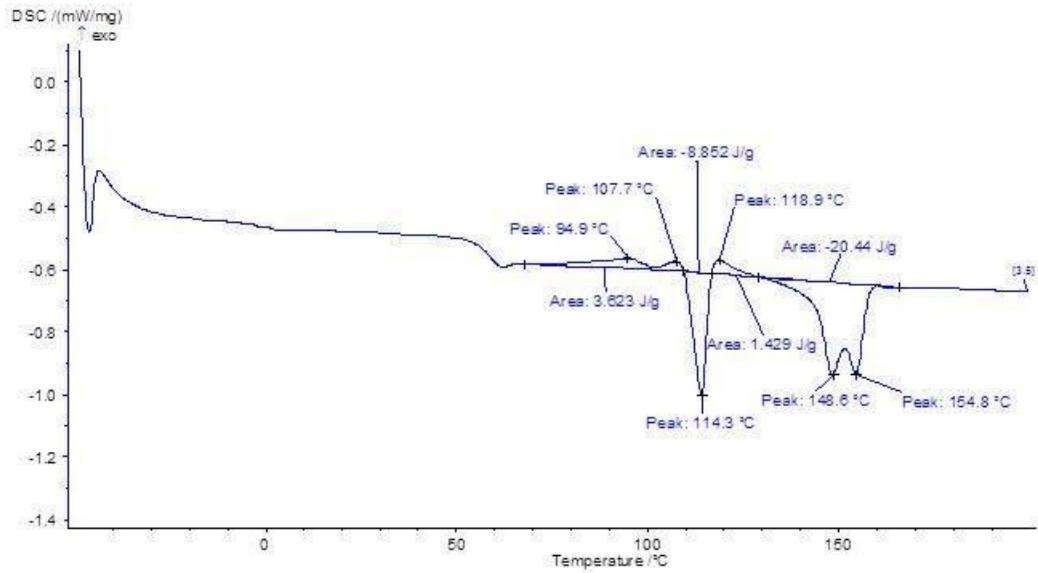
ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



