



การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติเพื่อเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตชีวภาพสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ



โดย
นายนรเศรษฐ์ วงษ์วรุณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติเพื่อเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตชีวภาพสำหรับการพิมพ์

3 มิติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

SURFACE MODIFICATION OF NATURAL FIBER REINFORCED BIOCOMPOSITES
FOR 3D PRINTING APPLICATION



By
MR. Norrasate WONGWAROON

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)
Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
Academic Year 2024
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติเพื่อเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต ชีวภาพสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ
โดย	นายนรเศรษฐ์ วงษ์วรุณ
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. รัตนพล มงคลรัตนาสีทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติ
ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์และ
เทคโนโลยีอุตสาหกรรม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรุณศรี ลีจิระจำเนียร)

พิจารณาเห็นชอบโดย
..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุศรินทร์ เข้มปะบุตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัตนพล มงคลรัตนาสีทธิ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ดร. ชวนชม อ่วมเนตร)

640920009 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ, วัสดุคอมพอสิตชีวภาพ, สารลดแรงตึงผิว, เอนไซม์เซลลูเลส

นาย นรเศรษฐ์ วงษ์วรุณ: การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติเพื่อเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตชีวภาพสำหรับการพิมพ์ 3 มิติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติเพื่อใช้เสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด/พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PLA/PBAT) โดยการใช้สารลดแรงตึงผิว triton x-100 และเอนไซม์เซลลูเลส ร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลน (APTMS) เพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์พอลิเมอร์ แล้วส่งผลให้สมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตดีขึ้น วัสดุคอมพอสิตชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้เตรียมโดยการผสม PLA ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก และ PBAT ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ร่วมกับเส้นใยธรรมชาติในปริมาณ 5 phr ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยการฉีดขึ้นรูป (injection molding) เพื่อให้ได้ชิ้นงานในการทดสอบสมบัติต่าง ๆ จากการผลการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน พบว่าสูตรการผสมที่มีการเติมเส้นใยใบสับปรดที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (PS), เส้นใยกล้วยที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (HS), เส้นใยมะพร้าวที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (CS) และเส้นใยมะพร้าวที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน (CSS) ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงกว่าวัสดุ PLA/PBAT ที่ไม่มีการเติมเส้นใย ในขณะที่สูตรการผสมที่มีการเติมเส้นใยกล้วยที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอนไซม์ร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน (HES), HS และ CS แสดงค่าความต้านทานต่อการโค้งงอที่สูงขึ้น นอกจากนี้สูตรวัสดุที่เติมเส้นใยเกือบทั้งหมดยังให้ค่าความต้านทานการกระแทกสูงกว่าชิ้นงาน PLA/PBAT ที่ไม่มีการเติมเส้นใย และผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่า การเติมเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวทำให้อุณหภูมิการสลายตัวลดลงเล็กน้อย แต่อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุเพิ่มขึ้น ต่อมาได้มีการนำสูตรวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติเหล่านี้ไปขึ้นรูปเป็นเส้นใยฟิลาเมนต์เพื่อประเมินความเหมาะสมในการใช้งานด้านการพิมพ์สามมิติ Fused Deposition Modeling (FDM) โดยพบว่าสูตร PLA/PBAT ที่เติมเส้นใยใบสับปรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวและไซเลน (PSS) และเส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับสภาพในลักษณะเดียวกัน (HSS) มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการขึ้นรูปเส้นฟิลาเมนต์ เนื่องจากพิมพ์ได้ง่ายและเกิดการหดตัวของชิ้นงานน้อย



640920009 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : 3D printing, bio-composite material, surfactant, cellulase enzyme

MR. Norrasate WONGWAROON : SURFACE MODIFICATION OF NATURAL FIBER REINFORCED BIOCOMPOSITES FOR 3D PRINTING APPLICATION Thesis advisor : Assistant Professor Pajaera Patanathabutr, Ph.D.

This research investigates the effect of surface modification of natural fibers to be used as reinforcing agents in polylactic acid/polybutylene adipate-co-terephthalate (PLA/PBAT) biocomposites. Surface treatments involved the application of a nonionic surfactant (Triton X-100), a cellulase enzyme, and a silane coupling agent (APTMS) to enhance interfacial adhesion between the fibers and the polymer matrix, thereby improving the mechanical and thermal properties of the composites. The bio-composites were prepared by compounding 90%wt PLA and 10%wt PBAT with 5 phr of natural fibers using a twin-screw extruder, followed by injection molding to produce test specimens. Mechanical and thermal properties of the composites were then evaluated. The results showed that the incorporation of different surface-treated natural fibers affected the composites properties. The silane treated pineapple leaf fiber (PS), silane treated hemp fiber (HS), silane treated coir fiber (CS), and surfactant-silane treated coir fiber (CSS) PLA/PBAT formulations exhibited higher tensile strength than the unreinforced PLA/PBAT matrix, while PS, enzyme-silane treated hemp fiber (HES), HS, and CS PLA/PBAT formulations showed higher flexural strength. Moreover, almost all fiber-reinforced formulations demonstrated higher impact resistance compared to the unreinforced PLA/PBAT blend. Thermogravimetric analysis indicated a slight reduction in decomposition temperature upon fiber addition; however, the melting temperature of the composites increased. Subsequently, those natural fiber/PLA/PBAT formulations could be processed into filaments to assess their suitability for fused deposition modeling (FDM) 3D printing. It was found that the surfactant-silane treated pineapple leaf fiber (PSS) and surfactant-silane treated hemp fiber (HSS) PLA/PBAT formulations exhibited optimal printability and dimensional stability, indicating their suitability for filament fabrication in additive manufacturing applications.



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตาและความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาเจรา พัฒนถาบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ รองศาสตราจารย์ ดร.รัตนพล มงคลรัตนสิทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้วิจัยสำนึกในพระคุณเป็นอย่างยิ่งที่ทั้งสองท่านได้กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการดำเนินงาน ตลอดจนอบรมสั่งสอน และให้ความช่วยเหลือในการ แก้ไขปัญหาอุปสรรคต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาของการทำวิจัยอย่างไม่เคยขาดตกบกพร่อง ผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านด้วยความเคารพอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เขมะปะบุตร และ ดร.ชวนชม อ่วมเนตร ผู้ซึ่งกรุณาสละเวลาอันมีค่าเป็นประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ทั้งยังได้ให้ ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ยิ่ง เพื่อปรับปรุงและพัฒนาผลงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่ออาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรม วัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดองค์ความรู้ และสนับสนุนการเรียนรู้ด้วยความเอื้อเฟื้อตลอดระยะเวลาที่ศึกษาอยู่ในหลักสูตร

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา และ คุณไพโรจน์ ตั้งศุภวัฒน์ วิศวกรประจำภาควิชา สำหรับการสนับสนุนด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่จำเป็นใน การดำเนินการวิจัย รวมถึงคำแนะนำและความช่วยเหลือที่มีส่วนอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของงานวิจัย ฉบับนี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่ในระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อนร่วมรุ่น และน้อง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้ คำแนะนำ แลกเปลี่ยนความคิดเห็น และให้กำลังใจด้วยมิตรไมตรีจิตเสมอมา ซึ่งมีส่วนสำคัญในการ ส่งเสริมให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปอย่างราบรื่น

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้เลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้กำลังใจในทุกย่างก้าว ทั้งในด้านการศึกษา การดำเนินชีวิต ตลอดจนการ จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

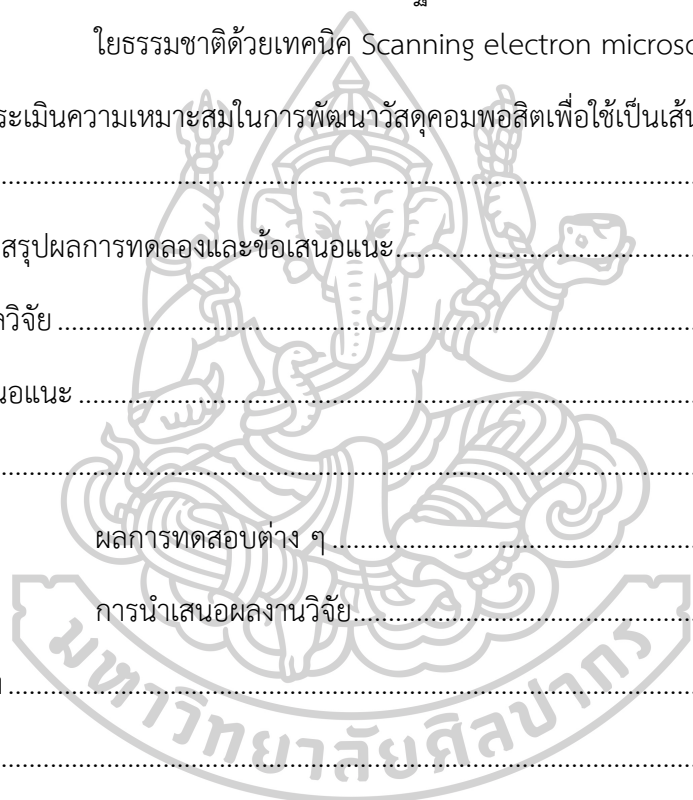
นรเศรษฐ์ วงษ์วรุณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ณ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ณ
สารบัญอักษรย่อ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	21
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	21
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	24
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย.....	24
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	24
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	24
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	26
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	27
2.1 เส้นใยธรรมชาติ.....	27
2.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเส้นใยไผ่สับปะรด.....	28
2.1.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเส้นใยมะพร้าว.....	29
2.1.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเส้นใยกล้วย.....	30
2.1.4 องค์ประกอบของเส้นใยพืช.....	31
2.2 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของเส้นใย.....	34

3.4.2.2.1.	การปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารลดแรงตึงผิว	56
3.4.2.2.2.	การปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยการใช้เอนไซม์เซลลูเลส	56
3.4.2.2.3.	การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน	
	APTMS	57
3.4.3.	การพิสูจน์เอกลักษณ์เส้นใยธรรมชาติหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิค Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR).....	57
3.4.4.	การผสม และการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ.....	57
3.4.5.	การทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอสิต และการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพPLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ	59
3.4.5.1.	การทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ	59
3.4.5.2.	การทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพPLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ.....	59
3.4.6.	การประเมินความเหมาะสมในการนำวัสดุคอมพอสิตพัฒนาเพื่อใช้เป็นเส้นฟิลาเมนต์	61
บทที่ 4	ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	62
4.1.	ผลการผสม PBAT ใน PLA ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT	62
4.2	ผลการเตรียม การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ และการพิสูจน์เอกลักษณ์เส้นใยธรรมชาติด้วยเทคนิค Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR).....	66
4.2.1.	ผลการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยการต้มในหม้ออัดแรงดัน และการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนร่วมกับการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใย.....	66
4.2.2	การพิสูจน์เอกลักษณ์เส้นใยธรรมชาติหลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิค Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR).....	73
4.3.	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ดัชนีการไหล และการศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพPLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ	76
4.3.1.	ผลการทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ	76

4.3.2. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมพอสิต ชีวภาพPLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ.....	79
4.3.2.1. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใย ธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด.....	79
4.3.2.2. ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/ เส้นใยธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด	88
4.3.3.3. ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอมพอสิต PLA/PBAT/เส้น ใยธรรมชาติด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)	91
4.4. การประเมินความเหมาะสมในการพัฒนาวัสดุคอมพอสิตเพื่อใช้เป็นเส้นฟิลาเมนต์ในงานพิมพ์ 3 มิติ	96
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	102
5.1 สรุปผลวิจัย	102
5.2. ข้อเสนอแนะ	105
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบต่าง ๆ	107
ภาคผนวก ข การนำเสนอผลงานวิจัย.....	148
รายการอ้างอิง.....	163
ประวัติผู้เขียน.....	169



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด [20].....	33
ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดของสารลดแรงตึงผิว ชนิดของอนุภาคระดับนาโน และกระบวนการในการปรับปรุงเพื่อเตรียมเป็น polymer nanocomposite [10].....	36
ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมแรงเป็นสารอินทรีย์ขนาดนาโน โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิด non-ionic [30] ...	46
ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย	55
ตารางที่ 3.2 แสดงสูตรของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการต่าง ๆ.....	58
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จากเทคนิค DSC.....	64
ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดที่ใช้เวลาในการต้มที่เวลาต่าง ๆ.....	67
ตารางที่ 4.3 แสดงภาพ SEM ของเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการต้มภายในหม้ออัดแรงดัน 2 ชั่วโมง.....	72
ตารางที่ 4.4 ดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ	77
ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติความต้านทานต่อการดึงของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ.....	79
ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานการโค้งงอ (flexural strength) ของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ.....	84
ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติความต้านต่อการกระแทกของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ.....	87
ตารางที่ 4.8 แสดงข้อมูลจาก DSC thermogram ของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ โดยอ้างอิงจากการให้ความร้อนในครั้งที่ 2.....	89
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าที่ได้จาก TGA thermogram ของชิ้นงานคอมพอสิต PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ.....	90

ตารางที่ 4.10	แสดงสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ	96
ตารางที่ 4.11	แสดงน้ำหนักชิ้นงาน เวลาในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ	98
ตารางที่ 4.12	แสดงค่าการหดตัวของชิ้นงานต้นแบบ	98
ตารางที่ ก.1	ผลการทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอลิทีชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ	114
ตารางที่ ก.2	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA.....	116
ตารางที่ ก.3	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT	117
ตารางที่ ก.4	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/PS.....	118
ตารางที่ ก.5	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/PSS.....	118
ตารางที่ ก.6	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/PES.....	119
ตารางที่ ก.7	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/HS	119
ตารางที่ ก.8	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/HSS	120
ตารางที่ ก.9	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/HES	120
ตารางที่ ก.10	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/CS	121
ตารางที่ ก.11	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/CSS	121
ตารางที่ ก.12	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/CES	122
ตารางที่ ก.13	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA.....	123
ตารางที่ ก.14	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT	123
ตารางที่ ก.15	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/PS	124
ตารางที่ ก.16	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/PSS.....	124
ตารางที่ ก.17	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/PES.....	125
ตารางที่ ก.18	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/HS.....	125
ตารางที่ ก.19	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/HSS.....	126
ตารางที่ ก.20	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/HES.....	126
ตารางที่ ก.21	ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/CS.....	127

ตารางที่ ก.22 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/CSS.....	127
ตารางที่ ก.23 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/CES.....	128
ตารางที่ ก.24 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA.....	129
ตารางที่ ก.25 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT	129
ตารางที่ ก.26 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/PS	130
ตารางที่ ก.27 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/PSS	130
ตารางที่ ก.28 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/PES	131
ตารางที่ ก.29 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/HS.....	131
ตารางที่ ก.30 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/HSS.....	132
ตารางที่ ก.31 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/HES.....	132
ตารางที่ ก.32 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/CS	133
ตารางที่ ก.33 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/CSS.....	133
ตารางที่ ก.34 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/CES.....	134
ตารางที่ ก.35 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA.....	140
ตารางที่ ก.36 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT	141
ตารางที่ ก.37 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/PS.....	142
ตารางที่ ก.38 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/PSS.....	143
ตารางที่ ก.39 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/PES.....	144
ตารางที่ ก.40 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/HS.....	145
ตารางที่ ก.41 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/HSS	146
ตารางที่ ก.42 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/HES	147

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 การจำแนกเส้นใยธรรมชาติ [2]	27
ภาพที่ 2.2 ผลและใบสับปะรด [47]	28
ภาพที่ 2.3 เส้นใยมะพร้าว [27]	29
ภาพที่ 2.4 ลักษณะลำต้นและใบของกัญชง [44]	30
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างเซลลูโลส [6]	31
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [14]	32
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างลิกนิน [26]	32
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างเพคติน [11]	33
ภาพที่ 2.9 เครื่องชูดเส้นใย	34
ภาพที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว [22]	36
ภาพที่ 2.11 สูตรโครงสร้างของ PBAT [43]	38
ภาพที่ 2.12 a) โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด [24] และ b) องค์ประกอบที่เป็นกรดแลคติก [39]	38
ภาพที่ 2.13 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบหัวฉีด [46]	40
ภาพที่ 2.14 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบการซ้อนแผ่นวัสดุ [46]	41
ภาพที่ 2.15 การพิมพ์สามมิติด้วยแสงยูวี [46]	42
ภาพที่ 2.16 การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ [46]	42
ภาพที่ 2.17 แสดงการพิมพ์แบบหัวฉีด [46]	43
ภาพที่ 2.18 แสดงผลของการเติม PBAT ต่อสมบัติความต้านทานการดึงของ PLA/PBAT [19]	44
ภาพที่ 2.19 แสดงอิทธิพลของการเติมเส้นใยที่ส่งผลต่อสมบัติ tensile ของวัสดุคอมพอสิต ชีวภาพ PLA/PBAT [19]	45
ภาพที่ 2.20 แสดงอิทธิพลของการเติม APTMS ที่ส่งผลต่อสมบัติ tensile ของวัสดุคอมพอสิต ชีวภาพ PLA/PBAT [19]	45

ภาพที่ 2.21 แสดงภาพ SEM ของเส้นใย isora ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมีต่าง ๆ โดยภาพที่ (a) เป็นเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับปรุง และ (e) เป็นการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารลดแรงตึงผิว [17]..	47
ภาพที่ 2.22 แสดงผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคมีที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอลสิต polyester/isora [17].....	48
ภาพที่ 2.23 แสดงผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคมีที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอลสิต polyester/isora [17].....	48
ภาพที่ 2.24 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกัญชงด้วยกระบวนการต่าง ๆ (a) เส้นใยกัญชงที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (c) เส้นใยกัญชงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอนไซม์ xylanase+cellulase [8]..	49
ภาพที่ 2.25 แสดงการเปรียบเทียบค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอลสิต PC/เส้นใยใบสับปะรด ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน [34].....	50
ภาพที่ 2.26 แสดงสมบัติเชิงกลของการปรับปรุงพื้นผิว MFC ด้วยสารลดแรงตึงผิวเทียบกับระบบที่ไม่ได้ปรับปรุง a) tensile strength และ b)Young's modulus ในวัสดุคอมพอลสิต LLDPE [37]..	51
ภาพที่ 2.27 แสดงค่า tensile strength ที่ปริมาณการเติมสารลดแรงตึงผิวต่างกันในวัสดุคอมพอลสิต PLA/nanocomposite [4].....	51
ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างเส้นฟิลาเมนต์ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT.....	63
ภาพที่ 4.2 TGA thermogram ของ a) เส้นใยใบสับปะรด b) เส้นใยกัญชง และ c) เส้นใยมะพร้าว ที่ผ่านการต้มในหม้ออัดแรงดันที่เวลาต่างกัน.....	69
ภาพที่ 4.3 FTIR spectra ของ a) เส้นใยใบสับปะรด b) เส้นใยกัญชง และ c) เส้นใยมะพร้าว หลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิว.....	74
ภาพที่ 4.4 ภาพ SEM ของเส้นใยใบสับปะรดที่กำลังขยาย 1000 เท่า ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการต่าง ๆ ก่อนใช้ร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน.....	75
ภาพที่ 4.5 ค่า MFI ของวัสดุคอมพอลสิตชีวภาพ PLA/PBAT ที่ใช้ a) เส้นใยใบสับปะรด b) เส้นใยกัญชง และ c) เส้นใยมะพร้าว เป็นสารเสริมแรง.....	78
ภาพที่ 4.6 แสดงค่า a) tensile strength, b) tensile modulus และ c) elongation at break ของชิ้นงานคอมพอลสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยใบสับปะรด.....	81
ภาพที่ 4.7 แสดงค่า a) tensile strength, b) tensile modulus และ c) elongation at break ของชิ้นงานคอมพอลสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยกัญชง.....	82

ภาพที่ 4.8 แสดงค่า a) tensile strength, b) tensile modulus และ c) elongation at break ของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยมะพร้าว	83
ภาพที่ 4.9 ค่า flexural strength ของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT ที่เติม a) เส้นใยใบสับปะรด b) เส้นใยกล้วย และ c) เส้นใยมะพร้าว เป็นสารเสริมแรง.....	85
ภาพที่ 4.10 แสดงภาพ SEM ของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการต่าง ๆ ที่กำลังขยายต่างกัน	93
ภาพที่ 4.11 ภาพชิ้นงานที่ใช้ในการพิมพ์ 3 มิติ	97
ภาพที่ 4.12 แสดงชิ้นงานต้นแบบจากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเส้นฟิลาเมนต์ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ.....	100
ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบการเกิดการ stringing ในชิ้นงาน a) PLA/PBAT/เส้นใยใบสับปะรด b) PLA/PBAT/กล้วย.....	101
ภาพที่ ก.1 DSC thermogram ของ 100PLA	108
ภาพที่ ก.2 DSC thermogram ของ 90PLA/10PBAT	108
ภาพที่ ก.3 DSC thermogram ของ 80PLA/20PBAT	109
ภาพที่ ก.4 DSC thermogram ของ 70PLA/30PBAT	109
ภาพที่ ก.5 DSC thermogram ของ 60PLA/40PBAT	110
ภาพที่ ก.6 DSC thermogram ของ 50PLA/50PBAT	110
ภาพที่ ก.7 DSC thermogram ของ 40PLA/60PBAT	111
ภาพที่ ก.8 DSC thermogram ของ -ของ 30PLA/70PBAT	111
ภาพที่ ก.9 DSC thermogram ของ 20PLA/80PBAT	112
ภาพที่ ก.10 DSC thermogram ของ 10PLA/90PBAT	112
ภาพที่ ก.11 DSC thermogram ของ 100PBAT	113
ภาพที่ ก.12 DSC thermogram ของสูตรการผสมPS.....	135
ภาพที่ ก.13 DSC thermogram ของสูตรการผสมPSS	135
ภาพที่ ก.14 DSC thermogram ของสูตรการผสม PES.....	136

ภาพที่ ก.15 DSC thermogram ของสูตรการผสม HS..... 136

ภาพที่ ก.16 DSC thermogram ของสูตรการผสม HSS..... 137

ภาพที่ ก.17 DSC thermogram ของสูตรการผสม HES..... 137

ภาพที่ ก.18 DSC thermogram ของสูตรการผสม CS 138

ภาพที่ ก.19 DSC thermogram ของสูตรการผสม CSS..... 138

ภาพที่ ก.20 DSC thermogram ของสูตรการผสม CES..... 139



สารบัญชัอักษรย่อ

PLA	คือ	พอลิแลคติกแอซิด
PBAT	คือ	พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท
PLA/PBAT	คือ	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBAT ในอัตราส่วน 90:10 โดยน้ำหนัก
PS	คือ	สูตรการผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้เส้นใยโพลีเอสเตอร์ปริมาณ 5 phr. ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารสานเชื่อมประสานไซเลน
PSS	คือ	สูตรการผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้เส้นใยโพลีเอสเตอร์ปริมาณ 5 phr. ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสานเชื่อมประสานไซเลน
PES	คือ	สูตรการผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้เส้นใยโพลีเอสเตอร์ปริมาณ 5 phr. ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอนไซม์ร่วมกับสานเชื่อมประสานไซเลน
HS	คือ	สูตรการผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้เส้นใยกล้วยปริมาณ 5 phr. ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารสานเชื่อมประสานไซเลน
HSS	คือ	สูตรการผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้เส้นใยกล้วยปริมาณ 5 phr. ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสานเชื่อมประสานไซเลน
HES	คือ	สูตรการผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้เส้นใยกล้วยปริมาณ 5 phr. ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอนไซม์ร่วมกับสานเชื่อมประสานไซเลน
CS	คือ	สูตรการผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 5 phr. ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารสานเชื่อมประสานไซเลน
CSS	คือ	สูตรการผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 5 phr. ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสานเชื่อมประสานไซเลน
CES	คือ	สูตรการผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้เส้นใยมะพร้าวปริมาณ 5 phr. ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอนไซม์ร่วมกับสานเชื่อมประสานไซเลน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุคอมพอสิต (Composites) เป็นวัสดุผสมที่ได้จากวัสดุพื้นฐานที่มีสมบัติทางเคมีและกายภาพที่แตกต่างกัน 2 ชนิดขึ้นไป ทำให้วัสดุที่ได้มีโครงสร้างใหม่ที่ดีขึ้น ซึ่งวัสดุคอมพอสิตได้มีการใช้งานในชีวิตประจำวันกันอย่างแพร่หลาย เช่น มีการนำไปใช้งานเป็นชิ้นส่วนของรถยนต์ ชิ้นส่วนของเครื่องบิน และเฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น โดยวัสดุคอมพอสิตประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่

1. แมทริกซ์ (Matrix) เป็นส่วนที่ยึดสารเสริมแรงเข้าด้วยกัน และยังเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายให้กับสารเสริมที่แรงที่เติมลงไป ในขณะที่ส่วน 2. เป็นส่วนของสารเสริมแรง ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ มักเป็นสารที่มีความแข็งแรง มีค่ามอดูลัสที่สูง โดยส่วนมากแล้วมักพบเห็นว่สารเสริมแรงที่ใช้ในวัสดุคอมพอสิตนั้นเป็นเส้นใยสังเคราะห์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำวัสดุคอมพอสิตที่ได้ไปใช้ในงานก่อสร้าง หรือใช้ในทางวิศวกรรม แต่ในปัจจุบันพบว่าเริ่มมีการหันมาใช้เส้นใยธรรมชาติแทน เนื่องจากว่าเส้นใยธรรมชาตินั้นมีน้ำหนักที่เบา สามารถหาได้ง่าย มีราคาที่ถูก และที่สำคัญยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [7] ซึ่งเส้นใยที่มักถูกนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตนั้นมีมากมายหลายชนิด เช่น เส้นใยฝ้าย เส้นใยกล้วย เส้นใยสับปะรด เส้นใยกล้วย เป็นต้น [1]

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หรือไบโอพอลิเมอร์ (Biopolymer) ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นแมทริกซ์ในวัสดุคอมพอสิต เนื่องจากปัจจุบันโลกของเราได้ประสบปัญหาขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ ทำให้เกิดเป็นขยะตกค้างเป็นจำนวนมาก จึงมีการใช้งานพลาสติกประเภทที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเพื่อลดปัญหาดังกล่าว โดยพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นมีหลายชนิด คือ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) เป็นต้น ซึ่งพอลิแลคติกแอซิดนั้นมีสมบัติที่โดดเด่น เช่น มีความแข็งแรง และมีค่ามอดูลัสที่สูง แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของพอลิเมอร์ดังกล่าวนี้คือมีความสามารถในการยึดตัวที่ต่ำ และมีการเกิดผลึกที่ช้า

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้เกิดผลพลอยได้ทางการเกษตรเหลือใช้ในปริมาณที่มาก และสามารถหาได้ง่าย โดยผลพลอยได้ดังกล่าวนี้สามารถนำมาเพิ่มมูลค่าเป็นเส้นใยสำหรับงานสิ่งทอ และเส้นใยเสริมแรงสำหรับงานทางด้านพลาสติก หนึ่งในพืชผลทางการเกษตรที่ประเทศไทยส่งออกเป็นอันดับต้น ๆ คือ สับปะรด ซึ่งในการเพาะปลูกสับปะรดเพื่อใช้ในการส่งออกเป็นอาหารกระป๋องนั้น ทางผู้ผลิตจะใช้ประโยชน์จากผลเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้ส่วนต่าง ๆ ของ

สับปะรดถูกทิ้งจนกลายเป็นขยะในปริมาณมาก จากงานวิจัยพบว่าใบของสับปะรดนั้นสามารถนำมาแยกเป็นเส้นใยได้ และเส้นใยดังกล่าวมีคุณสมบัติที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ด้านสิ่งทอ หรือนำไปทำเป็นกระดาษ เป็นต้น

ในขณะที่มะพร้าวก็ถือว่าเป็นอีกหนึ่งในพืชเศรษฐกิจของไทย ซึ่งมีผลผลิตเฉลี่ยต่อปีประมาณ 1.23 ล้านตัน สำหรับอุตสาหกรรมกระดาษมะพร้าวอ่อนจำเป็นที่จะต้องมีการลอกเปลือกออกก่อนส่งผลให้มีปริมาณเปลือกมะพร้าวเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอของไทยมีความต้องการที่จะก้าวสู่อุตสาหกรรมแห่งอนาคตที่เน้นการเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบทางการเกษตรและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำเปลือกมะพร้าวเหล่านี้มาสร้างมูลค่าโดยการนำมาปรับปรุงสมบัติบางอย่างและนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ

และในช่วงไม่นานที่ผ่านมาเส้นใยกล้วยก็ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ซึ่งกล้วยเป็นพืชเส้นใยเหมือนป่าน ปอกระเจา ป่านรามิ มีลักษณะเส้นใยที่เรียวยาว และมีการนำมาใช้งานมาเป็นหลายพันปีในแถบเอเชีย ซึ่งในการใช้งานเส้นใยกล้วยนั้นสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น มีการนำเส้นใยกล้วยไปใช้ในการผลิตสิ่งทอ กระดาษ เชือก เป็นต้น ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าเส้นใยกล้วยเป็นหนึ่งในเส้นใยที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด และมีการใช้งานมาอย่างยาวนานอีกด้วย [48]

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุ โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติเพื่อทำให้วัสดุที่มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น พบว่าพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นเมทริกซ์ในวัสดุคอมพอสิตนั้นนั้นมีหลายประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งพอลิเมอร์ประเภทย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น PLA แต่เนื่องจาก PLA มีข้อด้อยบางประการ ได้แก่ ความคงทนต่อความร้อนค่อนข้างน้อย กล่าวคือ เมื่อผ่านความร้อนจากการขึ้นรูป จะทำให้ PLA เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนโดยผ่านปฏิกิริยา hydrolysis เป็นต้น นอกจากนี้ PLA ยังมีความเปราะ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน จึงได้มีงานวิจัยจำนวนมากพยายามปรับปรุงสมบัติของ PLA โดยการนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น PBAT เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกับ PLA โดยคุณสมบัติที่สำคัญ คือ PBAT มีความยืดหยุ่นสูง เมื่อผสม PBAT กับ PLA จะทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติดี และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอีกด้วย จากงานวิจัยเหล่านั้นจึงทำให้ได้ผลลัพธ์ ออกมาเป็น PLA/PBAT ที่จะนำมาใช้เป็นเมทริกซ์เพื่อนำมาวิจัยต่อไป

สำหรับวัสดุคอมพอสิตที่ได้รับความนิยมมาก คือ วัสดุคอมพอสิตที่มีการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรงเนื่องจากเส้นใยธรรมชาตินั้นสามารถสร้างขึ้นได้ใหม่จากการปลูกเพิ่มได้ และยังสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติอีกด้วย สำหรับประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรมนั้น พืชที่ปลูกมากในประเทศไทยล้วนสามารถนำเส้นใยจากส่วนต่าง ๆ ของพืชมาใช้ประโยชน์ ทั้งจากผล ใบ และลำต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจ เส้นใยจากผลมะพร้าว (coir fiber) เส้นใยจากใบสับปะรด (pineapple leaf fiber) และเส้นใยจากลำต้นกล้วย (hemp fiber) อย่างไรก็ตามปัญหาหลักจากการ

นำเส้นใยธรรมชาติมาใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ คือ อันตรกิริยา (interaction) ระหว่างพอลิเมอร์กับพื้นผิวเส้นใยนั้นเกิดขึ้นได้น้อย หรือไม่แข็งแรงพอ ทำให้ความสามารถในการส่งผ่านแรงจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใยเกิดอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ซึ่งมีสาเหตุมาจากข้อโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสองที่แตกต่างกันนั่นเอง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติก่อนนำไปใช้งาน ในการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาตินั้นโดยทั่วไปแล้วจะสามารถทำได้ 4 วิธี ได้แก่ การปรับปรุงเส้นใยด้วยแรงกล การปรับปรุงเส้นใยด้วยสารเคมี การปรับปรุงเส้นใยด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และการปรับปรุงเส้นใยด้วยแรงกลเคมี ซึ่งวิธีที่สามารถปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติเพื่อทำให้เกิดอันตรกิริยาได้ดีนั้นคือ การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารเคมี แต่การใช้สารเคมีนั้นพบว่าภายหลังกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติแล้ว อาจมีของเสียบางอย่างที่เมื่อทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมอาจส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและอาจเป็นพิษต่อผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงได้มีการหันมาปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและไม่อันตรายต่อผู้ใช้งาน นั่นคือการใช้กระบวนการทางชีวภาพเข้ามาช่วย เช่น การใช้เอนไซม์มาปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ

กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์วัสดุเสริมองค์ประกอบในปัจจุบัน ได้แก่ การอัดรีดด้วยสกรู (Extrusion) การอัดฉีด (Injection) หรือการพิมพ์ 3 มิติ (3D printing) ซึ่งการพิมพ์ 3 มิตินั้นเป็นกระบวนการที่ใช้ในการรูปร่างงานต้นแบบ (Prototype) โดยใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ (3D printer) ซึ่งการขึ้นรูปด้วยกระบวนการนี้นั้นเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องสร้างแม่พิมพ์ (Mold) ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต โดยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติในปัจจุบันก็มีอยู่หลายประเภท ได้แก่ การพิมพ์แบบหัวฉีด (FDM : Fused Deposition Modeling) การพิมพ์ด้วยการซ้อนแผ่นวัสดุ (LOM : Laminated Object Manufacturing) การพิมพ์ด้วยรังสี อัลตราไวโอเลต (SLA : Stereolithography) การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (SLS : Selective Laser Sintering)

ในงานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT ที่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรง โดยเลือกใช้เส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยใบสับปะรด เส้นใยกล้วย และเส้นใยมะพร้าว เนื่องจากเส้นใยทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมานั้นเป็นผลพลอยได้ทางการเกษตรตลอดทั้งปี ทำให้มีปริมาณสะสมมากในแต่ละปี นอกจากนั้นแล้วยังเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงจึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสารเสริมแรง ซึ่งก่อนที่จะนำเส้นใยธรรมชาติไปใช้เป็นสารเสริมแรงนั้นจำเป็นต้องมีการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดกันระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติที่ส่งผลต่อวัสดุคอมพอสิต PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน เพื่อพัฒนาเป็นเส้นฟิลาเมนต์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียม และหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยใบสับปะรด (PALF) เส้นใยกัญชง (hemp) และเส้นใยมะพร้าว (coir) ด้วยวิธีการใช้สารลดแรงตึงผิว และการใช้เอนไซม์ ร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลน ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ เพื่อพัฒนาเป็นเส้นฟิลาเมนต์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

- 1.3.1 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่มีอัตราส่วนที่เหมาะสมนั้นจะแสดงพฤติกรรมทางความร้อนที่สามารถบ่งชี้ถึงความเข้ากันได้
- 1.3.2 การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติโดยการใช้สารลดแรงตึงผิว และการใช้เอนไซม์ร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลน จะสามารถเพิ่มการยึดติดกันระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีกว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนเพียงอย่างเดียว

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิด (PLA) เกรด 4043D และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท (PBAT) เกรด C1200
- 1.4.2 งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้เส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรง โดยเลือกใช้เส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยใบสับปะรด (PALF) เส้นใยกัญชง (hemp) และเส้นใยมะพร้าว (coir) โดยพิจารณาผลของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วย 2 วิธี ได้แก่ การใช้สารลดแรงตึงผิว และการใช้สารเอนไซม์ ร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์เมทริกซ์
- 1.4.3 ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเสริมแรงเมื่อเติมเส้นใยธรรมชาติปริมาณ 5 ส่วนในร้อยละส่วนเมทริกซ์
- 1.4.4 ชนิดของสารเชื่อมประสานไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ คือ 3-Aminopropyl trimethoxysilane (APTMS)

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาประยุกต์ในงานวิจัย

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการดำเนินงานวิจัย

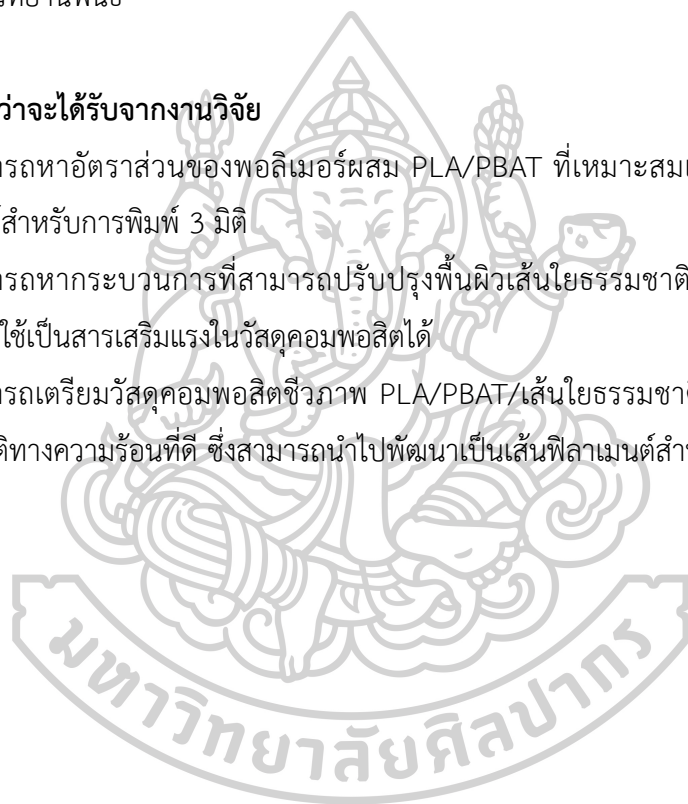
1.5.3 ดำเนินงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็นส่วนตัว่าง ๆ ดังนี้

- 1.5.3.1 การศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)
- 1.5.3.2 การเตรียมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดนั้นจะทำตัดเส้นใยให้มีความยาวในช่วง 0.50 – 1.00 เซนติเมตร จากนั้นจึงการนำไปต้มในน้ำด้วยหม้ออัดแรงดัน แล้วจึงนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยการใช้สารลดแรงตึงผิว และการใช้เอนไซม์ ร่วมกับการสารเชื่อมประสานไซเลน และวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค thermogravimetric analysis (TGA)
- 1.5.3.3 ทำการผสมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดในปริมาณ 5 ส่วนในร้อนส่วนของเมริกซ์ กับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในอัตราส่วนที่ได้จากตอนที่ 1.5.3.1 ด้วยเครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดเกลียวทวนคู่ (Twin screw extruder) โดยหล่อเย็นด้วยน้ำ จากนั้นนำไปตัดเป็นเม็ด แล้วนำเม็ดพลาสติกที่ได้ไปทำการทดสอบดัชนีการไหล (MFI) โดยศึกษาตามมาตรฐาน ASTM D1238
- 1.5.3.4 นำเม็ดพลาสติกที่เหลือไปทำการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดฉีดพลาสติก (Injection molding) เพื่อนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล ดังนี้
 - ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึง (Tensile test) ตามมาตรฐาน ASTM D638
 - ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural test) ตามมาตรฐาน ASTM D790
 - ศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการกระแทก (Impact test)) ตามมาตรฐาน ASTM D256 (Izod)
- 1.5.3.5 ศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของชิ้นงานหลังการแตกหักจากการดึงยึด เพื่อศึกษาการยึดติดกันของเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์เมทริกซ์
- 1.5.3.6 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) ด้วยเทคนิค ดังนี้
 - เทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ในโหมด heat-cool-heat ด้วยอัตราการให้และคายพลังงานความร้อน 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ศึกษาในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส
 - เทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 600 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้พลังงานความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

- 1.5.3.7 การประเมินความเหมาะสมในการใช้เส้นฟิลาเมนต์ที่เตรียมได้เพื่อใช้สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ
- 1.5.4 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย
- 1.5.5 ดำเนินการให้ผลงานหรือส่วนหนึ่งของผลงานได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์ในวารสารหรือสิ่งพิมพ์ทางวิชาการ หรือนำเสนอต่อที่ประชุมวิชาการที่มีรายงานการประชุม (Proceeding) อย่างน้อย 1 เรื่อง
- 1.5.6 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์
- 1.5.7 สอบวิทยานิพนธ์

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

- 1.6.1 สามารถหาอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาเส้นฟิลาเมนต์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ
- 1.6.2 สามารถหากระบวนการที่สามารถปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติได้อย่างเหมาะสม เพื่อนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตได้
- 1.6.3 สามารถเตรียมวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ที่มีสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนที่ดี ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาเป็นเส้นฟิลาเมนต์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ



บทที่ 2

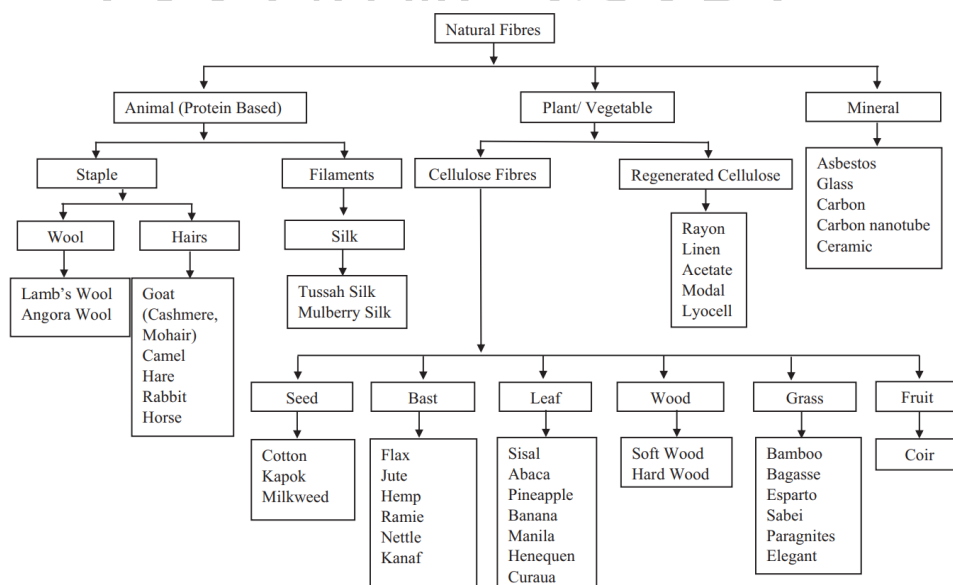
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1. เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติ คือ เส้นใยที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ สามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่ม [40] ดังภาพที่ 2.1 ได้แก่

1. เส้นใยจากพืช มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส เช่น เส้นใยของฝ้าย ป่าน สับปะรด หรือกล้วย เป็นต้น
2. เส้นใยจากสัตว์ เป็นเส้นใยที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโปรตีน เช่น ขนสัตว์ นม หรือเส้นใยไหม เป็นต้น
3. เส้นใยแร่ ได้แก่ เส้นใยหิน

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติมักถูกนำมาใช้เป็นตัวเสริมแรงในวัสดุ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ ซึ่งเส้นใยธรรมชาติที่ได้รับความนิยมที่นำมาใช้ในการเสริมแรงแก้วคือ เส้นใยจากพืช เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย มีน้ำหนักเบา ใช้เวลาในการผลิตใหม่ไม่นาน มีราคาถูก และที่สำคัญคือ เส้นใยพืชนั้นมีสมบัติต้านทานต่อแรงดึงที่ดี



ภาพที่ 2.1 การจำแนกเส้นใยธรรมชาติ [2]

2.1.1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเส้นใยใบสับปะรด

ชื่อสามัญ Pineapple

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Ananas comosus* (L.) Merr.

