การเตรียมและการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดจากพอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และโลหะออกไซด์

โดย

นางสาวณัฐกมล ศรีสมผัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดจากพอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และโลหะออกไซด์

โดย
นางสาวณัฐกมล ศรีสมผัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2
ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ
มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2567
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

PREPARATION AND PROPERTY STUDY OF HYBRID COMPOSITE BASED ON POLY(LACTIC ACID), POLY(BUTYLENE ADIPATE-CO-TEREPHTHALATE) AND METAL OXIDE

By

MISS Nutkamol SRISOMPHUN

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	การเตรียมและการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดจากพอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และโลหะออกไซด์
โดย	นางสาวณัฐกมล ศรีสมผัน
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุดศิริ เหมศรี)

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัตนพล มงคลรัตนาสิทธิ์)

650920009 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2
คำสำคัญ : วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด, พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท, อะลูมิเนียมออกไซด์, ซิงค์ออกไซด์, ไทเทเนียมไดออกไซด์, γ-(ไตรเอทอกซีไซลิล)โพรพิล เมทาคริเลต

นางสาว ณัฐกมล ศรีสมผัน: การเตรียมและการศึกษาสมบัติของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดจากพอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และโลหะออกไซด์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยใช้พอลิแลกติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) ผสมร่วมกับอนุภาคโลหะออกไซด์ ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน (TESPMA) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ตอนที่ 1 ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT อัตราส่วน 80:20 ให้ปริมาณผลึกของพอลิเมอร์สูงสุด มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม และมีลักษณะสัณฐานวิทยาการกระจายตัวของ PBAT ในเมทริกซ์ PLA อย่างสม่ำเสมอ ตอนที่ 1 นำพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนดังกล่าวไปผสมกับอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับผิวด้วย TESPMA ในปริมาณ 1, 5 และ 10% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลต่อสมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิต ผลการทดลองพบว่า การเติม ZnO ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนลดลง ขณะที่ Al_2O_3 และ TiO_2 ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การเติมอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย TESPMA ลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ช่วยเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึง ความแข็งแรง และความต้านทานแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิต ในขณะที่ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงดัดงอลดลง การเพิ่มปริมาณโลหะออกไซด์มีผลต่อสมบัติเชิงกลเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม การเติมโลหะออกไซด์มีในปริมาณน้อยช่วยให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคได้ดี จากผลการศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวสามารถเสริมสมบัติของวัสดุชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีแนวโน้มการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงเชิงกลสูงและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น บรรจุภัณฑ์ทางอาหารที่ใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้ง ฟิล์มชีวภาพ ถุงพลาสติกย่อยสลายได้ อุปกรณ์การเกษตร และชิ้นส่วนทางชีวการแพทย์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

650920009 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)
Keyword : Hybrid Composite, PLA/PBAT blend, Aluminium oxide, Zinc oxide, Titanium dioxide, γ-(triethoxysilyl) propyl methacrylate

MISS Nutkamol SRISOMPHUN : Preparation and property study of hybrid composite based on Poly(lactic acid), Poly(butylene adipate-co-terephthalate) and metal oxide Thesis advisor : Assistant Professor Pajaera Patanathabutr, Ph.D.

This study focuses on the development of hybrid composite materials derived from biodegradable polymers by blending polylactic acid (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) with surface-modified metal oxide nanoparticles, including aluminum oxide (Al_2O_3), zinc oxide (ZnO), and titanium dioxide (TiO_2). Surface modification of the metal oxides was carried out using a silane coupling agent, TESPMA, to enhance interfacial compatibility between the inorganic fillers and the polymer matrix. In the first part of the research, PLA/PBAT blends were prepared in various ratios to evaluate their crystallinity and mechanical behavior. The blend with a PLA:PBAT ratio of 80:20 exhibited the highest crystallinity, favorable mechanical properties, and homogeneous dispersion of PBAT within the PLA matrix. In the second part, this optimized blend (PLA/PBAT 80:20) was reinforced with TESPMA-treated metal oxide particles at concentrations of 1, 5, and 10 wt%. The objective was to assess the influence of filler type and loading level on the thermal and mechanical performance of the hybrid composites. Results showed that TESPMA-treated ZnO addition reduced the thermal decomposition temperature, while TESPMA-treated Al_2O_3 and TESPMA-treated TiO_2 had negligible effects on thermal stability. All three metal oxides contributed to improved tensile strength, impact resistance, and overall mechanical performance; however, reductions in elongation at break and flexural strength were observed. Increasing the filler content yielded only marginal effects on mechanical properties, but lower concentrations led to better particle dispersion throughout the polymer matrix. Overall, the incorporation of surface-modified metal oxide nanoparticles effectively enhanced the properties of PLA/PBAT-based biodegradable composites. These materials hold significant potential for applications requiring high mechanical strength combined

with environmental sustainability, such as disposable food packaging, biodegradable films, compostable bags, agricultural implements, and selected biomedical components

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้น ต้องขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปาเจรา พัฒนถาบุตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้คอยช่วยให้คำปรึกษา รวมถึงชี้แนะวิธีการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทำการวิจัยมาโดยตลอด จนถึงการตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างละเอียดถี่ถ้วน

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุดศิริ เหมศรี ที่สละเวลามาเป็นประธาน ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. รัตนพล มงคลรัตนาสิทธิ์ อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ อีกทั้งยังตรวจสอบและให้ข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ที่ได้อบรมสั่งสอน รวมถึงให้ความรู้กับผู้วิจัยจนสามารถทำงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาทุกท่านที่ช่วยติดต่อประสานงานในเรื่องต่างๆ จนทำให้การทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก นักวิทยาศาสตร์ และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่คอยช่วยเหลือและสอนการใช้เครื่องมือ จนเกิดความชำนาญในการใช้เครื่องมากขึ้น ทำให้การดำเนินงานวิจัยมีความราบรื่น

ขอขอบคุณทุนการศึกษาและทุนการนำเสนอผลงานทางวิชาการจากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากรในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เลี้ยงดูและให้การสนับสนุนผู้วิจัยมาเป็นอย่างดี ทำให้การศึกษาและการทำงานวิจัย ณ ที่แห่งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ณัฐกมล ศรีสมผัน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ฉ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

สารบัญ ..... ฌ

สารบัญตาราง ..... ฑ

สารบัญรูปภาพ ..... ด

สารบัญอักษรย่อ ..... ป

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 พอลิแลกติกแอซิด 4

2.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท 5

2.3 โลหะออกไซด์ 6

2.3.1 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) 6

2.3.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) 7

2.3.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) 8

2.4 การใช้งานทางการแพทย์ 9

2.4.1 พอลิแลกติกแอซิด (PLA) 9

2.4.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) 9
2.4.3 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) 9
2.4.4 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) 9
2.4.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) 10
2.5 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature) 11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 50
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 50
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 52
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ 53
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 54
3.4.1 การเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PLA/PBAT) 54
3.4.2 การเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) 58
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 64
4.1 การศึกษาเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PLA/PBAT) 64
4.1.1 การศึกษาเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) 65
4.1.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหาปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) 69
4.1.3 การศึกษาดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (MFI) 73

4.1.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท 74

4.1.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM)82

4.2 การเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) 87

4.2.1 การศึกษาเอกลักษณ์ของโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิว 87

4.2.1.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชั่นของโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis 87

4.2.1.2 การศึกษาเสถียรภาพ การสลายตัวทางความร้อน และประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)..... 90

4.2.1.3 การทดสอบค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย γ-(triethoxysily)propyl methacrylate (TESPMA) 97

4.2.1.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยโหมด EDS..... 98

4.2.2 การศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO)..... 107

4.2.2.1 การศึกษาเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)..... 107

4.2.2.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหาปริมาณผลึกของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดย

น้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)..... 113

4.2.2.3 การศึกษาดัชนีการไหลของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) (MFI) 120

4.2.2.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) 122

4.2.2.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM). 133

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 140

5.1 สรุปผลการวิจัย 140

5.1.1 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างการเติมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท 140

5.1.2 การเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) 141

5.2 ข้อเสนอแนะ 143

รายการอ้างอิง 145

ภาคผนวก 155

ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ 156

ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ 186

ภาคผนวก ค. การนำเสนอผลงานวิจัย 188

ประวัติผู้เขียน 208

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ชิ้นงานจากการผสม PBAT/PLA ด้วยอัตราส่วนต่างๆ [53] 11

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลทางความร้อนจากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PBAT, PLA และ PBAT/PLA [53] 12

ตารางที่ 2.3 T_c, ΔH_c, T_m และ ΔH_m ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ และที่อัตราการให้ความร้อนที่แตกต่าง [34] 19

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางความร้อนจากการทดสอบ DSC ของ PBAT บริสุทธิ์ และ PBAT/TiO_2 [9] 24

ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนในการผสมวัสดุคอมโพสิต [27] 25

ตารางที่ 2.6 ข้อมูลเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA/PBAT และ PLA/PBAT/Al_2O_3 จากกราฟ TGA [16] 28

ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนในการผสม PLA/MO [26] 33

ตารางที่ 2.8 โซนในการต้านเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ของ PLA, PLA/ZnO, PLA/MgO และ PLA/TiO_2 [26] 35

ตารางที่ 2.9 ความต้านทานต่อแรงดึงของ PLA/ZnO, PLA/MgO และ PLA/TiO_2 [26] 37

ตารางที่ 2.10 อัตราส่วนของผสม PBAT/ZnO และสัญลักษณ์ของแต่ละอัตราส่วน [56] 39

ตารางที่ 2.11 ข้อมูลจากการทดสอบ TGA ของฟิล์ม PBAT และ PBAT/ZnO [56] 41

ตารางที่ 2.12 ความหนา, สมบัติเชิงกล และความสามารถในการแพร่ผ่านของออกซิเจนในฟิล์ม PLA ที่ผสม ZnO (ST) และ ZnO (UT) [7] 43

ตารางที่ 2.13 ผลของ ZnO (ST) และ ZnO (UT) ต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA [7] 44

ตารางที่ 2.14 อัตราส่วนของสารในการปรับปรุงพื้นผิว [18] 47

ตารางที่ 2.15 พารามิเตอร์ทางความร้อนของ nano-TiO_2 และ nano-TiO_2 modified [18] 48

ตารางที่ 2.16 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ TMSPM บนผิวของ nano-TiO_2 [18] 49

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนระหว่าง PLA/PBAT ที่ทำการผสม 54

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนและตัวย่อของโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิว 58

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของ PLA/PBAT 80:20+5m-MO 60

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัวของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT 67

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT 69

ตารางที่ 4.3 ค่าโมดูลัส, ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด, ค่าความต้านทานต่อการดัดงอ, ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก และค่าความแข็งที่ผิว ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT 78

ตารางที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 พลังงาน 15 kV ที่กำลังขยาย 1000x และ 4000x ตามลำดับ ... 82

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ 1m- Al_2O_3, 5m- Al_2O_3 และ 10m- Al_2O_3 91

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ 1m-ZnO, 5m-ZnO และ 10m-ZnO 91

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ 1m-TiO_2, 5m-TiO_2 และ 10m-TiO_2 91

ตารางที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของ Al_2O_3 และ modified Al_2O_3 ที่ปริมาณ TESPMA, 5%wt, 10%wt พลังงาน 5 kV กำลังขยาย 1000x และ 2500x ตามลำดับ 99

ตารางที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของ ZnO และ modified ZnO ที่ปริมาณ TESPMA 1%wt, 5%wt, 10%wt พลังงาน 5 kV กำลังขยาย 1000x, 2500x และ 20,000x ตามลำดับ 101

ตารางที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของ TiO_2 และ modified TiO_2 ที่ปริมาณ TESPMA 1%wt, 5%wt, 10%wt พลังงาน 5 kV กำลังขยาย 1000x, 2500x และ 20,000x ตามลำดับ 102

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบทางเคมีของ 5m-Al_2O_3 103

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของ 5m-ZnO 104

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบทางเคมีของ 5m-TiO_2 105

ตารางที่ 4.14 อุณหภูมิการสลายตัวของของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20 +5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt และ PBAT 109

ตารางที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt และ PBAT 119

ตารางที่ 4.16 ค่าโมดูลัส, ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด, ค่าความต้านทานต่อการดัดงอ, ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก และค่าความแข็งที่ผิว ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 1, 5, 10 %wt และ PBAT 128

ตารางที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 ปริมาณ 5m-Al_2O_3 1%, 5% และ 10%wt พลังงาน 15 kV กำลังขยาย 100x, 500x, และ 1000x 134

ตารางที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO ปริมาณ 5m-ZnO 1%, 5% และ 10%wt พลังงาน 15 kV กำลังขยาย 100x, 500x, 1000x, 2,500x, 5,000x, และ 20,000x 135

ตารางที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-TiO_2 1%, 5% และ 10%wt พลังงาน 15 kV กำลังขยาย 100x, 500x, 1000x, 2,500x, 5,000x, และ 20,000x 137

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ PLA, PDLLA, PLLA และ PDLA [78] 4

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกรดแลกติก [82] 5

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ PBAT [79] 5

รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PBAT [79] 6

รูปที่ 2.5 โครงสร้างอะลูมิเนียมออกไซด์ [77] 7

รูปที่ 2.6 โครงสร้างซิงค์ออกไซด์ [41] 8

รูปที่ 2.7 โครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) rutile และ (b) anatase [35] 8

รูปที่ 2.8 กราฟ DSC แสดงการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PBAT/PLA [53] 11

รูปที่ 2.9 สัณฐานวิทยาพื้นผิว flat film ของ PBAT/PLA ที่อัตราส่วน (a) 90/10 (CD), (b) 90/10 (MD), (c) 60/40 (CD) และ (d) 60/40 (MD) [53] 13

รูปที่ 2.10 สัณฐานวิทยาพื้นผิว panel ของ PBAT/PLA ที่อัตราส่วน (a) 90/10, (b) 80/20, (c) 70/30, (d) 60/40, (e) 50/50, (f) 40/60, (g) 30/70, (h) 20/80 และ (i) 10/90 [53] 13

รูปที่ 2.11 สมบัติเชิงกลของ PBAT, PLA และ PBAT/PLA ขึ้นรูปแบบ panel (a) ค่าโมดูลัสและค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด , (b) ค่าการยืดตัวที่จุดขาด [53] 14

รูปที่ 2.12 สมบัติเชิงกลของ PBAT, PLA และ PBAT/PLA ขึ้นรูปแบบ flat film และ blown film ในทิศทาง cross direction (CD) และ machine direction (MD) โดย (a1) ค่าโมดูลัสของ flat film, (b1) ค่าโมดูลัสของ blown film, (a2) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ flat film, (b2) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ blown film, (a3) ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของ flat film และ (b3) ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของ blown film [53] 15

รูปที่ 2.13 G’ และ G”ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT [34] 17

รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด และอัตราการเฉือนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT [34] 17

รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง mechanical loss factor และอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ [34] 18

รูปที่ 2.16 การให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PLA/PBAT อัตราการให้ความร้อน 5°C/min (a) PBAT, (b) 20% PBAT, (c) 15% PBAT, (d) 10% PBAT, (e) 5% PBAT และ (F) PLA [34] 18

รูปที่ 2.17 การให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PLA/PBAT อัตราการให้ความร้อน 10°C/min (a) PBAT, (b) 20% PBAT, (c) 15% PBAT, (d) 10% PBAT, (e) 5% PBAT และ (F) PLA [34] 19

รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงและการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PBAT แตกต่างกัน [34] 20

รูปที่ 2.19 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PBAT แตกต่างกัน [34] 20

รูปที่ 2.20 ผลของปริมาณ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมต่อความต้านทานแรงกระแทก [34] 21

รูปที่ 2.21 XRD pattern ของ a) ผง TiO_2 และ PBAT/TiO_2 ที่มีปริมาณ TiO_2 แตกต่างกัน b) 0%, c) 0.25%, d) 0.5%, e) 1% และ f) 3%wt [9] 21

รูปที่ 2.22 สมบัติเชิงกลของ PBAT บริสุทธิ์และ PBAT/TiO_2 ที่มีปริมาณ TiO_2 แตกต่างกัน a) ค่าโมดูลัส, b) ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และ c) ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด [9] 22

รูปที่ 2.23 สัณฐานวิทยาของผง TiO_2 ที่กำลังขยายแตกต่างกัน a) 5000X และ b) 50000X [9] ... 23

รูปที่ 2.24 สัณฐานวิทยาของ PBAT/TiO_2 ที่มีปริมาณ TiO_2 แตกต่างกัน ที่กำลังขยาย 10000X a) 0%, b) 0.25%, c) 0.5%, d) 1% และ e) 3%wt [9] 23

รูปที่ 2.25 วัสดุและชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต [27] 25

รูปที่ 2.26 แรงดึง และแรงกดอัด ของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต [27] 25

รูปที่ 2.27 ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อแรงกดอัด ของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต [27] 26

รูปที่ 2.28 ความเครียดจากแรงดึง และความเครียดจากแรงอัด ของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต [27] .. 26

รูปที่ 2.29 การทดสอบความแข็งของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต [27] 27

รูปที่ 2.30 สัณฐานวิทยาของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต (70 wt% ของ PLA/30 wt% ของอนุภาค Al_2O_3) [27] 27

รูปที่ 2.31 กราฟ TGA ของ (a) PLA/PBAT และ (b) PLA/PBAT/Al_2O_3 [16] 28

รูปที่ 2.32 ความทานต้านต่อการโค้งงอของ (a) PLA/PBAT และ (b) PLA/PBAT/Al_2O_3 [16] 29

รูปที่ 2.33 อีลาสติกโมดูลัสของ (a) PLA/PBAT และ (b) PLA/PBAT/Al_2O_3 [16] 29

รูปที่ 2.34 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของ (a) PLA/PBAT และ (b) PLA/PBAT/Al_2O_3 [16] .. 30

รูปที่ 2.35 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT หลังจากการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก : (a) PLA บริสุทธิ์, (b) 5 wt% PBAT, (c) 10 wt% PBAT, (d) 15 wt% PBAT และ (e) 20 wt% PBAT (ที่กำลังขยาย 1000) [16] 31

รูปที่ 2.36 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT/Al_2O_3 หลังจากการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก : (a) 5 wt% PBAT, (b) 5 wt% PBAT/0.5 wt% Al_2O_3, (c) 5 wt% PBAT/1 wt% Al_2O_3, (d) 5 wt% PBAT/1.5 wt% Al_2O_3 และ (e) 5 wt% PBAT/2 wt% Al_2O_3 (ที่กำลังขยาย 1000) [16] ... 32

รูปที่ 2.37 FTIR spectra ของ PLA/ZnO [26] 33

รูปที่ 2.38 FTIR spectra ของ PLA/MgO [26] 34

รูปที่ 2.39 FTIR spectra ของ PLA/TiO_2 [26] 34

รูปที่ 2.40 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA บริสุทธิ์, (b) PLA/ZnO 0.5 phr และ (c) PLA/ZnO 2.0 phr [26] 36

รูปที่ 2.41 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA บริสุทธิ์, (b) PLA/MgO 0.5 phr และ (c) PLA/MgO 2.0 phr [26] 36

รูปที่ 2.42 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA บริสุทธิ์, (b) PLA/TiO_2 0.5 phr และ (c) PLA/TiO_2 2.0 phr [26] 36

รูปที่ 2.43 กราฟ TGA ของ PLA/MgO [26] 37

รูปที่ 2.44 กราฟ TGA ของ PLA/ZnO [26] 38

รูปที่ 2.45 กราฟ TGA ของ PLA/TiO_2 [26] 38

รูปที่ 2.46 FTIR spectra ของ PBAT และ PBAT/ZnO ที่ผสม ZnO ปริมาณแตกต่างกัน [56] 39

รูปที่ 2.47 สัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมโพสิต (a) PZ0, (b) PZ1, (c) PZ3, (d) PZ5 และ (e) PZ10 [56] 40

รูปที่ 2.48 (a) ความต้านทานต่อแรงดึง, (b) ความหนาของฟิล์ม และ (c) ความโปร่งใสของฟิล์ม PBAT/ZnO [56] 41

รูปที่ 2.49 อัตราการแพร่ผ่านของออกซิเจนในฟิล์ม PBAT และ PBAT/ZnO ณ อุณหภูมิ 25°C [56] 42

รูปที่ 2.50 สัณฐานวิทยาของ (A) PLA/PEG, (B) PLA/PEG/7.5% ZnO (UT) และ (C) PLA/PEG/7.5% ZnO (ST) [7] 45

รูปที่ 2.51 ผลการทดสอบการต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์ม PLA ที่ผสม ZnO (UT) และ ZnO (ST) ปริมาณ 2.5-10% (a) เชื้อ *L. monocytogenes* และ (b) เชื้อ *S. Typhimurium* [7] 46

รูปที่ 2.52 IR spectra ของ nano-TiO_2 และ nano-TiO_2 modified ที่ปริมาณ TMSPM แตกต่างกัน [18] 47

รูปที่ 2.53 TGA diagrams ของ nano-TiO_2 ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยปริมาณ TMSPM ที่แตกต่างกัน [18] 48

รูปที่ 2.54 หยดน้ำบนพื้นผิวของ TiO_2-T3 [18] 49

รูปที่ 4.1 กราฟ TGA (a) และกราฟ DTG (b) ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT 68

รูปที่ 4.2 DSC thermograms ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT 70

รูปที่ 4.3 ดัชนีการไหลของของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT ที่ 190°C load cell ขนาด 2.16 kg 73

รูปที่ 4.4 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม 79

รูปที่ 4.5 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม 79

รูปที่ 4.6 ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสม 80

รูปที่ 4.7 ค่าความต้านทานต่อการดัดงอของพอลิเมอร์ผสม 80

รูปที่ 4.8 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม 81

รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งที่ผิวของพอลิเมอร์ผสม 81

รูปที่ 4.10 IR spectra ของ Al_2O_3 และmodified Al_2O_3 ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt 88

รูปที่ 4.11 IR spectra ของ ZnO และmodified ZnO ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt ... 88

รูปที่ 4.12 IR spectra ของ TiO_2 และmodified TiO_2 ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt 89

รูปที่ 4.13 กราฟ TGA (a) และกราฟ DTG (b) ของ Al_2O_3 และmodified Al_2O_3 ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt ... 92

รูปที่ 4.14 กราฟ TGA (c) และกราฟ DTG (d) ของ ZnO และmodified ZnO ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt ... 93

รูปที่ 4.15 กราฟ TGA (e) และกราฟ DTG (f) ของ TiO_2 และmodified TiO_2 ด้วย TESPMA ที่ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt ... 94

รูปที่ 4.16 ค่ามุมสัมผัสของ Al_2O_3, ZnO, TiO_2 และ Al_2O_3, ZnO, TiO_2 ที่ปรับปรุงผิวด้วยด้วย TESPMA ที่ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt ... 97

รูปที่ 4.17 EDS spectra ของ 5m-Al_2O_3 ... 103

รูปที่ 4.18 EDS spectra ของ 5m-ZnO ... 104

รูปที่ 4.19 EDS spectra ของ 5m-TiO_2 ... 105

รูปที่ 4.20 กราฟ TGA (a) และกราฟ DTG (b) ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt และ PBAT ... 108

รูปที่ 4.21 กราฟ DSC ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 ที่ปริมาณ 5m-Al_2O_3 1, 5, 10 %wt และ PBAT ... 113

รูปที่ 4.22 กราฟ DSC ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO ที่ปริมาณ 5m-ZnO 1, 5, 10 %wt และ PBAT ... 115

รูปที่ 4.23 กราฟ DSC ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-TiO_2 1, 5, 10 %wt และ PBAT ... 117

รูปที่ 4.24 ดัชนีการไหลของของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO และ PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5 และ 10 %wt ที่ 190°C load cell ขนาด 2.16 kg ... 120

รูปที่ 4.25 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต ... 130

รูปที่ 4.26 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุคอมโพสิต.....130
รูปที่ 4.27 ค่าโมดูลัสของวัสดุคอมโพสิต.....131
รูปที่ 4.28 ค่าความต้านทานต่อการดัดงอของวัสดุคอมโพสิต.....131
รูปที่ 4.29 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิต.....132
รูปที่ 4.30 ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุคอมโพสิต.....132

มหาวิทยาลัยศิลปากร

สารบัญอักษรย่อ

อักษรย่อ	ความหมายภาษาไทย	ความหมายภาษาอังกฤษ
PLA	พอลิแลกติกแอซิด	Poly(lactic acid)
PLA/PBAT 80:20	พอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20	Poly(lactic acid) /Poly (butylene adipate-co-terephthalate) 80:20
PLA/PBAT 80:20 + 1% 5m-Al_2O_3	วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสม 1% โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Hybrid composite base on Poly(lactic acid) /Poly (butylene adipate-co-terephthalate) 80:20 with 1%wt Aluminium oxide, surface modified with 5%wt TESPMA
PLA/PBAT 80:20 + 5% 5m-Al_2O_3	วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสม 5% โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Hybrid composite base on Poly(lactic acid) /Poly (butylene adipate-co-terephthalate) 80:20 with 5%wt Aluminium oxide, surface modified with 5%wt TESPMA
PLA/PBAT 80:20 + 10% 5m-Al_2O_3	วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสม 10% โดยน้ำหนัก อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Hybrid composite base on Poly(lactic acid) /Poly (butylene adipate-co-terephthalate) 80:20 with 10%wt Aluminium oxide, surface modified with 5%wt TESPMA
PLA/PBAT 80:20 + 1% 5m-ZnO	วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-	Hybrid composite base on Poly(lactic acid) /Poly

อักษรย่อ	ความหมายภาษาไทย	ความหมายภาษาอังกฤษ
	โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสม 1% โดยน้ำหนัก ซิงค์ออกไซด์ ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	(butylene adipate-co-terephthalate) 80:20 with 1%wt Zinc oxide, surface modified with 5%wt TESPMA
PLA/PBAT 80:20 + 5% 5m-ZnO	วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสม 5% โดยน้ำหนัก ซิงค์ออกไซด์ ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Hybrid composite base on Hybrid composite base on Poly(lactic acid) /Poly (butylene adipate-co-terephthalate) 80:20 with 5%wt Zinc oxide, surface modified with 5%wt TESPMA
PLA/PBAT 80:20 + 10% 5m-ZnO	วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสม 10% โดยน้ำหนัก ซิงค์ออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Hybrid composite base on Poly(lactic acid) /Poly (butylene adipate-co-terephthalate) 80:20 with 10%wt Zinc oxide, surface modified with 5%wt TESPMA
PLA/PBAT 80:20 + 1% 5m-TiO_2	วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสม 1% โดยน้ำหนัก ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Hybrid composite base on Poly(lactic acid) /Poly (butylene adipate-co-terephthalate) 80:20 with 1%wt Titanium dioxide, surface modified with 5%wt TESPMA
PLA/PBAT 80:20 + 5% 5m-TiO_2	วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสม 5% โดยน้ำหนัก ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Hybrid composite base on Poly(lactic acid) /Poly (butylene adipate-co-terephthalate) 80:20 with 5%wt Titanium dioxide, surface modified with 5%wt TESPMA
PLA/PBAT 80:20 +	วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลก	Hybrid composite base on

อักษรย่อ	ความหมายภาษาไทย	ความหมายภาษาอังกฤษ
10% 5m-TiO_2	ติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสม 10% โดยน้ำหนัก ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Poly(lactic acid) /Poly (butylene adipate-co-terephthalate) 80:20 with 10%wt Titanium dioxide, surface modified with 5%wt TESPMA
PBAT	พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท	Poly (butylene adipate-co-terephthalate)
TESPMA	3-(ไตรเอทอกซีไซลิล)โพรพิล เมทาคริเลต	γ-(triethoxysily)propyl methacrylate
1m-Al_2O_3	อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 1% โดยน้ำหนัก	Aluminium oxide, surface modified with 1%wt TESPMA
5m-Al_2O_3	อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Aluminium oxide, surface modified with 5%wt TESPMA
10m-Al_2O_3	อะลูมิเนียมออกไซด์ ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 10% โดยน้ำหนัก	Aluminium oxide, surface modified with 10%wt TESPMA
1m-ZnO	ซิงค์ออกไซด์ ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 1% โดยน้ำหนัก	Zinc oxide, surface modified with 1%wt TESPMA
5m-ZnO	ซิงค์ออกไซด์ ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Zinc oxide, surface modified with 5%wt TESPMA
10m-ZnO	ซิงค์ออกไซด์ ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 10% โดยน้ำหนัก	Zinc oxide, surface modified with 10%wt TESPMA
1m-TiO_2	ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 1% โดยน้ำหนัก	Titanium dioxide, surface modified with 1%wt TESPMA
5m-TiO_2	ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Titanium dioxide, surface modified with 5%wt TESPMA
10m-TiO_2	ไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 10% โดยน้ำหนัก	Titanium dioxide, surface modified with 10%wt TESPMA
MO	โลหะออกไซด์	Metal oxide
m-MO	โลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย	Metal oxide, surface modified

อักษรย่อ	ความหมายภาษาไทย	ความหมายภาษาอังกฤษ
	TESPMA	with TESPMA
PLA/PBAT 80:20 +5m-MO	วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิดและ พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก	Hybrid composite base on Poly(lactic acid) /Poly (butylene adipate-co-terephthalate) 80:20 with Metal oxide, surface modified with 5%wt TESPMA
Al_2O_3	อะลูมิเนียมออกไซด์	Aluminium oxide
ZnO	ซิงค์ออกไซด์	Zinc oxide
TiO_2	ไทเทเนียมไดออกไซด์	Titanium dioxide

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด (Hybrid composite) เป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) ผสมกันอยู่ โดยส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์จะมีความเกี่ยวข้องกับความแข็งแรงเชิงกล ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์จะมีความเกี่ยวข้องกับการสร้างพันธะแรงยึดเหนี่ยว ยึดสารอนินทรีย์เข้าด้วยกัน สามารถจำแนกได้ตามอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ ได้แก่ วัสดุไฮบริดคลาส I จะเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์, พันธะไฮโดรเจน หรือ แรงไฟฟ้าสถิตแบบอ่อน และวัสดุไฮบริดคลาส II จะเกิดพันธะโควาเลนต์ [50] โดยวัสดุชนิดนี้มีการพัฒนาตั้งแต่ทศวรรษ 1980 จากกระบวนการเคมีอนินทรีย์ในสภาวะการสังเคราะห์ที่ไม่รุนแรงซึ่งพัฒนามาจากกระบวนการโซล-เจล ความก้าวหน้าเหล่านี้ทำให้สามารถควบคุมองค์ประกอบและโครงสร้างของวัสดุได้ ช่วยให้สามารถปรับแต่งสมบัติต่าง ๆ ได้ในวงกว้างและสำหรับการใช้งานที่เฉพาะเจาะจง ทำให้วัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดมีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งาน [61]

ในปัจจุบันการใช้งานพลาสติกเป็นที่นิยมและแพร่หลายอย่างมาก เนื่องจากความคงทน น้ำหนักเบา ราคาถูกและสามารถตอบสนองต่อการใช้งานที่หลากหลาย ทั้งในด้านผลิตภัณฑ์พลาสติกบรรจุภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ผลิตภัณฑ์สำหรับของเล่น ผลิตภัณฑ์สำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้า และผลิตภัณฑ์พลาสติกสำหรับเครื่องมือทางการแพทย์ โดยพลาสติกนั้นผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์โดยใช้วัตถุดิบจากแหล่งปิโตรเคมีเป็นหลัก ซึ่งถือเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปไม่สามารถทดแทนได้ [78] จึงมีการคิดค้นวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถผลิตจากแหล่งทรัพยากรที่สามารถทดแทนได้ เช่น ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ฯลฯ อีกทั้งพลาสติกบางประเภทถูกนำมาใช้งานเพียงระยะเวลาสั้นๆ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากขยะพลาสติกเนื่องจากการย่อยสลายที่ใช้ระยะเวลานาน เพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงมีการพัฒนาพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวิตภาพ [28]

พอลิแลกติกแอซิด (Poly(lactic acid): PLA) ถือเป็นพอลิเมอร์ที่ผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียนและทรัพยากรที่สามารถทดแทนได้ สังเคราะห์ได้จากกรดแลกติกจากกระบวนการหมักแป้งหรือน้ำตาล [78] ด้วยสมบัติที่หลากหลาย เช่น ความแข็งแรงสูง ความเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ ความเป็นพิษต่ำ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [75] จึงทำให้เป็นที่นิยมแต่ด้วยข้อด้อยบางประการ ได้แก่ ความเปราะและการเสื่อมสภาพทางความร้อนได้ง่าย จึงมีการปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าวด้วยวิธีต่าง ๆ หนึ่งในนั้นคือการผสมกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติยืดหยุ่น [81] พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Poly (butylene adipate-co-terephthalate): PBAT) เป็นพอ

ลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาผสมกับ PLA เพื่อปรับปรุงสมบัติของ PLA เนื่องจากสมบัติที่โดดเด่น เช่น ความเหนียว ความยืดหยุ่น ทนทาน ขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อย่างไรก็ตาม PBAT มีต้นทุนในการผลิตสูง เมื่อนำไปผสมกับ PLA จะมีส่วนช่วยในการลดต้นทุน อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมด้วย [79]

โลหะออกไซด์เป็นสารประกอบที่เกิดจากธาตุออกซิเจนรวมกับธาตุอื่น ๆ ซึ่งเป็นโลหะ ถือเป็นสารประกอบอนินทรีย์ สามารถเตรียมได้จากการนำออกซิเจนมาเผารวมกับธาตุต่าง ๆ ความว่องไวหรือความรุนแรงของปฏิกิริยาจะแตกต่างกันไปตามชนิดของธาตุ มีจุดหลอมเหลวสูง เป็นสารที่ได้รับความสนใจเพื่อนำมาช่วยพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เนื่องจากมีสมบัติที่หลากหลาย ประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายตามโลหะแต่ละชนิด [72] โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้โลหะออกไซด์ Al_2O_3, ZnO และ TiO_2 เพื่อทำการศึกษาพัฒนาต่อไป

ในงานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดจากพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ที่ผสมโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide: Al_2O_3), ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) โดยผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ ก่อนการนำไปผสมกับ PLA/PBAT และการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสม ชนิดและปริมาณของโลหะออกไซด์ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดจากพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิว
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดและอัตราส่วนการเติมโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. โลหะออกไซด์ (Metal oxide) ที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)
2. สารเชื่อมประสานไซเลน (Silane coupling agent) ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวโลหะออกไซด์ ได้แก่ γ-(triethoxysily)propyl methacrylate

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

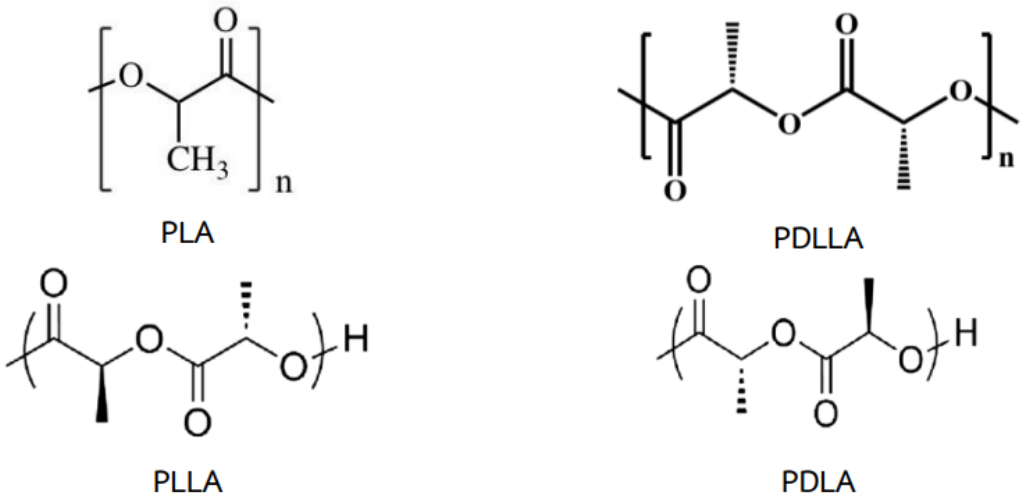
1. สามารถเตรียมวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดจากพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวได้
2. สามารถทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท เพื่อใช้ในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด
3. สามารถทราบชนิดและอัตราส่วนของโลหะออกไซด์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 2
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิแลกติกแอซิด

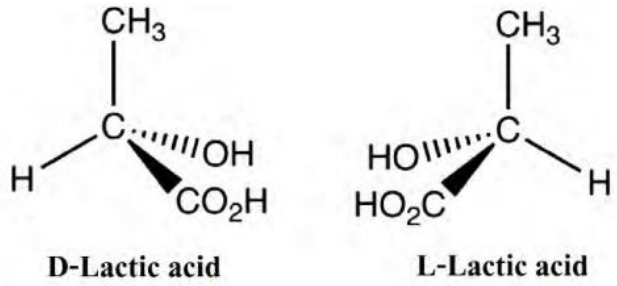
พอลิแลกติกแอซิด (Poly(lactic acid) หรือ PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ ผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียน เช่น มันสำปะหลัง ข้าวโพด ในอดีตยังไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องจากเป็นยุคของพลาสติกฐานปิโตรเลียมและไม่มีการตระหนักถึงประเด็นทางสิ่งแวดล้อม [78] กระทั่งปี พ.ศ. 2503 เริ่มนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์สำหรับเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ ไหมเย็บแผลภายในและอุปกรณ์ปลูกถ่าย ซึ่ง PLA นั้นมีความเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ [75] แต่ด้วยต้นทุนในการผลิตที่สูง จึงไม่เป็นที่นิยมในการใช้งานด้านอื่นๆ ในปัจจุบันสามารถคิดค้นเทคนิคการผลิต PLA อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้ PLA ถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น เกษตรกรรม อุตสาหกรรมรถยนต์ วิศวกรรมเนื้อเยื่อ รวมทั้งบรรจุภัณฑ์ต่างๆ [74] และ PLA มีสมบัติโดดเด่น เช่น ความแข็งแรง ความใส การต้านการซึมผ่านของแก๊สและของเหลว สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ความเป็นพิษต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [80]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ PLA, PDLLA, PLLA และ PDLA [78]

PLA เป็นพอลิเมอร์กลุ่มพอลิเอสเตอร์สายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) เป็นเทอร์โมพลาสติก มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1 สังเคราะห์จากกรดแลกติก (Lactic acid) โดยกรดแลกติกผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล กรดแลกติกมีไอโซเมอร์ 2 รูปแบบ คือ แบบดีและแบบแอล มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.2 มีความว่องไวต่อแสงต่างกัน พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่เป็น พอลิแอล-แลกติกแอซิด และ พอลิดีแอล-แลกติกแอซิด พอลิแลกติกแอซิดมีโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบ

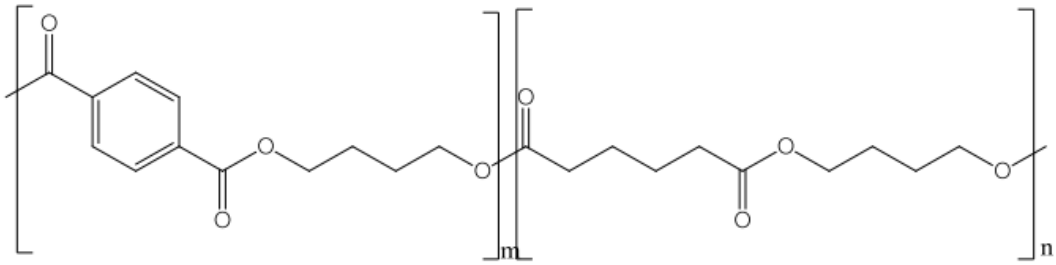
ได้แก่ อัลฟา (α) เบตา (β) และแกมมา (γ) โดยโครงสร้างแบบอัลฟาเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด [82] สามารถละลายได้ในตัวทำละลายกลุ่มของคลอริเนต และฟลูออริเนต ไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ อุณหภูมิการเปลี่ยนสภานะคล้ายแก้วอยู่ระหว่าง 60-65°C มีช่วงการหลอมเหลว 173-185°C สามารถขึ้นรูปด้วยเทคนิคการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกทั่วไป [82]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกรดแลกติก [82]

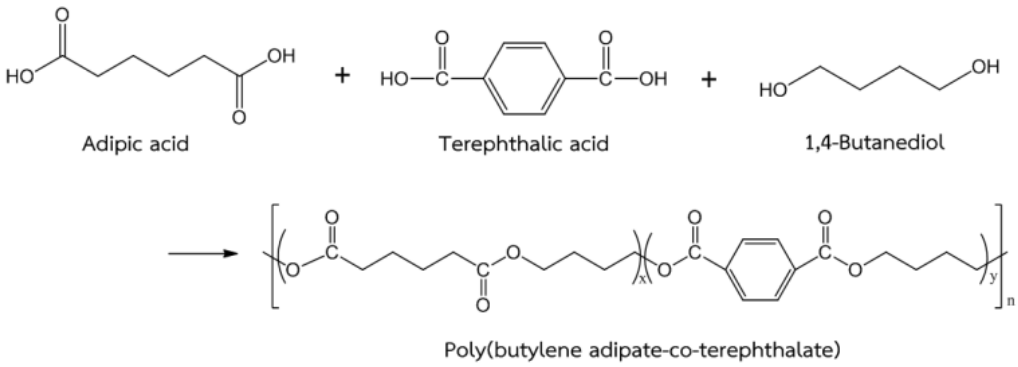
2.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene Adipate-co-Terephthalate หรือ PBAT) เป็นพลาสติกจากผลิตภัณฑ์จากแหล่งปิโตรเคมี สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ มีหมู่ฟังก์ชันเอสเตอร์และวงอะโรมาติกบนสายโซ่หลัก [82] โครงสร้างของ PBAT แสดงดังรูปที่ 2.3 สมบัติคล้ายคลึงกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีความแข็งแรง เหนียว มีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี และขึ้นรูปได้ง่าย จึงนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานด้านการผลิตฟิล์มประเภทต่างๆ แต่ด้วยต้นทุนในการผลิตยังมีราคาสูงจึงนำมาผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อลดต้นทุนในการผลิตและปรับปรุงสมบัติของพลาสติกที่นำไปผสมให้ดีขึ้น [79]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของ PBAT [79]

PBAT สามารถสังเคราะห์จากปฏิกิริยาควบแน่นของโมโนเมอร์ 3 ชนิด ได้แก่ กรดอะดิปิก (Adipic acid) กรดเทเรฟทาลิก แอซิด (Terephthalic acid) และ 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-Butanediol) แสดงดังรูปที่ 2.4 [79] เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม มีลักษณะโครงสร้างไม่เป็นผลึกที่แน่นอน ขาดความเป็นระเบียบของโครงสร้าง จึงมีสมบัติทางกายภาพที่หลากหลาย จุดหลอมเหลวมีช่วงกว้าง [80] ในปัจจุบันมีการนำมาใช้งานในด้านอุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมการแพทย์ (ด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ) เช่น ประยุกต์ใช้งานกับร่างการมนุษย์ กระดูกอ่อน เนื้อเยื่อ ข้อต่อ เพื่อซ่อมแซมหรือทดแทนอวัยวะที่สูญเสียไป [79]



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PBAT [79]

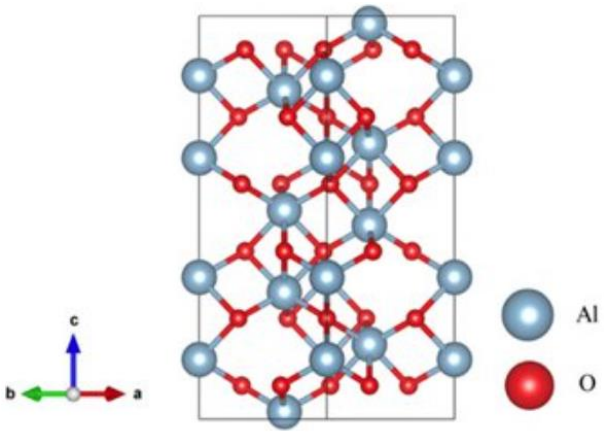
2.3 โลหะออกไซด์

ออกไซด์เป็นสารประกอบที่เกิดจากธาตุออกซิเจนรวมกับธาตุอื่นๆ เช่น ออกไซด์ของโลหะ ออกไซด์ของโลหะส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไอออนิก และเป็นเบส ออกไซด์ของโลหะบางชนิด เป็นได้ทั้งกรดและเบส เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ โลหะออกไซด์ (metal oxides) เป็นสารที่ได้รับความสนใจเพื่อนำมาช่วยพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เนื่องจากมีสมบัติที่หลากหลาย โลหะออกไซด์บางชนิด เช่น TiO_2 (Titanium dioxide), ZnO (Zinc oxide) และ SnO_2 (Tin dioxide) มีสมบัติโปร่งแสงและนำฟ้าได้ดี จึงถูกนำไปใช้งานด้านต่างๆ เช่น ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง รวมถึงนำไปเคลือบกระจกเพื่อเป็นการกั้นความร้อน และการกำจัดหมอก [73]

2.3.1 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide)

อะลูมินา (Alumina) ชื่อทางเคมีคือ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide : Al_2O_3) เป็นสารประกอบเคมีของอะลูมิเนียมและออกซิเจน มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.5 เป็นผงผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายน้ำ และไม่เป็นพิษ เป็นส่วนประกอบของแร่บอกไซต์ (bauxite) ถูกทำให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการไบเออร์ เป็นออกไซด์ที่มีการใช้งานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและมีการพัฒนามากขึ้น

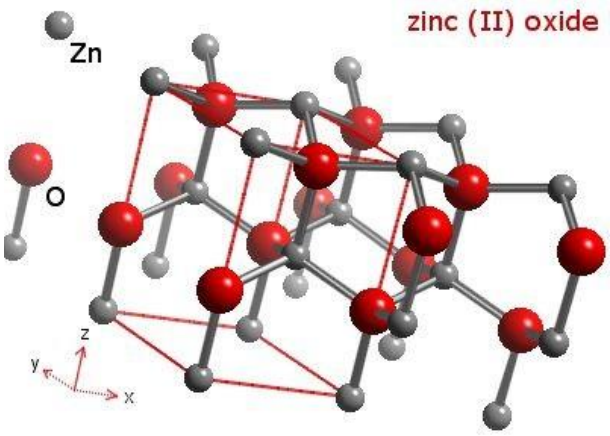
สำหรับใช้งานในอนาคต สมบัติของอะลูมินานั้น มีความแข็งสูง ความหนาแน่นสูง ทนต่อสารเคมี มีความต้านทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนสูง และมีความทนไฟสูง เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง สามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ [77]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างอะลูมิเนียมออกไซด์ [77]