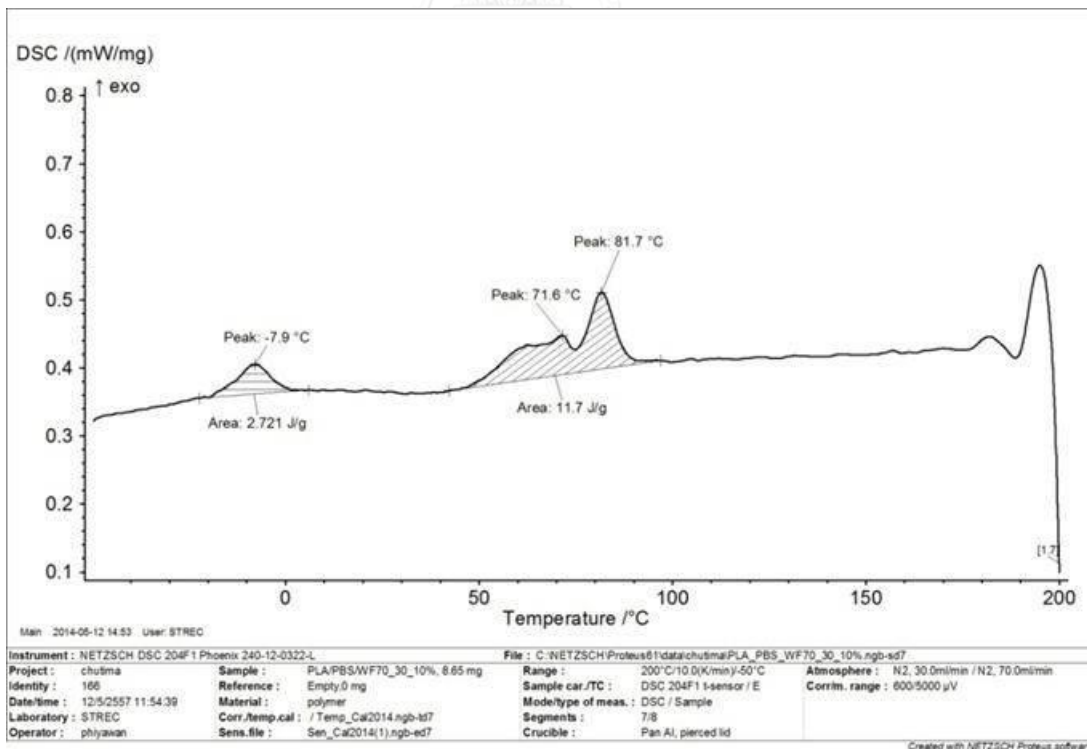
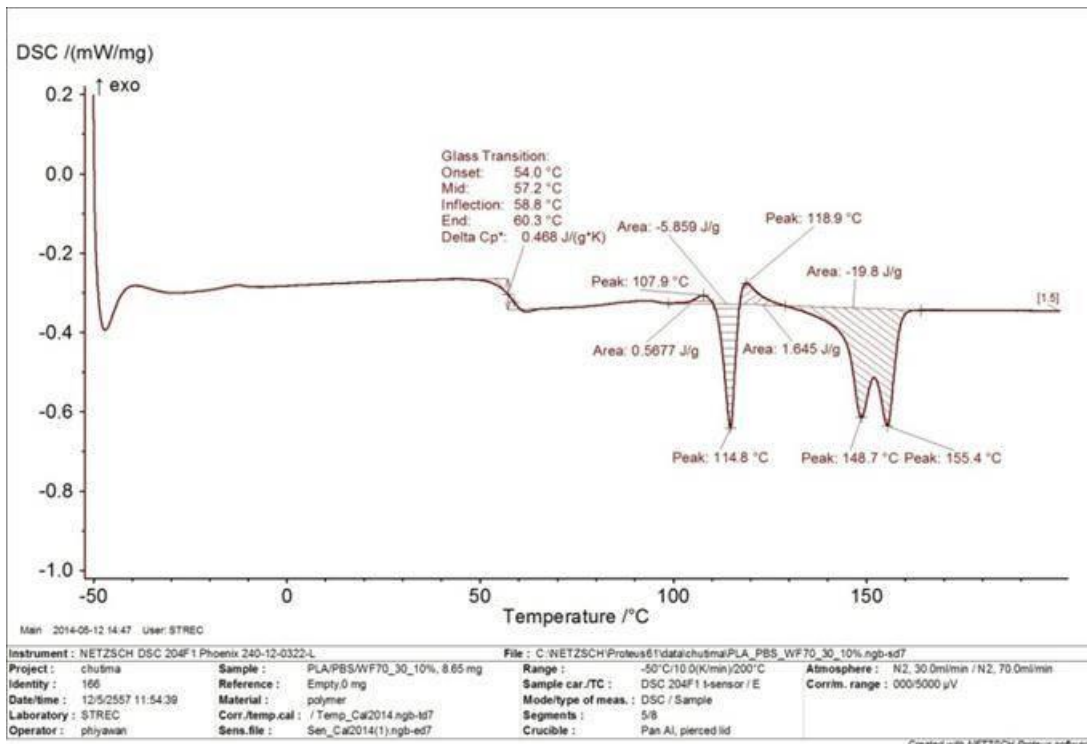
รูปที่ ก-1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิแล็กติกแอซิด 2nd heat scan และ cooling scan ตามลำดับ



รูปที่ ก-2 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิবিทิลีนซัคซินเนตที่ 2nd heat scan และ cooling scan ตามลำดับ