ตระกูล Bromelaceae

ถิ่นกำเนิด บราซิล โคลัมเบีย

ชื่อท้องถิ่น มะขะนัด (ภาคเหนือ) บ่อนัด (เชียงใหม่) ขนุนทอง ย่านัด ยานัด (ภาคใต้) หมากนัด (ภาคอีสาน)

สับปะรดเป็นพืชล้มลุก มีอายุหลายปี และมีความสูง 90-100 เซนติเมตร ลำต้นสั้นและแข็ง ใบเดี่ยวเรียงสลับซ้อนกัน ไม่มีก้านใบ ดอกออกเป็นช่อสีขาวมีก้านยาวออกจากกลางต้น ผลเป็นผลรวม มีรูปร่างทรงกระบอกหรือรูปไข่ โดยมีตาอยู่รอบผล ดังภาพที่ 2.2 ขณะผลอ่อนจะมีสีเขียว และเมื่อแก่ผลจะกลายเป็นสีเหลือง มีรสเปรี้ยวอมหวาน [30]



ภาพที่ 2.2 ผลและใบสับปะรด [47]

ลักษณะของเส้นใยสับปะรด

ใบของเส้นใยสับปะรดนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านสิ่งทอ มีการผลิตเชิงการค้าในประเทศฟิลิปปินส์ตั้งแต่ศตวรรษที่ 17 โดยความยาวของเส้นใยจะมีขนาดเท่าใบ สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มตามขนาดและกรรมวิธีการผลิต ได้แก่

1.) เส้นใยละเอียดมาก

เป็นเส้นใยที่มีการคัดเลือกอย่างละเอียด

2.) เส้นใยละเอียด

เป็นเส้นใยที่มีสีขาวนวล เส้นใยมีขนาดเล็กและนุ่ม มีความมันและเงางามคล้ายไหม มีความเหนียวและทนต่อการหัก สามารถนำมาทอเป็นผ้าที่บางเนื้อละเอียดที่มีความนุ่มนวล ซึ่งผ้าทอนี้สามารถย้อมสีหรือเติมสารตกแต่งผ้าทำได้ง่ายและหลากหลาย

3.) เส้นใยหยาบ

เส้นใยสับปะรดที่ถูกนำมาใช้งานโดยส่วนใหญ่เป็นเส้นใยหยาบ โดยนำมาทำเป็นเชือกผูก รองเท้า เชือกเย็บรองเท้า ใช้อ้อยสายสร้อยคอ ทำหมตูกตา และถูกนำมาทำเป็นด้ายเย็บผ้า

โดยเมื่อนำเส้นใยสับปะรดมาส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์จะพบว่าเส้นใยสับปะรดนั้นมีลักษณะหลายเหลี่ยม ทรงรี และค่อนข้างแบน มีลูเมน (lumen) อยู่ตรงกลางเส้นใย และขนาดของเส้นใยนั้นมีขนาดประมาณ 5 ไมครอน และในกาสกัดเส้นใยสับปะรดนั้นสามารถจำแนกได้ 3 วิธี ได้แก่ วิธีทางกล โดยใช้เครื่องบด เรียกเส้นใยที่ได้ว่าเส้นใยบด และเส้นใยที่ได้จะมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากมีลิกนินและสารประกอบอื่น ๆ ปนอยู่มาก วิธีที่สองเป็นการใช้เอนไซม์ และวิธีสุดท้ายเป็นวิธีทางเคมี เป็นการใช้สารเคมีเพื่อแยกเส้นใยออก เรียกเส้นใยที่ได้ว่า เส้นใยเคมี ซึ่งมีลิกนินและสารประกอบอื่น ๆ ในปริมาณน้อยมาก

2.1.2. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเส้นใยมะพร้าว

เป็นเส้นใยที่ได้จากส่วนที่เป็นเปลือกชั้นในที่อยู่ระหว่างผลและเปลือกชั้นนอก ถือเป็นเส้นใยที่ได้จากเมล็ด สีธรรมชาติของใยมะพร้าวเป็นสีน้ำตาล มีความหยาบ ดังภาพที่ 2.3 เส้นใยมีความแข็งแรง ทนต่อความชื้น และน้ำได้ดี ทนต่อการขัดสีได้ดีมาก นิยมนำมาทำพรมเช็ดเท้า เสื่อ เชือก ถ้าย้อมสีมักย้อมเป็นสีเข้มหรือสีดำ เพราะฟอกเป็นสีขาวยาก ปัจจุบันถูกนำมาทำที่นอน แก้วอ้วนผสมสปริง และเครื่องเรือนอื่น ๆ [27]



ภาพที่ 2.3 เส้นใยมะพร้าว [27]

2.1.3. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับเส้นใยกัญชง

กัญชงเป็นพืชในวงศ์ Cannabidaceae ใช้ประโยชน์ด้านเส้นใย มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cannabis sativa* L. var. *sativa* ส่วนกัญชา ใช้ประโยชน์ด้านสารเสพติดและระงับปวดมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cannabis sativa* L subsp. อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังมีข้อถกเถียงในการจำแนกพืชทั้งสองชนิดนี้อยู่ กัญชงจะมีสาร tetrahydrocannabinol (THC) ต่ำกว่าร้อยละ 0.3 ซึ่งในทางกฎหมายสากลไม่ถือว่าเป็นพืชเสพติด มีการใช้กัญชงเป็นพืชเศรษฐกิจในอุตสาหกรรมเส้นใยและการทำเยื่อกระดาษ เช่น แคนาดา และจีน โดยประเทศไทยมีการใช้วัตถุดิบด้านเส้นใยและเยื่อกระดาษเป็นจำนวนมาก ใบกัญชงมีลักษณะใบที่เรียวยาว มีแฉกประมาณ 5-7 แฉก ดังภาพที่ 2.4 เส้นใยกัญชงเป็นทางเลือกของเส้นใยธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ทำให้เส้นใยคุณภาพสูง มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น ปลูกได้หลายครั้งต่อปี และ เมล็ดยังมีโปรตีนและน้ำมันที่มีคุณภาพในการบริโภค [45]

จากการศึกษาลักษณะเชิงกายวิภาคของเปลือกลำต้นกัญชง (*Cannabis sativa* L. var. *sativa*) ด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่ามีการสร้างเส้นใย (fiber) จำนวน 2 ชนิด ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเส้นใยชนิดแรกคือ blast fiber ซึ่งเป็นกลุ่มเซลล์ขนาดใหญ่ มีผนังเซลล์หนาและช่องว่างภายในเซลล์ (lumen) ขนาดใหญ่ จัดเรียงอยู่ในบริเวณเนื้อเยื่อคอร์เทกซ์ (cortex) ใกล้กับผิวลำต้น ส่วนเส้นใยอีกชนิดหนึ่งคือ phloem fiber เป็นกลุ่มเซลล์ขนาดเล็ก เรียงตัวเป็นแนววงแหวนบริเวณใกล้กับแคมเปียมของท่อลำเลียงอาหาร (vascular cambium) ระหว่างเส้นใยทั้งสองชนิด ยังพบเนื้อเยื่อพาราเรงโคมา (parenchyma) กระจายแทรกอยู่ ทั้งนี้ เส้นใยทั้งสองชนิดมีความเกี่ยวข้องกับการนำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมเส้นใยโดยตรง ขณะที่เส้นใยที่อยู่ในบริเวณ secondary xylem นิยมใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ เส้นใยกัญชงจัดเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีปริมาณเซลลูโลสสูง ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความเหนียวที่ดี จึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการนำมาใช้เป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต โดยเฉพาะในงานด้านวิศวกรรมวัสดุและการพัฒนาโครงสร้างเบา



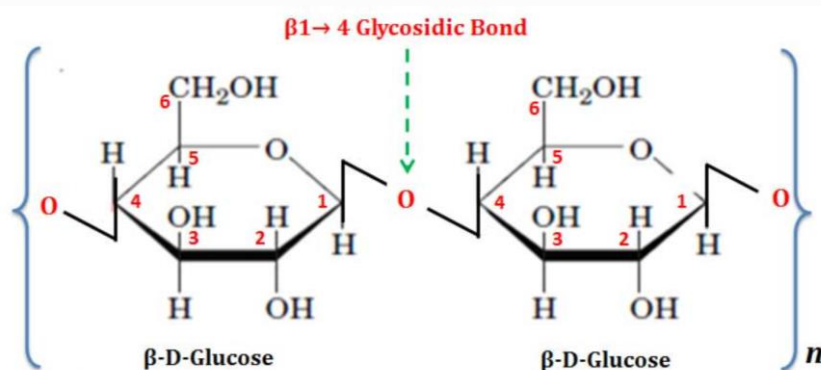
ภาพที่ 2.4 ลักษณะลำต้นและใบของกัญชง [44]

2.1.4 องค์ประกอบของเส้นใยพืช

โดยทั่วไปแล้วเส้นใยพืช จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เพคติน แวกซ์ ส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ (water soluble substance) และน้ำ [6]

เซลลูโลส (cellulose)

เป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดเดียวกัน (homopolysaccharide) คือน้ำตาลกลูโคส เชื่อมกันด้วยพันธะ beta-1,4-glycosidic เป็นสายโซ่ยาวตลอด ไม่มีการแตกกิ่ง มีโครงสร้างดังภาพที่ 2.5 อยู่ในลักษณะที่ขนานกันและยึดรวมกันเป็นก้อนด้วยพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล

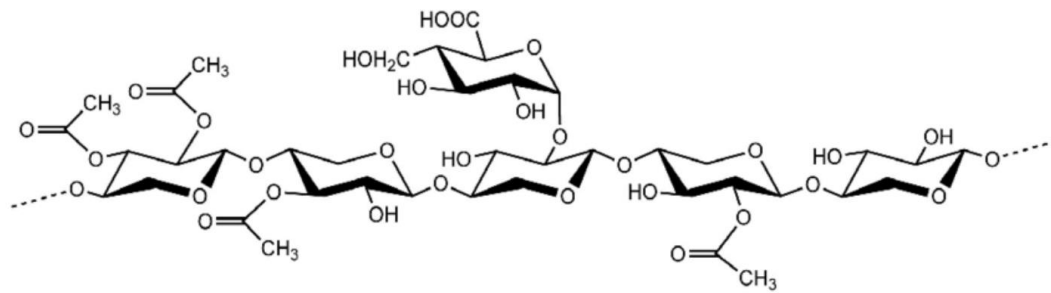


ภาพที่ 2.5 โครงสร้างเซลลูโลส [6]

เซลลูโลสที่พบในธรรมชาติ เป็นส่วนประกอบในผนังเซลล์ ใบไม้ และเนื้อไม้ โดยมีสมบัติไม่ละลายน้ำและสามารถต่อปฏิกิริยาเคมีของเอนไซม์และต่าง แต่จะไม่ทนต่อกรดที่เข้มข้น

เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

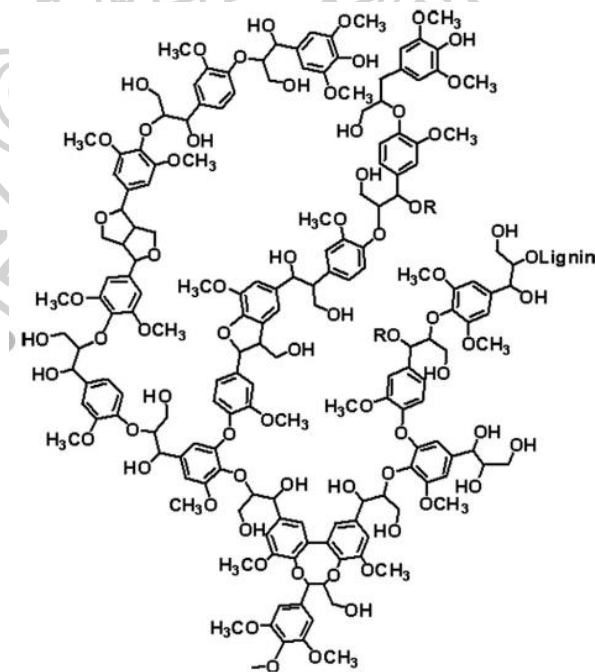
เฮมิเซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน ที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด (heteropolysaccharide) โดยมีสายโซ่หลักเป็นสายโซ่ที่ยาวประกอบด้วย beta-1,4 linked D-xylopyranoyl unit ที่มีสายโซ่ข้าง (side chain) ประกอบด้วย L-arabinose, D-glucuronic acid หรือ 4-O-methyl, D-galactose และ D-glucose มีโครงสร้างดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [14]

ลิกนิน (lignin)

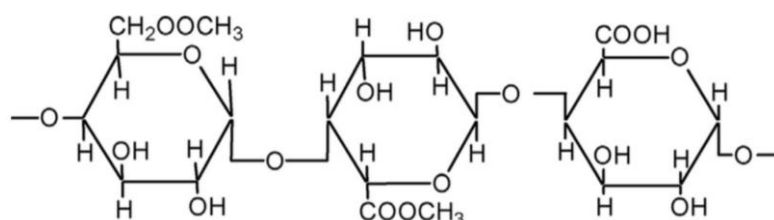
เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีองค์ประกอบอะลิฟาติกและอะโรมาติก ซึ่งมีโครงสร้างดังภาพที่ 2.7 ทำหน้าที่ในการปกป้องผนังเซลล์ของพืช ทำให้เอนไซม์เข้าไปทำการย่อยสลายได้ยาก ในอุตสาหกรรมการทำกระดาษหรืออุตสาหกรรมเซลลูโลส จะมีลิกนินเป็นผลพลอยได้เสมอ ซึ่งลิกนินนั้นมีราคาไม่แพงและมักใช้ทำเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำไปทำกาหรืออาจนำไปเปลี่ยนโครงสร้างบางอย่างแล้วจากนั้นนำไปละลายผสมในพอลิเมอร์ก็ได้



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างลิกนิน [26]

เพคติน (pectin)

เพคตินมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า heteropolysaccharides ซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยที่ชื่อว่า polygalacturonic acid โดยมีโครงสร้างดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างเพคติน [11]

แวกซ์ (Wax)

เป็นส่วนหนึ่งในเส้นใยพืช สามารถสกัดออกได้โดยการใช้สารละลายอินทรีย์

ซึ่งเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดก็จะมีองค์ประกอบของสารที่กล่าวมาข้างต้นแตกต่างกันไปด้วย ดังตารางที่ 2.1 [20] พบว่าไยปอ (Jute) นั้นมีปริมาณความชื้น (Moisture content) มากที่สุด และเส้นใยแต่ละชนิดก็มีปริมาณความชื้นที่ต่างกันด้วย การที่ปริมาณความชื้นในเส้นใยมีค่าต่างจะส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลแตกต่างกันไปด้วย เช่น ความแข็งเกร็ง (rigidity) หรือความทนต่อการดึงยืด (tensile strength) หรือขนาดของเส้นใย เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิด [20]

Fiber	Cellulose (wt%)	Lignin (wt%)	Hemicellulose (wt%)	Pectin (wt%)	Wax (wt%)	Moisture content (wt%)
Jute	61–71.5	12–13	13.6–20.4	0.4	0.5	12.6
Hemp	70.2–74.4	3.7–5.7	17.9–22.4	0.9	0.8	10
Kenaf	31–39	15–19	21.5	–	–	–
Flax	71	2.2	18.6–20.6	2.3	1.7	10
Ramie	68.6–76.2	0.6–0.7	13.1–16.7	1.9	0.3	8
Sunn	67.8	3.5	16.6	0.3	0.4	10
Sisal	67–78	8–11	10.0–14.2	10	2.0	11
Henquen	77.6	13.1	4–8	–	–	–
Cotton	82.7	–	5.7	–	0.6	–
Kapok	64	13	23	23	–	–
Coir	36–43	41–45	10–20	3–4	–	8
Banana	63–67.6	5	19	–	–	8.7
PALF	70–82	5–12	–	–	–	11.8

2.2 การปรับปรุงสมบัติพื้นผิวของเส้นใย

การนำเส้นใยธรรมชาติมาเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิตนั้นจำเป็นต้องคำนึงความสามารถในการยึดติดกันระหว่างผิวหน้าของเส้นใยกับพอลิเมอร์ จากที่กล่าวมาข้างต้นจะพบว่าเส้นธรรมชาตินั้นจะประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก นั้นแสดงให้เห็นว่าเส้นใยธรรมชาติจะมีความมีขี้ ซึ่ง เป็นผลมาจากหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ทำให้เส้นใยธรรมชาตินั้นไม่สามารถที่จะเข้ากันได้กับพลาสติก ซึ่งหากต้องการให้เส้นใยธรรมชาตินั้นสามารถที่จะยึดติดกับพลาสติกได้ดีมากขึ้นสามารถทำได้ด้วยการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใย โดยในการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารซิลเลน (silane treatment) การปรับปรุงพื้นผิวด้วยด่าง (alkali treatment) เป็นต้น

2.2.1. กระบวนการที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติ

กระบวนการทางเชิงกล

กระบวนการปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติด้วยกระบวนการเชิงกลนั้น จะเป็นการใช้แรงหรือกลไกทางกายภาพกับเส้นใยพืชโดยตรง เพื่อลดขนาดของกลุ่มเซลลูโลส ซึ่งวิธีที่มักใช้มีหลายวิธี ดังต่อไปนี้

การใช้แรงทางกล : เป็นการทำให้เส้นใยมีขนาดเล็กซึ่งอาจจะนำไปทอ บด หรือม่ โดยใช้เครื่องมือดังแสดงภาพที่ 2.9 จะทำให้ผลึกของเซลลูโลสมีขนาดเล็ก และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น มักนำเส้นใยไปทำการบดด้วยลูกกลิ้ง มีข้อดี คือ ต้นทุนในการผลิตนั้นค่อนข้างต่ำและเส้นใยที่ได้มีสมบัติที่ดี [35]



ภาพที่ 2.9 เครื่องชูดเส้นใย

กระบวนการทางเคมี

การปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติด้วยสารเคมีนั้นถือว่าเป็นอีกกระบวนการที่ทำให้เส้นใยมีประสิทธิภาพ และทำให้ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสสามารถละลายได้อีกด้วย และกระบวนการทางเคมีนั้นสามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่กระบวนการดังกล่าวก็มีข้อเสีย คือ มีค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งสารเคมีที่มักใช้นั้น เป็นสารประเภทสารออกซิไดซ์ กรดต่าง ๆ และเกลือที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสเฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้ โดยต่างที่กล่าวมานั้นมักใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนีย แอมโมเนียมซัลไฟด์ ส่วนกรดที่ใช้ในกระบวนการดังกล่าวนี้มักใช้กรดไฮโดรคลอริก กรดฟอสฟอริก ในขณะที่สารออกซิไดซ์ที่ใช้ นั้นเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โอโซน และตัวทำละลายที่ใช้จะเป็นเอทานอล เบนซิน เอทิลีนไกลคอล บิวทานอล [35]

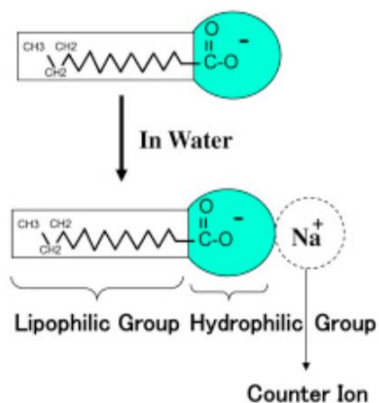
ปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติด้วยด่าง (alkali treatment) นั้นจะส่งผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยพืช โดยกลไกการทำงานของด่าง คือ ด่างจะไปละลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้ในเส้นใยมีร้อยละของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น และทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น

ปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติด้วยกรด (acid treatment) มีจุดประสงค์เพื่อให้ได้น้ำตาลในปริมาณที่สูงจากเส้นใย ซึ่งอาจใช้กรดที่เข้มข้นหรือเจือจางก็ได้

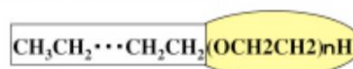
การปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติโดยใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant treatment) เป็นกระบวนการที่อาศัยสารเคมีซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยทั้งหมู่ที่มีขั้ว (polar) และไม่มีขั้ว (non-polar) อยู่ภายในโมเลกุลเดียวกัน โดยสารลดแรงตึงผิวจะทำหน้าที่เสมือนสะพานเชื่อมระหว่างพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์พอลิเมอร์ ทำให้สามารถยึดเกาะกันได้ดีขึ้น โครงสร้างทั่วไปของสารลดแรงตึงผิวแสดงดังภาพที่ 2.10 โดยสารลดแรงตึงผิวสามารถจำแนกออกเป็น 4 ประเภทหลัก ได้แก่ Non-ionic surfactants ซึ่งมีหมู่หัวโมเลกุลที่ไม่มีประจุ, Anionic surfactants ซึ่งมีหมู่หัวโมเลกุลที่เป็นประจุลบ, Cationic surfactants ซึ่งมีหมู่หัวโมเลกุลที่เป็นประจุบวกและ Amphoteric surfactants ซึ่งสามารถแสดงสมบัติเป็นทั้งประจุบวกและประจุลบ ขึ้นอยู่กับสภาวะของระบบ เช่น ค่า pH ของสารละลาย

ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของวัสดุประเภทนาโนฟิลเลอร์ (nanofiller) แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

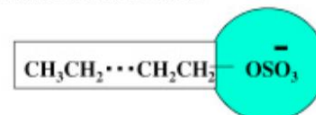
In an amphiphilic structure there are groups with opposite properties, one group that has affinity to water and a group that has affinity to lipids.



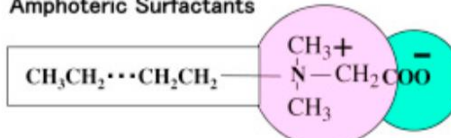
Nonionic Surfactants



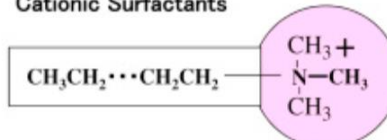
Anionic Surfactants



Amphoteric Surfactants



Cationic Surfactants



ภาพที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว [22]

ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดของสารลดแรงตึงผิว ชนิดของอนุภาคระดับนาโน และกระบวนการในการปรับปรุงเพื่อเตรียมเป็น polymer nanocomposite [10]

Surfactant	Type of Surfactant	Nanofiller	Type of Nanofiller	Modification Method
Triton X-100	Non-ionic	CNTs	Inorganic	Ultrasonication
Ultrac PE 105	Non-ionic	NCFs	Organic	Stirring
SDS	Anionic	GNPs	Inorganic	Ultrasonication
Beycostat A B09	Anionic	CNCs	Organic	Stirring
DDAB	Cationic	MMT	Inorganic	Agitation
HTAB	Cationic	CNCs	Organic	Stirring

กระบวนการทางชีวภาพ

เป็นกระบวนการที่ปรับปรุงเส้นใยพืชโดยใช้จุลินทรีย์เข้ามาย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ในขณะที่ส่วนที่เป็นเซลลูโลสก็จะถูกย่อยไปด้วย แต่ย่อยในปริมาณที่น้อยมาก ในกระบวนการดังกล่าว มักใช้สารชีวภาพ เช่น เชื้อราสีน้ำตาล เชื้อราสีขาว และเชื้อราอ่อน เพื่อปรับปรุงเส้นใยให้มีประสิทธิภาพที่สูง และมีการใช้เอนไซม์เพื่อปรับปรุงคุณภาพเส้นใย เช่น การใช้เอนไซม์เซลลูเลสเพื่อ

ปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นค่า pH และอุณหภูมิ [35]

กระบวนการทางเชิงกลเคมี

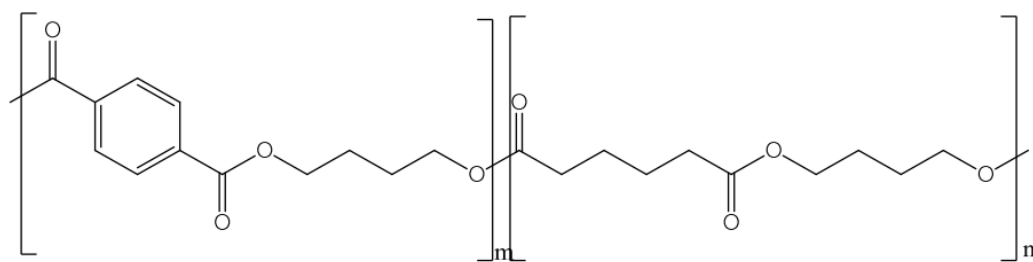
เป็นกระบวนการที่ใช้แรงกลร่วมกับสารเคมีทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ส่งผลให้สารเหล่านี้สามารถละลายออกจากโครงสร้างเส้นใยได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลทำให้เซลลูโลสเกิดการแยกตัว (fibrillation) ได้ดีขึ้นในขั้นตอนต่อไป เช่น การไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำเส้นใยไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต โดยเฉพาะในงานที่ต้องการการกระจายตัวของเส้นใยที่ดีและการยึดเกาะระหว่างเฟสที่มีประสิทธิภาพ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การใช้กระบวนการเชิงกลเคมีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกเซลลูโลสเดี่ยว (individual cellulose fibrils) และช่วยลดปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสที่เหลืออยู่ในเส้นใยหลังการปรับสภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มสมบัติทางกลและความเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ในวัสดุคอมโพสิตชีวภาพ [35]

2.3 พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสลายตัวได้โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ ซึ่งใช้ระยะเวลาที่น้อยมากเมื่อเทียบกับพลาสติกทั่วไป และในการสลายตัวนั้นจะทำให้ได้ก๊าซออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน นอกจากนั้นอาจได้ชีวมวลเพิ่มอีกด้วย ซึ่งพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นมีสมบัติที่เด่น คือ พอลิเมอร์นั้นที่ได้จากธรรมชาติ หรือสามารถถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายได้ หากพอลิเมอร์มีสมบัติข้อใดข้อหนึ่งในสองข้อนี้ อาจกล่าวได้ว่าเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.3.1 พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท

พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรพทาเลท (Polybutylene Adipate-co-Terephthalate : PBAT) เป็นพลาสติกชีวภาพที่ได้มาจากแหล่งปิโตรเคมี แต่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งมีโครงสร้างดังภาพที่ 2.11 ซึ่งจะพบว่าภายในโครงสร้างนั้นมีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และวงอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบบนสายโซ่หลัก จึงทำให้มีความเหนียว ขึ้นรูปได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง แต่ต้นทุนในการผลิต PBAT ยังมีราคาสูง จึงมักนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาติค พอลิแลคติกแอซิด ซึ่งนอกจากจะช่วยลดต้นทุนแล้ว ยังสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมอีกด้วย [43]

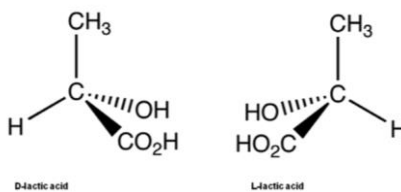
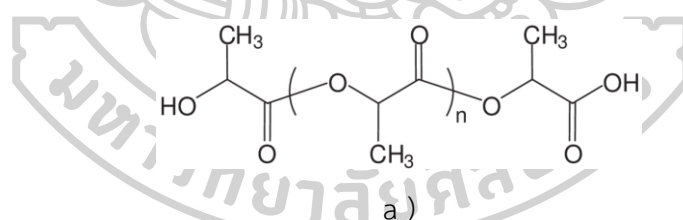


ภาพที่ 2.11 สูตรโครงสร้างของ PBAT [43]

2.3.2 พอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดนั้นเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่ง จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่มีสายโซ่ตรง ซึ่งสังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก และกรดแลคติกนั้นได้มาจากการหมักแป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบจึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้

กรดแลคติกนั้นมีไอโซเมอร์สองรูปแบบ คือ แบบดี-แลคติกและแบบแอล-แลคติกดังภาพที่ 2.12 ซึ่งเป็นอแนนทิโอเมอร์ (enantiomer) ที่มีความว่องไวต่อแสงต่างกัน หรืออาจกล่าวได้ว่ามีโครงสร้างทางเคมีเหมือนกันแต่มีการเรียงตัวที่ต่างกันในสามมิติ โดยในธรรมชาติจะพบไอโซเมอร์แบบแอล-แลคติกไอโซเมอร์ [39]



b)

ภาพที่ 2.12 a) โครงสร้างของพอลิแลคติกแอซิด [24] และ b) องค์ประกอบที่เป็นกรดแลคติก [39]

ความบริสุทธิ์เชิงแสง (optical purity) ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุ เช่น ความสามารถในการตกผลึก (crystallinity) จุดหลอมเหลว (melting temperature) และสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของ PLA โดยทั่วไปแล้ว PLA ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงสูง เช่น PLA ที่ประกอบด้วย L-isomer เกือบ 100% จะมีแนวโน้มตกผลึกได้ง่ายและแสดงสมบัติทางกลที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับ PLA ที่มีลักษณะเป็น racemic mixture (เช่น มี D-isomer ปะปนอยู่ในปริมาณมาก) เนื่องจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเกิดได้อย่างเป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกมีความเสถียรและแน่นหนา

นอกจากนั้นแล้วพอลิแลคติกแอซิดนั้นจะมีสมบัติที่เห็นได้ชัด คือ มีความแข็งแรง แต่ข้อจำกัดคือ มีความเปราะ ดังนั้นจึงนิยมนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและสมบัติอื่น ๆ

2.4 เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

2.4.1 ความสำคัญของการพิมพ์ 3 มิติ

ในอดีตนั้นการที่จะขึ้นรูปชิ้นงานจำเป็นที่จะต้องทำการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาก่อน ส่งผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงขึ้น และหากต้องการขึ้นรูปชิ้นงานหลายชิ้นที่มีลักษณะแตกต่างกัน นั้นก็หมายความว่าจำเป็นที่จะต้องแม่พิมพ์หลายแบบด้วยเช่นเดียวกัน แต่ปัจจุบันพบว่าเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิตินั้นสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ โดยเทคโนโลยีดังกล่าวนี้จะทำการสร้างแบบจำลองชิ้นงาน 3 มิติออกมาในระบบคอมพิวเตอร์ออกมาก่อน จากนั้นหากต้องการแก้ไขก็สามารถทำการแก้ไขในระบบคอมพิวเตอร์ได้เลย และเมื่อได้แบบที่ต้องการแล้ว ก็ทำการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งชิ้นงานต้นแบบที่ได้ออกมานั้นจะมีความถูกต้องและแม่นยำ เนื่องจากมีการประมวลผลโดยระบบคอมพิวเตอร์ และระยะเวลาในการขึ้นรูปค่อนข้างเร็ว นอกจากนั้นยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสร้างแม่พิมพ์ ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าเดิม [49]

2.4.2. เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติในปัจจุบัน

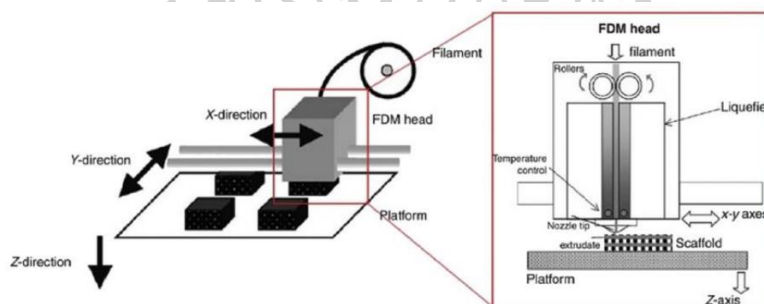
ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ในปัจจุบันนั้นเกิดเทคโนโลยีใหม่ ๆ มากมาย ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในขณะนี้ คือ เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ หรือเรียกกันว่า 3D printing เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิตินั้นมีหลายประเภท [3] ได้แก่

2.4.2.1. การพิมพ์แบบหัวฉีด (FDM : Fused Deposition Modeling)

เทคโนโลยีการพิมพ์แบบหัวฉีด หรือ Fused Deposition Modeling (FDM) เป็นเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในการสร้างต้นแบบที่มีต้นทุนต่ำและกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน หลักการทำงานของ FDM คือ การ

ป้อนเส้นฟิลาเมนต์ซึ่งอยู่ในสถานะของแข็งเข้าสู่หัวฉีดซึ่งมีการให้ความร้อนจนวัสดุอ่อนตัว จากนั้นวัสดุจะถูกอัดผ่านหัวฉีดออกมาในลักษณะกึ่งกลมเหลว และถูกวางเรียงเป็นชั้นอย่างต่อเนื่องบนแท่นพิมพ์ตามแบบจำลองสามมิติที่กำหนดไว้ โดยกระบวนการจะดำเนินต่อไปทีละชั้นจนได้ชิ้นงานสมบูรณ์ในรูปแบบสามมิติ [46]

เทคโนโลยี FDM เหมาะสำหรับวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติก เช่น PLA, ABS, PETG และวัสดุชีวภาพอื่น ๆ เนื่องจากสามารถหลอมเหลวได้ที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป และมีคุณสมบัติในการคืนรูปหลังเย็นตัวได้ดี อย่างไรก็ตาม ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการ FDM มักมีลักษณะผิวหยาบในแนวตั้งและอาจเกิดเส้นชั้น (layer lines) ที่ส่งผลต่อความเรียบของพื้นผิว ดังนั้นจึงมักจำเป็นต้องมีการตกแต่งผิว (post-processing) เช่น การขัดผิวหรือเคลือบพื้นผิวเพิ่มเติมก่อนนำไปใช้งานจริง เพื่อเพิ่มความเรียบเนียนและความสวยงามของชิ้นงาน กลไกการทำงานของเทคโนโลยี FDM แสดงไว้ในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบหัวฉีด [46]

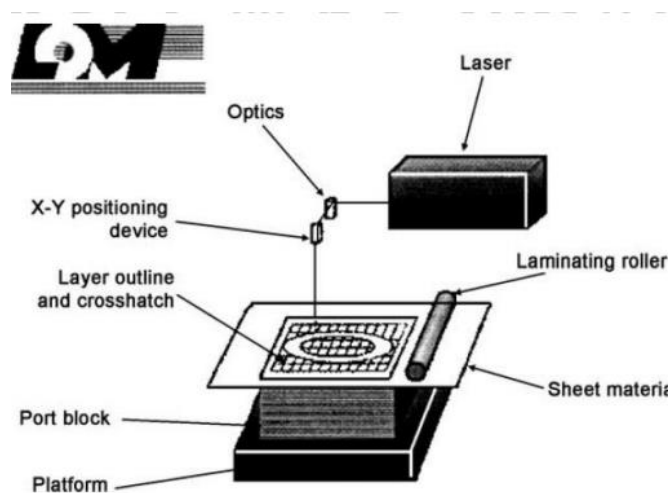
2.4.2.2. การพิมพ์ด้วยการซ้อนแผ่นวัสดุ (LOM : Laminated Object Manufacturing)

เป็นเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing) ประเภทหนึ่ง ซึ่งทำงานโดยการนำวัสดุแผ่นบาง เช่น กระดาษ แผ่นฟิล์มพลาสติก หรือแผ่นโลหะ มาทำการตัดเป็นรูปทรงของแต่ละชั้นตามแบบจำลองสามมิติด้วยแหล่งพลังงาน เช่น เลเซอร์ หรือใบมีด จากนั้นจึงทำการซ้อนและเชื่อมติดกันเป็นชิ้นงานแบบสามมิติ การยึดติดกันระหว่างชั้นสามารถทำได้โดยใช้ความร้อน หรือแรงกด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุที่ใช้

ข้อดีที่สำคัญของกระบวนการ LOM คือ ความรวดเร็วในการผลิต โดยไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุเฉพาะทางหรือมีสมบัติพิเศษสำหรับการขึ้นรูปด้วยความร้อน ทำให้สามารถใช้วัสดุทั่วไป เช่น กระดาษ ไม้อัด หรือโลหะแผ่นบาง ซึ่งมีต้นทุนต่ำและหาได้ง่ายในการผลิตต้นแบบหรือชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังมีจุดเด่นในด้าน การใช้วัสดุอย่างคุ้มค่า และไม่ต้องมีระบบหล่อเย็นหรือการ

ควบคุมอุณหภูมิที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ ความละเอียดของชิ้นงานอาจไม่สูงเท่ากับเทคโนโลยีอื่น และไม่สามารถสร้างชิ้นงานที่มีโครงสร้างภายในซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เทคโนโลยี LOM จึงเหมาะสำหรับการสร้างแบบจำลองขนาดใหญ่หรือชิ้นงานเพื่อการตรวจสอบด้านรูปร่างภายนอก (visual prototyping) โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมที่ให้ความสำคัญกับเวลาและต้นทุน เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์หรือผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าเบื้องต้น [46]

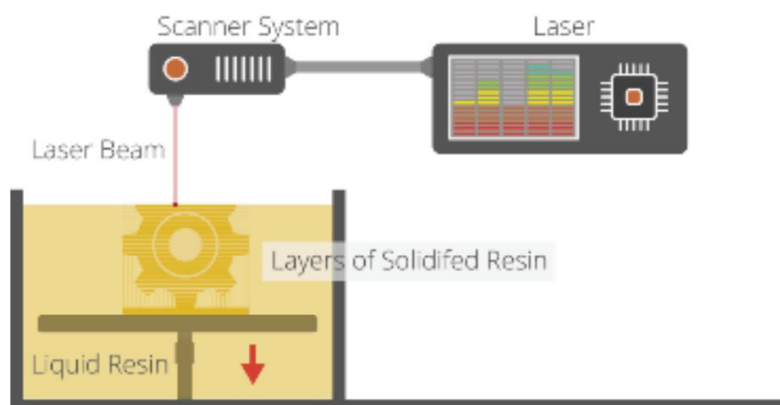


ภาพที่ 2.14 แสดงกลไกและองค์ประกอบของเครื่องพิมพ์ 3 มิติแบบการซ้อนแผ่นวัสดุ [46]

2.4.2.3. การพิมพ์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต (SLA : Stereolithography)

การพิมพ์แบบ Stereolithography (SLA) เป็นเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุที่อาศัยปฏิกิริยาโฟโตพอลิเมอไรเซชัน (photopolymerization) ในการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ฉายลงบนผิวของเรซินชนิดไวแสง (photosensitive resin) เพื่อกระตุ้นให้เกิดการแข็งตัวของเรซินในบริเวณที่สัมผัสกับแสง [41] โดยกระบวนการจะดำเนินไปทีละชั้นอย่างต่อเนื่องจนได้เป็นชิ้นงานสามมิติสมบูรณ์ตามแบบจำลองที่กำหนดไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2.15

เทคโนโลยี SLA เหมาะสำหรับการขึ้นรูปด้วยวัสดุประเภทเรซิน โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความละเอียดของชิ้นงานสูงและผิวที่เรียบเนียน ชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการนี้มักมีความแม่นยำและความซับซ้อนของรายละเอียดที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีอื่น เช่น FDM อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของ SLA อยู่ที่ชนิดของวัสดุที่ใช้ได้จำกัดอยู่เฉพาะเรซินที่ตอบสนองต่อแสง UV เท่านั้น และวัสดุดังกล่าวอาจมีความเปราะหรือไม่ทนต่อสภาวะแวดล้อมบางประเภท



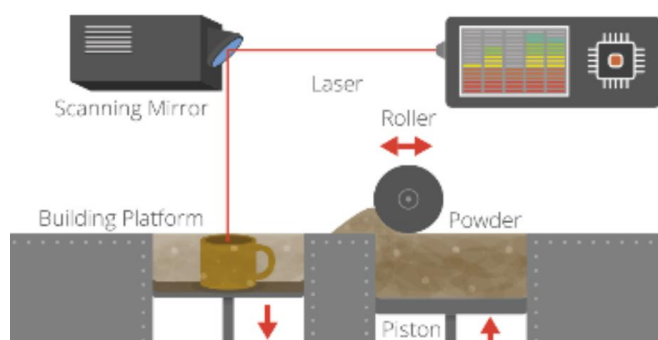
ภาพที่ 2.15 การพิมพ์สามมิติด้วยแสงยูวี [46]

2.4.2.4. การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ (SLS : Selective Laser Sintering)

การพิมพ์แบบ Selective Laser Sintering (SLS) เป็นเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing) ที่ใช้เลเซอร์กำลังสูงในการหลอมละลายวัสดุผงเฉพาะบริเวณที่ต้องการ บนพื้นผิววัสดุที่ถูกกระจายเป็นชั้นบาง ๆ โดยลำแสงเลเซอร์จะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ตามแบบจำลองสามมิติ เพื่อให้วัสดุผงเกิดการหลอมรวมกันเฉพาะจุด และยึดติดกันเป็นชั้นต่อเนื่องจนกระทั่งได้ชิ้นงานสามมิติสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.16

เทคโนโลยี SLS สามารถใช้งานได้กับวัสดุหลากหลายประเภท เช่น พงโลหะ พงแก้ว พงเซรามิก รวมถึงวัสดุพอลิเมอร์บางชนิด โดยชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแรงทางกลสูง มีความทนทานต่ออุณหภูมิและแรงกระทำภายนอก อีกทั้งยังสามารถสร้างชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนได้โดยไม่ต้องใช้โครงสร้างรองรับ (support structure) เนื่องจากผงวัสดุที่ไม่ได้ถูกหลอมสามารถทำหน้าที่รองรับชิ้นงานระหว่างการพิมพ์ได้

ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว เทคโนโลยี SLS จึงเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงและความแม่นยำสูง เช่น ชิ้นส่วนทางวิศวกรรม ยานยนต์ การแพทย์ และการบินอวกาศ [41]



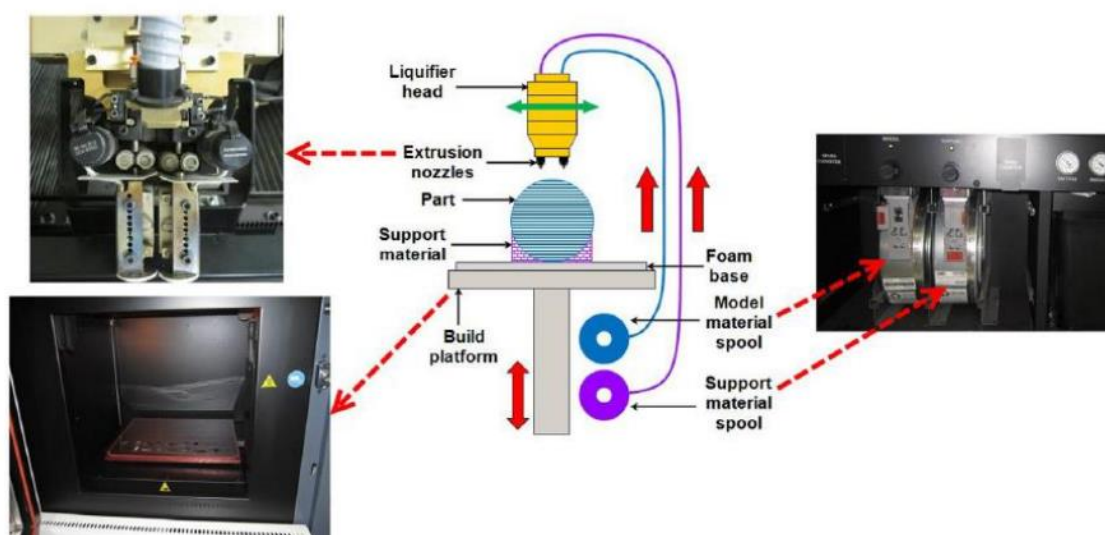
ภาพที่ 2.16 การพิมพ์ด้วยแสงเลเซอร์ [46]

2.4.3 แนวทางการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D Printing) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานออกแบบและพัฒนาชิ้นงานต้นแบบ โดยเฉพาะเทคโนโลยีการพิมพ์แบบหัวฉีด หรือ Fused Deposition Modeling (FDM) ซึ่งเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing) ที่ใช้งานง่าย ต้นทุนต่ำ และสามารถใช้ร่วมกับวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกได้หลากหลายชนิด

กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคโนโลยี FDM เริ่มต้นจากการออกแบบแบบจำลองสามมิติของชิ้นงานในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-Aided Design: CAD) เมื่อได้ไฟล์แบบจำลองสามมิติแล้ว จะนำเข้าสู่โปรแกรมเตรียมการผลิต (Computer-Aided Manufacturing: CAM) เพื่อกำหนดพารามิเตอร์การพิมพ์ เช่น ความเร็วในการพิมพ์ อุณหภูมิหัวฉีด ความหนาของชั้นพิมพ์ และรูปแบบการวางแนวชั้น (infill pattern) เป็นต้น

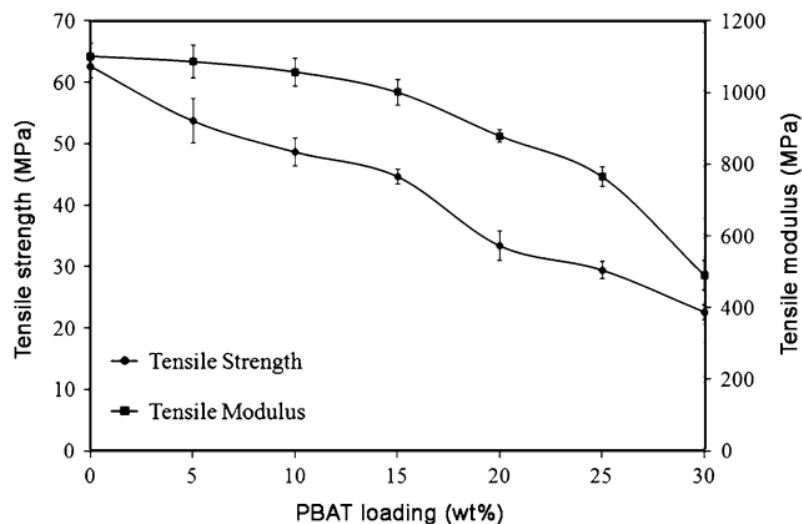
เมื่อกำหนดค่าการพิมพ์เรียบร้อยแล้ว โปรแกรมจะส่งคำสั่งไปยังเครื่องพิมพ์สามมิติ เพื่อเริ่มกระบวนการผลิต โดยเครื่องจะหลอมเส้นฟิลาเมนต์ที่ป้อนเข้าสู่หัวฉีดด้วยความร้อน และฉีดลงบนแท่นพิมพ์ทีละชั้นในลักษณะกึ่งหลอมเหลว พลาสติกจะเย็นตัวและแข็งตัวต่อเนื่องในแต่ละชั้น ขณะที่หัวฉีดสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในแนวแกน X, Y และ Z เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานตามแบบจำลองอย่างแม่นยำ กระบวนการจะดำเนินต่อเนื่องจนได้ชิ้นงานต้นแบบครบถ้วนตามที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2.17



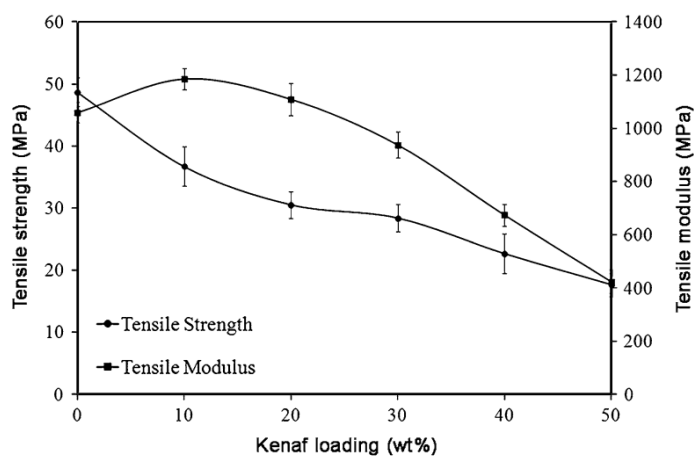
ภาพที่ 2.17 แสดงการพิมพ์แบบหัวฉีด [46]

2.5 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

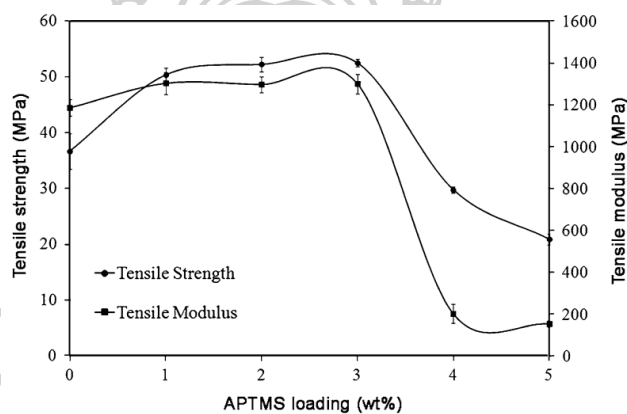
จากงานวิจัยของ Anith Liyana Mohd Sis และคณะ [19] เรื่อง Effect of (3-aminopropyl) trimethoxysilane on mechanical properties of PLA/PBAT blend reinforced kenaf fiber ได้ทำการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้าด้วยกัน ได้แก่ PBAT กับ PLA โดยเริ่มทำการเติม PBAT ลงไปใน PLA ในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0-50 ของน้ำหนักจากผลการทดสอบค่า tensile strength และ tensile modulus พบว่าที่ปริมาณ PLA ร้อยละ 10 ของน้ำหนักจะทำให้พอลิเมอร์ผสมนั้นมีค่า tensile strength และ tensile modulus ที่สูงที่สุด ดังภาพที่ 2.18 จากนั้นนำอัตราส่วนดังกล่าวไปทำการเติมเส้นใยปอแก้วลงไปในปริมาณร้อยละ 0-50 ของน้ำหนัก ซึ่งจากการทดสอบ tensile strength และ tensile modulus ได้ผลการทดสอบว่าที่ปริมาณการเติมเส้นใยร้อยละ 10 ของน้ำหนัก จะทำให้วัสดุคอมพอสิตนั้นมีค่า tensile strength และ tensile modulus ที่สูงที่สุดดังภาพที่ 2.19 หลังจากนั้น ได้ทำการเติม APTMS ลงไปในวัสดุคอมพอสิตที่เติมเส้นใยร้อยละ 10 ของน้ำหนัก ในปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0-5 ของน้ำหนัก จากผลการทดสอบ tensile strength และ tensile modulus พบว่าที่ปริมาณการเติม APTMS ความเข้มข้นร้อยละ 2 ของน้ำหนัก จะทำให้ได้ค่า tensile strength และ tensile modulus ที่สูงที่สุด ดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.18 แสดงผลของการเติม PBAT ต่อสมบัติความต้านทานการดึงของ PLA/PBAT [19]