2.3.2 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

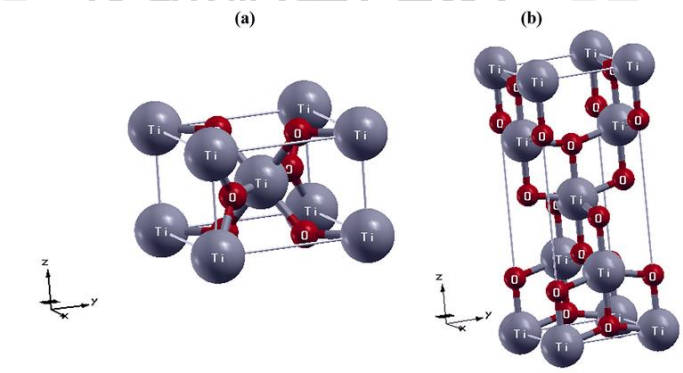
ซิงค์ออกไซด์หรือสังกะสีออกไซด์ (Zinc Oxide : ZnO) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.6 เป็นสารประกอบที่ผลึกไม่มีสี มีลักษณะเป็นผง ไม่ละลายน้ำ ละลายในกรด จุดหลอมเหลวสูง มีโครงสร้างแบบเวิร์ตไซท์และซิงค์เบลนเด ลักษณะผลึกแบบเฮกซะโกนอล เป็นสารประกอบที่สามารถพบเห็นได้ในธรรมชาติ อนุภาคมีรูปร่างเป็นทรงกลม, รูปเข็ม หรือเป็นก้อนกลมๆ ขึ้นอยู่กับกระบวนการในการสังเคราะห์ [76] เป็นสารอนินทรีย์ที่นำมาใช้ปกป้องรักษาผิวหนัง ถูกนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในอุตสาหกรรมยางและใช้ในการผลิตน้ำหอม, ยา และเครื่องสำอางเป็นต้น นอกจากนี้สามารถใช้ในการผลิตเม็ดสีและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์เมทานอลในอุตสาหกรรมเคมี [41]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างซิงค์ออกไซด์ [41]

2.3.3 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide), ไทเทเนียม (IV) ออกไซด์ (Titanium (IV) oxide) หรือ ไททาเนีย (Titania) เป็นออกไซด์ของโลหะ สูตรโครงสร้างทางเคมี TiO_2 แสดงดังรูปที่ 2.7 เป็นสารประกอบอนินทรีย์ สามารถเกิดผลึกได้ 3 รูปแบบได้แก่ บรูไคต์, อนาเทส และ รูไทล์ ซึ่งรูไทล์ เป็นรูปแบบผลึกที่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ [70] มีการใช้งานทางอุตสาหกรรมมากมาย เช่น สีหมึกพิมพ์ กระดาษ เครื่องสำอาง เป็นต้น [55] นิยมใช้ทางการแพทย์เนื่องจากมีสมบัติทางแสงและอิเล็กทรอนิกส์ที่ดี มีความคงตัว ไม่เป็นพิษ ราคาถูก มีความเฉื่อยทางเคมีและทางชีวภาพ [3]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างไทเทเนียมไดออกไซด์ (a) rutile และ (b) anatase [35]

2.4 การใช้งานทางการแพทย์

2.4.1 พอลิแลกติกแอซิด (PLA)

เนื่องจากความสามารถในการเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ โดยสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อและสามารถดูดซึมได้โดยระบบชีวภาพในร่างกาย [78] จึงมีการประยุกต์ใช้งาน PLA ในทางการแพทย์อย่างมาก เช่น ไหมเย็บแผล ตัวเย็บแผล วัสดุปิดแผล อุปกรณ์ฝังในร่างกาย แคปซูลยา สกรูทางการแพทย์ อุปกรณ์สำหรับยึดกระดูก และวัสดุปลดปล่อยตัวยา ซึ่งสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้ [24]

2.4.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT)

สมบัติความยืดหยุ่นสูง ทนต่อแรงกระแทก ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี จึงนิยมประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เพื่อซ่อมแซม รักษาหรือทดแทนอวัยวะและเนื้อเยื่อที่สูญเสียไป นอกจากนี้ PBAT สามารถเตรียมในรูปของวัสดุนาโนคอมโพสิตได้ [79]

2.4.3 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide)

มีความเสถียรเพียงพอในการใช้งานที่สภาวะต่างๆ ถูกใช้ในการนำส่งยาความดันโลหิต ในรูปแบบของเมโซพอรัสอะลูมิเนียมออกไซด์ มีส่วนควบคุมการละลายและการปลดปล่อยตัวยา การตรวจวัดทางชีวภาพ เช่น การถ่ายภาพเซลล์ และการตรวจจับดีเอนเอในหลอดทดลอง มีส่วนในการกระตุ้นฤทธิ์การต้านเนื้องอกของมะเร็ง ใช้เป็นยาเสริมประสิทธิภาพในการบำบัดโรคมะเร็ง มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ มีการใช้งานร่วมกับเปปไทด์และใช้เป็นยาในการรักษาโรคหอบหืด อีกทั้งยังเป็นสารเสริมที่มีประสิทธิภาพในการสร้างภูมิคุ้มกันเพื่อใช้สำหรับการออกแบบวัคซีนต้านเอชไอวี [31]

2.4.4 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide)

ได้รับความนิยมในการใช้งานทางการแพทย์ เนื่องจากความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และความเป็นพิษต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านยาต้านมะเร็งและแบคทีเรีย ช่วยปกป้องผิวจากรังสียูวี ปกป้องและระงับการระคายเคืองของผิวหนัง ปกป้องผิวจากความร้อนและความเปียกชื้น มีฤทธิ์ฆ่าเชื้อโรคแบบอ่อนๆ เนื่องจากการสะสมของ ZnO ในเยื่อหุ้มชั้นนอกหรือไซโตพลาสซึมของเซลล์แบคทีเรียและกระตุ้นการปลดปล่อย Zn^{2+} ซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวของเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรีย เกิดความเสียหายของโปรตีนเมมเบรนและความไม่เสถียรของจีโนม ส่งผลให้เซลล์แบคทีเรียตาย สามารถใช้ในการรักษาโรคเบาหวาน มีส่วนเกี่ยวข้องกับการหลั่งอินซูลินจากตับอ่อน ต้านการอักเสบ การนำส่งยา และการรักษาบาดแผล [33]

2.4.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide)

เป็นวัสดุที่นิยมใช้ในทางการแพทย์และทางทันตกรรม เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง มีความเป็นพิษที่ต่ำ สามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ และมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนสูง ด้วยสมบัติเหล่านี้จึงใช้เป็นวัสดุปลูกฝัง เช่น ข้อเข่าเทียม รากฟันเทียม ซึ่งถือว่ามีบทบาทสำคัญในการรักษา [72] อีกทั้งยังสามารถดูดซับประจุของฟอสเฟตและแคลเซียม เหนี่ยวนำโปรตีนบางชนิดช่วยส่งเสริมการเกิดกระดูกเชื่อมประสาน กระตุ้นให้เกิดการตอบสนองของร่างกายโดยเฉพาะของโปรตีนจากเลือดและเนื้อเยื่อโดยรอบ เหนี่ยวนำให้เกิดการเพิ่มจำนวนของเซลล์สร้างกระดูก มีผลโดยตรงต่อการสร้างกระดูกใหม่ และมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในการรักษามะเร็ง การบำบัดและการวินิจฉัยด้วยแสง [3]

2.5 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Review of related literature)

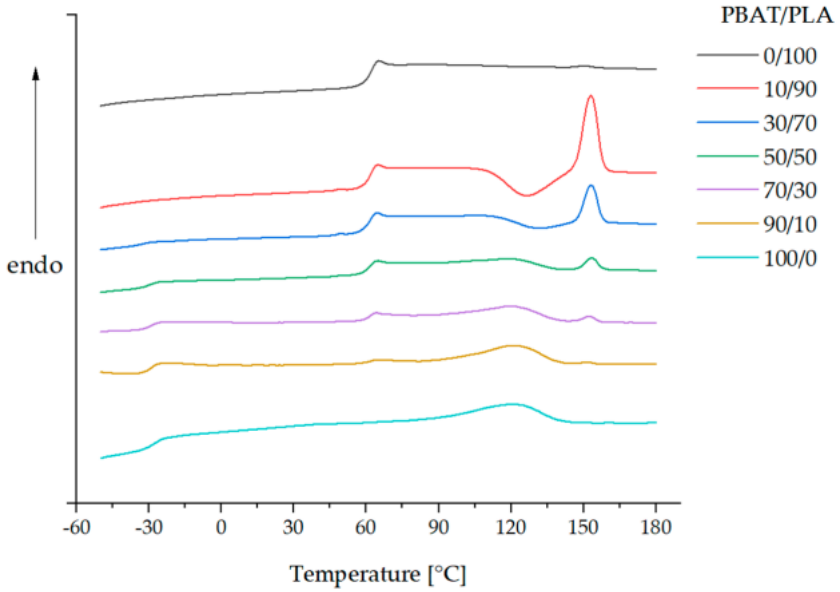
จากงานวิจัยของ Shen S. และคณะ [53] ศึกษาการผสม PBAT และ PLA เพื่อประเมินศักยภาพในการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์หรือฟิล์มทางการเกษตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการเข้ากันได้และสมบัติเชิงกลของการผสม PBAT/PLA ในอัตราส่วนตั้งแต่ 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70, 20/80 และ 10/90 โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ความเร็วรอบสกรู 200 rpm อุณหภูมิการผสม : 150/160/170/170/170/170/170/170°C จากนั้นทำการขึ้นรูป 3 แบบได้แก่ panel, flat film และ blown film และทำการศึกษาสมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา สมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 2.1 ชิ้นงานจากการผสม PBAT/PLA ด้วยอัตราส่วนต่างๆ [53]

Specimen	Thickness [μm]	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90
Panel	800	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Flat film	110	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓
Blown film	25	✓	✓	✓	✓					

สังเกตได้ว่าที่อัตราส่วนระหว่าง PBAT/PLA 50/50 และ 40/60 ไม่สามารถขึ้นรูปแบบ flat film ได้ และที่อัตราส่วนระหว่าง PBAT/PLA 50/50, 40/60, 30/70, 20/80 และ 10/90 นั้นไม่สามารถขึ้นรูปแบบ blown film ได้ ดังตารางที่ 2.1

จากรูปที่ 2.8 และตารางที่ 2.2 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของ PBAT/PLA พบว่าค่า T_g ของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นถึงความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสม

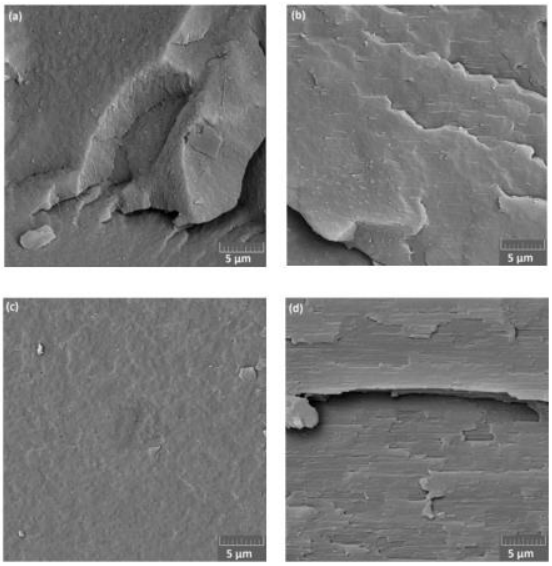


รูปที่ 2.8 กราฟ DSC แสดงการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PBAT/PLA [53]

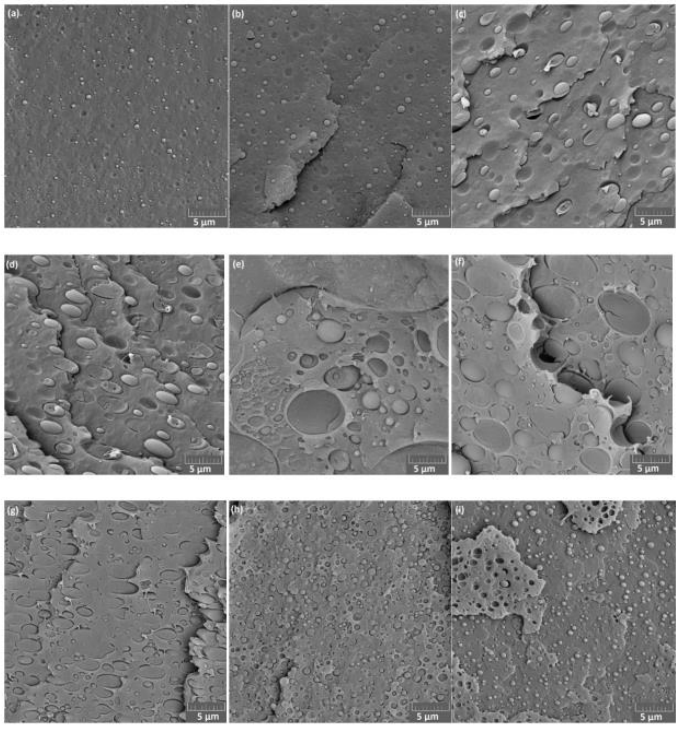
ตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลทางความร้อนจากการให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PBAT, PLA และ PBAT/PLA [53]

PBAT/PLA Weight Ratio	T_g (PBAT) [°C]	T_m (PBAT) [°C]	T_g (PLA) [°C]	T_m (PLA) [°C]
0/100	-	-	61.6	149.6
10/90	**	*	61.4	153.1
20/80	**	*	61.2	153.4
30/70	−32.1	*	60.8	153.3
40/60	−32.0	*	61.2	153.1
50/50	−30.0	119.6	61.1	153.4
60/40	−29.8	119.3	60.9	152.6
70/30	−28.8	120.3	60.9	152.1
80/20	−29.0	120.3	61.5	151.8
90/10	−29.3	120.9	61.0	151.8
100/0	−28.3	120.4	-	-

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาแสดงดังรูปที่ 2.9 ในทิศทาง CD จะพบ PLA กระจายตัวอยู่ใน PBAT เป็นลักษณะทรงกลม ในขณะที่ทิศทาง MD PLA จะกระจายตัวอยู่ใน PBAT เป็นลักษณะแถบยาวและแบน ตามทิศทางการยืดตัวของวัสดุหลอมเหลว เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ PBAT/PLA ที่อัตราส่วน 60/40 (MD) แสดงการแยกเฟสชัดเจน ฟิล์มตัวอย่างที่นำมาทดสอบเกิดการแยกเฟสของ PBAT/PLA แสดงถึงความเข้ากันได้ไม่ดีของพอลิเมอร์ผสม และในรูปที่ 2.10 PBAT/PLA (90/10) มีลักษณะการแตกหักแบบเรียบและพบการกระจายตัวของ PLA เป็นทรงกลมขนาด 1 μm ทั่วเมทริกซ์ของ PBAT และเมื่อปริมาณ PLA เพิ่มขึ้นจาก 10%wt เป็น 30%wt ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมจะเพิ่มขึ้นและผิวที่แตกหักจะมีลักษณะขรุขระมากขึ้น เมื่อผสม PLA ปริมาณ 40-60%wt ผิวแตกหักมีความหยาบมากขึ้น เกิดการแยกเฟสของ PLA และ PBAT อย่างชัดเจน ปริมาณ PLA 70-90%wt เฟสของ PBAT จะกระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ PLA โดยมีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณ PLA เพิ่มขึ้น

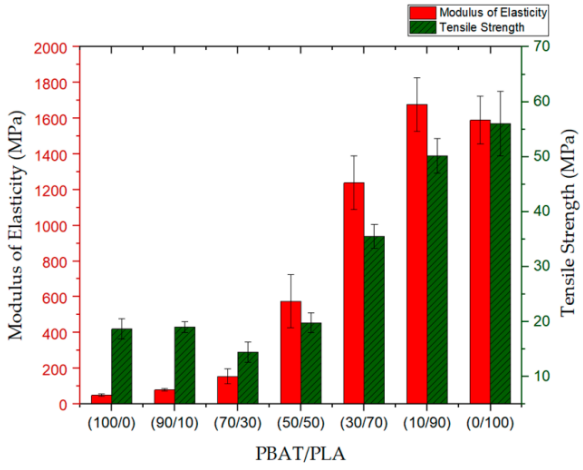


รูปที่ 2.9 สัณฐานวิทยาพื้นผิว flat film ของ PBAT/PLA ที่อัตราส่วน (a) 90/10 (CD), (b) 90/10 (MD), (c) 60/40 (CD) และ (d) 60/40 (MD) [53]

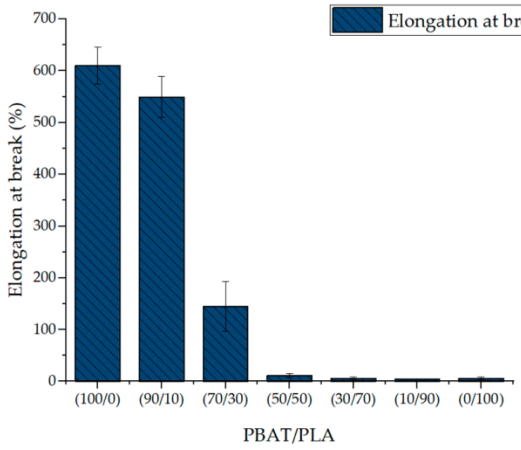


รูปที่ 2.10 สัณฐานวิทยาพื้นผิว panel ของ PBAT/PLA ที่อัตราส่วน (a) 90/10, (b) 80/20, (c) 70/30, (d) 60/40, (e) 50/50, (f) 40/60, (g) 30/70, (h) 20/80 และ (i) 10/90 [53]

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลดังรูปที่ 2.11 PBAT/PLA ที่อัตราส่วน 100/0, 90/10 และ 50/50 ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางด้านความต้านทานแรงดึง (รูปที่ 2.11(a)) และอัตราส่วน 70/30 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุด การลดลงของความต้านทานแรงดึงเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยา ซึ่งเมื่อปริมาณ PLA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ PLA ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ PBAT มีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อปริมาณของ PLA เพิ่มขึ้นถึง 50-90%wt จะส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงและค่าโมดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าการยืดตัวที่จุดขาดจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ PLA เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.11(b)

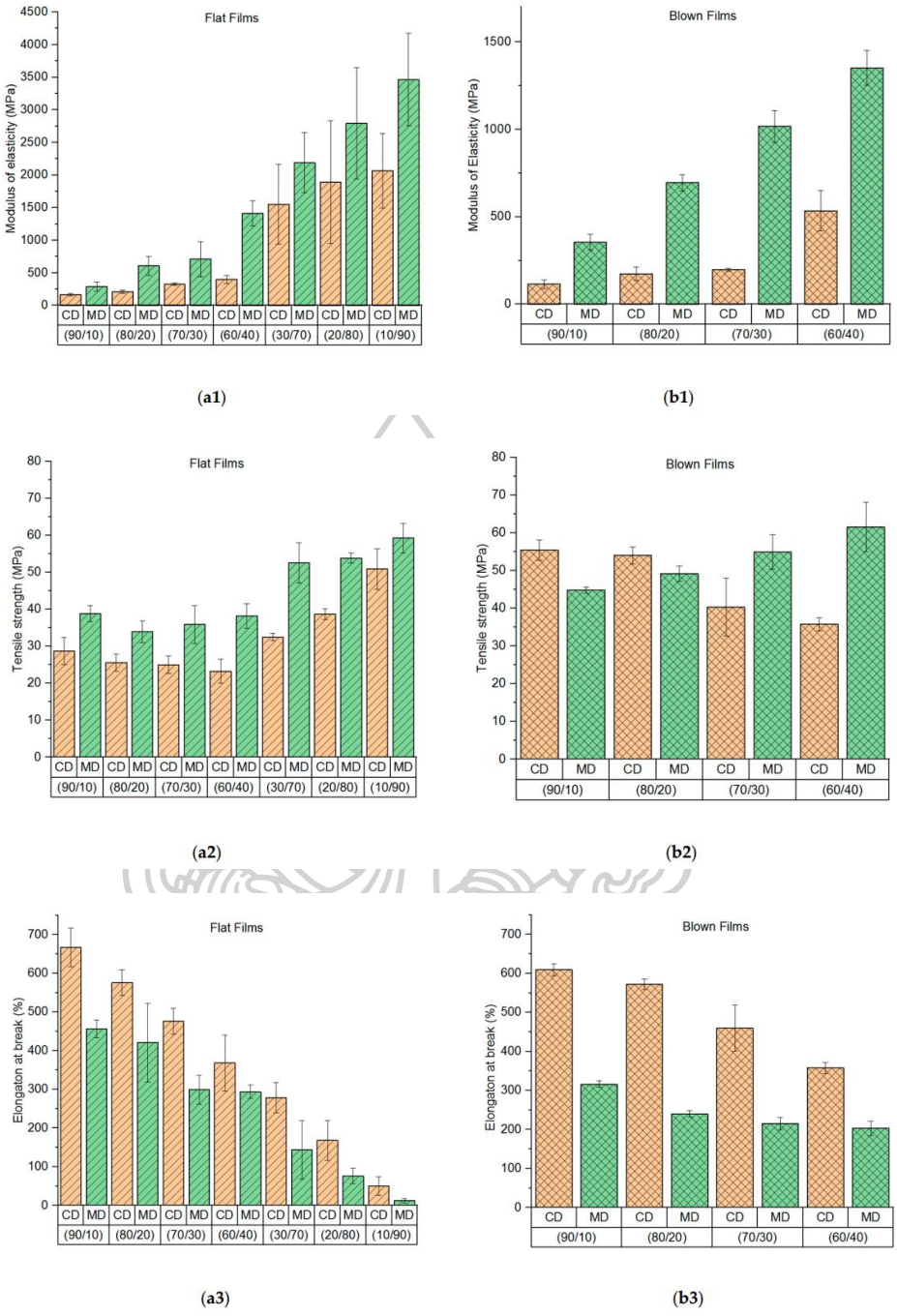


(a)



(b)

รูปที่ 2.11 สมบัติเชิงกลของ PBAT, PLA และ PBAT/PLA ขึ้นรูปแบบ panel (a) ค่าโมดูลัสและค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด , (b) ค่าการยืดตัวที่จุดขาด [53]

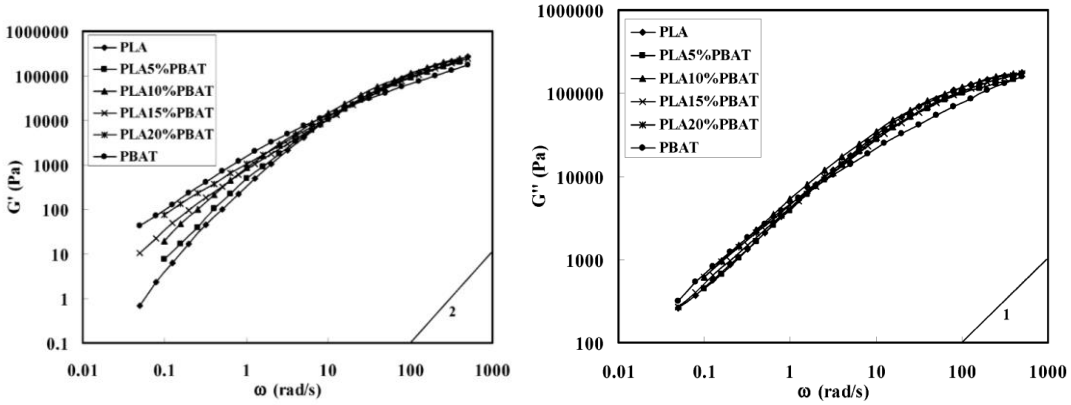


รูปที่ 2.12 สมบัติเชิงกลของ PBAT, PLA และ PBAT/PLA ขึ้นรูปแบบ flat film และ blown film ในทิศทาง cross direction (CD) และ machine direction (MD) โดย (a1) ค่าโมดูลัสของ flat film, (b1) ค่าโมดูลัสของ blown film, (a2) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ flat film, (b2) ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของ blown film, (a3) ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของ flat film และ (b3) ค่าการยืดตัวที่จุดขาดของ blown film [53]

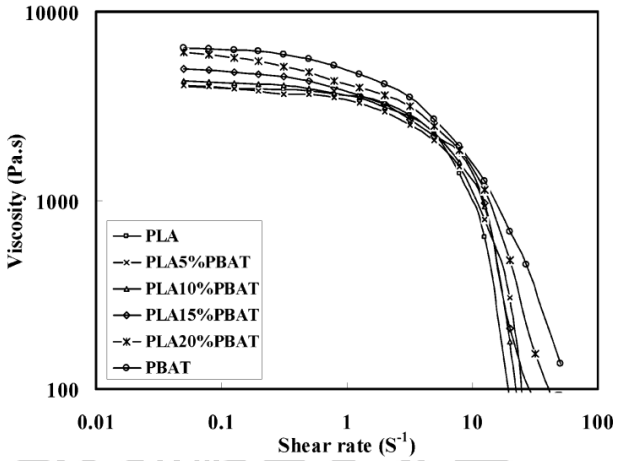
จากรูปที่ 2.12(a1) และ (b1) ค่าโมดูลัสของ flat film และ blown film ทั้ง 2 ทิศทาง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ PLA เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึง PLA มีส่วนช่วยในการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัส ในส่วนของความต้านทานต่อแรงดึงแสดงดังรูปที่ 2.12(a2) และ (b2) ในการขึ้นรูปแบบ flat film ทิศ CD จะมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าทิศ MD เนื่องมาจากโมเลกุลจะจัดเรียงตัวในทิศ MD ซึ่งเป็นทิศทางการขึ้นรูป ความต้านทานต่อแรงดึงจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ PLA เพิ่มมากขึ้นถึง 40%wt และเมื่อปริมาณ PLA เพิ่มขึ้นถึง 70%wt ค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะมีค่าเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PLA ที่เพิ่ม ในส่วนการขึ้นรูปแบบ blown film สำหรับทิศ CD ค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ PLA มากขึ้น ในทางกลับกันสำหรับทิศ MD ปริมาณ PLA ที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความต้านทานแรงดึงมากขึ้น ในส่วนค่าการยืดตัวที่จุดขาดแสดงดังรูปที่ 2.12(a3) และ (b3) การยืดตัวที่จุดขาดจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของ PLA เพิ่มมากขึ้นทั้ง flat film และ blown film ในทั้ง 2 ทิศทาง

จากงานวิจัยของ Jiang L. และคณะ [34] ได้ทำการศึกษาการผสม PLA และ PBAT เพื่อเพิ่มความเหนียวของพอลิเมอร์ผสม อีกทั้งยังศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ ความสามารถในการผสมกัน สัณฐานวิทยา การไหล และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม โดยทำการผสม PLA/PBAT ที่ปริมาณ PBAT 5, 10, 15 และ 20%wt ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ อุณหภูมิในการผสมอยู่ในช่วง 150-180^{o}C ความเร็วรอบสกรู 60 rpm

จากการศึกษาสมบัติการไหลดังรูปที่ 2.13 ค่า G’ และ G” ของ PLA และ PBAT จะมีค่าใกล้เคียงกันยกเว้นที่ความถี่ต่ำ ค่า G’ ของ PBAT จะมีค่าสูงกว่า PLA บ่งบอกถึง PBAT มีความยืดหยุ่นสูงกว่า PLA ซึ่งค่า G’ จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณ PBAT ที่ผสมเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด และอัตราการเฉือนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT สังเกตได้ว่าความหนืดของ PBAT มีค่าสูงกว่าความหนืดของ PLA และเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นด้วย

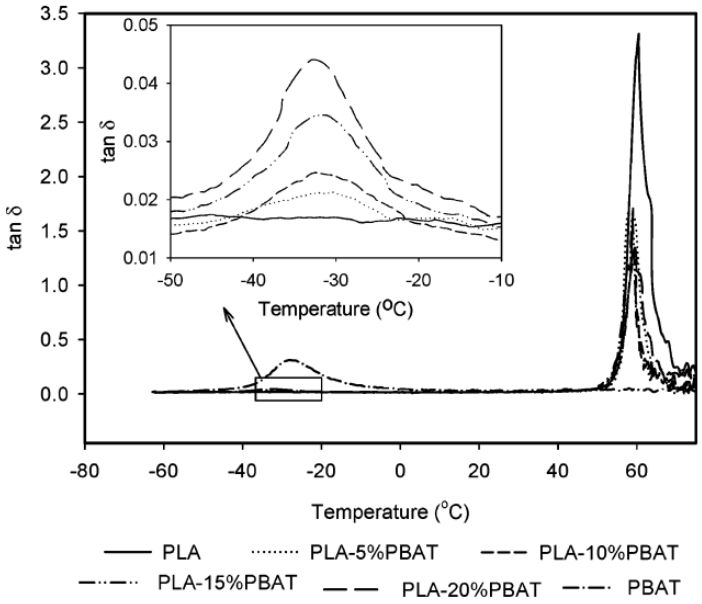


รูปที่ 2.13 G’ และ G”ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT [34]

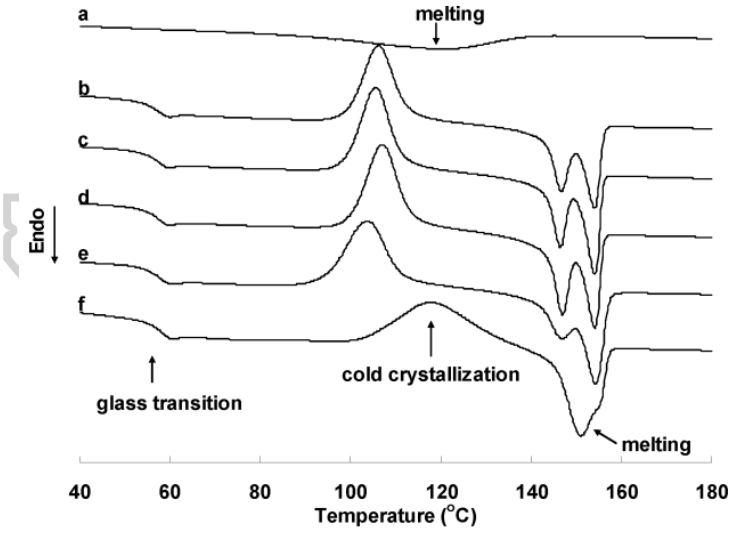


รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด และอัตราการเฉือนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT [34]

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนดังรูปที่ 2.15 การทดสอบ DMA กราฟแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว 2 ตำแหน่ง ณ อุณหภูมิ -30°C ของ PBAT และ 60°C ของ PLA ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของพีคเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของ PLA และ PBAT



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง mechanical loss factor และอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วนต่างๆ [34]

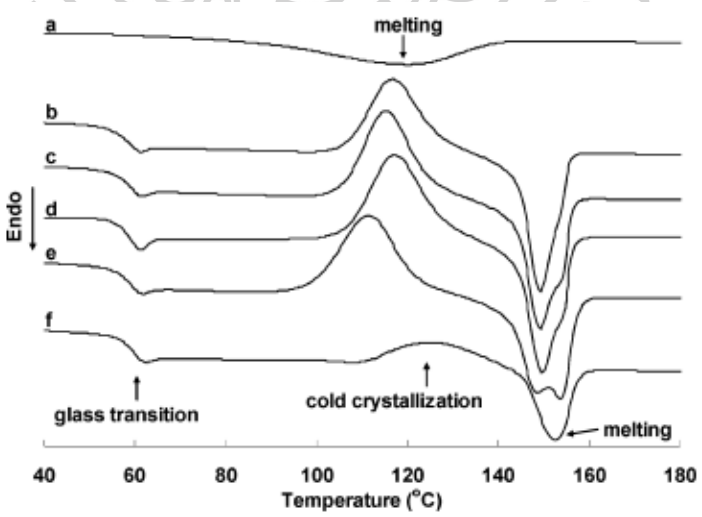


รูปที่ 2.16 การให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PLA/PBAT อัตราการให้ความร้อน 5°C/min (a) PBAT, (b) 20% PBAT, (c) 15% PBAT, (d) 10% PBAT, (e) 5% PBAT และ (F) PLA [34]

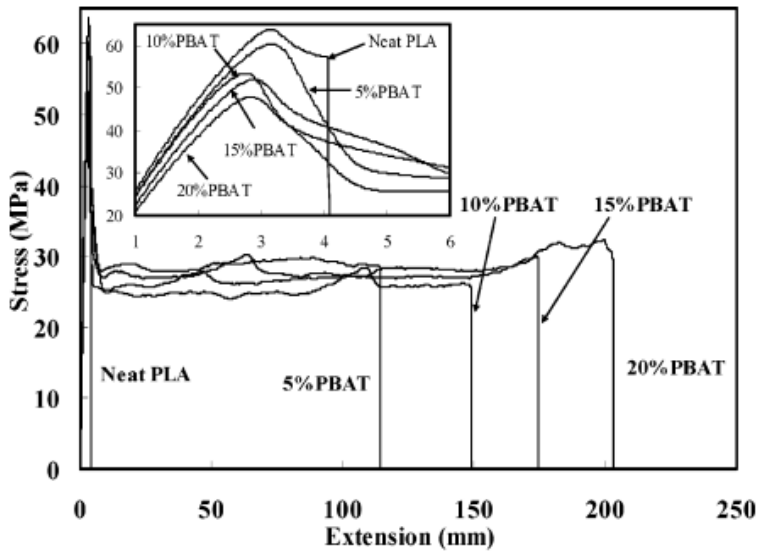
จากรูปที่ 2.16 การผสม PBAT จะส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดผลึกเย็น ลดลงประมาณ 10°C และตารางที่ 2.3 ค่า ΔH_c และ ΔH_m ของ PLA/PBAT จะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเกิดผลึกที่เพิ่มขึ้นของ PLA เมื่อทำการผสม PBAT โดยไม่มีความแตกต่างเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้นและไม่ส่งผลต่อปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น ในส่วนของพีคการหลอมเหลวเมื่อผสม PBAT พีคการหลอมเหลวของ PLA จะแยกออกเป็น 2 พีคอย่างชัดเจนแสดงดังรูปที่ 2.16 แสดงถึงการเกิดโครงสร้างผลึกใหม่ ถูกเหนี่ยวนำโดย PBAT และเมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 2.16 และ 2.17 อัตราการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน สังเกตได้ว่าผลการทดสอบที่ได้จากอัตราการให้ความร้อนต่ำกว่าจะแสดงพีคชัดเจนเนื่องมาจากอัตราการให้ความร้อนที่ต่ำโมเลกุลของ PLA มีระยะเวลาที่มากพอในการจัดเรียงตัวเป็นผลึก

ตารางที่ 2.3 T_c, ΔH_c, T_m และ ΔH_m ของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนต่างๆ และที่อัตราการให้ความร้อนที่แตกต่าง [34]

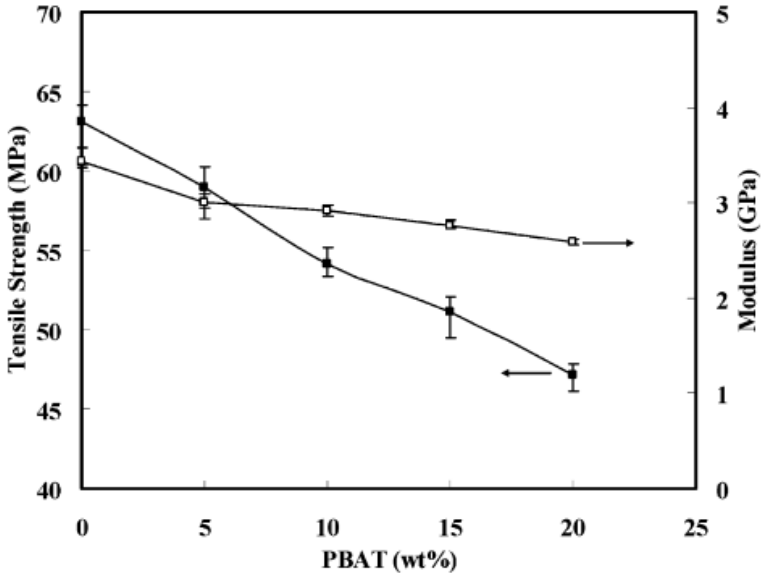
	5 °C/min					10 °C/min				
PBAT content (%)	T_c (°C)[b]	ΔH_c (J/g)[c]	T_m (°C)[b] 1	2	ΔH_m (J/g)[c]	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	T_m (°C) 1	2	ΔH_m (J/g)
0	117.8	23.4	151.1	154.3	23.5	127	9.12		153.3	11.0
5	103.7	25.3	146.9	154.3	26.7	112	24.5	148.8	153.8	24.7
10	106.9	23.7	146.9	154.1	24.0	118	25.2	150.3	153.3	25.3
15	105.4	23.1	146.4	154.1	24.9	116	26.0	149.3	153.8	26.1
20	106.2	24.3	146.7	154.1	24.5	118	24.7	149.3	153.3	25.5
100			120.1		14.9				122.3	15.6



รูปที่ 2.17 การให้ความร้อนครั้งที่ 2 ของ PLA/PBAT อัตราการให้ความร้อน 10°C/min (a) PBAT, (b) 20% PBAT, (c) 15% PBAT, (d) 10% PBAT, (e) 5% PBAT และ (F) PLA [34]

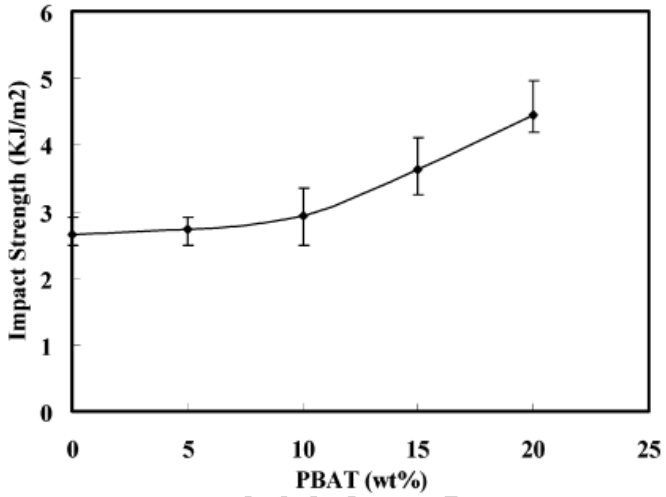


รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่อแรงดึงและการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PBAT แตกต่างกัน [34]



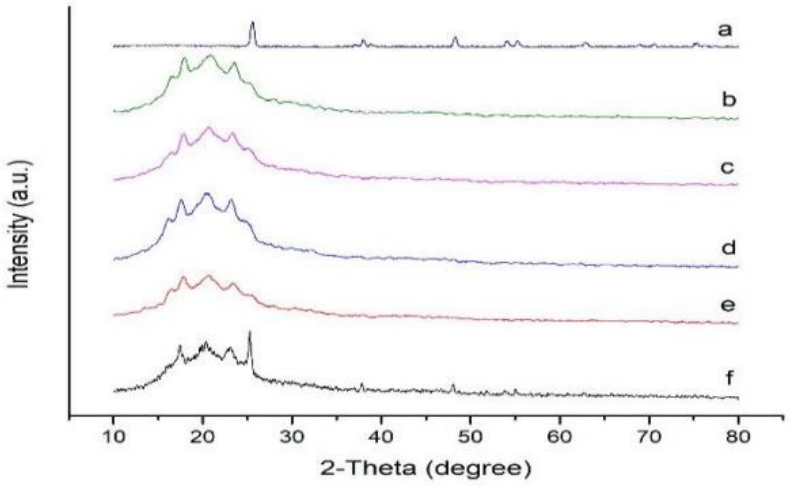
รูปที่ 2.19 ความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณ PBAT แตกต่างกัน [34]

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลดังรูปที่ 2.18 และ 2.19 เมื่อผสม PBAT กับ PLA พอลิเมอร์ผสมจะเกิดการแตกหักแบบเหนียว และเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้นความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์จะลดลงแต่การยืดตัวที่จุดขาดจะมีค่ามากขึ้น เนื่องมาจากความยืดหยุ่นของ PBAT และความทนทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ PBAT ที่มากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.20



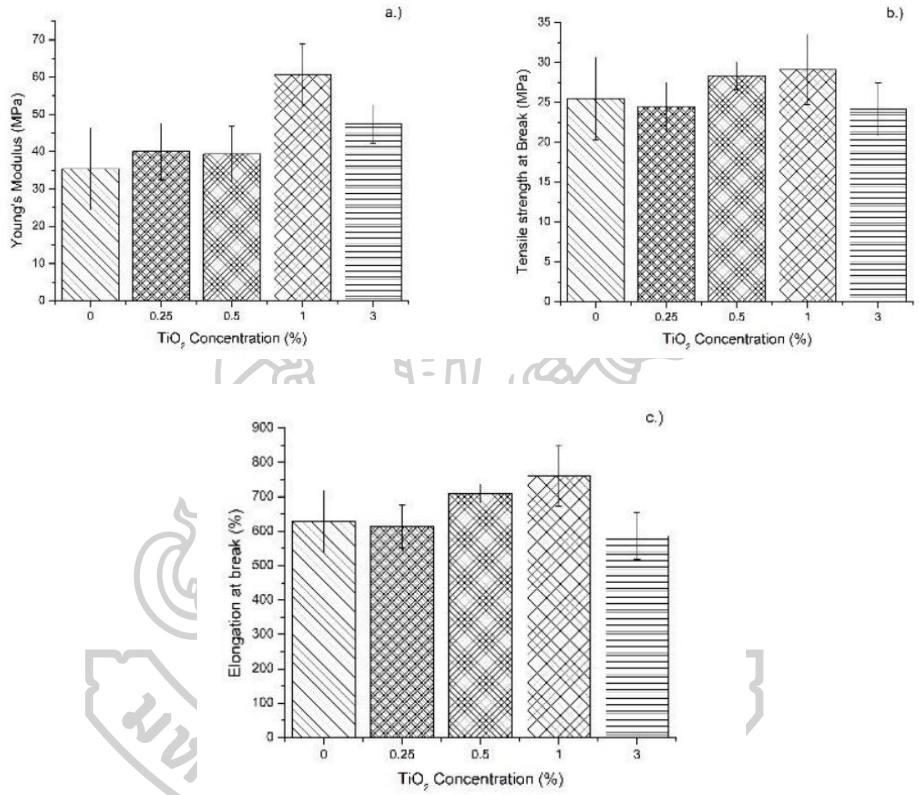
รูปที่ 2.20 ผลของปริมาณ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมต่อความต้านทานแรงกระแทก [34]

จากงานวิจัยของ Natnaree A. และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาผลของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่อสมบัติของฟิล์ม poly (butylene adipate-co-terephthalate) เพื่อพัฒนาฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพ PBAT/TiO_2 สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร และศึกษาผลของ TiO_2 ต่อสมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของเมทริกซ์ PBAT เตรียมตัวอย่างฟิล์มโดยผสม TiO_2 ปริมาณ 0.25, 0.5, 1 และ 3%wt กับ PBAT ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และนำเส้น PBAT/TiO_2 ที่ได้ตัดเป็นเม็ดและทำการขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์มแบบแผ่น ความหนาของฟิล์มอยู่ในช่วง 50-90 ไมโครเมตร



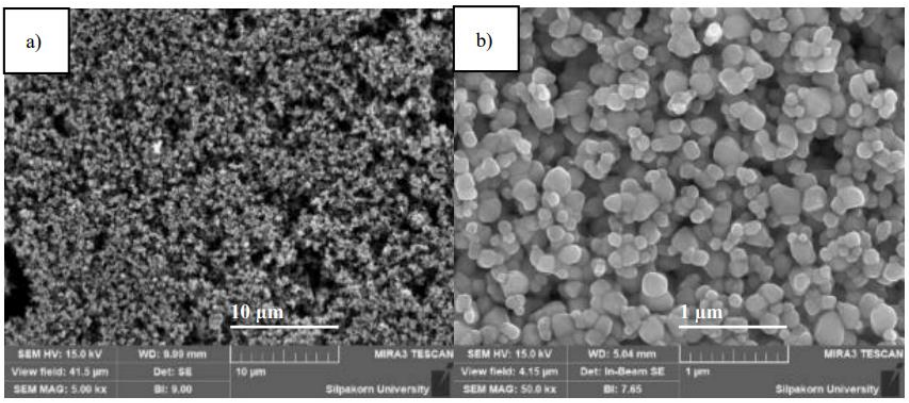
รูปที่ 2.21 XRD pattern ของ a) ผง TiO_2 และ PBAT/TiO_2 ที่มีปริมาณ TiO_2 แตกต่างกัน b) 0%, c) 0.25%, d) 0.5%, e) 1% และ f) 3%wt [9]

จากการทดสอบ X-ray diffraction ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ผง TiO_2 (a) จะปรากฏพีคของเฟสผลึกที่ตำแหน่ง 25.3°, 38° และ 48° ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (101), (004) และ (200) ในส่วนของ PBAT บริสุทธิ์ (b) ไม่แสดงพีคที่ชัดเจนบ่งบอกถึงโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานของ PBAT และเมื่อผสม TiO_2 ลงไป (c-f) XRD pattern ของ PBAT/TiO_2 จะปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 25.3°, 38° และ 48° ชัดเจนมากขึ้นเมื่อปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้น

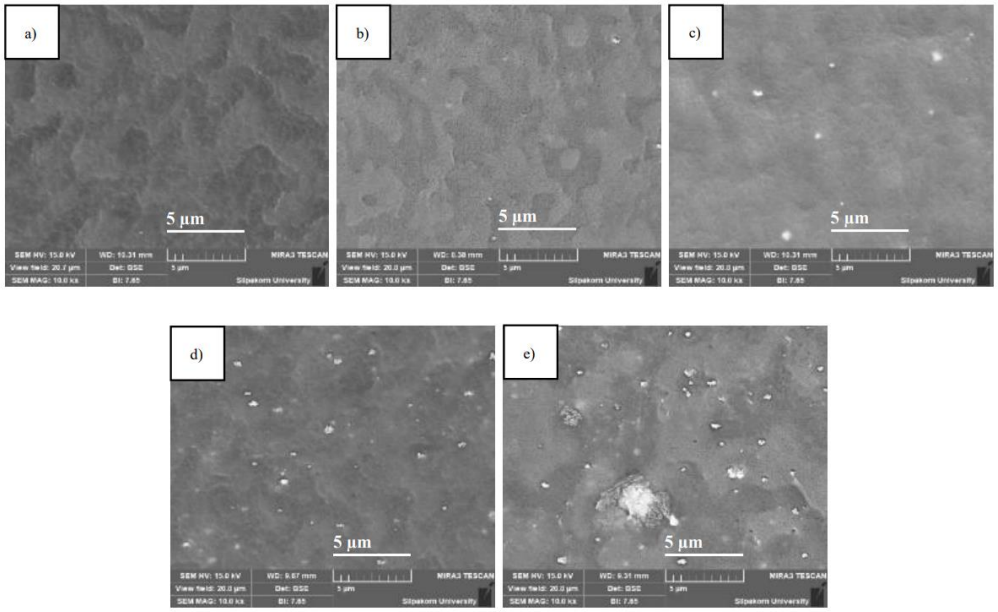


รูปที่ 2.22 สมบัติเชิงกลของ PBAT บริสุทธิ์และ PBAT/TiO_2 ที่มีปริมาณ TiO_2 แตกต่างกัน a) ค่าโมดูลัส, b) ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และ c) ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด [9]

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลดังแสดงในรูปที่ 2.22 ค่าโมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้น (0.25-1%wt) เนื่องจาก TiO_2 จะกระจายตัวใน PBAT และมีส่วนช่วยในการเสริมแรงทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 ถึง 3%wt ค่าโมดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง และการยืดตัว ณ จุดขาดจะมีค่าลดลง เนื่องจากจะเกิดการรวมกลุ่มกันของ TiO_2 ขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์