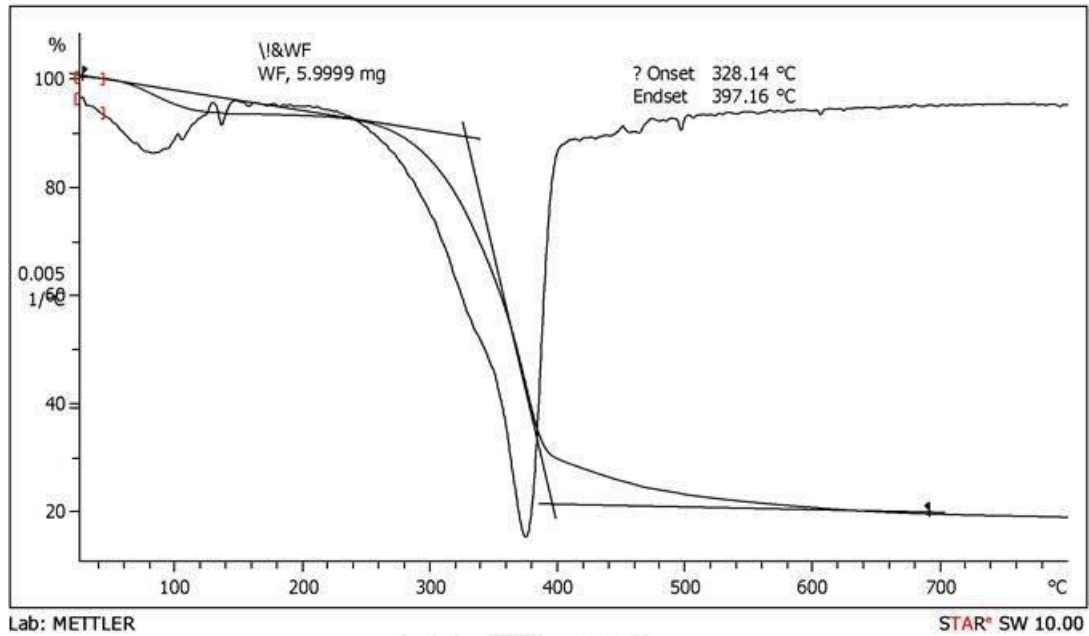


รูปที่ ก-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมพอลิเล็กทิกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต อัตราส่วน 70/30 ที่ 2nd heat scan และ cooling scan ตามลำดับ

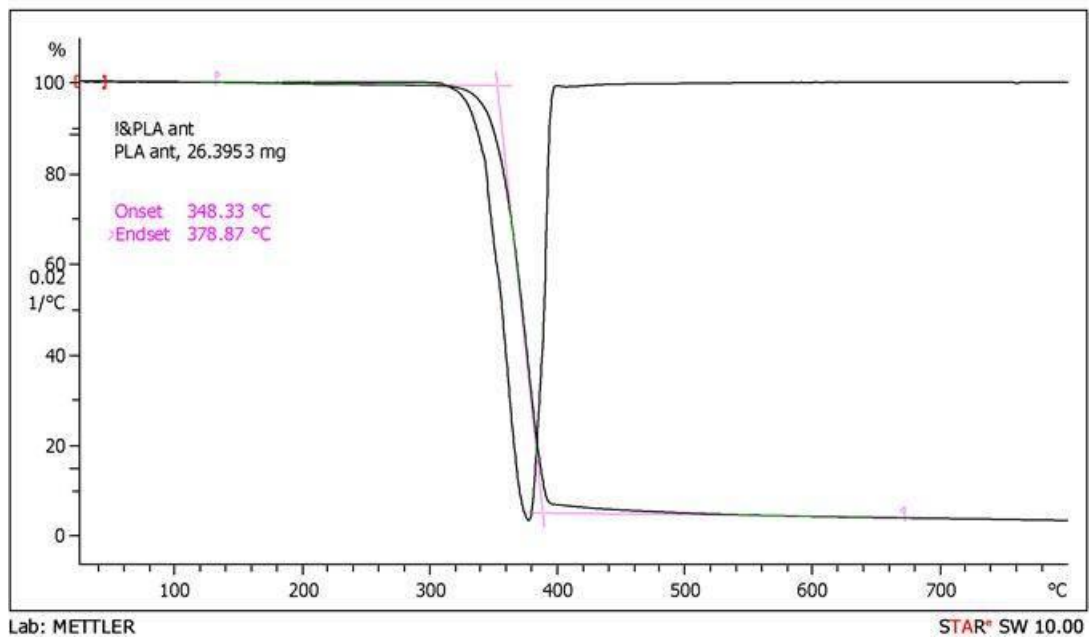


รูปที่ ก-4 DSC เทอร์โมแกรมของคอมพอลิเมอร์พอลิเล็กทิกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซินเนต/ผงไม้
อัตราส่วน 70/30/10 ที่ 2nd heat scan และ cooling scan ตามลำดับ