ภาพที่ 2.19 แสดงอิทธิพลของการเติมเส้นใยที่ส่งผลต่อสมบัติ tensile ของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT [19]



ภาพที่ 2.20 แสดงอิทธิพลของการเติม APTMS ที่ส่งผลต่อสมบัติ tensile ของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT [19]

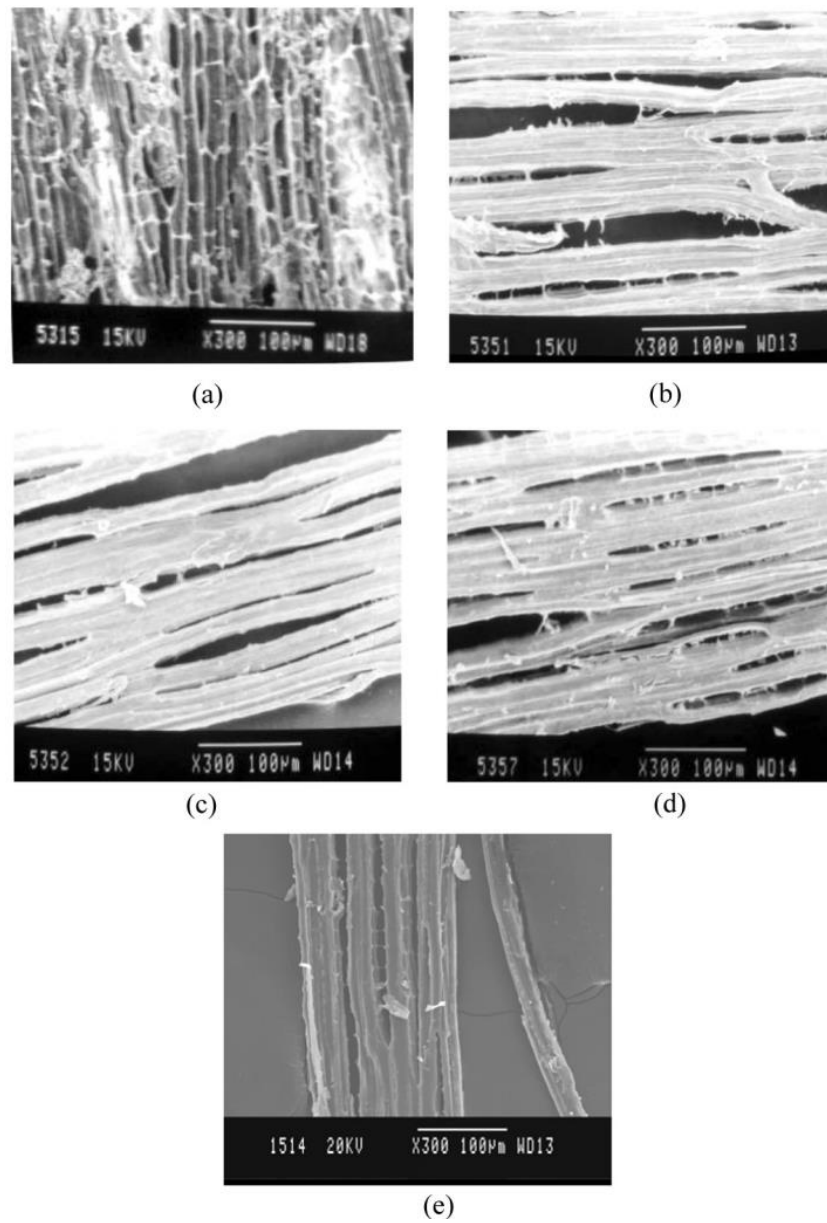
ในงานวิจัยของ Shamsuri และคณะ [30] เรื่อง A Short Review on the Effect of Surfactants on the Mechano-Thermal Properties of Polymer Nanocomposites ได้ทำการศึกษาผลของการใช้สารลดแรงตึงผิว triton x-100 กับเส้นใย CNTs โดยผสมกับ PBO จากนั้นนำคอมพอสิตที่ได้ทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน ได้ผลการทดสอบว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารลดแรงตึงผิวนั้นสามารถเพิ่มสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่า flexural strength, flexural modulus และ impact strength ของคอมพอสิตผสมระหว่างเส้นใย CNTs ใน PBO ได้ โดยแสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตที่มีการเติมสารเสริมแรงเป็นสารอินทรีย์ขนาดนาโน โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิด non-ionic [30]

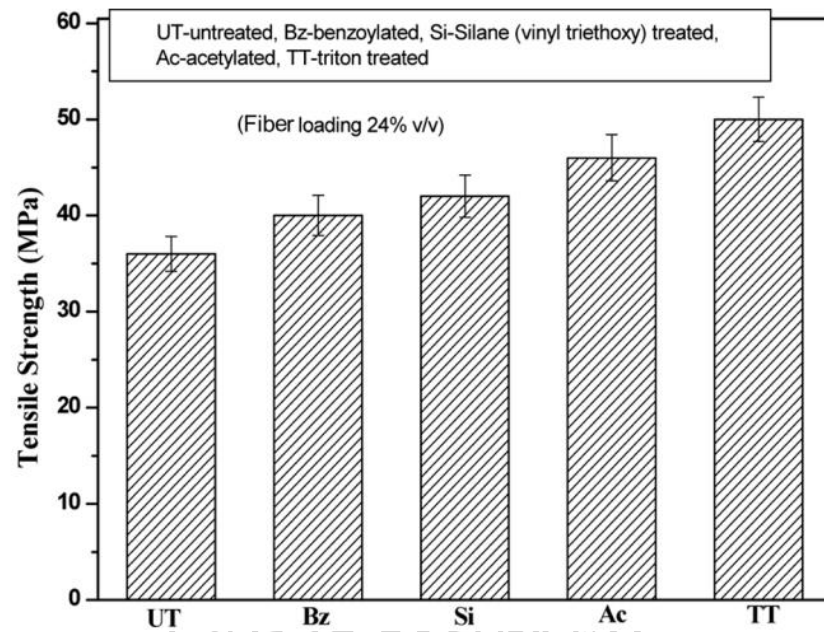
Non-ionic Surfactant	Nanofiller	Polymer Matrix	Mechanico-Thermal Properties *										References
			TS	TM	EB	FS	FM	IS	T _d	T _g	T _m	T _c	
Pluronic	CNWs	DGEBA	↑	↑	↑	-	-	-	↓	↓	-	-	[7]
PEGMONO	CNCs	PLA	↓	-	↓	-	-	-	↑	-	-	-	[14,16]
Triton X-100	CNTs	PBO	-	-	-	↑	↑	↑	-	↑	↑	-	[10]
AK8805	CNFs	DGEBA	↑	↑	-	-	-	↑	↑	↑	-	-	[5]
Triton X-100	G NPs	SR	↑	↑	↑	-	-	-	↑	-	↓	↓	[11]
Ultrac PE 105	NCFs	PBAT	↑	↑	-	-	-	-	↓	-	-	-	[19]

TS = tensile strength, TM = tensile modulus, EB = elongation at break, FS = flexural strength, FM = flexural modulus, IS = impact strength, T_d = degradation temperature, T_g = glass transition temperature, T_m = melting temperature, and T_c = crystallization temperature. * The symbol \uparrow corresponds to an increase in the properties

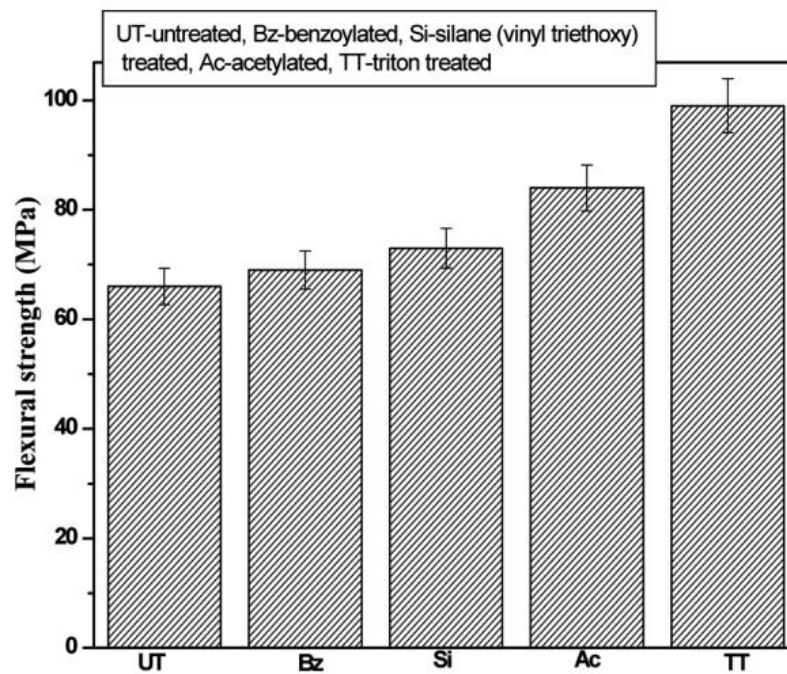
จากงานวิจัยของ Joshy และคณะ [17] เรื่อง Influence of Fiber Surface Modification on the Mechanical Performance of Isora-Polyester Composites ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเส้นใยเซลลูโลสจาก Isora เพื่อใช้เป็นสารเสริมแรงกับพอลิเอสเตอร์ โดยใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลน APTES แล้วจึงนำไปผสมกับพอลิเอสเตอร์ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล จากผลการทดสอบพบว่า การปรับสภาพพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว triton x-100 สามารถทำให้เส้นใยแยกออกจากกันได้โดยศึกษาจากภาพ SEM ในขณะที่สมบัติเชิงกลของวัสดุพบว่าค่า tensile strength และค่า flexural modulus เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ใช้เส้นใย Isora ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว แสดงผลการทดสอบดังภาพที่ 2.21 – 2.23



ภาพที่ 2.21 แสดงภาพ SEM ของเส้นใย isora ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารเคมีต่าง ๆ โดยภาพที่ (a) เป็นเส้นใยที่ไม่ผ่านการปรับปรุง และ (e) เป็นการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยสารลดแรงตึงผิว [17]

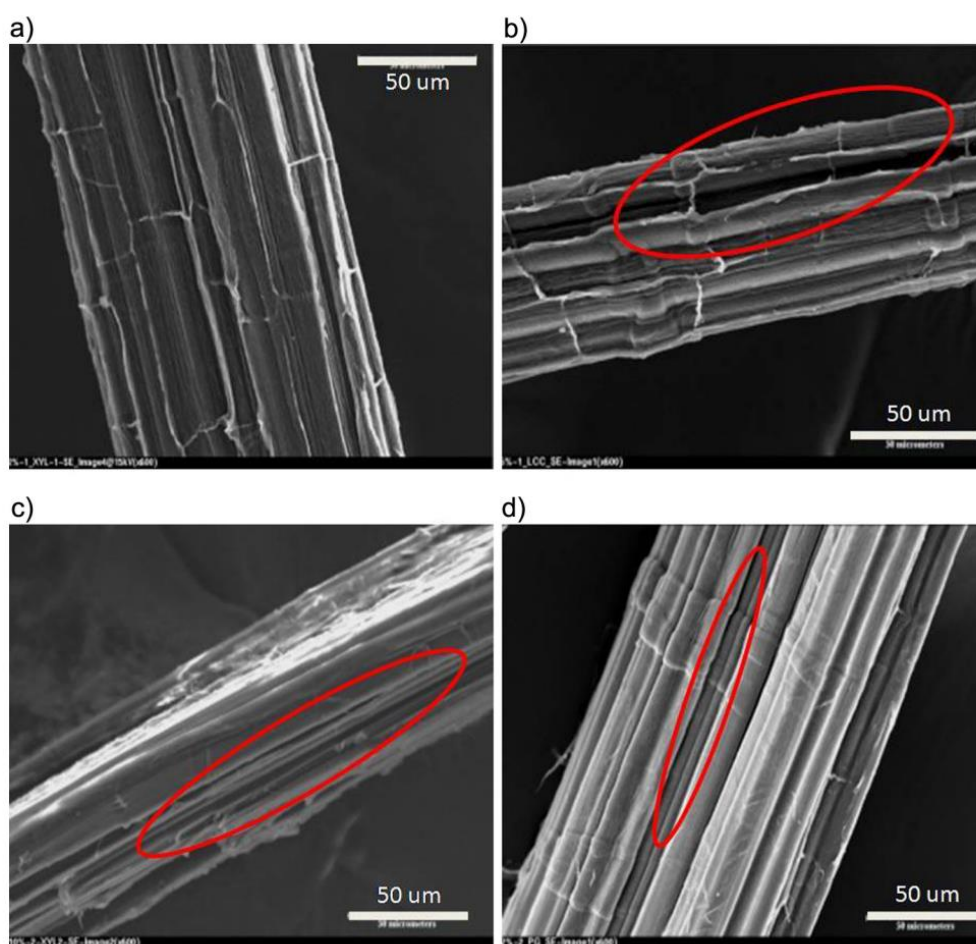


ภาพที่ 2.22 แสดงผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคมีที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิต polyester/isora [17]



ภาพที่ 2.23 แสดงผลของการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคมีที่แตกต่างกันที่ส่งผลต่อค่า flexural strength ของวัสดุคอมพอสิต polyester/isora [17]

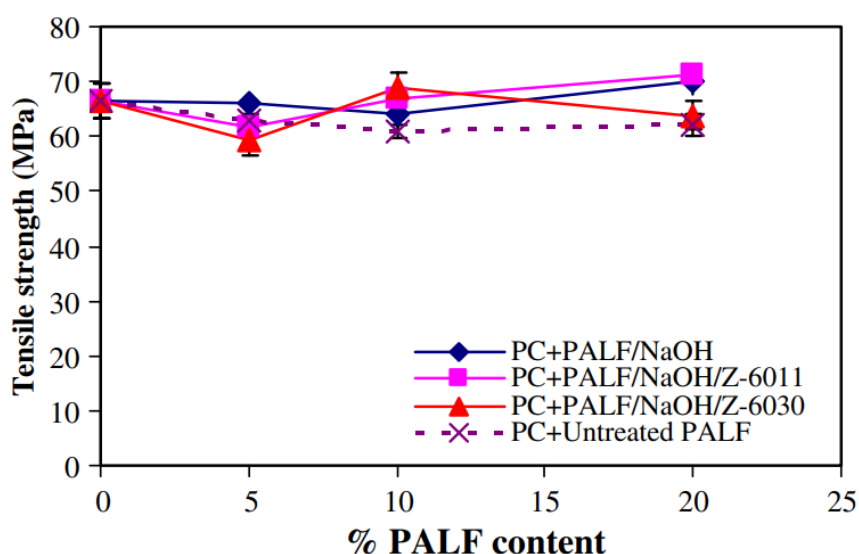
จากงานวิจัยของ Michael George และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวด้วย เอนไซม์เพื่อกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสภายในเส้นใย 2 ชนิด ได้แก่เส้นใยกล้วย และป่าน เพื่อเพิ่มความขรุขระให้กับเส้นใยซึ่งทำให้สามารถเกิดการยึดเกาะติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดีขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้มีการศึกษาถึงผลของการใช้เอนไซม์ cellulase ร่วมกับ xylanase พบว่าการใช้เอนไซม์ในการปรับปรุงพื้นผิว สามารถเพิ่มความขรุขระให้กับเส้นใยได้ ดังแสดงภาพในที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 แสดงการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยกล้วยด้วยกระบวนการต่าง ๆ (a) เส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (c) เส้นใยกล้วยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอนไซม์ xylanase+cellulase [8]

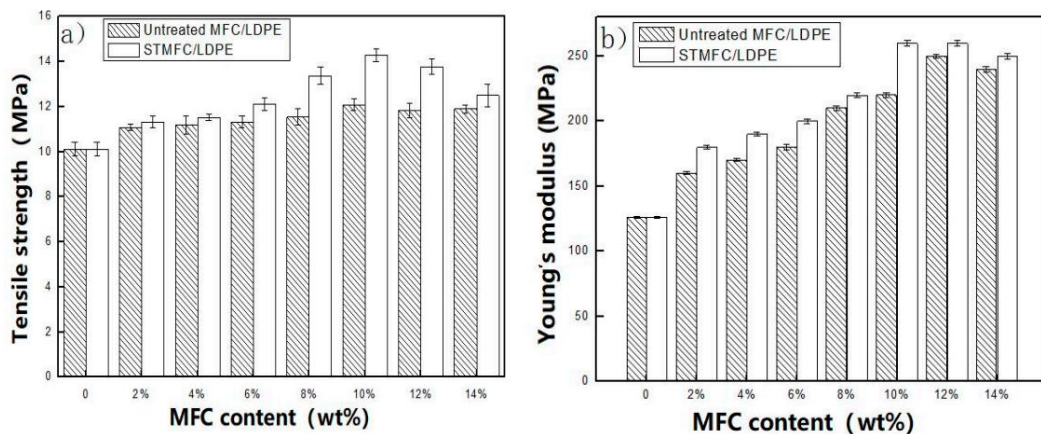
จากงานวิจัยของ P.Threepopnatkul , N.Kaerkitcha และ N.Athipongarporn [34] เรื่อง Effect of surface treatment on performance of pineapple leaf fiber–polycarbonate composites ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้ไฮดรอกซิล 2 ชนิด ได้แก่ γ -(aminopropyl) trimethoxy silane (Z-6011) และ γ -methacrylate propyl trimethoxy silane (Z-6030) โดย

นำไปปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ พบว่าในวัสดุคอมพอสิต PC เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจะทำให้ได้ค่า tensile strength เพิ่มขึ้น และที่ปริมาณเส้นใยร้อยละ 20 ของน้ำหนัก พบว่าเส้นใยโพลีเอสเตอร์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย γ -(aminopropyl) trimethoxy silane จะทำให้มีค่า tensile strength สูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโพลีเอสเตอร์ที่ยังไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว ดังภาพที่ 2.25



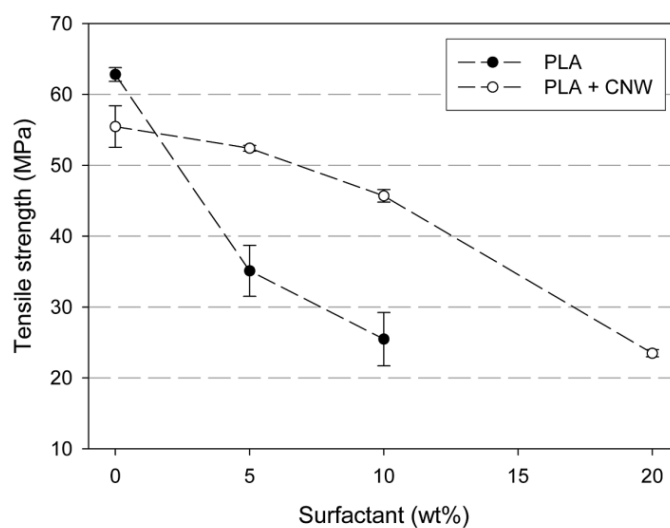
ภาพที่ 2.25 แสดงการเปรียบเทียบค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิต PC/เส้นใยโพลีเอสเตอร์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเคมีต่างชนิดกัน [34]

จากงานวิจัยของ Guangzhao Wang , Xiaohui Yang และ Weihong Wang เรื่อง Reinforcing Linear Low-Density Polyethylene with Surfactant-Treated Microfibrillated Cellulose [37] ได้ทำการผสมสารลดแรงผิว 2 ชนิด ได้แก่ span80 กับ tween80 ในอัตรา 1:1 จากนั้นทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไมโครไฟบริลเลตเซลลูโลส (Microfibrillated Cellulose: MFC) ด้วยสารลดแรงตึงผิวดังกล่าว เพื่อนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในฟิล์ม LLDPE โดยผลการทดสอบสมบัติทางกลพบว่า วัสดุคอมพอสิตที่ใช้ MFC ซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้วให้ค่าความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และโมดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) สูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่ใช้ MFC โดยไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ MFC จะทำให้ค่า tensile strength และ tensile modulus มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และจะมีค่าที่สูงสุดเมื่อใช้ MFC ในปริมาณร้อยละ 10 ของน้ำหนัก ดังแสดงผลการทดสอบในภาพที่ 2.26



ภาพที่ 2.26 แสดงสมบัติเชิงกลของการปรับปรุงพื้นผิว MFC ด้วยสารลดแรงตึงผิวเทียบกับระบบที่ไม่ได้ปรับปรุง a) tensile strength และ b) Young's modulus ในวัสดุคอมพอสิต LLDPE [37]

จากงานวิจัยของ Daniel Bondeson a & Kristiina Oksman [4] เรื่อง Dispersion and characteristics of surfactant modified cellulose whiskers nanocomposites ที่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงพื้นผิวของ CNW (cellulose nanowhiskers) โดยใช้สารลดแรงตึงผิวประเภท anionic ในปริมาณน้อยละ 0-20 เพื่อนำไปเสริมแรงใน PLA และจากผลการทดสอบพบว่าที่ปริมาณสารลดแรงตึงผิวร้อยละ 5 เมื่อเทียบกับเส้นใยจะทำให้ CNW มีการกระจายตัวดีที่สุด ส่งผลให้มีค่า tensile strength ของวัสดุคอมพอสิต PLA สูงที่สุดอีกด้วย และพบว่าหากเพิ่มปริมาณสารลดแรงตึงผิว ค่า tensile strength จะลดลงเรื่อย ๆ ดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 แสดงค่า tensile strength ที่ปริมาณการเติมสารลดแรงตึงผิวต่างกัน ในวัสดุคอมพอสิต PLA/nanocomposite [4]

จากงานวิจัยของณัฐวัฒน์ กาญจนวสิกุล และคณะ [42] เรื่อง อิทธิพลของสารเชื่อมประสานไฮเลนที่มีผลต่อสมบัติความคงทนต่อสภาพอากาศของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้เพื่อใช้เป็นวัสดุตกแต่งอาหาร ซึ่งได้ทำการปรับปรุงผงไม้แดงด้วยสารประสานไฮเลน 3-aminopropyl trimethoxysilane (APTMS) ในอัตราส่วนต่าง ๆ และจากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการโค้งงอนั้นพบว่าที่ปริมาณของไฮเลนร้อยละ 5 เมื่อเทียบกับน้ำหนักเส้นใย นั้นจะทำให้วัสดุคอมพอสิตมีค่า Young's modulus และ tensile stress at break สูงที่สุด เมื่อเทียบกับปริมาณร้อยละ 0 , 2 และ 10 ตามลำดับ แต่จะมีค่า %Elongation และค่า %flexural strain มีค่าน้อยกว่าในวัสดุคอมพอสิตที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยด้วยไฮเลน เป็นผลมาจากการที่ผงไม้ที่เติมนั้นมีอนุภาคทรงกลม ทำให้เกิดการขัดขวางการดึงยึดของชิ้นงาน

จากงานวิจัยของ Mathew และคณะ [21] เรื่อง Development of poly (butylene adipate-co-terephthalate) PBAT toughened poly (lactic acid) blends 3D printing filament ได้ทำการพัฒนาเส้นใยฟิลาเมนต์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ โดยใช้ PLA ผสมกับ PBAT ซึ่งศึกษาอัตราส่วน PBAT ในการผสมที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติการไหล สมบัติทางความร้อน แล้วนำไปทดลองการพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ พบว่าการเติม PBAT ลงไปจะทำให้ค่าดัชนีการไหล (MFI) ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่สมบัติความต้านทานต่อการดึงมีค่าลดลงเล็กน้อย นอกจากนั้นยังได้นำเส้นฟิลาเมนต์ที่ได้ไปทดลองพิมพ์ 3 มิติด้วยการพิมพ์แบบ FDM พบว่าการเติม PBAT นั้นทำให้เส้นฟิลาเมนต์ทนต่อการแตกหักขณะพิมพ์ได้มากขึ้น นอกจากนั้นยังสามารถลดปัญหาการเกิด nozzle clogging และสามารถทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างเลเยอร์ได้ดีมากขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1. พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เกรด Ingeo biopolymer 4043D ผลิตโดยบริษัท NaturalWorks ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2. พอลิবিวทีลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) เกรด EcoflexMulch C1200 จัดซื้อจากบริษัท ยูนิค เทคโนโลยี (ไทยแลนด์) จำกัด

3.1.3. เส้นใยใบสับปะรด จัดซื้อจากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตเส้นใยธรรมชาติบ้านคา อำเภอบ้านคา จ.ราชบุรี

3.1.4. เส้นใยกัญชง จัดซื้อจากผู้จำหน่ายออนไลน์ผ่านเพจทางเฟสบุ๊กชื่อว่า “ขายเส้นใยกัญชง สินค้ากัญชง Hemp” ซึ่งจัดซื้อในช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2565

3.1.5. เส้นใยมะพร้าว จัดซื้อจากฟาร์ม ทำฟาร์มดี คาเฟ่ แอน ฟาร์ม ซึ่งตั้งอยู่ที่ตำบลห้วยกะปิ อำเภอมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี

3.1.6. สารเชื่อมประสานไฮเลน 3-aminopropyl trimethoxysilane (APTMS) ความบริสุทธิ์ร้อยละ 97 ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.7. สารละลายบัฟเฟอร์

- โซเดียมซิเตรตไดไฮเดรต (Sodium Citrate Dihydrate) เกรด FG มวลโมเลกุล 294.10 g/mol ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

- กรดซิตริก (Citric Acid) มวลโมเลกุล 192.12 g/mol ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.8. สารลดแรงตึงผิว triton x-100 เกรด laboratory ผลิตโดยบริษัท Merck KGaA ประเทศเยอรมัน

3.1.9. เอนไซม์เซลลูเลส จาก *Aspergillus sp.* ผลิตโดยบริษัท Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2. เครื่องมือที่ใช้ในการผสมและขึ้นรูปชิ้นงาน

3.2.1. เครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดเกลียวทวนคู่ (Twin screw extruder) รุ่น SHJ-25 จากบริษัท Yougteng ผลิตจากประเทศจีน

3.2.2. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection molding machine) รุ่น PS40E5ASE ผลิตจากบริษัท NISSEI PLASTIC INDUSTRIAL CO.,LTD. ประเทศญี่ปุ่น

3.2.3. เครื่องพิมพ์ 3 มิติ จากบริษัท ANYCUBIC รุ่น MEGA-S

3.3. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1. เครื่อง Fourier-transform infrared spectrometer (FT-IR) รุ่น VERTEX70 ผลิตโดยบริษัท BRUKER ประเทศเยอรมัน

3.3.2. เครื่อง Melt flow indexer (MFI) รุ่น MI2 ผลิตจากบริษัท GÖTTFERT ประเทศเยอรมัน

3.3.3 เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) รุ่น DSC 1 Auto sample Robot ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.4. เครื่อง Thermogravimetric analysis (TGA) รุ่น TGA/DSC 1 Auto sample Robot ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.5. เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) รุ่น 5969 ผลิตโดยบริษัท Instron Engineering ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.6. เครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบลูกตุ้ม (Pendulum impact testing machine) รุ่น 9050 ผลิตโดยบริษัท Instron Engineering ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ยี่ห้อ Tescan รุ่น Mira3 จาก Czech Republic

3.3.8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) รุ่น Tabletop Microscope TM30303 จากบริษัท Hitachi-High-Technologies ประเทศญี่ปุ่น

3.3.9 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์

3.3.10 ตู้อบสูญญากาศ (vacuum oven)

3.3.11 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า (shaking water bath)

3.4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1. การผสม และการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

ในการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT ที่มีการเติมเส้นใยธรรมชาติเป็นสารเสริมแรง จำเป็นต้องศึกษาอัตราส่วนการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBAT เสียก่อน เพื่อพิจารณาถึงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนการเติม PBAT ปริมาณตั้งแต่ร้อยละ 0-100 ของน้ำหนัก ดังแสดงสูตรการผสมในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนการผสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBAT ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย

สูตรผสม	PLA (%wt)	PBAT (%wt)
100PLA	100	0
90PLA/10PBAT	90	10
80PLA/20PBAT	80	20
70PLA/30PBAT	70	30
60PLA/40PBAT	60	40
50PLA/50PBAT	50	50
40PLA/60PBAT	40	60
30PLA/70PBAT	30	70
20PLA/80PBAT	20	80
10PLA/90PBAT	10	90
100PBAT	0	100

ในการผสมพอลิเมอร์ผสมนั้นทำการนำเม็ดพลาสติก PLA และ PBAT ไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดเกลียวทวนคู่ (Twin screw extruder) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปตั้งแต่บริเวณส่วนป้อนเม็ดไปถึงหัวตายคือ 110, 120, 130, 150, 160, 170, 180, 180 องศาเซลเซียสและตั้งความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ประมาณ 40 รอบต่อนาที ทำการดึงเส้น extrudate ที่ได้ผ่านน้ำเพื่อเป็นการหล่อเย็น หลังจากนั้นจะทำการนำเส้น extrudate เข้าเครื่องตัดเม็ดพลาสติก และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

หลังจากนั้นจะนำเม็ดพลาสติกที่ผ่านอบแล้วไปทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC) ซึ่งใช้อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส ควบคุมอัตราการให้และคายพลังงานความร้อนที่ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน และศึกษาในโหมด heat-cool-heat เพื่อศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปก่อนหน้านี้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความร้อนนั้นสามารถนำไปพิจารณาถึงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

3.4.2. การเตรียม การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ และการพิสูจน์เอกลักษณ์เส้นใยธรรมชาติ ด้วยเทคนิค Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR)

3.4.2.1. การเตรียมเส้นใยธรรมชาติด้วยการต้มในหม้ออัดแรงดัน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของชนิดเส้นใยธรรมชาติที่ใช้เป็นสารเสริมแรง 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยใบสับปะรด (PALF) เส้นใยกัญชง (hemp) และเส้นใยมะพร้าว (coir) โดยได้นำเส้นใยทั้ง 3 ชนิดมาตัดให้มีมีความยาวประมาณ 0.50 ถึง 1.00 เซนติเมตร แล้วจึงนำไปต้มภายในหม้ออัดแรงดัน เป็นเวลา 1, 2 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อหาเวลาที่ใช้ในการต้มที่เหมาะสมสำหรับเส้นใยทั้ง 3 ชนิด เพื่อให้เส้นใยเกิดการแยกออกจากกันได้มากที่สุด จากนั้นนำเส้นใยที่ผ่านการต้มที่เวลาต่าง ๆ ไปทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ซึ่งใช้อุณหภูมิในการศึกษาตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยให้ความร้อนในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที และนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM

3.4.2.2. การศึกษาการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ

3.4.2.2.1. การปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารลดแรงตึงผิว

การเตรียมสารละลายสารลดแรงตึงผิว triton X-100 นั้นเตรียมจากละลายสารลดแรงตึงผิว triton X-100 ในน้ำกลั่นตามวิธีที่ใช้ในงานวิจัยของ Joshy และคณะ [17] โดยใช้ปริมาณสารลดแรงตึงผิวร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเส้นใยธรรมชาติ เมื่อละลายจนหมดนำเส้นใยธรรมชาติไปจุ่มแช่เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงนำออกมาล้างด้วยน้ำกลั่นอีกรอบเพื่อกำจัดสารลดแรงตึงผิวที่ตกค้าง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.4.2.2.2. การปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยการใช้เอนไซม์เซลลูเลส

ทำการเตรียมสารละลายเอนไซม์โดยการเติมเอนไซม์เซลลูเลสปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเส้นใยลงในสารละลายซิเตรตบัฟเฟอร์ (citrate buffer) ค่า pH 3.0-6.2 [36] ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ซึ่งเตรียมจากการนำโซเดียมซิเตรตไดไฮเดรตปริมาณ 12.135 กรัม ละลายในน้ำ DI ปริมาณ 400 mL จากนั้นเติมกรดซิตริกปริมาณ 1.679 กรัม จากนั้นปรับค่า pH ของสารละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก แล้วปรับปริมาตรจนเป็น 500 mL ด้วยน้ำ DI จากนั้นนำเส้นใยลงไปจุ่มแช่ให้ท่วมเส้นใยแล้วนำไปให้ความร้อนผ่านอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.2.2.3. การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยสารเชื่อมประสานไฮเลน APTMS

เตรียมสารละลายระหว่างเอทานอลและน้ำกลั่นในอัตราส่วน 80/20 โดยปริมาตร แล้วกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดกระบวนการ hydrolysis จากนั้นทำการเติม APTMS ลงไปร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของเส้นใยธรรมชาติ ทำการปรับค่า pH ของสารละลายด้วยกรดอะซิติก (acetic acid) จนมีค่าประมาณ 4-5 แล้วทำการกวนต่อเนื่องอีก 2 ชั่วโมง [9] จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปปั่นให้ทั่วเส้นใย แล้วนำเส้นใยที่ได้ไปทำการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางของสารเชื่อมประสานไฮเลนกับเส้นใยธรรมชาติ

3.4.3. การพิสูจน์เอกลักษณ์เส้นใยธรรมชาติหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิค Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR)

นำเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 มาทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR) เพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลงทางของหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเส้นใยที่เกิดหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการ 3 กระบวนการ ได้แก่ การใช้สารลดแรงตึงผิว triton X-100 ร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไฮเลน APTMS, การใช้สารเอนไซม์เซลลูเลสร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไฮเลน APTMS และการใช้สารเชื่อมประสานไฮเลน APTMS เพียงอย่างเดียว โดยทำการนำเส้นใยที่ต้องการศึกษามาตัดให้มีขนาดเล็กมากแล้วจึงไปผสมกับ KBr ในอัตราส่วน 1:9 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปอัดเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิก แล้วจึงนำไปทดสอบในโหมด TR-FTIR

3.4.4. การผสม และการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

การขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตชีวภาพนั้นทำโดยการเลือกอัตราส่วนของ PLA/PBAT จากตอน 3.4.1 มาผสมกับเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใยโอบัสปะรด(PALF) เส้นใยกัญชง(hemp) และเส้นใยมะพร้าว(coir) ในปริมาณ 5 c (phr) ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการต่าง ๆ โดยสูตรการผสมแสดงดังตารางที่ 3.2 ซึ่งในการขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ จะใช้เครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดเกลียวพนอนคู่ (twin screw extruder) ซึ่งตั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปตั้งแต่บริเวณส่วนป้อนเม็ดไปถึงหัวตาย คือ 110, 120, 130, 150, 160, 170, 180 และ 180 องศาเซลเซียส ควบคุมความเร็วรอบในการหมุนของสกรูที่ประมาณ 40 รอบต่อนาที จากนั้นลำเลียงเส้น extrudate ที่ได้ผ่านน้ำเพื่อเป็นการหล่อเย็น นำเข้าเครื่องตัดเม็ดพลาสติกเป็นลำดับต่อไป จากนั้นนำเม็ดพลาสติกที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น

ตารางที่ 3.2 แสดงสูตรของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการต่าง ๆ

พอลิเมอร์	ชนิดเส้นใยธรรมชาติ	กระบวนการปรับปรุงเส้นใยธรรมชาติ	ชื่อสูตรการผสม
PLA	-	-	PLA
PLA/PBAT	-	-	PLA/PBAT
PLA/PBAT	PALF	Silane (APTMS)	PS
		Surfactant+Silane (APTMS)	PSS
		Enzyme+Silane (APTMS)	PES
PLA/PBAT	hemp	Silane (APTMS)	HS
		Surfactant+Silane (APTMS)	HSS
		Enzyme+Silane (APTMS)	HES
PLA/PBAT	coir	Silane (APTMS)	CS
		Surfactant+Silane (APTMS)	CSS
		Enzyme+Silane (APTMS)	CES

ในการศึกษาดัชนีการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer (MFI) ซึ่งทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยจะทดสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และใช้น้ำหนักลูกตุ้ม 2.16 กิโลกรัม หลังจากนั้นทำการคำนวณค่าออกในหน่วย กรัม/10นาที (g/10min)

กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลดำเนินการโดยใช้เครื่องฉีดพลาสติก (Injection Molding Machine) โดยควบคุมอุณหภูมิของกระบอกฉีด (Barrel) 4 โซน ได้แก่ 170, 160, 160 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพื่อให้เหมาะสมกับการหลอมและการไหลของวัสดุคอมพอสิตระหว่างกระบวนการขึ้นรูป

การฉีดวัสดุเข้าสู่แม่พิมพ์ดำเนินการภายใต้ความดันระหว่าง 98–105 บาร์ โดยตั้งค่าอัตราการไหล (Flux) ให้อยู่ในช่วง 50–52% ตำแหน่งของสกรู (Screw Position) ขณะทำการฉีดจะเปลี่ยนแปลงจาก 55.00 มิลลิเมตรในระยะแรก ลดลงเหลือ 25.00 มิลลิเมตรในระยะสุดท้าย โดยมีระยะเวลาในการฉีดทั้งหมดเท่ากับ 2.30 วินาที

การขึ้นรูปดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตชิ้นงานในรูปแบบมาตรฐาน ได้แก่ ชิ้นงานประเภท dog bone และชิ้นงานรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM

D638 และ ASTM D790 ตามลำดับ โดยครอบคลุมการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึง (Tensile Strength), ความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural Strength) และความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบผลของการเติมเส้นใยธรรมชาติและการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมพอสิต

3.4.5. การทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอสิต และการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพPLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

3.4.5.1. การทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

ศึกษาดัชนีการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer (MFI) โดยนำเม็ดพลาสติกที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่อง twin screw extruder ที่ผ่านการอบมาแห้ง มาทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยจะทดสอบที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และใช้น้ำหนักลูกตุ้ม 2.16 กิโลกรัม หลังจากนั้นทำการคำนวณค่าออกมาให้อยู่ในหน่วยกรัม/10นาที เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประเมินความเหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเป็นเส้นฟิลาเมนต์เพื่อใช้ในงานพิมพ์ 3 มิติ

3.4.5.2. การทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพPLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการดึง (Tensile test) ทำการศึกษาตามมาตรฐาน ASTM D638 ซึ่งในการทดสอบนั้นจะใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน และใช้อัตราในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที ภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่า tensile strength, %Elongation และค่า tensile modulus

การศึกษาสมบัติความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural test) จะศึกษาตามมาตรฐาน ASTM D790 ทำการทดสอบภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยมีการให้แรงในโหมดดัดงอ 3 จุด (Three point bending mode) โดยใช้ระยะของ support span เท่ากับ 56 มิลลิเมตร ซึ่งโหลดเซลล์ที่ใช้จะมีขนาด 50 กิโลนิวตัน จากนั้นทำการกดลงมาด้วยอัตรา 1.49 50 มิลลิเมตรต่อนาที ทำการกดจนกระทั่งชิ้นงานเกิดการโค้งงอไปร้อยละ 5 แล้วหยุดการทดสอบ ทั้งนี้เพื่อหาค่า Flexural strength

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการกระแทก (Impact test) ศึกษาตามมาตรฐาน ASTM D256 (Izod) ซึ่งจะทำการบากชิ้นงานเป็นร่องลักษณะสามเหลี่ยมให้มีความลึกประมาณ 2.54 มิลลิเมตร จากนั้นทำการปล่อยค้อนลงมากระแทก ซึ่งใช้ค้อนที่มีพลังงาน 2.75 จูล เพื่อหาค่า Impact strength

การศึกษาสมบัติทางความร้อนนั้นจะทำการศึกษาด้วยเทคนิค DSC สามารถทำได้โดยการนำเม็ดพลาสติกที่มีน้ำหนักในช่วง 3-5 มิลลิกรัม มาทำการทดสอบในโหมด heat-cool-heat โดยศึกษาที่อุณหภูมิช่วง -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้อัตราเพิ่มและลดอุณหภูมิที่ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วทำการหาปริมาณผลึกตามสมการที่ 3.1 [38]

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

เมื่อ ΔH_m คือ Enthalpy of melting (J/g)

ΔH_m คือ Enthalpy of cold crystallization (J/g)

ω_{PLA} คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของพอลิแลคติกแอซิดในวัสดุ

H_m^0 คือ Enthalpy of melting ของพอลิแลคติกแอซิดที่มีปริมาณผลึกร้อยละ 100 (93 J/g)

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ด้วยเทคนิค thermogravimetric analysis (TGA) ทำได้โดยการนำเม็ดพลาสติกที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 5-7 มิลลิกรัม มาทำการให้ความร้อนตั้งแต่อุณหภูมิ 50-600 องศาเซลเซียส ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เพื่อศึกษาอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัว และปริมาณขี้เถ้าที่เหลือของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ โดยมีสูตรการคำนวณหาปริมาณสารที่สลายตัวในแต่ละขั้น (%weight loss) ดังสมการที่ 3.2

$$\% \text{ weight loss} = \left(\frac{W_i - W_f}{W_i} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ W_i คือ มวลของสารเริ่มต้น (มิลลิกรัม)

W_f คือ มวลของสารที่เหลือ (มิลลิกรัม)

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมพอสิตดำเนินการโดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) โดยนำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงมาเตรียมตัวอย่างด้วยการติดตั้งลงบนฐานตัวอย่างด้วยเทปคาร์บอน (Carbon Tape) เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าได้ดีในระหว่างการวิเคราะห์ จากนั้นทำการเคลือบ

ผิวของบริเวณที่เกิดการฉีกขาดของชิ้นงานด้วยทอง (Gold Coating) โดยใช้วิธีสปัตเตอร์ริง (Sputter Coating) เพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าและลดการสะท้อนของลำอิเล็กตรอนที่ไม่สม่ำเสมอ

การถ่ายภาพ SEM กระทำภายใต้ความต่างศักย์ของลำอิเล็กตรอนที่ 5 กิโลโวลต์ (kV) เพื่อให้สามารถสังเกตลักษณะพื้นผิวของวัสดุได้อย่างชัดเจน โดยมุ่งเน้นการวิเคราะห์บริเวณรอยฉีกขาดเพื่อศึกษาลักษณะการแตกหัก การยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์กับเส้นใยเสริมแรง และพฤติกรรมของการกระจายตัวของเส้นใยภายในโครงสร้างคอมพอสิต

3.4.6. การประเมินความเหมาะสมในการนำวัสดุคอมพอสิตพัฒนาเพื่อใช้เป็นเส้นฟิลาเมนต์

ในการประเมินความเหมาะสมของวัสดุคอมพอสิตเพื่อพัฒนาเป็นเส้นฟิลาเมนต์สำหรับใช้ทดแทนเส้นฟิลาเมนต์ PLA ได้ดำเนินการวิเคราะห์โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการไหล ซึ่งได้จากการทดสอบในขั้นตอนก่อนหน้านี้นอกจากนี้ยังพิจารณาลักษณะทางกายภาพของเส้น extrudate ที่ได้จากระบวนการอัดรีด โดยเฉพาะความเรียบของพื้นผิว ซึ่งมีความสำคัญต่อความสม่ำเสมอในการพิมพ์ 3 มิติ

สูตรวัสดุที่แสดงสมบัติเหมาะสมจะถูกนำไปขึ้นรูปเป็นเส้นฟิลาเมนต์โดยใช้เครื่องอัดรีดพลาสติกแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) โดยควบคุมอุณหภูมิในแต่ละโซนของเครื่องอัดรีดตั้งแต่บริเวณส่วนป้อนเม็ดไปจนถึงหัวดายที่อุณหภูมิ 110, 120, 130, 150, 160, 170, 180 และ 180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความเร็วรอบของสกรูถูกควบคุมที่ประมาณ 40 รอบต่อนาที หลังจากอัดรีดเส้น extrudate ที่ได้จะถูกปล่อยให้เย็นผ่านรางน้ำเพื่อให้เย็นลงและคงรูป

ในขั้นตอนนี้ ได้มีการควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้น extrudate ที่ได้ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 1.75 ± 0.175 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดมาตรฐานของเส้นฟิลาเมนต์ที่ใช้กับเครื่องพิมพ์สามมิติระบบ FDM จากนั้นนำเส้นฟิลาเมนต์ที่ได้ไปใช้ขึ้นรูปชิ้นงานโดยการพิมพ์สามมิติเป็นแผ่นฟิล์มรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด $25 \times 25 \times 1$ มิลลิเมตร เพื่อประเมินความเสถียรของการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะผ่านหัวฉีด และตรวจสอบความสม่ำเสมอในการพิมพ์

หลังจากการพิมพ์ จะนำชิ้นงานที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก วัดค่าการหดตัวของชิ้นงาน และจับเวลาในการขึ้นรูป โดยค่าร้อยละการหดตัวของชิ้นงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 [15]

$$\text{Shrinkage (\%)} = \left(\frac{L_0 - L_s}{L_0} \right) \times 100 \quad (\text{สมการที่ 3.3})$$

โดยค่า L_0 คือ ความยาวหรือขนาดตามแบบ CAD (Design Dimension)