รูปที่ 2.23 สัณฐานวิทยาของผง TiO_2 ที่กำลังขยายแตกต่างกัน a) 5000X และ b) 50000X [9]



รูปที่ 2.24 สัณฐานวิทยาของ PBAT/TiO_2 ที่มีปริมาณ TiO_2 แตกต่างกัน ที่กำลังขยาย 10000X a) 0%, b) 0.25%, c) 0.5%, d) 1% และ e) 3%wt [9]

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของผง TiO_2 ดังแสดงในรูปที่ 2.23 พบว่าผง TiO_2 มีการกระจายตัวที่ดีและขนาดอยู่ในช่วง 0.1-0.4 ไมโครเมตร และสัณฐานวิทยาของ PBAT/TiO_2 ที่ปริมาณ TiO_2 แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ในส่วนของ PBAT บริสุทธิ์ แสดงผิวการแตกหักที่เรียบ และเมื่อเติมผง TiO_2 ปริมาณ 0.25-1%wt จะพบการกระจายตัวของ TiO_2 ในเมทริกซ์ PBAT อย่างสม่ำเสมอ และเมื่อเพิ่มปริมาณ TiO_2 ถึง 3%wt จะเกิดการรวมกลุ่มกันเองของ TiO_2 ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติของฟิล์ม

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางความร้อนจากการทดสอบ DSC ของ PBAT บริสุทธิ์ และ PBAT/TiO_2 [9]

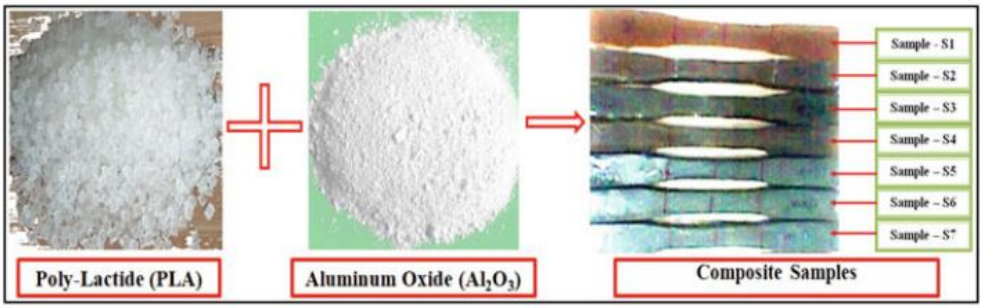
Sample	T_m (C)	Tc (C)	ΔH_m	X_C (%)
Neat PBAT	124.72	87.20	5.86	5.14
PBAT/TiO_2 0.25%	124.64	86.62	7.77	6.83
PBAT/TiO_2 0.5%	125.45	88.04	8.03	7.08
PBAT/TiO_2 1%	125.05	88.54	8.18	7.25
PBAT/TiO_2 3%	125.03	86.96	7.71	6.97

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยการทดสอบ DSC แสดงดังตารางที่ 2.4 ค่า T_m และ T_c มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเติม TiO_2 ในปริมาณที่มากขึ้น ความสามารถในการเกิดผลึกและปริมาณผลึกจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้นจาก 0.25-1%wt เนื่องจาก TiO_2 ทำหน้าที่คล้ายกับสารเร่งการเกิดนิวเคลียสของผลึกแต่จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มขึ้นถึง 3%wt เนื่องจากการรวมกลุ่มกันเองของ TiO_2 รบกวนการเกิดผลึกของพอลิเมอร์

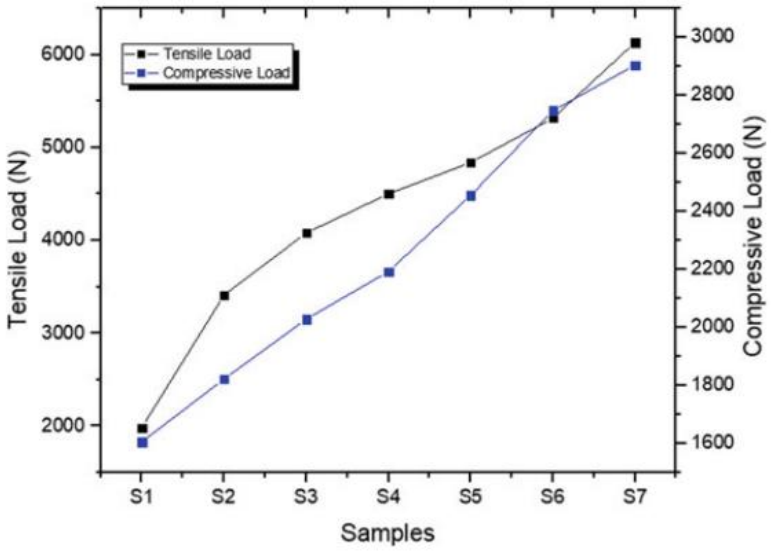
จากงานวิจัยของ Girimurugan R. และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาสมบัติของ Poly (lactic acid) ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ทำการผสม PLA กับ Al_2O_3 ที่ปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 %wt ด้วยเครื่องผสมแบบให้ความร้อนร่วมกับการหมุน ความเร็วรอบ 175 rpm อุณหภูมิ 200°C เป็นระยะเวลา 10 นาที จากนั้นนำวัสดุคอมโพสิตไปขึ้นรูปแบบกระบวนการขึ้นรูปแบบการอัดด้วยความร้อน อุณหภูมิการกดอัด 180°C และตัดชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM ด้วยกระบวนการตัดด้วยน้ำแรงดันสูง

ตารางที่ 2.5 อัตราส่วนในการผสมวัสดุคอมโพสิต [27]

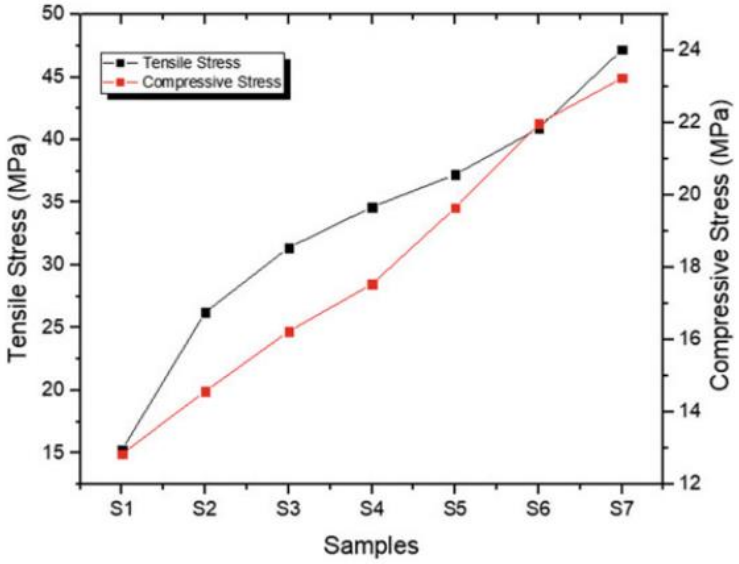
S. No.	Weight % of matrix material (polylactide—PLA) (%)	Weight % of reinforcement material (aluminium oxide—Al_2O_3) (%)	Specimen description
1	100	0	Sample-S1
2	95	5	Sample-S2
3	90	10	Sample-S3
4	85	15	Sample-S4
5	80	20	Sample-S5
6	75	25	Sample-S6
7	70	30	Sample-S7



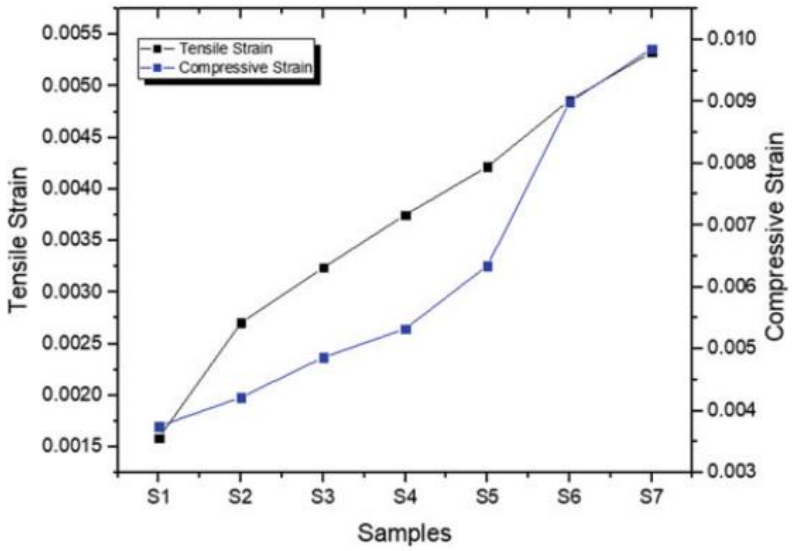
รูปที่ 2.25 วัสดุและชิ้นงานวัสดุคอมโพสิต [27]



รูปที่ 2.26 แรงดึง และแรงกดอัด ของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต [27]



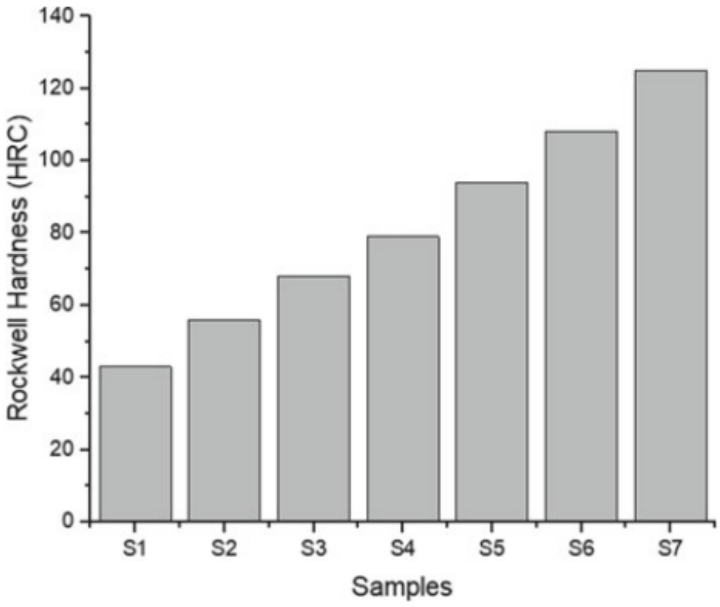
รูปที่ 2.27 ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อแรงกดอัด ของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต [27]



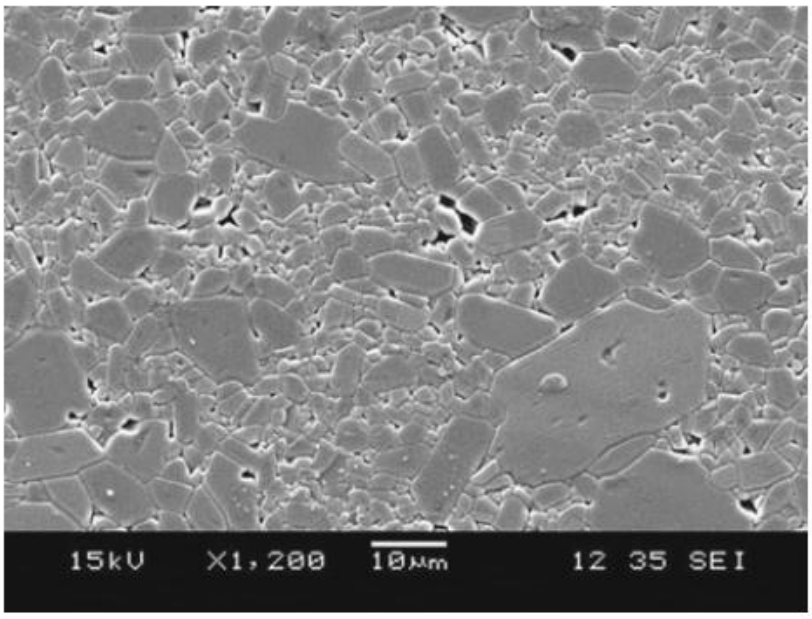
รูปที่ 2.28 ความเครียดจากแรงดึง และความเครียดจากแรงอัด ของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต [27]

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลแสดงดังรูปที่ 2.26, 2.27 และ 2.28 ค่าแรงดึง, แรงกดอัด, ความต้านทานต่อแรงดึง, ความต้านทานต่อแรงกดอัด, ความเครียดจากแรงดึง และความเครียดจากแรงอัด ของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของ Al_2O_3 มากขึ้น และการทดสอบความแข็งแสดงดังรูปที่ 2.29 ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับสมบัติเชิงกล เมื่อปริมาณของ Al_2O_3 มากขึ้น

ความแข็งจะมีค่าเพิ่มขึ้น สัณฐานวิทยาของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต (70 wt% ของ PLA/30 wt% ของอนุภาค Al_2O_3) แสดงดังรูปที่ 2.30 พบว่า PLA และอนุภาค Al_2O_3 มีความเข้ากันได้ดี



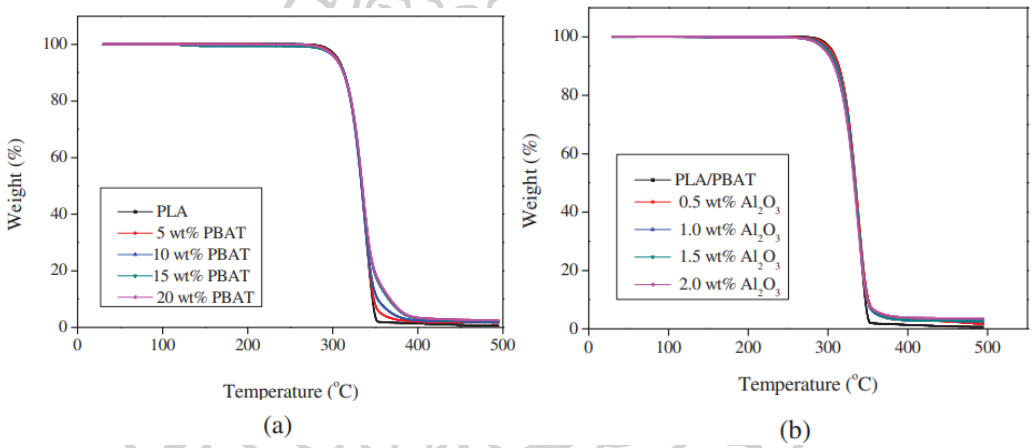
รูปที่ 2.29 การทดสอบความแข็งของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต [27]



รูปที่ 2.30 สัณฐานวิทยาของ PLA/Al_2O_3 คอมโพสิต (70 wt% ของ PLA/30 wt% ของอนุภาค Al_2O_3) [27]

จากงานวิจัยของ Jie C. และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณ PBAT และ Al_2O_3 ที่ผสมลงในเมทริกซ์ PLA ต่อเสถียรภาพทางความร้อน สมบัติการโค้งงอ ความต้านทานต่อแรงกระแทก และสัณฐานวิทยา ทำการผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 100/0, 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/10 ด้วยวิธีการผสมแบบสารละลาย โดยใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลาย จากนั้นทำการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนระหว่าง PLA/PBAT ที่เหมาะสม (ซึ่งในที่นี้คือ 95/5) และจึงนำไปผสมกับ Al_2O_3 ที่ปริมาณ 0.5, 1, 1.5 และ 2 %wt โดยวิธีการผสมแบบสารละลายเช่นเดิม

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.31 และตารางที่ 2.6 เมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ char เพิ่มขึ้นเนื่องจาก PBAT เป็นโคพอลิเอสเตอร์อะลิฟาติก/อะโรมาติกที่มีความเสถียรทางความร้อนสูง และการเติม Al_2O_3 ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA/PBAT/ Al_2O_3

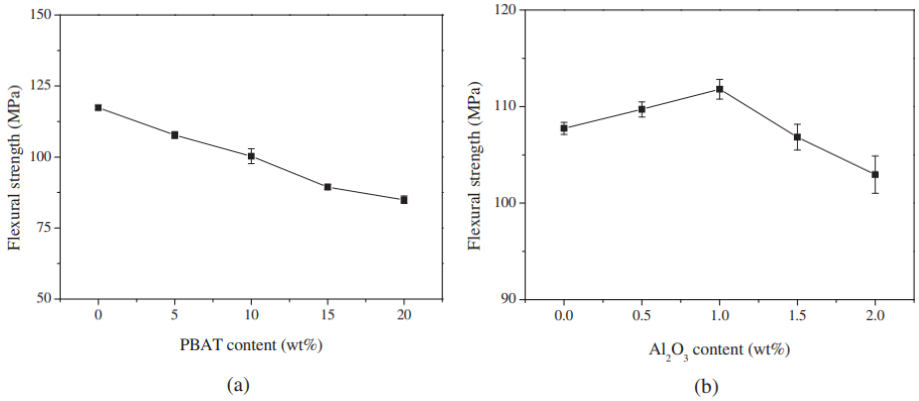


รูปที่ 2.31 กราฟ TGA ของ (a) PLA/PBAT และ (b) PLA/PBAT/Al_2O_3 [16]

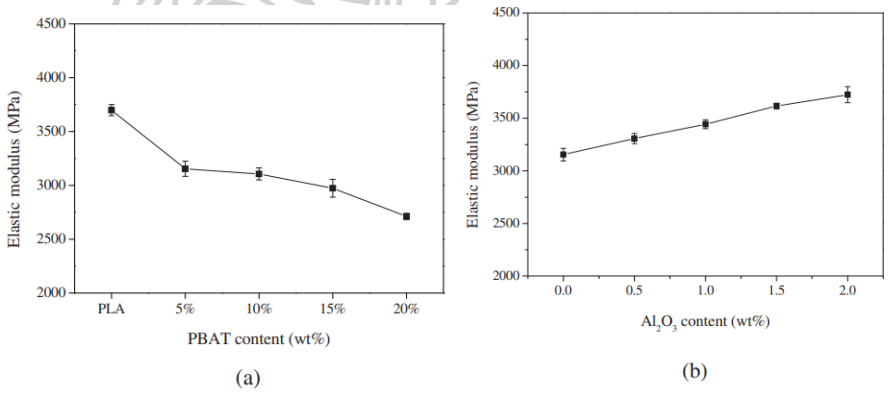
ตารางที่ 2.6 ข้อมูลเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA/PBAT และ PLA/PBAT/Al_2O_3 จากกราฟ TGA [16]

PBAT content (wt%)	Al_2O_3 content (wt%)	$T_{10\%}$ (°C)	Char at 500°C (%)
0	0	313.5	0.65
5	0	313.2	1.45
10	0	312.6	1.90
15	0	313.3	2.41
20	0	312.6	2.50
5	0.5	313.4	1.58
5	1.0	311.1	2.48
5	1.5	310.9	2.73
5	2.0	308.1	3.43

จากการศึกษาสมบัติการโค้งงอดังรูปที่ 2.32 และ 2.33 ความต้านทานต่อการโค้งงอจะลดลงเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากสมบัติความยืดหยุ่นของ PBAT และเมื่อทำการผสม Al_2O_3 ความต้านทานต่อการโค้งงอจะมากขึ้น เมื่อปริมาณ Al_2O_3 เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อปริมาณ Al_2O_3 มากกว่า 1.0 %wt จะส่งผลให้ความต้านทานต่อการโค้งงอลดลงเนื่องจากเกิดการรวมกันของอนุภาค Al_2O_3 ทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ในส่วนของค่าโมดูลัสนั้นจะลดลงเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการผสม Al_2O_3 ค่าโมดูลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ Al_2O_3

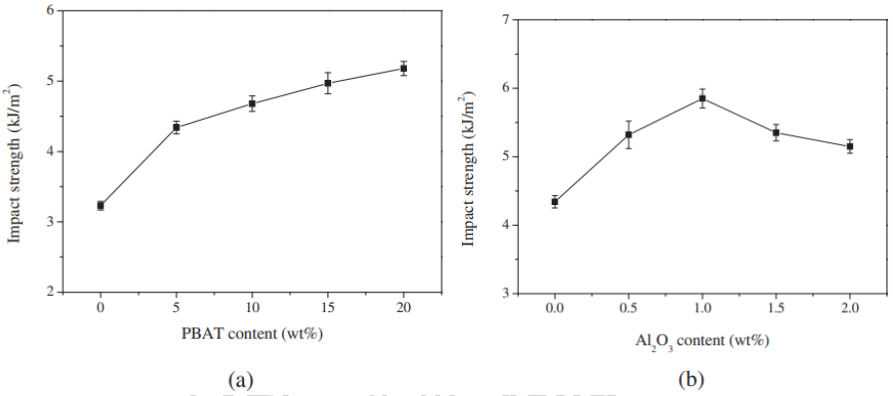


รูปที่ 2.32 ความทานต้านต่อการโค้งงอของ (a) PLA/PBAT และ (b) PLA/PBAT/Al_2O_3 [16]



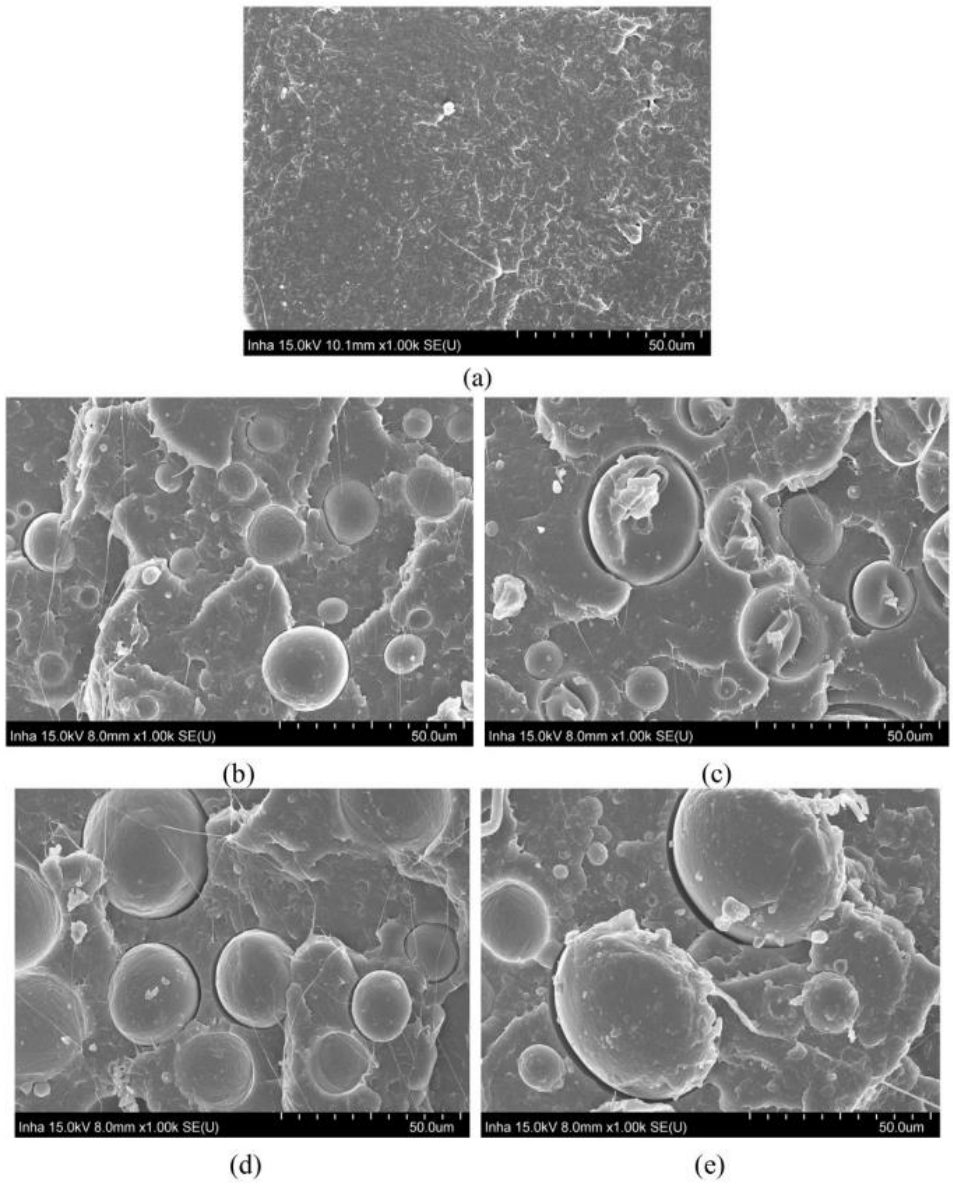
รูปที่ 2.33 อีลาสติกโมดูลัสของ (a) PLA/PBAT และ (b) PLA/PBAT/Al_2O_3 [16]

จากการศึกษาความต้านทานต่อแรงกระแทกแสดงดังรูปที่ 2.34 ความต้านทานต่อแรงกระแทกจะมากขึ้นเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจาก PBAT มีส่วนช่วยในการดูดซับแรง และเมื่อทำการผสม Al_2O_3 ความต้านทานต่อแรงกระแทกจะมากขึ้น เมื่อปริมาณ Al_2O_3 เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อปริมาณ Al_2O_3 มากกว่า 1.0 %wt จะส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลงเนื่องจากเกิดการรวมกันของอนุภาค Al_2O_3 ทำให้เกิดจุดรวมความเค้น

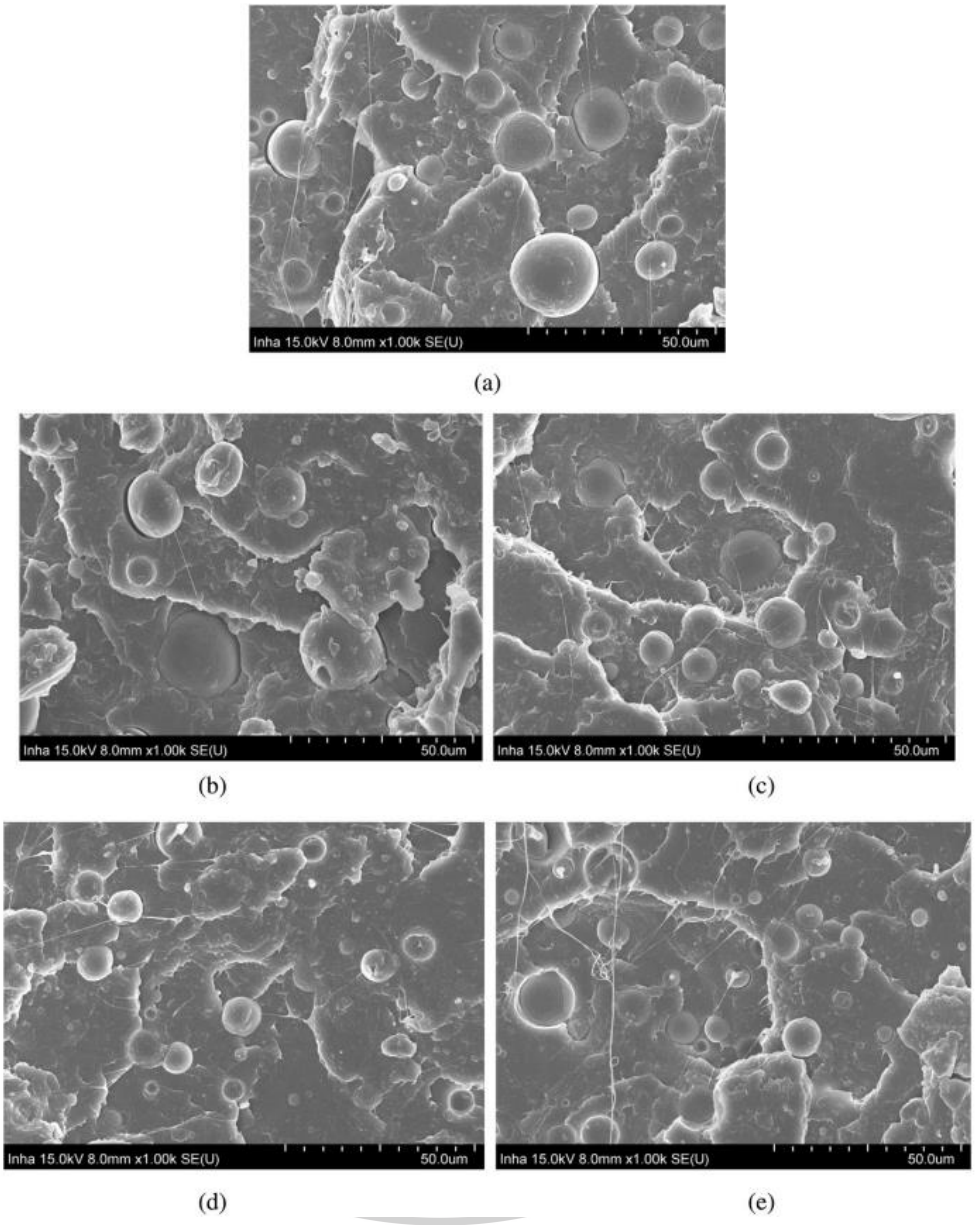


รูปที่ 2.34 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของ (a) PLA/PBAT และ (b) PLA/PBAT/Al_2O_3 [16]

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาแสดงดังรูปที่ 2.35 และ 2.36 PLA บริสุทธิ์แสดงการแตกหักแบบเปราะและพื้นผิวการแตกหักที่เรียบ เมื่อทำการผสม PBAT จะเกิดการแตกหักแบบเหนี่ยว นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นเฟสของ PBAT ในเมทริกซ์ PLA กระจายตัวอย่างชัดเจนเป็นลักษณะทรงกลม และเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มมากขึ้นทรงกลมนั้นจะมีขนาดเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของเฟส PBAT ในส่วนของ PLA/PBAT/Al_2O_3 ผิวการแตกหักจะหยาบกว่า PLA/PBAT และเกิดการแตกหักแบบเหนี่ยว สังเกตได้ว่าการผสม Al_2O_3 จะทำให้ขนาดของเฟส PBAT มีขนาดเล็กลงเนื่องจาก Al_2O_3 จะปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่าง PBAT และ PLA อีกทั้งยังเกิดการกระจายตัวของ Al_2O_3 ที่ดี



รูปที่ 2.35 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT หลังจากการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก : (a) PLA บริสุทธิ์, (b) 5 wt% PBAT, (c) 10 wt% PBAT, (d) 15 wt% PBAT และ (e) 20 wt% PBAT (ที่กำลังขยาย 1000) [16]



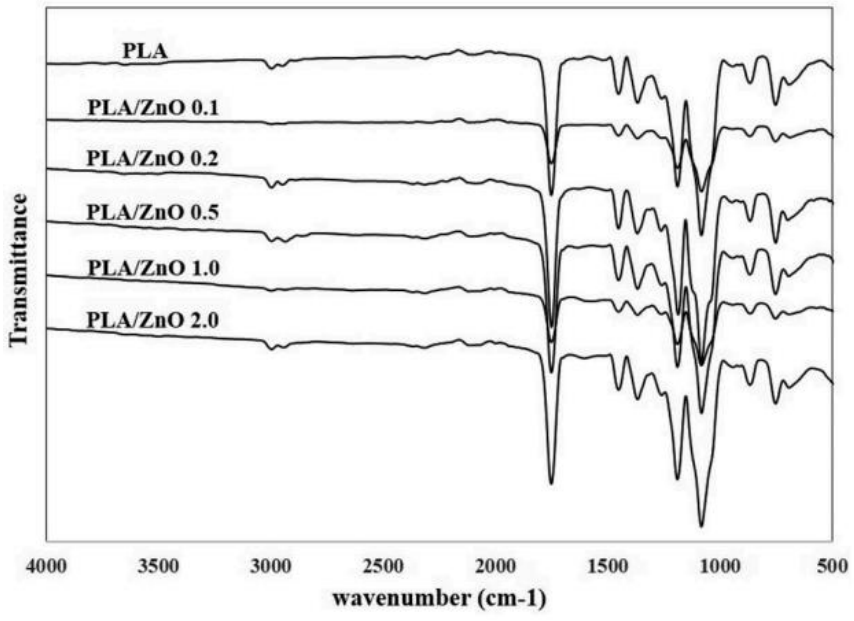
รูปที่ 2.36 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT/Al_2O_3 หลังจากการทดสอบความต้านทานแรงกระแทก : (a) 5 wt% PBAT, (b) 5 wt% PBAT/0.5 wt% Al_2O_3, (c) 5 wt% PBAT/1 wt% Al_2O_3, (d) 5 wt% PBAT/1.5 wt% Al_2O_3 และ (e) 5 wt% PBAT/2 wt% Al_2O_3 (ที่กำลังขยาย 1000) [16]

จากงานวิจัยของ Muhammad G. และคณะ [26] ได้ทำการศึกษาผลของการเติมโลหะออกไซด์ต่อสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การต้านเชื้อแบคทีเรีย และสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์ม PLA โดยชนิดโลหะออกไซด์ได้แก่ ZnO, MgO และ TiO_2 ทำการผสมโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ปริมาณ 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, และ 2.0 phr ด้วยวิธีการขึ้นรูปฟิล์มด้วยตัวทำละลาย ใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย

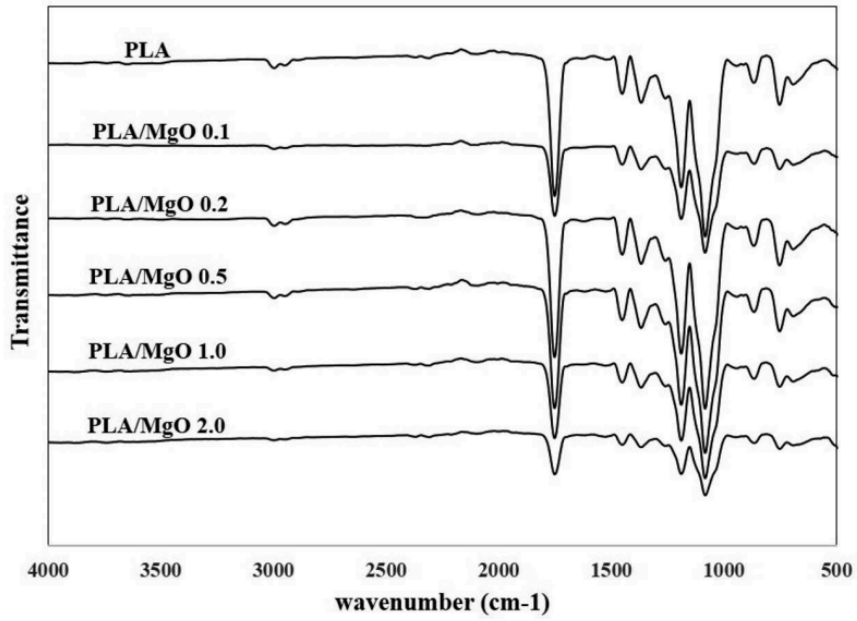
ตารางที่ 2.7 อัตราส่วนในการผสม PLA/MO [26]

Materials	Amount	Unit
PLA	2	gr
Chloroform	10	ml
Metal oxides		
ZnO	0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0	phr
MgO	0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0	phr
TiO_2	0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0	phr

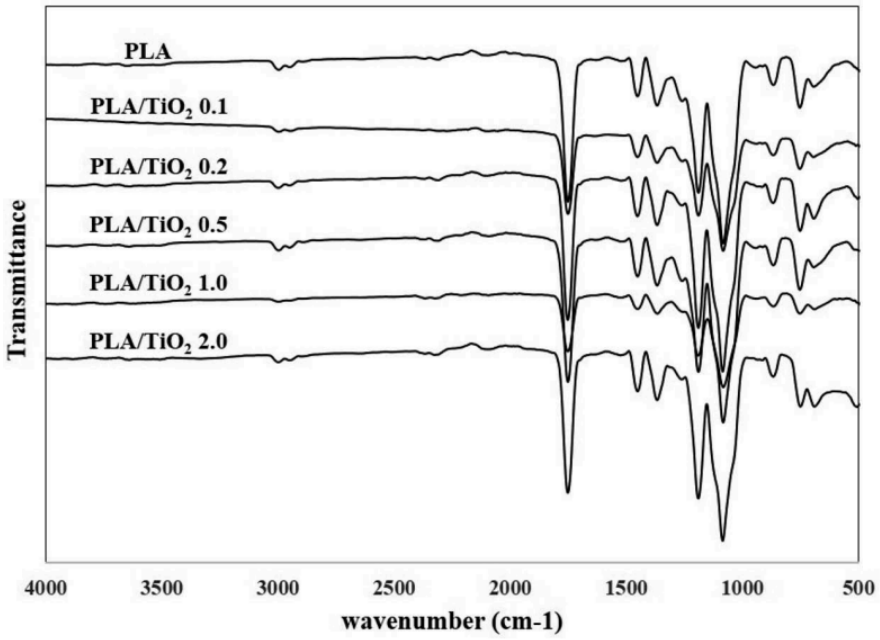
จากการทดสอบ FTIR แสดงดังรูปที่ 2.37, 2.38 และ 2.39 พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของ spectra เมื่อผสมโลหะออกไซด์ บ่งชี้ว่าการผสมโลหะออกไซด์นั้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ PLA



รูปที่ 2.37 FTIR spectra ของ PLA/ZnO [26]



รูปที่ 2.38 FTIR spectra ของ PLA/MgO [26]



รูปที่ 2.39 FTIR spectra ของ PLA/TiO_2 [26]

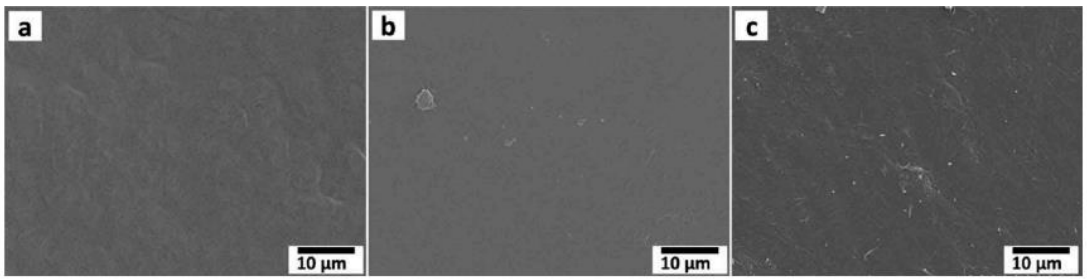
จากการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียแสดงดังตารางที่ 2.8 พบว่า ZnO, MgO และ TiO_2 มีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียตามลำดับ และเมื่อปริมาณของโลหะออกไซด์มากขึ้นความสามารถในการต้านเชื้อก็จะมากขึ้นตามไปด้วยเนื่องจากผนังเซลล์แบคทีเรียได้รับความเสียหายเมื่อสัมผัสโลหะออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าชนิดของโลหะออกไซด์และปริมาณโลหะออกไซด์ที่ผสมส่งผลต่อความสามารถในการต้านเชื้อจุลชีพ

ตารางที่ 2.8 โซนในการต้านเชื้อแบคทีเรีย *E.coli* ของ PLA, PLA/ZnO, PLA/MgO และ PLA/TiO_2 [26]

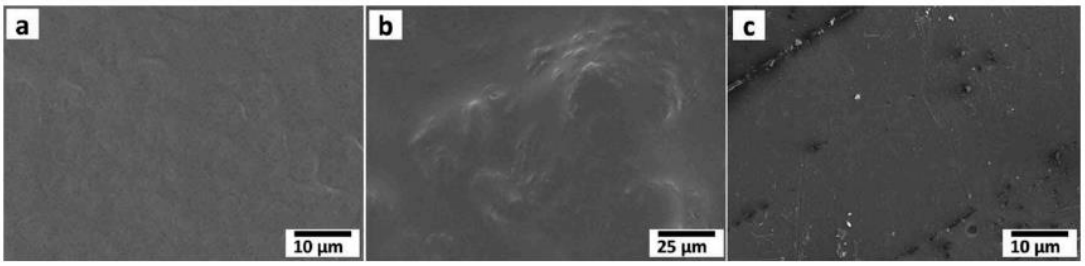
Sample	Inhibition Zone (mm)
PLA	0
PLA/ZnO 0.1 phr	7.30
PLA/ZnO 0.2 phr	7.40
PLA/ZnO 0.5 phr	7.55
PLA/ZnO 1.0 phr	7.66
PLA/MgO 0.1 phr	7.20
PLA/MgO 0.2 phr	7.20
PLA/MgO 0.5 phr	7.45
PLA/MgO 1.0 phr	7.50
PLA/TiO_2 0.1 phr	5.90
PLA/TiO_2 0.2 phr	5.90
PLA/TiO_2 0.5 phr	6.00
PLA/TiO_2 1.0 phr	6.00

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาดังรูปที่ 2.40, 2.41 และ 2.42 จะเห็นการกระจายตัวของโลหะออกไซด์เป็นอนุภาคสีขาวในเมทริกซ์ PLA เนื่องมาจากการไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคทั้ง 3 ชนิด

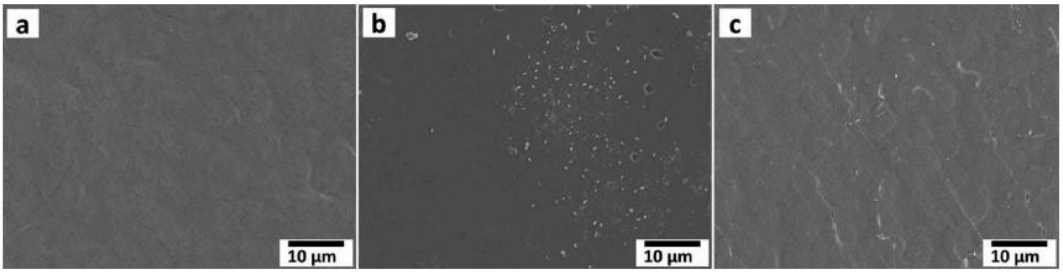
จากการศึกษาสมบัติเชิงกลแสดงดังตารางที่ 2.9 พบว่าเมื่อเติมโลหะออกไซด์จะส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นแต่เมื่อปริมาณของโลหะออกไซด์เพิ่มขึ้นเกิน 1.0 phr จะส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเมื่อเทียบกับ PLA และ TiO_2, MgO และ ZnO สามารถเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึงได้ตามลำดับ ทั้งนี้การเติมออกไซด์ของโลหะในความเข้มข้นต่ำสามารถเพิ่มความต้านทานแรงดึงได้ แต่ความเข้มข้นที่สูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลง



รูปที่ 2.40 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA บริสุทธิ์, (b) PLA/ZnO 0.5 phr และ (c) PLA/ZnO 2.0 phr [26]



รูปที่ 2.41 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA บริสุทธิ์, (b) PLA/MgO 0.5 phr และ (c) PLA/MgO 2.0 phr [26]

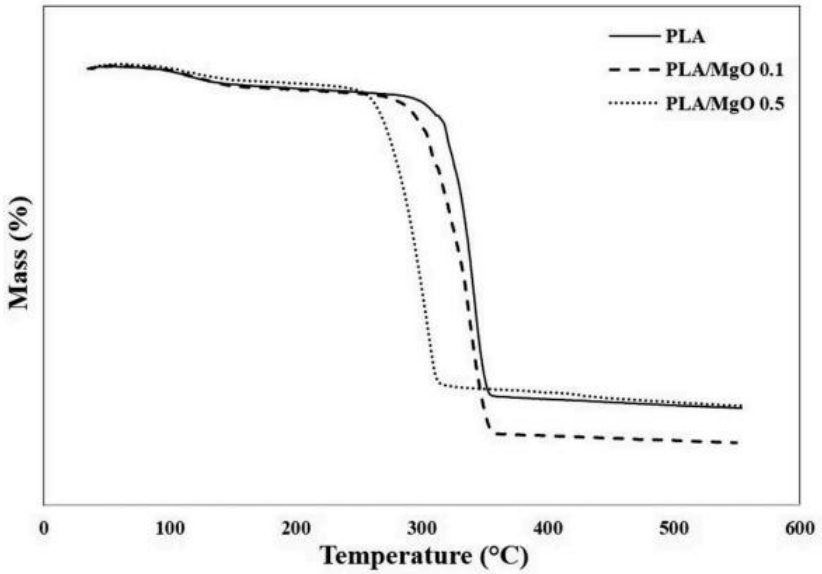


รูปที่ 2.42 สัณฐานวิทยาของ (a) PLA บริสุทธิ์, (b) PLA/TiO_2 0.5 phr และ (c) PLA/TiO_2 2.0 phr [26]

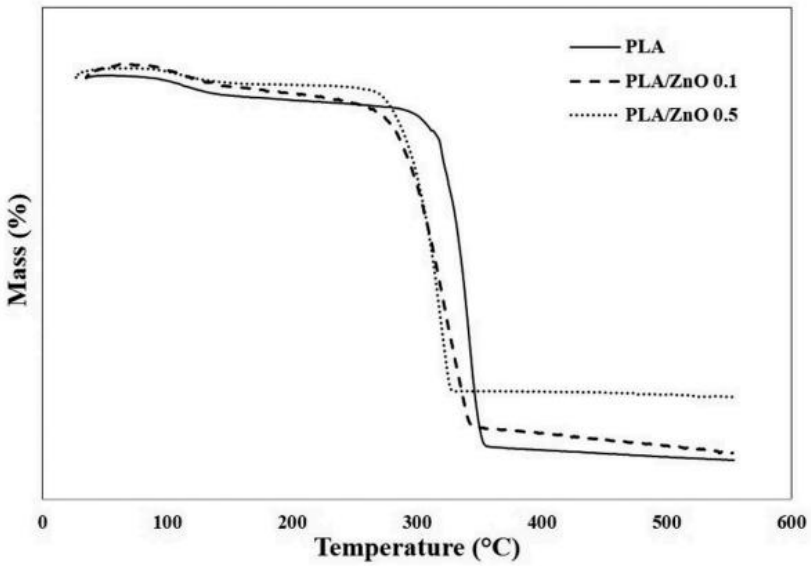
ตารางที่ 2.9 ความต้านทานต่อแรงดึงของ PLA/ZnO, PLA/MgO และ PLA/TiO_2 [26]

Sample	Tensile Strength (Mpa)
PLA	33.63
PLA/ZnO 0.1	36.80
PLA/ZnO 0.2	30.40
PLA/ZnO 0.5	20.71
PLA/ZnO 1.0	8.96
PLA/MgO 0.1	35.86
PLA/MgO 0.2	33.05
PLA/MgO 0.5	32.03
PLA/MgO 1.0	28.86
PLA/TiO_2 0.1	45.80
PLA/TiO_2 0.2	37.10
PLA/TiO_2 0.5	34.90
PLA/TiO_2 1.0	32.30
PLA/TiO_2 2.0	30.80