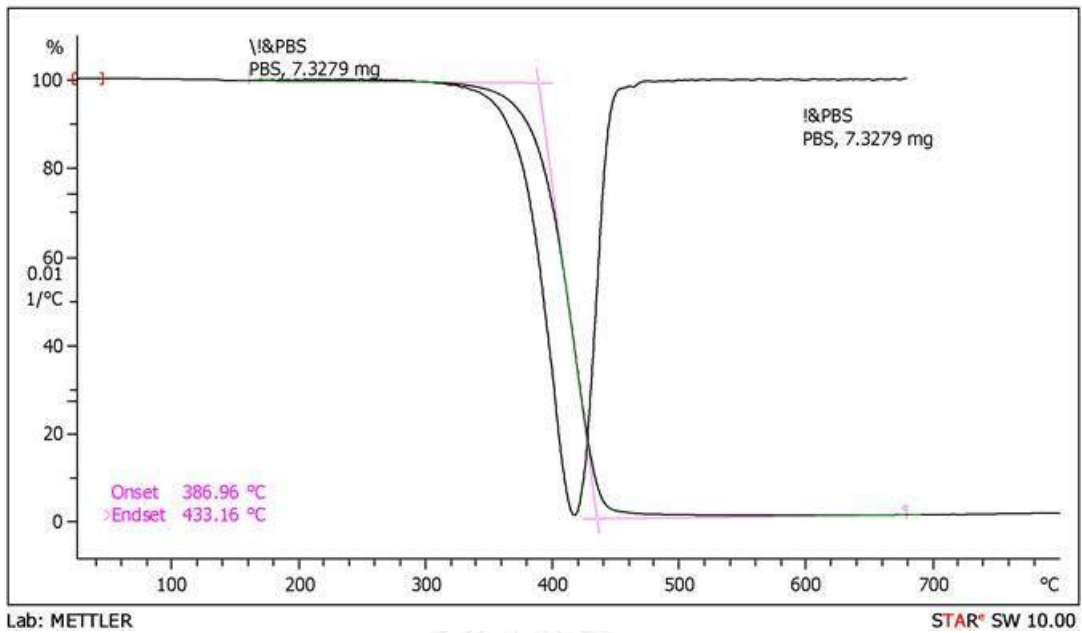
ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