L_s คือ ความยาวหรือขนาดของชิ้นงานจริงหลังพิมพ์

บทที่ 4

ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้มีแนวคิดที่จะทำการเตรียมวัสดุคอมพอสิตระหว่างพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในอัตราส่วนเหมาะสมที่มีภาคเติมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดเป็นสารเสริมแรง ได้แก่ เส้นใยใบสับปะรด, เส้นใยกล้วย และเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การใช้สารลดแรงตึง และการเอนไซม์ร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลน APTMS โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบกับชิ้นงานที่เติมเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านปรับปรุงพื้นผิวด้วยการใช้สารเชื่อมประสานไซเลน APTMS เพียงอย่างเดียว ซึ่งการผสมเส้นใยธรรมชาตินั้น จะใช้ในปริมาณ 5 ส่วนในร้อยส่วนของเมทริกซ์ โดยผสมลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) จากนั้นนำเส้น extrudate ที่ได้เข้าเครื่องตัดเม็ดพลาสติกแล้วนำไปทดสอบสมบัติการไหล ในขณะที่เดียวกันนำเม็ดพลาสติกที่ได้ไปขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องอัดฉีดพลาสติก (Injection molding) ซึ่งชิ้นงานที่ได้จากการอัดฉีดนั้นจะนำไปศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของวัสดุคอมพอสิตต่อไป เพื่อนำผลการทดสอบมาใช้ในการประเมินความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุคอมพอสิตที่ได้ไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นเส้นฟิลาเมนต์สำหรับการพิมพ์ 3 มิติ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ตอน ได้แก่

ตอนที่ 1 การผสม และการทดสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

ตอนที่ 2 การเตรียม การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ และการพิสูจน์เอกลักษณ์เส้นใยธรรมชาติก่อนและหลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

ตอนที่ 3 การขึ้นรูปวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ และการศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการไหล และสัญญาณวิทยา

ตอนที่ 4 การประเมินความเหมาะสมในการพัฒนาวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ เพื่อการใช้งานเป็นเส้นฟิลาเมนต์ในงานพิมพ์ 3 มิติ

4.1. ผลการผสม PBAT ใน PLA ที่มีต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA/PBAT โดยทำการผสมในอัตราส่วนที่แตกต่างกันตามที่แสดงในตารางที่ 3.1 การผสมพอลิเมอร์ดำเนินการโดยใช้เครื่องอัดรีดพลาสติกแบบสกรูคู่ (Twin screw Extruder) ซึ่งมีระบบหล่อเย็นด้วยรังก้านบริเวณทางออกของหัวตาย (die) เพื่อให้เส้น extrudate เย็นตัวและคงรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ภายหลังจากกระบวนการอัดรีด เส้น extrudate ถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (Pelletizer) เพื่อแปรรูปเป็นเม็ดพลาสติกสำหรับใช้ในกระบวนการขึ้นรูปขั้นต่อไป

จากการสังเกตลักษณะภายนอกของเส้น PLA/PBAT extrudate ที่ได้ พบว่าเมื่อมีการเติม PBAT ลงใน PLA สีของเส้นเอ็กซ์ทรูเดตจะเปลี่ยนจากสีใสของ PLA บริสุทธิ์ เป็นสีขาวทึบมาก ทั้งนี้สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนจากภาพถ่ายของตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างเส้นฟิลาเมนต์ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT

สำหรับการศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ทดสอบด้วยเทคนิค Differential Scanning calorimetry (DSC) ในโหมด Heat-Cool-Heat โดยกำหนดอัตราการเพิ่มและอุณหภูมิที่ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยศึกษาที่อุณหภูมิตั้งแต่ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพื่อศึกษาอุณหภูมิคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์เติม PLA/PBAT รวมถึงศึกษาปริมาณผลึก ผลการทดลองที่ได้แสดงดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จากเทคนิค DSC

อัตราส่วน PLA/PBAT	T _g (°C)		T _{cc} (°C)	ΔH _{cc} (J/g)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
	PBAT	PLA					
100PLA	-	56.24	102.30	21.76	152.95	19.71	n/a
90PLA/10PBAT	-36.17	55.08	101.30	22.50	152.15	21.65	n/a
80PLA/20PBAT	-37.77	56.26	100.50	16.59	152.00	20.81	5.67
70PLA/30PBAT	-44.17	55.80	101.80	15.56	152.30	15.45	n/a
60PLA/40PBAT	-33.59	56.79	102.40	14.30	152.05	14.34	0.07
50PLA/50PBAT	-37.94	56.16	104.75	12.96	145.50	11.97	n/a
40PLA/60PBAT	-33.59	56.79	102.40	14.30	152.05	14.34	0.11
30PLA/70PBAT	-37.44	56.38	108.25	6.61	146.20	7.36	2.69
20PLA/80PBAT	-45.33	59.70	100.50	16.59	152.00	20.81	22.69
10PLA/90PBAT	-35.49	57.10	101.25	3.23	153.45	1.70	n/a
100PBAT	-35.74	-	-	-	122.05	9.54	8.37

* เนื่องจากในการคำนวณค่า X_c (%) ที่ได้นั้นติดลบ จึงรายงานเป็น n/a

จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC ที่มีการให้ความร้อน 2 ครั้งนั้นโดยการให้ความร้อนในครั้งแรกจะเป็นการทำลายประวัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม จากนั้นทำการหล่อเย็นเพื่อทำให้สายโซ่พอลิเมอร์นั้นสามารถเรียงตัวให้เป็นระเบียบมากขึ้นอีกครั้งแล้วจึงให้ความร้อนในครั้งที่ 2 ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT และปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น ซึ่งผลการทดสอบที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะได้ออกมาจากการให้ความร้อนในครั้งที่ 2 และเมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่ปรากฏในตารางที่ 4.1 พบว่า T_g ของ PBAT มีค่า -35.74 องศาเซลเซียส และ T_m ของ PBAT มีค่า 122.05 องศาเซลเซียส ในขณะที่ T_g ของ PLA มีค่า 56.24 องศาเซลเซียส และ T_m ของ PLA มีค่า 152.95 องศาเซลเซียส และสำหรับ PLA/PBAT พบว่าพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในทุกอัตราส่วนจะปรากฏ T_g 2 ตำแหน่ง โดยค่า T_g ที่พบที่อุณหภูมิต่ำจะพบในช่วงประมาณ -35 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับค่า T_g ของ PBAT ในขณะที่ T_g อีกตำแหน่งจะพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าซึ่งอยู่พบในช่วงอุณหภูมิประมาณ 55.00 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับค่า T_g ของ PLA ในขณะที่ T_m ที่พบนั้นจะพบเพียง 1 พิกัด เกิดที่บริเวณอุณหภูมิประมาณ 150.00 องศาเซลเซียส โดยจากผลการทดสอบที่ได้นั้นพบว่ามันมีลักษณะเดียวกันกับงานวิจัยของ Shen Su และคณะ [32] โดยปกติแล้วเมื่อนำ PLA กับ PBAT มาผสมกันพบว่าพอลิเมอร์ทั้งสองจะไม่สามารถเข้ากันเป็นเฟสเดียวกันได้เนื่องจากความแตกต่างระหว่างขั้วโมเลกุลของพอลิเมอร์ทั้งสอง ซึ่งหากเมื่อพิจารณา

โครงสร้างของ PLA และ PBAT จะพบว่าโครงสร้างของ PLA นั้นจะมีหมู่เอสเทอร์ (-COO-) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันทั้งสองนี้ทำให้โครงสร้างของ PLA นั้นมีขั้ว ในขณะที่โครงสร้างของ PBAT จะประกอบไปด้วยส่วนของอะลิฟาติก และอะโรมาติกซึ่งนั่นทำให้โครงสร้างของ PBAT ไม่มีขั้ว ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้ PLA กับ PBAT เกิดการแยกเฟสกัน ส่งผลให้ปรากฏ T_g 2 ตำแหน่ง และเหตุผลที่พบ T_m ที่ตำแหน่งเดียวนั้นเป็นมาจาก PBAT นั้นมีปริมาณผลึก (crystallinity) ที่ต่ำ ส่งผลให้ไม่สามารถวัดอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึกได้นั่นเอง

นอกจากนั้นยังพบว่าผลของการเติม PBAT ในปริมาณร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักนั้น จะทำให้ค่า T_g ของ PLA ลดลงเล็กน้อย และเมื่อเติม PBAT ที่มากเกินไป (ร้อยละ 50-90 โดยน้ำหนัก) ทำให้ค่า T_g ของ PLA ไม่ได้ลดลงต่อเนื่อง แต่กลับมีค่าที่คงตัวหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเติม PBAT ในปริมาณที่น้อยนั้นจะทำให้สายโซ่ของ PBAT ที่มีความยืดหยุ่นสามารถแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของ PLA ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PLA ได้ง่ายขึ้น ทำให้ T_g ลดลง[5] ในขณะที่เมื่อมีการเติม PBAT ในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 50-90 นั้นอาจเป็นปริมาณที่มากเกินไป ส่งผลให้เกิดการแยกเฟสกันระหว่าง PLA กับ PBAT กันอย่างชัดเจน สำหรับค่า T_g ของ PBAT นั้นพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วง -35.67 องศาเซลเซียส ถึง -44.17 องศาเซลเซียส ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการกระจายตัวของ PBAT ในเฟสของ PLA แต่ก็ยังไม่สามารถที่จะเกิดการเข้ากันได้กับ PLA นอกจากนั้นยังสามารถสังเกตเห็นได้ว่าการที่เติม PBAT ในปริมาณที่มากขึ้นนั้นจะทำให้ T_m มีค่าลดลงโดยค่า T_m ของ PLA จะปรากฏที่อุณหภูมิ 152.95 องศาเซลเซียส และลดต่ำสุดที่อุณหภูมิ 145.30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็น T_m ของอัตราส่วน 20PLA/80PBAT นั้นสะท้อนให้เห็นว่าการเติม PBAT จะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของ PLA ทำให้โครงสร้างเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ยากและสามารถเกิดการหลอมเหลวได้ง่ายมากขึ้น สำหรับปริมาณผลึก (X_c) นั้นพบว่า X_c ของ PLA มีค่าประมาณร้อยละ 21.04 แล้วมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเติม PBAT ในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงค่า T_m

เมื่อนำข้อมูลค่า T_g ของทั้งสองเฟสมาวิเคราะห์พบว่าสูตร 90PLA/10PBAT มีค่า T_g ของ PLA ลดลงเล็กน้อย และค่า T_g ของ PBAT สูงขึ้นเล็กน้อย ทำให้ค่าความแตกต่าง T_g (ΔT_g) ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดอยู่ใกล้เคียงกันมากที่สุดเมื่อเทียบกับสูตรอื่น ๆ จึงสามารถกล่าวได้ว่าสูตร 90PLA/10PBAT แสดงแนวโน้มการเข้ากันได้ดีกว่าสูตรอื่น ทำให้งานวิจัยนี้เลือกอัตราส่วนการผสม 90PLA/10PBAT มาใช้ในการผสมเส้นใยธรรมชาติเพื่อศึกษาในตอนต่อ ๆ ไป

4.2 ผลการเตรียม การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ และการพิสูจน์เอกลักษณ์เส้นใยธรรมชาติ ด้วยเทคนิค Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR)

4.2.1. ผลการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยการต้มในหม้ออัดแรงดัน และการทดสอบ เสถียรภาพทางความร้อนร่วมกับการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยาของเส้นใย

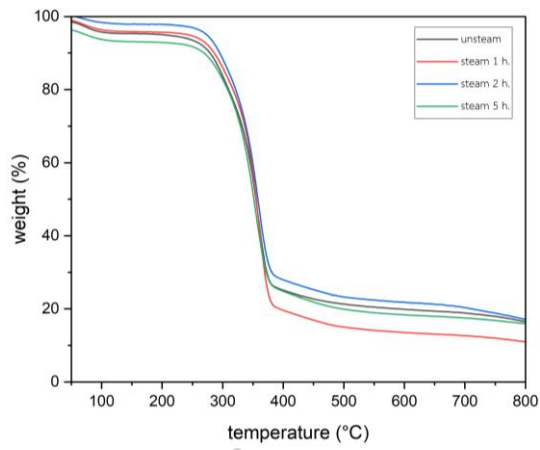
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดก่อน และหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไอน้ำ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้เส้นใยธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ เส้นใย สับปะรด (PALF) เส้นใยกัญชง (hemp) และเส้นใยมะพร้าว (coir) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผล ของเวลาที่ใช้ในการต้มเส้นใยในหม้ออัดแรงดันต่อเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใย ซึ่งเป็นหนึ่งใน ขั้นตอนสำคัญที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยก่อนนำไปใช้ในการผลิตวัสดุคอมพอสิต โดยเฉพาะ สำหรับกระบวนการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติที่ต้องการเส้นใยที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง เพื่อ ไม่ให้เกิดการเสื่อมสภาพของเส้นใยระหว่างกระบวนการหลอมของพอลิเมอร์ โดยผลของการต้มเส้นใย ธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดด้วยหม้ออัดแรงดัน จะทำให้เส้นใยมีการดูดซึมน้ำ ทำให้เส้นใยที่เกาะกันเป็นกลุ่ม เกิดการแยกออกเนื่องจากความดันของไอน้ำ กลายเป็นเส้นใยขนาดเล็ก ส่งผลให้สามารถเพิ่มพื้นที่ผิว ในการยึดเกาะของสารเชื่อมประสานไซเลน และนอกจากนั้นการต้มเส้นใยด้วยหม้ออัดแรงดันยัง สามารถละลายเฮมิเซลลูโลส/ลิกนินได้บางส่วน ทำให้เส้นใยเกิดการแยกออกจากกัน จึงทำให้การ เตรียมเส้นใยเบื้องต้นเป็นวิธีที่ปลอดภัยเนื่องจากไม่มีการใช้สารเคมี ซึ่งในการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ ต้มเส้นใยด้วยแรงดันจากหม้ออัดแรงดันนั้นจะศึกษาเวลาที่ใช้ในการต้ม 1, 2 และ 5 ชั่วโมง จากนั้นนำ เส้นใยที่ได้ไปทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้สภาวะบรรยากาศไนโตรเจน โดยให้พลังงานความร้อนในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-800 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เพื่อหาค่าอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (Onset temperature, T_{onset}) อุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (Endset temperature, T_{endset}) ปริมาณขี้เถ้า (% residue) และร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (% weight loss) ซึ่งผลการทดสอบที่ได้แสดงดังตาราง ที่ 4.2 และภาพที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดที่ใช้เวลาในการต้มที่เวลาต่าง ๆ

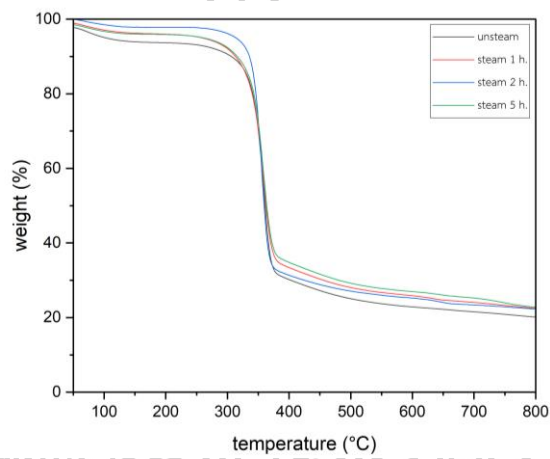
ชนิดเส้นใย	เวลา	การสลายตัว	T _{on set} (°C)	T _{end set} (°C)	inflection point (°C)	% residue	%weight loss
เส้นใยใบ สับปะรด (PALF)	0 hr.	ชั้นที่ 1	55.30	93.14	77.67	95.27	4.73
		ชั้นที่ 2	296.49	332.52	341.80	69.68	25.59
		ชั้นที่ 3	345.57	376.55	360.50	23.57	46.11
	1 hr.	ชั้นที่ 1	54.32	86.12	68.50	96.09	3.91
		ชั้นที่ 2	281.38	313.60	292.87	81.46	14.62
		ชั้นที่ 3	341.67	374.57	361.00	19.41	62.06
	2 hr.	ชั้นที่ 1	56.02	92.74	77.81	97.90	2.10
		ชั้นที่ 2	283.45	315.67	294.73	82.38	15.52
		ชั้นที่ 3	340.00	376.25	354.90	25.65	56.73
	5 hr.	ชั้นที่ 1	55.24	68.00	79.68	93.05	6.95
		ชั้นที่ 2	261.28	325.54	327.27	72.21	20.84
		ชั้นที่ 3	338.20	372.02	354.67	23.75	48.15
เส้นใย กัญชง (hemp)	0 hr.	ชั้นที่ 1	58.93	106.62	72.17	93.71	6.29
		ชั้นที่ 2	340.88	370.00	359.33	28.38	65.34
	1 hr.	ชั้นที่ 1	55.08	74.94	76.69	96.95	3.05
		ชั้นที่ 2	337.89	371.14	359.89	32.51	64.43
	2 hr.	ชั้นที่ 1	52.21	76.72	86.27	97.90	2.10
		ชั้นที่ 2	342.22	366.11	354.00	31.22	66.67
	5 hr.	ชั้นที่ 1	54.49	101.39	84.80	95.94	4.06
		ชั้นที่ 2	338.65	371.35	357.67	33.29	62.65

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดที่ใช้เวลาในการต้มที่เวลาต่าง ๆ (ต่อ)

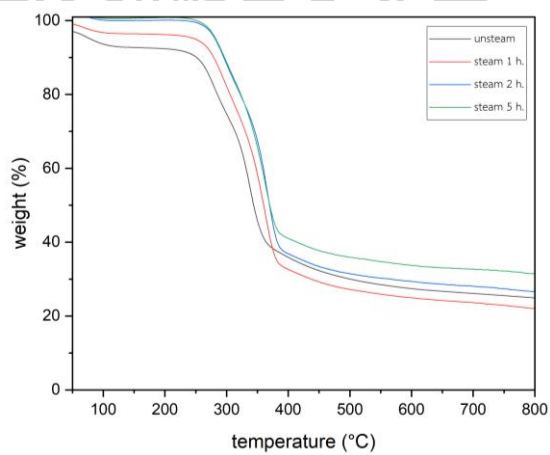
ชนิดเส้นใย	เวลา	การสลายตัว	T _{onset} (°C)	T _{endset} (°C)	inflection point (°C)	% residue	%weight loss
เส้นใยมะพร้าว (coir)	0 hr.	ชั้นที่ 1	39.44	86.36	62.17	92.66	7.34
		ชั้นที่ 2	268.11	299.14	293.83	70.99	21.67
		ชั้นที่ 3	349.12	379.28	366.67	29.81	41.17
	1 hr.	ชั้นที่ 1	55.40	86.02	65.17	96.45	3.55
		ชั้นที่ 2	271.04	288.09	292.85	29.90	66.55
		ชั้นที่ 3	343.42	379.66	361.50	29.33	0.57
	2 hr.	ชั้นที่ 1	51.91	73.19	53.00	99.98	0.02
		ชั้นที่ 2	275.02	308.05	299.00	78.50	21.48
		ชั้นที่ 3	349.91	381.86	363.29	34.67	43.82
	5 hr.	ชั้นที่ 1	52.00	73.57	52.83	95.74	4.26
		ชั้นที่ 2	272.35	305.39	299.00	83.70	12.04
		ชั้นที่ 3	341.37	377.58	361.17	39.14	44.56



a)



b)



c)

ภาพที่ 4.2 TGA thermogram ของ a) เส้นใยใบสับปะรด b) เส้นใยกล้วย และ c) เส้นใยมะพร้าว ที่ผ่านการต้มในหม้ออัดแรงดันที่เวลาต่างกัน

จากผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA นั้น พบว่าพฤติกรรมการสลายตัวของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดนั้นมีการสลายตัว 3 ชั้น ในการสลายตัวขั้นแรกเกิดที่อุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 50-100 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นขั้นของระเหยของความชื้นและสารประกอบโมเลกุลขนาดเล็ก ในขณะที่การสลายตัวในขั้นที่สองนั้นเกิดในช่วงอุณหภูมิช่วง 280-320 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นของการสลายตัวของเพกตินและเฮมิเซลลูโลส และการสลายตัวในขั้นที่ 3 นั้นเกิดที่อุณหภูมิ 350-380 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของเซลลูโลสและลิกนิน [33]

สำหรับผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยใบสับปะรดนั้นแสดงดังภาพที่ 4.2 a) พบว่าเส้นใยใบสับปะรดที่ไม่ผ่านการต้มนั้นมีอุณหภูมิในเริ่มเกิดการสลายตัวนั้นอยู่ที่อุณหภูมิ 296.49 องศาเซลเซียสแต่เมื่อนำเส้นใยใบสับปะรดไปต้มภายในหม้ออัดแรงดันในเวลา 1, 2 และ 5 ชั่วโมง ทำให้อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวกลายเป็น 281.38, 283.45 และ 261.28 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากการต้มเส้นใย จะทำให้องค์ประกอบบางอย่างภายในเส้นใยใบสับปะรดเกิดการละลายออกซึ่งคาดว่าเป็นเฮมิเซลลูโลส แต่หากทำการต้มนานเกินไปอาจส่งผลต่อโครงสร้างของเซลลูโลส และทำให้เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการต้ม [13]

ในขณะที่เสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยกล้วยนั้นแสดงดังภาพที่ 4.2 b) โดยพบว่าเกิดการสลายตัวทางความร้อนแค่ 2 ชั้น ซึ่งเป็นการระเหยของความชื้น และการสลายตัวของลิกนิน ทั้งนี้เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสของกล้วยนั้นมีปริมาณที่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณของลิกนินและเซลลูโลส ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงการสลายตัวของปริมาณเฮมิเซลลูโลสได้นั่นเอง และหากพิจารณาถึงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวพบว่าเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการต้มจะเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 340.88 องศาเซลเซียส ในขณะที่เส้นใยกล้วยที่ผ่านการต้มภายในหม้ออัดแรงดันในเวลา 1, 2 และ 5 ชั่วโมง มีอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวกลายเป็น 337.89, 342.22 และ 338.65 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในการต้มเส้นใย 2 ชั่วโมงนั้นจะทำให้เส้นใยเริ่มเกิดการสลายที่อุณหภูมิสูงกว่าเส้นใยกล้วยที่ไม่ผ่านการต้ม เนื่องการที่เวลาดังกล่าวสามารถเกิดการกำจัดของเฮมิเซลลูโลสและองค์ประกอบบางอย่างที่สามารถละลายน้ำได้อย่างเหมาะสม ทำให้สัดส่วนของปริมาณเซลลูโลสและลิกนินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดความเสถียรทางความร้อนดีขึ้น แต่หากใช้เวลาในการต้มที่นานเกินไปจะทำให้อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวลดลงเนื่องจากโครงสร้างของเส้นใยอาจเกิดการเปลี่ยนแปลง

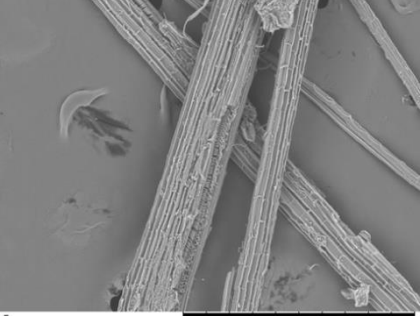
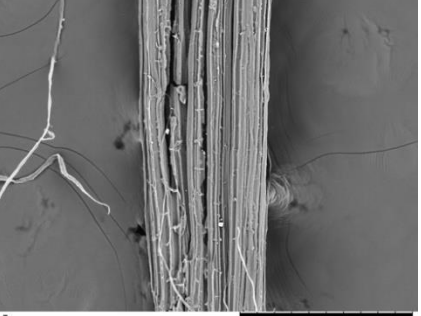
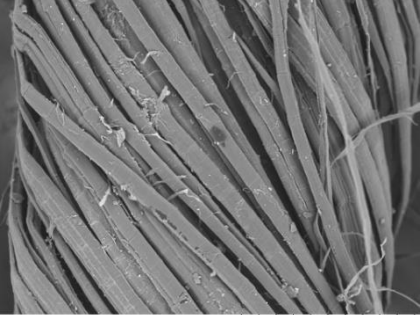
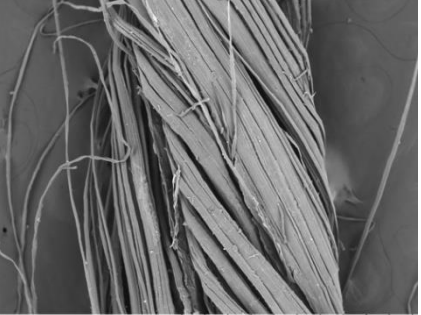
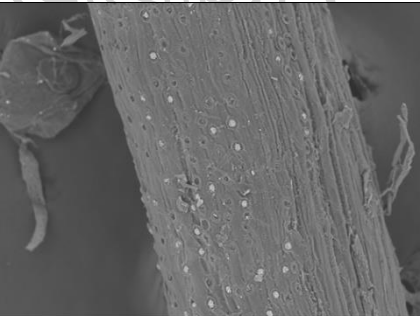
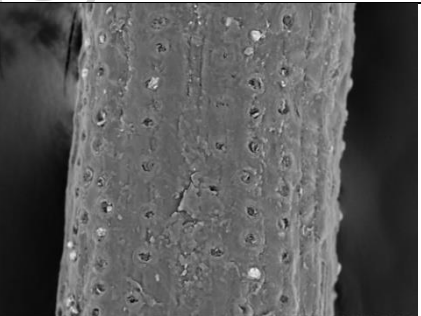
สำหรับผลการทดสอบของเส้นใยมะพร้าวแสดงดังภาพที่ 4.2 c) ซึ่งพบว่าเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ผ่านการต้มนั้นจะมีอุณหภูมิของการเริ่มการสลายตัวที่อุณหภูมิ 268.11 องศาเซลเซียส และเมื่อต้มเส้นใยมะพร้าวภายในหม้ออัดแรงดันในเวลา 1, 2 และ 5 ชั่วโมง ทำให้อุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวกลายเป็น 271.04, 275.02 และ 272.35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการต้มเส้นใยนั้นทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยมะพร้าวนั้นดีขึ้น

จากผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดนั้นพบว่าการต้มเส้นใยที่เวลา 2 ชั่วโมงนั้นจะทำให้เส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด เริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงสุด เนื่องจากที่เวลาดังกล่าวสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสออกไปได้อย่างเหมาะสม แต่หากทำการต้มที่เวลานานเกินไป (5 ชั่วโมง) จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้เริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิต่ำลง เป็นผลให้งานวิจัยนี้จะทำการปรับสภาพพื้นผิวเส้นใยทั้ง 3 ชนิดด้วยการต้มภายในหม้ออัดแรงดันเป็นเวลา 2 ชั่วโมงก่อนนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการอื่น ๆ ทั้งนี้เพื่อให้เส้นใยเกิดการแยกออกจากกัน

เพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดหลังผ่านกระบวนการต้มภายในหม้ออัดแรงดัน จึงได้ทำการศึกษาโดยใช้เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) โดยใช้ความต่างศักย์ของลำอิเล็กตรอนที่ 5 กิโลโวลต์ และทำการศึกษาที่กำลังขยายต่าง ๆ ตั้งแต่ 100 – 600 เท่า โดยภาพ SEM ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการต้มในหม้ออัดแรงดันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะมีลักษณะของเส้นใยที่แยกออกจากกลุ่มเส้นใย (bundle) กลายเป็นเส้นใยเดี่ยว และมีความขรุขระของพื้นผิวเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในของเส้นใย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ TGA ในตอนก่อนหน้านี้ ทำให้สามารถยืนยันได้อย่างชัดเจนว่าการต้มเส้นใยในหม้ออัดแรงดันมีผลต่อการปรับสภาพโครงสร้างของเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพต่อการยึดเกาะกับสารเชื่อมประสานไซเลนหรือแมทริกซ์ในงานคอมโพสิตต่อไป



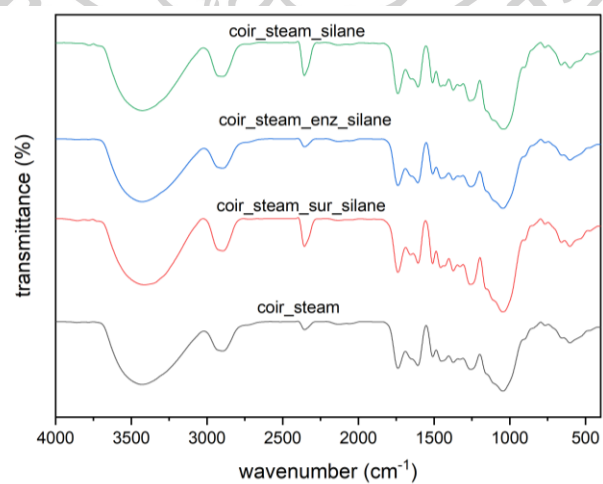
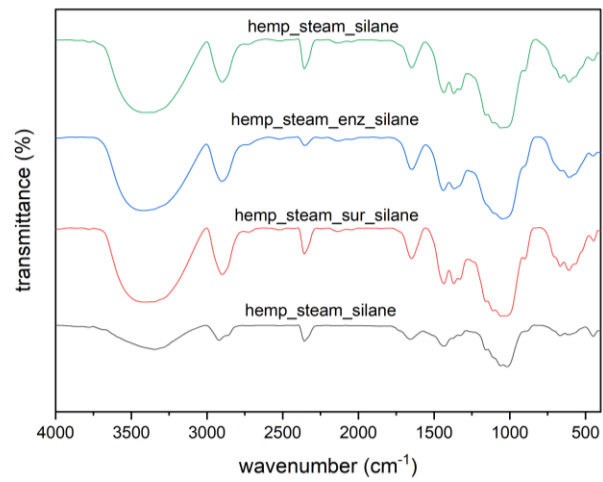
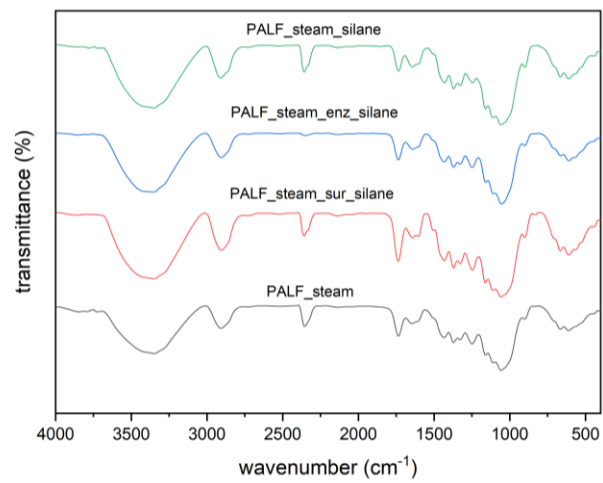
ตารางที่ 4.3 แสดงภาพ SEM ของเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการต้มภายในหม้ออัดแรงดัน 2 ชั่วโมง

ชนิดเส้นใยธรรมชาติ	กระบวนการปรับสภาพเส้นใยธรรมชาติ	
	ไม่ผ่านการต้ม	ผ่านการต้มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
เส้นใยใบสับปะรด	 <p>NL D4.1 x200 500 μm</p> <p>กำลังขยาย 200 เท่า</p>	 <p>NL D4.1 x250 300 μm</p> <p>กำลังขยาย 250 เท่า</p>
เส้นใยกล้วย	 <p>NL D3.9 x250 300 μm</p> <p>กำลังขยาย 250 เท่า</p>	 <p>NL D3.7 x100 1 mm</p> <p>กำลังขยาย 100 เท่า</p>
เส้นใยมะพร้าว	 <p>NL D3.5 x300 300 μm</p> <p>กำลังขยาย 300 เท่า</p>	 <p>NL D4.0 x600 100 μm</p> <p>กำลังขยาย 600 เท่า</p>

4.2.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์เส้นใยธรรมชาติหลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิค Fourier transformation infrared spectroscopy (FTIR)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดด้วยกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การใช้สารลดแรงตึงผิว และการใช้เอนไซม์ ร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการยึดเกาะกันระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารเชื่อมประสานไซเลน 3-aminopropyl trimethoxysilane (APTMS) ในการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด เนื่องจากสารเชื่อมประสานไซเลนดังกล่าวประกอบด้วยหมู่เอมีน ($-NH_2$) ในโครงสร้างซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลหรือหมู่เอสเตอร์ ของ PLA และ PBAT ได้โดยผ่านการเกิดพันธะไฮโดรเจน [19] ส่งผลให้สามารถช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างเส้นใยธรรมชาติกับพอลิเมอร์เมทริกซ์

จากผลการวิเคราะห์ FTIR สเปกตรัมแสดง ดังภาพที่ 4.3 พบว่าเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยการต้มในหม้ออัดแรงดันนั้นจะแสดงพีกเอกลักษณ์ที่บริเวณตำแหน่ง 3400 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งการสั่นของ $-OH$ stretching และที่ตำแหน่งประมาณ 2900 cm^{-1} เป็นตำแหน่งการสั่นของ $C-H$ stretching ซึ่งผลจากโครงสร้างของเส้นใยที่ประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนิน [19] ในขณะที่ผลการทดสอบของเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนนั้นจะพบว่าความเข้มของกราฟที่ตำแหน่งประมาณ $900-1100\text{ cm}^{-1}$ นั้นมีความเข้มลดลง เนื่องจากที่ตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะ $Si-O-Si$ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าที่บริเวณพื้นผิวของเส้นใยนั้นเกิดการควบแน่นของสารเชื่อมประสานไซเลน นอกจากนั้นยังเป็นตำแหน่งการสั่นของพันธะ $Si-O-C$ ที่ตำแหน่ง $700-1000\text{ cm}^{-1}$ อีกด้วย [12] ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นถึงการทำงานของสารเชื่อมประสานไซเลนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติ และยังพบว่าสำหรับเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว และเอนไซม์ร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลนจะมีความเข้มของพีกที่ตำแหน่งดังกล่าวมีความเข้มลดลงเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลนเพียงอย่างเดียวเล็กน้อย



c)

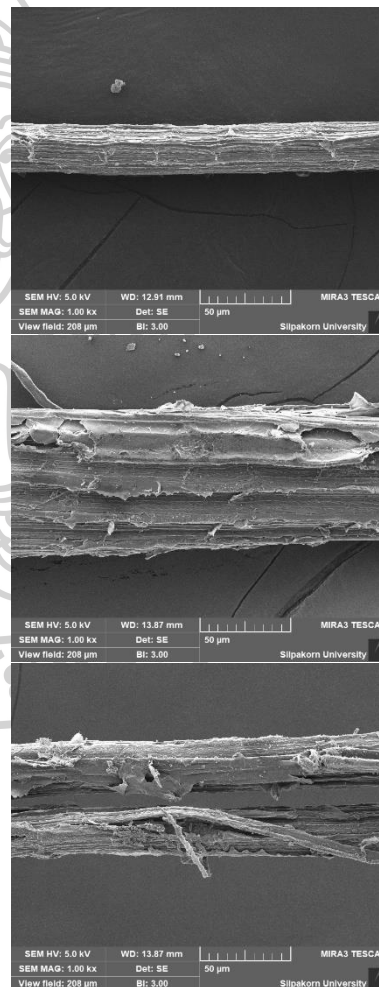
ภาพที่ 4.3 FTIR spectra ของ a) เส้นใยโพลีเอสเตอร์ b) เส้นใยกล้วยง และ c) เส้นใยมะพร้าว หลังผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยได้นำเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิว และเอนไซม์ไปศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM เพิ่มเติมเพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของเส้นใย ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.4 ทั้งนี้เพื่อให้การวิเคราะห์ภาพ SEM เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงเลือกถ่ายเฉพาะเส้นใยชนิดที่แสดงแนวโน้มความเปลี่ยนแปลงจากการปรับปรุงพื้นผิวมากที่สุดในการทดสอบเบื้องต้น ซึ่งช่วยให้สามารถเห็นผลของการปรับปรุงได้อย่างชัดเจนที่สุด และใช้ในการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิว จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการใช้สารลดแรงตึงผิวและเอนไซม์นั้นจะทำให้เส้นใยมีผิวที่ขรุขระมากขึ้น ส่งผลให้สามารถเพิ่มพื้นที่ในการยึดเกาะของสารเชื่อมประสานไซเลนได้เพิ่มขึ้น

ไม่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว

สารลดแรงตึงผิว

เอนไซม์



ภาพที่ 4.4 ภาพ SEM ของเส้นใยใบสับปะรดที่กำลังขยาย 1000 เท่า ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการต่าง ๆ ก่อนใช้ร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน

4.3. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ดัชนีการไหล และการศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมพอลิทีชีวภาพPLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

4.3.1. ผลการทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอลิทีชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

การทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอลิทีที่ได้นั้นจะทำการทดสอบโดยใช้เทคนิค Melt flow Index (MFI) โดยการหลอมเม็ดพลาสติกที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการกดให้ไหลด้วยน้ำหนักขนาด 2.16 กิโลกรัม ซึ่งปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยการทดสอบด้วยเทคนิคดังกล่าวจะทำให้ทราบถึงคุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ ซึ่งสามารถนำไปประกอบการประเมินความสามารถในการพัฒนาวัสดุคอมพอลิทีเพื่อใช้เป็นเส้นฟิลาเมนต์สำหรับการพิมพ์ขึ้นรูป 3 มิติ

จากการทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอลิทีชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ดังผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.5 พบว่าค่า MFI ของ PLA นั้นมีค่า 4.42 กรัม/10นาที่ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของ PLA ที่มีความเปราะ และมีความต้านทานการไหลที่สูง และเมื่อมีการเติม PBAT ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่า MFI เปลี่ยนแปลงกลายเป็น 13.44 กรัม/10นาที่ แต่เมื่อมีการผสม PBAT ลงไปในปริมาณร้อยละ 10โดยน้ำหนักนั้น จะทำให้ดัชนีการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 13.44 กรัม/10นาที่ ทั้งนี้เนื่องจากตัว PBAT นั้นเป็นพอลิเมอร์ที่มีความอ่อนตัวสูง และมีความหนืดที่ต่ำ ส่งผลให้เมื่อนำมาผสมกับ PLA จึงทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมที่ได้นี้น้อยลงตามไปด้วย ส่งผลให้ค่า MFI ที่ได้นั้นเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลการทดสอบที่ได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pitivut และคณะ [25]

หากพิจารณาผลการทดสอบของวัสดุคอมพอลิทีชีวภาพ PLA/PBAT ที่มีการเติมเส้นใยใบสับปะรดเป็นสารเสริมแรงพบว่าการเติมเส้นใยใบสับปะรดที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการต่าง ๆ จะมีค่าดัชนีการไหลที่สูงกว่า PLA/PBAT โดยเฉพาะในสูตรการผสม PSS จะมีให้ค่า MFI สูงที่สุด ซึ่งมีค่า 23.12 กรัม/10นาที่ เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวช่วยทำให้เส้นใยเกิดการกระจายตัวได้ดีภายในเมทริกซ์ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดผลึก (nucleating agent) ของ PLA [31] ส่งผลให้โครงสร้างเฟส amorphous ลดลง เมื่อพอลิเมอร์เกิดหลอมและไหลจะทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเกี่ยวพันกันน้อยลง ส่งผลให้ความหนืดลดลง และเพิ่มความสามารถในการไหลได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT นอกจากนี้การกระจายตัวที่ดีของเส้นใยยังช่วยป้องกันการรวมตัวเป็นก้อน จึงไม่ก่อให้เกิดแรงต้านการไหลเพิ่มขึ้น

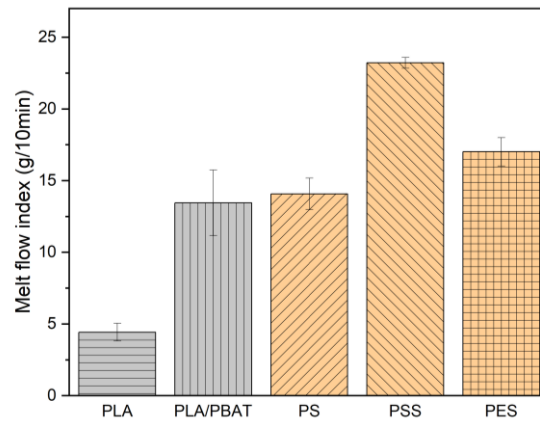
ในกรณีของการเติมเส้นใยกัญชงที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวในสูตร HS และ HSS พบว่าค่าดัชนีการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าเส้นใยกัญชงมีโครงสร้างที่แข็งแรงและสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการเกิดผลึก [18] ได้เช่นกัน และเมื่อนำเส้นใยไป

ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการดังกล่าวจะช่วยให้การยึดเกาะกับเมทริกซ์ดีขึ้น และกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอภายในพอลิเมอร์เมริกซ์ ส่งผลให้เกิดผลึกของ PLA ภายในสูตรการผสมเพิ่มขึ้น ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงลดลง

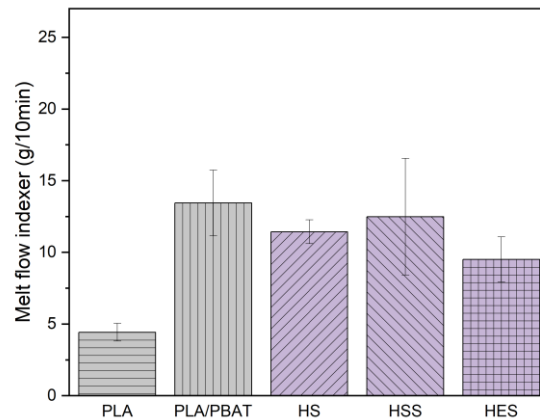
สำหรับสูตรการเติมเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แก่ CS, CSS และ CES พบว่าค่าดัชนีการไหลมีค่าใกล้เคียงกับสูตร PLA/PBAT ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยมะพร้าวที่มีโครงสร้างหลวมและมีโพรงอากาศภายในสูง ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารเร่งผลึกที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าใบสับปะรดและกล้วย แม้จะมีการปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มการยึดเกาะกับเมทริกซ์ ส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทำให้ค่าดัชนีการไหลไม่ต่างจากสูตร PLA/PBAT

ตารางที่ 4.4 ดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

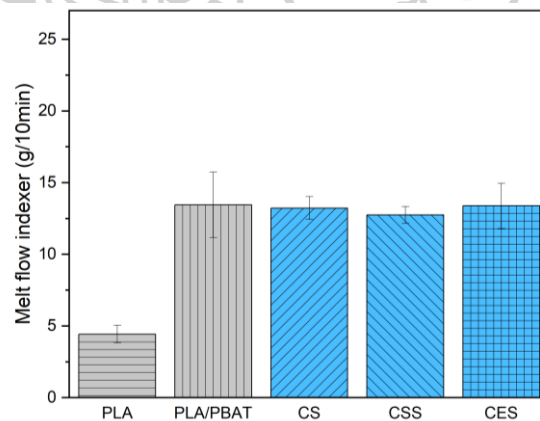
สูตรการผสม	MFI (g/10min)
PLA	4.42
PLA/PBAT	13.44
PS	14.07
PSS	23.21
PES	17.01
HS	11.43
HSS	12.48
HES	9.51
CS	13.22
CSS	12.74
CES	13.38



a)



b)



c)

ภาพที่ 4.5 ค่า MFI ของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT ที่ใช้ a) เส้นใยใบสับปะรด
b) เส้นใยกล้วย และ c) เส้นใยมะพร้าว เป็นสารเสริมแรง

4.3.2. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพPLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

4.3.2.1. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

การศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาตินั้นจะทำการทดสอบถึงความต้านทานต่อการดึง (tensile test) ความต้านทานต่อการโค้งงอ (flexural test) และความต้านทานต่อการกระแทก (impact test)

สำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงของชิ้นงานนั้นจะทำการทดสอบชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ทดสอบวัสดุที่ได้จากกระบวนการอัดฉีดพลาสติกทดสอบโดยใช้โหลดเซลล์ขนาด 5 กิโลนิวตัน และใช้อัตราในการดึง 50 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งการทดสอบนี้จะสามารถทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของวัสดุในระหว่างที่มีการถูกให้แรงดึง โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.6 – 4.8

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติความต้านทานต่อการดึงของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

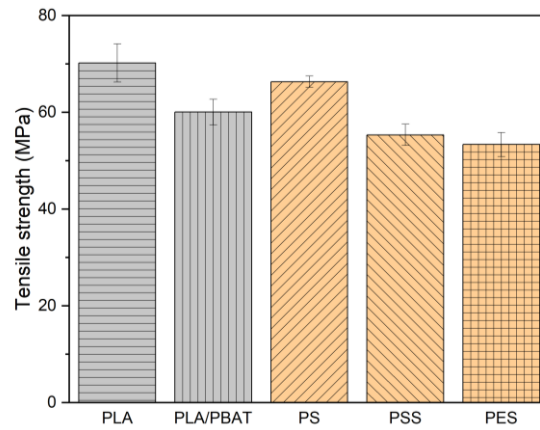
สูตรการผสม	Tensile properties		
	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Elongation at break (%)
PLA	70.18±3.94	1,23.75±125.61	15.62±3.07
PLA/PBAT	60.04±2.64	1,007.63±74.18	14.76±2.94
PS	66.28±1.18	1,151.85±41.19	14.04±3.00
PSS	55.31±2.20	1,101.12±81.94	10.26±0.40
PES	53.34±2.46	1,069.94±140.89	9.68±0.54
HS	67.15±1.44	1,090.61±62.07	14.87±2.84
HSS	58.93±2.74	1,086.73±21.34	9.71±2.54
HES	55.03±1.79	1,126.80±7.78	8.70±1.07
CS	64.52±1.19	1,132.29±40.21	14.49±3.28
CSS	61.20±1.20	1,049.26±30.43	6.40±0.36
CES	49.68±1.88	1,051.75±31.53	6.46±0.38

โดยจากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.6 – 4.8 แสดงค่า tensile strength ของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกระบวนการต่าง ๆ พบว่า PLA มีค่า tensile strength ที่สูงที่สุดซึ่งมีค่า 70.18 ± 3.94 MPa และหากมีการเติม PBAT ลงไปผสมในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะทำให้ความต้านทานด้านการดึงยึดลดลง เนื่องจากโครงสร้างของ PBAT นั้นมีความยืดหยุ่น ทำให้เมื่อนำไปผสมกับ PLA จึงไปรบกวนการเกิดผลึกของ PLA ทำให้มีค่า tensile strength ลดลงนั่นเอง