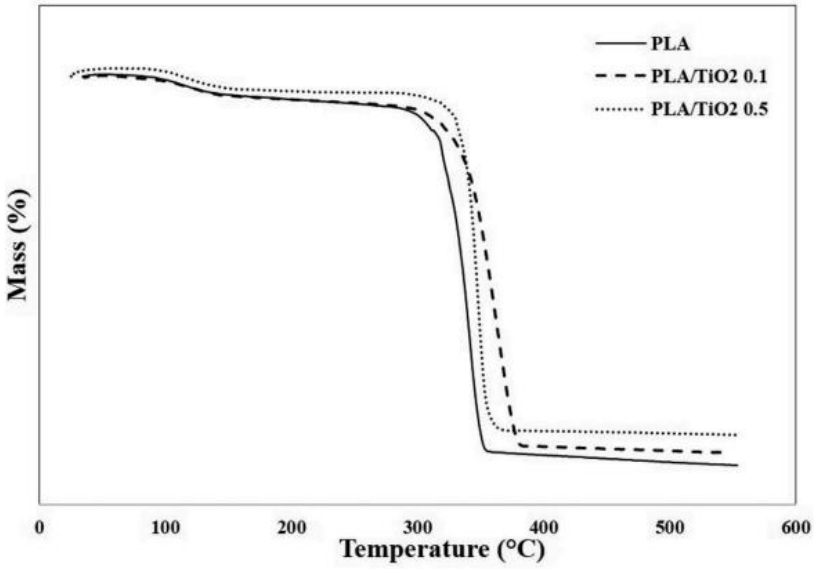
จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.43, 2.44 และ 2.45 เมื่อทำการผสม ZnO และ MgO จะส่งผลให้ PLA เกิดการสลายตัว ณ อุณหภูมิต่ำลงและเมื่อปริมาณโลหะออกไซด์มากขึ้น การสลายตัวทางความร้อนจะเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำลง แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวกันของ ZnO และ MgO ในฟิล์ม PLA ช่วยเร่งการสลายตัวทางความร้อนของฟิล์ม PLA ในทางกลับกันการผสม TiO_2 นั้นจะส่งผลให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนช้ากว่า PLA บริสุทธิ์ เกิดการสลายตัว ณ อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่ง TiO_2 ทำหน้าที่เป็นเกราะป้องกันความร้อนในช่วงแรกของการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนั้นจึงช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA ซึ่ง PLA/TiO_2 0.1 phr มีเสถียรทางความร้อนสูงสุด เกิดการสลายตัว ณ อุณหภูมิ 380°C



รูปที่ 2.43 กราฟ TGA ของ PLA/MgO [26]



รูปที่ 2.44 กราฟ TGA ของ PLA/ZnO [26]



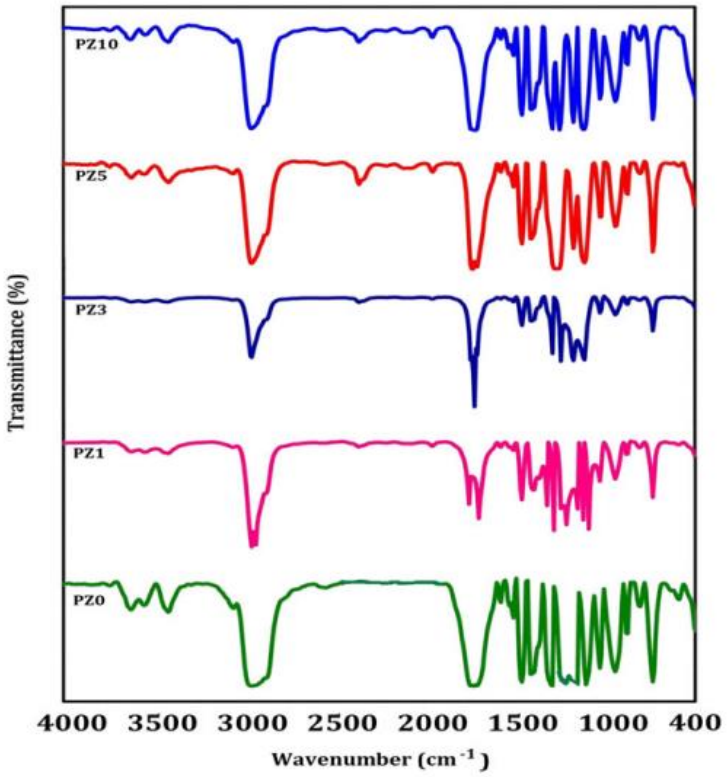
รูปที่ 2.45 กราฟ TGA ของ PLA/TiO_2 [26]

จากงานวิจัยของ Raja V. และคณะ [56] ได้ทำการศึกษาผลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ที่สังเคราะห์ขึ้นในปริมาณต่างๆต่อสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน ความสามารถในการแพร่ผ่านของออกซิเจน และการต้านเชื้อของฟิล์มต้านเชื้อจุลชีพ PBAT โดยทำการเตรียมฟิล์มด้วยกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มด้วยตัวทำละลาย ใช้คลอโรฟอร์มเป็นตัวทำละลาย ผสมอนุภาคนาโน ZnO ปริมาณ 0, 1, 3 และ 5 %wt

ตารางที่ 2.10 อัตราส่วนของผสม PBAT/ZnO และสัญลักษณ์ของแต่ละอัตราส่วน [56]

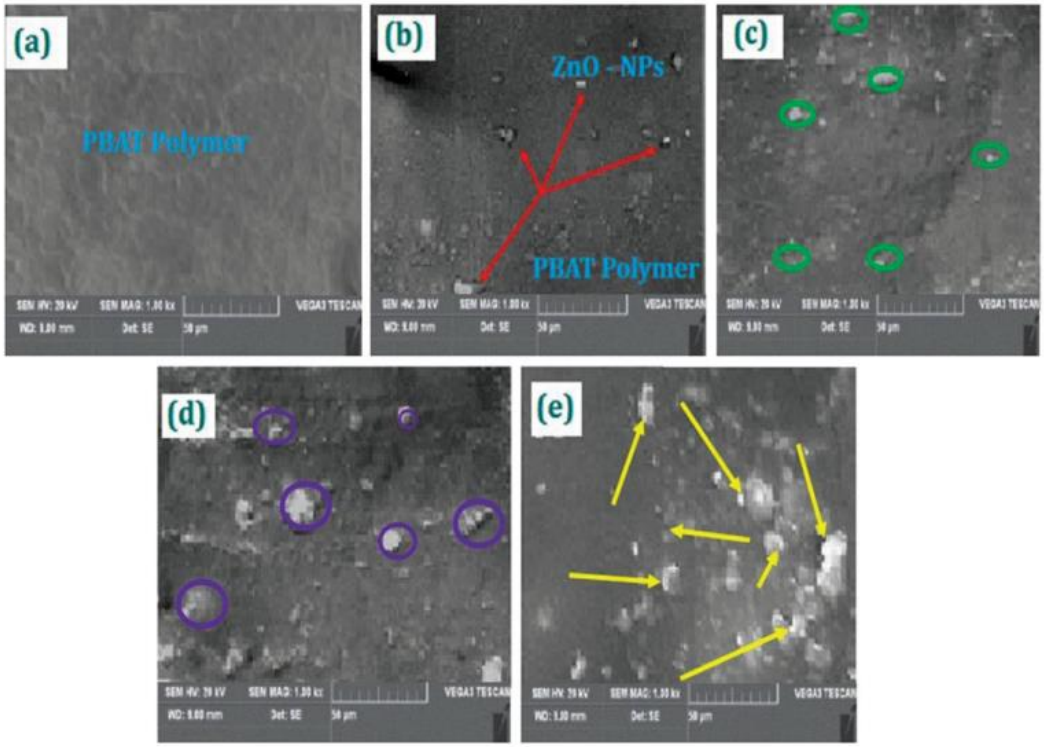
Sample	Nanocomposite films	Abbreviation
1	PBAT/ZnO (0 wt%)	PZ0
2	PBAT/ZnO (1 wt%)	PZ1
3	PBAT/ZnO (3 wt%)	PZ3
4	PBAT/ZnO (5 wt%)	PZ5
5	PBAT/ZnO (10 wt%)	PZ10

จากการทดสอบ FTIR แสดงดังรูปที่ 2.46 แสดงให้เห็นถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง Zn-O ที่ตำแหน่ง 430 cm^{-1} ซึ่งจะเด่นชัดมากขึ้นเมื่อปริมาณของ ZnO เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.46 FTIR spectra ของ PBAT และ PBAT/ZnO ที่ผสม ZnO ปริมาณแตกต่างกัน [56]

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาดังรูปที่ 2.47 พื้นผิวของ PBAT/ZnO มีความขรุขระและเมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้นจะเกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคบางส่วน แสดงให้เห็นถึงการผสมกันอย่างไม่สม่ำเสมอในเมทริกซ์ PBAT โดยอนุภาคมีลักษณะสัณฐานคล้ายทรงกลม



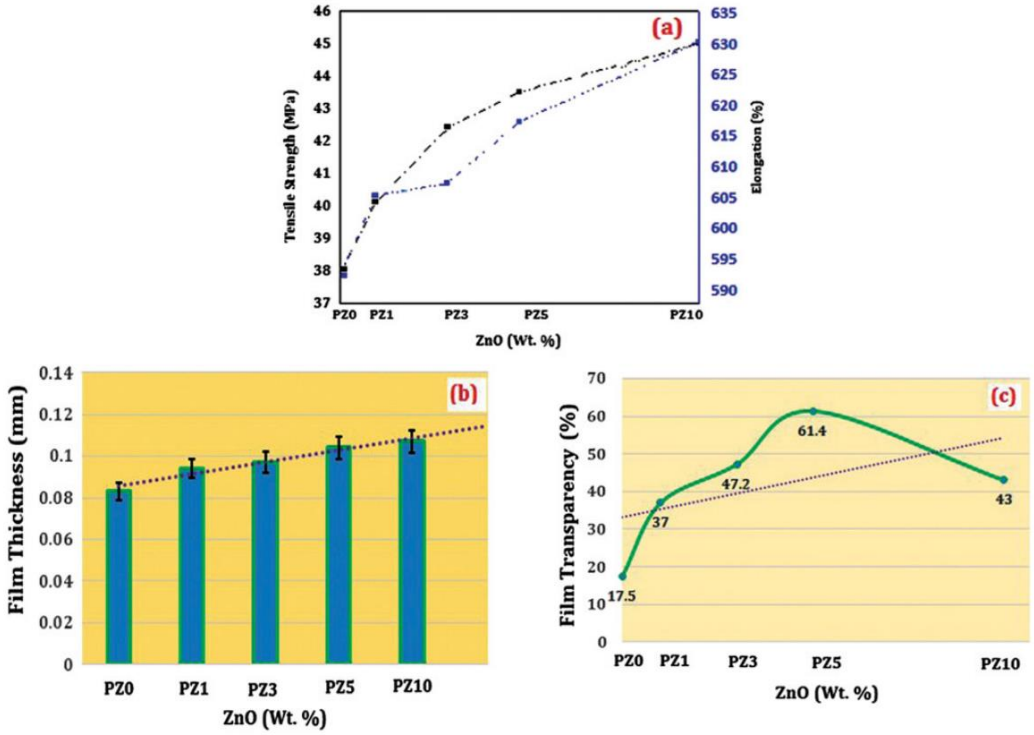
รูปที่ 2.47 สัณฐานวิทยาของฟิล์มคอมโพสิต (a) PZ0, (b) PZ1, (c) PZ3, (d) PZ5 และ (e) PZ10 [56]

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนแสดงดังตารางที่ 2.11 พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มมากขึ้น แสดงถึงเสถียรภาพทางความร้อนที่มากขึ้นของฟิล์ม PBAT/ZnO เนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยาของ PBAT และ ZnO ที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นในการสลายตัว

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลดังรูปที่ 2.48 เมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาดของฟิล์ม PBAT/ZnO เพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาค ZnO

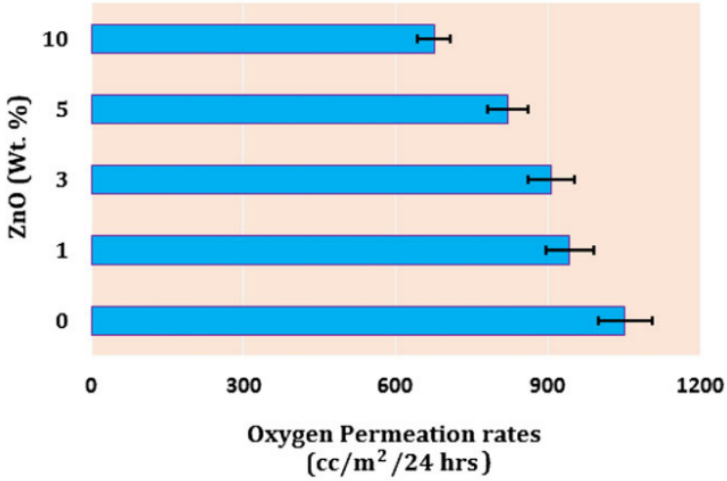
ตารางที่ 2.11 ข้อมูลจากการทดสอบ TGA ของฟิล์ม PBAT และ PBAT/ZnO [56]

Sample	Initial degradation temperature (℃)	Final degradation temperature (℃)	50% degradation temperature (℃)	Ash content (%)
PZ0	319.51	412.00	405.01	8.13
PZ1	323.29	416.25	409.34	8.01
PZ3	326.88	420.59	413.87	7.83
PZ5	339.30	428.90	419.33	7.41
PZ10	349.08	435.82	421.51	7.32



รูปที่ 2.48 (a) ความต้านทานต่อแรงดึง, (b) ความหนาของฟิล์ม และ (c) ความโปร่งใสของฟิล์ม PBAT/ZnO [56]

จากการศึกษาความสามารถในการแพร่ผ่านของออกซิเจนแสดงดังรูปที่ 2.49 พบว่าอัตราการแพร่ผ่านของออกซิเจนลดลงเมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคจะกระจายตัวอยู่ในฟิล์มและขัดขวางการเคลื่อนที่ของออกซิเจน



รูปที่ 2.49 อัตราการแพร่ผ่านของออกซิเจนในฟิล์ม PBAT และ PBAT/ZnO ณ อุณหภูมิ 25°C [56]

จากงานวิจัยของ Yasir A. และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาการป้องกันการสลายตัวของ PLA ด้วยอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ (ZnO NP) และทำการเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มคอมโพสิตระหว่าง PLA และ ZnO ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane และไม่ผ่านการปรับปรุง ขึ้นรูปฟิล์มคอมโพสิตด้วยวิธีการขึ้นรูปฟิล์มด้วยตัวทำละลายใช้ไดคลอโรมีเทน เป็นตัวทำละลาย ผสม PLA/PEG อัตราส่วน 80/20 (PEG ทำหน้าที่เป็นพลาสติไซเซอร์ในงานวิจัยนี้) และผสม ZnO ที่ผ่านการ treat (ZnO (ST)) และ ZnO ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (ZnO (UT)) ปริมาณ 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10 %wt

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลดังตารางที่ 2.12 ในส่วนของฟิล์ม PLA ที่ผสม ZnO (UT) เมื่อทำการเติมและเพิ่มปริมาณของ ZnO (UT) จะส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงและการยืดตัวที่จุดขาดลดลง ในทางกลับกันฟิล์ม PLA ที่ผสม ZnO (ST) จะมีความต้านทานต่อแรงดึงมากขึ้น และเมื่อปริมาณ ZnO (ST) เพิ่มมากขึ้นความต้านทานต่อแรงดึงจะมากขึ้นไปด้วย แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว แต่การยืดตัว ณ จุดขาดจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม PLA ที่ผสม ZnO (UT)

จากการศึกษาความสามารถในการแพร่ผ่านของออกซิเจนแสดงดังตารางที่ 2.12 เมื่อทำการผสม ZnO จะส่งผลให้ค่าการแพร่ผ่านของออกซิเจนลดลงและเมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้นค่าการแพร่

ผ่านของออกซิเจนก็ยิ่งลดลง เนื่องมาจากอนุภาคของ ZnO จะกระจายตัวในฟิล์ม PLA และเป็นอุปสรรคในการผ่านของออกซิเจน โดยฟิล์ม PLA ที่ผสม ZnO (ST) จะส่งผลให้ค่าการแพร่ผ่านของออกซิเจนลดลงมากกว่าฟิล์ม PLA ที่ผสม ZnO (UT) เนื่องมาจากการกระจายตัวของอนุภาคในฟิล์ม PLA ที่ดีกว่า

ตารางที่ 2.12 ความหนา, สมบัติเชิงกล และความสามารถในการแพร่ผ่านของออกซิเจนในฟิล์ม PLA ที่ผสม ZnO (ST) และ ZnO (UT) [7]

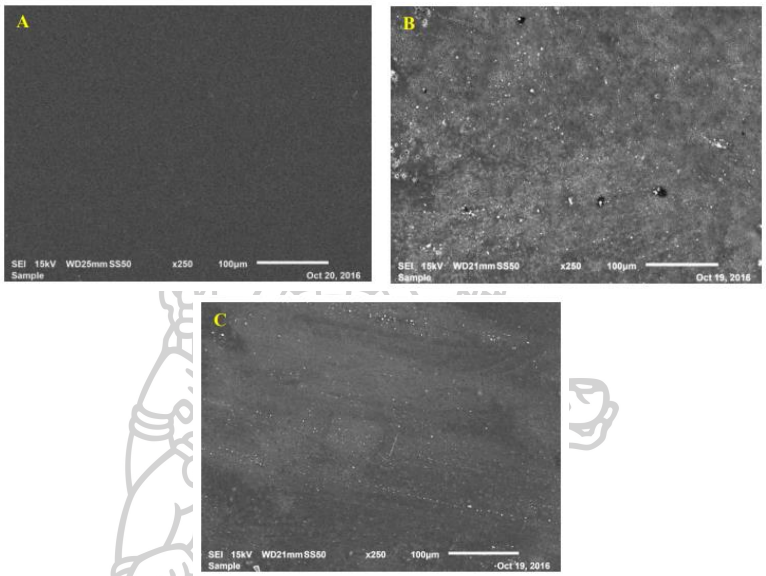
Film sample	Thickness (mm)	Tensile strength (MPa)	EAB (%)	Oxygen Permeability (cc mm/m² d atm)
PLA/PEG (80/20)	0.068±0.002 ^{a}	29.7±3.9^{ab}	36.0±2.2^{a}	15.8±1.2^{a}
PLA/PEG/2.5% ZnO(UT)	0.070±0.002 ^{a}	26.1±3.1^{bcd}	33.2±2.3^{abc}	13.9±0.76^{b}
PLA/PEG/5% ZnO(UT)	0.070±0.001 ^{a}	23.8±2.6^{cd}	30.9±2.7^{bc}	11.5±0.52^{cd}
PLA/PEG/7.5% ZnO(UT)	0.071±0.002 ^{a}	21.4±3.4^{d}	29.1±3.0^{c}	10.4±0.48^{de}
PLA/PEG/10% ZnO(UT)	0.072±0.003 ^{a}	22.6±2.8^{d}	30.7±2.1^{bc}	10.1±0.59^{e}
PLA/PEG/2.5% ZnO(ST)	0.070±0.003 ^{a}	29.2±2.6^{abc}	34.2±1.9^{ab}	11.9±0.38^{c}
PLA/PEG/5% ZnO(ST)	0.071±0.002 ^{a}	33.9±2.1^{a}	33.4±3.1^{abc}	9.3±0.69^{ef}
PLA/PEG/7.5% ZnO(ST)	0.071±0.002 ^{a}	33.1±3.4^{a}	32.2±2.5^{abc}	8.2±0.32^{fg}
PLA/PEG/10% ZnO(ST)	0.072±0.001 ^{a}	34.6±3.9^{a}	32.9±2.7^{abc}	7.8±0.5^{g}

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนดังตารางที่ 2.13 เมื่อพิจารณาค่า T_g พบว่าเมื่อผสม ZnO และปริมาณ ZnO เพิ่มมากขึ้น ค่า T_g จะเพิ่มมากขึ้น โดยการผสม ZnO (ST) จะส่งผลให้ค่า T_g เพิ่มขึ้นสูงกว่าการผสม ZnO (UT) และเป็นเช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาในส่วนของค่า Tm พิจารณาค่า T_{cc} เมื่อผสม ZnO จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเมื่อผสม ZnO (UT) ค่า T_{cc} จะมีค่าสูงมากกว่าการผสม ZnO (ST) ในส่วนของค่า ΔH_m ฟิล์มที่ผสม ZnO (ST) จะมีค่า ΔH_m สูงกว่าฟิล์มที่ผสม ZnO (UT) ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาค่า ΔH_{cc} นั้นฟิล์มที่ผสม ZnO (UT) จะมีค่า ΔH_m สูงกว่าฟิล์มที่ผสม ZnO (ST)

ตารางที่ 2.13 ผลของ ZnO (ST) และ ZnO (UT) ต่อสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PLA [7]

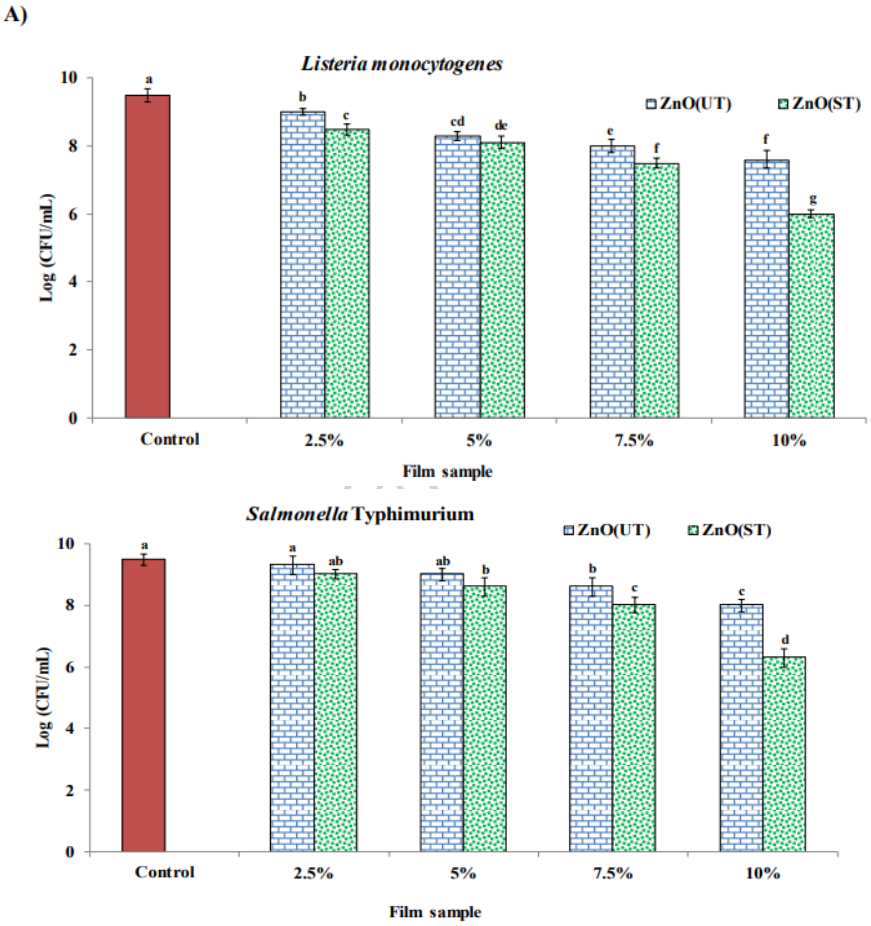
Film sample	T_g/°C	T_m/°C	ΔH_m/J g^{-1}	T_{cc}/°C	ΔH_{cc}/J g^{-1}	T_{mc}/°C	ΔH_{mc}/J g^{-1}	X_{cc}/%	X_{mc}/%
PLA/PEG	13.8±0.23^{g}	146.4±0.39^{c}	23.1±0.34^{c}	77.8±0.67^{d}	11.9±0.17^{a}	71.6±0.52^{f}	3.8±0.16^{f}	12.8±0.65^{a}	4.9±0.38^{e}
PLA/PEG/2.5% ZnO(UT)	15.3±0.32^{f}	147.4±0.48^{b}	12.6±0.42^{f}	89.1±1.29^{abc}	7.7±0.22^{bc}	79.1±1.22^{a}	6.0±0.47^{cd}	8.3±0.74^{c}	6.5±0.66^{cd}
PLA/PEG/5% ZnO(UT)	16.4±0.24^{e}	147.3±0.34^{b}	15.9±0.54^{d}	89.2±0.68^{abc}	8.1±0.54^{b}	77.2±0.62^{bcd}	10.8±0.29^{a}	8.7±0.31^{c}	12.4±0.74^{a}
PLA/PEG/7.5% ZnO(UT)	16.9±0.19^{d}	147.2±0.45^{b}	14.3±0.23^{e}	89.9±0.57^{ab}	7.3±1.06^{bcd}	76.0±0.70^{d}	11.6±0.52^{a}	9.3±0.39^{c}	11.4±0.53^{a}
PLA/PEG/10% ZnO(UT)	17.1±0.26^{d}	147.5±0.37^{b}	15.9±0.35^{d}	90.3±1.33^{a}	7.7±0.92^{bc}	78.2±0.34^{ab}	9.8±0.87^{b}	10.9±0.53^{b}	8.1±0.29^{b}
PLA/PEG/2.5% ZnO(ST)	16.3±0.14^{e}	148.3±0.26^{a}	29.6±0.21^{a}	88.5±0.82^{bc}	6.9±0.52^{cde}	73.3±0.31^{e}	5.2±0.29^{de}	6.8±0.48^{d}	5.6±0.43^{de}
PLA/PEG/5% ZnO(ST)	18.1±0.21^{c}	148.7±0.51^{a}	24.3±0.19^{b}	89.0±0.73^{abc}	6.5±0.44^{de}	76.3±0.28^{cd}	6.3±0.62^{c}	7.2±0.41^{d}	6.8±0.71^{c}
PLA/PEG/7.5% ZnO(ST)	19.7±0.23^{b}	148.4±0.47^{a}	22.9±0.42^{c}	88.7±0.53^{abc}	6.1±0.65^{e}	76.8±0.46^{cd}	5.2±0.25^{de}	3.4±0.87^{e}	5.7±0.86^{de}
PLA/PEG/10% ZnO(ST)	21.5±0.38^{a}	147.9±0.61^{ab}	24.8±0.34^{b}	87.6±0.81^{c}	6.3±0.11^{de}	77.5±0.79^{bc}	4.4±0.31^{ef}	2.4±0.64^{e}	5.4±0.49^{e}

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาแสดงดังรูปที่ 2.50 ฟิล์ม PLA/PEG มีพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่ฟิล์มที่มีการผสม ZnO นั้นจะมีพื้นผิวที่หยาบ และฟิล์มที่ผสม ZnO (ST) จะเกิดการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอและดีกว่าฟิล์มที่ผสม ZnO (UT) ซึ่งส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PLA



รูปที่ 2.50 สัณฐานวิทยาของ (A) PLA/PEG, (B) PLA/PEG/7.5% ZnO (UT) และ (C) PLA/PEG/7.5% ZnO (ST) [7]

จากการศึกษาการต้านเชื้อจุลชีพแสดงดังรูปที่ 2.51 พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้น ความสามารถในการต้านเชื้อจะมากขึ้น และอนุภาค ZnO ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวจะมีความสามารถในการต้านเชื้อได้ดีกว่าอนุภาคที่ไม่ได้มีการปรับปรุง เนื่องมาจาก ZnO (ST) จะสามารถกระจายตัวได้ดีในฟิล์มทำให้มีพื้นที่ผิวมากส่งผลให้ประสิทธิภาพในการขัดขวางการทำงานของเยื่อหุ้มเซลล์เพิ่มมากขึ้นไปด้วย



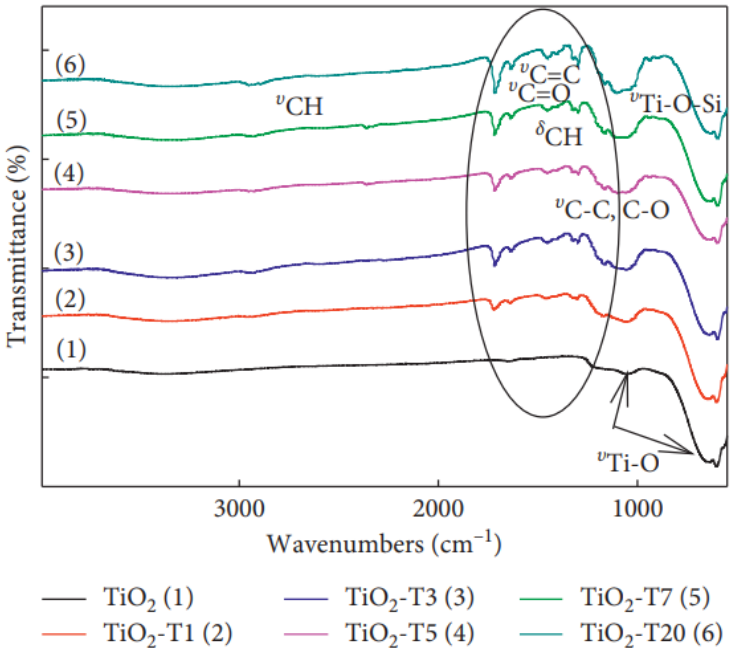
รูปที่ 2.51 ผลการทดสอบการต้านเชื้อจุลชีพของฟิล์ม PLA ที่ผสม ZnO (UT) และ ZnO (ST) ปริมาณ 2.5-10% (a) เชื้อ *L. monocytogenes* และ (b) เชื้อ *S. Typhimurium* [7]

จากงานวิจัยของ Thuy Chinh N. [18] ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคนาโน Titanium dioxide ด้วย 3-(Trimethoxysilyl) propyl Methacrylate ที่ปริมาณแตกต่างกันได้แก่ 1, 3, 5, 7 และ 10 vol% โดยใช้สารละลายเอทานอลเป็นตัวทำละลายและสารละลายแอมโมเนียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของอนุภาค

ตารางที่ 2.14 อัตราส่วนของสารในการปรับปรุงพื้นผิว [18]

Sample	Composition	Signature	m_{TiO2} (g)	V_{TMSPM} (mL)
1	TiO_2	TiO_2	5	0
2	TiO_2 + 1% TMSPM	TiO_2 T1	5	0.05
3	TiO_2 + 3% TMSPM	TiO_2 T3	5	0.15
4	TiO_2 + 5% TMSPM	TiO_2 T5	5	0.25
5	TiO_2 + 7% TMSPM	TiO_2 T7	5	0.35
6	TiO_2 + 20% TMSPM	TiO_2 T20	5	1.00

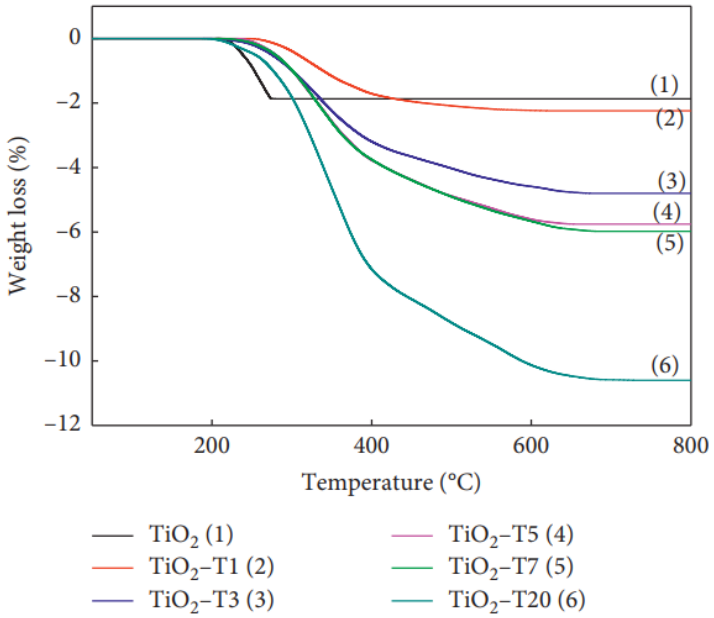
จากการทดสอบ Infrared (IR) Spectroscopy แสดงดังรูปที่ 2.52 พื้นผิวของ TiO_2 ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว จะปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชั่น C=C และ C=O ขึ้น และเมื่อปริมาณของสารเชื่อมประสานไซเลน เพิ่มมากขึ้น ความเข้มของพีคที่ปรากฏจะมีความเข้มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าวิธีการปรับปรุงพื้นผิวนี้สามารถทำให้หมู่ silanol เกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของ TiO_2 ได้



รูปที่ 2.52 IR spectra ของ nano-TiO_2 และ nano-TiO_2 modified ที่ปริมาณ TMSPM แตกต่างกัน [18]

ตารางที่ 2.15 พารามิเตอร์ทางความร้อนของ nano-TiO_2 และ nano-TiO_2 modified [18]

Sample	Weight loss (%)	Maximum degradation temperature (°C)
TiO_2	1.87	277.82
TiO_2-T1	2.24	325.65
TiO_2-T3	4.80	332.72
TiO_2-T5	5.75	329.09
TiO_2-T7	5.98	331.18
TiO_2-T20	10.58	344.65



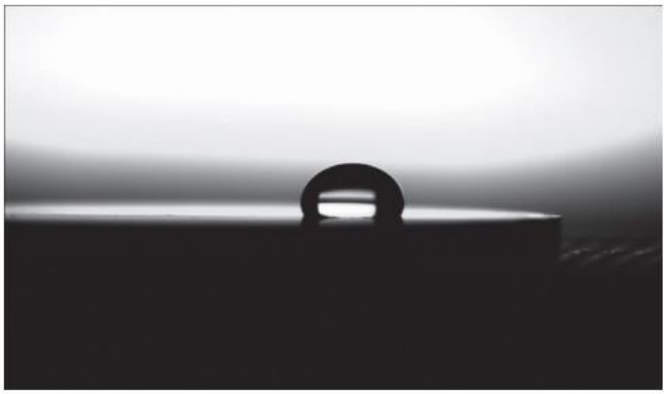
รูปที่ 2.53 TGA diagrams ของ nano-TiO_2 ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยปริมาณ TMSPM ที่แตกต่างกัน [18]

จากการทดสอบ TGA แสดงดังรูปที่ 2.53 และตารางที่ 2.15 เมื่อปริมาณของไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวเพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่ลดลงจะมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสามารถช่วยในการยืนยันการเกิดอันตรกิริยาของหมู่ไซลานอล กับพื้นผิวของ TiO_2 ดังผลการทดสอบ Infrared (IR) Spectroscopy ข้างต้น

ตารางที่ 2.16 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ TMSPM บนผิวของ nano-TiO_2 [18]

Sample	Percentage of initial silane (%)	Weight loss obtained from TGA (%)	Percentage of grafted silane (%)	Grafting efficiency (%)
TiO_2	0	1.87	0	0
TiO_2-T1	1	2.24	0.37	37.0
TiO_2-T3	3	4.80	2.93	97.7
TiO_2-T5	5	5.75	3.88	77.6
TiO_2-T7	7	5.98	4.11	58.7
TiO_2-T20	20	10.58	8.71	43.6

จากผลการทดสอบ TGA สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพการปรังปรุงผิวของ TMSPM บนพื้นผิวของ nano-TiO_2 แสดงดังตารางที่ 2.16 การปรับปรุงผิวของ nano-TiO_2 ที่ใช้ปริมาณ TMSPM 3% จะมีค่าประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวสูงสุด เนื่องจากเกิดโครงสร้างแบบเชื่อมโยงของไซเลนบนพื้นผิวของ nano-TiO_2 แบบชั้นการยึดเกาะตำแหน่งเดียว และเมื่อปริมาณ TMSPM เพิ่มมากขึ้น ไซเลนจะเกิดการยึดเกาะแบบ 2 ตำแหน่ง และ 3 ตำแหน่ง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวลดลง



รูปที่ 2.54 หยดน้ำบนพื้นผิวของ TiO_2-T3 [18]

จากการทดสอบค่ามุมสัมผัส ของ nano-TiO_2 แสดงดังรูปที่ 2.54 ก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิว ก่อนการปรับปรุงพื้นผิว nano-TiO_2 เกิดการดูดซับน้ำอย่างรวดเร็ว เมื่อทำการทดสอบพื้นผิวที่ผ่านการปรับปรุงของตัวอย่าง TiO_2-T3 พบว่าไม่เกิดการดูดซับและวัดค่ามุมสัมผัสได้ 111.76° แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวส่งผลให้สมบัติความไม่ชอบน้ำของ nano-TiO_2 เพิ่มมากขึ้น

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 Polylactic acid (PLA)

ชื่อทางการค้า : Ingeo™ Biopolymer

ผู้ผลิต : NatureWork® LLC

เกรด : 4043D

Density : 1.24 g/cm^3

MFI : 6 g/10 min (ณ อุณหภูมิ 190°C load cell 2.16 kg)

Melting point : 145-160°C

3.1.2 Polybutylene adipate-co-terephalate (PBAT)

ชื่อทางการค้า : Ecoflex Mulch C1200

ผู้ผลิต : Unic Technology CORP.

เกรด : C1200

Density : 1.25 - 1.27 g/cm^3

MFI : 2.7 – 4.9 g/10 min (ณ อุณหภูมิ 190°C load cell 2.16 kg)

Melting point : 110-120°C

3.1.3 γ-(triethoxysily)propyl methacrylate (TESPMA)

ผู้ผลิต : Tokyo Chemical Industry

Density : 1.25 - 1.27 g/cm^3

Purity : >98.0%

3.1.4 Aluminium oxide anhydrous (y-aluminia) (Al_2O_3)

ผู้ผลิต : Kemaus

เกรด : KA18

Density : 3.93 g/cm^3

Purity : >72.0%

Particle size : >0.063 mm

M.W. : 101.96 g/mol

ลักษณะ : ผงผลึกสีขาว

3.1.5 Zinc oxide (ZnO)

ผู้ผลิต : Kemaus

เกรด : KA582

Density : 5.6 g/cm^3

M.W. : 81.39

ลักษณะ : ผงสีขาวถึงเหลือง

3.1.6 Titanium dioxide (TiO_2)

ผู้ผลิต : Kemaus

เกรด : KA547

Density : 4.23 g/cm^3

M.W. : 79.90 g/mol

ลักษณะ : ผงสีขาว

3.1.7 Ammonia solution 25% (NH_4OH)

ผู้ผลิต : Qrec

เกรด : Grade AR

M.Wt : 35.04 g/mol

3.1.8 Ethanol

3.1.9 Distilled water

3.1.10 Glycerol

3.1.11 Potassium bromide (KBr)

3.1.12 Silica gel

มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 บีกเกอร์ (Beaker)

3.2.2 กระบอกตวง (Cylinder glass)

3.2.3 แม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)

3.2.4 ปิเปต (Pipette)

3.2.5 ฟิล์มห่ออาหาร

3.2.6 อะลูมิเนียมฟอยล์

3.2.7 เครื่องกวน (Stirrer/Hot plate stirrer)

3.2.8 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)

3.2.9 เครื่องชั่งแบบละเอียด

3.2.10 ช้อนตักสาร (Stainless steel spatula)

3.2.11 อ่างให้ความร้อน (Water bath)

3.2.12 หลอดกระดาษกรองสำหรับการสกัด (Extraction Thimble)

3.2.13 Aluminum Pan

3.2.14 Crucible Pan

3.2.15 Soxhlet

3.2.16 Condenser

3.2.17 เครื่องทำความเย็น (Cooling pump)

3.2.18 หลอดปั่นเหวี่ยง (Centrifuge tube)

3.2.19 ขวดก้นกลม (Round bottom)

3.2.20 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)

3.2.21 แผ่นเทปล่อน (Teflon sheet)

3.2.22 ถาดสแตนเลส (Stainless tray)

3.2.23 ตู้อบ (Oven)

3.2.24 ชุดบดอัด KBr

3.2.25 เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier caliper)

3.2.26 ถุงซิปล็อค

3.2.27 แปรงทองเหลือง

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.3.1 เครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) รุ่น SHJ-25 ผลิตโดยบริษัท เอ็นแมช จำกัด ประเทศไทย นำเข้าชิ้นส่วนอะไหล่จากประเทศจีน

3.3.2 เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding machine) รุ่น PS40E5ASE ผลิตโดยบริษัท Nissei Plastic Industrial Co., LTD. ประเทศญี่ปุ่น

3.3.3 เครื่อง Thermogravimetric Analysis (TGA) รุ่น TGA/DSC 1 Auto sample Robot ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.3.4 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) รุ่น DSC 1 Auto sample Robot ผลิตโดยบริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.3.5 เครื่อง Fourier-transform infrared spectrophotometer (FTIR) รุ่น VERTEX70 ผลิตโดยบริษัท Bruker ประเทศเยอรมัน

3.3.6 เครื่องวัดดัชนีการไหล (Melt flow indexer) รุ่น Gottfert ผลิตโดยบริษัท Werkstoff-Prüfmaschinen จำกัด ประเทศเยอรมัน

3.3.7 เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal testing machine) รุ่น 5969 ผลิตโดยบริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.8 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกระแทกของพลาสติกแบบค้อนเหวี่ยง (Izod/Charpy Pendulum Impact tester) รุ่น 9050 ผลิตโดยบริษัท Instron Engineering Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, FE-SEM/EDS) ยี่ห้อ TESCAN รุ่น Mira3 ผลิตโดยบริษัท Ceitec nano research infrastructure ประเทศ Czech Republie

3.3.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น Tabletop Microscope TM3030 ผลิตโดยบริษัท Hitachi-High-Technologies Corporation ประเทศญี่ปุ่น

3.3.11 เครื่องวัดความแข็ง (Durometer stand) รุ่น 473 ผลิตโดยบริษัท Pacific Transducer Corpoation ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.12 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบ USB รุ่น Digimicro profi ผลิตโดยบริษัท DNT Technologies ประเทศเยอรมนี

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งวิธีการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.4.1 การเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PLA/PBAT)

3.4.1.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PLA/PBAT)

- อบเม็ดพอลิเมอร์ PLA และ PBAT ณ อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดพอลิเมอร์ทั้ง 2 ผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ที่อัตราส่วนระหว่าง PLA/PBAT ที่ 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 โดยใช้อุณหภูมิการผสมดังนี้ 150/160/170/170/170/170/170/170°C ด้วยความเร็วรอบสกรู 60 rpm อัตราส่วนระหว่าง PLA/PBAT แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนระหว่าง PLA/PBAT ที่ทำการผสม

Sample	PLA content (%wt)	PBAT content (%wt)
PLA	100	-
PLA/PBAT 90:10	90	10
PLA/PBAT 80:20	80	20
PLA/PBAT 70:30	70	30
PLA/PBAT 60:40	60	40
PLA/PBAT 50:50	50	50
PLA/PBAT 40:60	40	60
PLA/PBAT 30:70	30	70
PLA/PBAT 20:80	20	80
PLA/PBAT 10:90	10	90
PBAT	-	100

- นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทไปทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง injection molding ตามมาตรฐาน ASTM ณ อุณหภูมิ Feed zone 145°C, Metering zone 145-148°C, Nozzle 185°C และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 26°C ความดัน ณ ตำแหน่ง Nozzle 120 bar, cooling time เป็นเวลา 35 วินาที ความเร็วรอบสกรู 120 rpm

3.4.1.2 การศึกษาเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PLA/PBAT)

- การศึกษาสมบัติทางความร้อน

- การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ -50°C ถึง 200°C อัตราการให้ความร้อน 3°C/min โหมด Heat-Cool-Heat เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมและปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมตามสมการที่ 3.1

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

(สมการที่ 3.1)

เมื่อ X_c เป็น percentage of crystallinity (%)

ΔH_m เป็น enthalpy of fusion (J/g)

ΔH_{cc} เป็น enthalpy of cold crystallization (J/g)

W_{PLA} เป็น weight fraction ของ PLA

ΔH_m^0 เป็น heat of fusion ของ completely crystalline PLA มีค่า 93.6 J/g

- การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 800°C อัตราการให้ความร้อน 10°C/min เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์

- การศึกษาสมบัติเชิงกล

- การศึกษาความต้านทานต่อแรงดึง ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM-D638 type I ใช้ load cell ขนาด 50 kN crosshead speed 50 mm/min

- การศึกษาความต้านทานต่อแรงกระแทก ด้วยเครื่อง Impact testing machine ตามมาตรฐาน ASTM-D256 ใช้ Izod pendulum ขนาด 2.75 J

- การศึกษาการดัดงอแบบ 3 จุด (3 point bending testing) ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM-D790 ใช้ load cell ขนาด 50 kN span length 56 mm และ speed 1.49 mm/min

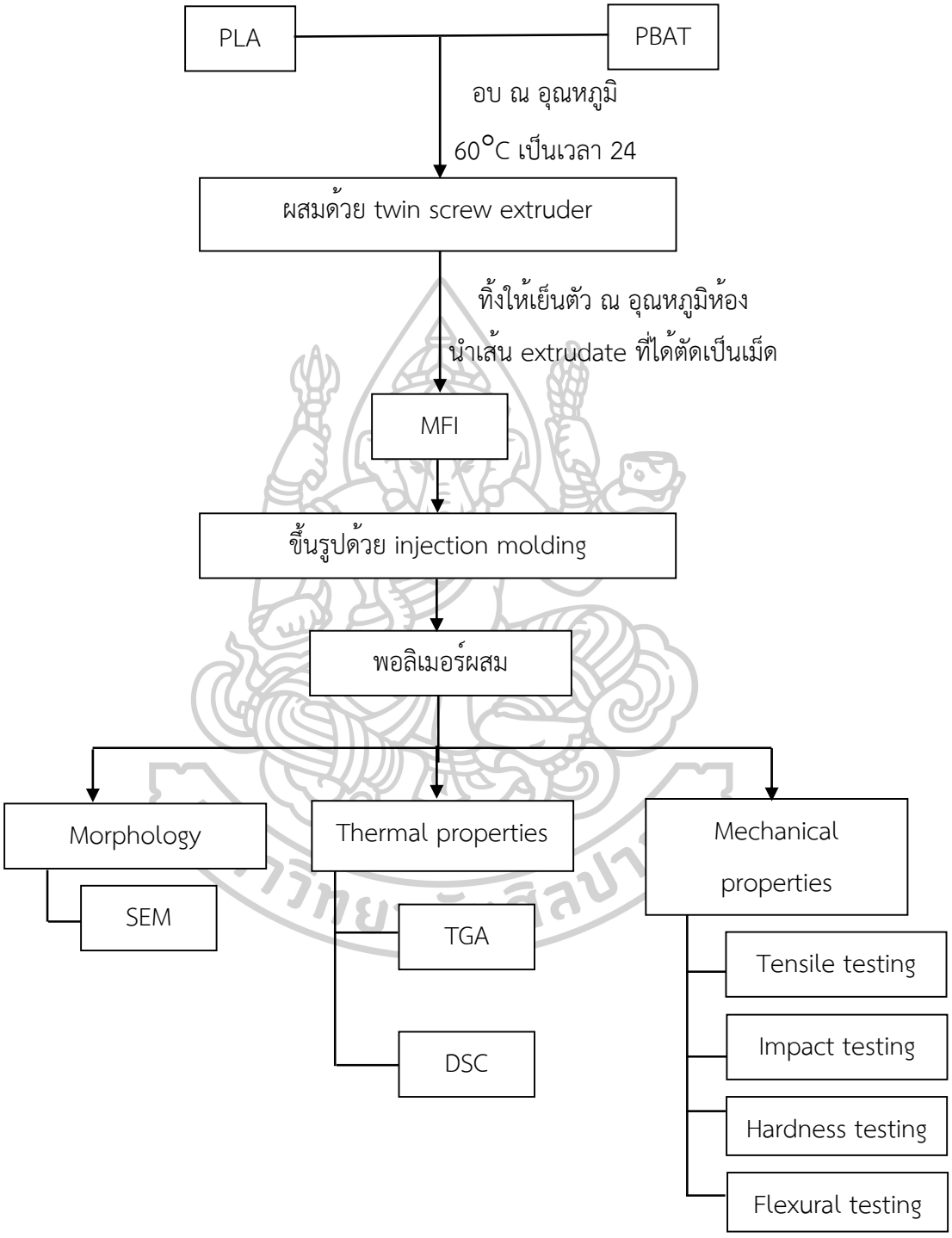
- การศึกษาความแข็งที่ผิว Shore hardness test ตามมาตรฐาน ASTM-D2240 ด้วยเครื่อง Durometer หัวกดชนิด Shore D ใช้ load cell 1 kg

- การศึกษาดัชนีการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer (MFI) ตามมาตรฐาน ASTM-D1238 ใช้ load cell ขนาด 2.16 kg และอุณหภูมิในการทดสอบ 190°C

- การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวและความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม ช่วงกำลังขยาย 1,000-4,000x พลังงาน 15 kV

มหาวิทยาลัยศิลปากร

แผนผังที่ 1 แสดงขั้นตอนการเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PLA/PBAT)



3.4.2 การเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO)

3.4.2.1 การปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์

- นำ γ-(triethoxysily)propyl methacrylate (TESPMA) ปริมาณ 1%, 5% และ 10%wt ใส่ในสารละลายผสมของเอทานอล 150 ml และ น้ำกลั่น 50 ml เพื่อทำการไฮโดรไลซิส ใส่แอมโมเนีย 2 ml กวนเป็นเวลา 60 นาที ณ อุณหภูมิ 50°C จากนั้นใส่โลหะออกไซด์แต่ละชนิด ได้แก่ Al_2O_3, ZnO และ TiO_2 ปริมาณ 10 g กวนผสมต่อเป็นเวลา 150 นาที อุณหภูมิ 50°C จากนั้นนำโลหะออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวมา soxhlet เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในสารละลายน้ำ/เอทานอล (1:1 v/v) อุณหภูมิ 150°C เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาควบแน่น นำสารที่ได้ไปปั่นเหวี่ยง (centrifuging) ด้วยความเร็ว 6000 rpm จากนั้นล้างด้วยเอทานอลเพื่อกำจัดไซเลนที่ไม่เกิดปฏิกิริยา และทำการอบในตู้อบ ณ อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง อัตราส่วนปริมาณไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนและตัวย่อของโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิว

Composition	Abbreviation	Al_2O_3 content (g)	ZnO content (g)	TiO_2 content (g)	TESPMA content (ml)
Al_2O_3 + 1% TESPMA	1m-Al_2O_3	10	-	-	0.1
Al_2O_3 + 5% TESPMA	5m-Al_2O_3	10	-	-	0.5
Al_2O_3 + 10% TESPMA	10m-Al_2O_3	10	-	-	1.0
ZnO + 1% TESPMA	1m-ZnO	-	10	-	0.1
ZnO + 5% TESPMA	5m-ZnO	-	10	-	0.5
ZnO + 10% TESPMA	10m-ZnO	-	10	-	1.0
TiO_2 + 1% TESPMA	1m-TiO_2	-	-	10	0.1
TiO_2 + 5% TESPMA	5m-TiO_2	-	-	10	0.5
TiO_2 + 10% TESPMA	10m-TiO_2	-	-	10	1.0

3.4.2.2 การศึกษาเอกลักษณ์ของโลหะออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงผิว

- การศึกษาหมู่ฟังก์ชั่นของโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis โดยทดสอบช่วง wavenumber 4000-400 cm^{-1} โหมด Transmittance ในการทดสอบอบสารตัวอย่างและ Potassium bromide (KBr) ณ อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดความชื้น จากนั้นนำสารตัวอย่างบดผสมรวมกับ KBr ในอัตราส่วน metal oxide : KBr 1:9 เพื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชั่นที่เกิดขึ้น

- การศึกษาสมบัติทางความร้อน

- การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 800°C อัตราการให้ความร้อน 10°C/min เพื่อศึกษาการปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์ และคำนวณประสิทธิภาพในการปรับปรุงผิวดังสมการที่ 3.2

$$\text{Grafting efficiency (\%)} = \frac{\text{Weight loss obtained of sample - Weight loss obtained of metal oxide}}{\text{Percentage of initial silane in that sample}}$$

(สมการที่ 3.2)

- การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) เพื่อวิเคราะห์การปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์ ช่วงกำลังขยาย 1,000-20,000x พลังงาน 5 kV และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยโหมด EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) พลังงาน 15 kV

- การทดสอบค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ทดสอบโดย glass slide method นำตัวอย่างไปอบ ณ อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแปะเทปกาว 2 หน้า ลงบนกระจกสไลด์ เทผงตัวอย่างลงบนแผ่นสไลด์ที่แปะเทปกาว ใช้ลูกยางเป่าผงตัวอย่างที่ไม่ติดเทปกาวออก จากนั้นหยดน้ำกลั่นด้วยไมโครปิเปต 10 μL ลงบนตัวอย่าง ทิ้งไว้ 60 วินาที บันทึกภาพตัวอย่างที่ทดสอบ ทำซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้งและนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.4.2.3 การเตรียมวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO)

- อบเม็ดพอลิเมอร์ PLA, PBAT และโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิว 5m-Al_2O_3, 5m-ZnO และ 5m-TiO_2 ณ อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดพอลิเมอร์ทั้ง 2 ผสมกันด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ ที่อัตราส่วนระหว่าง PLA/PBAT 80:20 และโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5%wt ในงานวิจัยนี้ใช้โลหะออกไซด์ผสมในปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt รวมทั้งหมด 9 สูตร โดยใช้อุณหภูมิการผสม ดังนี้ 150/160/170/170/170/170/170/170°C ด้วยความเร็วรอบสกรู 60 rpm อัตราส่วนของ PLA/PBAT 80:20+5m-MO แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของ PLA/PBAT 80:20+5m-MO

Sample	PLA content (%wt)	PBAT content (%wt)	5m-Al_2O_3 content (%wt)	5m-ZnO content (%wt)	5m-TiO_2 content (%wt)
PLA/PBAT 80:20 + 1% 5m-Al_2O_3	79.2	19.8	1.0	-	-
PLA/PBAT 80:20 + 5% 5m-Al_2O_3	76.0	19.0	5.0	-	-
PLA/PBAT 80:20 + 10% 5m-Al_2O_3	72.0	18.0	10.0	-	-
PLA/PBAT 80:20 + 1% 5m-ZnO	79.2	19.8	-	1.0	-
PLA/PBAT 80:20 + 5% 5m-ZnO	76.0	19.0	-	5.0	-
PLA/PBAT 80:20 + 10% 5m-ZnO	72.0	18.0	-	10.0	-
PLA/PBAT 80:20 + 1% 5m-TiO_2	79.2	19.8	-	-	1.0
PLA/PBAT 80:20 + 5% 5m-TiO_2	76.0	19.0	-	-	5.0
PLA/PBAT 80:20 + 10% 5m-TiO_2	72.0	18.0	-	-	10.0

- นำเม็ด PLA/PBAT 80:20+5m-MO ไปทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง injection molding ตามมาตรฐาน ASTM ณ อุณหภูมิ Feed zone 145°C, Metering zone 145-148°C, Nozzle 185°C และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 26°C ความดัน ณ ตำแหน่ง Nozzle 120 bar, cooling time เป็นเวลา 35 วินาที ความเร็วรอบสกรู 120 rpm

3.4.2.4 การศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO)

- การศึกษาสมบัติทางความร้อน

- การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ -50°C ถึง 200°C อัตราการให้ความร้อน 3°C/min โหมด Heat-Cool-Heat เพื่อศึกษาปริมาณผลึกของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) ตามสมการที่ 3.1

- การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 800°C อัตราการให้ความร้อน 10°C/min เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิว

- การศึกษาสมบัติเชิงกล

- การศึกษาความต้านทานต่อแรงดึง ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM-D638 type I ใช้ load cell ขนาด 50 kN crosshead speed 50 mm/min

- การศึกษาความต้านทานต่อแรงกระแทก ด้วยเครื่อง Impact testing machine ตามมาตรฐาน ASTM-D256 ใช้ Izod pendulum ขนาด 2.75 J

- การศึกษาการดัดงอแบบ 3 จุด (3 point bending testing) ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM-D790 ใช้ load cell ขนาด 50 kN span length 56 mm และ speed 1.49 mm/min

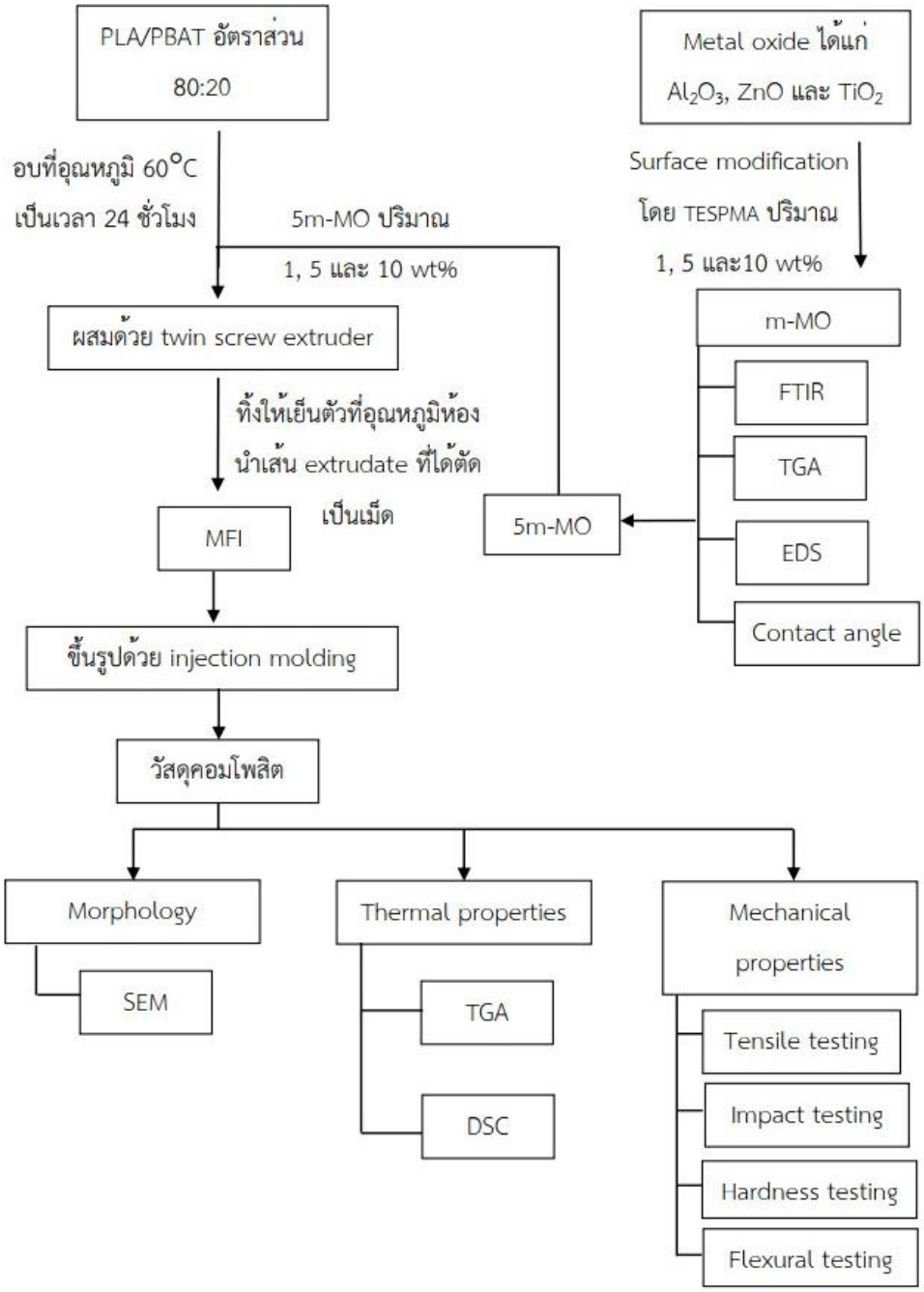
- การศึกษาความแข็งที่ผิว Shore hardness test ตามมาตรฐาน ASTM-D2240 ด้วยเครื่อง Durometer หัวกดชนิด Shore D ใช้ load cell 1kg

- การศึกษาดัชนีการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer (MFI) ตามมาตรฐาน ASTM-D1238 ใช้ load cell ขนาด 2.16 kg และอุณหภูมิในการทดสอบ 190°C

- การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวและความเข้ากันได้ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) ช่วงกำลังขยาย 100-20,000x พลังงาน 15 kV

มหาวิทยาลัยศิลปากร

แผนผังที่ 2 แสดงขั้นตอนการเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO)



บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตจากพอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ที่ผสมโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide: Al_2O_3), ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน คือ γ-(triethoxysilyl) propyl methacrylate (TESPMA) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ ก่อนนำไปผสมกับ PLA/PBAT เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดจากพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ผสมโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิว ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างการเติมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และศึกษาอิทธิพลของชนิดและอัตราส่วนการเติมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิต โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 การเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PLA/PBAT) และตอนที่ 2 การเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO)

4.1 การศึกษาเอกลักษณ์ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PLA/PBAT)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอัตราส่วนการผสมของ PLA และ PBAT ที่เหมาะสม โดยผสมพอลิเมอร์ทั้ง 2 ที่อัตราส่วนของ PLA/PBAT 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ และนำไปขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ และทำการศึกษาเอกลักษณ์ ได้แก่ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยา ของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PLA/PBAT)

4.1.1 การศึกษาเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 800°C อัตราการให้ความร้อน 10°C/min เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1(a), รูปที่ 4.1(b) และตารางที่ 4.1

จากผลการทดสอบ Thermogravimetric analysis ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT แสดงดังรูปที่ 4.1(a), รูปที่ 4.1(b) และตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA จากการทดสอบพบ ณ อุณหภูมิ 348-378°C เกิดจากการสลายตัวของพันธะเอสเตอร์ในโครงสร้างโมเลกุลแตกตัวเมื่อได้รับความร้อน เกิดการแตกออกของพันธะเอสเตอร์ และทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นของหมู่เอสเตอร์ระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง จากงานวิจัยของ Phasawat C. และคณะ [14] และงานวิจัยของ Antonio Abad C. และคณะ [21] ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของ PLA การสลายตัวทางความร้อนของ PLA นั้นเกิดจากการแตกออกของสายโซ่โมเลกุล (chain scission) ซึ่งเป็นกลไกทำให้ PLA เกิดการสลายตัวและเกิดการเสื่อมสภาพ และจากงานวิจัยของ Hantao Z. และคณะ [71] ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของ PLA ด้วยเทคนิค TGA-FTIR เพื่อศึกษาผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวทางความร้อนของ PLA พบผลิตภัณฑ์ที่ระเหยออกมาระหว่างการสลายตัวทางความร้อนของ PLA นั้น ได้แก่ โอลิโกเมอร์วงแหวน, แลกไทด์, อะซีตัลดีไฮด์, คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ และอธิบายกลไกการสลายตัวทางความร้อนของ PLA เริ่มจากหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งปลายสายโซ่เกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนหมู่เอสเตอร์ (ester interchange) และการแตกพันธะของสายโซ่โมเลกุลแบบโฮโมไลซิส (chain homolysis) เมื่อสิ้นสุดการทดสอบพบว่า อะซีตัลดีไฮด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ หลงเหลืออยู่ในตัวอย่างทดสอบ ในขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์ เกิดการสลายตัวหมดเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจากงานวิจัยของ Fatima Zohra Y. และคณะ [71] อธิบายการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นสายโซ่โมเลกุลของ PLA เมื่อเกิดการแตกออก มีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่เป็นโอลิโกเมอร์วงแหวนของกรดแลกติก และแลกไทด์

และอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT พบ ณ อุณหภูมิ 387-424°C เกิดจากการสลายตัวของพันธะเอสเตอร์ภายใต้การให้ความร้อน จากงานวิจัยของ Marica B. และคณะ [10] ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของ PLA/PBAT เพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์ พบอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT บริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิ 370-414°C ซึ่งสูงกว่า PLA บริสุทธิ์ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของ PBAT ซึ่งมีวงแหวนเบนซีน และจากงานวิจัยของ Phasawat C. และคณะ [14] และงานวิจัยของ Hongmei C. และคณะ [15] ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พบว่าเมื่อให้ความร้อน PBAT เกิดการสลายตัวเนื่องจากการแตกออกของพันธะเอสเตอร์หรือ C-C ในสายโซ่, พันธะเอสเตอร์ในโครงสร้างเกิดทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลที่ปลายสายโซ่

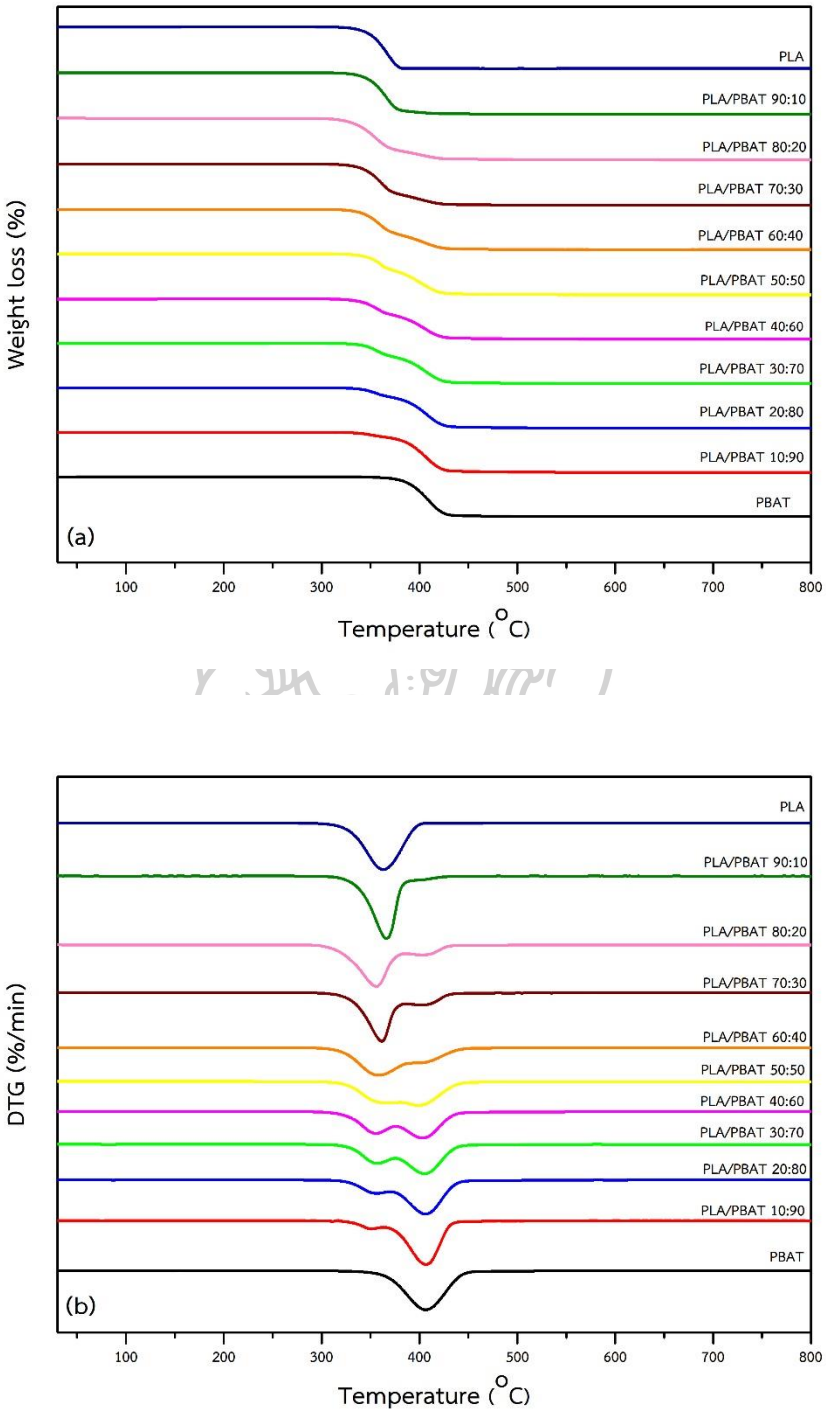
ในส่วนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในทุกอัตราส่วนแสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว 2 ขั้น ขั้นที่ 1 ณ อุณหภูมิ 331-379°C สอดคล้องกับอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA และขั้นที่ 2 ณ อุณหภูมิ 387-423°C สอดคล้องกับอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT ดังงานวิจัยของ Wenwen C. และคณะ [17] และงานวิจัยของ Phasawat C. และคณะ [14] ศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT พบอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA บริสุทธิ์เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิ 350-393.6°C และอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT ณ อุณหภูมิ 397-441.2°C โดยพอลิเมอร์ทั้ง 2 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวเพียงขั้นเดียว สำหรับตัวอย่างพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จากกราฟ TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัว 2 ขั้น เป็นผลมาจากการสลายตัวของ PLA และ PBAT และจากงานวิจัยของ Marica B. และคณะ [10] อธิบายการสลายตัว 2 ขั้น ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT แสดงให้เห็นถึงความไม่เข้ากันทางโมเลกุล (immiscible) ของ PLA และ PBAT

และสังเกตได้ว่าอุณหภูมิการสลายตัวขั้นที่ 1 ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ในทุกอัตราส่วน ซึ่งสอดคล้องกับการสลายตัวของ PLA มีค่าลดลง ต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA บริสุทธิ์ ในขณะที่อุณหภูมิการสลายตัวขั้นที่ 2 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงและมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT บริสุทธิ์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อผสม PBAT ในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของ PLA ลดลง เนื่องมาจากการผสม PBAT ลงใน PLA นั้น PBAT จะแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ PLA ทำให้อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของ PLA ลดลง จากงานวิจัยของ Phasawat C. และคณะ [14] งานวิจัยของ Sheng X. และคณะ [62] และงานวิจัยของ Onur Ç. และคณะ [20] ศึกษาวัสดุคอมโพสิต PLA/PBAT พบการผสม PBAT ในปริมาณมากขึ้นลงในพอลิเมอร์ผสมจะส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของ PLA ลดลง เนื่องจาก PBAT มีโครงสร้างประกอบด้วยอะลิฟาติก และวง

แหวนอะโรมาติก ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม เมื่อแทรกตัวระหว่างสายโซ่ PLA จะขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ PLA และทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของ PLA ลดลง เนื่องจากระยะห่างระหว่างสายโซ่เพิ่มขึ้น และสารตกค้าง (%) ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น ดังงานวิจัยของ Marica B. และคณะ [10] พบว่า PLA บริสุทธิ์เกิดการสลายตัวหมด ในขณะที่ PBAT มีสารตกค้าง (%) อยู่ที่ 4.2% เนื่องมาจากการเกิดกระบวนการคาร์บอนไนซ์ของวงแหวนเบนซีน

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิการสลายตัวของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT

Sample	PLA (°C)			PBAT (°C)			Residue (%)
	T_d	T_{onset}	T_{endset}	T_d	T_{onset}	T_{endset}	
PLA	367.5	348.5	377.6	-	-	-	3.4
PLA/PBAT 90:10	366.7	348.0	378.1	394.8	394.6	412.4	4.5
PLA/PBAT 80:20	355.7	331.9	367.4	403.8	394.4	419.7	4.8
PLA/PBAT 70:30	361.7	342.97	370.2	404.8	392.7	420.6	5.5
PLA/PBAT 60:40	359.0	341.6	366.5	403.2	397.4	421.3	7.5
PLA/PBAT 50:50	360.2	348.7	361.2	402.3	391.1	419.2	6.2
PLA/PBAT 40:60	359.2	341.6	361.0	403.5	391.6	420.5	7.6
PLA/PBAT 30:70	357.2	342.5	363.2	405.7	391.4	422.2	8.5
PLA/PBAT 20:80	355.3	340.8	361.5	406.7	390.6	422.9	8.2
PLA/PBAT 10:90	351.0	336.2	355.9	406.3	388.4	421.5	9.2
PBAT	-	-	-	408.3	387.2	423.9	8.6



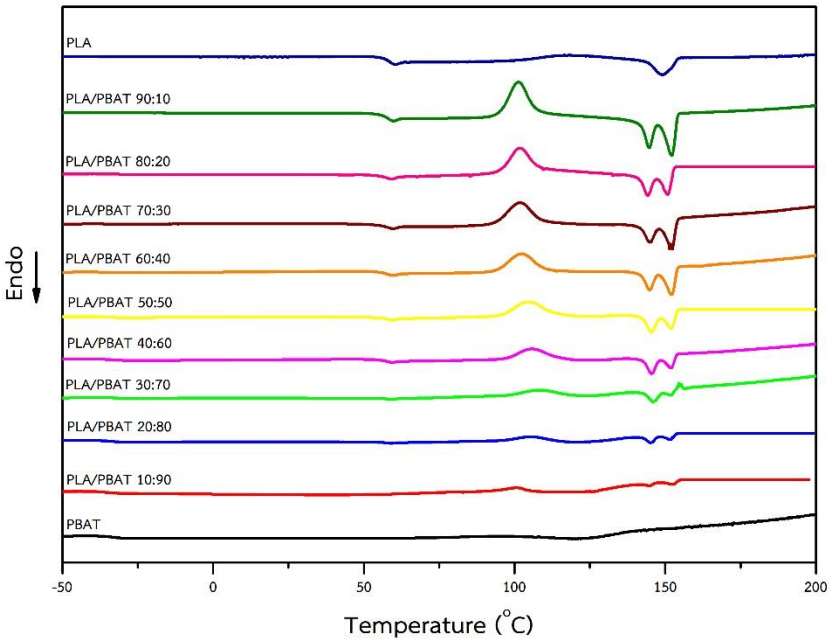
รูปที่ 4.1 กราฟ TGA (a) และกราฟ DTG (b) ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT

4.1.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหาปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ -50°C ถึง 200°C อัตราการให้ความร้อน 3°C/min โหมด Heat-Cool-Heat เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมและปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT แสดงดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางความร้อนของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT

Sample	T_g (°C) PLA	T_g (°C) PBAT	T_m (°C) PLA		T_m (°C) PBAT	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	ΔH_m (J/g)	X_c of PLA (%)
			1	2					
PLA	60.5	-	149.1	-	-	116.5	5.5	10.0	4.9
PLA/PBAT 90:10	59.8	-	144.7	152.2	-	101.3	22.4	24.3	2.3
PLA/PBAT 80:20	59.8	-	144.8	151.6	-	102.4	17.9	20.2	3.1
PLA/PBAT 70:30	59.8	-	144.9	152.4	-	101.8	16.4	16.9	0.8
PLA/PBAT 60:40	59.7	-	144.8	152.2	-	102.4	14.6	15.7	2.1
PLA/PBAT 50:50	59.5	-35.9	145.4	152.1	-	104.8	12.6	12.9	0.7
PLA/PBAT 40:60	59.4	-35.3	145.5	152.0	-	105.8	9.6	9.7	0.4
PLA/PBAT 30:70	59.3	-36.5	146.1	152.2	-	108.8	5.3	5.7	1.5
PLA/PBAT 20:80	59.2	-36.2	145.3	152.0	-	105.5	3.3	3.6	1.3
PLA/PBAT 10:90	58.9	-34.2	145.7	153.5	126.2	101.7	1.6	1.7	1.0
PBAT	-	-33.3	-	-	122.2	-	-	8.5	-



รูปที่ 4.2 DSC thermograms ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT

จากการทดสอบ Differential scanning calorimetry ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 ค่า T_g ของ PLA ปรากฏพีค ณ อุณหภูมิ 60°C และค่า T_{cc} ณ อุณหภูมิ 116.5°C ในขณะที่ค่า T_m ปรากฏพีค ณ อุณหภูมิประมาณ 149°C สอดคล้องกับงานวิจัยของ Onur Ç. และคณะ [20] พบว่า ณ อุณหภูมิ T_g ผลการทดสอบจะปรากฏพีคดูดความร้อน (endothermic peak) แสดงถึงการคลายตัวของโมเลกุล PLA เมื่อได้รับความร้อนและ ณ อุณหภูมิ T_{cc} พบพีคคายความร้อน (exothermic peak) ซึ่งเป็นการเกิดผลึกขณะให้ความร้อนของ PLA เนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานเกิดความเป็นระเบียบมากขึ้นนำไปสู่การเกิดผลึก และพบพีคดูดความร้อน ณ อุณหภูมิ T_m เนื่องมาจากการหลอมเหลวของผลึก และสำหรับ PBAT ค่า T_g และ T_m ปรากฏพีคประมาณ -33°C และ 122°C ตามลำดับ ดังงานวิจัยของ Hsien-Tang C. และคณะ [19] พบค่า T_g และ T_m ของ PBAT ปรากฏพีคประมาณ -33°C และ 112°C ใกล้เคียงกับผลการทดสอบเช่นกัน

เมื่อทำการผสมพอลิเมอร์ทั้ง 2 ค่า T_g ของ PLA ในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ณ อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 58-60°C ในขณะที่ค่า T_g ของ PBAT ในตัวอย่างที่อัตราส่วน

PLA/PBAT 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 จากการทดสอบไม่พบค่าปรากฏ สำหรับตัวอย่างที่อัตราส่วน PLA/PBAT 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 จะปรากฏ ณ อุณหภูมิประมาณ -35.86°C, -35.29°C, -36.5°C, -36.15°C และ -34.21°C ตามลำดับ สังเกตได้ว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเช่นเดียวกับค่า T_g ของ PLA สอดคล้องกับงานวิจัยของ Liliane Cardoso A. และคณะ [8] พบว่าค่า T_g ของพอลิเมอร์ผสมจะแสดงค่า T_g 2 ค่า ซึ่งสัมพันธ์กับเฟสของ PLA และ PBAT และทั้งสองค่าแยกจากกันอย่างชัดเจนแสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ไม่ดีของพอลิเมอร์ผสม และจากงานวิจัยของ Wangwang Y. และคณะ [66] พบว่าการเติม PBAT ส่งผลต่ออุณหภูมิ T_g ของ PLA น้อยมากเป็นผลมาจากความเข้ากันได้ระหว่างเฟสที่ไม่ดี ส่งผลให้ PBAT มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุล PLA เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อพิจารณาค่า T_m ของพอลิเมอร์ผสมจะปรากฏค่า T_m ของ PLA 2 ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยกำหนดค่า T_m ค่าที่ 1 เป็น T_{m1} และค่า T_m ค่าที่ 2 เป็น T_{m2} สำหรับค่า T_{m1} ในพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าประมาณ 144-146°C และค่า T_{m2} มีค่าประมาณ 151-154°C แสดงถึงการเกิดโครงสร้างผลึก 2 รูปแบบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Onur Ç. และคณะ [20] ที่พบ T_m มีลักษณะเป็นพีคคู่ โดยพีคแรกปรากฏ ณ อุณหภูมิ 145.5°C และ พีคสอง ปรากฏ ณ อุณหภูมิ 152.5°C บ่งชี้ว่า PLA เกิดโครงสร้างผลึก 2 รูปแบบ พบพีคคู่ลักษณะนี้ได้ทั่วไปในพอลิเอสเตอร์ เกิดจากกลไกการหลอมเหลวผลึก/การเกิดผลึกใหม่/การหลอมเหลวผลึกอีกครั้ง ผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะหลอมเหลว ณ อุณหภูมิต่ำกว่า ดังงานวิจัยของ Ping M. และคณะ [43] อธิบายพีคดูดความร้อนลักษณะเป็นคู่แบบนี้ว่า เกิดจากการแยกตัวออกของเฟส หรือ กระบวนการหลอมเหลวและตกผลึกใหม่ สำหรับพอลิเมอร์ที่เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก หรือพอลิเมอร์ผสม โดยพีค ณ อุณหภูมิต่ำจะสัมพันธ์กับผลึกที่ไม่เสถียรหรือมีความสมบูรณ์ต่ำ ขณะที่พีค ณ อุณหภูมิสูงจะสัมพันธ์กับผลึกที่เสถียรและสมบูรณ์ และงานวิจัยของ Long J. และคณะ [30] พบว่าโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เกิดจากการเหนี่ยวนำของ PBAT ซึ่งโครงสร้างใหม่นี้เป็นฟอร์มเดียวกับผลึก ณ อุณหภูมิสูงกว่า แต่มีความหนาของชั้นผลึกลาเมลลาต่ำกว่า ซึ่งลักษณะนี้เกิดขึ้นเมื่อมีอัตราการให้ความร้อนที่ช้า โดยผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีเวลาหลอมเหลวและจัดเรียงตัวใหม่ให้มีโครงสร้างที่สมบูรณ์มากขึ้น ก่อนหลอมเหลวอีกครั้ง ณ อุณหภูมิสูงกว่าเดิม ส่วนค่า T_m ของ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมจากการทดสอบจะปรากฏเพียงอัตราส่วนเดียวคือ PLA/PBAT 10:90 แสดงค่าที่ 126°C และการเติม PBAT ไม่ส่งผลต่อการเกิดผลึกของ PLA ค่า T_m ของ PLA จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังงานวิจัยของ Hsien-Tang C. และคณะ [19] อธิบายว่าพอลิเมอร์ผสม

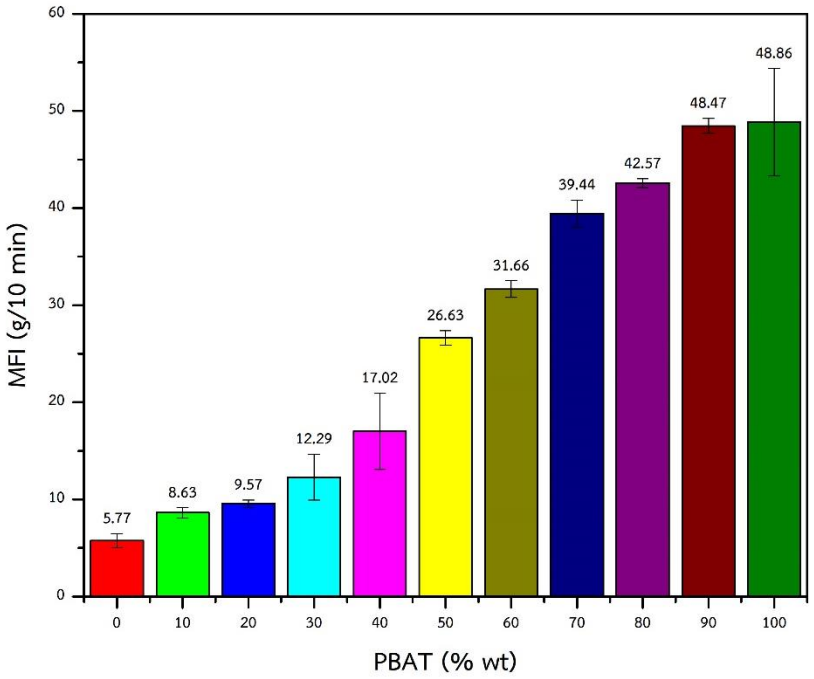
PLA/PBAT มีการก่อตัวเป็นเฟสอิสระแยกออกจากกัน PBAT ที่เติมเข้าไปมีผลต่อความสามารถในการเกิดผลึกของ PLA เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เมื่อพิจารณาค่า T_{cc} ในพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าประมาณ 101-109°C มีค่าลดลงเมื่อทำการผสม PBAT ส่วน PBAT นั้นไม่พบค่า T_{cc} จากงานวิจัยของ Liliane Cardoso A. และคณะ และงานวิจัยของ Long J. และคณะ [30] พบว่าการเติม PBAT ลงใน PLA ส่งผลให้ T_{cc} ของ PLA ลดลงประมาณ 10°C แสดงให้เห็นว่าการเติม PBAT ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดผลึกของ PLA ให้ดีขึ้น เนื่องจาก PBAT จะเหนี่ยวนำให้ PLA เกิดผลึก โดยงานวิจัยของ Long Jiang ได้ทำการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์เพิ่มเติม โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบเดียวกันกับการทดสอบ DSC พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT 95:5 จะเกิดผลึกขนาดเล็กและจำนวนมาก โดยเริ่มตกผลึก ณ อุณหภูมิต่ำกว่า PLA บริสุทธิ์ และจากงานวิจัยของ Wangwang Y. และคณะ [66] พบว่า PBAT ซึ่งเป็นเฟสรองสามารถทำหน้าที่เป็นสารเหนี่ยวนำการเกิดผลึกของ PLA ได้

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึก X_c (%) ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 จากการคำนวณตามสมการที่ 3.1 มีค่า 4.9%, 2.3%, 3.1%, 0.78%, 2.11%, 0.67%, 0.38%, 1.5%, 1.29% และ 0.96% ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อทำการผสม PBAT ปริมาณผลึกจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ ดังในตัวอย่าง PLA/PBAT 90:10 ที่มีปริมาณผลึก 2.3% เนื่องจาก PBAT เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม ที่มีโครงสร้างผลึกไม่แน่นอน จึงรบกวนและขัดขวางการเกิดผลึกของ PLA ทำให้การจัดเรียงตัวเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ของ PLA น้อยลง ดังงานวิจัยของ Jen-Taut Y. และคณะ [64] พบว่าโมเลกุลของ PBAT ที่เติมลงใน PLA เกิดการแยกออกของเฟส และขัดขวางการเกิดผลึกของ PLA ทำให้เมื่อปริมาณ PBAT ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึก X_c (%) ของ PLA จึงลดลง ในทางกลับกันปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT 80:20 โดยมีค่า 3.1% เนื่องจาก PBAT ที่กระจายตัวใน PLA ทำหน้าที่เป็นสารเหนี่ยวนำการเกิดผลึก ดังงานวิจัยของ Miguel A. และคณะ [4] พบว่าปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากเติม PBAT เนื่องจาก PBAT สามารถเป็นตัวกระตุ้นในการเกิดนิวเคลียสได้ อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

4.1.3 การศึกษาดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (MFI)

การศึกษาดัชนีการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer (MFI) ตามมาตรฐาน ASTM-D1238 ใช้ load cell ขนาด 2.16 kg และอุณหภูมิในการทดสอบ 190°C ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ดัชนีการไหลของของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT ที่ 190°C load cell ขนาด 2.16 kg

จากการศึกษาดัชนีการไหลของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT ที่ 190°C load cell ขนาด 2.16 kg ดังรูปที่ 4.3 ค่าดัชนีการไหลของ PLA มีค่า 5.77 ±0.71 g/10 min, ค่าดัชนีการไหลของ PBAT นั้นมีค่า 48.86 ±5.55 g/10 min และเมื่อทำการทดสอบพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 ค่าดัชนีการไหลแสดงค่า 8.63 ±0.52, 9.57 ±0.37, 12.29 ±2.37, 17.02 ±3.94, 26.63 ±0.75, 31.66 ±0.87, 39.44 ±1.39, 42.57 ±0.47 และ 48.47 ±0.78 g/10 min ตามลำดับ เมื่อทำการผสม PBAT ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ค่าดัชนีการไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากโมเลกุลของ PBAT ที่ผสมแทรก

ตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของ PLA ช่วยลดการเกี่ยวพันของสายโซ่ PLA เพิ่มช่องว่างระหว่างสายโซ่ ช่วยให้สายโซ่พอลิเมอร์ผสมเคลื่อนไหวได้ดีขึ้นขณะหลอมเหลว การไหลของพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลวดีขึ้นความหนืดต่ำลง ค่าดัชนีการไหลจึงสูงขึ้น ดังงานวิจัยของ Juviya M. และคณะ [44] ได้ทำการศึกษาพัฒนา 3D filament จากพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT โดยกระบวนการอัดรีดและกระบวนการผสมวัสดุขนาดเล็ก ที่อัตราส่วนระหว่าง PLA/PBAT 100:0, 90:10, 80:20, 70:30 และ 60:40 จากการศึกษาดัชนีการไหลพบว่าค่าดัชนีการไหลของเส้นใยผสม PLA/PBAT ในทุกอัตราส่วนมีค่าสูงกว่าดัชนีการไหลของ PLA บริสุทธิ์ และเมื่อเพิ่มปริมาณ PBAT ในอัตราส่วนผสมมากขึ้น ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงระหว่างการหลอมเหลว เมื่อผสม PBAT ลงใน PLA โมเลกุลของ PBAT จะช่วยให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ดีขึ้นขณะหลอมเหลว ช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์ผสม ทำให้ความต้านทานต่อการไหลลดลง ส่งผลให้ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ Phasawat C. และคณะ [14] ศึกษาวัสดุคอมโพสิตของ PLA/PBAT ที่ผสมเส้นใยไม้และวอลลาสโทไนต์ กล่าวว่าค่าดัชนีการไหลแสดงถึงความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ในสถานะหลอมเหลวเมื่อพอลิเมอร์ได้รับความร้อนและแรงดัน และยังเป็นตัวบ่งชี้ถึงน้ำหนักโมเลกุล และความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ค่าดัชนีการไหลที่สูงแสดงถึงความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ต่ำ และจากการศึกษาดัชนีการไหล พบว่าค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBAT ที่ผสมมากขึ้น เนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ลดลงระหว่างการหลอมเหลว ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนไหวได้ดีขึ้น และค่าดัชนีการไหลที่ทดสอบได้ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จะมีค่าอยู่ระหว่างดัชนีการไหลของ PLA บริสุทธิ์ และ PBAT

4.1.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

การศึกษาสมบัติเชิงกลของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT ได้ทำการศึกษา 4 อย่าง ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM-D638 type I ใช้ load cell ขนาด 50 kN crosshead speed 50 mm/min, ความต้านทานต่อแรงกระแทกด้วยเครื่อง Impact testing machine ตามมาตรฐาน ASTM-D256 ใช้ Izod pendulum ขนาด 2.75 J, การดัดงอแบบ 3 จุด (3 point bending testing) ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM-D790 ใช้ load cell ขนาด 50 kN span length 56 mm และ speed 1.49

mm/min, ความแข็งที่ผิว Shore hardness test ตามมาตรฐาน ASTM-D2240 ด้วยเครื่อง Durometer หัวกดชนิด Shore D ใช้ load cell 1 kg ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึง แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าการเติม PBAT ลงใน PLA ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเนื่องจาก PBAT ที่เติมลงไปไม่สามารถผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกับ PLA ได้ ดังงานวิจัยของ Wenwen C. และคณะ [17] อธิบายว่าการที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงนั้นเนื่องมาจากการเข้ากันได้ไม่ดีระหว่างพอลิเมอร์ PLA และ PBAT

แต่พบว่าค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม แสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 การผสม PBAT ในปริมาณที่มากขึ้น ช่วยเพิ่มค่าการยืดตัว ณ จุดขาดให้กับพอลิเมอร์ผสมเนื่องจากความสามารถในการดึงยืดที่ดีของ PBAT เมื่อพิจารณาตัวอย่าง PLA/PBAT 70:30 มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาด 16.63 $\pm$3.68% ซึ่งมีค่าลดลงจากตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20 ที่มีค่า 24.35 $\pm$15.64% เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Juviya M. และคณะ [44] พบว่าเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มขึ้นถึง 40%wt ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจะลดลงเนื่องมาจากขนาดของเฟส PBAT ที่กระจายตัวใหญ่ขึ้น และพอลิเมอร์ผสมเกิดลักษณะสัณฐานการผสมที่ทั้งสองเฟสมีความต่อเนื่อง มีการกระจายตัวของเฟสอย่างไม่ต่อเนื่องและการยึดเกาะระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ที่ไม่ดี เกิดการแตกออกของรอยต่อระหว่างเฟสระหว่างการดึง ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมขาดง่ายขึ้น ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจึงลดลง อย่างไรก็ตาม พบว่า PBAT บริสุทธิ์ ชิ้นงานทดสอบไม่เกิดการดึงยืดขาด เนื่องจากเกินค่าที่กำหนดในการทดสอบการดึงยืดไว้

ในส่วนของค่าโมดูลัส ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 พบว่าการเติม PBAT ลงใน PLA ส่งผลให้ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสมลดลงเช่นเดียวกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง เนื่องจากคุณสมบัติของ PBAT ที่มีโมดูลัสต่ำ ความแข็งแรงต่ำ และมีความเหนียว (ductility) สูง ได้ ดังงานวิจัยของ Juviya M. และคณะ [44] และงานวิจัยของ Yixin D. และคณะ [23] พบว่าเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มมากขึ้น ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT จะมีค่าลดลง เนื่องจากการเติมวัสดุที่อ่อนและยืดหยุ่นเข้าไปในวัสดุที่แข็งและเปราะ ความแข็งแรงโดยรวมของวัสดุย่อมลดลง

ค่าความต้านทานต่อการดัดงอแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 สังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณอัตราส่วนของ PBAT เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อการดัดงอจะลดลง เนื่องจาก PBAT มี

ความสามารถในการรับแรงได้น้อยกว่า PLA ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงและความต้านทานการดัดงอที่มาก ดังงานวิจัยของ Juviya M. และคณะ [44] งานวิจัยของ Phasawat C. และคณะ [14] และงานวิจัยของ Wangwang Y. และคณะ [66] เมื่อพิจารณาพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT 90:10 และ 80:20 พบว่าค่าความต้านทานต่อการดัดงอจะลดลงเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเฟสของ PBAT จะกระจายอยู่ในเมทริกซ์ PLA ความสามารถในการรับแรงจึงมากอยู่ และเมื่อผสม PBAT ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นถึง 30%wt พอลิเมอร์ทั้ง 2 จะเกิดโครงสร้างร่วมที่ทั้งสองเฟสมีความต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อการดัดงอลดลงอย่างชัดเจน และเมื่อปริมาณ PBAT เพิ่มมากขึ้นจนกลายเป็นเฟสหลัก (phase inversion) ค่าความต้านทานต่อการดัดงอจะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.8 การผสม PBAT เข้าไปใน PLA ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจากอัตราส่วน PLA/PBAT 90:10 ไปจนถึงอัตราส่วน PLA/PBAT 70:30 พบว่า สมบัติของการต้านแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมจะดีขึ้นเนื่องจาก PBAT สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าเมื่อเทียบกับ PLA ดังงานวิจัยของ Juviya M. และคณะ [44] อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของ PBAT เนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุลที่มีความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความยืดหยุ่นจากหน่วยอะดิเพท และเทเรฟทาเลท ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถดูดซับและกระจายพลังงานได้มากก่อนการแตกหัก แต่หลังจากนั้นในอัตราส่วน PLA/PBAT 60:40 ไปจนถึงอัตราส่วน PLA/PBAT 30:70 พบว่ามีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกน้อยกว่า PLA/PBAT 70:30 เนื่องจากการผสมเข้ากันได้ไม่ดีของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีในพอลิเมอร์ผสม ดังงานวิจัยของ Peng Z. และคณะ [68] เมื่อพอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ไม่ดี จะเกิดจุดรวมความเค้น ชิ้นงานจึงดูดซับและกระจายพลังงานได้น้อยลง ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจึงลดลง

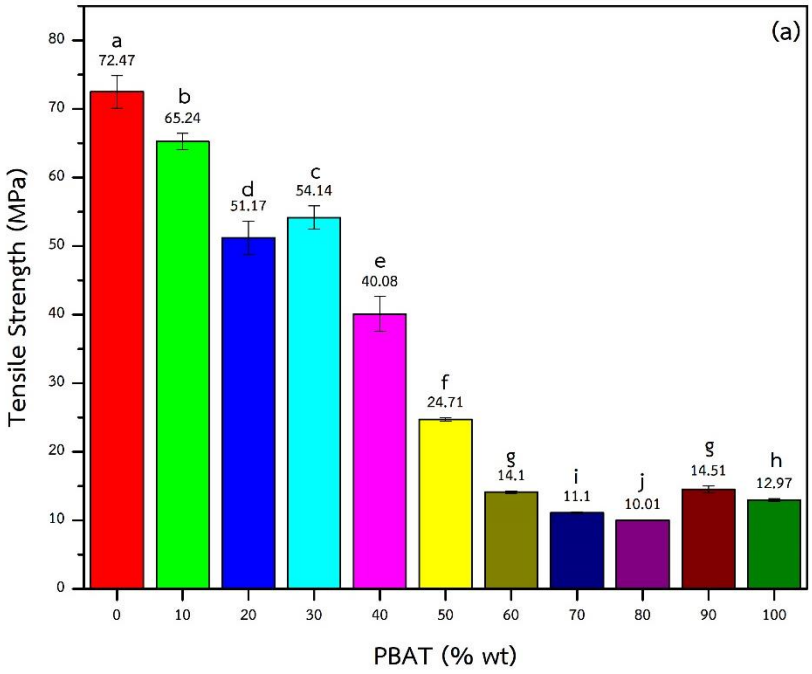
อย่างไรก็ตามพบว่าตัวอย่าง PBAT และ PLA/PBBAT 10:90 ไม่เกิดการแตกหัก ดังงานวิจัยของ Phasawat C. และคณะ [14] พบว่าวัสดุผสมที่มี PBAT 40% และ 50% โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงมากจนไม่สามารถวัดค่าได้ เนื่องจากชิ้นทดสอบไม่แตกหัก แสดงถึงการเกิดลักษณะสัณฐานการผสมที่ทั้งสองเฟสมีความต่อเนื่อง ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง ซึ่ง PLA กลายเป็นเฟสกระจายตัว (dispersed phase) อยู่ภายในเมทริกซ์ของ PBAT

และสุดท้ายค่าความแข็งที่ผิว ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.9 พบว่าค่าความแข็งที่ผิว มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ PBAT ที่ผสมเพิ่มมากขึ้น ดังงานวิจัยของ Migrel A. และคณะ [4] เมื่อผสม PBAT ลงใน PLA พบว่าค่าความแข็งที่ผิวจะลดลงเนื่องมาจากสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ซึ่ง PLA บริสุทธิ์มีค่าความแข็งที่ผิวสูง เมื่อทำการผสม PBAT ลงไปใน PLA เล็กน้อย เฟสของ PBAT จะกระจายตัวใน PLA เกิดการแยกตัวออกของเฟส เนื่องจากความเข้ากันได้ไม่ดี จะเกิดรอยต่อ

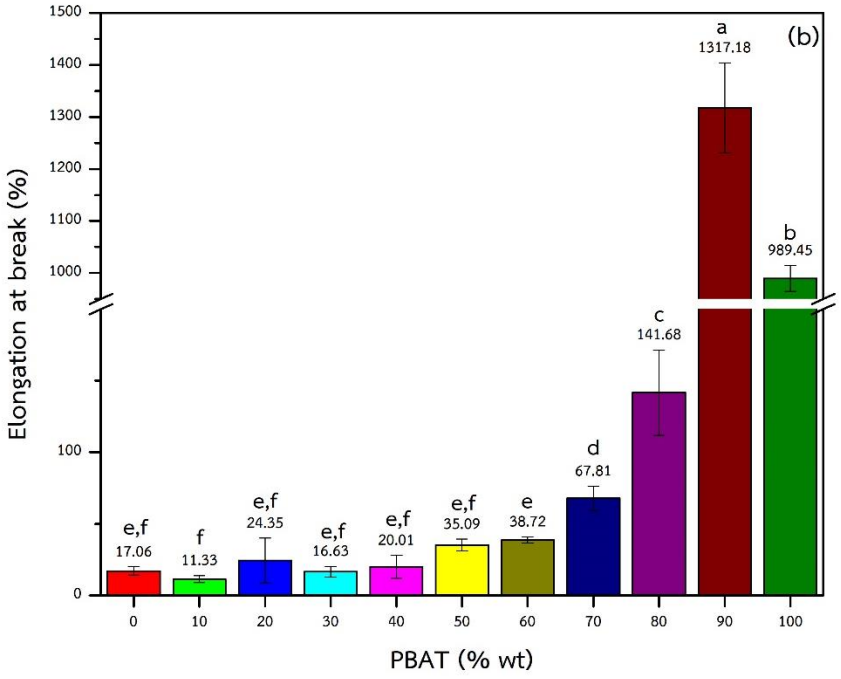
ระหว่างเฟสขึ้น ส่งผลให้ความแข็งของพอลิเมอร์ผสมลดลง และเมื่อผสม PBAT ในปริมาณที่มากขึ้น พอลิเมอร์ผสมเกิดโครงสร้างร่วมที่ทั้งสองเฟสมีความต่อเนื่อง โดย PLA กลายเป็นเฟสกระจายตัวแทรกอยู่ในเมทริกซ์ของ PBAT ค่าความแข็งของพอลิเมอร์จะลดลงอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.3 ค่าโมดูลัส, ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด, ค่าความต้านทานต่อการดัดงอ, ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก และค่าความแข็งที่ผิว ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT

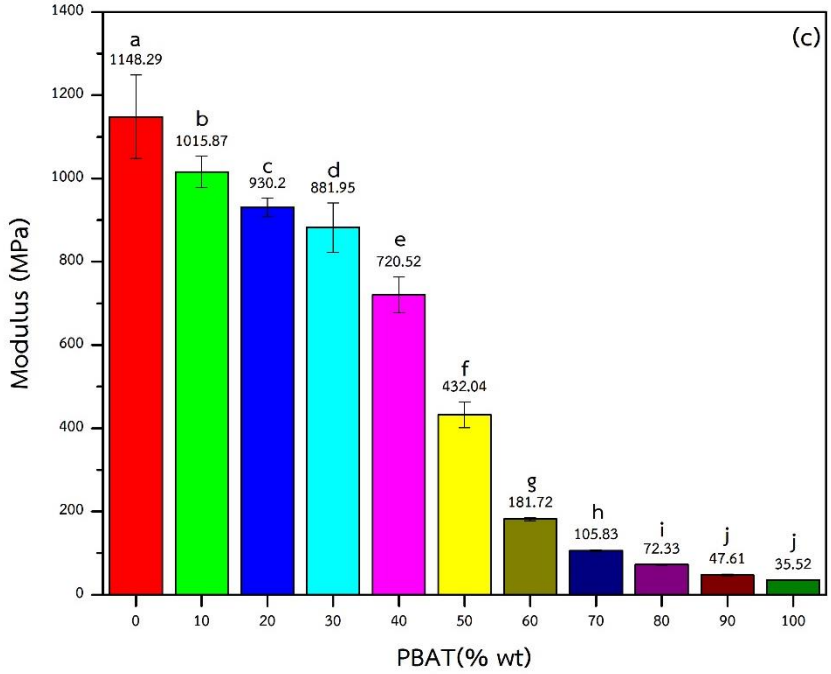
Sample	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural stress (MPa)	Impact strength (kJ/m^2)	Shore D Hardness
PLA	1148.29 ±100.34^{a}	72.47 ± 2.37^{a}	17.06 ± 2.87^{e,f}	140.09 ± 1.32^{a}	3.20 ± 0.45^{c,d}	74.7 ± 1.64^{a}
PLA/PBAT 90:10	1015.87 ± 37.78^{b}	65.24 ± 1.18^{b}	11.33 ± 2.5^{f}	119.24 ±0.77^{b}	3.08 ± 0.29^{d}	73.1 ± 1.20^{b}
PLA/PBAT 80:20	930.2 ± 22.05^{c}	51.17 ± 2.45^{d}	24.35 ± 15.64^{e,f}	116.21 ± 1.99^{c}	3.51 ± 0.06^{c}	67.6 ± 0.52^{c}
PLA/PBAT 70:30	881.95 ± 59.25^{d}	54.14 ± 1.71^{c}	16.63 ± 3.68^{e,f}	63.57 ±2.23^{d}	6.69 ± 0.54^{a}	65.3 ±1.5^{d}
PLA/PBAT 60:40	720.52 ± 42.93^{e}	40.08 ± 2.53^{e}	20.01 ± 7.98^{e,f}	49.19 ±2.28^{e}	5.96 ± 0.84^{b}	62.3 ± 1.16^{e}
PLA/PBAT 50:50	432.04 ± 31.05^{f}	24.71 ± 0.27^{f}	35.09 ±4.17^{e,f}	38.01 ±1.07^{f}	3.8 ± 0.54^{c}	57.5 ± 1.27^{f}
PLA/PBAT 40:60	181.72 ± 3.76^{g}	14.1 ± 0.17^{g}	38.72 ± 2.1^{e}	21.19 ±0.25^{g}	3.39 ± 0.26^{c,d}	53.1 ± 1.97^{g}
PLA/PBAT 30:70	105.83 ± 2.49^{h}	11.1 ± 0.15^{i}	67.81 ± 8.52^{d}	15.74 ± 0.24^{h}	4.91 ± 0.68^{b}	50.8 ± 0.92^{h}
PLA/PBAT 20:80	72.33 ± 1.39^{i}	10.01 ± 0.08^{j}	141.68 ± 29.86^{c}	12.39 ±0.19^{i}	6.43 ±1.67^{a}	46.2 ± 0.79^{i}
PLA/PBAT 10:90	47.61 ± 2.24^{j}	14.51 ± 0.48^{g}	1317.18 ± 86.43^{a}	10.33 ±0.28^{j}	ไม่เกิดการแตกหัก	44 ± 1.05^{j}
PBAT	35.52 ± 0.75^{j}	12.97 ± 0.18^{h}	989.45 ± 24.86^{b} (ไม่ขาด)	9.41 ± 0.23^{k}	ไม่เกิดการแตกหัก	42 ±1.05^{k}



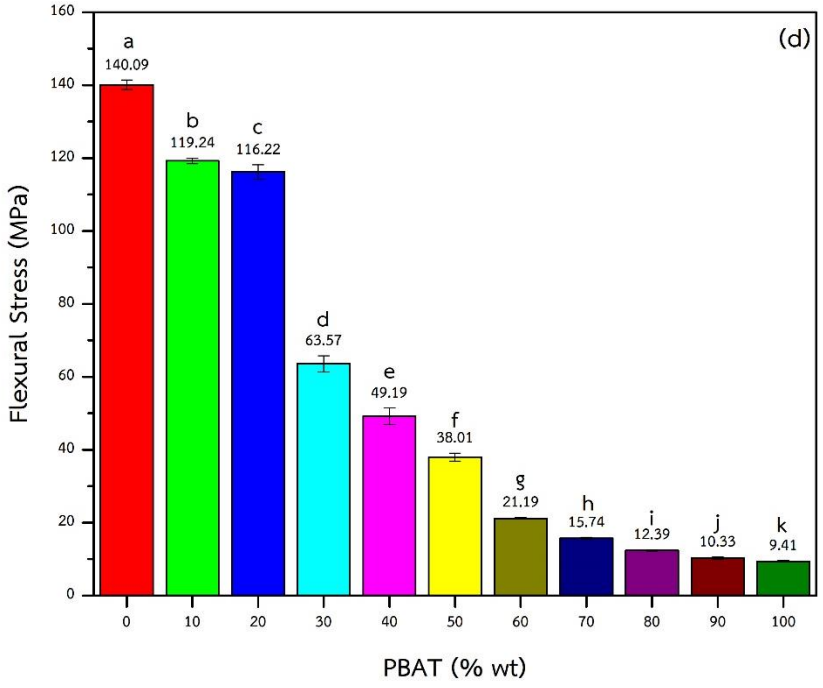
รูปที่ 4.4 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม



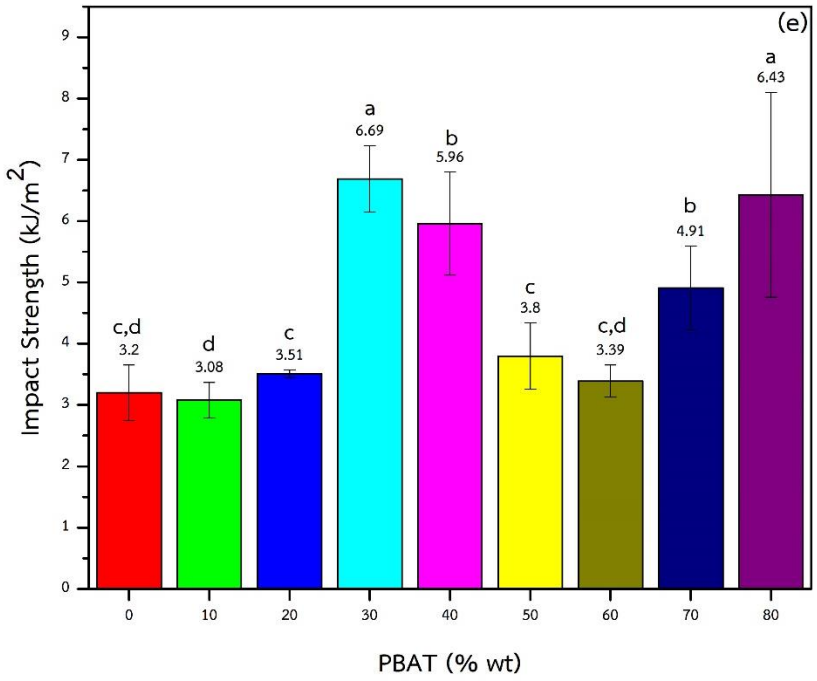
รูปที่ 4.5 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม



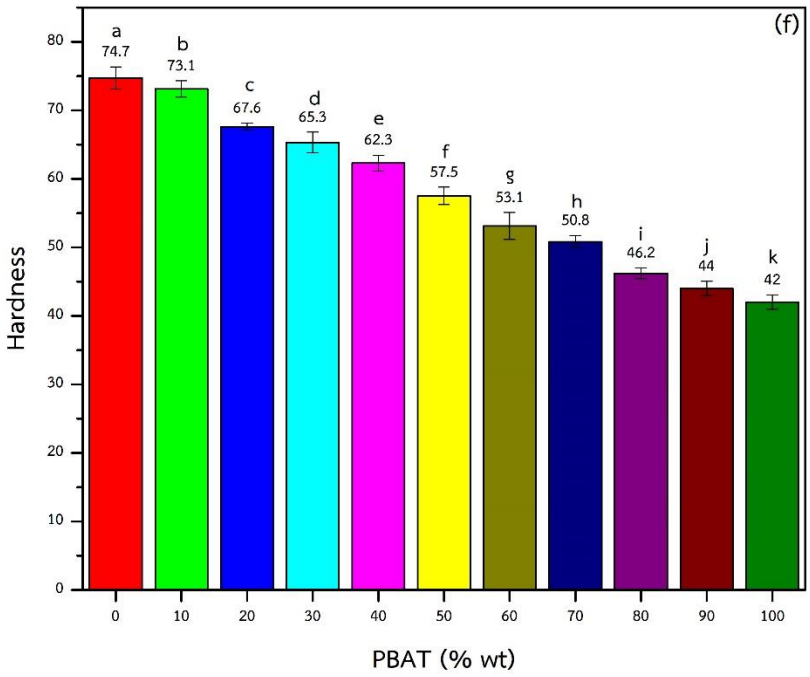
รูปที่ 4.6 ค่าโมดูลัสของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.7 ค่าความต้านทานต่อการดัดงอของพอลิเมอร์ผสม



รูปที่ 4.8 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม

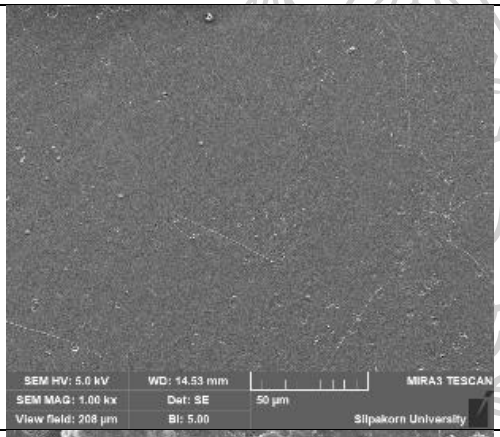
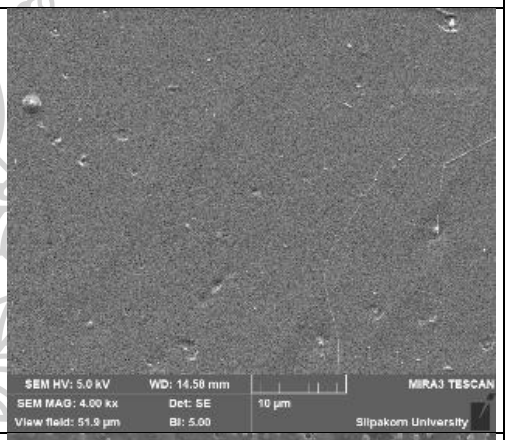
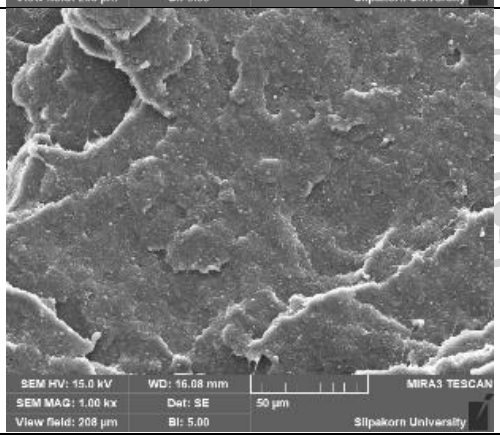
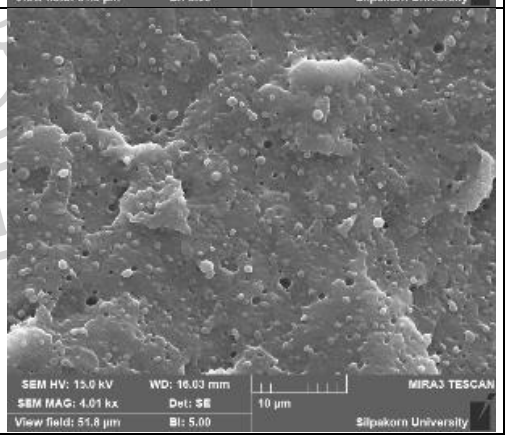


รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งที่ผิวของพอลิเมอร์ผสม

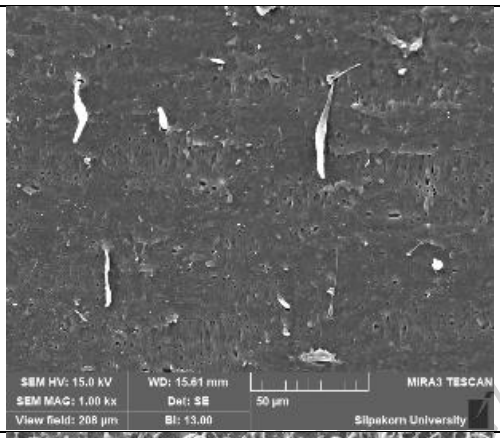
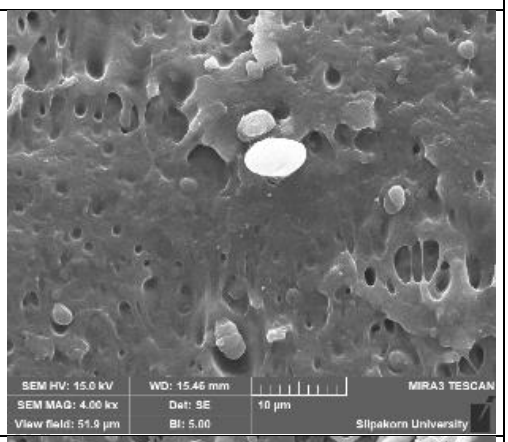
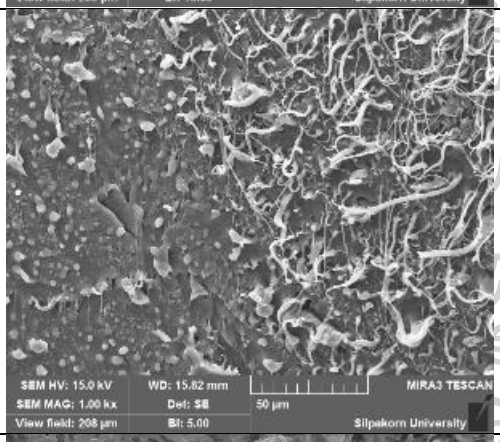
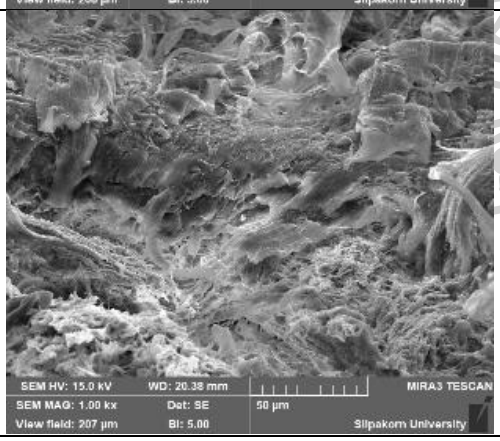
4.1.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM)

การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวและความเข้ากันได้ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 ช่วงกำลังขยาย 1,000x และ 4,000x พลังงาน 15 kV โดยใช้ชิ้นงานจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง แสดงตารางที่ 4.4

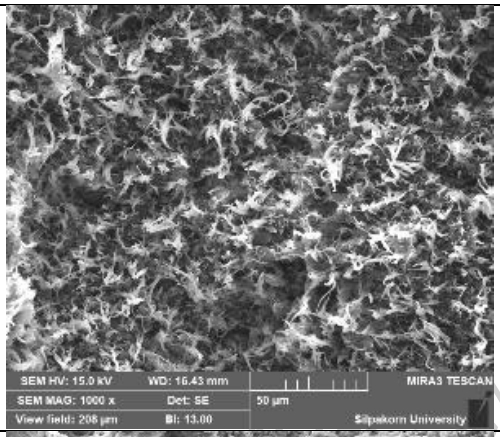
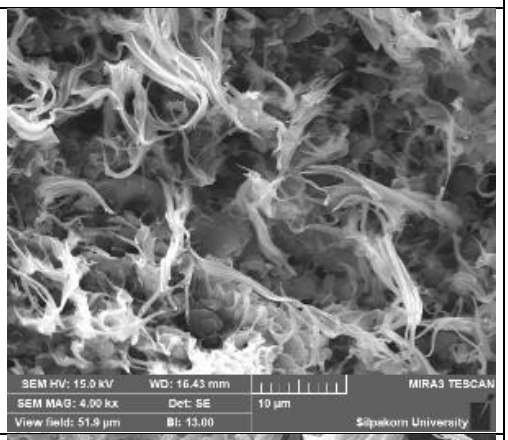
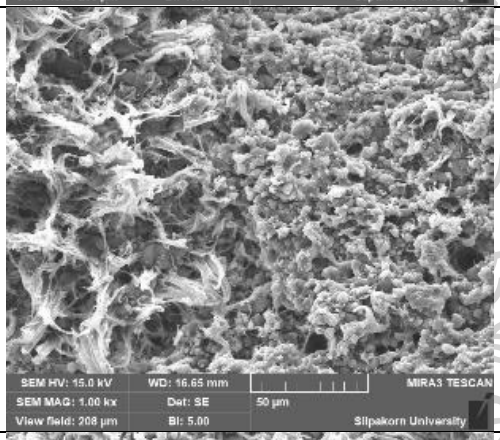
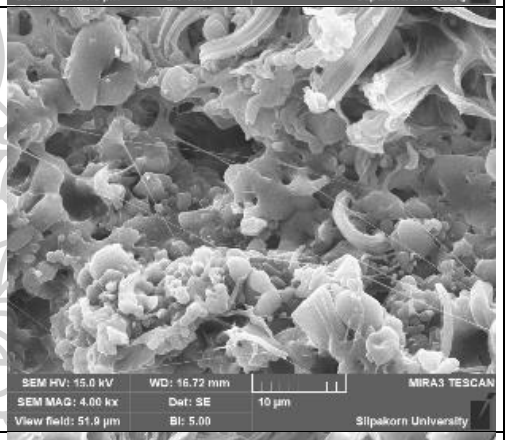
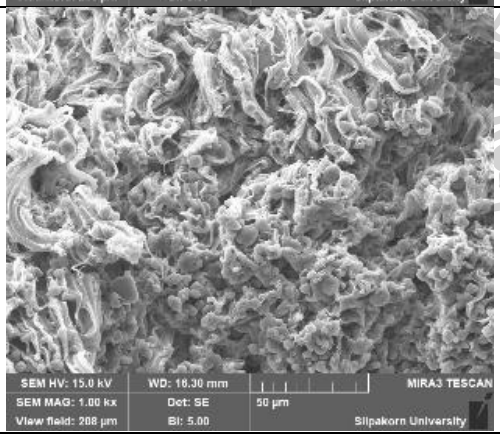
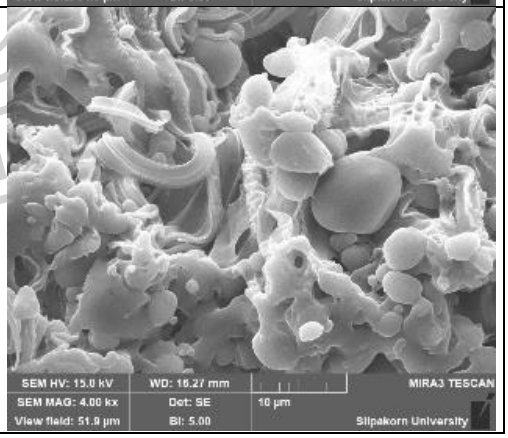
ตารางที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 พลังงาน 15 kV ที่กำลังขยาย 1000x และ 4000x ตามลำดับ

	1000x	4000x
PLA		
PLA/PBAT 90:10		

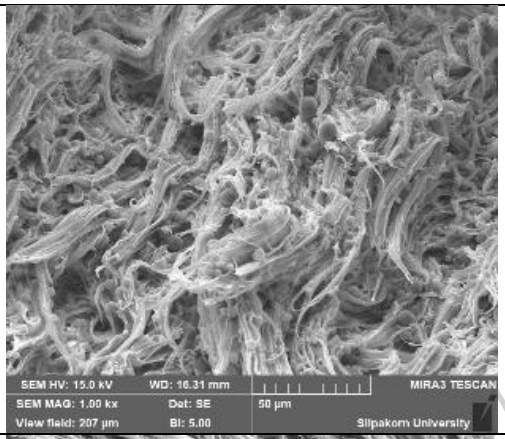
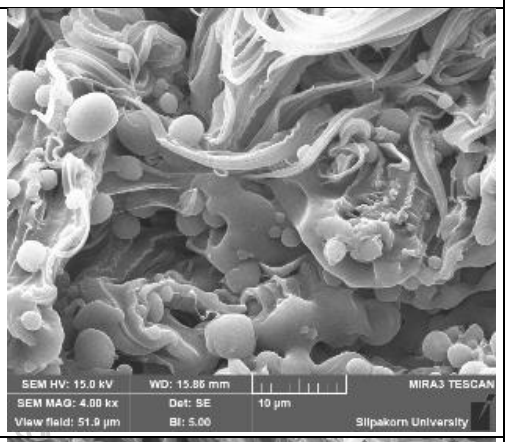
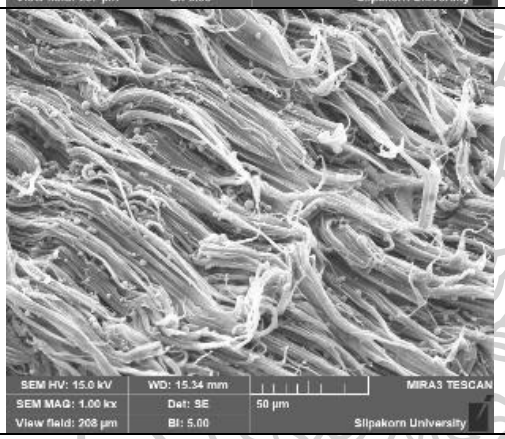
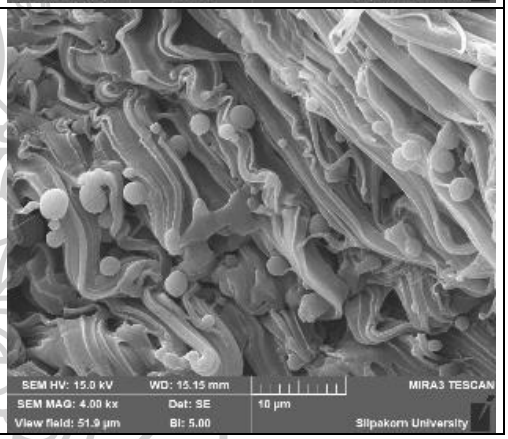
ตารางที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 พลังงาน 15 kV ที่กำลังขยาย 1000x และ 4000x ตามลำดับ (ต่อ)

	1000x	4000x
PLA/PBAT 80:20		
PLA/PBAT 70:30		
PLA/PBAT 60:40		

ตารางที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 พลังงาน 15 kV ที่กำลังขยาย 1000x และ 4000x ตามลำดับ (ต่อ)

	1000x	4000x
PLA/PBAT 50:50		
PLA/PBAT 40:60		
PLA/PBAT 30:70		

ตารางที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 พลังงาน 15 kV ที่กำลังขยาย 1000x และ 4000x ตามลำดับ (ต่อ)

	1000x	4000x
PLA/PBAT 20:80		
PLA/PBAT 10:90		

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาจากเทคนิค Scanning electron microscope ของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80 และ 10:90 ช่วงกำลังขยาย 1,000x และ 4,000x แสดงดังตารางที่ 4.4

พิจารณาการแตกหักของ PLA พบว่ามีการแตกหักแบบเปราะและมีผิวการแตกหักเรียบสม่ำเสมอ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jen-Taut Y. และคณะ [64] PLA แสดงลักษณะการแตกหักแบบเปราะ (brittle) โดยมีผิวเรียบ

การแตกหักของ PLA/PBAT 90:10 ที่กำลังขยาย 1000x ผิวส่วนใหญ่เป็นการแตกหักแบบเปราะ ผิวมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA และเมื่อเพิ่มกำลังขยายที่ 4000x พบการกระจายตัวของเฟส PBAT ลักษณะทรงกลมกระจายอยู่ทั่วเมทริกซ์ที่เรียบของ PLA สอดคล้องกับงานวิจัยของ

Jen-Taut Y. และคณะ [64] ที่พบ PBAT แยกเฟส (phase-separated droplets) กระจายตัวชัดเจนบนผิวที่แตกหัก

การแตกหักของ PLA/PBAT 80:20 ที่กำลังขยาย 1000x พบการยืดตัวออกของ PBAT และที่กำลังขยาย 4000x จะพบอนุภาคของ PBAT มีลักษณะสีขาว สังเกตได้ว่า PBAT กระจายตัวอยู่ทั่ว PLA สังเกตได้จากบริเวณที่มีการยืดออกที่มากขึ้นในบริเวณโดยรอบ ดังงานวิจัยของ Onur Ç. และคณะ [20] อธิบายถึงอนุภาคสีขาวที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ PLA คือเฟสของ PBAT และพบลักษณะการหลุดออกของ PBAT ออกจาก PLA สังเกตได้จากบริเวณช่องว่างที่เหลืออยู่หลังการทดสอบ

การแตกหักแบบเหนียวของ PLA/PBAT 70:30 พบบริเวณที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 บริเวณ บริเวณแรกจะมีลักษณะที่ PBAT กระจายตัวอยู่ทั่ว PLA สังเกตได้จากจากการยืดออกและมีปริมาณ PBAT กระจายตัวมากกว่าจากอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น บริเวณที่ 2 จะแสดงการยืดออกของ PBAT ที่เด่นชัดมากความยาวที่ยืดออกเกิน 50 μm โดยทั้ง 2 บริเวณอยู่ติดกัน แสดงให้เห็นว่าบริเวณแรกมีปริมาณ PLA ที่มากกว่าบริเวณที่ 2 แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ไม่ดีของพอลิเมอร์ทั้ง 2 ในอัตราส่วน PLA/PBAT 70:30

การแตกหักของ PLA/PBAT 60:40 ที่กำลังขยาย 1000x พบการยืดตัวออกของ PBAT ทั้งภาพ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Phasawat C. และคณะ [14] อธิบายลักษณะแบบนี้ว่าพอลิเมอร์ผสมเกิดโครงสร้างร่วมที่ทั้งสองเฟสมีความต่อเนื่อง ไม่สามารถสังเกตเห็น PLA ได้ และเมื่อเพิ่มกำลังขยายไปที่ 4000x จะสังเกตเห็น PLA ลักษณะเป็นทรงกลม กระจายอยู่ใน PBAT ที่เกิดการยืด

การแตกหักของ PLA/PBAT 50:50 ที่กำลังขยาย 1000x พบการยืดตัวออกของ PBAT ทั้งภาพทั่วทุกบริเวณ มีลักษณะการยืดออกที่คล้ายกัน เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 4000x จะสังเกตเห็นอนุภาคทรงกลมของ PLA กระจายแทรกตัวอยู่ระหว่าง PBAT ที่ถูกยืด

การแตกหักของ PLA/PBAT 40:60 และ 30:70 ตามลำดับ พบบริเวณที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 บริเวณ บริเวณที่มีการยืดตัวออก PBAT ที่มากตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น และบริเวณที่มีการยืดตัวที่น้อยแสดงถึงการรวมตัวของ PLA ณ บริเวณนั้นที่มากกว่า แต่อย่างไรก็ตามทั้ง 2 บริเวณยังมีอนุภาคของพอลิเมอร์อีกชนิดกระจายแทรกตัวอยู่ด้วยเสมอ แต่จากการทดสอบแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวที่ไม่ดีของพอลิเมอร์ทั้ง 2 เนื่องจากสังเกตความแตกต่างของทั้ง 2 บริเวณได้ชัดเจน

การแตกหักของ PLA/PBAT 20:80 และ 10:90 ลักษณะการแตกหักของอัตราส่วนทั้ง 2 เป็นการแตกหักแบบเหนียว สังเกตการยืดตัวของ PBAT ได้ชัดเจน ดังงานวิจัยของ Jen-Taut Y. และ

คณะ [64] และพบอนุภาคทรงกลมของ PLA กระจายอยู่ตามเมทริกซ์ของ PBAT และอัตราส่วน PBAT ที่เพิ่มมากขึ้นจะแสดงการยืดตัวที่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น

จากการทดสอบสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของ PLA, PLA/PBAT ที่อัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90 และ PBAT ผู้วิจัยได้เลือกพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT อัตราส่วน 80:20 ซึ่งมีปริมาณผลึกสูงที่สุด สมบัติเชิงกลที่เหมาะสม และมีลักษณะสัณฐานวิทยาการกระจายตัว PBAT ใน PLA อย่างทั่วถึง ในการดำเนินงานวิจัยตอนที่ 2 ต่อไป ทางผู้วิจัยต้องการพอลิเมอร์ผสมที่มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นโดยมี PLA เป็นเฟสหลักและ PBAT เป็นเฟสรองและมีการผสมเฟสรองลงไปให้น้อยที่สุด

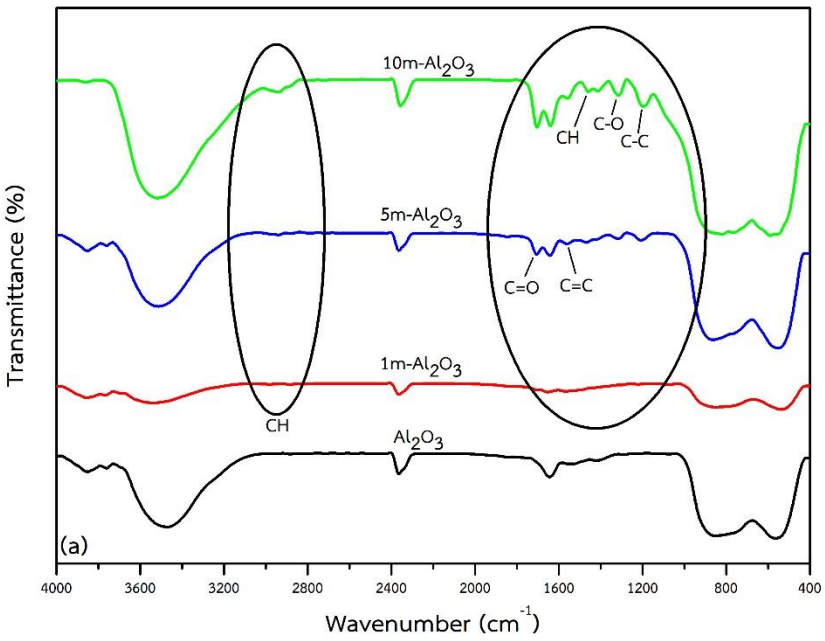
4.2 การเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO)

ตอนที่ 2 ทำการเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) โดยทำการปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ Al_2O_3, ZnO และ TiO_2 ด้วย TESPMA ที่ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt ทำการศึกษาเอกลักษณ์เพื่อเลือกปริมาณ TESPMA ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงผิวก่อนนำไปผสมกับ PLA/PBAT 80:20 ที่ปริมาณโลหะออกไซด์ 1, 5 และ 10 %wt

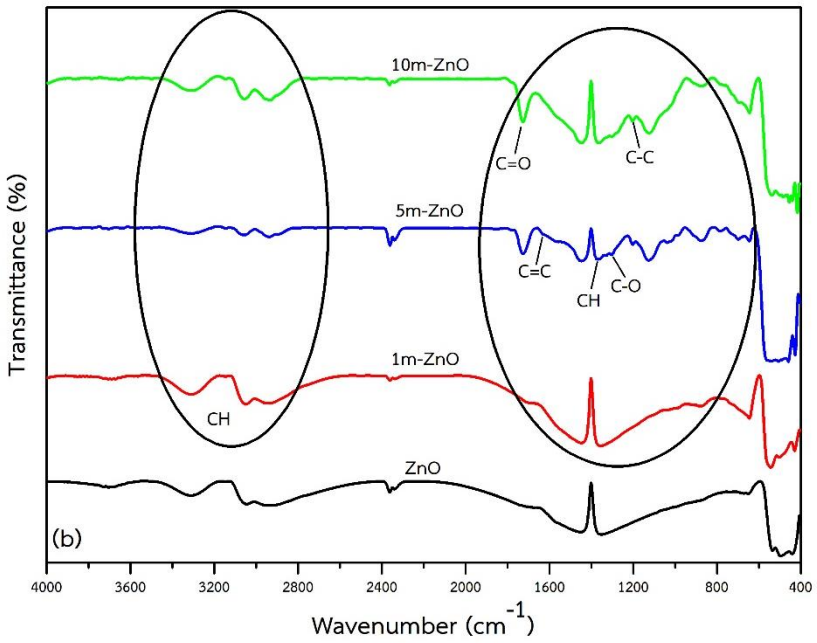
4.2.1 การศึกษาเอกลักษณ์ของโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิว

4.2.1.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชั่นของโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis

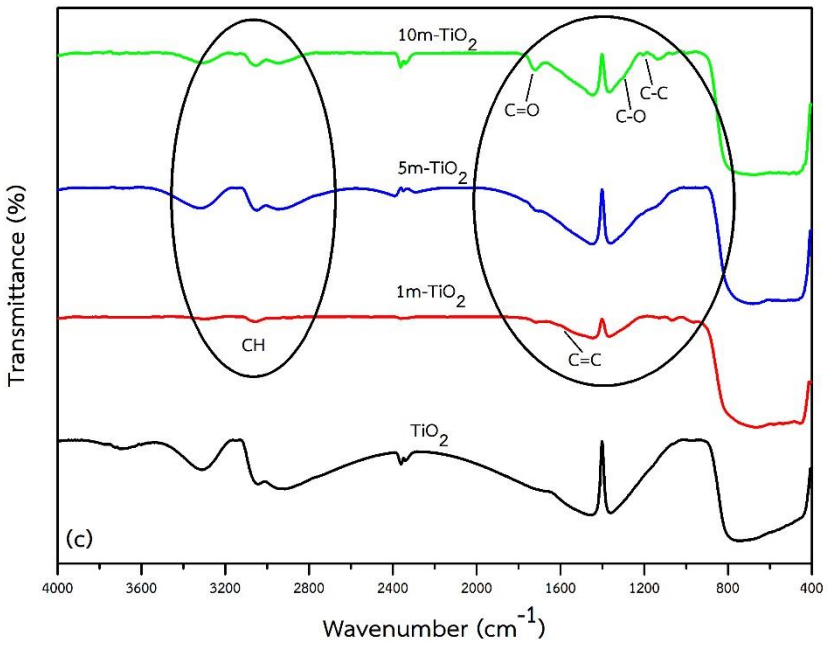
การศึกษาหมู่ฟังก์ชั่นของโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) ช่วงความยาวคลื่น 4000-400 cm^{-1} แสดงดังรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.10 IR spectra ของ Al_2O_3 และmodified Al_2O_3 ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt



รูปที่ 4.11 IR spectra ของ ZnO และmodified ZnO ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt



รูปที่ 4.12 IR spectra ของ TiO_2 และmodified TiO_2 ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt

จาก FTIR spectra ของ modified Al_2O_3 ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt แสดงดังรูปที่ 4.10 ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2973 cm^{-1} สอดคล้องกับการสั่นของ C-H stretching ใน TESPMA และ พีคที่ตำแหน่ง 1720 และ 1639 cm^{-1} สอดคล้องการสั่นของ C=O และ C=C ตามลำดับ และพบการสั่นของ C-H bending, C-O stretching และ C-C stretching ที่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1449, 1314 และ 1206 cm^{-1} ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] ที่พบการสั่นของ C-H stretching ใน TESPMA ที่ตำแหน่ง 2954 cm^{-1} พบการสั่นของ C=O และ C=C ที่ตำแหน่ง 1716 และ 1636 cm^{-1} ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชั่นที่พบในหมู่เมทาคริเลต และการสั่นของ C-H bending, C-O stretching และ C-C stretching ที่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1451, 1324 และ 1298 cm^{-1} ตามลำดับ และจากงานวิจัยกล่าวว่า ความเข้มของพีค C=O และ C=C เพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ TESPMA เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง Al_2O_3 และ TESPMA แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงผิวที่สำเร็จ

FTIR spectra ของ modified ZnO ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt แสดงดังรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาเส้นกราฟของตัวอย่าง 5m-ZnO และ 10m-ZnO ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1725 และ 1636 cm^{-1} สอดคล้องการสั่นของ C=O และ C=C ตามลำดับเช่นเดียวกับในตัวอย่าง modified Al_2O_3 อีกทั้งยังพบการสั่นของ C-H bending, C-O stretching และ C-C stretching ด้วยการ

ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1362, 1300 และ 1202 cm^{-1} และความเข้มของพีค C=O และ C=C เพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ TESPMA เพิ่มขึ้น แต่ในตัวอย่าง 1m-ZnO ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 1 %wt กลับไม่พบการสั่นของหมู่ฟังก์ชั่นที่ได้กล่าวไปข้างต้น

FTIR spectra ของ modified TiO_2 ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt แสดงดังรูปที่ 4.12 ทั้ง 3 ตัวอย่าง ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1718 cm^{-1} สอดคล้องการสั่นของ C=O หมู่ฟังก์ชั่นที่พบในหมู่เมทาคริเลต ดังงานวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] ที่กล่าวไปข้างต้น ในส่วนการสั่น C=C, C-H bending, C-O stretching และ C-C stretching ไม่สามารถสังเกตได้ชัดเจนจึงต้องทำการวิเคราะห์การปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์ด้วย TESPMA โดยการวิเคราะห์ดังแสดงถัดไป

4.2.1.2 การศึกษาเสถียรภาพ การสลายตัวทางความร้อน และประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 800°C อัตราการให้ความร้อน 10°C/min เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ modified Al_2O_3, ZnO และ TiO_2 แสดงดังตารางที่ 4.5, 4.6, 4.7 รูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ 1m- Al_2O_3, 5m- Al_2O_3 และ 10m- Al_2O_3

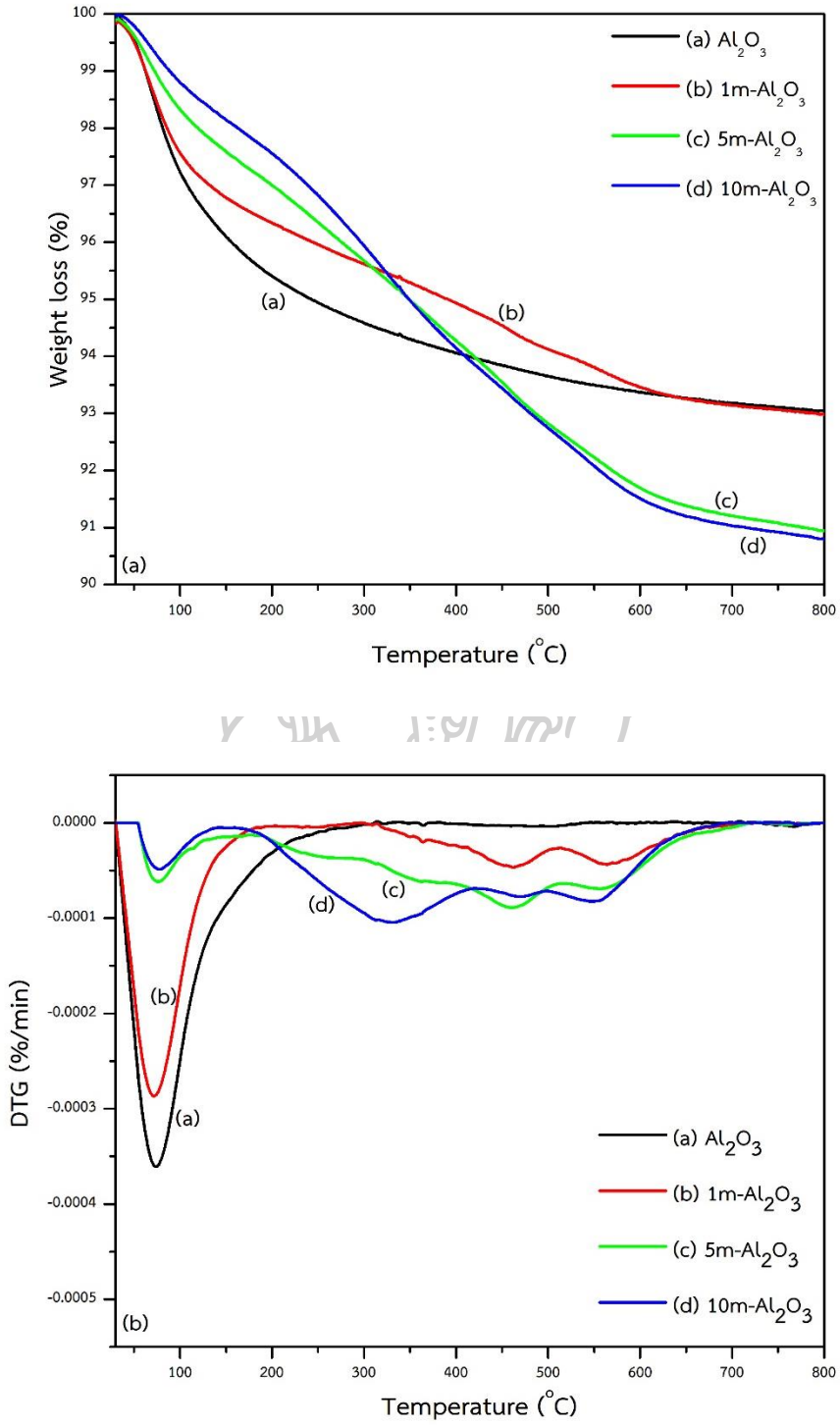
Sample	Percentage of initial silane (%)	Weight loss obtained from TGA (%)	Percentage of silane (%)	Grafting efficiency (%)
Al_2O_3	0	6.97	-	-
1m-Al_2O_3	1	7.02	0.05	5.0
5m-Al_2O_3	5	9.01	2.04	40.8
10m-Al_2O_3	10	9.20	2.23	22.3