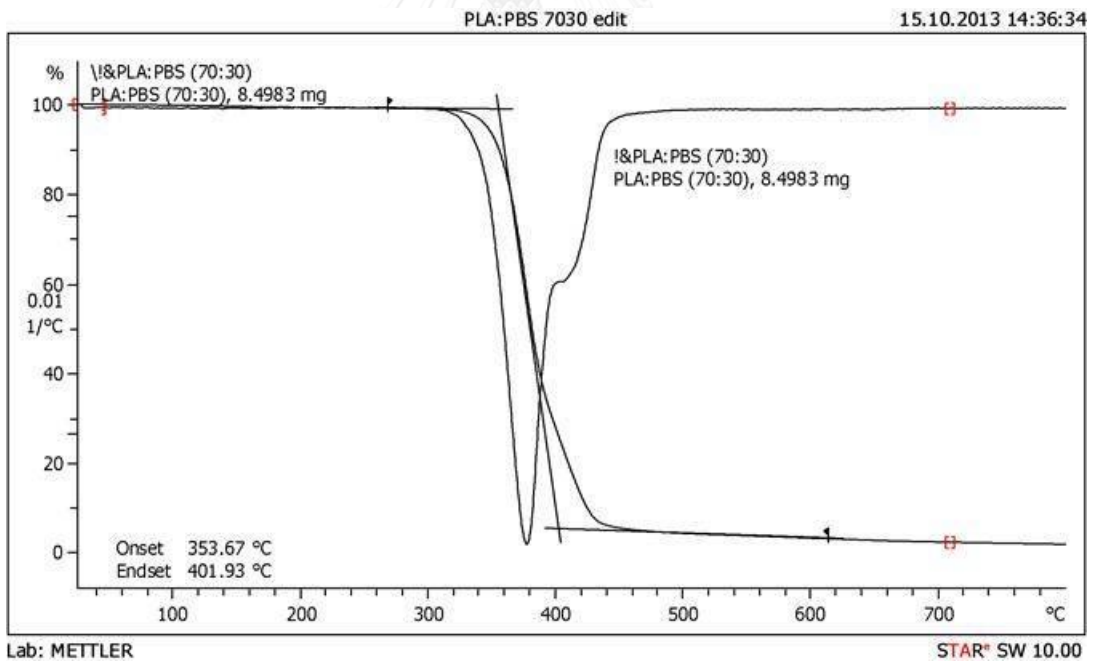
รูปที่ ข-1 TGA เทอร์โมแกรมของผงไม้



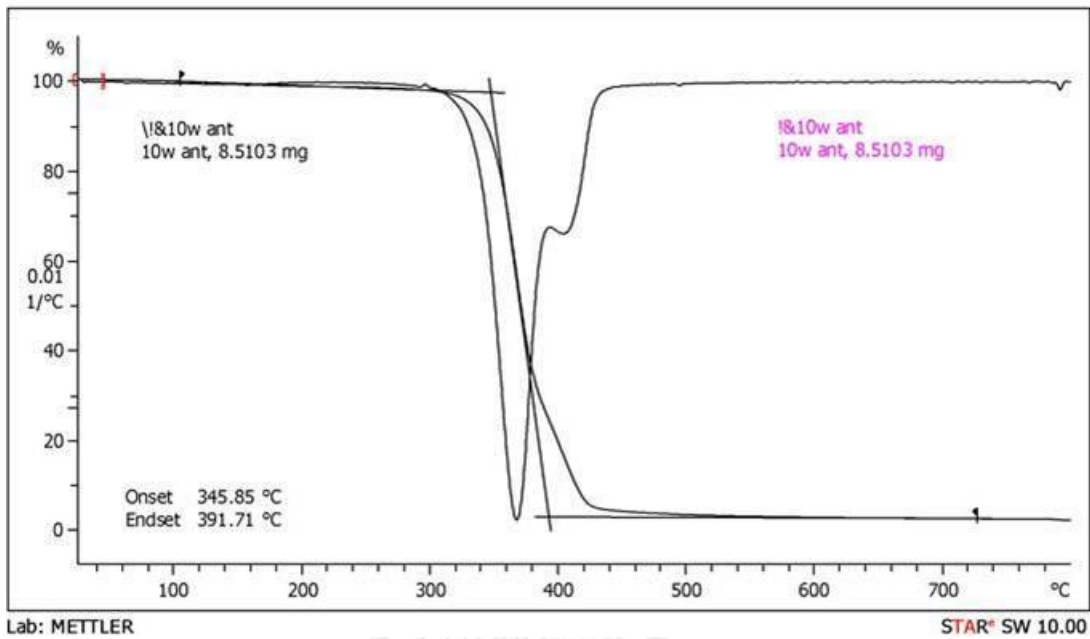
รูปที่ ข-2 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิแล็กติกแอซิด