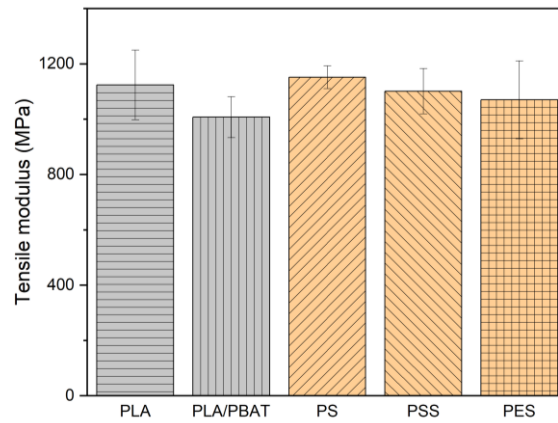
หากพิจารณาถึงสมบัติความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT ที่เติมเส้นใยใบสับปะรดที่แสดงในภาพที่ 4.6 พบว่าค่า tensile strength อยู่ในช่วง $53.34 \pm 2.46 - 66.28 \pm 1.18$ MPa ซึ่งหากเทียบกับ PLA/PBAT (60.04 ± 2.64 MPa) พบว่าสูตรการผสม PS จะมีค่าที่สูงกว่า ในขณะที่ PSS และ PES จะมีค่าน้อยกว่า ในขณะที่ค่า tensile modulus นั้นของสูตร PS และ PSS สูงกว่า PLA/PBAT ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างของเส้นใยใบสับปะรดมีลักษณะที่ยาวและมีปริมาณเซลลูโลสที่สูง และเมื่อผ่านการปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสมจะทำให้สามารถเกิดการยึดติดกันระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น [28] ในขณะที่เมื่อพิจารณาถึงค่า elongation พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมเส้นใยใบสับปะรดเนื่องจากเกิดจุดรวมเค้นในเนื้อวัสดุซึ่งทำให้การยึดตัวมีขีดจำกัด [16]

สำหรับสูตร HS, HSS และ HES ที่เติมเส้นใยกล้วย พบว่าค่า Tensile strength ของ HS (67.15 ± 1.44 MPa) สูงกว่า PLA/PBAT ในขณะที่ HSS และ HES มีค่าลดลงเล็กน้อย (58.93 ± 2.74 และ 55.03 ± 1.79 MPa) โดยค่า Tensile modulus มีแนวโน้มสูงกว่า PLA/PBAT ในทุกสูตร เป็นผลมาจากธรรมชาติของเส้นใยกล้วยจะมีปริมาณผลึกที่สูง ทำให้สามารถกระจายแรงภายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี [16; 29] แต่หากพิจารณาถึงค่า การยึดตัวของสูตรที่เติมเส้นใยกล้วยพบว่าจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT เนื่องจากเส้นใยกล้วยทำให้เกิดความเปราะเพิ่มขึ้น

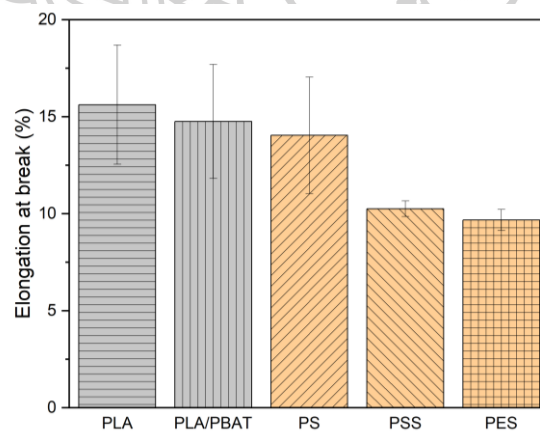
สูตร CS, CSS และ CES ซึ่งเป็นสูตรการผสมที่มีการเติมเส้นใยมะพร้าว พบว่าสูตร CS จะมีค่า Tensile strength ที่สูงกว่า PLA/PBAT ในขณะที่สูตร CSS และ CES นั้นจะมีค่าลดลงและมีค่าการยึดตัวลดลง แต่จะพบว่ามีการเติมเส้นใยมะพร้าวจะให้ค่า tensile modulus สูงขึ้น เนื่องจากเส้นใยมะพร้าวนั้นมีปริมาณลิกนินสูงทำให้เส้นใยแข็งแรงแต่ความเข้ากันได้กับเมทริกซ์จำเป็นต้องปรับปรุงพื้นผิวเพื่อป้องกันการรวมตัวเป็นกลุ่ม [15; 29] ทั้งนี้การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยมะพร้าวด้วย 2 กระบวนการที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ อาจไม่สามารถเพิ่มสมบัติความต้านต่อแรงดึงได้จึงทำให้ค่าการยึดตัวและความต้านทานแรงดึงลดลง



a)

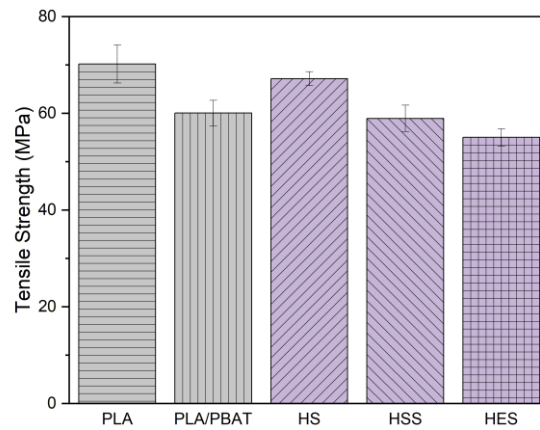


b)

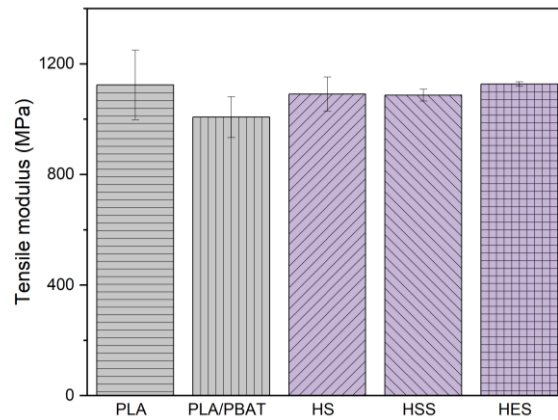


c)

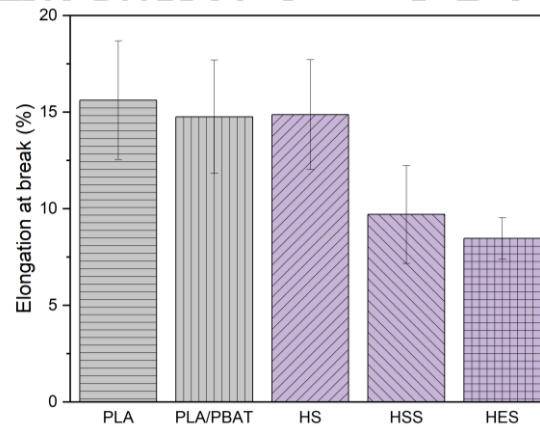
ภาพที่ 4.6 แสดงค่า a) tensile strength, b) tensile modulus และ c) elongation at break ของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยไบโสับปะรด



a)

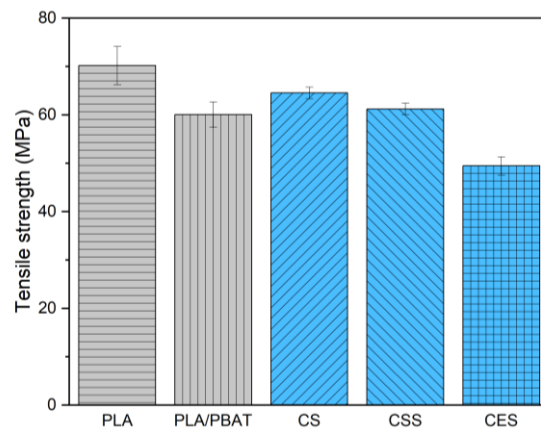


b)

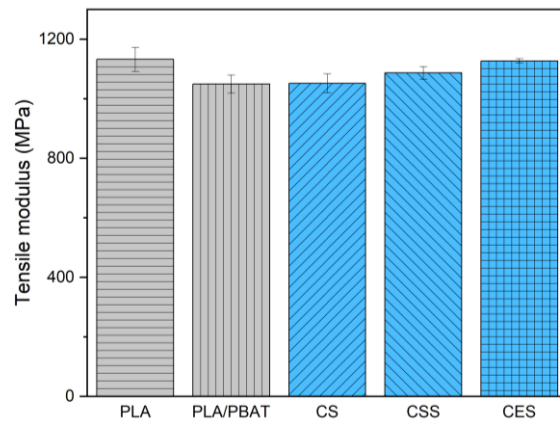


c)

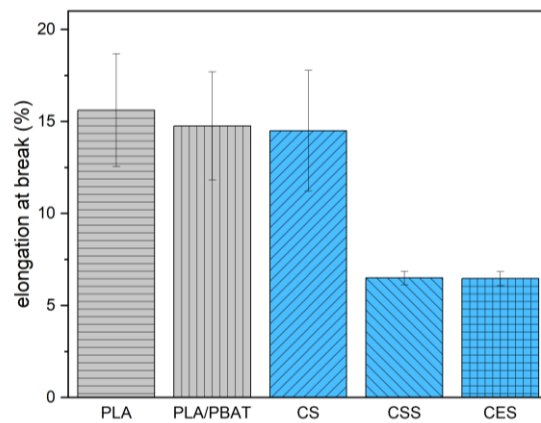
ภาพที่ 4.7 แสดงค่า a) tensile strength, b) tensile modulus และ c) elongation at break ของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยกล้วยง



a)



b)



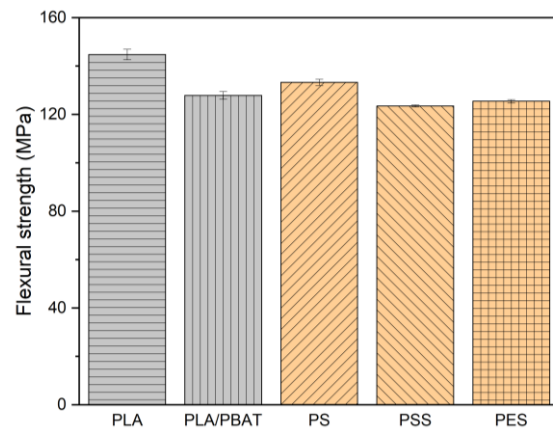
c)

ภาพที่ 4.8 แสดงค่า a) tensile strength, b) tensile modulus และ c) elongation at break ของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยมะพร้าว

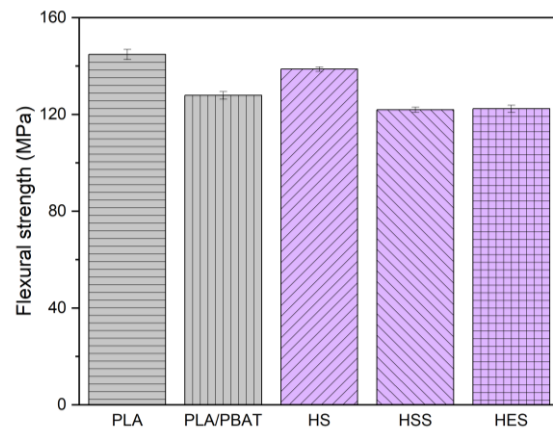
สำหรับผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ได้ทำการนำชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดพลาสติกมาทำการให้แรงใน โหมดดัดงอ 3 จุด (3-point bending) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 และมีการใช้น้ำหนักกดขนาด 50 กิโลนิวตัน ใช้อัตราในการกด 1.49 50 มิลลิเมตรต่อนาที โดยกำหนดระยะ span ที่ ระยะ 56 มิลลิเมตร ซึ่งจากผลการทดสอบที่ได้นั้นแสดงดังตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.9

ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานการโค้งงอ (flexural strength) ของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

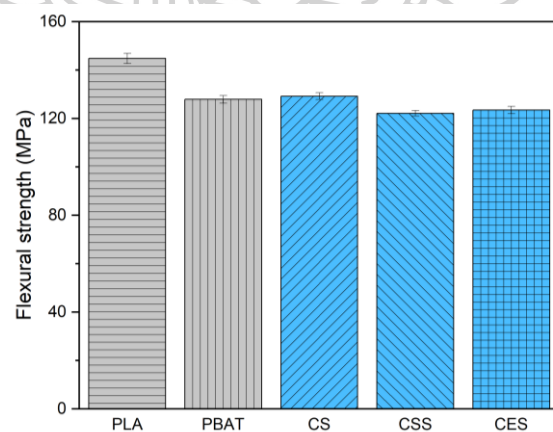
สูตรการผสม	Flexural strength (MPa)
PLA	144.78±2.16
PLA/PBAT	127.88±1.57
PS	133.30±1.80
PSS	123.51±0.43
PES	154.28±0.67
HS	138.72±0.97
HSS	121.93±1.09
HES	122.41±1.44
CS	129.20±1.40
CSS	122.11±1.13
CES	123.47±1.55



a)



b)



c)

ภาพที่ 4.9 ค่า flexural strength ของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT ที่เติม a) เส้นใยใบ
 สับปะรด b) เส้นใยกล้วย และ c) เส้นใยมะพร้าว เป็นสารเสริมแรง

จากค่าในตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า PLA นั้นมีค่า flexural strength ที่สูงที่สุด และเมื่อมีการเติม PBAT จะทำให้ค่าดังกล่าวลดลง เนื่องจากการเติม PBAT นั้น จะทำให้สายโซ่ของ PLA ถูกรบกวนและส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง [23]

จากการพิจารณาถึงผลการเติมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ซึ่งพิจารณาจากสูตร PS, PSS และ PES พบว่ามีค่า Flexural strength อยู่ในช่วง 123.51 ± 0.43 ถึง 154.28 ± 0.67 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับ PLA/PBAT (127.88 ± 1.57 MPa) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานในสูตร PS และ PES มีค่า Flexural strength ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT โดยสะท้อนให้เห็นโดยธรรมชาติของเส้นใยโพลีเอสเตอร์นั้นสามารถเพิ่มความต้านทานต่อการโค้งงอได้อยู่แล้ว และยิ่งหากทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยการใช้เอนไซม์จะยิ่งช่วยให้มีสมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ชิ้นงานสูตร PSS มีค่า Flexural strength ต่ำสุดในกลุ่มโพลีเอสเตอร์ ซึ่งต่ำกว่า PLA/PBAT เล็กน้อย บ่งชี้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวใน PSS ไม่ได้ช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะได้ดีนักทำให้ความสามารถต่อการโค้งงอลดลง

สำหรับสูตร HS, HSS และ HES ที่เป็นสูตรของชิ้นงานที่มีการเติมเส้นใยกล้วยซึ่งเป็นสารเสริมแรง พบว่า HS มีค่า Flexural strength สูงสุดในกลุ่มนี้และสูงกว่า PLA/PBAT อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ชิ้นงานในสูตร HSS และ HES มีค่า Flexural strength ใกล้เคียงกัน แต่ก็มีค่าต่ำกว่า PLA/PBAT แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติในสูตร HSS และ HES ไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์ได้ดีเท่าสูตร HS จึงทำให้ไม่รับแรงในลักษณะดังกล่าวได้ดี

สำหรับชิ้นงานในสูตร CS, CSS และ CES ซึ่งเป็นสูตรที่เติมเส้นใยมะพร้าว พบว่า CS ให้ค่า Flexural strength สูงสุดในกลุ่มนี้ และยิ่งสูงกว่า PLA/PBAT เล็กน้อย ในขณะที่ CSS และ CES มีค่า Flexural strength ต่ำกว่าค่าใน PLA/PBAT แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวในสูตร CSS และ CES ไม่ได้ช่วยเพิ่มแรงยึดเกาะได้ดีมากนัก อาจเกิดจากปัญหาการกระจายตัวของเส้นใยหรือเกิดการรวมตัวกันของเส้นใย

จากผลการทดสอบดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่าเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนจะช่วยให้เพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการโค้งงอได้ดี ในขณะที่การปรับปรุงพื้นผิวด้วยการใช้สารลดแรงตึงผิว และเอนไซม์ ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติดังกล่าวยกเว้นชิ้นงานสูตร PES ที่จะมีความต้านทานต่อการโค้งงอสูงที่สุด

จากผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของชิ้นงานคอมพอลิทีชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ โดยการปล่อยลูกตุ้มขนาด 2.75 จูล ให้การกระแทกชิ้นงาน ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงสมบัติความต้านทานต่อการกระแทกของชิ้นงานคอมพอลิทีชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

สูตรการผสม	Impact strength (MPa)
PLA	3.22±0.32
PLA/PBAT	3.63±1.28
PS	3.20±0.25
PSS	4.34±0.16
PES	3.99±0.26
HS	3.91±0.21
HSS	4.48±0.43
HES	3.52±0.24
CS	4.05±0.37
CSS	3.90±0.10
CES	3.82±0.18

เมื่อเปรียบเทียบค่า impact strength ของ PLA กับ PLA/PBAT พบว่าการเติม PBAT นั้นทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความต้านทานต่อการกระแทกมากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างของ PBAT ที่มีความเหนียว จึงส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานเมื่อเกิดการกระแทกได้นั่นเอง และหากพิจารณาถึงผลการเติมเส้นใยเส้นใยธรรมชาติพบว่ามีแนวโน้มที่สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการกระแทกได้ ทั้งนี้เนื่องจากเส้นใยที่เติมลงไปนั้นจะเข้าไปกระจายในพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้สามารถช่วยรับแรงกระแทกได้ดีแล้วกระจายแรงดังกล่าว ทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานต่อการกระแทกที่ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงผลของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติพบว่าการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยใบสับปะรดด้วยสารลดแรงตึงผิวและเอนไซม์ ร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลน (PSS และ PES) นั้น

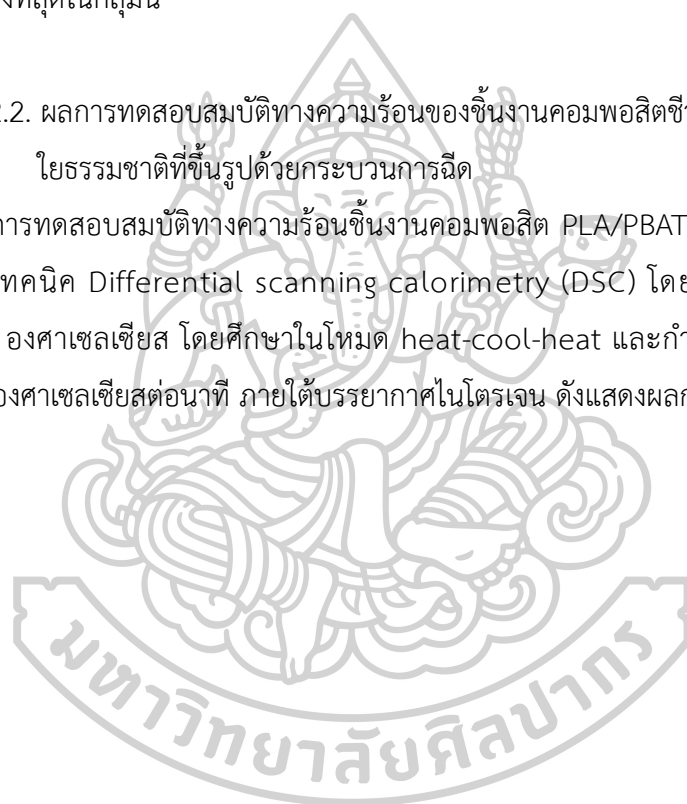
สามารถเพิ่มความต้านทานต่อการกระแทกสูงกว่า PLA/PBAT ในทางตรงกันข้ามสำหรับสูตร PS นั้น จะมีความต้านทานต่อการกระแทกลดลงเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT

ในขณะที่การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยก็ยูนังนั้นพบว่าการใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลน (HSS) และการใช้สารเชื่อมประสานไซเลนเพียงเดียว (HS) จะทำให้ชิ้นงานทดสอบมีความต้านทานต่อการกระแทกสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT

ในขณะที่สำหรับเส้นใยมะพร้าว นั้นพบว่าในชิ้นงานทดสอบทุกสูตร (CS, CSS และ CES) จะมีความต้านทานต่อการกระแทกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT และสำหรับสูตร CS จะมีความต่อการกระแทกสูงที่สุดในกลุ่มนี้

4.3.2.2. ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีด

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนชิ้นงานคอมพอสิต PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาตินั้น ได้ทดสอบด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ -50 ถึง 200 องศาเซลเซียส โดยศึกษาในโหมด heat-cool-heat และกำหนดอัตราการเพิ่ม/ลดอุณหภูมิที่ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ดังแสดงผลการทดสอบที่ได้ในตารางที่ 4.8



ตารางที่ 4.8 แสดงข้อมูลจาก DSC thermogram ของชิ้นงานคอมพอลิทีชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ โดยอ้างอิงจากการให้ความร้อนในครั้งที่ 2

สูตรการผสม	T _g (°C)		T _{cc} (°C)	ΔH _{cc} (J/g)	T _m (°C)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
	PBAT	PLA					
PLA	-	56.24	102.3	21.76	152.95	19.17	n/a
PLA/PBAT	-36.17	55.08	101.3	22.5	152.15	21.65	n/a
PS	-36.31	56.69	100.9	18.9	152.40	19.67	0.97
PSS	-36.05	56.71	100.1	21.22	152.50	23.70	3.13
PES	-35.62	56.37	98.8	22.21	147.65	26.36	5.24
HS	-33.23	66.62	99.8	18.14	153.70	18.07	n/a
HSS	-34.01	56.78	99.4	13.77	153.70	15.37	2.02
HES	-34.01	57.25	99.6	13.99	153.75	18.48	5.67
CS	-37.04	57.08	99.5	15.62	153.55	17.88	2.85
CSS	-38.6	56.23	100.05	16.81	153.75	19.33	3.18
CES	-37.32	57.81	99.3	18.68	153.75	17.26	n/a

* เนื่องจากในการคำนวณค่า X_c (%) ที่ได้นั้นติดลบ จึงรายงานเป็น n/a

จากผลการสอบที่ได้จากเทคนิค DSC พบว่าหากเปรียบเทียบผลของค่า T_g ของ PLA ก่อนและหลังเติม PBAT พบว่าหลังจากการเติม PBAT ทำให้ค่า T_g เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการเติม PBAT นั้นจะสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการยับยั้งของสายโซ่ของ PLA ได้ ทำให้ค่า T_g ลดลง ในขณะที่หากพิจารณาถึงพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมผลึก (T_m) พบว่าหลังการเติม PBAT จะทำให้ค่า T_m ลดลง เนื่องจาก PBAT นั้นจะเข้าไปรบกวนการเกิดผลึก ส่งผลให้ผลึกที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดเล็ก จึงทำให้อุณหภูมิที่ใช้นั้นลดลง แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่าการเติม PBAT นั้น ทำให้ปริมาณผลึกเกิดขึ้นนั้นเพิ่มขึ้น

ในขณะที่เมื่อพิจารณาถึงผลของการเติมเส้นใยธรรมชาติพบว่า การเติมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดนั้นส่งผลต่อค่า T_g, T_m และ X_c เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดนั้นมีความแข็งแรง และโครงสร้างที่ต่างกัน จึงทำให้มีความสามารถในการเกิดพันธะระหว่างพื้นผิวกับสารเชื่อมประสานโซเลนต่างกัน โดยจะเห็นว่าการเติมเส้นใยทุกชนิดจะทำให้ค่า T_g เพิ่มขึ้น เป็นผลจากการที่เส้นใยธรรมชาติที่เติมลงไปนั้นเกิดพันธะไฮโดรเจนกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงทำให้ความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่ได้ยากขึ้น ส่งผลต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อสายโซ่เกิดการเคลื่อนไหว [23] และหากพิจารณาถึง

ผลของกระบวนการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติด้วยการใช้สารลดแรงตึงผิวและการใช้เอนไซม์ จะส่งผลต่อโครงสร้างของเส้นใย โดยสำหรับกระบวนการที่ใช้เอนไซม์นั้นจะทำให้โครงสร้างเส้นใยเกิดการแตกออกเป็นเส้นใยเดี่ยวขนาดเล็ก ทำให้เมื่อนำไปปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนต้อ ทำให้เกิดพื้นที่ผิวในการยึดเกาะที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลเกิดเป็นตำแหน่งในเกิดผลึกได้มาก จึงทำให้ปริมาณในการเกิดผลึกสูงนั่นเอง ซึ่งเห็นได้ชัดในกรณีของเส้นใยใบสับปะรด (PSS และ PES) แต่สำหรับเส้นใย กัญชงและมะพร้าว (HSS, HES, CSS และ CES) ที่ปริมาณผลึกลดลงนั้นอาจเป็นผลจากผลการกระจายตัวของเส้นใยที่เข้าไปแทรกในสายโซ่พอลิเมอร์

จากการทดสอบสมบัติดังกล่าวพบว่ากระบวนการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิดด้วยการใช้สารลดแรงตึงผิวและเอนไซม์รวมกับการใช้สารเชื่อมประสานไซเลนต้อจะทำให้ T_g เพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มที่อุณหภูมิในหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

นอกจากนั้นแล้วงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานคอมพอสิต PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ด้วยเทคนิคด้วยเทคนิค Thermal gravitational analysis (TGA) โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยกำหนดอัตราการให้พลังงานความร้อน 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ดังแสดงผลการทดสอบที่ได้ในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าที่ได้จาก TGA thermogram ของชิ้นงานคอมพอสิต PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

สูตรการผสม	T_{onset} (°C)	T_{endset} (°C)	Inflection point (°C)	Residue (%)
PLA	349.56	379.69	369.33	1.21
PLA/PBAT	386.79	423.99	408.33	8.60
PS	347.53	378.94	366.67	4.02
PSS	333.79	376.75	361.33	20.49
PES	337.26	374.76	361.67	17.42
HS	281.69	379.22	336.33	26.18
HSS	344.76	363.51	355.67	5.74
HES	349.05	379.60	366.67	4.45
CS	347.70	380.46	366.83	4.55
CSS	341.50	366.23	354.67	5.78
CES	348.68	382.44	368.50	1.75

จากผลการทดสอบ สมบัติความเสถียรทางความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA (Thermogravimetric Analysis) พบว่าการเติม PBAT ลงใน PLA ส่งผลให้อุณหภูมิที่เริ่มเกิดการสลายตัวของ PLA/PBAT มีค่าที่สูงกว่าของ PLA โดยเพิ่มจาก 349.56 องศาเซลเซียส เป็น 386.79 องศาเซลเซียส และค่าการสลายตัวจุด inflection-point เพิ่มขึ้นจาก 369.33 องศาเซลเซียส เป็น 408.33 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติม PBAT นั้นจะช่วยเพิ่มความเสถียรทางความร้อนของชิ้นงานคอมพอสิต เนื่องจากโครงสร้างของ PBAT มีส่วนที่ทนความร้อนได้ดี ทำให้เมื่อเกิดการผสมกันจึงทำให้สามารถช่วยลดการสลายตัวของ PLA ได้บางส่วน

สำหรับผลของการเติมเส้นใยธรรมชาติชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เส้นใยสับปะรด เส้นใยมะพร้าว และเส้นใยกล้วย พบว่าค่าการเริ่มต้นสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมพอสิตที่เติมเส้นใยอยู่ในช่วง 281.69 องศาเซลเซียส ถึง 349.05 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่า T_{onset} ของ PLA/PBAT เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งสลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ (Residue) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ยกเว้นชิ้นงานทดสอบจากสูตร PSS, PES และ HS ที่จะมีปริมาณขี้เถ้าที่สูง นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานทดสอบของสูตรการผสม HES จะเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงสุด

4.3.3.3. ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอมพอสิต PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

การศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงานคอมพอสิต PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ได้ทำการทดสอบโดยใช้เทคนิค SEM ซึ่งชิ้นงานที่นำไปศึกษานั้นเตรียมมาจากชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อการดึง (tensile test) โดยผลการทดสอบที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.10 ซึ่งจากภาพที่ 4.10 a) และ b) พบว่า PBAT ที่เติมลงนั้นเกิดการกระจายตัวทั่วเมทริกซ์ของ PLA ในขณะที่ภาพ 4.10 c), e), g), i) และ k) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่เติมลงไปในนั้นเกิดการกระจายตัวทั่วพอลิเมอร์เมทริกซ์โดยช่องว่างที่เห็นนั้นเป็นบริเวณที่เส้นใยเคยยึดเกาะกับพอลิเมอร์เมทริกซ์นั่นเอง

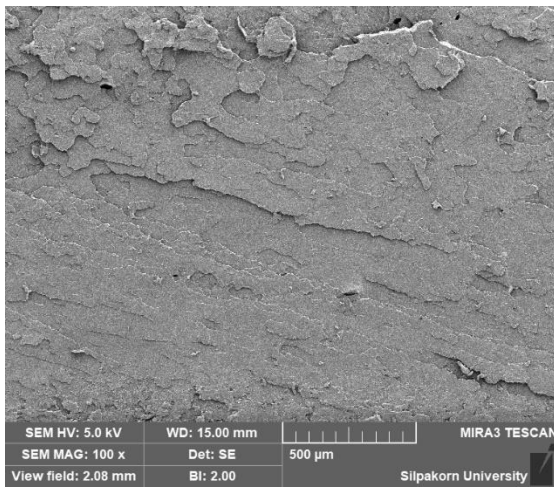
จากภาพที่ 4.10 d) แสดงให้เห็นว่าลักษณะของเส้นใยสับปะรดนั้นจะมีลักษณะเป็นเส้นแบน และเห็นเป็นร่องยาว และเมื่อจะเห็นถึงการยึดติดกับที่ผิวของเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่บริเวณผิวเส้นใย ซึ่งเป็นการยืนยันถึงประสิทธิภาพของสารเชื่อมประสานไซเลน นอกจากนั้นจะเห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวและเอนไซม์นั้นทำให้เส้นใยมีความขรุขระ และมีรูปร่างต่างจากเดิม

ในขณะที่ภาพ 4.9 j) จะเห็นได้ชัดว่าโครงสร้างของเส้นใยกล้วยนั้นมีลักษณะเป็นเส้นกลม และพื้นผิวมีลักษณะที่เรียบ เนื่องจากผ่านการกำจัดสิ่งเจือปนจากการต้มภายในหม้ออัดแรงดัน และยังสามารถเห็นการแยกออกของเส้นใยบริเวณด้านในเส้นใย และผลจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลด

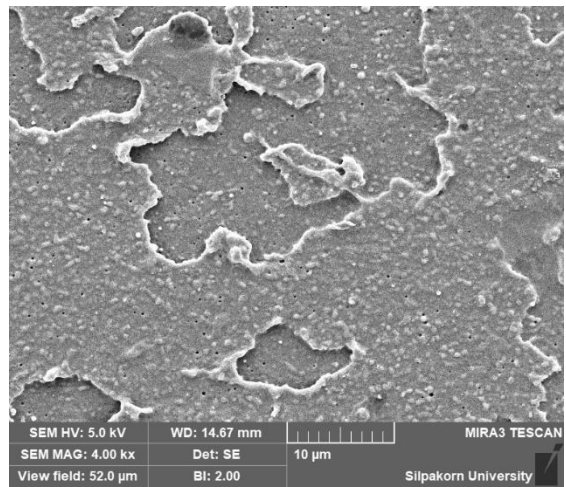
แรงดึงผิวและเอนไซม์ ดังแสดงในภาพที่ l) และ n) ตามลำดับ พบว่าเส้นใยจะมีความขรุขระที่บริเวณผิวเส้นใยมากขึ้น และยังมีการแยกออกของเส้นเป็นเส้นใยขนาดเล็ก (fibrils)

และเมื่อพิจารณาภาพที่ 4.10 p) จะเห็นว่าเส้นใยมะพร้าวที่ค่อนข้างมีความหนาและมีลักษณะผิวที่ขรุขระเล็กน้อย ในขณะที่ภาพที่ 4.10 q) และ 4.10 s) นั้นจะเห็นว่าเส้นใยมีพื้นผิวที่หยาบมากขึ้น และโครงสร้างภายในเส้นใยมีช่องว่าง ซึ่งเป็นผลการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงดึงผิวและเอนไซม์

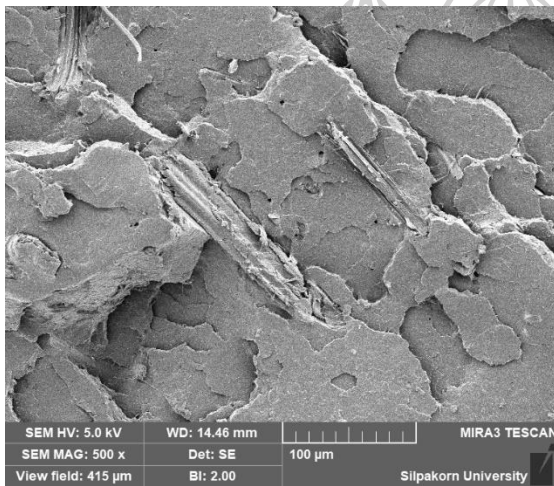




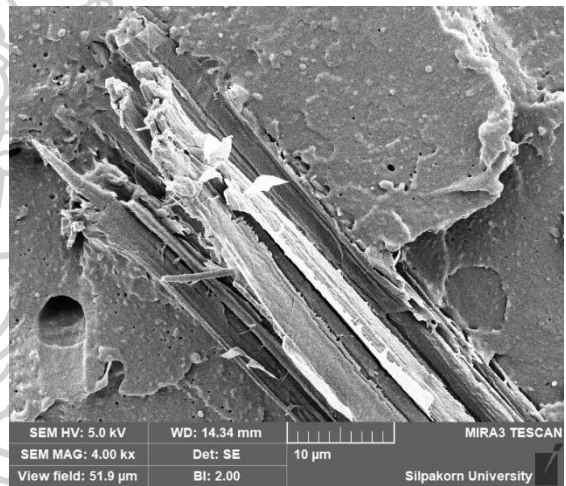
a) PLA/PBAT x100



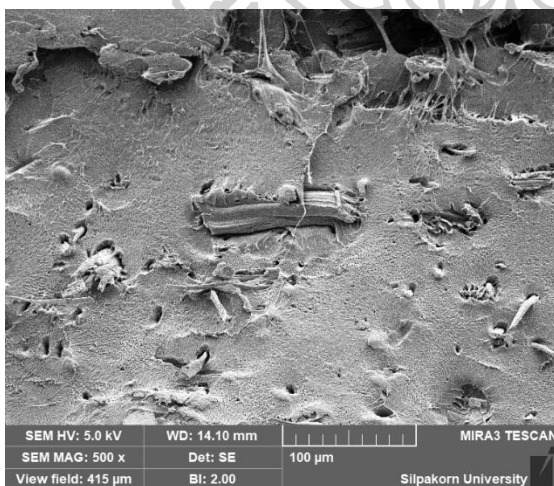
b) PLA/PBAT x4000



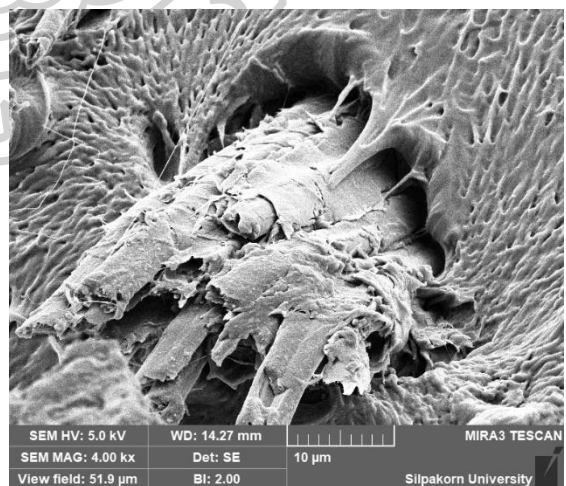
c) PS x500



d) PS x4000

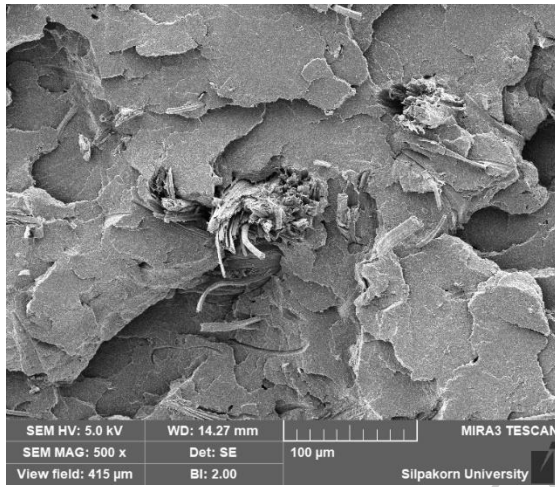


e) PSS x500

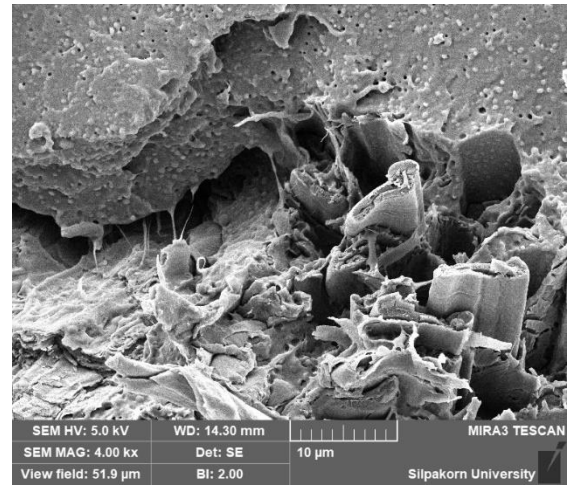


f) PSS x4000

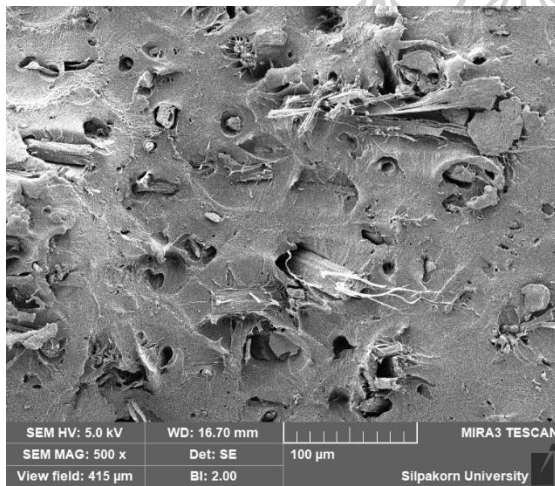
ภาพที่ 4.10 แสดงภาพ SEM ของวัสดุคอมพอสิตีผิวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการต่าง ๆ ที่กำลังขยายต่างกัน



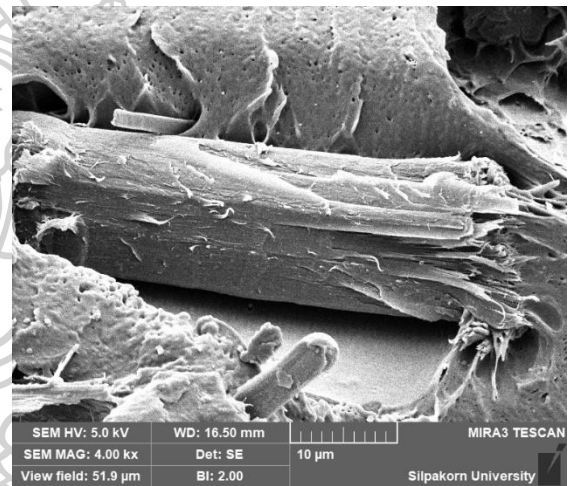
g) PES x500



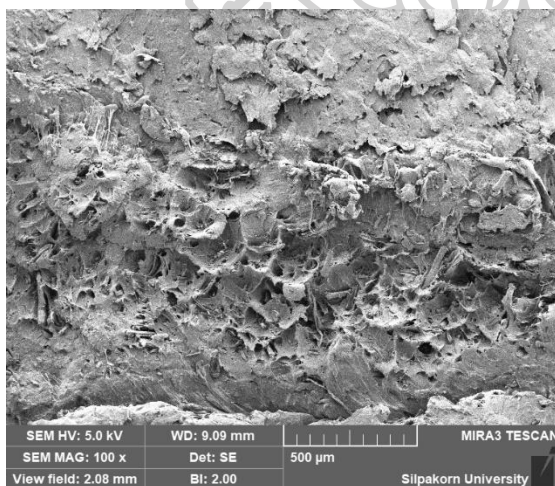
h) PES x4000



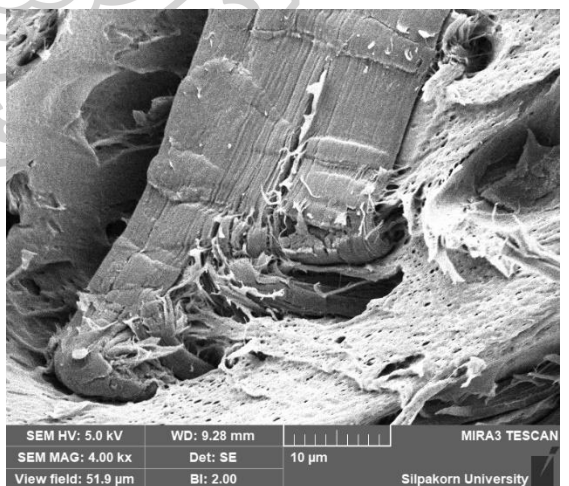
i) HS x500



j) HS x4000

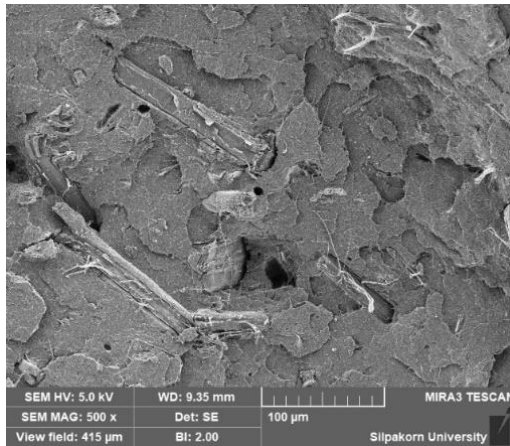


k) HSS x100

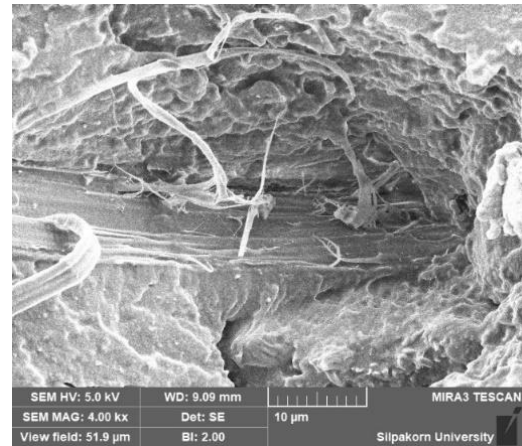


l) HSS x4000

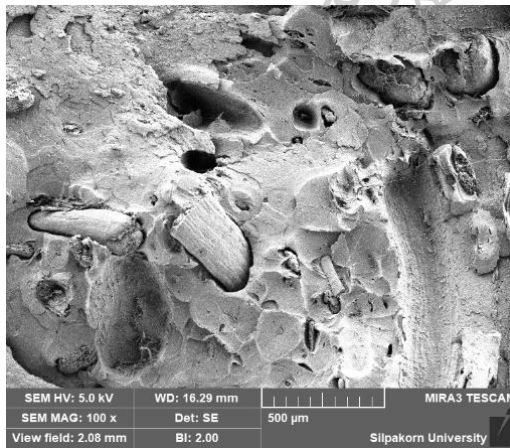
ภาพที่ 4.10 แสดงภาพ SEM ของวัสดุคอมพอสิตีผิวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการต่าง ๆ ที่กำลังขยายต่างกัน (ต่อ)



m) HES x 500

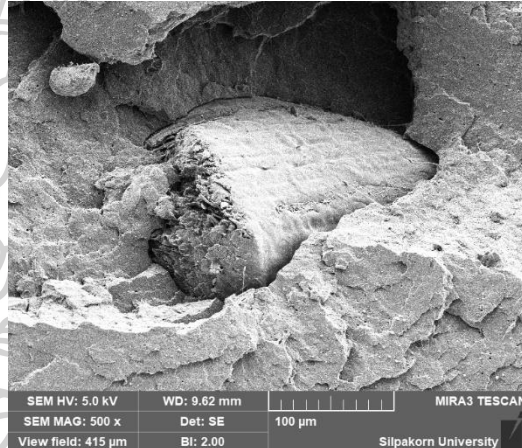


n) HES x4000



i)