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ 1m-ZnO, 5m-ZnO และ 10m-ZnO

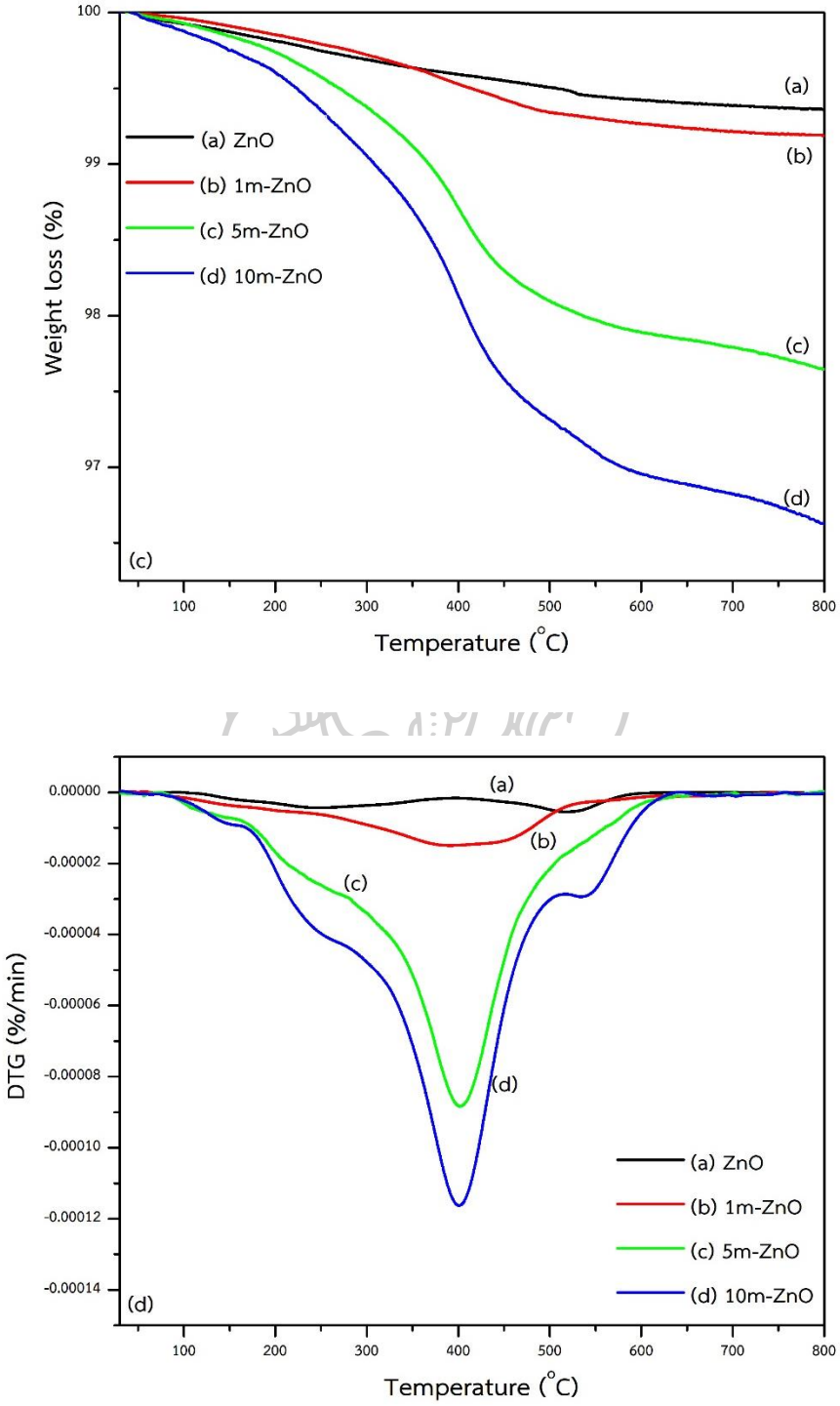
Sample	Percentage of initial silane (%)	Weight loss obtained from TGA (%)	Percentage of silane (%)	Grafting efficiency (%)
ZnO	0	0.65	-	-
1m-ZnO	1	0.82	0.17	17.00
5m-ZnO	5	2.36	1.71	34.20
10m-ZnO	10	3.38	2.73	27.30

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ 1m-TiO_2, 5m-TiO_2 และ 10m-TiO_2

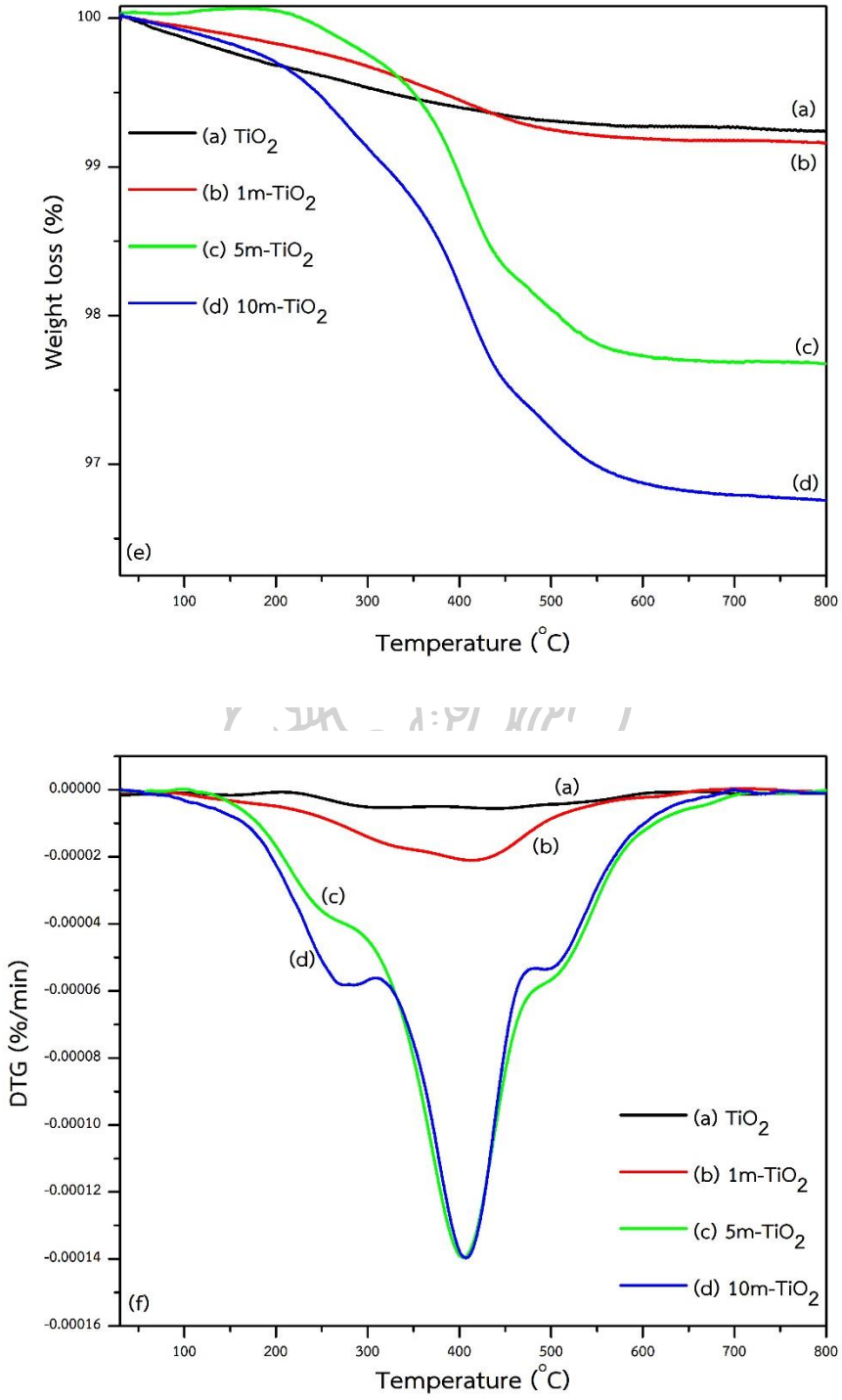
Sample	Percentage of initial silane (%)	Weight loss obtained from TGA (%)	Percentage of silane (%)	Grafting efficiency (%)
TiO_2	0	0.77	-	-
1m-TiO_2	1	0.84	0.07	7.00
5m-TiO_2	5	2.33	1.56	31.20
10m-TiO_2	10	3.25	2.48	24.80



รูปที่ 4.13 กราฟ TGA (a) และกราฟ DTG (b) ของ Al_2O_3 และmodified Al_2O_3 ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt



รูปที่ 4.14 กราฟ TGA (c) และกราฟ DTG (d) ของ ZnO และmodified ZnO ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt



รูปที่ 4.15 กราฟ TGA (e) และกราฟ DTG (f) ของ TiO_2 และmodified TiO_2 ด้วย TESPMA ที่ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt

จากกราฟ TGA ของ Al_2O_3 และ modified Al_2O_3 แสดงดังรูปที่ 4.13 (a) และกราฟ DTG ดังรูปที่ 4.13 (b) และประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวดังตารางที่ 4.5 จากรูปที่ 4.13 (a) กราฟ TGA พบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักลดลง 6.97%, 7.02%, 9.01% และ 9.20% ในตัวอย่าง Al_2O_3, 1m- Al_2O_3, 5m- Al_2O_3 และ 10m- Al_2O_3 ตามลำดับ เมื่อปริมาณ TESPMA เพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของตัวอย่างจะยิ่งลดลง แสดงให้เห็นว่า TESPMA ยึดเกาะบนผิวของอนุภาค Al_2O_3

รูปที่ 4.13 (b) กราฟ DTG พบการสลายตัว ณ อุณหภูมิ 80-100°C ในทุกตัวอย่าง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Damian S. N. และคณะ [47] พบการระเหยของความชื้นในอนุภาค Al_2O_3 ณ อุณหภูมิ 70-160°C และเมื่อพิจารณา modified Al_2O_3 พบการสลายตัว ณ อุณหภูมิ 325-350°C และ ณ อุณหภูมิประมาณ 450-600°ดังวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] เนื่องมาจากการสลายตัวของโครงสร้างออร์แกโนไซเลนที่เกิดการยึดเกาะบนอนุภาค Al_2O_3 ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย TESPMA ถือเป็นการเน้นย้ำว่า TESPMA ยึดเกาะบนผิวของอนุภาค Al_2O_3

พิจารณาในส่วนของประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวดังตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ modified Al_2O_3 ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt ที่ได้จากการคำนวณ มีค่า 5.0%, 40.8% และ 22.3% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวมีค่าสูงสุด 40.8% ในตัวอย่าง 5m-Al_2O_3 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] พบว่าเมื่อทำการปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์ด้วย TESPMA ที่ปริมาณ 1-3% พบประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวจะมีค่ามากขึ้น และเมื่อปริมาณ TESPMA 5-20% ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวจะมีค่าลดลง เนื่องจากที่ปริมาณน้อย ไซเลนจะเกาะบนผิวของโลหะออกไซด์อย่างสม่ำเสมอมีลักษณะการยึดเกาะแบบตำแหน่งเดียว เมื่อปริมาณ TESPMA เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวจะลดลงเนื่องจากเกิดการขัดขวางจากรูปร่างของอะตอม ในโครงสร้างของไซเลน ทำให้เกิดการยึดเกาะแบบ 2 ตำแหน่ง หรือ 3 ตำแหน่ง แสดงให้เห็นในตัวอย่าง 10m- Al_2O_3 นอกจากนี้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของ Al_2O_3 ที่ลดลงในตัวอย่างที่มีปริมาณ TESPMA มาก ก็ส่งผลให้ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวลดลงไปด้วย

กราฟ TGA ของ modified ZnO แสดงดังรูปที่ 4.14 (c) และกราฟ DTG ดังรูปที่ 4.14 (d) พบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักลดลง 0.65%, 0.82%, 2.36% และ 3.38% ในตัวอย่าง ZnO, 1m- ZnO, 5m- ZnO และ 10m- ZnO ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณ TESPMA เพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของตัวอย่างจะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่า TESPMA ยึดเกาะบนผิวของอนุภาค ZnO มากขึ้น พิจารณารูปที่ 4.14 (d) กราฟ DTG ของ ZnO และmodified ZnO ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt พบการสลายตัว ณ อุณหภูมิ 100-200°C ในตัวอย่าง ZnO และในตัวอย่าง m-ZnO พบ

การสลายตัว ณ อุณหภูมิ 100-180°C สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fatemeh E. และคณะ [25] พบการระเหยของความชื้นบนผิวอนุภาค ZnO ณ อุณหภูมิ 25-120°C และนอกจากนี้ยังพบการสลายตัว ณ อุณหภูมิ 200-550°C สอดคล้องกับงานวิจัยของ Fatemeh E. และคณะ [25] และงานวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] เนื่องมาจากการสลายตัวของโครงสร้างออร์แกโนไซเลนที่เกิดการยึดเกาะบนอนุภาค ZnO

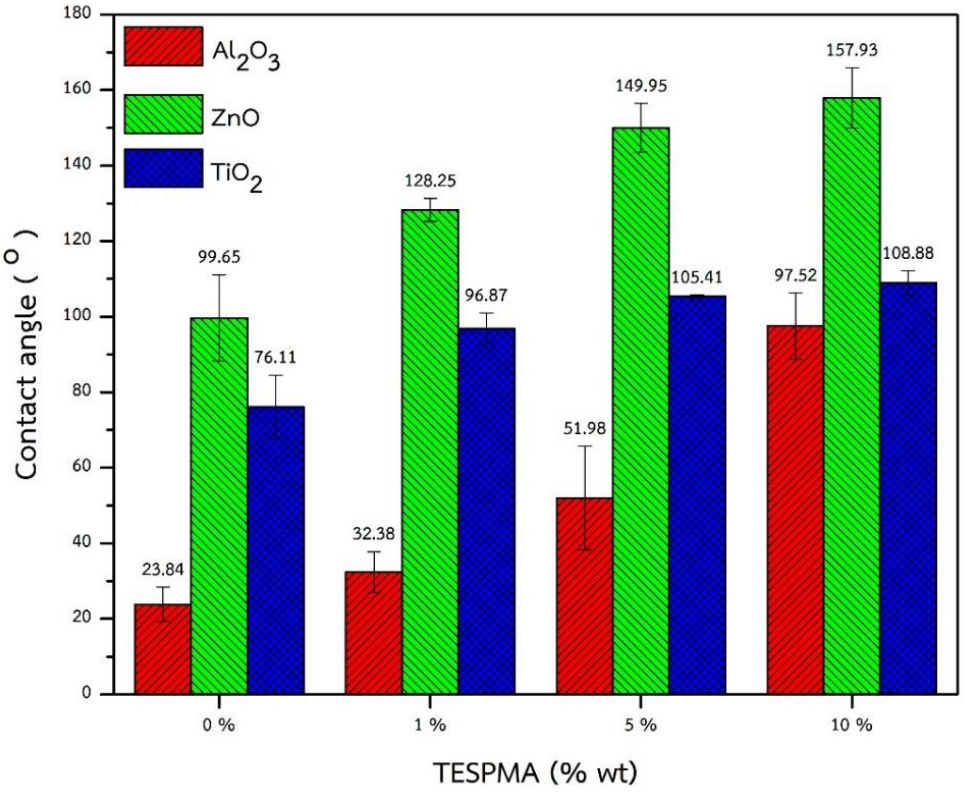
พิจารณาประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวแสดงดังตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ modified ZnO ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt จากการคำนวณ มีค่า 17%, 34.2% และ 27.3% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวมีค่าสูงสุด 34.2% ในตัวอย่าง 5m- ZnO สอดคล้องงานวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] พบว่าที่ปริมาณไซเลนน้อยๆ โมเลกุลของไซเลนจะเกาะบนผิวของอนุภาคแบบการยึดเกาะแบบตำแหน่งเดียว เมื่อปริมาณ TESPMA เพิ่มขึ้น จะเกิดการยึดเกาะแบบ 2 ตำแหน่ง หรือ 3 ตำแหน่ง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวลดลงจากการขัดขวาง จากรูปร่างของอะตอม ในโครงสร้างของไซเลน

กราฟ TGA ของ modified TiO_2 แสดงดังรูปที่ 4.15 (e) และกราฟ DTG ดังรูปที่ 4.15 (f) พบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักลดลง 0.77%, 0.84%, 2.33% และ 3.25% ในตัวอย่าง TiO_2, 1m-TiO_2, 5m-TiO_2 และ 10m-TiO_2 ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์น้ำหนักของตัวอย่างจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณ TESPMA เพิ่มมากขึ้น พิจารณารูปที่ 4.15 (f) กราฟ DTG พบการระเหยของน้ำบนผิวอนุภาค TiO_2 ณ อุณหภูมิ 100-200°C ดังเช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] พบการระเหยของความชื้นบนผิวอนุภาค TiO_2 ณ อุณหภูมิ 200-300°C และในตัวอย่าง m-TiO_2 พบการสลายตัว ณ อุณหภูมิ 250-500°C ดังงานวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] เนื่องจากเกิดการสลายตัวของโครงสร้างออร์แกโนไซเลน ที่ยึดเกาะบนอนุภาค TiO_2

พิจารณาประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวแสดงดังตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ modified TiO_2 ที่ปริมาณ TESPMA 1, 5 และ 10 %wt จากการคำนวณ มีค่า 7%, 31.2% และ 24.8% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวมีค่าสูงสุด 31.2% ในตัวอย่าง 5m-TiO_2 ดังงานวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] เนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของไซเลน แบบการยึดเกาะแบบหน่วยเดียว ในขณะที่ปริมาณ TESPMA เพิ่มขึ้น จะเกิดการขัดขวางจากรูปร่างของอะตอมในโครงสร้างของไซเลน ทำให้เกิดการยึดเกาะแบบ 2 ตำแหน่ง หรือ 3 ตำแหน่ง ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวจึงลดลงเช่นเดียวกันกับ m-Al_2O_3 และ m-ZnO

4.2.1.3 การทดสอบค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย γ-(triethoxysily)propyl methacrylate (TESPMA)

การทดสอบค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ของโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย TESPMA ทดสอบโดยใช้ glass slide method ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ค่ามุมสัมผัสของ Al_2O_3, ZnO, TiO_2 และ Al_2O_3, ZnO, TiO_2 ที่ปรับปรุงผิวด้วยด้วย TESPMA ที่ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt

จากการทดสอบพิจารณาตัวอย่าง Al_2O_3, 1m-Al_2O_3, 5 m-Al_2O_3 และ 10m-Al_2O_3 วัดค่ามุมสัมผัส ได้ 23.84°±4.52, 32.38°±5.39, 51.98°±13.74 และ 97.52°±8.72 ตามลำดับ ในตัวอย่าง ZnO, 1m- ZnO, 5 m- ZnO และ 10m- ZnO วัดค่ามุมสัมผัส ได้ 99.65°±11.45, 128.25°±3.05, 149.95°±6.46 และ 157.93°±7.96 ตามลำดับ และสุดท้ายในตัวอย่าง TiO_2, 1m- TiO_2, 5 m- TiO_2 และ 10m- TiO_2 วัดค่ามุมสัมผัสได้ 76.11°±8.38, 96.87°±4.09, 105.41°±0.30 และ 108.88°±3.27 ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณ TESPMA ที่ปรับปรุงผิวในแต่ละสารตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น ค่ามุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นดังงานวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] งานวิจัยของ Nikhita K. และคณะ [36] และงานวิจัยของ Chaoxia W. และคณะ [59] อธิบายถึงการ

ทดสอบค่ามุมสัมผัส ผิวที่วัดมุมสัมผัสได้ 90-120° เป็นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) การปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์ด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน จะส่งผลให้ผิวของโลหะออกไซด์มีความไม่ชอบน้ำเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของโลหะออกไซด์ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ลดลง เพราะเกิดอันตรกิริยากับสารเชื่อมประสานไซเลนแล้ว ส่งผลให้ค่ามุมสัมผัสเพิ่มมากขึ้น บ่งชี้ว่าการปรับปรุงผิวมีส่วนในการเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำของ m-Al_2O_3, m-ZnO และ m-TiO_2 ช่วยเพิ่มความสามารถในการใช้ของโลหะออกไซด์ทางด้านวัสดุคอมโพสิตได้

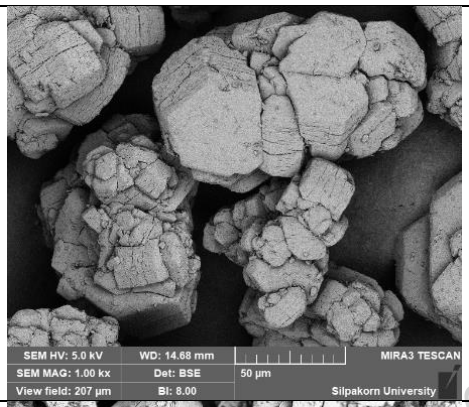
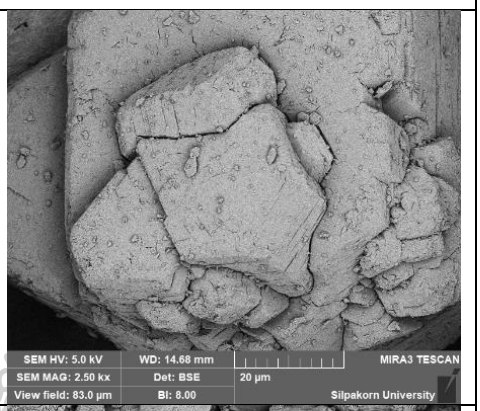
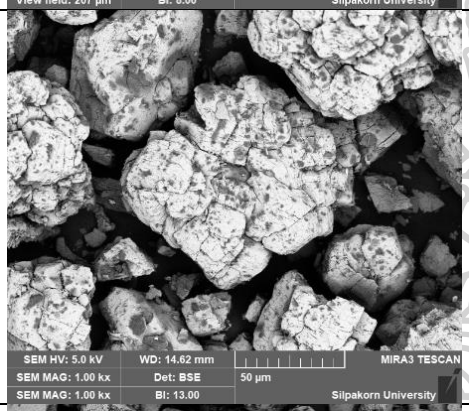
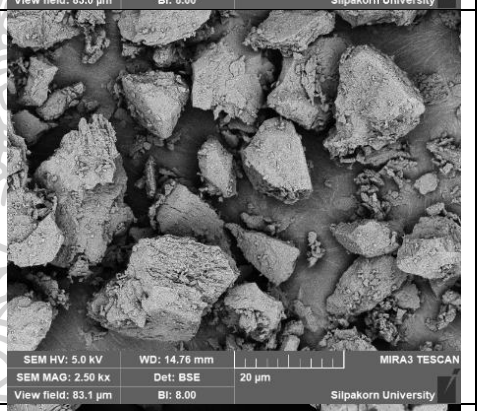
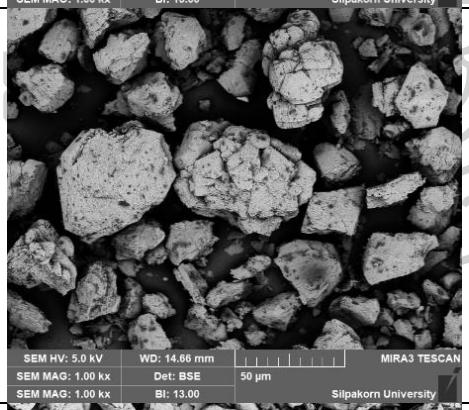
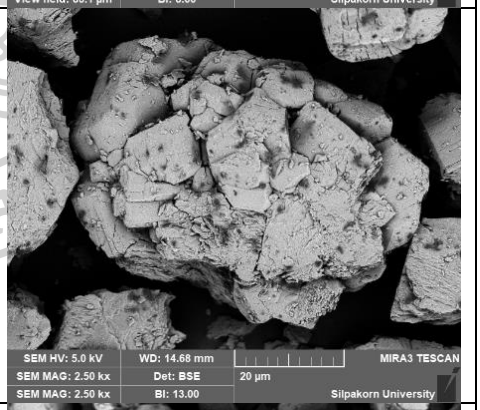
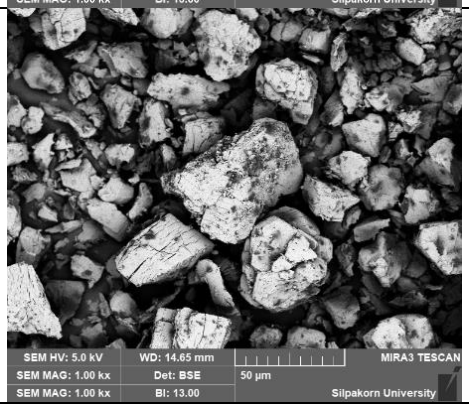
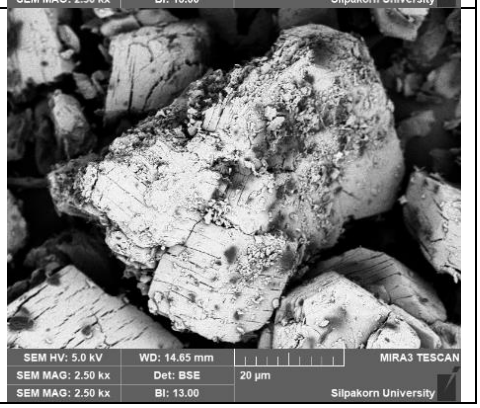
4.2.1.4 การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยโหมด EDS

การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) ของ Al_2O_3, ZnO, TiO_2 และ Al_2O_3, ZnO, TiO_2 ที่ปรับปรุงผิวด้วยด้วย TESPMA ที่ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt พลังงาน 5 kV กำลังขยาย 1000x, 2500x และ 20,000x แสดงตารางที่ 4.8, 4.9, และ4.10 และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยโหมด EDS แสดงดังรูปที่ 4.17,4.18 และ 4.19

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ Al_2O_3 และ modified Al_2O_3 ที่ปรับปรุงผิวด้วยด้วย TESPMA ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt แสดงดังตารางที่ 4.8 จากการสังเกตพบว่า unmodified Al_2O_3 มีรูปร่างเป็นทรงกลมไม่สม่ำเสมอ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Manyasree D. และคณะ [22] และงานวิจัยของ Quanquan H. และคณะ [30] พบว่าอนุภาคมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ เมื่อได้รับแรงกระแทกอนุภาคจะเกิดการแตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก

และจากการทดสอบยังพบลักษณะผิวหยาบและมีรอยแตกระหว่างผิว เมื่อนำไปผ่านการปรับปรุงผิวด้วย TESPMA ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt อนุภาคจะเกิดการแตกออก ทำให้มีขนาดเล็กลงเนื่องมาจากการกวน และบริเวณผิวจะมีความหยาบมากขึ้นจากการแตกออกของอนุภาคบางส่วน บริเวณผิวของตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นจุดสีดำ เนื่องมาจากชิ้นงานทดสอบมีการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยทองซ้ำ 2 รอบ ในช่วงเวลาที่ต่างกัน

ตารางที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของ Al_2O_3 และ modified Al_2O_3 ที่ปริมาณ TESPMA, 5%wt, 10%wt พลังงาน 5 kV กำลังขยาย 1000x และ 2500x ตามลำดับ

	1000x	2500x
Al_2O_3		
1m-Al_2O_3		
5m-Al_2O_3		
10m-Al_2O_3		

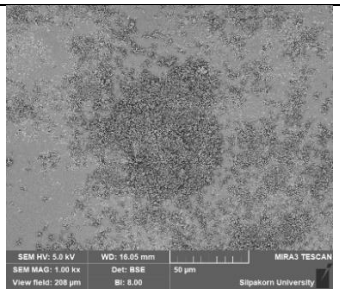
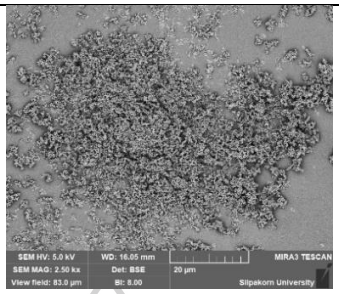
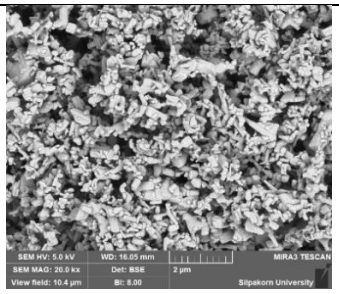
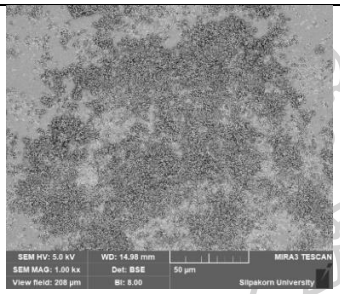
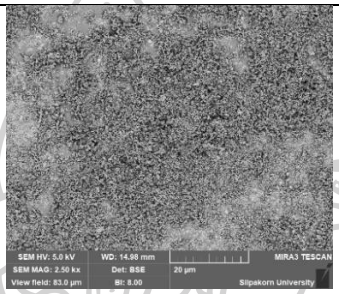
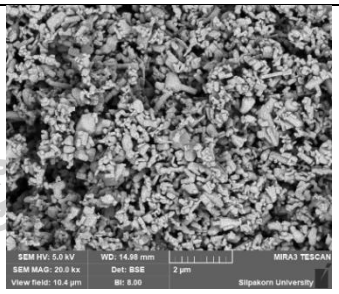
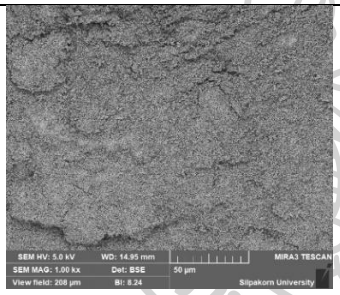
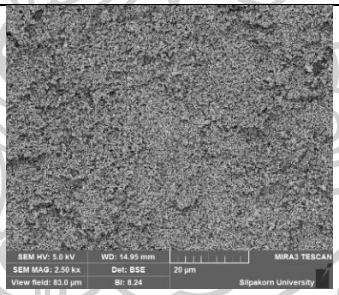
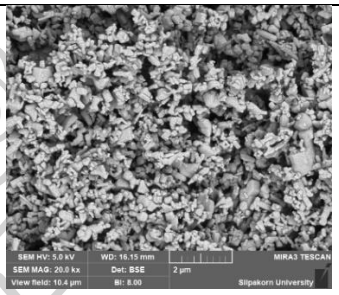
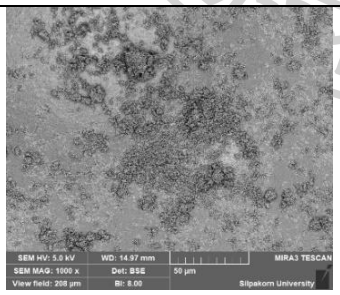
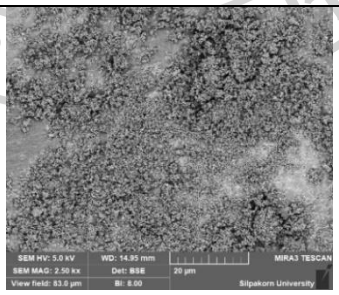
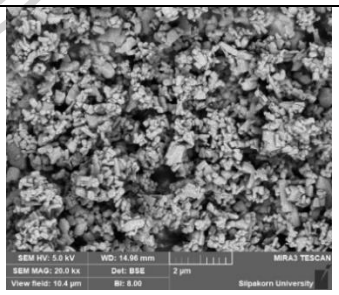
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ ZnO และ modified ZnO ที่ปรับปรุงผิวด้วยด้วย TESPMA ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt แสดงตารางที่ 4.9 ที่กำลังขยาย 1,000x, 2,500x และ 20,000x อนุภาคของ ZnO มีลักษณะรูปทรงเหลี่ยมที่ไม่แน่นอน ขนาดไม่เกิน 2 μm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shiv S. [51] พบว่าอนุภาค ZnO มีลักษณะเป็นทรงลูกบาศก์

และสังเกตได้ว่า ZnO มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค เมื่อทำการปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 1%wt พบว่าอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันน้อยลง และเมื่อเพิ่มปริมาณ TESPMA เป็น 5%wt พบว่ามีการกระจายตัวมากกว่าในตัวอย่าง 1m-ZnO แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ TESPMA อนุภาค ZnO จะมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nikhita K. และคณะ [36] และงานวิจัยของ Yongchun L. และคณะ [40] ทำการศึกษา ZnO ที่ปรับปรุงผิวด้วยไซเลน พบว่าอนุภาค ZnO ที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุงผิวจะมีการเกาะกลุ่มกันเองอย่างหนาแน่น ในขณะที่อนุภาค ZnO ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยไซเลน จะมีการกระจายตัวที่ดีขึ้น และเมื่อปริมาณไซเลนมากขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคก็ยิ่งดีขึ้นตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงผิวช่วยป้องกันไม่ให้อนุภาครวมตัวกัน แต่ในทางกลับกันตัวอย่างที่ 10m-ZnO อนุภาค ZnO กลับมีการเกาะกลุ่มกันอีกครั้ง

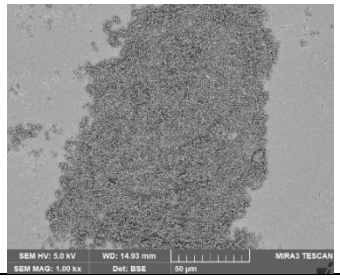
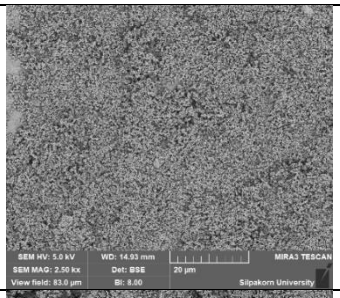
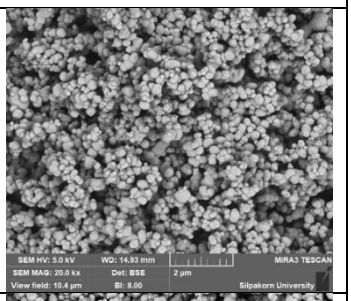
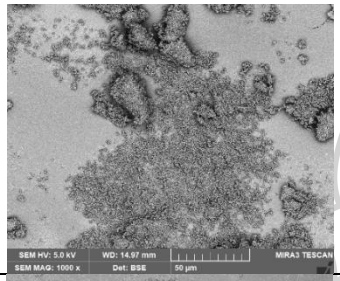
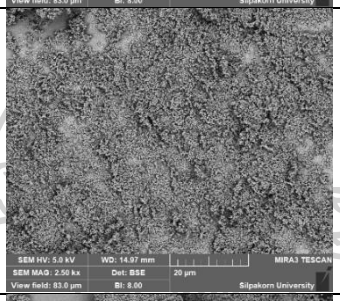
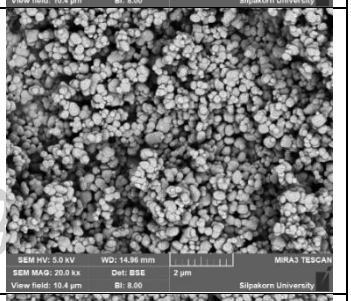
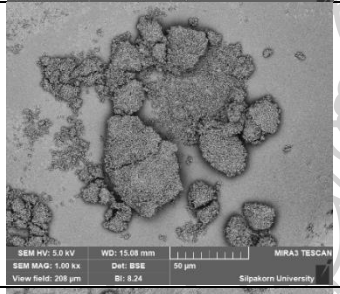
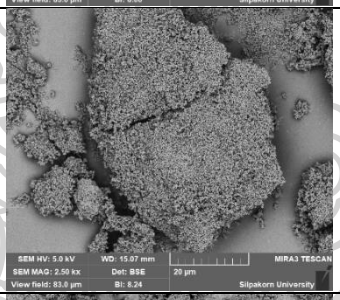
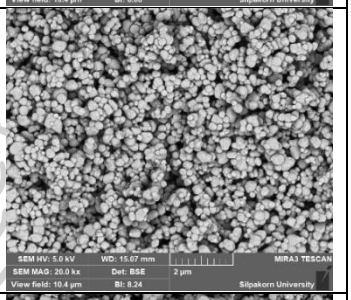
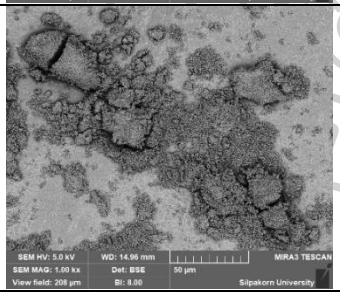
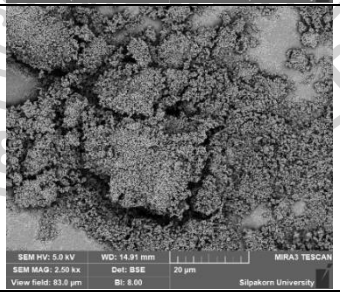
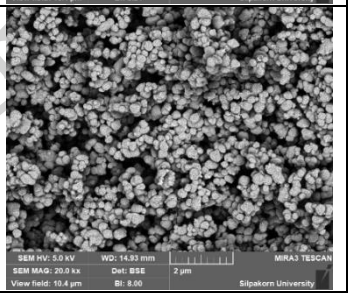
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ TiO_2 และ modified TiO_2 ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt แสดงดังตารางที่ 4.10 ที่กำลังขยาย 1,000x, 2,500x และ 20,000x อนุภาคของ TiO_2 มีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดน้อยกว่า 1 μm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Natnaree A. และคณะ [9] พบว่าอนุภาค TiO_2 มีลักษณะเป็นทรงกลมและมีการกระจายตัวที่ดี

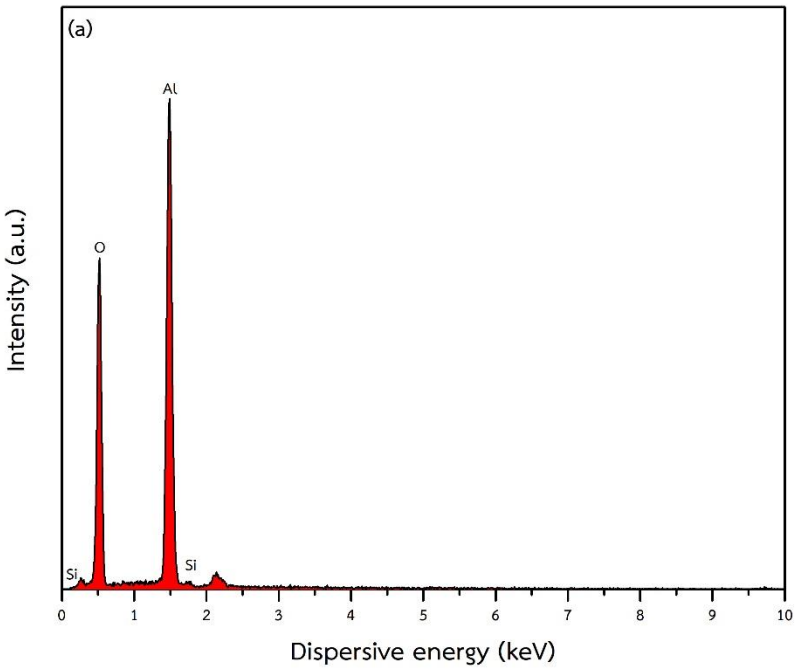
พิจารณา unmodified TiO_2 พบว่าอนุภาคมีการกระจายตัวที่ดี และเมื่อพิจารณา 1m-TiO_2, 5m-TiO_2 และ 10m-TiO_2 พบว่า อนุภาคจะเกิดการเกาะกลุ่มกันมากขึ้นเมื่อปริมาณ TESPMA เพิ่มขึ้นตามลำดับ และจากงานวิจัยของ Thuy-Chinh N. และคณะ [18] พบว่าการปรับปรุงผิวของอนุภาคไม่ทำให้ขนาดหรือรูปร่างของอนุภาคเปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของ ZnO และ modified ZnO ที่ปริมาณ TESPMA 1%wt, 5%wt, 10%wt พลังงาน 5 kV กำลังขยาย 1000x, 2500x และ 20,000x ตามลำดับ

	1000x	2500x	20,000x
ZnO			
1m-ZnO			
5m-ZnO			
10m-ZnO			

ตารางที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของ TiO_2 และ modified TiO_2 ที่ปริมาณ TESPMA 1%wt, 5%wt, 10%wt พลังงาน 5 kV กำลังขยาย 1000x, 2500x และ 20,000x ตามลำดับ

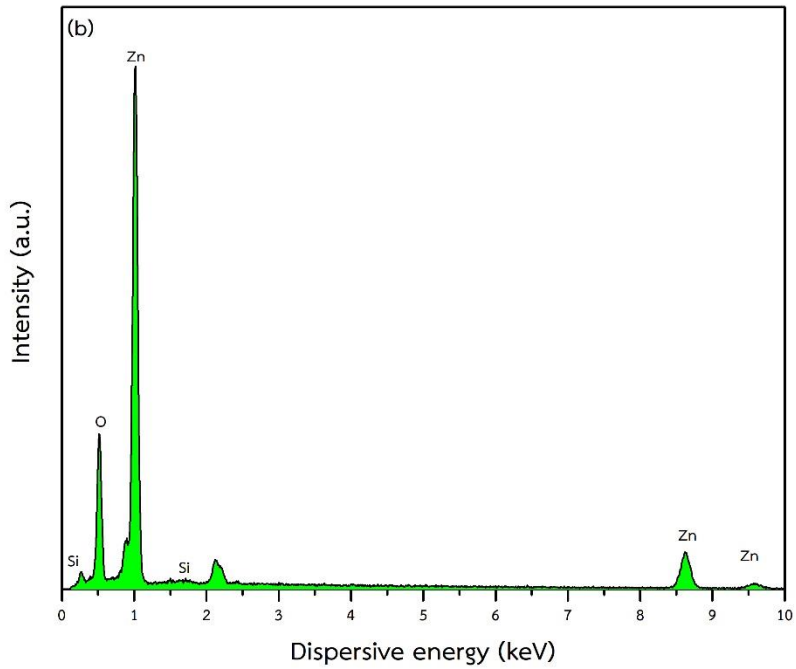
	1000x	2500x	20,000x
TiO_2			
1m- TiO_2			
5m-TiO_2			
10m-TiO_2			



รูปที่ 4.17 EDS spectra ของ 5m-Al_2O_3

ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบทางเคมีของ 5m-Al_2O_3

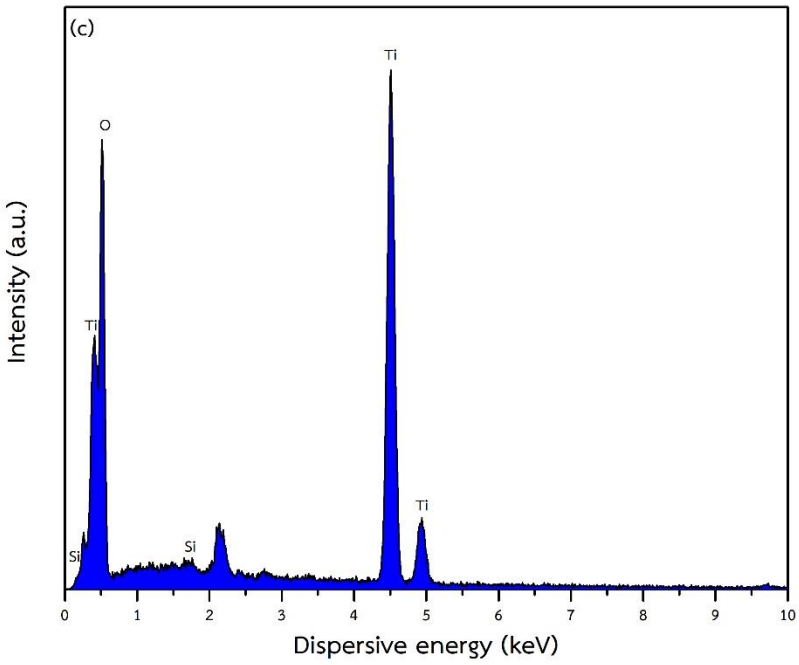
Element	Weight %	Atomic %
Al	52.91	40.16
O	46.29	59.26
Si	0.80	0.58



รูปที่ 4.18 EDS spectra ของ 5m-ZnO

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของ 5m-ZnO

Element	Weight %	Atomic %
Zn	79.28	48.85
O	19.78	49.81
Si	0.94	1.34



รูปที่ 4.19 EDS spectra ของ 5m-TiO_2

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบทางเคมีของ 5m-TiO_2

Element	Weight %	Atomic %
Ti	58.85	32.52
O	40.30	66.67
Si	0.85	0.80

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ Al_2O_3, Zn และ TiO_2 ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย TESPMA ที่ปริมาณ 5 %wt แสดงดังรูปที่ 4.17, 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ โดยใช้ SEM โหมด EDS พลังงาน 15 kV ในการทดสอบและแสดงเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบ ในตัวอย่าง 5m-Al_2O_3 ดังรูปที่ 4.17 องค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้ ได้แก่ Al, O และ Si โดย Al และ O เป็นธาตุองค์ประกอบหลักของ Al_2O_3 สอดคล้องกับงานวิจัยของ AO A. และคณะ [5] พบธาตุ Si จากการปรับปรุงผิวของ Al_2O_3 เมื่อนำไปผสมกับเมทริกซ์พอลิเมอร์ แสดงให้เห็นว่าไซเลน เกิดการยึดเกาะบนผิวของ Al_2O_3 และจากตารางที่ 4.11 องค์ประกอบทางเคมีของ 5m-Al_2O_3 จากการทดสอบพบอัตราส่วนของ Al ต่อ O เท่ากับ 40.16 ต่อ 59.26 สอดคล้องกับสูตรเคมี Al_2O_3 ซึ่งมีอัตราส่วนของ Al ต่อ O ใกล้เคียง 2 ต่อ 3 และพบปริมาณของ Si 0.58% มาจากสารเชื่อมประสานไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงผิวอนุภาค

ในตัวอย่าง 5m-ZnO ดังรูปที่ 4.18 องค์ประกอบที่พบ ได้แก่ Zn, O และ Si โดย Zn และ O เป็นธาตุองค์ประกอบหลักของ ZnO สอดคล้องกับงานวิจัยของ Nikhita K. และคณะ [36] ทำการศึกษา ZnO ที่ปรับปรุงผิวด้วยไวนิลไตรอีทอกซีไซเลน พบธาตุ Si เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างทดสอบเนื่องจากไซเลน เกิดการยึดเกาะบนผิวของ ZnO และจากตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของ 5m-ZnO จากการทดสอบพบอัตราส่วนของ Zn ต่อ O เท่ากับ 48.85 ต่อ 49.81 สอดคล้องกับสูตรเคมี ZnO ซึ่งมีอัตราส่วนของ Zn ต่อ O มีค่า 1 ต่อ 1 และพบปริมาณของ Si 1.34% จากสารเชื่อมประสานไซเลนที่ใช้ในการปรับปรุงผิวอนุภาค