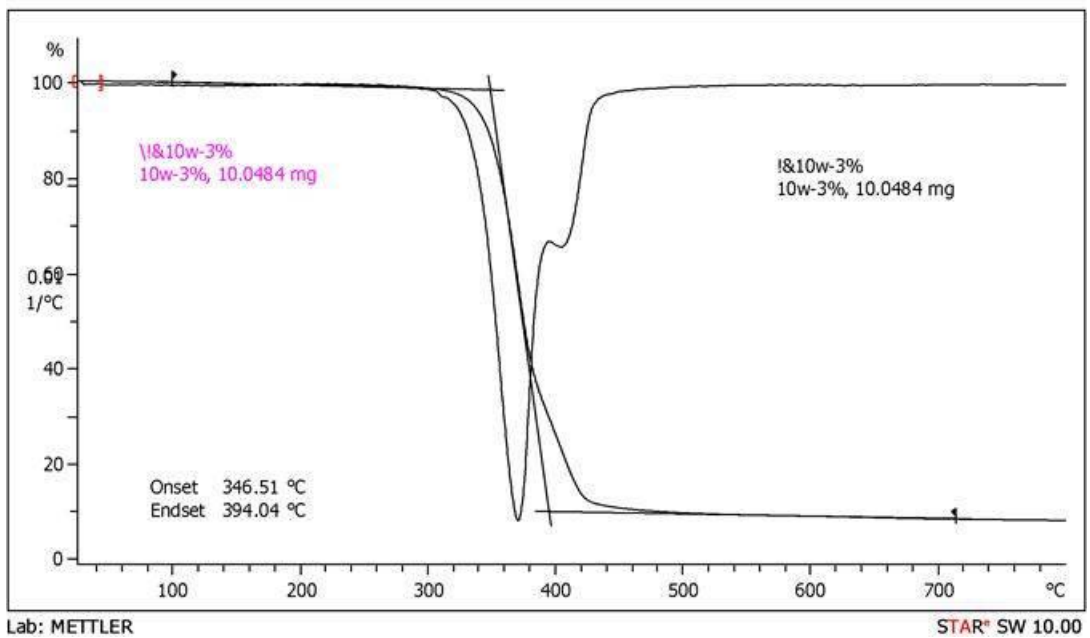
รูปที่ ข-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต



รูปที่ ข-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสมของพอลิแล็กติกแอซิด/พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต
อัตราส่วน 70/30