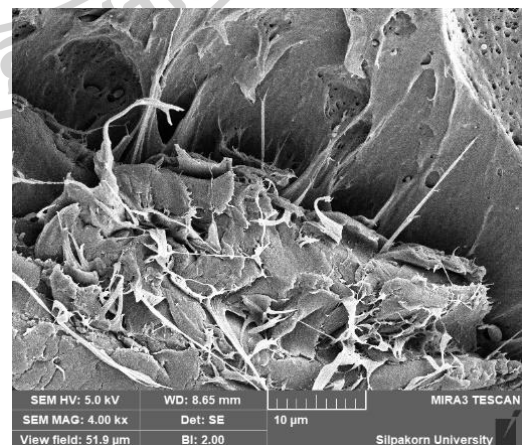
p) CS x100



q) CS x4000

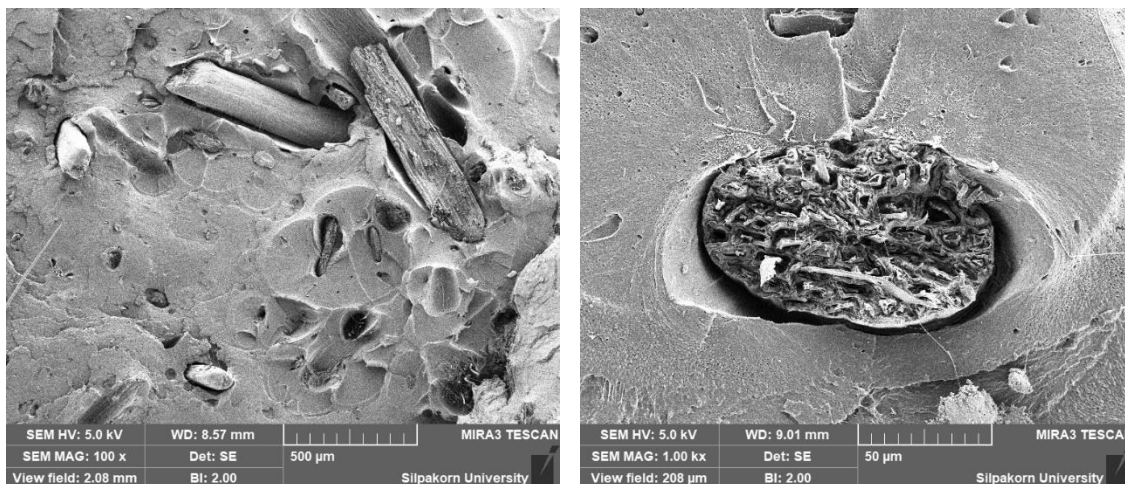


r) CSS x100



s) CSS x4000

ภาพที่ 4.10 แสดงภาพ SEM ของวัสดุคอมพอสิตีผิวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการต่าง ๆ ที่กำลังขยายต่างกัน (ต่อ)



t) CES x100

u) CES x1000

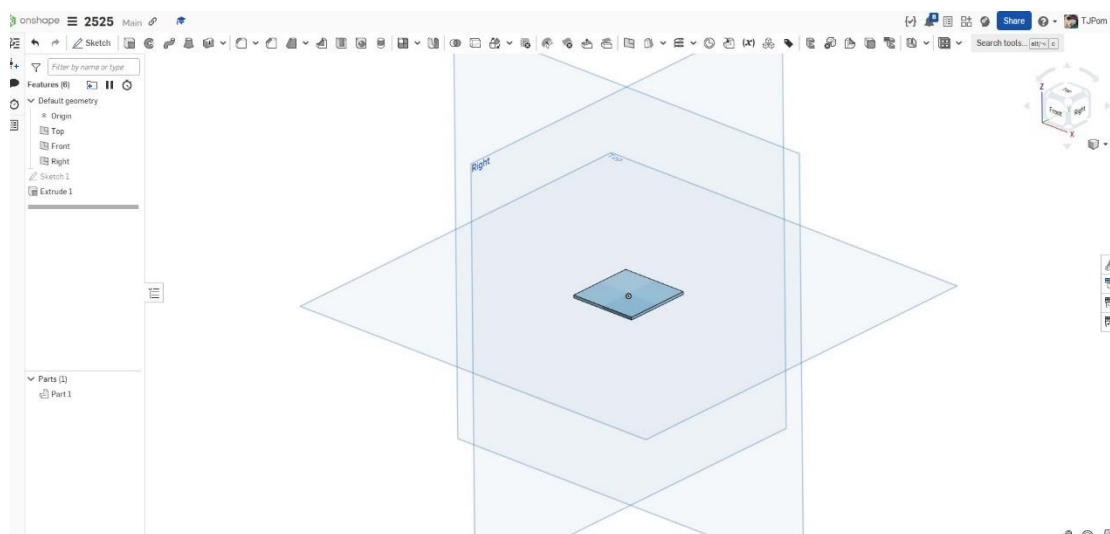
ภาพที่ 4.10 แสดงภาพ SEM ของวัสดุคอมพอลิเมอร์ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการต่าง ๆ ที่กำลังขยายต่างกัน (ต่อ)

4.4. การประเมินความเหมาะสมในการพัฒนาวัสดุคอมพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นเส้นฟิลาเมนต์ในงานพิมพ์ 3 มิติ

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสูตรการผสมระหว่างเส้นใยธรรมชาติที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวกับ PLA/PBAT นั้นสามารถนำไปใช้ในงานพิมพ์ 3 มิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบจากเส้นฟิลาเมนต์ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ ด้วยการพิมพ์ 3 มิติ โดยรูปที่ใช้ในการพิมพ์ชิ้นงานต้นแบบนี้จะออกแบบผ่านโปรแกรม oneshape ให้ชิ้นงานมีขนาด 25x25x1 มิลลิเมตร โดยแสดงดังภาพที่ 4.11 และในการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิตินั้นได้กำหนดค่าสภาวะต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 แสดงสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ

Printing condition	
Melting temperature	200 °C
Bed temp	60 °C
Brim	10 mm
Printing speed	40 mm/s
Fan speed	100%
Infill	100%



ภาพที่ 4.11 ภาพชิ้นงานที่ใช้ในการพิมพ์ 3 มิติ

ผลการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบนั้นแสดงในภาพที่ 4.12 ซึ่งจะเห็นว่าเส้นฟิลาเมนต์ที่สามารถนำมาใช้ในการขึ้นรูปได้นั้นจะเป็นสูตร PLA/PBAT/เส้นใยใบสับปะรด และ กัญชง เนื่องจากเส้นฟิลาเมนต์ PLA/PBAT/เส้นใยมะพร้าว ที่ได้นั้นมีลักษณะผิวที่หยาบ และมีขนาดไม่สม่ำเสมอทั้งเส้น จึงทำให้ควบคุมขนาดเส้นให้เท่ากันตลอดค่อนข้างยาก ส่งผลให้ขณะป้อนเส้นเข้าเครื่องพิมพ์ 3 มิตินั้นตัวเฟืองที่ทำหน้าที่ยึดจับเส้นฟิลาเมนต์ไม่สามารถยึดเกาะได้อย่างแน่นหนาเพียงพอ ส่งผลให้เส้นฟิลาเมนต์เกิดการลื่นถอยกลับระหว่างกระบวนการป้อนวัสดุ จึงทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานจากเส้นฟิลาเมนต์สูตรดังกล่าวได้นั่นเอง นอกจากนั้นแล้วทางผู้วิจัยได้ทำการจับเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป ซึ่งน้ำหนักชิ้นงาน และหาค่าการหดตัวของชิ้นงานต้นแบบ โดยแสดงผลในตารางที่ 4.11 และภาพชิ้นงานที่ขึ้นรูปได้แสดงดังภาพที่ 4.12 ซึ่งการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติพบว่าเส้นฟิลาเมนต์ PLA/PBAT/เส้นใยกัญชง นั้นจะมีการเกิดเส้นใยยืดออก (stringing) บนผิวชิ้นงานที่เย็นตัวแล้วในชิ้นงาน (HS, HSS) ในขณะที่สูตรที่มีการเติมเส้นใยใบสับปะรด (PS,PSS ,PES) จะไม่เกิดลักษณะดังกล่าว ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.13 นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาถึงผลของเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป พบว่า เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.11 แสดงน้ำหนักชิ้นงาน เวลาในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบ

สูตรการผสม	เวลา (นาที)	น้ำหนัก (mg)
PLA	5.15±0.02	0.59±0.01
PLA/PBAT	5.09±0.02	0.59±0.01
PS	5.10±0.02	0.58±0.01
PSS	5.05±0.02	0.60±0.01
PES	5.09±0.03	0.60±0.01
HS	5.10±0.02	0.57±0.01
HSS	5.08±0.02	0.58±0.01
HES	5.14±0.03	0.53±0.02

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าการหดตัวของชิ้นงานต้นแบบ

สูตรการผสม	ขนาดชิ้นงาน					
	แกน x (กำหนด 25 mm)		แกน y (กำหนด 25 mm)		แกน z (กำหนด 1 mm)	
	ค่าจริง (mm)	ร้อยละการ หดตัว	ค่าจริง (mm)	ร้อยละการ หดตัว	ค่าจริง (mm)	ร้อยละการ หดตัว
PLA	24.78±0.78	0.87±0.30	24.82±0.09	0.73±0.36	0.92±0.02	1.65±1.83
PLA/PBAT	24.80±0.09	0.80±0.36	24.90±0.08	0.40±0.34	0.99±0.01	1.50±0.53
PS	24.90±0.06	0.50±0.27	24.80±0.07	0.80±0.27	0.98±0.01	1.50±1.18
PSS	24.90±0.06	0.42±0.23	24.80±0.07	0.80±0.27	0.98±0.01	1.70±1.06
PES	24.80±0.07	0.79±0.27	24.90±0.08	0.40±0.31	0.98±0.01	2.00±0.15
HS	24.90±0.08	0.42±0.33	24.90±0.06	0.41±0.25	0.98±0.01	1.70±1.06
HSS	24.90±0.09	0.39±0.36	24.90±0.07	0.40±0.26	0.98±0.01	1.60±0.52
HES	24.80±0.07	0.79±0.27	24.80±0.07	0.40±0.31	0.98±0.01	2.00±0.15

จากผลการทดสอบดังตารางที่ 4.11 พบว่าเวลาที่ใช้ในการพิมพ์อยู่ในช่วง 5.05-5.15 นาที ซึ่งใกล้เคียงกัน สะท้อนให้เห็นว่าดัชนีการไหลมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป เนื่องจากหากพอลิเมอร์หลอมเหลวมีดัชนีการไหลที่เหมาะสม จะให้การพิมพ์มีความเสถียรแต่หากมีค่าดัชนีการไหลที่ต่ำ

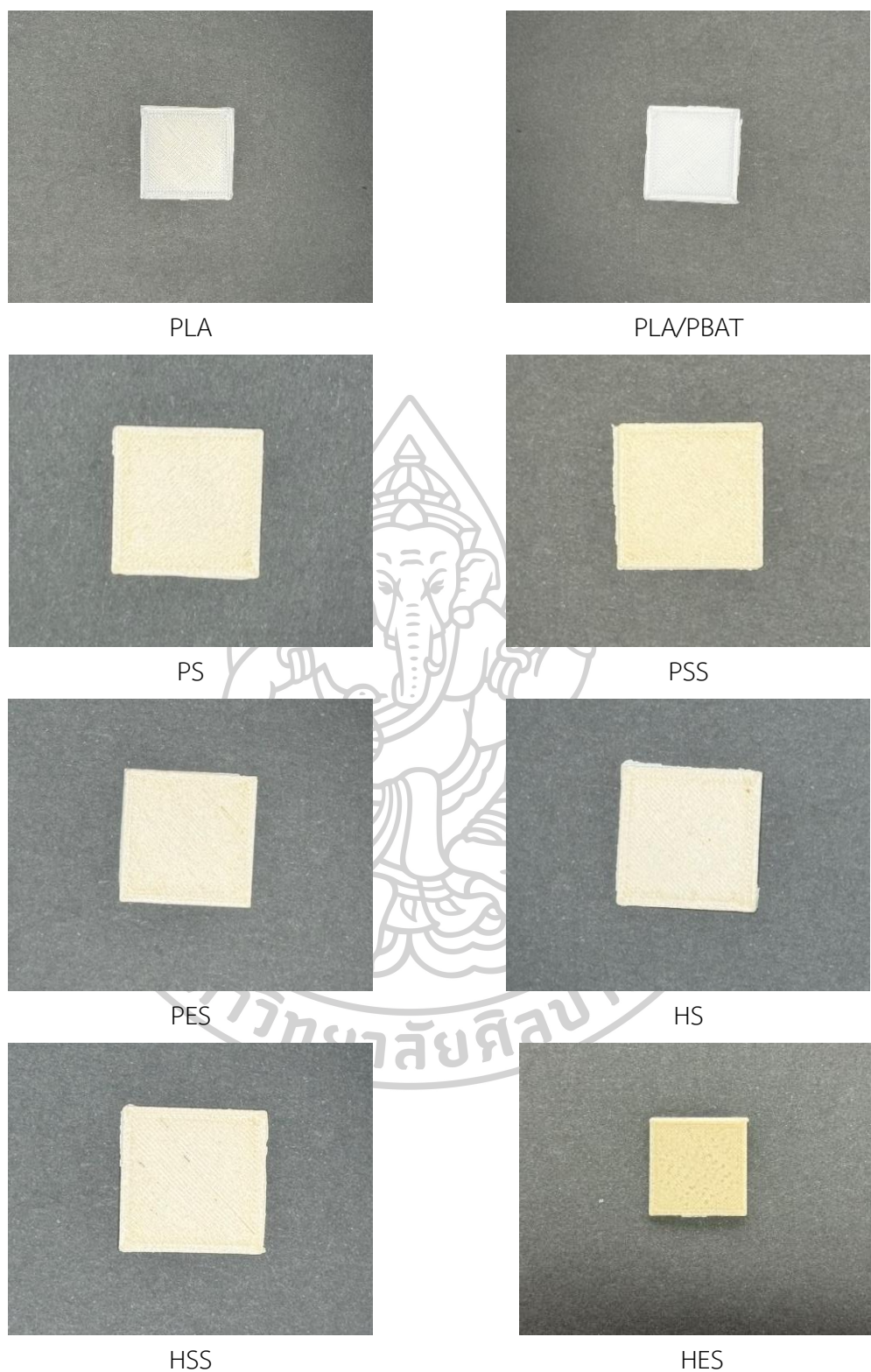
จนเกินไป จะทำให้เกิดการไหลได้ยาก ชิ้นงานไม่สมบูรณ์ และเวลาที่ใช้จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังแสดงให้
เห็นได้ชัดในสูตรการขึ้นรูปจากเส้นฟิลาเมนต์ PES

หากพิจารณาน้ำหนักของชิ้นงาน พบว่า สูตร PLA และ PLA/PBAT มีน้ำหนักชิ้นงานอยู่ที่
0.59 กรัม ซึ่งสูงกว่าสูตรอื่นเล็กน้อย เนื่องจากวัสดุเดิมมีค่าดัชนีการไหลสูง ทำให้การอัดแน่นและการ
ไหลในหัวฉีดเกิดได้ดี ขณะที่สูตร PS, HS และ HES มีน้ำหนักลดลงเล็กน้อย (0.53–0.58 กรัม) แสดง
ถึงการกระจายตัวของเส้นใยธรรมชาติที่ส่งผลให้การอัดแน่นของเนื้อวัสดุลดลงบ้างตามโครงสร้าง
ภายใน

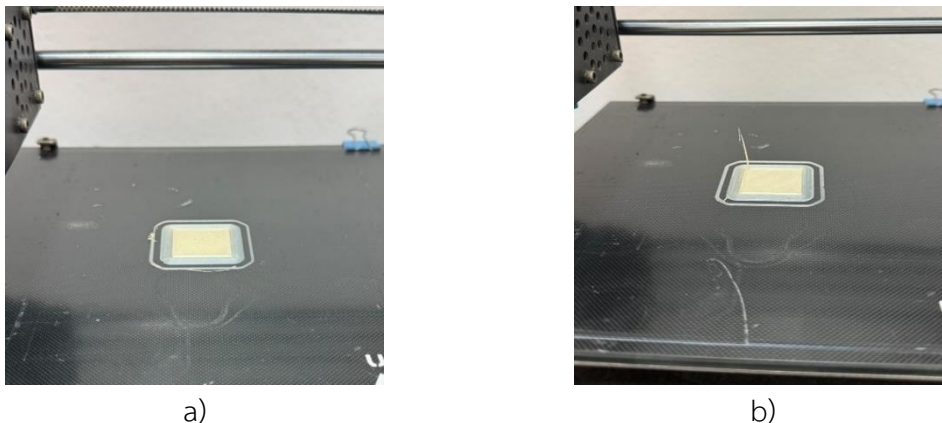
ด้านการหดตัว พบว่า สูตร PSS และ PES มีค่าการหดตัวในทิศทางแกน X สูงที่สุด
สอดคล้องกับค่า MFI ที่สูงกว่าสูตรอื่น ทำให้วัสดุไหลได้ดี ซึ่งทำให้เกิดการกันระหว่างชั้นที่ค่อนข้าง
หนา ทำให้สามารถเกิดการหดตัวเชิงราบมากขึ้นหลังจากการเย็นตัว

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกล พบว่าสูตรที่มีการปรับปรุงผิวเส้นใย (เช่น PSS, PES,
HSS) มีค่าความแข็งแรงและความยืดหยุ่นในระดับดี ช่วยให้ชิ้นงานมีความคงรูป ลดการเสียรูปและหด
ตัวในแนวราบได้ดีกว่าสูตรที่ไม่ได้ปรับปรุงผิว เช่น PS และ HS ที่อาจมีการกระจายตัวของเส้นใยต่ำ
กว่า ส่งผลให้การควบคุมการหดตัวยังไม่สมบูรณ์





ภาพที่ 4.12 แสดงชิ้นงานต้นแบบจากการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเส้นฟิลาเมนต์ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ



ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบการเกิดการ stringing ในชิ้นงาน

a) PLA/PBAT/เส้นใยโอบีบัสประรด b) PLA/PBAT/กัญชง

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่พิมพ์ขึ้นได้สำเร็จ พบว่าเส้นฟิลาเมนต์ที่เติมเส้นใยโอบีบัสประรดและเส้นใยกัญชงที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน (PSS, HSS) แสดงผลการขึ้นรูปที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยสามารถพิมพ์ได้ต่อเนื่อง มีเวลาในการขึ้นรูปใกล้เคียงกัน ชิ้นงานมีน้ำหนักคงที่ และค่าการหดตัวในแต่ละทิศทางอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ไม่เกิดการเสียรูปหรือบิดเบี้ยว นอกจากนี้ยังมีค่าดัชนีการไหลของหลอมเหลว (MFI) อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการพิมพ์ และมีสมบัติเชิงกลรวมถึงสมบัติทางความร้อนที่ช่วยเสริมให้ชิ้นงานมีความคงตัวเชิงมิติที่ดี จึงสามารถสรุปได้ว่าสูตร PSS และ HSS เป็นสูตรวัสดุที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นเส้นฟิลาเมนต์สำหรับการใช้งานจริงในกระบวนการพิมพ์สามมิติ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลวิจัย

จากการศึกษาการพัฒนาวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติในพอลิเมอร์แมทริกซ์ PLA/PBAT โดยมีปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยด้วยเทคนิคต่าง ๆ เพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเมทริกซ์ สามารถแบ่งการวิเคราะห์ผลได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่า สูตรที่มีอัตราส่วนการผสม PLA/PBAT เท่ากับ 90/10 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นถึงการเลื่อนของค่า T_g เข้าหากันในระดับหนึ่ง ซึ่งสามารถสนับสนุนว่าทั้งสองพอลิเมอร์สามารถเข้ากันได้ดีในอัตราส่วนนี้ อาจมีสาเหตุมาจากการแทรกตัวของโซ่พอลิเมอร์ PBAT เข้าไปใน PLA ได้ในระดับที่ยังไม่เกิดการเฟสแยกอย่างชัดเจน จึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีลักษณะกึ่งเข้ากันได้ (partially miscible)

จากการเตรียมเส้นใยธรรมชาติด้วยการต้มในหม้ออัดแรงดันที่เวลา 2 ชั่วโมง พบว่าเส้นใยเกิดการแยกตัวออกจากพวงรวมเกาะ (bundles) อย่างชัดเจน และเมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าพื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งเอื้อต่อการยึดเกาะกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ TGA ยังแสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ผ่านการต้มในหม้ออัดแรงดันมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเส้นใยที่ไม่ผ่านการต้ม

จากการทดสอบดัชนีการไหล (MFI) พบว่าการเติมเส้นใยธรรมชาติมีผลต่อค่าดัชนีการไหลของคอมพอสิต โดยสูตรการผสมที่เติมเส้นใยใบสับปะรดที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน (PSS) จะให้ค่า MFI สูงที่สุดที่ 23.12 กรัม/10 นาที อาจเป็นผลมาจากการที่เส้นใยใบสับปะรดที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารลดแรงตึงผิวและสารเชื่อมประสานไซเลนมีการกระจายตัวดี ทำให้แรงต้านภายในของพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยมากเกินไปในระหว่างการไหล ส่งผลให้ความหนืดของระบบลดลงเล็กน้อย และทำให้ค่า MFI สูงขึ้น ซึ่งการไหลที่ดีและอาจเหมาะสมกับการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ FDM

จากการทดสอบความต้านทานต่อการดึง พบว่าวัสดุคอมพอสิตที่ผสมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนเพียงอย่างเดียว (PS, HS, CS) มีค่า tensile strength 66.28 ± 1.18 , 67.15 ± 1.44 , 64.52 ± 1.19 MPa ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าวัสดุคอมพอสิต PLA/PBAT ที่ไม่เติมเส้นใยธรรมชาติ (ค่า tensile strength 60.04 ± 2.64 MPa) และยังพบว่าวัสดุคอมพอสิตที่เติมเส้นใยมะพร้าวซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน (CSS) มีค่า tensile strength 61.20 ± 1.20 MPa ซึ่งสูงกว่าวัสดุคอมพอสิต

PLA/PBAT ที่ไม่เติมเส้นใยธรรมชาติอีกด้วย ดังนั้นเส้นใยธรรมชาติที่เติมเข้าไปทำหน้าที่เสริมแรงได้ดี ทั้งนี้เป็นผลของการเสริมแรงจากเส้นใยที่กระจายตัวได้ดีและมีการยึดเกาะกับเมทริกซ์อย่างเหมาะสม โดยเฉพาะเมื่อเส้นใยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยไซเลน จะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับเมทริกซ์ PLA/PBAT ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการถ่ายเทแรงระหว่างเฟสได้ดีขึ้น

จากการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอ พบว่าวัสดุคอมพอสิตที่ผสมเส้นใยธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนเพียงอย่างเดียว (PS, HS, CS) มีค่า flexural strength 133.30 ± 1.80 , 138.72 ± 0.97 , 129.20 ± 1.40 MPa ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าวัสดุคอมพอสิต PLA/PBAT ที่ไม่เติมเส้นใยธรรมชาติ (ค่า flexural strength 127.88 ± 1.57 MPa) ในขณะเดียวกัน วัสดุคอมพอสิตที่เติมเส้นใยใบสับปะรดซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยการใช้เอนไซม์ร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน (PES) ให้ค่า flexural strength 154.28 ± 0.67 MPa ซึ่งสูงกว่าค่า flexural strength ของ PLA/PBAT แสดงให้เห็นความต้านทานต่อการโค้งงอที่ดีขึ้น เนื่องจากเส้นใยที่เติมลงไปมีแนวโน้มจัดเรียงในทิศทางของการขึ้นรูป ส่งผลให้วัสดุสามารถต้านการโค้งงอและเสีรูปร่างได้มากขึ้น

จากการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการกระแทก พบว่าในวัสดุคอมพอสิตที่เติมเส้นใยใบสับปะรดซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน และการใช้เอนไซม์ร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน มีค่า impact strength 3.91 ± 0.21 และ 4.05 ± 0.37 MPa ตามลำดับ ในขณะที่สูตรคอมพอสิตที่มีการเติมเส้นใยกล้วย และเส้นใยมะพร้าว ซึ่งผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน การใช้เอนไซม์ร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน และใช้สารเชื่อมประสานไซเลนเพียงอย่างเดียวจะมีค่า impact strength 3.91 ± 0.21 , 4.48 ± 0.43 , 3.52 ± 0.24 , 4.05 ± 0.37 , 3.90 ± 0.10 และ 3.82 ± 0.18 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าคอมพอสิตสูงกว่าวัสดุคอมพอสิต PLA/PBAT ที่ไม่เติมเส้นใยธรรมชาติซึ่งมีค่า impact strength 3.63 ± 1.28 MPa ในทางตรงกันข้ามคอมพอสิตที่เติมเส้นใยใบสับปะรดซึ่งปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลนเพียงอย่างเดียวจะมีค่า impact strength 3.20 ± 0.25 MPa ซึ่งลดลงเมื่อเทียบกับวัสดุคอมพอสิต PLA/PBAT ที่ไม่เติมเส้นใยธรรมชาติ

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน พบว่าค่า T_m ของคอมพอสิตในสูตรต่าง ๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากสูตร PLA/PBAT ซึ่งอาจเป็นผลจากการจัดเรียงโซ่พอลิเมอร์ที่ดีขึ้นเนื่องจากการเสริมแรง ในขณะที่อุณหภูมิเริ่มการสลายตัว (T_{onset}) ลดลงในหลายสูตร โดยเฉพาะสูตรที่มีการเติมเส้นใยกล้วยที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (HS) ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด

และจากการทดสอบสัณฐานวิทยา (Morphology) ซึ่งภาพ SEM ของคอมพอสิตแสดงให้เห็นว่า การปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติมีผลต่อการยึดเกาะกับเมทริกซ์ PLA/PBAT โดยเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงมีพื้นผิวขรุขระและสามารถยึดเกาะกับเมทริกซ์ได้ดี

ในการขึ้นรูปชิ้นงานต้นแบบพบว่าเส้นฟิลาเมนต์ที่เติมเส้นใยไบสัปอะรตและกัญชง (PS, PSS, PES, HS, HSS และ HES) สามารถขึ้นรูปขึ้นรูปงานได้ ในขณะที่เส้นฟิลาเมนต์ที่มีการเติมเส้นใยมะพร้าวไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากขนาดของเส้นมีความไม่สม่ำเสมอ จึงไม่สามารถป้อนเส้นฟิลาเมนต์เข้าเครื่องพิมพ์ 3 มิติได้ และเมื่อทำการจับเวลาและชั่งน้ำหนักชิ้นงานต้นแบบพร้อมวัดการหดตัวของชิ้นงาน พบว่าเส้นฟิลาเมนต์ที่เติมเส้นใยทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารเชื่อมประสานไซเลน (PSSและ HSS) จะมีความเสถียรของการพิมพ์ 3 มิติอย่างต่อเนื่อง โดยพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลออกจากหัวพิมพ์นั้นไหลได้อย่างต่อเนื่องไม่ขาดออก เนื่องจากเส้นใยไบสัปอะรตมีโครงสร้างที่ละเอียดและเส้นใยยาว ซึ่งช่วยให้สามารถจัดเรียงในแนวเดียวกับการไหลของพอลิเมอร์ขณะขึ้นรูป จึงเอื้อต่อการไหลของวัสดุในหัวพิมพ์และลดการเกิดการอุดตัน และเส้นใยกัญชงนั้นมีความยืดหยุ่นและความเหนียวสูง จึงสามารถทนแรงตึงระหว่างการเดินทางผ่านหัวพิมพ์ได้ดี ช่วยให้เส้นฟิลาเมนต์ไม่ขาดง่าย และยังส่งผลต่อความแข็งแรงของชิ้นงาน แต่ถึงอย่างไรก็ตามเส้นใยกัญชงจะทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวนั้นมีความหนืดเพิ่มขึ้น จึงควรเลือกการปรับปรุงพื้นผิวที่เหมาะสมเพื่อทำให้การไหลผ่านหัวพิมพ์เกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอ



5.2. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากในงานวิจัยมีการกำหนดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และเอนไซม์ที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยธรรมชาติที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับเส้นใย ดังนั้นจึงควรศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ของวัสดุคอมพอสิตต่อไป

เนื่องจากเส้นใยที่เลือกใช้เป็นสารเสริมแรงนั้นเป็นเส้นใยธรรมชาติทำให้สามารถควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้ยาก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงจึงควรควบคุมค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (L/D ratio) ก่อนนำมาใช้เป็นสารเสริมแรง

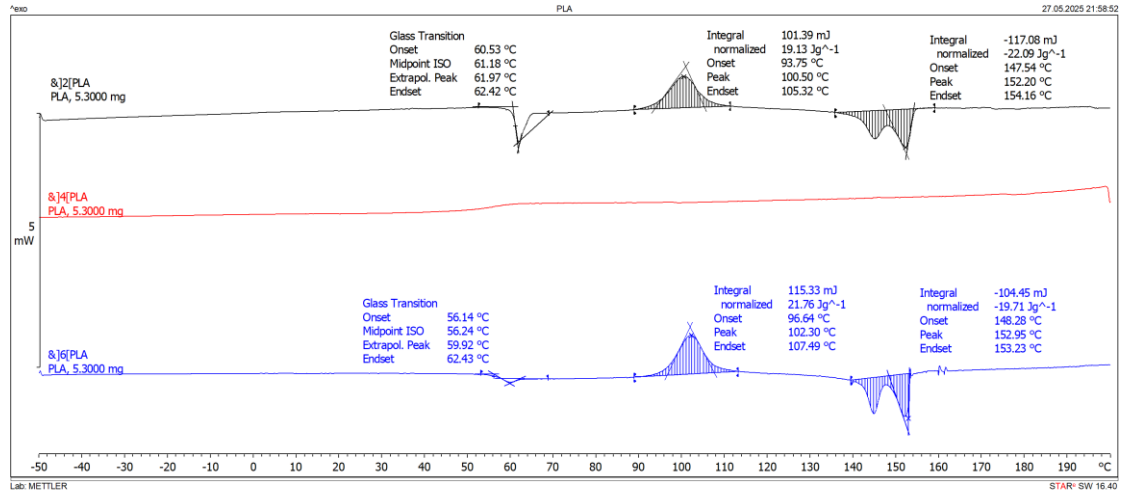
เนื่องจากการขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมมีการออกแบบรูปทรงเพียงรูปทรงเดียว จึงควรพิจารณาในรูปทรงอื่นที่มีความหลากหลายและซับซ้อน และควรนำรูปทรงที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน แล้วนำมาเทียบผลการทดสอบที่ได้จากชิ้นงานในกระบวนการอัดฉีดพลาสติก นอกจากนี้ยังควรศึกษาถึงผลของพารามิเตอร์ในการพิมพ์ เช่น ความเร็ว หรืออุณหภูมิของหัวฉีด นอกจากนี้ยังควรหาความคุ้มค่าในการใช้เส้นฟิลาเมนต์ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติเทียบกับเส้นฟิลาเมนต์ในท้องตลาด



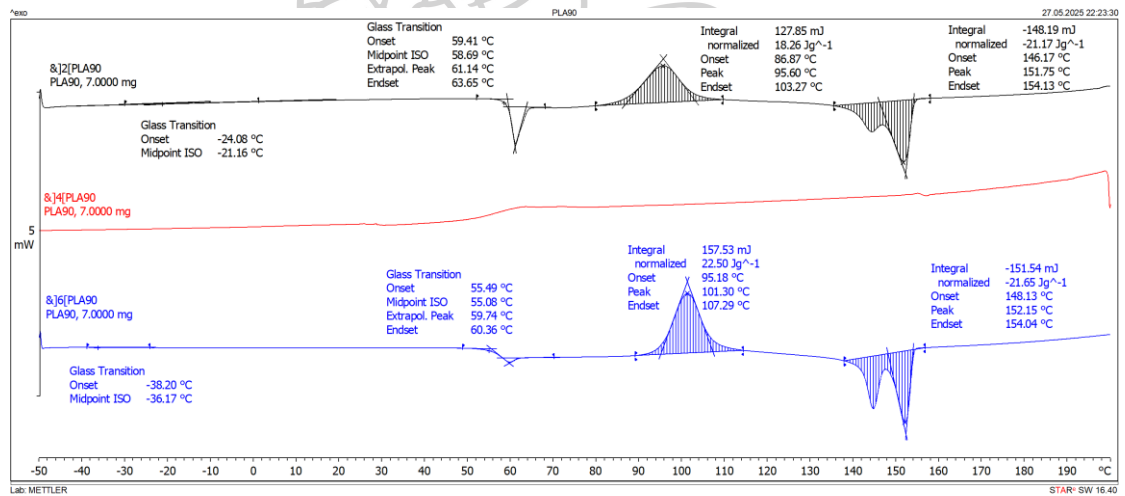




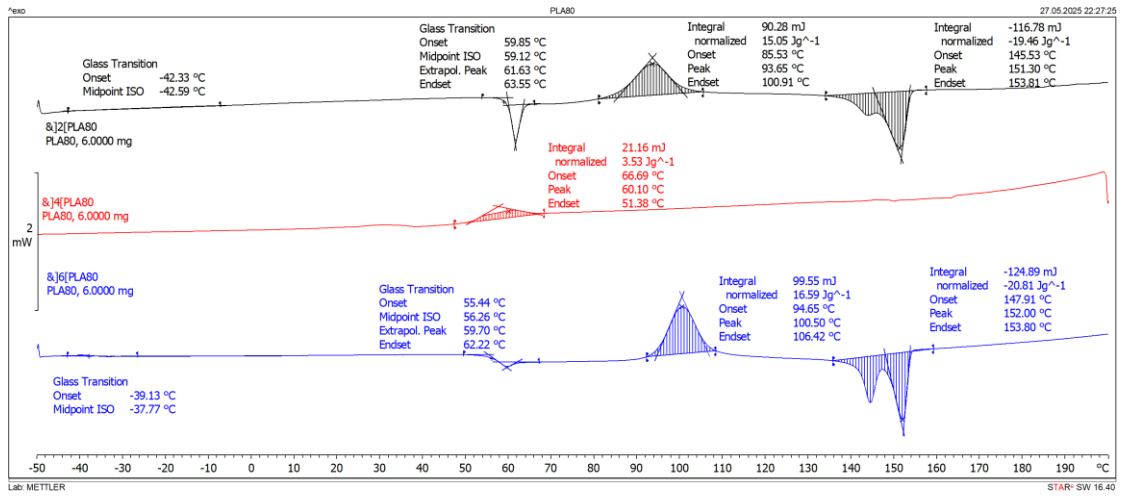
ผลการศึกษสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT



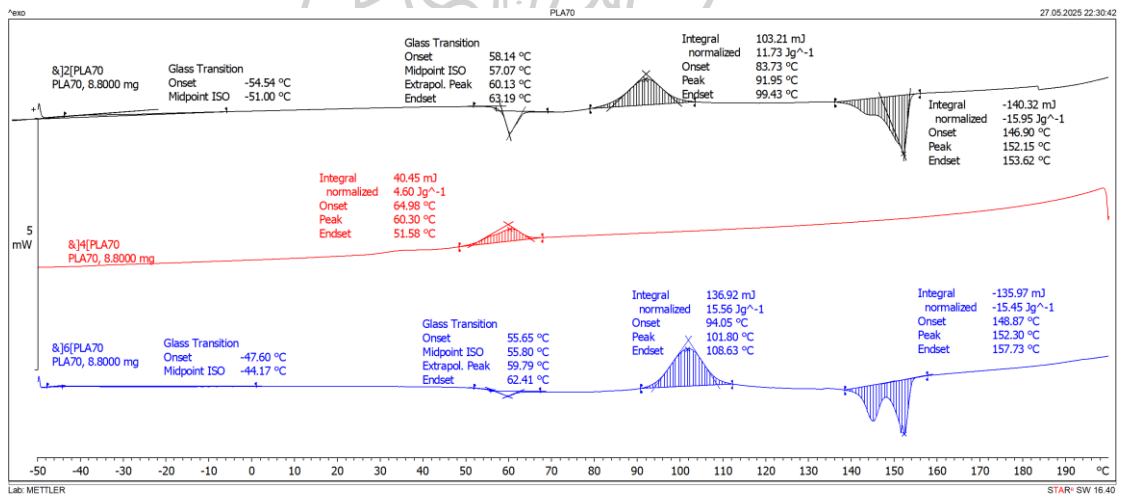
ภาพที่ ก.1 DSC thermogram ของ 100PLA



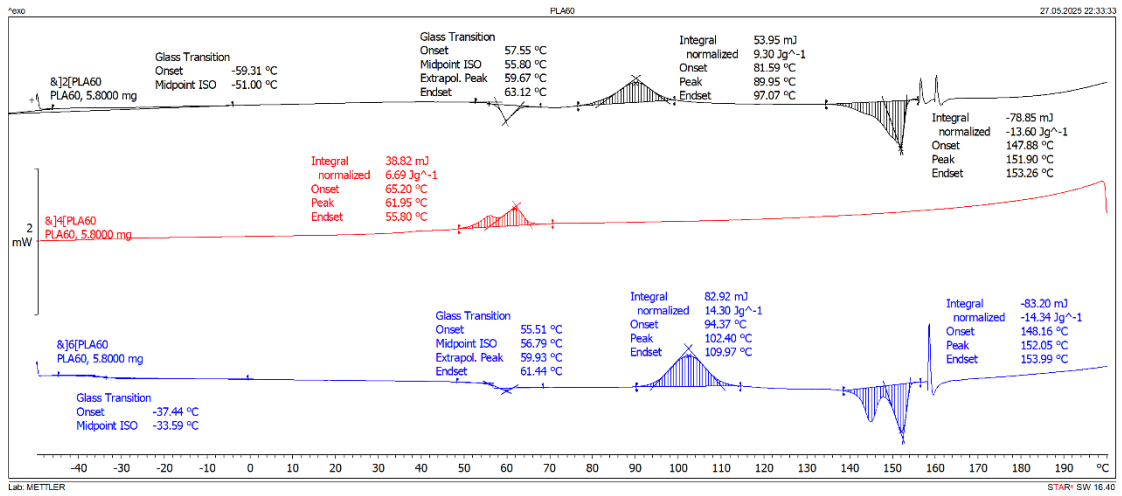
ภาพที่ ก.2 DSC thermogram ของ 90PLA/10PBAT



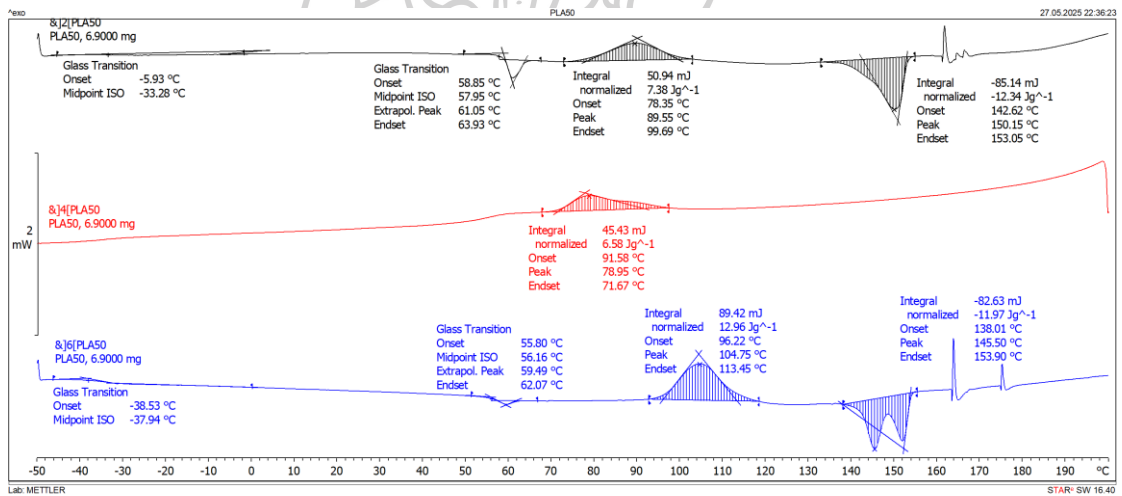
ภาพที่ ก.3 DSC thermogram ของ 80PLA/20PBAT



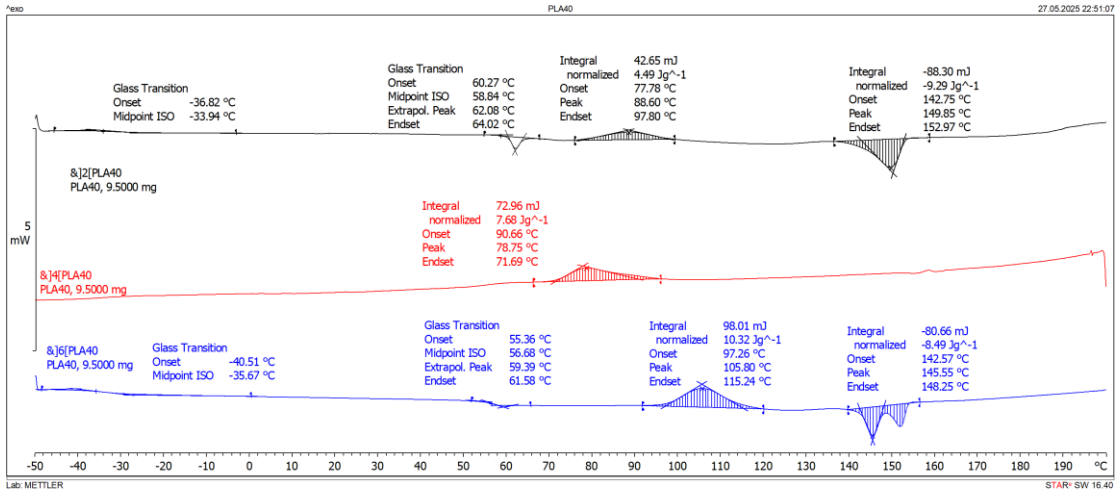
ภาพที่ ก.4 DSC thermogram ของ 70PLA/30PBAT



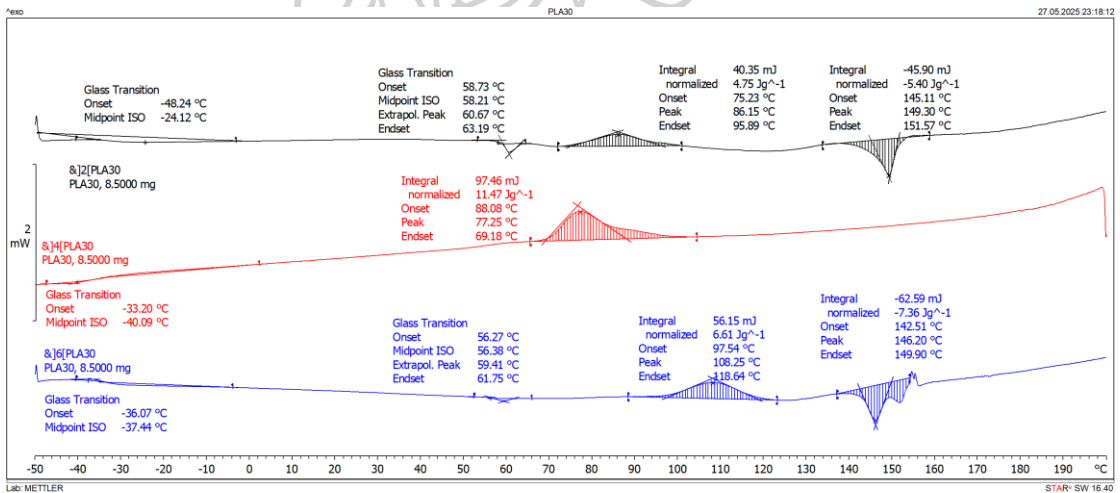
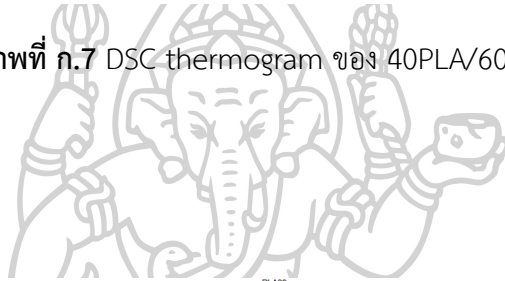
ภาพที่ ก.5 DSC thermogram ของ 60PLA/40PBAT



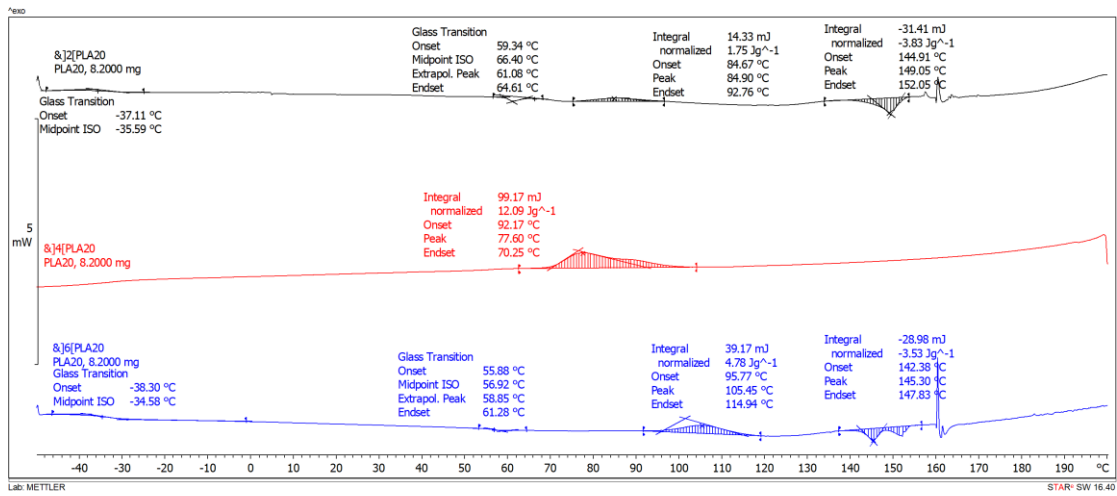
ภาพที่ ก.6 DSC thermogram ของ 50PLA/50PBAT



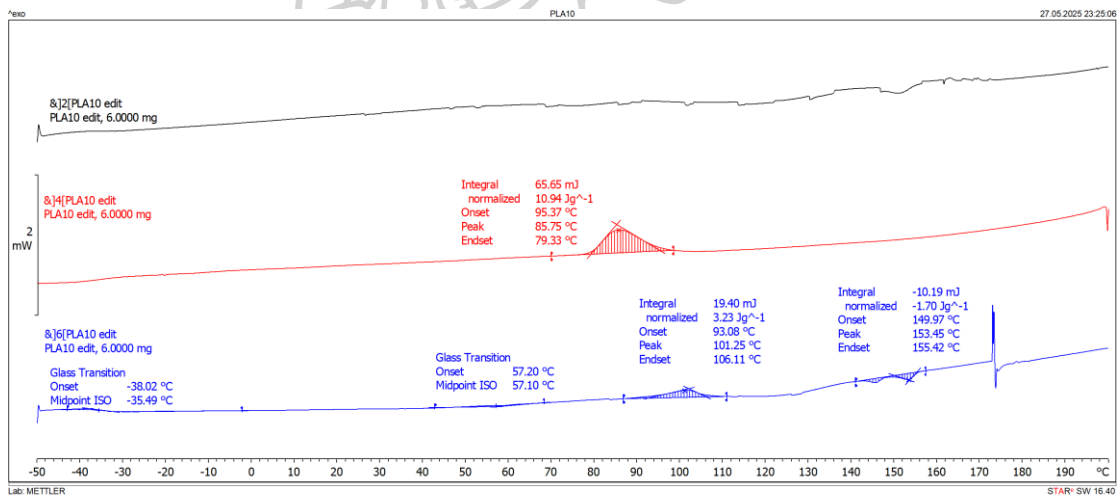
ภาพที่ ก.7 DSC thermogram ของ 40PLA/60PBAT



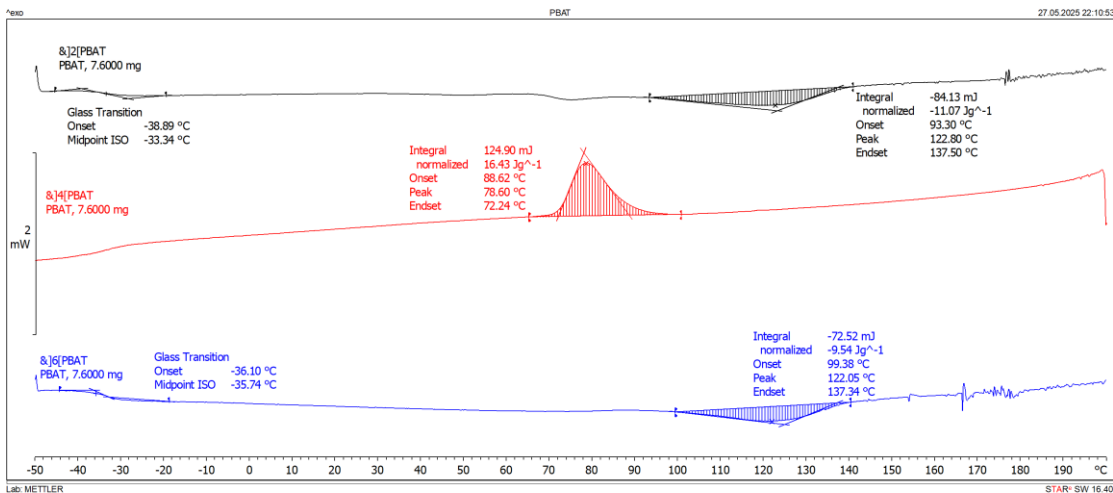
ภาพที่ ก.8 DSC thermogram ของ -ของ 30PLA/70PBAT



ภาพที่ ก.9 DSC thermogram ของ 20PLA/80PBAT



ภาพที่ ก.10 DSC thermogram ของ 10PLA/90PBAT



ภาพที่ ก.11 DSC thermogram ของ 100PBAT



ผลการทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอสิตชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

สูตรการผสม	ครั้งที่	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กรัม)	MFI (กรัม/10นาทีก)	ค่าเฉลี่ยMFI (กรัม/10นาทีก)	SD
PLA	1	243.34	2.01	4.96	4.42	0.62
	2	247.97	2.02	4.89		
	3	274.51	1.67	3.65		
	4	287.52	2.01	4.19		
PLA/PBAT	1	83.60	2.20	15.79	13.44	2.29
	2	97.32	1.82	11.22		
	3	90.59	2.01	13.31		
PS	1	92.72	2.04	13.20	14.07	1.10
	2	87.57	2.29	15.69		
	3	90.40	2.07	13.74		
	4	90.02	2.05	13.66		
PSS	1	52.67	2.07	23.58	23.21	0.37
	2	52.78	2.01	22.85		
	3	52.47	2.03	23.21		
PES	1	77.08	2.04	15.88	17.01	0.98
	2	68.78	2.01	17.53		
	3	68.50	2.01	17.61		

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบดัชนีการไหลของวัสดุคอมพอลิทีชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ (ต่อ)

สูตรการผสม	ครั้งที่	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กรัม)	MFI (กรัม/10นาที)	ค่าเฉลี่ยMFI (กรัม/10นาที)	SD
HS	1	98.82	2.04	12.39	11.43	0.83
	2	111.67	2.02	10.96		
	3	110.80	2.02	10.94		
HSS	1	114.22	2.07	10.87	12.48	4.08
	2	70.85	2.10	17.78		
	3	148.96	2.02	8.14		
	4	89.05	1.95	13.14		
HES	1	129.57	2.03	9.40	9.51	1.56
	2	151.45	2.02	8.00		
	3	108.46	2.01	11.12		
CS	1	101.87	2.05	12.07	13.22	0.80
	2	87.37	2.01	13.80		
	3	81.41	1.80	13.27		
	4	87.77	2.01	13.74		
CSS	1	94.62	1.99	12.62	12.74	0.59
	2	98.27	2.00	12.21		
	3	90.61	2.02	13.38		
CES	1	80.02	2.02	15.15	13.38	1.58
	2	100.65	2.03	12.10		
	3	93.47	2.01	12.90		

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของวัสดุคอมพอลิทีชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.44	3.53	69.72	17.43	1196.25
2	13.50	3.47	73.36	11.79	1155.96
3	13.48	3.49	66.92	14.86	855.89
4	13.51	3.45	72.74	12.61	1085.24
5	13.51	3.46	73.07	20.42	1212.88
6	13.48	3.45	72.48	17.76	1200.76
7	13.46	3.47	62.96	14.44	1159.26
		Mean	70.18	15.62	1123.75
		S.D	3.94	3.07	125.61



ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.48	3.57	59.26	12.20	1001.88
2	13.50	3.51	59.12	13.61	1038.78
3	13.50	3.51	60.93	12.53	1045.46
4	13.50	3.46	61.86	15.36	1069.12
5	13.51	3.49	60.23	18.59	1061.59
6	13.50	3.48	54.52	18.59	1051.25
7	13.79	3.46	63.04	10.46	872.47
8	13.53	3.44	63.24	13.03	913.85
9	13.53	3.47	60.78	13.20	980.42
10	13.52	3.46	62.48	11.62	1006.09
11	13.52	3.46	61.05	12.20	835.79
12	13.59	3.47	58.31	18.59	1059.16
13	13.46	3.44	61.92	18.84	1098.12
14	13.53	3.48	60.83	18.51	1048.06
15	13.53	3.50	54.33	15.11	1044.59
16	13.53	3.52	54.52	13.70	989.09
		Mean	59.78	14.76	1007.23
		S.D	2.97	2.94	74.18

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/PS

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.52	3.40	67.37	15.36	1211.57
2	13.52	3.58	67.55	17.85	1199.39
3	13.55	3.39	66.46	13.45	1130.13
4	13.50	3.41	65.42	15.54	1152.12
5	13.51	3.44	67.20	15.85	1130.72
6	13.52	3.39	64.44	9.38	1145.48
7	13.52	3.40	67.37	15.36	1211.57
		Mean	66.54	14.68	1168.71
		S.D	1.19	2.67	37.33

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/PSS

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.44	3.64	58.14	10.38	1027.85
2	13.43	3.63	56.24	9.96	986.80
3	13.44	3.63	57.23	10.79	1236.75
4	13.45	3.64	55.85	10.54	1135.61
5	13.45	3.65	52.35	10.46	1129.25
6	13.42	3.67	54.73	9.63	1069.14
7	13.45	3.65	52.65	10.04	1122.41
		Mean	55.31	10.26	1101.12
		S.D	2.20	0.40	81.95

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/PES

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.46	3.59	56.21	9.96	1112.79
2	13.49	3.58	54.66	10.13	1083.34
3	13.47	3.55	51.26	9.55	1069.08
4	13.49	3.55	50.34	8.80	847.51
5	13.48	3.53	54.25	9.96	1237.00
Mean			53.34	9.68	1069.94
S.D			2.46	0.54	140.89

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/HS

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.52	3.66	68.05	15.35	1080.66
2	13.51	3.70	64.75	11.79	1185.13
3	13.53	3.55	66.94	16.52	1061.61
4	13.51	3.83	69.73	17.43	1078.89
5	13.53	3.63	66.89	15.85	1097.51
6	13.52	3.72	67.54	15.60	1176.97
7	13.50	3.76	66.15	9.30	1016.91
8	13.52	3.66	67.15	17.09	1027.23
Mean			67.15	14.87	1090.61
S.D			1.44	2.84	62.07

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/HSS

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.52	3.58	55.13	8.30	1090.70
2	13.44	3.67	58.48	6.64	1096.41
3	13.45	3.84	61.56	12.06	1055.36
4	13.64	3.62	59.53	10.38	1093.21
5	13.43	3.29	55.88	6.56	1052.87
6	13.55	3.55	57.05	8.88	1087.02
7	13.62	3.56	61.47	11.04	1122.94
8	13.55	3.53	63.21	14.36	1093.52
9	13.52	3.62	58.10	9.13	1088.58
		Mean	58.93	9.71	1086.73
		S.D	2.74	2.66	21.34

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/HES

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.54	3.39	55.63	9.30	1115.95
2	13.52	3.39	54.35	8.97	1123.88
3	13.53	3.37	54.03	7.31	1136.07
4	13.52	3.36	54.98	10.13	1123.32
5	13.53	3.37	54.41	7.80	1132.71
6	13.54	3.39	58.69	7.31	1120.69
7	13.55	3.39	53.14	8.47	1134.98
		Mean	55.03	8.47	1126.80
		S.D	1.79	1.07	7.78

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/CS

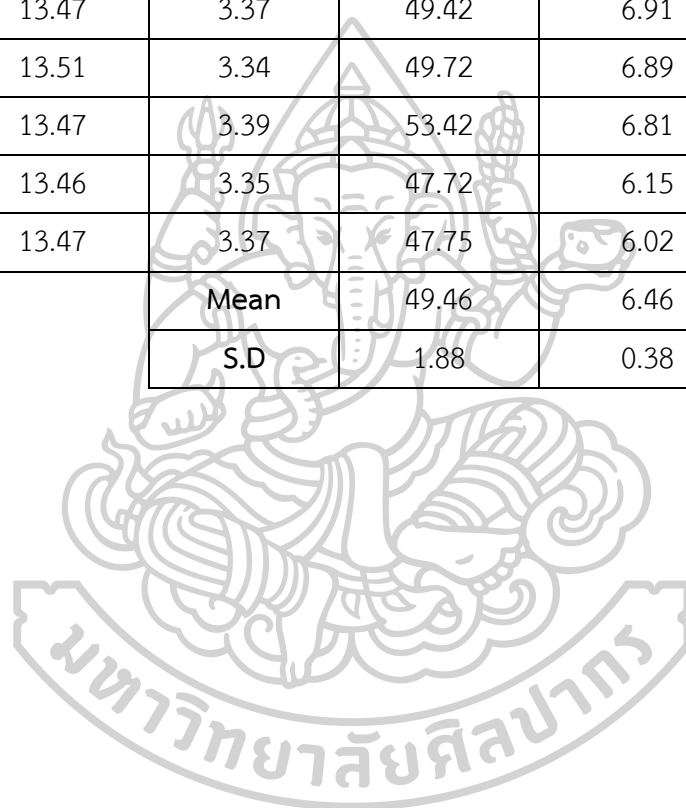
ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.49	3.76	64.59	11.04	1116.91
2	13.54	3.65	65.72	18.84	1098.12
3	13.50	3.62	63.62	9.63	1158.09
4	13.52	3.67	66.04	16.16	1076.12
5	13.54	3.68	64.97	16.91	1133.75
6	13.52	3.74	64.06	15.27	1197.93
7	13.52	3.60	62.65	13.61	1145.10
		Mean	64.52	14.49	1132.29
		S.D	1.19	3.28	40.21

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/CSS

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.52	3.44	49.30	7.06	1023.13
2	13.59	3.38	50.07	6.56	1050.60
3	13.51	3.38	50.50	6.64	1074.17
4	13.49	3.37	51.27	6.27	1082.87
5	13.47	3.39	48.84	6.14	1049.07
6	13.51	3.45	52.38	6.73	1068.26
7	13.54	3.41	49.86	6.06	996.71
		Mean	50.32	6.49	1049.26
		S.D	1.20	0.36	30.43

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการดึงของ PLA/PBAT/CES

ตัวอย่าง ที่	ความกว้าง (มิลลิเมตร)	ความหนา (มิลลิเมตร)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Tensile Modulus (MPa)
1	13.49	3.38	50.01	6.56	1081.35
2	13.51	3.35	49.79	6.27	1053.14
3	13.58	3.37	47.83	6.06	1061.09
4	13.47	3.37	49.42	6.91	1021.14
5	13.51	3.34	49.72	6.89	1034.56
6	13.47	3.39	53.42	6.81	1031.28
7	13.46	3.35	47.72	6.15	1021.24
8	13.47	3.37	47.75	6.02	1110.18
		Mean	49.46	6.46	1051.75
		S.D	1.88	0.38	31.54



ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของวัสดุคอมพอลิทีชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	144.30
2	144.29
3	147.09
4	144.38
5	140.70
6	146.78
7	145.93
mean	144.78
S.D	2.16

ตารางที่ ก.14 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	126.11
2	128.21
3	128.81
4	125.88
5	129.51
6	129.66
7	126.96
mean	127.88
S.D	1.57

ตารางที่ ก.15 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/PS

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	134.97
2	134.28
3	132.41
4	134.58
5	132.01
6	133.81
7	131.59
8	132.72
mean	133.38
S.D	1.35

ตารางที่ ก.16 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/PSS

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	123.40
2	123.55
3	123.88
4	123.45
5	123.39
6	124.11
7	122.76
mean	123.51
S.D	0.43

ตารางที่ ก.17 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/PES

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	125.16
2	125.21
3	125.72
4	124.76
5	125.54
6	124.69
7	126.60
8	126.19
mean	125.38
S.D	0.65

ตารางที่ ก.18 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/HS

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	137.72
2	138.12
3	140.36
4	139.70
5	139.26
6	138.27
7	138.60
8	137.69
mean	138.86
S.D	0.95

ตารางที่ ก.19 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/HSS

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	120.01
2	123.01
3	122.24
4	123.21
5	121.84
6	121.98
7	121.20
mean	121.93
S.D	1.09

ตารางที่ ก.20 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/HES

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	124.02
2	123.20
3	123.27
4	120.87
5	123.60
6	121.31
7	120.57
8	124.02
mean	122.41
S.D	1.43

ตารางที่ ก.21 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/CS

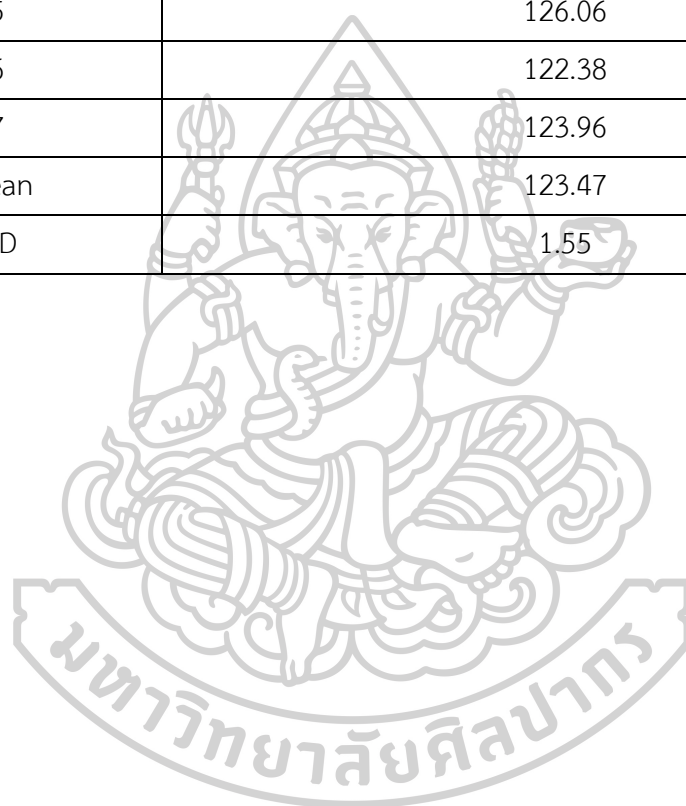
ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	129.52
2	129.41
3	129.50
4	131.15
5	130.12
6	127.16
7	127.53
mean	129.20
S.D	1.40

ตารางที่ ก.22 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/CSS

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	120.01
2	123.01
3	122.24
4	121.84
5	121.98
6	121.20
7	123.35
8	123.21
mean	121.95
S.D	1.12

ตารางที่ ก.23 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการโค้งงอของ PLA/PBAT/CES

ตัวอย่างที่	Flexural strength (MPa)
1	121.31
2	124.56
3	122.85
4	123.16
5	126.06
6	122.38
7	123.96
mean	123.47
S.D	1.55



สมบัติความต้านทานต่อการกระแทกของวัสดุคอมพอลิต์ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ

ตารางที่ ก.24 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA

ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	2.64
2	3.33
3	3.27
4	2.95
5	3.55
6	3.47
7	3.32
mean	3.22
S.D	0.32

ตารางที่ ก.25 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT

ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	4.12
2	3.97
3	3.99
4	3.98
5	4.28
6	3.83
7	4.14
8	3.99
9	3.95
mean	4.03
S.D	0.13

ตารางที่ ก.26 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/PS

ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	3.19
2	3.02
3	2.99
4	3.69
5	3.2
6	3.01
mean	3.18
S.D	0.27

ตารางที่ ก.27 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/PSS

ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	4.07
2	4.41
3	4.35
4	4.22
5	4.29
6	4.49
7	4.53
mean	4.34
S.D	0.16

ตารางที่ ก.28 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/PES

ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	3.91
2	3.88
3	3.69
4	3.99
5	4.12
6	4.51
7	4.10
8	3.75
mean	3.99
S.D	0.26

ตารางที่ ก.29 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/HS

ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	3.92
2	4.10
3	3.9
4	3.95
5	4.06
6	3.51
mean	3.91
S.D	0.21

ตารางที่ ก.30 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/HSS

ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	4.10
2	4.69
3	4.40
4	4.58
5	4.19
6	3.84
7	4.94
mean	4.39
S.D	0.38

ตารางที่ ก.31 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/HES

ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	3.85
2	3.81
3	3.41
4	3.20
5	3.42
6	3.62
7	3.15
8	3.42
9	3.68
10	3.68
11	3.00
mean	3.48
S.D	0.28

ตารางที่ ก.32 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/CS

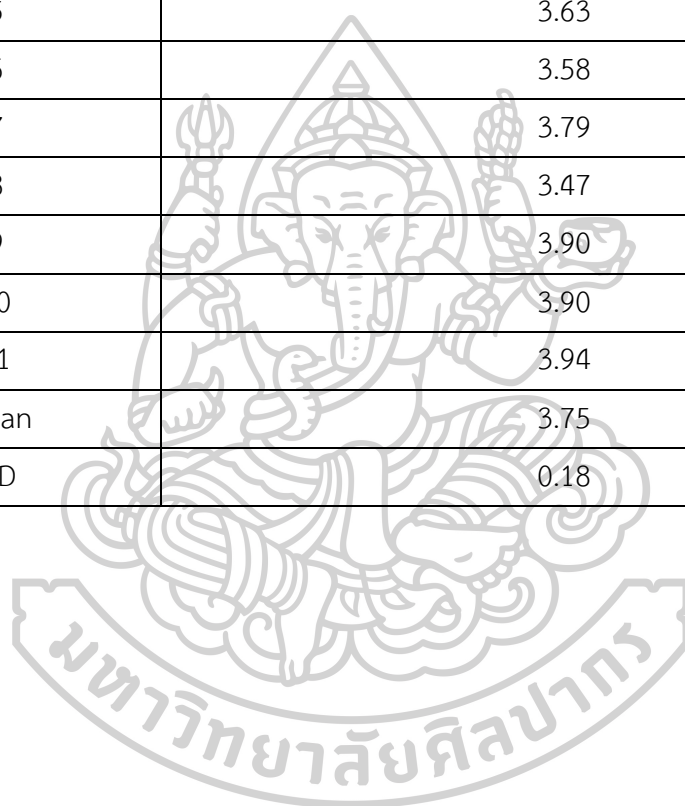
ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	4.68
2	3.92
3	3.81
4	3.74
5	4.21
6	3.66
7	4.34
8	4.68
mean	4.13
S.D	0.41

ตารางที่ ก.33 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/CSS

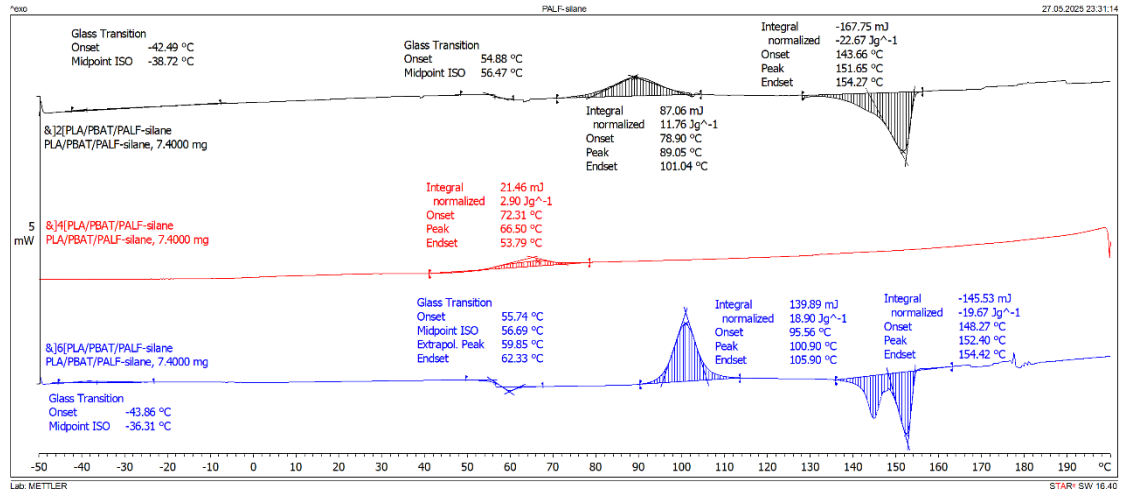
ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	3.90
2	3.97
3	3.91
4	3.97
5	3.78
6	4.03
7	3.89
8	3.88
9	3.90
10	3.97
11	3.69
mean	3.90
S.D	0.10

ตารางที่ ก.34 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกระแทกของ PLA/PBAT/CES

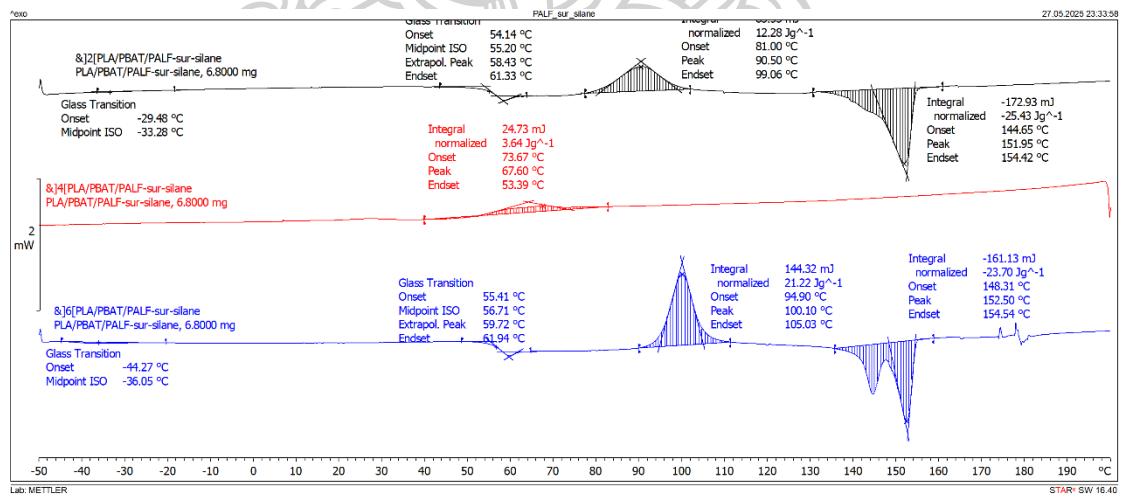
ตัวอย่างที่	Impact strength (kJ/mm ²)
1	3.80
2	3.47
3	3.88
4	3.86
5	3.63
6	3.58
7	3.79
8	3.47
9	3.90
10	3.90
11	3.94
mean	3.75
S.D	0.18



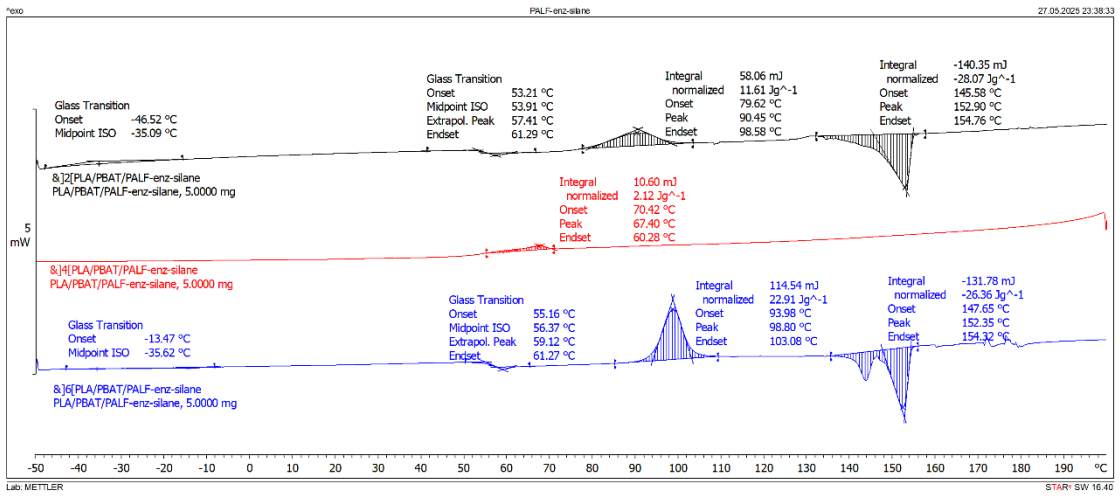
ผลการศึกษสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมพอลิเมอร์ชีวภาพ PLA/PBAT/เส้นใยธรรมชาติ



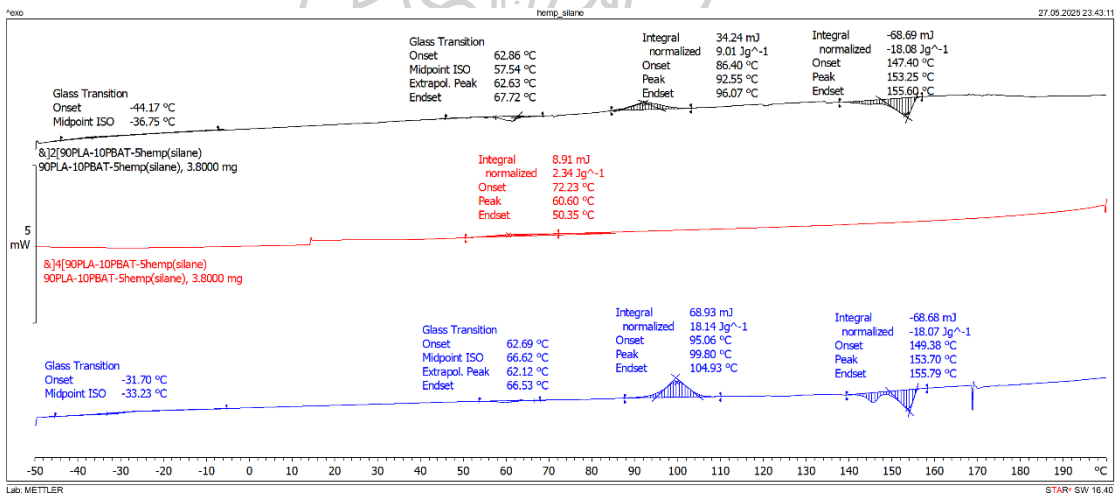
ภาพที่ ก.12 DSC thermogram ของสูตรการผสมPS



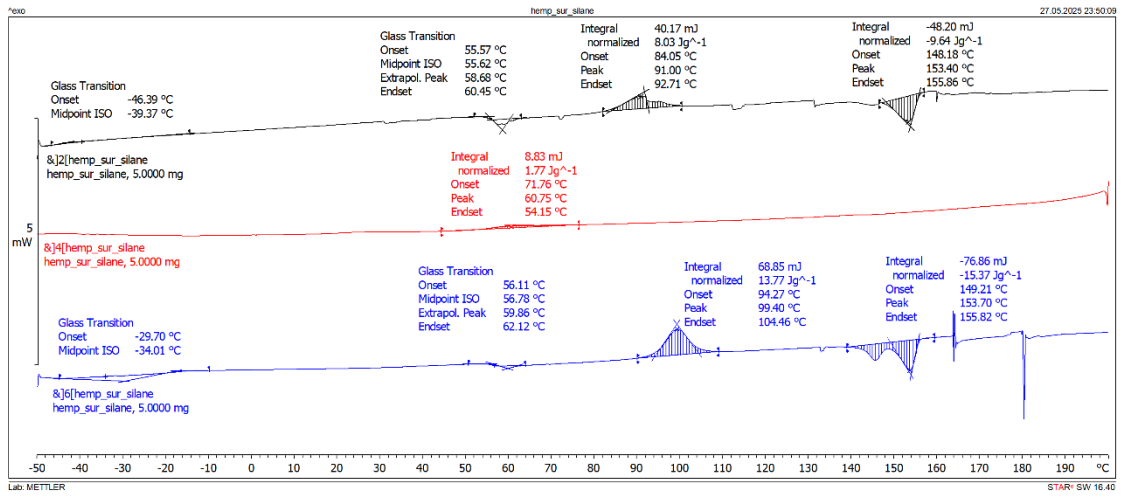
ภาพที่ ก.13 DSC thermogram ของสูตรการผสมPSS



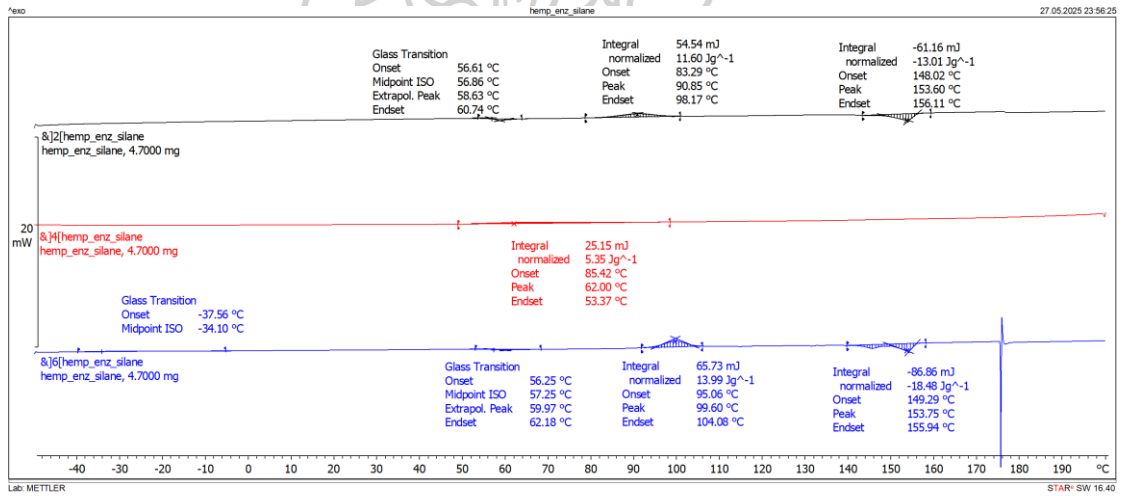
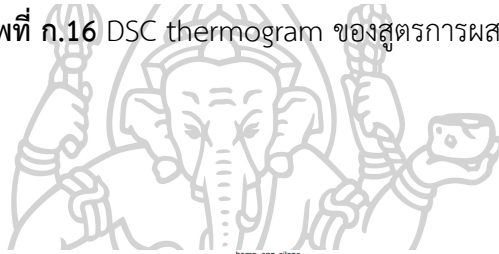
ภาพที่ ก.14 DSC thermogram ของสูตรการผสม PES



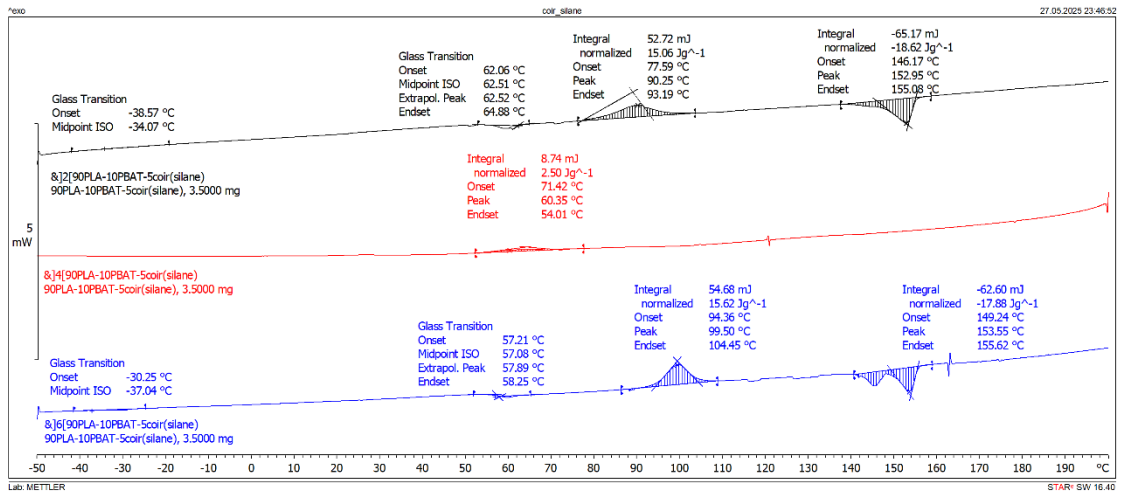
ภาพที่ ก.15 DSC thermogram ของสูตรการผสม HS



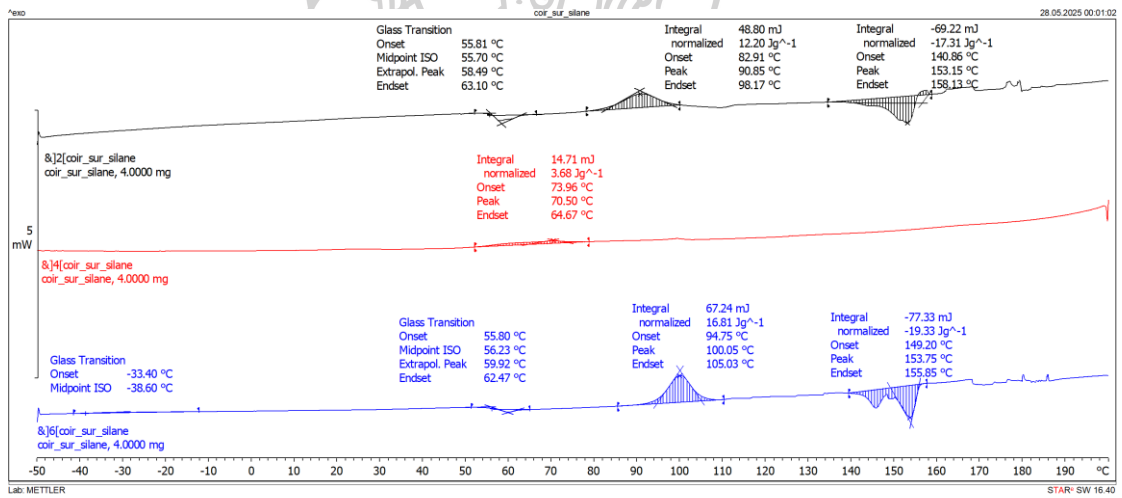
ภาพที่ ก.16 DSC thermogram ของสูตรการผสม HSS



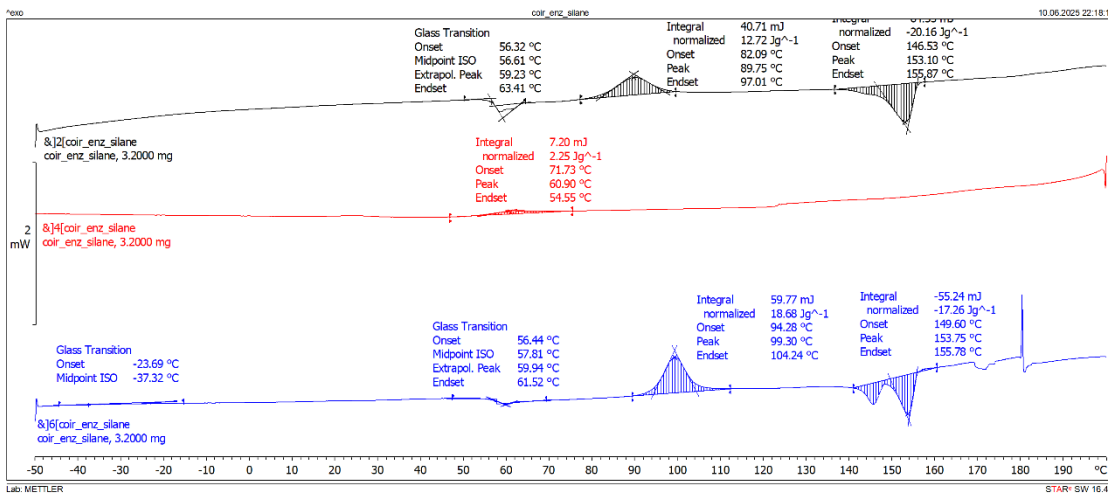
ภาพที่ ก.17 DSC thermogram ของสูตรการผสม HES



ภาพที่ ก.18 DSC thermogram ของสูตรการผสม CS



ภาพที่ ก.19 DSC thermogram ของสูตรการผสม CSS



ภาพที่ ก.20 DSC thermogram ของสูตรการผสม CES



ผลการทดสอบการหดตัวของชิ้นงานต้นแบบ

ตารางที่ ก.35 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA

ชิ้น ที่	ขนาดชิ้นงาน (mm)								
	แกน x			แกน y			แกน z		
	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว
1	25.00	24.75	0.98	25.00	24.71	1.18	1.00	1.00	0.00
2	25.00	24.74	1.06	25.00	24.99	0.04	1.00	0.96	3.71
3	25.00	24.77	0.91	25.00	24.95	0.20	1.00	0.96	4.19
4	25.00	24.70	1.19	25.00	24.76	0.95	1.00	0.98	1.59
5	25.00	24.81	0.77	25.00	24.75	0.98	1.00	1.00	0.00
6	25.00	24.74	1.02	25.00	24.76	0.98	1.00	0.97	2.62
7	25.00	24.86	0.55	25.00	24.79	0.83	1.00	1.02	-1.85
8	25.00	24.96	0.17	25.00	24.86	0.57	1.00	0.99	0.52
9	25.00	24.76	0.96	25.00	24.83	0.68	1.00	0.98	2.15
10	25.00	24.74	1.04	25.00	24.79	0.85	1.00	0.97	2.86

ตารางที่ ก.36 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT

ชิ้น ที่	ขนาดชิ้นงาน (mm)								
	แกน x			แกน y			แกน z		
	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว
1	25.00	24.75	0.98	25.00	24.71	0.64	1.00	1.00	0.00
2	25.00	24.74	1.16	25.00	24.99	0.04	1.00	0.96	2.00
3	25.00	24.77	0.96	25.00	24.95	0.16	1.00	0.96	1.00
4	25.00	24.70	0.84	25.00	24.76	0.20	1.00	0.98	1.00
5	25.00	24.81	0.88	25.00	24.75	0.52	1.00	1.00	0.00
6	25.00	24.74	1.08	25.00	24.76	1.08	1.00	0.97	2.00
7	25.00	24.86	0.16	25.00	24.79	0.08	1.00	1.02	2.00
8	25.00	24.96	1.20	25.00	24.86	0.76	1.00	0.99	2.00
9	25.00	24.76	0.40	25.00	24.83	0.28	1.00	0.98	2.00
10	25.00	24.74	0.40	25.00	24.79	0.28	1.00	0.97	1.00

ตารางที่ ก.37 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/PS

ชิ้น ที่	ขนาดชิ้นงาน (mm)								
	แกน x			แกน y			แกน z		
	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว
1	25.00	24.97	0.98	25.00	24.71	1.16	1.00	0.98	0.00
2	25.00	24.92	0.32	25.00	24.81	0.76	1.00	0.98	2.00
3	25.00	24.82	0.72	25.00	24.72	1.12	1.00	0.99	1.00
4	25.00	24.96	0.16	25.00	24.79	0.84	1.00	0.99	1.00
5	25.00	24.91	0.36	25.00	24.78	0.88	1.00	1.00	0.00
6	25.00	24.88	0.48	25.00	24.77	0.92	1.00	0.99	1.00
7	25.00	24.90	0.40	25.00	24.79	0.84	1.00	0.97	3.00
8	25.00	24.79	0.84	25.00	24.90	0.40	1.00	0.97	3.00
9	25.00	24.87	0.52	25.00	24.92	0.32	1.00	0.97	3.00
10	25.00	24.94	0.24	25.00	24.80	0.80	1.00	0.99	1.00

ตารางที่ ก.38 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/PSS

ชิ้น ที่	ขนาดชิ้นงาน (mm)								
	แกน x			แกน y			แกน z		
	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว
1	25.00	24.97	0.12	25.00	24.71	1.16	1.00	0.98	2.00
2	25.00	24.92	0.32	25.00	24.81	0.76	1.00	0.98	2.00
3	25.00	24.82	0.72	25.00	24.72	1.12	1.00	0.99	1.00
4	25.00	24.96	0.16	25.00	24.79	0.84	1.00	0.99	1.00
5	25.00	24.91	0.36	25.00	24.78	0.88	1.00	1.00	0.00
6	25.00	24.88	0.48	25.00	24.77	0.92	1.00	0.99	1.00
7	25.00	24.90	0.40	25.00	24.79	0.84	1.00	0.97	3.00
8	25.00	24.79	0.84	25.00	24.90	0.40	1.00	0.97	3.00
9	25.00	24.87	0.52	25.00	24.92	0.32	1.00	0.97	3.00
10	25.00	24.94	0.24	25.00	24.80	0.80	1.00	0.99	1.00

ตารางที่ ก.39 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/PES

ชิ้น ที่	ขนาดชิ้นงาน (mm)								
	แกน x			แกน y			แกน z		
	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว
1	25.00	24.88	0.48	25.00	24.82	0.72	1.00	0.99	1.00
2	25.00	24.75	1.00	25.00	24.77	0.92	1.00	0.99	1.00
3	25.00	24.83	0.68	25.00	24.81	0.76	1.00	0.97	3.00
4	25.00	24.93	0.28	25.00	24.92	0.32	1.00	0.98	2.00
5	25.00	24.79	0.84	25.00	24.97	0.12	1.00	0.98	2.00
6	25.00	24.74	1.04	25.00	24.97	0.12	1.00	0.97	3.00
7	25.00	24.71	1.16	25.00	24.87	0.52	1.00	0.97	3.00
8	25.00	24.83	0.68	25.00	24.94	0.24	1.00	0.97	3.00
9	25.00	24.77	0.92	25.00	24.94	0.24	1.00	0.98	2.00
10	25.00	24.8	0.80	25.00	24.99	0.04	1.00	1	0.00

ตารางที่ ก.40 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/HS

ชิ้น ที่	ขนาดชิ้นงาน (mm)								
	แกน x			แกน y			แกน z		
	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว
1	25.00	24.92	0.32	25.00	24.92	0.32	1.00	0.98	2.00
2	25.00	24.96	0.16	25.00	24.95	0.20	1.00	0.98	2.00
3	25.00	24.81	0.76	25.00	24.86	0.56	1.00	0.98	2.00
4	25.00	24.97	0.12	25.00	24.87	0.52	1.00	1.00	0.00
5	25.00	24.81	0.76	25.00	24.78	0.88	1.00	0.99	1.00
6	25.00	24.92	0.32	25.00	24.86	0.56	1.00	0.98	2.00
7	25.00	24.95	0.20	25.00	24.90	0.40	1.00	1.00	0.00
8	25.00	24.96	0.16	25.00	24.96	0.16	1.00	0.98	2.00
9	25.00	24.92	0.32	25.00	25.00	0.00	1.00	0.99	1.00
10	25.00	24.73	1.08	25.00	24.87	0.52	1.00	0.98	2.00

ตารางที่ ก.41 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/HSS

ชิ้น ที่	ขนาดชิ้นงาน (mm)								
	แกน x			แกน y			แกน z		
	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว
1	25.00	24.9	0.40	25.00	24.88	0.48	1.00	0.98	2.00
2	25.00	24.92	0.32	25.00	24.9	0.40	1.00	0.99	1.00
3	25.00	24.87	0.52	25.00	24.79	0.84	1.00	0.97	3.00
4	25.00	24.88	0.48	25.00	24.89	0.44	1.00	0.98	2.00
5	25.00	24.89	0.44	25.00	24.89	0.44	1.00	0.99	1.00
6	25.00	24.79	0.84	25.00	24.89	0.44	1.00	0.99	1.00
7	25.00	24.89	0.44	25.00	24.93	0.28	1.00	0.98	2.00
8	25.00	24.98	0.08	25.00	24.98	0.08	1.00	0.98	2.00
9	25.00	24.93	0.28	25.00	24.97	0.12	1.00	0.98	2.00
10	25.00	24.97	0.12	25.00	24.92	0.32	1.00	0.97	3.00

ตารางที่ ก.42 ผลการวัดขนาดชิ้นงานต้นแบบของสูตร PLA/PBAT/HES

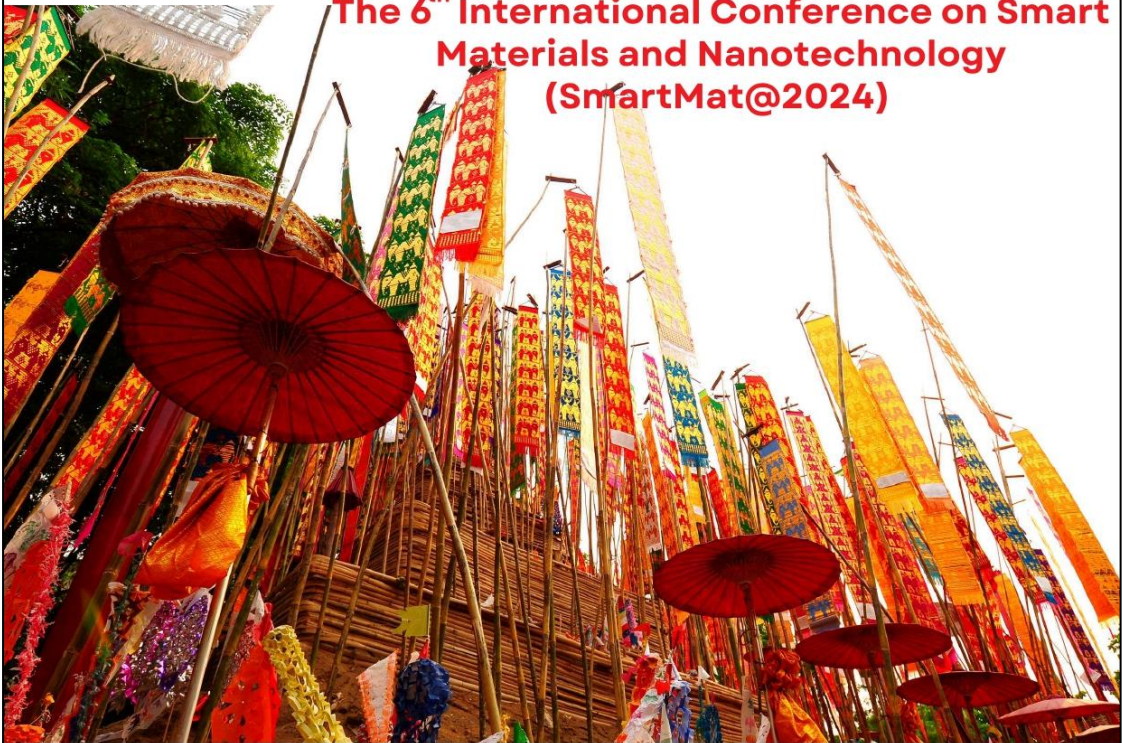
ชิ้น ที่	ขนาดชิ้นงาน (mm)								
	แกน x			แกน y			แกน z		
	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว	ขนาดจาก โปรแกรม (mm)	ขนาด จริง (mm)	ร้อยละ การ หด ตัว
1	25.00	24.99	0.04	25.00	24.88	0.48	1.00	0.97	3.00
2	25.00	24.78	0.88	25.00	24.94	0.24	1.00	0.99	1.00
3	25.00	24.86	0.56	25.00	24.89	0.44	1.00	0.98	2.00
4	25.00	24.99	0.04	25.00	24.91	0.36	1.00	0.97	3.00
5	25.00	24.88	0.48	25.00	24.86	0.56	1.00	0.97	3.00
6	25.00	24.86	0.56	25.00	24.94	0.24	1.00	1	0.00
7	25.00	24.92	0.32	25.00	24.88	0.48	1.00	0.98	2.00
8	25.00	24.97	0.12	25.00	24.95	0.20	1.00	0.98	2.00
9	25.00	24.88	0.48	25.00	24.91	0.36	1.00	0.99	1.00
10	25.00	24.89	0.44	25.00	24.83	0.68	1.00	0.98	2.00



ภาคผนวก ข
การนำเสนอผลงานวิจัย

SMARTMAT 2024

The 6th International Conference on Smart
Materials and Nanotechnology
(SmartMat@2024)



E-proceedings



November 5-8, 2024

**The Chiang Mai Grandview
and Uniserv CMU, Thailand**

Hosted by





Improvement of Mechanical and Thermal Properties of PLA/PBAT Biocomposites by Surface Modified Pineapple Leaf Fiber

Norrasate Wongwaroon¹, Rattanaphol Mongkholrattanasit², Pajaera Patanathabutr^{1,*}

¹ Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand

² Department of Textile Chemistry Technology, Faculty of Industrial Textiles and Fashion Design, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok 10300, Thailand

*Email: Patanathabutr_P@su.ac.th

Abstract

Natural fiber-reinforced biocomposites offer advantages such as biodegradability and renewability of fiber resources. However, challenges such as poor fiber-matrix adhesion can result in reduced mechanical performance. This research aimed to improve the mechanical and thermal properties of polylactic acid (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) biocomposites, with a 90:10 ratio, by incorporating 5 phr. of surface-modified pineapple leaf fiber (PALF) treated with (3-aminopropyl) trimethoxy silane. The study also explored the effects of pre-treating PALF with Triton X-100 surfactant and cellulase enzyme before surface modification. Differential Scanning Calorimetry (DSC) results showed that adding PALF increased the crystallinity of PLA/PBAT biocomposites due to a nucleation effect facilitated by the high stiffness of pineapple leaf fibers. Mechanical tests showed improvements in tensile strength, flexural strength, and impact strength with the surface-modified PALF, enhancing the adhesion between fibers and polymer matrix. The PLA/PBAT biocomposites with surfactant-modified PALF-silane exhibited the best mechanical properties among all treated methods. Scanning Electron Microscopy (SEM) revealed that the silane-modified PALF was well-distributed throughout the polymer matrix. Thermogravimetric Analysis (TGA) demonstrated improved thermal stability, with a higher percentage of char residue than 90PLA/10PBAT. These enhanced properties make 90PLA/10PBAT/5PALF biocomposites promising for lightweight and environmentally friendly components in the structural applications.