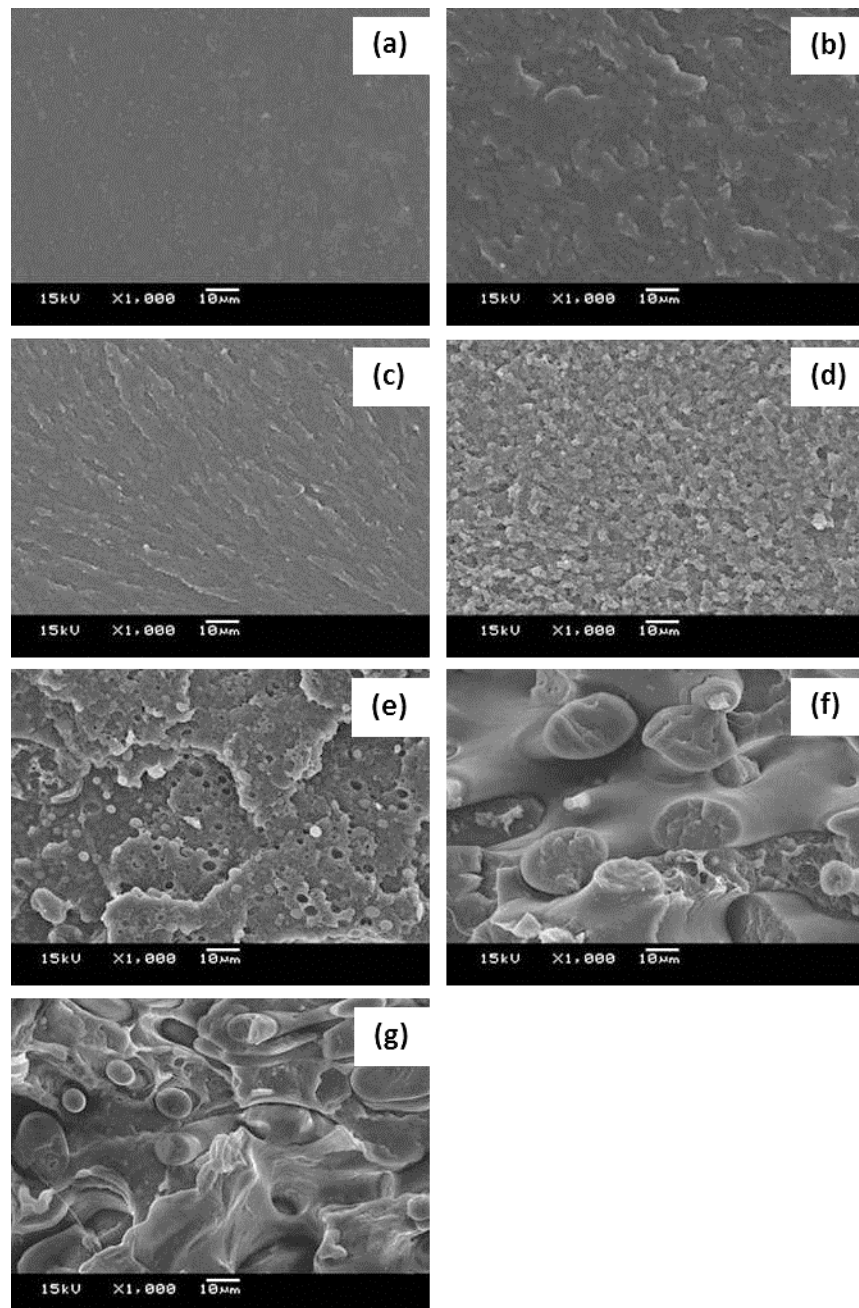


รูปที่ ข-5 TGA เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตของพอลิเล็กทริกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/
ผงไม้ อัตราส่วน 70/30/10

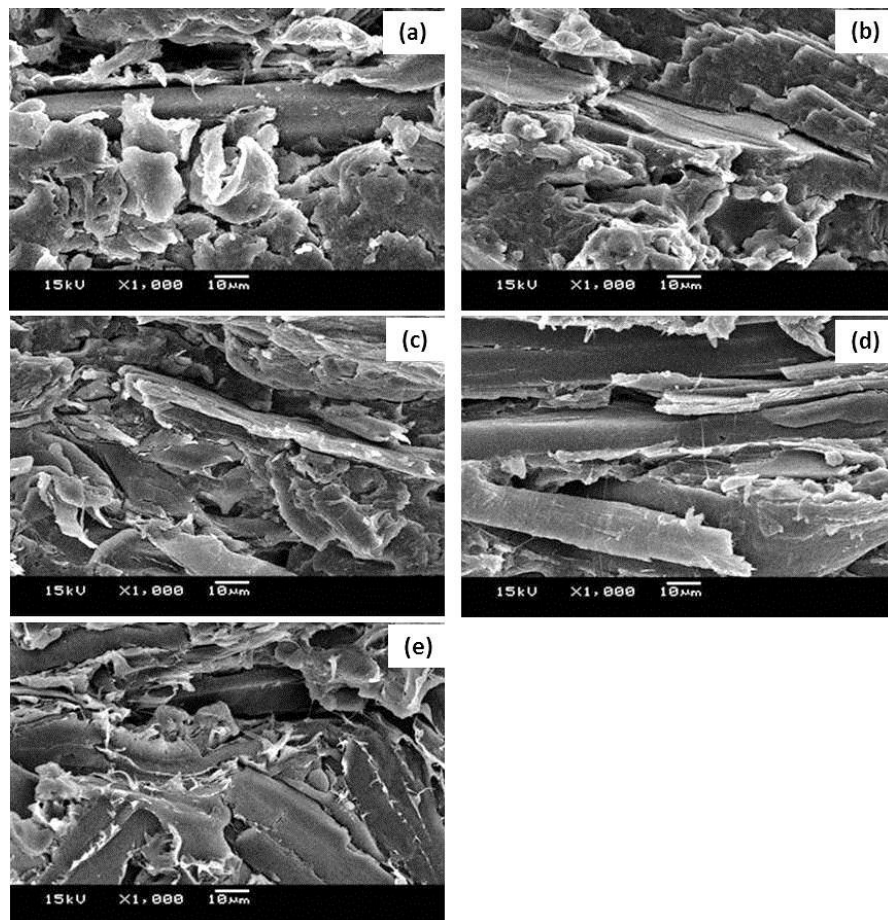


รูปที่ ข-6 TGA เทอร์โมแกรมของคอมพอสิตของพอลิเล็กทริกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/
ผงไม้ อัตราส่วน 70/30/10 ที่ใส่ Silane 3%

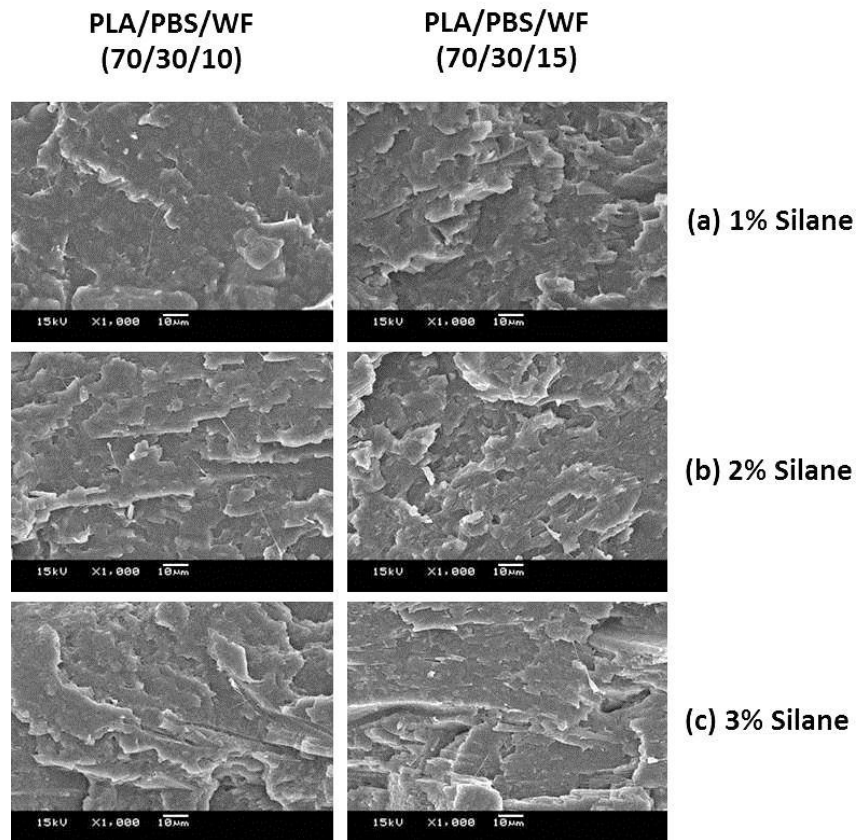
ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบสัณฐานวิทยา SEM



รูปที่ ค-1 SEM สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบด้านความทนแรงดึงของ (a) PLA, (b) PBS และ (c-g) พอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 และ 50/50 ตามลำดับ



รูปที่ ค-2 SEM สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบด้านความทนแรงดึงของคอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วนต่างๆ (a) 70/30/5, (b) 70/30/10, (c) 70/30/15, (d) 70/30/20 และ (e) 70/30/30



รูปที่ ค-3 SEM สัณฐานวิทยาบริเวณรอยแตกหักของชิ้นทดสอบภายหลังการทดสอบด้านความทนแรงดึงของคอมพอสิต PLA/PBS/WF ที่อัตราส่วน 70/30/10 และ 70/30/15 ที่ดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน (a) 1%, (b) 2% และ (c) 3% โดยน้ำหนักผงไม้

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชุติมา ว่องไววัฒนกุล เกิดวันที่ 11 มิถุนายน 2531 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 และเข้าร่วมเสนอผลงานการประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 (The 4th TIChE International Conference 2014) และการประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 ในวันที่ 18 – 19 ธันวาคม 2557 ณ โรงแรม ฟุราม่า เชียงใหม่ ประเทศไทย