Keywords: pineapple leaf fiber, PLA/PBAT biocomposites, surfactant, (3-aminopropyl) trimethoxy silane, cellulase enzyme.

Introduction

Natural fibers have emerged as promising reinforcing agents in polymer composites due to their renewability, biodegradability, and excellent mechanical properties. Natural fibers, derived from plants, animals, and minerals, offer a sustainable alternative to synthetic fibers, reducing reliance on non-renewable resources. By incorporating natural fibers into polymer matrices, researchers aim to develop lightweight, high-strength, and environmentally friendly composite materials. Biopolymers, derived from renewable biological sources, have gained significant attention in recent years because of their biodegradability and reduced environmental impact compared to conventional petrochemical-based polymers. Poly(lactic acid) (PLA) and



poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) are two prominent examples of biopolymers with great potential in various applications. When combined with natural fibers, these biopolymers can create sustainable composite materials with enhanced properties, offering a promising solution for addressing environmental concerns and promoting a circular economy. However, the inherent hydrophilic nature and poor interfacial adhesion between natural fibers and polymer matrices often hinder the development of high-performance composites. To address these limitations, surface modification techniques have been employed to improve the compatibility and interfacial bonding between the fibers and polymer phases. Silane coupling agents have emerged as effective surface modification agents for natural fibers. These multifunctional molecules possess both hydrophobic and hydrophilic groups, enhancing strong bonding between the silane-modified fibers and polymer matrix by chemical treatment.

This research aims to investigate the effects of pre-treatments of pineapple leaf fiber (PALF) with steam explosion, followed by pre-treating with surfactant and enzymatic on the properties of silane-modified pineapple leaf fibers (PALF) in order to enhance interfacial adhesion with a PLA/PBAT biopolymer matrix.

Materials and Methods

Materials

Poly(lactic acid) (PLA 4043D) was purchased from SMART BIO PLASTIC CO., LTD, Thailand, and Poly(butylene adipate-co-terephthalate) Ecoflex (PBAT C1200) was also purchased from SMART BIO PLASTIC CO., LTD, Thailand. Pineapple leaf fiber (PALF) (lengths of 5 mm to 1 cm) were purchased from a cultivator at Ratchaburi, Thailand. (3-aminopropyl) trimethoxysilane (concentration $\leq 100\%$) was purchased from Sigma-Aldrich, the United States. Triton X-100 (laboratory grade) was purchased from Merck KGaA, Germany. Cellulase enzyme from *Aspergillus* sp. was purchased from Sigma-Aldrich, the United States. Acetic acid glacial, sodium citrate dihydrate, and citric acid were purchased from Qrec, New Zealand.

Fiber preparation

Pineapple leaf fibers (PALF) were washed with water to remove impurities and dried in a hot oven at 60 °C for 12 h. They were then cut into lengths of 0.5 to 1 cm. The obtained fibers were boiled in a pressure cooker for 2 h. to remove lignin. After the specified time, they were washed with water at 60 °C and dried in a hot air oven at 60 °C for 12 h.

Fiber surface treatment

For surfactant treatment, Triton X-100 was used as a surfactant, which was prepared by dissolving Triton X-100 (2.5 ml) in DI water (500 ml) and stirring for 3 h.¹ Then, the PALF were soaked for 3 h. When the time is up, the fibers were washed with plain water to remove residues. Then, they were dried in a hot air oven at 60 °C for 12 h.

Cellulase enzyme was used for enzyme pre-treatment. First, citrate buffer (pH 3.0 to 6.2) was prepared by adding 12.852 g of sodium citrate dihydrate and 1.211 g of citric acid in 400 ml of DI water. Then, the pH of the solution was adjusted with HCl or NaOH to 500 ml with DI. Next, 2.5 g of cellulase was added to the prepared solution, 50 g of PALF was added, and the container was heated to 60 °C and shaken continuously in a shaking water bath for 24 h.¹ When the time was up, the fibers were washed with water and dried in a hot air oven at 60 °C for 12 h.



For silane surface treatment, silane (5 wt% compared to the weight of the fiber) was first prepared in a solution of ethanol and DI-water using a ratio of ethanol to water of 80:20 and stirred for 3 hours. After that, the pH of the solution was adjusted with acetic acid until the pH value in the range of 4-5. Then, the silane coupling agent was added to the solution and stirred for 1. After that, the solution was sprayed on the surface of PALF and, later, the fibers were heated in an oven at 60 °C for 12 h.³

Composite compounding and processing

PLA, PBAT, and PALF were dried at 60 °C for 12 h. before mixing. All blends and composites were prepared using a twin-screw extruder (SHJ-25, China) at the barrel temperature of 110 to 200 °C. The screw speed was 40 rpm. Table 1 displays the composition of the blends and the biocomposite, from the research of Anith Liyana Mohd Sis et al., it was reported that at a PLA/PBAT ratio of 90/10, the biocomposites has the highest mechanical properties with tensile strength. After that, the extruded was cut into pellets and molded using an injection molding machine.

Table 1 Designation of PALF at different surface treatment

PLA (wt%)	PBAT (wt%)	PALF (5 phr.)	Designation
90	10	Silane	90PLA/10PBAT/5PALF-steam-silane
		Surfactant-silane	90PLA/10PBAT/5PALF-steam-sur-silane
		Enzyme-silane	90PLA/10PBAT/5PALF-steam-enz-silane

Fiber Characterization

FTIR spectroscopy

The chemical structures of the PALF were studied by FTIR (Vertex 70, BRUKER, Germany). The samples were mixed with potassium bromide (KBr) using the pellet technique. All FTIR spectra were recorded in the wave number range of 400 – 4000 cm⁻¹ with a resolution of 4 cm⁻¹.

Scanning electron microscopy (SEM)

The untreated and treated PALF morphology were studied using a scanning electron microscope (Tabletop Microscope TM 3030, Hitachi High-Technologies, Japan). The imaging was performed at an accelerating voltage of 5 kV.

Thermogravimetric analysis (TGA)

Thermal stability of treated and untreated PALF were carried out using a thermogravimetric analyzer (TGA model TGA/DSC1, Mettler Toledo, Switzerland). The weight changes of PALF were measured as a percentage of increasing temperature at a constant heating rate. All samples were placed in a pan and heated from 30 °C to 600 °C at a rate of 10 °C/min in a nitrogen atmosphere.



PALF composites characterization
Thermogravimetric analysis (TGA)

The PLA/PBAT blends were reinforced with PALF, using varying weight percentages as a function of increasing temperature at a constant heating rate. All samples were placed in a pan and heated from 30 °C to 800 °C at a rate of 10 °C/min in a nitrogen atmosphere.

Differential scanning calorimetry (DSC)

PLA/PBAT/PALF biocomposites were heated at a rate of 3 °C/min from -50 °C to 200 °C during the initial heating scan. To eliminate any previous thermal history, they were kept isothermal in a nitrogen environment for 1 minute. In the cooling stage, the temperature was reduced from 200 °C to -50 °C at rate of 3 °C/min, after that samples were heated to 200 °C with a heating rate of 3 °C/min (2nd heating scan). The melting and crystallisation temperatures were determined from the reheating scans. The following formula was used to determine the percentage of crystallinity.

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

Where X_c = percentage of crystallinity, ΔH_m is the enthalpy of fusion (J/g), ΔH_{cc} the enthalpy of cold crystallization (J/g), and ΔH_m^0 the heat of fusion of the completely crystalline materials at the equilibrium melting temperature (for PLA, $\Delta H_m^0=93$ J/g).¹

Tensile test

The Instron universal testing machine (model 5969, Instron Engineering Corp., USA) was used to conduct a tensile test following the ASTM D638 standard. Ten dumbbell-shaped specimens with measured width and thickness were put through testing with a gauge length of 50.2 mm, a load cell of 50 kN, and a constant cross-head speed of 50 mm/min. Tensile strength and related value were determined by taking the average values of all runs.

Flexural test

The flexural test was conducted using the Instron universal testing machine (model 5969, Instron Engineering Corp., USA) by ASTM D790 standard. A load cell of 50 kN and a constant cross-head speed of 1.49 mm/min were used to assess flexural strength. The average values of all samples were used as the generated data.

Impact test

Following ASTM D256, the Izod method was used. A 2.75 J hammer (9050-Manual model, Instron Engineering Corp., USA) was used for impacting ten specimens, and the impact strength was obtained by averaging all of the values.

Scanning electron microscopy (SEM)

To study the morphology of PLA/PBAT/PALF biocomposites, the specimens obtained from tensile testing were examined using a Scanning Electron Microscopy (Tabletop Microscope TM 3030, Hitachi High-Technologies, Japan) operated at 5 kV. The fractured surface was gold-coated to avoid electrostatic charging during inspection.



Results and Discussion

Fiber characterization

FTIR spectroscopy

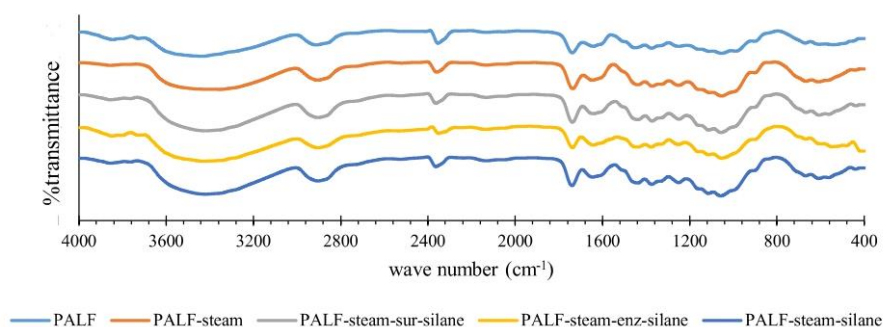


Figure 1. FTIR spectra of untreated and treated PALF.

FTIR spectra of untreated and treated PALF are shown in Figure 1. In untreated PALF, broad spectra in the range $3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ were observed, which is the result of -OH stretching vibrations of cellulose. From the comparison between PALF and PALF-steam, PALF-steam has a higher peak intensity than PALF, which was due to the hot, high-pressure steam dissolving the lignin and hemicellulose in the fibers and resulting in an increased proportion of cellulose in PALF after steaming.² Therefore, in this research, pre-treating PALF with steam was then treated with Triton X-100 surfactant and cellulase enzyme before modifying the surface with amino-silane coupling agents. For untreated PALF, the peak at 2900 and 1700 cm^{-1} related to the stretching vibrations of the -CH and -C=O groups in hemicellulose.³ For treated PALF (PALF-steam-sur-silane, PALF-steam-enz-silane, PALF-steam-silane), the intensity of Si-O-C at 1053 cm^{-1} appeared, which can confirm that there was some adsorption of silane at the surface of the fiber.



Scanning electron microscopy (SEM)

Figure 2a. to 2e. show the surface morphology of untreated and pre-treated PALF. For untreated pineapple leaf fiber (PALF), the surface was found to be relatively smooth (Figure 2a). The smooth appearance of the fiber surface can be explained by the distributed layer of important impurities, such as hemicellulose, pectin, wax, and other surface impurities.⁴ However, if the fibers are pre-treated with steam, defibrillation occurs. While the PALF pre-treated with steam had larger fiber sizes due to fiber defibrillation (Figure 2b). For PALF pre-treated with steam and then surface-treated with surfactants (Triton x-100), It could be observed that the fibers were separated and become smaller as a result of the wax inside the fibers being released (Figure 2c). For the treated fiber with cellulase enzyme (Figure 2d), The decomposition of hemicellulose by the enzyme cellulase caused the outer skin of PALF to begin to collapse and show visible pores.² From Figure 2c to 2e, the surface of the PALF area become rougher because silane adheres to the surface of the fibers.

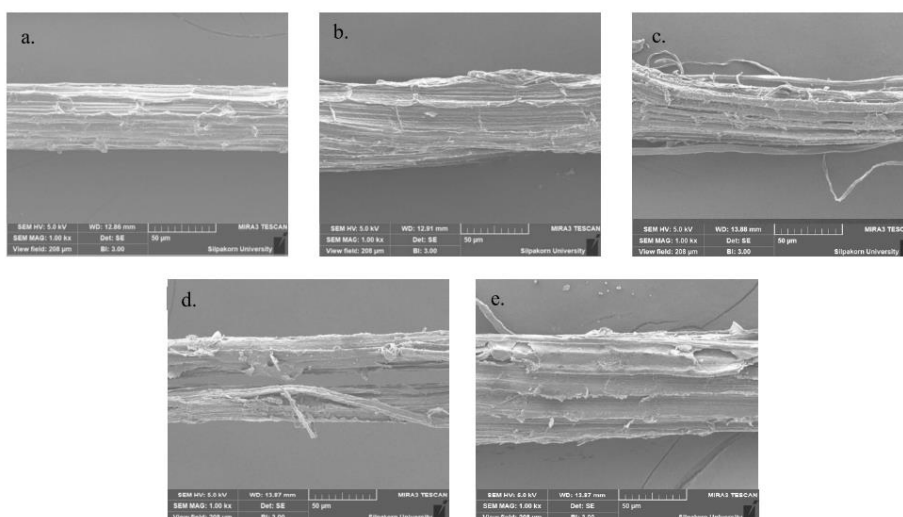


Figure 2. SEM images of a) PALF, b) PALF-steam, c) PALF-steam-sur-silane, d) PALF-steam-enz-silane, and e) PALF-steam-silane.

Thermal decomposition analysis of fiber

TGA thermograms of PALF-steam, PALF-steam-sur-silane and PALF-steam-enz-silane and PALF-steam -silane, shown in Figure 3, addressed that the first weight loss of all PALF occurred between 40 °C to 60 °C. Because of moisture evaporation from the fiber structure, there was only a slight weight reduction.



The second stage of degradation occurred at temperatures ranging from 270 °C to 340 °C and was related to the degradation of cellulosic substances (cellulose and hemicellulose).⁵

It was found that treating the PALF surface with enzyme and surfactant before modifying the surface with silane increased T_{onset} compared with PALF-steam because silane molecules can also form a protective siloxane (Si-O-Si) network on the fiber surface. This layer acts as a barrier, reducing the direct exposure of the fiber to heat and moisture. This protective silicon dioxide barrier can slow down the thermal degradation process by heat absorption, thereby improving the fiber's thermal stability. For the PALF was treated with an enzyme, it has a decreased T_{onset} . This may be a result of soaking the fibers in the enzyme solution for too long, causing some cellulose in the fibers to decompose.

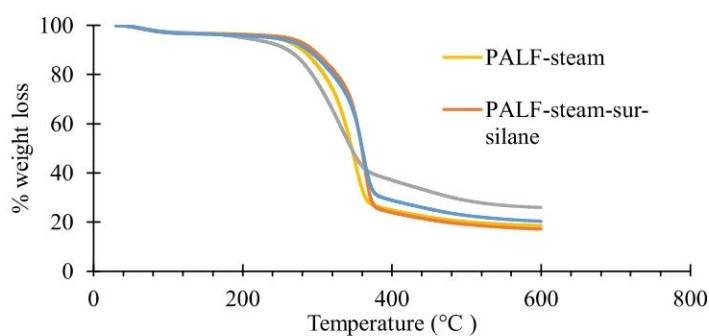


Figure 3. TGA thermogram of untreated and treated PALF.

Table 2. Initial degradation temperatures (T_{onset}) and maximum decomposition temperature (T_{dmax}) of PALF obtained from TGA.

Sample	First stage		%Residue	Second stage		%Residue
	T_{onset} (°C)	T_{dmax} (°C)		T_{onset} (°C)	T_{dmax} (°C)	
PALF	55.63	51.67	96.56	309.54	349.17	18.70
PALF-steam-silane	46.51	64.17	96.76	332.12	361.33	23.58
PALF- steam-sur-silane	48.20	65.67	96.59	335.71	361.67	23.58
PALF- steam-enz-silane	47.96	67.33	97.11	279.86	336.33	33.05



PALF bio-composites characterization
Thermal decomposition analysis of PALF composite

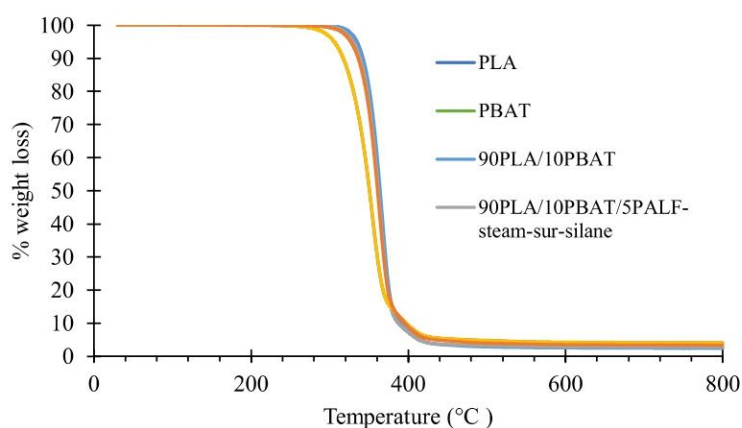


Figure 4. TGA thermograms of PALF composites.

Table 3. Initial degradation temperatures (T_{onset}) and maximum decomposition temperature (T_{dmax}) of PALF and PALF composites obtained from TGA.

Sample	First stage		%Residue
	T_{onset} (°C)	T_{dmax} (°C)	
PLA	349.60	369.33	0.10
PBAT	384.46	409.00	0.50
90PLA/10PBAT	347.20	366.67	2.81
90PLA/10PBAT/5PALF-steam-sur-silane	344.41	364.33	2.88
90PLA/10PBAT/5PALF-steam-enz-silane	326.72	354.67	4.24
90PLA/10PBAT/5PALF-steam-silane	342.00	362.50	3.82

As shown in Figure 4, the thermogram of 90PLA/10PBAT/5PALF biocomposite, there was only 1 stage of thermal degradation that began in the temperature range of 320 °C to 350 °C as seen in Table 3. It was found that the 90PLA/10PBAT biocomposites began to degrade at 347.20 °C, but when PALF, as a reinforcing agent, was added, the degradation temperature was found to be lower. The lowest T_{onset} of degradation was found for the 90PLA/10PBAT blend with PALF-steam-enz-silane added.



Differential scanning calorimetry (DSC)

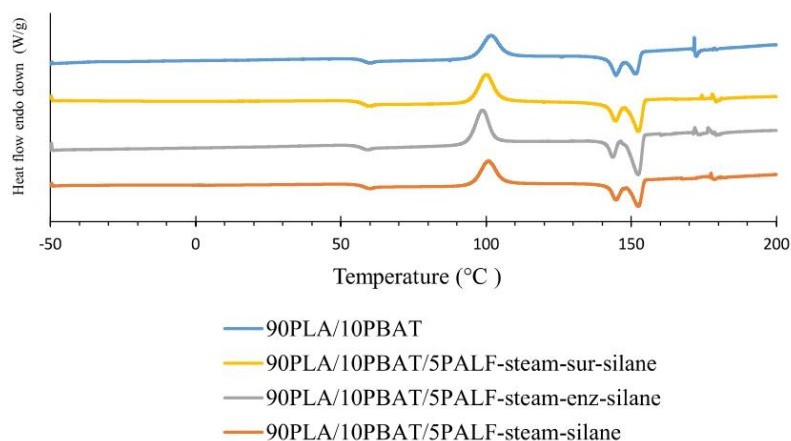


Figure 5. DSC thermograms of the PALF composites.

Table 4. Thermal behaviors of PALF composites obtained from DSC.

Sample	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_m (°C)		ΔH_m (J/g)	ΔH_{cc} (J/g)	X_c (%)
			1	2			
PLA/PBAT	57.38	101.75	144.70	151.60	17.38	16.77	0.73
PLA/PBAT/PALF-sur-silane	56.68	100.10	144.55	152.55	24.48	18.93	6.63
PLA/PBAT/PALF-enz-silane	55.80	98.80	143.75	152.40	24.93	22.97	2.34
PLA/PBAT/PALF-silane	57.10	100.90	144.75	152.55	19.99	18.37	1.94

Figure 5 and Table 4 displayed DSC thermogram together with the glass transition temperature (T_g), cold crystallization temperature (T_{cc}), melting temperature (T_m), cold crystallization enthalpy (ΔH_{cc}), and melting enthalpy (ΔH_m).

From the DSC test results in the second heat treatment shown in Table 4, it could be seen that for 90PLA/10PBAT blend polymers, T_g occurs at 57.38 °C and T_m occurs at 144.70 °C and 151.60 °C, respectively. The double melting peak of the PLA/PBAT blend was observed. The re-melting of newly formed crystallite during heating was the reason for the peak at low temperatures. And when PALF was added to the polymer blend, it was found that the T_g value was reduced. This could be attributed to the addition of PALF, which enhanced chain mobility of the PLA molecular chains while T_m remains virtually unchanged.⁴



From the calculated percentage of crystallinity (X_c) as shown in Table 4, it was found that the addition of PALF increased the crystallinity due to a nucleation effect facilitated by the high stiffness of PALF.

Tensile test

Figure 6a shows the tensile strength of PALF composites. Neat PLA was found to have a tensile strength of 70.55 MPa, and when PBAT was added, the tensile strength decreased to 59.55 MPa due to the presence of a soft elastomeric phase that reduces the crystallinity in the virgin matrix.⁶ The tensile strength value decreased when PALF was added to the blend of PLA/PBAT. This is because the silane would allow an increasing number of linkages between the PLA/PBAT blend and the fiber. The PALF biocomposites have the optimum tensile strength treated with Triton x-100 surfactant; the surfactant was expected to cause the fiber strands to spread apart and disperse throughout the polymer matrix during melt compounding.

Figure 6b showed the elongation of PALF composites. The results showed that the elongation value was reduced when PBAT was added to PLA. It may be a result of PLA and PBAT may not be compatible because no compatibilizer is added. While PALF was added to the PLA/PBAT blends, the elongation was reduced compared to the PLA/PBAT blended. In addition, it was found that PLA/PBAT/PALF-sur-silane had the highest elongation value compared to the other formulas.

Figure 6c showed the Young's modulus of the PALF composite. It can be seen that PLA has a Young's modulus of 1116.45 MPa, but when PBAT is mixed, Young's modulus decreases to 997.64 MPa. Meanwhile, it was found that for PLA/PBAT blends, when PALF was added, the Young's Modulus value was higher than before the addition, which could due to the PALF's function as a reinforcing agent for the blends.

From the flexural test, as shown in Figure 6d Neat PLA was found to have a flexural strength of 144.78 MPa, when compounding with PBAT, the flexural strength was reduced to 128.21 MPa. When PALF was added to the PLA/PBAT polymer blend, it was found that the flexural strength tended to decrease. When comparing all PALF composites, it was found that PLA/PBAT/PALF-sur-silane and PLA/PBAT/PALF-enz-silane gave similar values.

Figure 6e shows the impact test results. For PLA, the impact strength was 3.32 kJ/m² and when added the PBAT, the impact strength increased to 4.03 kJ/m². In addition, it was found that adding PLAF to the PLA/PBAT blends changed the impact strength as follows: for PALF-silane, the impact strength decreased to 2.76 kJ/m², while for PALF-sur-silane, the impact strength increased to 4.34 kJ/m², and for PALF-enz-silane, the impact strength was almost the same. The cause of the PLA/PBAT/PALF-sur-silane formula's enhanced their impact strength was that the modified PALF were well-distributed throughout the specimen, thus helping to absorb impact throughout the specimen.

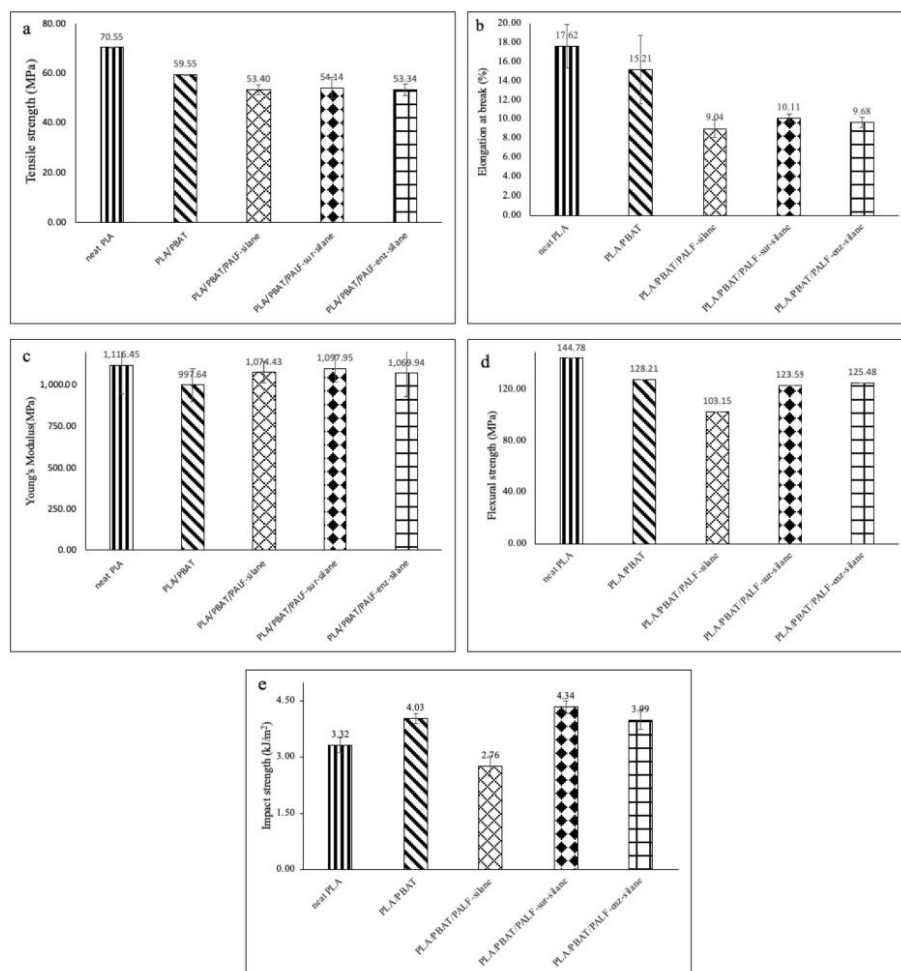


Figure 6. a) Tensile strength of PALF bio-composites, b) elongation at break of PALF bio-composites, c) Young's modulus of PALF bio-composites, d) flexural strength of PALF bio-composites, and e) Impact strength of PALF bio-composites



Scanning electron microscopy (SEM)

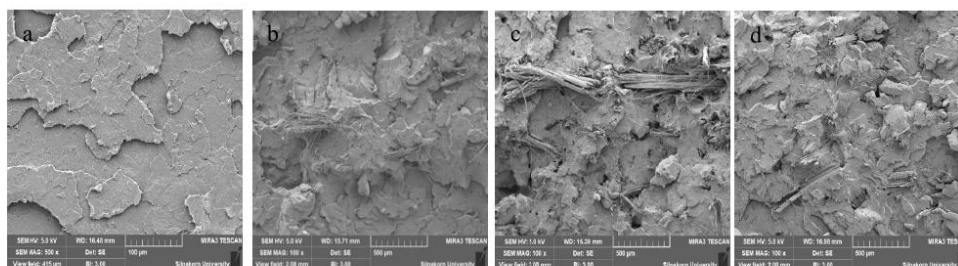


Figure 7. SEM images of **a)**90PLA/10PBAT, **b)** 90PLA/10PBAT/5PALF-steam-sur-silane, **c)** 90PLA/10PBAT/5PALF-steam-enz-silane, and **d)** 90PLA/10PBAT/5PALF-steam-sur-silane.

Figure 7a to 7d showed the fractured surface of the PALF bio-composite was reinforced with PALF 5 phr. As shown in Figure 4a, it is evident from the PLA/PBAT blend that PLA and PBAT may be two immiscible phases. From Figure 4b to 4d, it could be observed that the added PALF was distributed throughout the PLA/PBAT blend polymer. The fiber were well adhered with the polymer matrix, and thus, better stress transfer could be obtained in the 90PLA/10PBAT/5PALF composites.⁷

Conclusion

The study showed that surface treatment of pineapple leaf fibers (PALF) prior to their use as reinforcing agents can enhance their thermal and mechanical properties. The FTIR results showed a new peak at 1053 cm^{-1} of the silane treated fibers, which was the peak of Si-O-C. The new functional groups on the fiber surface improved thermal stability and adhesion between pineapple leaf fiber and PLA/PBAT biocomposites. SEM image showed that pre-treatment with steam leads to the better removal of lignin and the creation of a rougher fiber surface. SEM micrographs also confirmed silane adhesion to the pineapple leaf fiber surface in this research. TGA analysis revealed that pineapple leaf fibers modified with steam-sur-silane demonstrated the highest thermal stability. When pineapple leaf fibers were melt-compounded with 5 phr. in 90PLA/10PBAT blends, it provided better thermal stability. Additionally, it boosts the crystalline content, leading to improved mechanical properties. The mechanical properties of pineapple leaf fiber and PLA/PBAT biocomposites revealed that PALF treated with surfactant-silane exhibited improved mechanical properties compared to those treated with enzyme-silane and silane alone.

Acknowledgments

The authors are grateful for the research funding provided by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University.



Declaration

We acknowledge the use of Grammarly (AI tool) in supporting us to review our writing at the process of preparing our manuscript.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Yu T, Li Y. Influence of poly(butylenes adipate-co-terephthalate) on the properties of the biodegradable composites based on ramie/poly(lactic acid). *Compos. - A: Appl. Sci. Manuf.* 2014;58:24-9. doi: 10.1016/j.compositesa.2013.11.013
2. Chin SC, Tee KF, Tong FS, Ong HR, Gimbin J. Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced composites. *Mater. Today Commun.* 2020;23:100876. doi: 10.1016/j.mtcomm.2019.100876
3. Suwanruji P, Tuechart T, Smitthipong W, Chollakup R. Modification of pineapple leaf fiber surfaces with silane and isocyanate for reinforcing thermoplastic. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2016;30(10):1344-60. doi: 10.1177/08927057166328
4. Benyahia A, Merrouche A, Rahmouni ZEA, Mansour R, Serge W, Kouadri Z. Study of the alkali treatment effect on the mechanical behavior of the composite unsaturated polyester-Alfa fibers. *Mech. Ind.* 2014;15:69-73. doi: 10.1051/meca/2013082
5. Simão J, Carmona V, Marconcini J, Mattoso L, Barsberg S, Sanadi A. Effect of fiber treatment condition and coupling agent on the mechanical and thermal properties in highly filled composites of sugarcane bagasse fiber/PP. *Acc. Mater. Res.* 2016;19. doi: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0609
6. Peng Z, Wanqiang L, Qingsheng W, Ren J. Preparation, Mechanical, and thermal properties of biodegradable polyesters/poly(lactic acid) blends. *J. Nanomater.* 2010;2010. doi: 10.1155/2010/287082
7. Threepopnatkul P, Kaerkitcha N, Athipongarporn N. Effect of surface treatment on performance of pineapple leaf fiber-polycarbonate composites. *Compos. B: Eng.* 2009;40(7):628-32. doi: 10.1016/j.compositesb.2009.04.008

รายการอ้างอิง

1. Admin. (2017). คอมโพสิตวัสดุเส้นใยธรรมชาติ ในงานด้านนวัตกรรมทางอุตสาหกรรมในเชิงพาณิชย์ https://www.atdp-textiles.org/blog_fiber_composite/
2. Ahmed, F., & Mondal, M. I. H. (2021). 1 - Introduction to natural fibres and textiles. In M. I. H. Mondal (Ed.), *Fundamentals of Natural Fibres and Textiles* (pp. 1-32). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821483-1.00001-2>
3. Benyahia, A., Merrouche, A., Rahmouni, Z. E. A., Mansour, R., Serge, W., & Kouadri, Z. (2014). Study of the alkali treatment effect on the mechanical behavior of the composite unsaturated polyester-Alfa fibers. *Mechanics and Industry*, 15, 69-73. <https://doi.org/10.1051/meca/2013082>
4. Bondeson, D., & Oksman, K. (2007). Dispersion and characteristics of surfactant modified cellulose whiskers nanocomposites. *Composite Interfaces*, 14(7-9), 617-630. <https://doi.org/10.1163/156855407782106519>
5. Deng, Y., Yu, C., Wongwiwattana, P., & Thomas, N. L. (2018). Optimising Ductility of Poly(Lactic Acid)/Poly(Butylene Adipate-co-Terephthalate) Blends Through Co-continuous Phase Morphology. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(9), 3802-3816. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1256-x>
6. Dhakal, H. N., MacMullen, J., & Zhang, Z. Y. (2016). 5 - Moisture measurement and effects on properties of marine composites. In J. Graham-Jones & J. Summerscales (Eds.), *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites* (pp. 103-124). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-250-1.00005-3>
7. Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H.-P., & Sain, M. (2014). Progress Report on Natural Fiber Reinforced Composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 299(1), 9-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/mame.201300008>
8. George, M., Mussone, P. G., & Bressler, D. C. (2014). Surface and thermal characterization of natural fibres treated with enzymes. *Industrial Crops and Products*,

53, 365-373. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.037>

9. Gironès, J., Méndez, J., Vilaseca, F., & Mutjé, P. (2007). Effect of silane coupling agents on the properties of pine fibers/polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 103, 3706-3717. <https://doi.org/10.1002/app.25104>

10. Hallad, S., Devangamath, S., Banapurmath, N., Hunashyal, A. M., Dhanalakshmi, S., & Ramadevi, P. (2019). Study of the surfactants role in natural fibres reinforced composites for structural applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 577, 012182. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/577/1/012182>

11. Hassan, B., Chatha, S. A. S., Hussain, A., & Akhtar, N. (2017). Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097>

12. Herrera-Franco, P. J., & Valadez-González, A. (2005). A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 36(8), 597-608. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.04.001>

13. Hindi, J., Muralishwara, K., & Gurusurthy, B. M. (2025). Comparative analysis of physical, morphological, tensile and thermal stability characteristics of raw and alkali treated novel *Tinospora cordifolia* natural fiber. *Scientific Reports*, 15(1), 18596. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03627-y>

14. Hu, L., Fang, X., Du, M., Luo, F., & Guo, S. (2020). Hemicellulose-Based Polymers Processing and Application. *American Journal of Plant Sciences*, 11, 2066-2079. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1112146>

15. Jawaid, M., & Abdul Khalil, H. P. S. (2011). Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 1-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>

16. John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 71(3), 343-364. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.05.040>

17. Joshy, M. K., Lovely, M., & Joseph, R. (2008). Influence of Fiber Surface Modification on the Mechanical Performance of Isora-Polyester Composites. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 58(1), 2-20. <https://doi.org/10.1080/00914030802461824>
18. Lamsaf, H., Singh, S., Pereira, J., & Poças, F. (2023). Multifunctional Properties of PBAT with Hemp (*Cannabis sativa*) Micronised Fibres for Food Packaging: Cast Films and Coated Paper. *Coatings*, 13(7), 1195. <https://www.mdpi.com/2079-6412/13/7/1195>
19. Liyana, A., Ibrahim, N., & Yunus, W. (2013). Effect of (3-aminopropyl)trimethoxysilane on mechanical properties of PLA/PBAT blend reinforced kenaf fiber. *Iranian Polymer Journal*, 22. <https://doi.org/10.1007/s13726-012-0108-0>
20. Malkapuram, R., Kumar, V., & Negi, Y. S. (2009). Recent Development in Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28, 1169-1189. <https://doi.org/10.1177/0731684407087759>
21. Juviya, M., Jyoti Prakash, D., Manoj, T.P., & Kumar, S. (2022). Development of poly (butylene adipate-co-terephthalate) PBAT toughened poly (lactic acid) blends 3D printing filament. *Journal of Polymer Research*, 29. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03320-y>
22. Nakama, Y. (2017). Chapter 15 - Surfactants. In K. Sakamoto, R. Y. Lochhead, H. I. Maibach, & Y. Yamashita (Eds.), *Cosmetic Science and Technology* (pp. 231-244). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802005-0.00015-X>
23. Oğuz, H., Doğan, Ç., Kara, D., Ozen, T., Ovalı, D., & Nofar, M. R. (2019). *Development of PLA-PBAT and PLA-PBSA bio-blends: Effects of processing type and PLA crystallinity on morphology and mechanical properties* (Vol. 2055). <https://doi.org/10.1063/1.5084813>
24. Petinakis, E., Yu, L., Simon, G., & Dean, K. (2013). Natural Fibre Bio-Composites Incorporating Poly(Lactic Acid). In M. A. Masuelli (Ed.), *Fiber Reinforced Polymers - The Technology Applied for Concrete Repair*, (pp. 41-58). Intech open. <https://doi.org/10.5772/52253>

25. Pitivut, S., Suttiruengwong, S., & Seadan, M. (2015). Effect of reactive agent and transesterification catalyst on properties of PLA/PBAT blends. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 87. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/87/1/012090>
26. Prieur, B., Meub, M., Wittemann, M., Klein, R., Bellayer, S., Fontaine, G., & Bourbigot, S. (2017). Phosphorylation of lignin: characterization and investigation of the thermal decomposition. *RSC Advances.*, 7, 16866-16877. <https://doi.org/10.1039/C7RA00295E>
27. Ruedee. (2020). ไผ่ผะพร้าว <https://www.ruedee.com/th/fabric/coir/>
28. Sethupathi, M., Khumalo, M. V., Skosana, S. J., & Muniyasamy, S. (2024). Recent Developments of Pineapple Leaf Fiber (PALF) Utilization in the Polymer Composites—A Review. *Separations*, 11(8), 245. <https://www.mdpi.com/2297-8739/11/8/245>
29. Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites – a review. *Journal of Composite Materials*, 46, 973-986. <https://doi.org/10.1177/0021998311413623>
30. Shamsuri, A. A., & Jamil, Md. S. N. A. (2020). A Short Review on the Effect of Surfactants on the Mechano-Thermal Properties of Polymer Nanocomposites. *Applied Sciences*, 10(14), 4867. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/14/4867>
31. Shi, K., Liu, G., Sun, H., Yang, B., & Weng, Y. (2022). Effect of Biomass as Nucleating Agents on Crystallization Behavior of Polylactic Acid. *Polymers*, 14(20), 4305. <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/20/4305>
32. Su, S., Duhme, M., & Kopitzky, R. (2020). Uncompatibilized PBAT/PLA Blends: Manufacturability, Miscibility and Properties. *Materials*, 13(21), 4897. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/21/4897>
33. Thomason, J. L., & Rudeiros-Fernández, J. L. (2021). Thermal degradation behaviour of natural fibres at thermoplastic composite processing temperatures. *Polymer Degradation and Stability*, 188, 109594. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109594>
34. Threepopnatkul, P., Kaerkitcha, N., & Athipongarporn, N. (2009). Effect of surface

treatment on performance of pineapple leaf fiber–polycarbonate composites.

Composites Part B: Engineering, 40(7), 628-632.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.008>

35. Venkatachalam, N., Navaneethakrishnan, P., Rajsekar, R. & Shankar, S. (2016). Effect of Pretreatment Methods on Properties of Natural Fiber Composites: A Review. *Polymers and Polymer Composites*, 24, 555-566.

<https://doi.org/10.1177/096739111602400715>

36. Verenich, S., Arumugam, K., Shim, E., & Pourdeyhimi, B. (2008). Treatment of Raw Cotton Fibers with Cellulases for Nonwoven Fabrics. *Textile Research Journal*, 78, 540-548. <https://doi.org/10.1177/0040517507083308>

37. Wang, G., Yang, X., & Wang, W. (2019). Reinforcing Linear Low-Density Polyethylene with Surfactant-Treated Microfibrillated Cellulose. *Polymers*, 11(3), 441.

<https://doi.org/10.3390/polym11030441>

38. Xu, C., Yuan, D., Fu, L., & Chen, Y. (2014). Physical blend of PLA/NR with co-continuous phase structure: Preparation, rheology property, mechanical properties and morphology. *Polymer Testing*, 37, 94-101.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2014.05.005>

39. เลิศวารสิริกุล, อ. (2554). พอลิแลกติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์. 77(24).

file:///C:/Users/Windows/Downloads/kejv024n077a001.pdf

40. Admin. (2022). เส้นใยธรรมชาติคืออะไร (*Natural fibers*)

<http://otop.dss.go.th/index.php/knowledge/interesting-articles/259-natural-fibers>

41. เหลี่ยมมณีนี, ว. (2015.). เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติในมุมมองคณิตศาสตร์ การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 2 สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร, มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร.

42. แววนันรี, ช.& หรร่าร์ศมี ก. (2022). เทคโนโลยีของเครื่องพิมพ์สามมิติ

<https://sites.google.com/a/bumail.net/3dprintingdimension/thekhnoyoi-khxng-kheruxngphimph-sam-miti>

43. กาญจนวสิกุล, ณ., จอมศรี, ช., ทองชนะ, ศ., พัฒนถาบุตร, ป. (2559). อิทธิพลของสารเชื่อมประสานไซเลนที่มีผลต่อสมบัติความคงทนต่อสภาพอากาศของวัสดุเสริมองค์ประกอบพอลิแลคติกแอซิดผสมผงไม้เพื่อใช้เป็นวัสดุตกแต่งอาหาร. การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์, โรงแรม ไม้ด้า ทวารวดี แกรนด์ นครปฐม.
44. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (2020) บทที่ 9 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภทพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท.
http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624234830u.pdf
45. ยานะพันธ์, ร. (2562). กัญชง (เฮมพ์) กับ กัญชา ต่างกันอย่างไร?
<https://www.hrdi.or.th/articles/Detail/37>
46. กาวีต๊ะ, ล., เสี่ยงหลวง, ฐ., เผ่าพันธ์, ย., พรหมรัตน์รักษ์, ก., ณ นคร, ม., สุวรรณวงศ์, ศ., ณ นคร, ว. & ต้นติวิวัฒน์, ส. (2022). เส้นใยพืช : กัญชง
http://www3.rdi.ku.ac.th/exhibition/50/plant/43_plant/43_plant.html#author
47. วงศ์วิศิษฐ์ชัย, พ. (2562). การจำลองการออกแบบและการเลือกใช้วัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง ศิลปากร].
48. ศูนย์วิจัยพืชสวนจันทบุรี. (2559). แนะนำเทคนิค เลือกปลูกสับปะรดอย่างไร ให้ตรงกับความต้องการของตลาด https://www.technologychaoban.com/agricultural-technology/article_189067
49. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ. (2024). อุตสาหกรรมเส้นใยกัญชง
<http://www.thailandhemp.info/thti/hemp-shell-fiber.php?menu=281>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายนรเศรษฐ์ วงษ์วรรณ
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ผลงานตีพิมพ์	Norrasate Wongwaroon, Rattanaphol Mongkhorrattanasit, Pajaera Patanathabutr. (2024). "Improvement of Mechanical and Thermal Properties of PLA/PBAT Biocomposites by Surface Modified Pineapple Leaf Fiber." In Proceeding of the 6th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat@2024), 144-156. Chiang Mai, Thailand, November 5-8, 2024. Chiang Mai: Chiang Mai University.
รางวัลที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยการสอนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีการศึกษา 2564-2566 สังกัดภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร