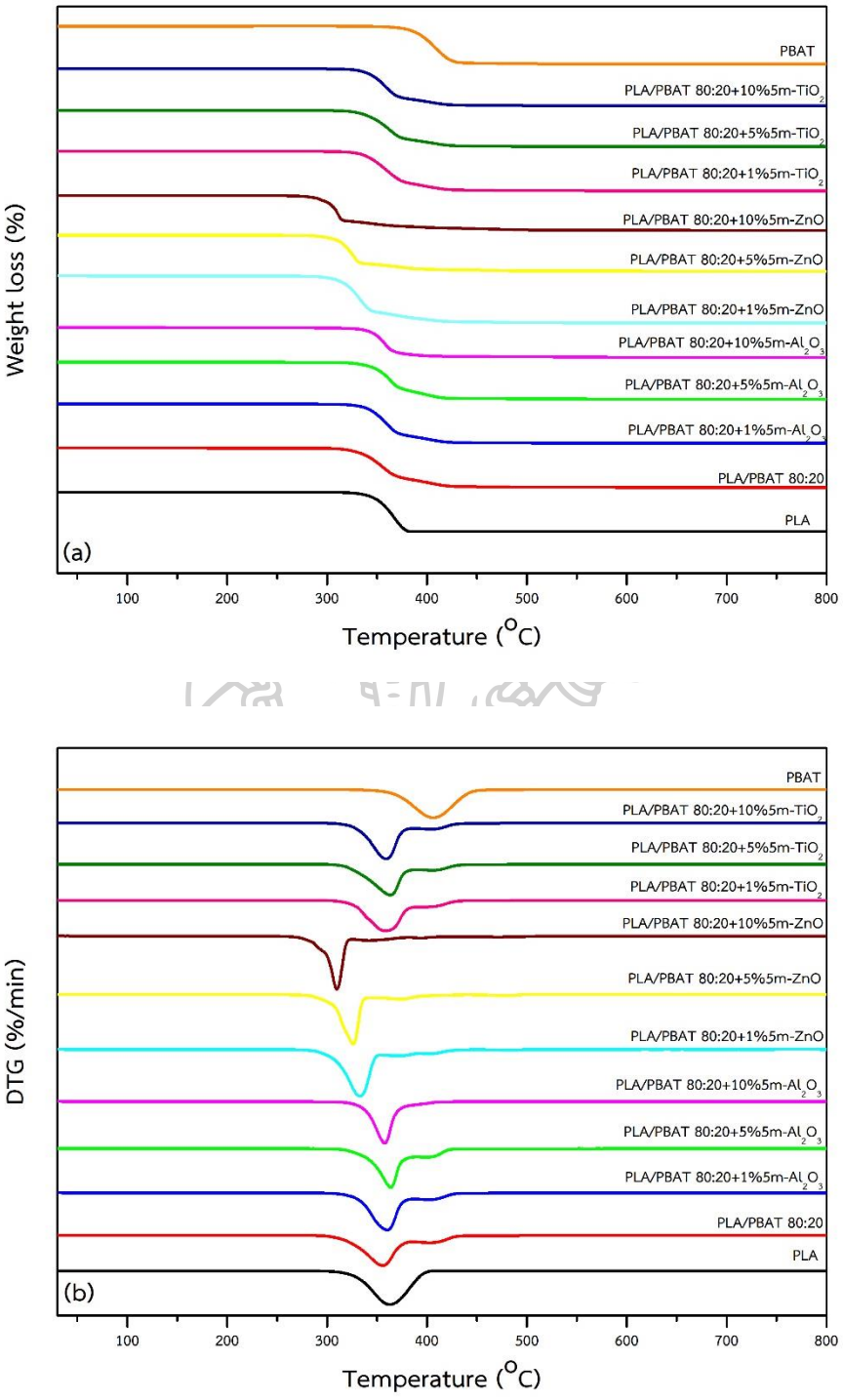
และในตัวอย่าง 5m-TiO_2 ดังรูปที่ 4.19 องค์ประกอบที่วิเคราะห์ได้ ได้แก่ Ti, O และ Si โดย Ti และ O เป็นธาตุองค์ประกอบหลักของ TiO_2 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jong-Ho K. และคณะ [38] ทำการศึกษาการยึดเกาะของไซเลนบนผิว TiO_2 พบว่าการยึดเกาะของไซเลนบนผิวของ TiO_2 จะสมบูรณ์นั้นต้องพบพีคองค์ประกอบของธาตุ Si และจากงานวิจัยของ Agnieszka W. และคณะ [58] พบว่าปริมาณ Si ที่พบจะมากขึ้นตามความเข้มข้นของไซเลนที่ใช้ และจากตารางที่ 4.13 องค์ประกอบทางเคมีของ 5m-TiO_2 จากการทดสอบพบอัตราส่วนของ Ti ต่อ O เท่ากับ 32.52 ต่อ 66.67 สอดคล้องกับสูตรเคมี TiO_2 ซึ่งมีอัตราส่วนของ Ti ต่อ O มีค่า 1 ต่อ 2 และพบปริมาณของ Si 0.80% จากการปรับปรุงผิวอนุภาคด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน

4.2.2 การศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO)

จากการศึกษาเอกลักษณ์ของโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย TESPMA ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt จากผลการทดสอบ FTIR, TGA, ค่ามุมสัมผัส และการศึกษาสัณฐานวิทยา ได้ทำการเลือก m-Al_2O_3, m-ZnO และ m-TiO_2 ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA ปริมาณ 5 %wt ซึ่งมีประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวที่สูงสุด เนื่องมาจากการยึดเกาะของไซเลนบนผิวอนุภาคโลหะออกไซด์ที่ดี เพื่อใช้ในการเตรียม PLA/PBAT 80:20+5m-MO ต่อไป

4.2.2.1 การศึกษาเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) ด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA)

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ 30°C ถึง 800°C อัตราการให้ความร้อน 10°C/min เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt และ PBAT ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.20 และตารางที่ 4.14



รูปที่ 4.20 กราฟ TGA (a) และกราฟ DTG (b) ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt และ PBAT

ตารางที่ 4.14 อุณหภูมิการสลายตัวของของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20 +5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt และ PBAT

Sample	PLA (°C)			PBAT (°C)			Residue (%)
	T_d	T_{onset}	T_{endset}	T_d	T_{onset}	T_{endset}	
PLA	367.5	348.5	377.6	-	-	-	3.4
PLA/PBAT 80:20	355.7	331.9	367.4	403.8	394.4	419.7	4.8
PLA/PBAT 80:20+ 1% 5m-Al_2O_3	360.2	339.5	369.7	402.2	395.9	418.6	4.4
PLA/PBAT 80:20+ 5% 5m-Al_2O_3	364.3	345.7	370.6	400.2	396.5	415.1	10.6
PLA/PBAT 80:20+ 10% 5m-Al_2O_3	364.7	348.4	371.4	390.8	389.7	413.5	11.2
PLA/PBAT 80:20+ 1% 5m-ZnO	332.8	311.1	343.3	379.0	370.0	407.2	6.9
PLA/PBAT 80:20+ 5% 5m-ZnO	327.2	312.7	331.4	374.5	368.9	387.1	11.6
PLA/PBAT 80:20+ 10% 5m-ZnO	311.3	302.0	314.4	341.3	331.8	360.9	20.1
PLA/PBAT 80:20+ 1% 5m-TiO_2	359.0	337.9	373.1	398.8	398.2	419.4	3.9
PLA/PBAT 80:20+ 5% 5m-TiO_2	362.8	341.2	372.4	406.3	400.2	421.9	12.0
PLA/PBAT 80:20+ 10% 5m-TiO_2	359.5	340.9	369.3	404.8	396.0	419.3	9.9
PBAT	-	-	-	408.3	387.2	423.9	8.6

จากการทดสอบ Thermogravimetric analysis ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt และ PBAT กราฟ TGA แสดงดังรูปที่ 4.20 (a) และกราฟ DTG แสดงดังรูปที่ 4.20 (b) และตารางที่ 4.14

พิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 พบอุณหภูมิการสลายตัว 2 ขั้น ขั้นที่ 1 ช่วงอุณหภูมิ 339-372°C และขั้นที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ 389-419°C ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA และ PBAT ตามลำดับ ดังผลการทดสอบ TGA ในการทดลองตอนที่ 1 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิขั้นที่ 1 พบว่า เมื่อปริมาณของ 5m-Al_2O_3 เพิ่มขึ้นที่ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt อุณหภูมิการสลายตัว (T_d) จะสูงขึ้นเล็กน้อย ได้แก่ 360.2°C, 364.3°C และ 364.67°C ตามลำดับ และมีค่าสูงกว่าในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20 แสดงให้เห็นว่า 5m-Al_2O_3 ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับ PLA เนื่องจากอนุภาค 5m-Al_2O_3 สามารถดูดซับความร้อนไว้ได้ก่อนความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังพอลิเมอร์ ดังงานวิจัยของ Jing C. และคณะ [13] ศึกษาวัสดุคอมโพสิต Polyimide/Al_2O_3 พบว่าเมื่อผสม Al_2O_3 ลงไปเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตดีขึ้น เนื่องจากอนุภาค Al_2O_3 จะทำหน้าที่เสมือนฉนวนความร้อนกระจายตัวทั่วพอลิเมอร์ ทำให้ความร้อนถ่ายเทผ่านวัสดุคอมโพสิตช้าลง ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนสูงขึ้น ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาอุณหภูมิขั้นที่ 2 พบว่าเมื่อปริมาณของ 5m-Al_2O_3 เพิ่มขึ้น อุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT จะมีค่าใกล้เคียงกับในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhibo Z. และคณะ [69] ที่การผสมอนุภาคออกไซด์จะมีผลกับอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA มากกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างของ PBAT มีความเสถียรต่อความร้อนมากกว่าโครงสร้างอะลิฟาติกของ PLA

พิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO พบว่าเมื่อผสม 5m-ZnO ลงในวัสดุคอมโพสิต จะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของ PLA และ PBAT ลดลง ซึ่งอุณหภูมิของ PLA แสดงดังการสลายตัวขั้นที่ 1 ช่วงอุณหภูมิ 302-344°C และอุณหภูมิของ PBAT แสดงอุณหภูมิการสลายตัวขั้นที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ 331-408°C เนื่องจาก ZnO ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ช่วยเร่งการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต ดังงานวิจัยของ Udangshree B. และคณะ [11] ศึกษาการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิต PLA ผสมนาโน ZnO พบว่าการผสมนาโน ZnO ลงใน PLA จะส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องมาจากพฤติกรรมการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของ ZnO โดยเมื่อ ZnO ได้รับพลังงานความร้อน จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวกลับเป็นโมโนเมอร์และทรานส์เอสเทอริฟิเคชั่นใน PLA ส่งผลให้เกิดการแตกออกของสายโซ่พอลิเมอร์ และจากงานวิจัยของ Zhibo Z. และคณะ [69] ศึกษาฟิล์มคอมโพสิตของ PBAT/PLA/ZnO พบว่า ZnO ช่วยเร่งการแตกตัวกลับเป็นโมโนเมอร์ของฟิล์มคอมโพสิตเมื่อปริมาณของ ZnO เพิ่มมากขึ้น

และนอกจากนี้ PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO ยังพบอุณหภูมิการสลายตัวขั้นที่ 3 ช่วงอุณหภูมิ 396-498°C จากงานวิจัยของ Insoo K. และคณะ [37] ศึกษาฟิล์มคอมโพสิตของ PLA/ZnO พบการสลายตัวทั้งหมด 3 ช่วง ช่วงที่ 1 ณ อุณหภูมิ 140°C เกิดจากการระเหยของความชื้นภายในฟิล์ม ช่วงที่ 2 ณ อุณหภูมิ 240-345°C มีการลดลงของน้ำหนักถึง 96 % เกิดจากการสลายพันธะเอสเตอร์ด้วยกระบวนการแตกตัวกลับเป็นโมโนเมอร์ และช่วงที่ 3 ณ อุณหภูมิ 400-460°C เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของสายโซ่พอลิเมอร์ และการผสม ZnO ไม่ได้เพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของ PLA เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่ดี และการรวมตัวกันของอนุภาค ZnO ภายในเมทริกซ์ PLA และงานวิจัยของ Blanca I. R. และคณะ [49] ศึกษาวัสดุคอมโพสิต PLA/ZnO พบการสลายตัวทางความร้อน 2 ขั้น ขั้นแรกเกิดขึ้น ณ อุณหภูมิ 170-330°C เนื่องมาจากการสลายตัวของ PLA ที่อยู่ใกล้อนุภาค ZnO ขั้นที่ 2 ช่วง 367-425°C สัมพันธ์กับการสลายตัวของ PLA ที่อยู่ห่างจากอนุภาค ZnO โดยเมื่อ ZnO ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแตกตัวกลับเป็นโมโนเมอร์ ให้ PLA ที่อยู่ใกล้อนุภาค ZnO เกิดการสลายตัวเร็วขึ้น

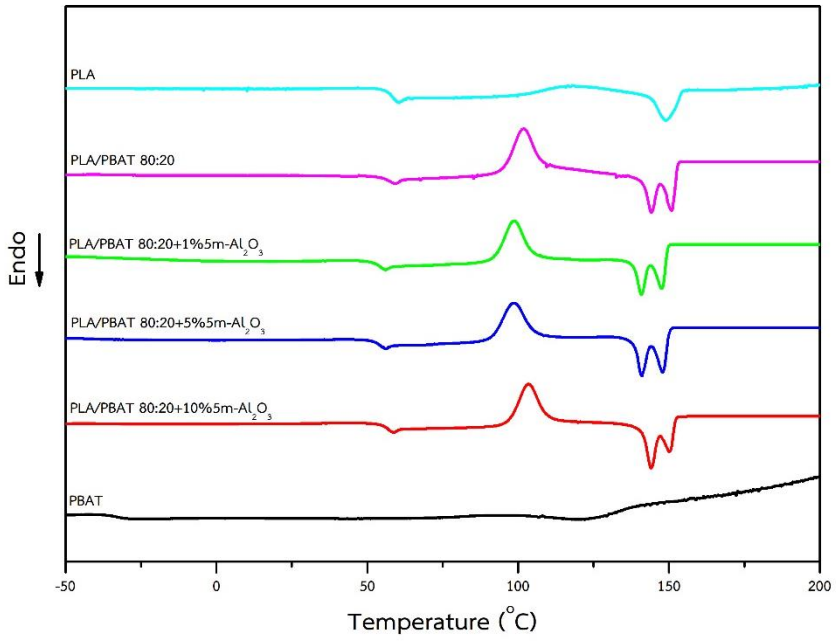
และอุณหภูมิการสลายตัวทั้ง 2 ขั้น มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของ 5m-ZnO เพิ่มขึ้นที่ปริมาณ 1, 5 และ 10 %wt ได้แก่ 332.83°C, 327.17°C, 311.33°C และ 379.00°C, 374.50°C, 341.33°C ตามลำดับ ดังงานวิจัยของ Udangshree B. และคณะ [11] พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO ในวัสดุคอมโพ

สิตเพิ่มขึ้น เสถียรภาพทางความร้อนของ PLA จะลดลง เนื่องจากปริมาณ ZnO ที่เพิ่มขึ้นจะยิ่งกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวกลับเป็นโมโนเมอร์

พิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 พบอุณหภูมิการสลายตัว 2 ขั้น เช่นเดียวกับในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 ขั้นที่ 1 ช่วงอุณหภูมิ 340-374°C และขั้นที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ 395-422°C สอดคล้องกับอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA และ PBAT ตามลำดับ การผสมอนุภาค 5m-TiO_2 ส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20 แสดงให้เห็นว่า 5m-TiO_2 ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับวัสดุคอมโพสิต เนื่องจากอนุภาคของ 5m-TiO_2 ทำหน้าที่ชะลอการถ่ายเทความร้อน ดังงานวิจัยของ Muhammad G. และคณะ [35] และงานวิจัยของ Haichen Z. และคณะ [67] ศึกษาวัสดุคอมโพสิต PLA/TiO_2 พบว่าเมื่อผสม TiO_2 ลงใน PLA อุณหภูมิการสลายตัวของวัสดุคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้น วัสดุคอมโพสิตสามารถทนต่อความร้อนได้มากขึ้น เนื่องจากอนุภาค TiO_2 ทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวกั้นความร้อน เมื่ออนุภาคกระจายอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์จะดูดซับพลังงานความร้อนไม่ให้แพร่กระจายอย่างรวดเร็วไปยังสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้กระบวนการสลายตัวทางความร้อนเกิดช้าลง หากกระจายตัวได้ดีจะเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ให้มากขึ้น แต่ถ้าหากอนุภาครวมกลุ่มกันเองจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการชะลอการถ่ายเทความร้อนลดลง อุณหภูมิการสลายตัวทั้ง 2 ขั้น มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อผสม 5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 1 และ 5 %wt ตามลำดับ และมีค่าลดลงเมื่อทำการผสม 5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 10 %wt เนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของอนุภาค ดังงานวิจัยของ Haichen Z. [67] ที่กล่าวไปข้างต้น

4.2.2.2 การศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหาปริมาณผลึกของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) ด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ -50°C ถึง 200°C อัตราการให้ความร้อน 3°C/min โหมด Heat-Cool-Heat เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ของวัสดุคอมโพสิตและปริมาณผลึกของวัสดุคอมโพสิต ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt และ PBAT แสดงดังรูปที่ 4.21, 4.22, 4.23 และตารางที่ 4.15

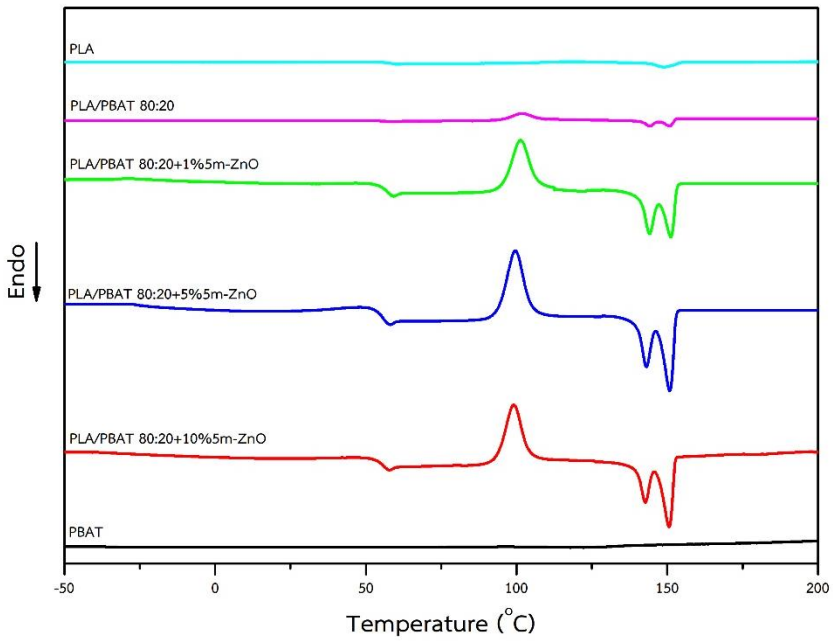


รูปที่ 4.21 กราฟ DSC ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 ที่ปริมาณ 5m-Al_2O_3 1, 5, 10 %wt และ PBAT

จากการศึกษา Differential scanning calorimetry ของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, แสดงดังรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.15 ค่า T_g ของ PLA ปรากฏพีคที่ประมาณ 59.9°C, 60.0°C และ 60.4°C ที่ปริมาณ 5m-Al_2O_3 1, 5 และ 10 %wt ตามลำดับ และมีค่า T_m ปรากฏ 2 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ค่า T_{m1} ของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 ที่ปริมาณ 5m-Al_2O_3 1, 5, 10 %wt มีค่า 144.9°C, 145.2°C และ 145.9°C ตามลำดับ ค่า T_{m2} มีค่า 151.7°C, 152.2°C และ 152.2°C แสดงถึงการเกิดโครงสร้างผลึก 2 รูปแบบดังที่กล่าวในผลการทดสอบ DSC ตอนที่ 1 สำหรับค่า T_{cc} จะปรากฏพีค ณ อุณหภูมิช่วง 102.1-105.3°C มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT 80:20 สังเกตได้ว่าค่า T_g, T_{m1}, T_{m2} และ T_{cc} มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของ 5m-Al_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ดังงานวิจัยของ Fatima Zohra Y. และคณะ [63] พบว่าการเติมอนุภาค Al_2O_3 ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงต่างๆ

ในส่วนของปริมาณผลึกมีค่าลดลงเมื่อผสม 5m-Al_2O_3 ลงไปใน PLA/PBAT 80:20 ที่ปริมาณ 1 และ 5 %wt จะมีค่า 3.0% และ 1.6% แสดงให้เห็นว่าอนุภาค 5m-Al_2O_3 ขัดขวางการเกิดผลึกของ PLA เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ดี ส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของ 5m-Al_2O_3 เพิ่มขึ้นเป็น 10 %wt ปริมาณผลึกของ PLA มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.2% ในงานวิจัยของ Bianying W. และคณะ [60] ศึกษาการปรับปรุงความสามารถในการนำความร้อนของ PLA ที่ผสม Al_2O_3 พบว่าเมื่อปริมาณของ Al_2O_3 เพิ่มมากขึ้น ค่า T_m มีค่าลดลงและปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการกระจายตัวที่มากขึ้นของอนุภาค Al_2O_3 ทำหน้าที่เป็นสารเหนี่ยวนำการเกิดผลึก

มหาวิทยาลัยศิลปากร



รูปที่ 4.22 กราฟ DSC ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO ที่ปริมาณ 5m-ZnO 1, 5, 10 %wt และ PBAT

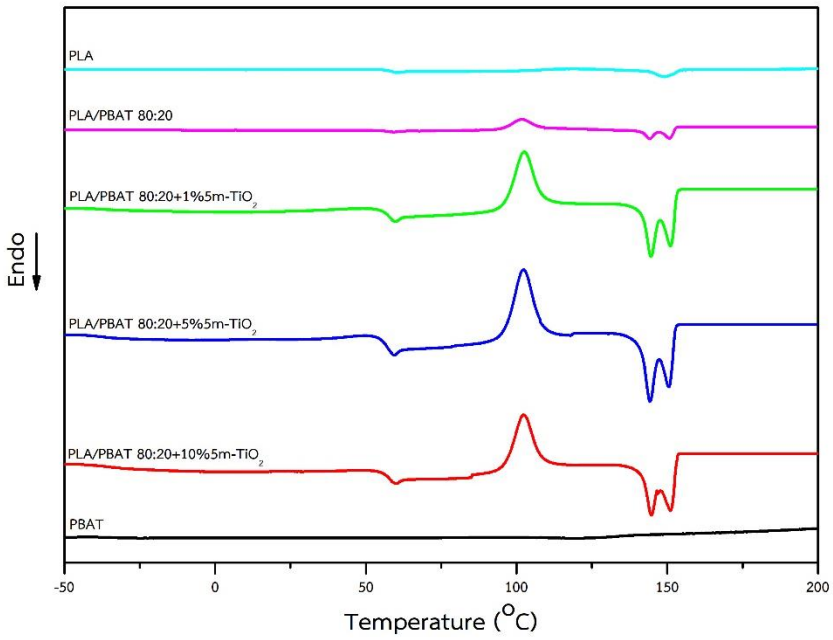
เมื่อพิจารณากราฟ DSC ของ PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO ดังรูปที่ 4.22 และตารางที่ 4.15 ค่า T_g ของ PLA ปรากฏพีคที่ประมาณ 59.65°C, 59.15°C และ 59.1°C ที่ปริมาณ 5m-ZnO 1, 5 และ 10 %wt ตามลำดับ และมีค่า T_m ปรากฏ 2 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ค่า T_{m1} ของ PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO ที่ปริมาณ 5m-ZnO 1, 5, 10 %wt มีค่า 144.65°C, 144.45°C และ 144.2°C ตามลำดับ ค่า T_{m2} มีค่า 151.85°C, 152.35°C และ 152.2°C สำหรับค่า T_{cc} จะปรากฏพีค ณ อุณหภูมิช่วง 100.55-101.95°C มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT 80:20 และมีปริมาณผลึก X_c 3.5%, 3.1% และ 3.6% ตามลำดับ

สังเกตได้ว่าค่า T_g และ T_{m1} ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนค่า T_{m2} มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังงานวิจัยของ Insoo K. และคณะ [37] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO ค่า T_m จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอนุภาค ZnO จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PLA บริเวณผลึกทำให้การหลอมเหลวของผลึกช้าลง จากงานวิจัยของ Tongsai J. และคณะ [32] พบว่าการที่ค่า T_m เพิ่มนั้นเนื่องมาจากการกระจายตัวของ ZnO ในเมทริกซ์ PLA ซึ่งมีผลต่อกระบวนการเร่งการเกิดผลึก (nucleating efficiency)

ส่วนค่า T_{cc} นั้นมีค่าลดลงตามปริมาณของ 5m-ZnO ที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องงานวิจัยของ Zhenya T. และคณะ [54] พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO ทำให้เกิดการเกิดนิวเคลียสแบบไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้สายโซ่ของ PLA เกิดผลึกได้ ณ อุณหภูมิต่ำลง

ในส่วนของปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสม 5m-ZnO ลงไปในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+1%5m-ZnO และมีค่าลดลงที่ปริมาณ 5m-ZnO 5%wt สอดคล้องกับงานวิจัยของ Insoo K. และคณะ [37] และงานวิจัยของ Zhenya T. และคณะ [54] พบว่าเมื่อเติม ZnO ความเป็นผลึกของ PLA จะลดลง เนื่องจากการกระจายตัวของ ZnO ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ดี และอันตรกิริยาระหว่าง ZnO กับพอลิเมอร์ที่ไม่ดี

และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ปริมาณ 5m-ZnO 10%wt จากงานวิจัยของ Tongsai J. และคณะ [32] พบว่าเมื่อเติม ZnO ลงในพอลิเมอร์ ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของปริมาณผลึกพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม ZnO เนื่องจาก ZnO จะทำหน้าที่เป็นสารเหนี่ยวนำการเกิดผลึกใน PLA และเมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้น ความเป็นผลึกจะลดลงเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่ดีของอนุภาค จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PLA ทำให้จัดเรียงตัวเป็นระเบียบได้น้อยลง ส่งผลให้ปริมาณผลึกลดลง และจากงานวิจัยของ Guang Yu และ Yujia Cheng [65] พบว่าขนาดของอนุภาคส่งผลต่อกระบวนการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ โดยอนุภาคขนาดนาโน มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ส่งผลให้มีจุดเริ่มต้นการเกิดผลึกมาก เหนี่ยวนำให้สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวได้ดีขึ้น ปริมาณผลึกจึงเพิ่มขึ้น ในขณะที่อนุภาคขนาดไมโคร มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำกว่า ส่งผลให้จุดเริ่มต้นการเกิดผลึกน้อยลง อนุภาคขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ปริมาณผลึกจึงลดลง แสดงดังผลการทดสอบของวัสดุคอมโพสิตที่ผสม 5m-Al_2O_3 มีปริมาณผลึกที่น้อยกว่าวัสดุคอมโพสิตที่ผสม 5m-ZnO เนื่องมาจากขนาดอนุภาคของ 5m-Al_2O_3 มีขนาดใหญ่กว่าจึงขัดขวางการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ ในขณะที่อนุภาค 5m-ZnO ขนาดเล็กจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเกิดผลึก



รูปที่ 4.23 กราฟ DSC ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-TiO_2 1, 5, 10 %wt และ PBAT

ในส่วนกราฟ DSC ของ PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ดังรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.15 ค่า T_g ของ PLA ปรากฏพีคที่ประมาณ 59.7°C, 59.65°C และ 59.8°C ที่ปริมาณ 5m-TiO_2 1, 5 และ 10 %wt ตามลำดับ และมีค่า T_m ปรากฏ 2 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ค่า T_{m1} ของ PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-TiO_2 1, 5, 10 %wt มีค่า 144.75°C, 144.75°C และ 144.6°C ตามลำดับ ค่า T_{m2} มีค่า 151.4°C, 151.3°C และ 151.25°C แสดงถึงการเกิดผลึก 2 รูปแบบ สำหรับค่า T_{cc} จะปรากฏพีค ณ อุณหภูมิช่วง 102.4-102.75°C ซึ่งใกล้เคียงกับ PLA/PBAT 80:20

สังเกตได้ว่าค่า T_g, T_{m1}, T_{m2} และ T_{cc} ไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของ 5m-TiO_2 ที่เพิ่มขึ้น ดังงานวิจัยของ Fatima Zohra Y. และคณะ [63] พบว่าการเติมอนุภาค TiO_2 ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงต่างๆ แต่ส่งผลต่อปริมาณผลึก

เมื่อพิจารณาปริมาณผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสม 5m-TiO_2 ลงไปในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+1%5m-TiO_2 ที่ 3.4% และมีค่าลดลงที่ปริมาณ 5m-TiO_2 5%wt ที่ 2.6% และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ปริมาณ 5m-TiO_2 10%wt 3.4% คล้ายกับในโลหะออกไซด์ทั้ง 2 ชนิดที่กล่าวไปข้างต้นจากงานวิจัยของ Haichen Z. และคณะ [67] ศึกษาผลของปริมาณ TiO_2 ในวัสดุคอมโพสิต PLA/TiO_2 พบว่าปริมาณผลึกลดลงเมื่อมีการผสมอนุภาค TiO_2 มากขึ้น เนื่องจากอนุภาค TiO_2 กระจายตัวในเมทริกซ์ PLA ได้ดีจึงขัดขวางการจัดเรียงตัวของสายโซ่ PLA, อนุภาค TiO_2 เหนี่ยวนำให้เกิดนิวเคลียสแบบไม่สม่ำเสมอ ทำให้ไม่ได้ช่วยเพิ่มปริมาณหรือเร่งกระบวนการเกิดผลึกของ PLA อย่างชัดเจน, การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค TiO_2 กับเมทริกซ์ PLA ที่ดี ทำให้สายโซ่แข็งและเคลื่อนที่ได้น้อยลง ส่งผลให้เกิดการเกิดผลึกช้า หรือยับยั้งการเกิดผลึก และ PLA มีความสามารถในการเกิดผลึกที่ต่ำ ดังนั้นการเติม TiO_2 จึงไม่เปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกมากนัก และจากตารางที่ 4.15 ค่า T_g และ T_m ของ PBAT จากการทดสอบไม่ปรากฏค่าในทุกตัวอย่างวัสดุคอมโพสิต PLA/PBAT 80:20+5m-MO

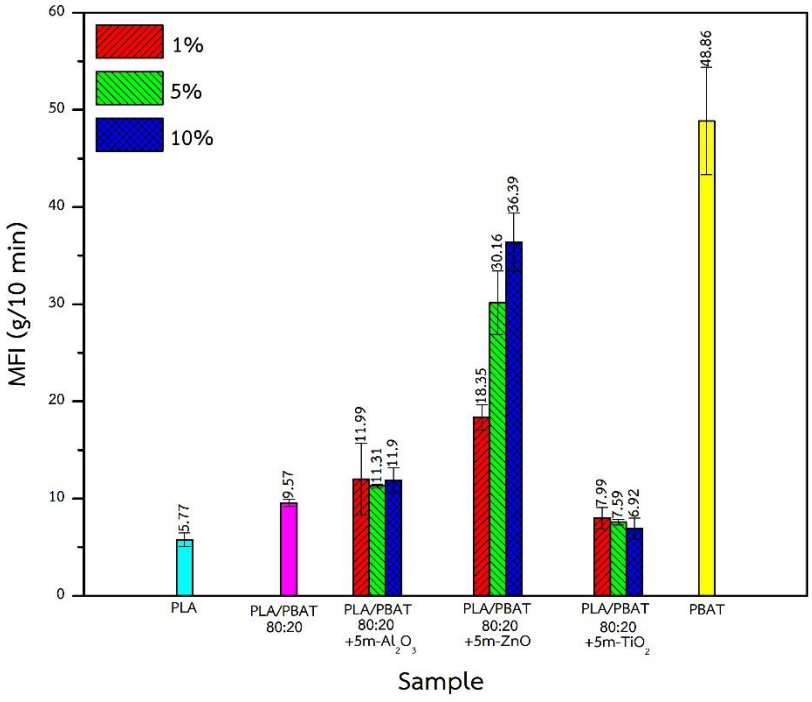
มหาวิทยาลัยศิลปากร

ตารางที่ 4.15 สมบัติทางความร้อนของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt และ PBAT

Sample	T_g (°C) PLA	T_g (°C) PBAT	T_m (°C) PLA		T_m (°C) PBAT	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
			1	2					
PLA	60.5	-	149.1	-	-	116.5	5.5	10.0	4.9
PLA/PBAT 80:20	59.8	-	144.8	151.6	-	102.4	17.9	20.2	3.1
PLA/PBAT 80:20 + 1% 5m-Al_2O_3	59.9	-	144.9	151.7	-	102.6	13.9	16.1	3.0
PLA/PBAT 80:20+ 5% 5m-Al_2O_3	60.0	-	145.2	152.2	-	102.1	15.4	16.5	1.6
PLA/PBAT 80:20+ 10% 5m-Al_2O_3	60.4	-	145.9	152.2	-	105.3	15.5	17.0	2.2
PLA/PBAT 80:20+ 1% 5m-ZnO	59.7	-	144.7	151.9	-	102.0	15.8	18.4	3.5
PLA/PBAT 80:20+ 5% 5m-ZnO	59.2	-	144.5	152.4	-	101.0	15.4	17.5	3.1
PLA/PBAT 80:20+ 10% 5m-ZnO	59.1	-	144.2	152.2	-	100.6	17.0	19.4	3.6
PLA/PBAT 80:20 + 1% 5m-TiO_2	59.7	-	144.8	151.4	-	102.8	13.5	16.0	3.4
PLA/PBAT 80:20+ 5% 5m-TiO_2	59.7	-	144.8	151.3	-	102.9	13.6	15.5	2.6
PLA/PBAT 80:20+ 10% 5m-TiO_2	59.8	-	144.6	151.3	-	102.4	15.0	17.2	3.4
PBAT	-	-33.3	-	-	122.2	-	-	8.5	-

4.2.2.3 การศึกษาดัชนีการไหลของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) (MFI)

การศึกษาดัชนีการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer (MFI) ตามมาตรฐาน ASTM-D1238 ใช้ load cell ขนาด 2.16 kg และอุณหภูมิในการทดสอบ 190°C ของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO และPLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5 และ 10 %wt แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ดัชนีการไหลของของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO และ PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5 และ 10 %wt ที่ 190°C load cell ขนาด 2.16 kg

จากการศึกษาดัชนีการไหลของวัสดุคอมโพสิต PLA/PBAT 80:20+5m-MO ผลการทดสอบที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.24 พิจารณา PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 พบว่าเมื่อผสม 5m-Al_2O_3 ลงใน PLA/PBAT 80:20 ค่าดัชนีการไหลของวัสดุคอมโพสิตจะมีค่ามากกว่า PLA/PBAT 80:20 และปริมาณของ 5m-Al_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อดัชนีการไหลของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 ดัชนีการไหลมีค่าใกล้เคียงกันได้แก่ 11.99 ±3.70, 11.31 ±0.18 และ 11.90 ±1.27 g/10 min ที่ปริมาณ 5m- Al_2O_3 1, 5 และ 10 %wt ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Paul L. และคณะ [39] ศึกษา

การเตรียมวัสดุคอมโพสิต PLA/boehmite alumina พบว่าเมื่อเติม boehmite alumina ลงใน PLA ค่าดัชนีการไหลของวัสดุคอมโพสิต มีค่าลดลงเนื่องจาก boehmite alumina จะขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ อนุภาคจะทำหน้าที่เป็นสิ่งกีดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ และจะไปลดช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อช่องว่างระหว่างสายโซ่ลดลง การเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์จะลดลงตามไปด้วย และเมื่อเพิ่มปริมาณ boehmite alumina มากขึ้น ค่าดัชนีการไหลจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง และจากงานวิจัยของ Hamsatulazura H. และคณะ [29] ศึกษาผลของการผสมนาโนฟิลเลอร์ ลงในวัสดุคอมโพสิต พบว่าการเติมอนุภาคฟิลเลอร์ลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ อนุภาคเหล่านี้จะทำหน้าที่จำกัดการเคลื่อนไหวของโมเลกุล เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับอนุภาค แรงยึดเหนี่ยวเหล่านี้จะทำให้การเคลื่อนไหวอิสระของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง ส่งผลให้เมื่อผสมอนุภาคฟิลเลอร์เพิ่มขึ้น ดัชนีการไหลจะมีค่าลดลง ซึ่งมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยในตัวอย่างที่มีการผสม Al_2O_3 0.5-2 %wt

ในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO มีค่าดัชนีการไหล 18.35 $\pm$1.28, 30.16 $\pm$3.26 และ 36.39 $\pm$3.00 g/10 min ที่ปริมาณ 5m-ZnO 1, 5 และ 10 %wt ตามลำดับ ดัชนีการไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ 5m-ZnO เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของวัสดุคอมโพสิตที่ลดลงและความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่ที่มากขึ้น ดังงานวิจัยของ Jamileh S. และคณะ [52] ศึกษาอิทธิพลของ ZnO ต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและการไหลของวัสดุคอมโพสิต PLA/ZnO และได้ทำการหาค่า M_w และ M_n ในวัสดุคอมโพสิต PLA/ZnO พบว่าการเติม ZnO ลงใน PLA ส่งผลให้ค่า M_w ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในวัสดุคอมโพสิต แสดงให้เห็นว่า ZnO กระตุ้นให้เกิดการเสื่อมสภาพของ PLA เมื่อปริมาณ ZnO มากขึ้น ค่า M_w และ M_n จะลดลง ซึ่งเกิดจากการเติม ZnO จะขัดขวางสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกออกของสายโซ่พอลิเมอร์ (chain scissions) ดังนั้นเมื่อพิจารณาค่าดัชนีการไหลจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตหลอมเหลวมีการไหลที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ เนื่องมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลง ความหนืดลดลง และความสามารถในการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น

และสุดท้ายในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 มีค่าดัชนีการไหล 7.99 $\pm$1.10, 7.59 $\pm$0.29 และ 6.92 $\pm$1.09 g/10 min ที่ปริมาณ 5m-TiO_2 1, 5 และ 10 %wt ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณ 5m-TiO_2 เพิ่มขึ้นดัชนีการไหลจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากการผสมสารเติมแต่งนั้นอนุภาคจะไปจำกัดการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุล ดังงานวิจัยของ Christian Cabello A. และคณะ [12] ศึกษาสมบัติของวัสดุนาโนคอมโพสิตที่ทำจากพอลิโพรพิลีน (PP) ผสมกับอนุภาคนาโน

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และคาร์บอนนาโนทิวบ์ (CNT) พบว่าการเติมอนุภาคนาโนลงในพอลิเมอร์จะทำให้พอลิเมอร์มีความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับพอลิเมอร์ที่ดี ทำให้ความต้านทานต่อการเสียรูปเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การไหลของวัสดุคอมโพสิตหลอมเหลวยากขึ้นหรือถูกจำกัด ค่าดัชนีการไหลจึงลดลง เมื่อปริมาณของ TiO_2 เพิ่มขึ้น

4.2.2.4 การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO)

การศึกษาสมบัติเชิงกลของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt และ PBAT ได้ทำการศึกษา 4 อย่าง ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึงด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM-D638 type I ใช้ load cell ขนาด 50 kN crosshead speed 50 mm/min, ความต้านทานต่อแรงกระแทกด้วยเครื่อง Impact testing machine ตามมาตรฐาน ASTM-D256 ใช้ Izod pendulum ขนาด 2.75 J, การดัดงอแบบ 3 จุด (3 point bending testing) ด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ASTM-D790 ใช้ load cell ขนาด 50 kN span length 56 mm และ speed 1.49 mm/min, ความแข็งที่ผิว Shore hardness test ตามมาตรฐาน ASTM-D2240 ด้วยเครื่อง Durometer หัวกดชนิด Shore D ใช้ load cell 1 kg ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30 และตารางที่ 4.16

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพิจาณาตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 พบว่าเมื่อทำการผสม 5m-Al_2O_3 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตมีค่าใกล้เคียงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT 80:20 ดังงานวิจัยของ Paul L. และคณะ [39] พบว่าเมื่อเติม Al_2O_3 ลงไปในคอมโพสิต ความต้านทานต่อแรงต่อของ PLA และวัสดุคอมโพสิตมีค่าใกล้เคียงกัน และปริมาณ 5m-Al_2O_3 ที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง

เมื่อพิจารณาค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ดังรูปที่ 4.26 จากการทดสอบพบว่า ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด จะมีค่าลดลงเมื่อผสม 5m-Al_2O_3 ดังงานวิจัยของ Paul L. และคณะ [39] พบว่าเมื่อเติม Al_2O_3 ลงไปในคอมโพสิตในปริมาณน้อย จะไม่ส่งผลต่อความสามารถในการยืดตัวของวัสดุคอมโพสิตมากนัก แต่เมื่อปริมาณ Al_2O_3 เพิ่มมากขึ้นความสามารถในการดึงยืดจะลดลง เนื่องจากอนุภาคเกิด

การรวมตัวกัน ทำให้การเคลื่อนที่ของสายโซ่เมื่อขณะดึงยืดถูกขัดขวาง ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจึงลดลง

ในส่วนของค่าโมดูลัสดังรูปที่ 4.27 เมื่อทำการผสม 5m-Al_2O_3 ปริมาณ 1, 5 และ 10%wt มีค่า 957.47 ±34.76 MPa, 1,007.42 ±62.44 MPa และ 991.36 ±88.18 MPa ตามลำดับ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT 80:20 ซึ่งมีค่า 930.20 ±22.05 MPa ดังงานวิจัยของ Paul L. และคณะ [39] เนื่องจากอนุภาค Al_2O_3 มีโครงสร้างแข็งแรงสามารถรับแรงได้ดี จึงทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ค่าโมดูลัสจึงเพิ่มขึ้นเมื่อผสม Al_2O_3 แต่เมื่อปริมาณของ Al_2O_3 มากขึ้น จะเกิดการรวมตัวกันของอนุภาค เกิดจุดรวมความเค้น ส่งผลให้ความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตลดลง

พิจารณาค่าความต้านทานต่อการดัดงอ ดังรูปที่ 4.28 พบว่าเมื่อทำการผสม 5m-Al_2O_3 ปริมาณ 1 %wt ค่าความต้านทานต่อการดัดงอมีค่า 119.22 ±0.82 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT 80:20 ที่มีค่า 116.21 ±1.99 MPa และมีค่าลดลงในตัวอย่างที่มีการผสม 5m-Al_2O_3 ปริมาณ 5 และ 10%wt ได้แก่ 112.77 ±1.47 MPa และ 105.56 ±2.22 MPa ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jie C. และคณะ [34] พบว่าเมื่อเติมอนุภาค Al_2O_3 ลงในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT ค่าความต้านทานต่อการดัดงอจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคมีส่วนช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์ PLA และ PBAT ส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างผิวดีขึ้น ความต้านทานต่อการดัดงอเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ Al_2O_3 มากกว่า 1%wt จะเกิดการกระจายตัวของอนุภาค Al_2O_3 ที่ไม่ดี ส่งผลให้ค่า ความต้านทานต่อการดัดงอจึงลดลงตามไปด้วย

ในส่วนของค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก ดังรูปที่ 4.29 วัสดุคอมโพสิต PLA/PBAT 80:20+1%5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5%5m-Al_2O_3 และ PLA/PBAT 80:20+10%5m-Al_2O_3 มีค่า 3.62 ±0.04 MPa, 3.57 ±0.02 MPa และ 3.49 ±0.04 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของ PLA/PBAT 80:20 ที่ 3.51 ±0.06 MPa ดังงานวิจัยของ Jie C. และคณะ [34] เมื่อเติมอนุภาค Al_2O_3 ในปริมาณที่เหมาะสม (ไม่เกิน 1%wt) อนุภาค Al_2O_3 จะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ ระหว่างเมทริกซ์ PLA และ PBAT เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำต่อวัสดุคอมโพสิต อนุภาค Al_2O_3 ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานแรงเค้น จะดูดซับพลังงานและถ่ายโอนแรงไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีความต้านทานต่อแรงกระแทกมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเติมอนุภาค Al_2O_3 ในปริมาณที่มากเกินไป อนุภาคจะเกิดการ

รวมตัวกันได้ง่าย (agglomerate) เกิดจุดรวมความเค้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจึงลดลง

พิจารณาค่าความแข็งที่ผิว มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการผสม 5m-Al_2O_3 ที่ปริมาณ 1, 5 และ 10%wt มีค่าความแข็งที่ผิว 69.40 ±1.71, 69.70 ±1.42 และ 70.70 ±1.48 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.30 ดังงานวิจัยของ Girimurugan R. และคณะ [33] พบว่าค่าความแข็งที่ผิวมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ Al_2O_3 เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอนุภาค Al_2O_3 ที่กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดการยึดเกาะที่ดีกับเมทริกซ์ ส่งผลให้การกระจายแรงบนผิววัสดุคอมโพสิตได้ดี ต้านทานแรงกดและการเสียรูปดีขึ้น ค่าความแข็งที่ผิวจึงเพิ่มขึ้น

ในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO เมื่อทำการผสม 5m-ZnO ที่ปริมาณ 1%wt ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT 80:20 ซึ่งมีค่า 60.22 ±0.75 MPa และ 51.17 ±2.45 MPa ตามลำดับ และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ 5m-ZnO ถึง 5%wt ค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะมีค่าอยู่ที่ 57.78 ±2.20 MPa และเมื่อปริมาณ 5m-ZnO เพิ่มขึ้นถึง 10%wt ค่าความต้านทานต่อแรงดึงอยู่ที่ 58.41 ±1.62 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5%5m-ZnO เล็กน้อย จากงานวิจัยของ Zhenya T. และคณะ [54] พบว่าเมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงจะมีค่าสูงขึ้นจนถึงปริมาณ ZnO ที่ 7%wt เนื่องมาจากการกระจายตัวของอนุภาค และการยึดเกาะระหว่างผิวที่ดีและเมื่อเพิ่มปริมาณ ZnO มากกว่านั้น ความต้านทานต่อแรงดึงจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากจะเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคส่งผลให้ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง

เมื่อพิจารณาค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ดังรูปที่ 4.26 พบว่าตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+1%5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5%5m-ZnO และ PLA/PBAT 80:20+10%5m-ZnO มีค่า 13.34 ±2.58%, 12.56 ±3.13% และ 10.38 ±2.08% ตามลำดับ เมื่อผสม 5m-ZnO ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจะลดลง ดังงานวิจัยของ Shiv S. และคณะ [51] พบว่าการเติม ZnO ลงใน PLA จะส่งผลให้ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเนื่องมาจาก ZnO จะเกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่ PLA

ในส่วนของค่าโมดูลัสดังรูปที่ 4.27 เมื่อเติม 5m-ZnO ลงไปจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20 เช่นเดียวกันกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง แต่เมื่อพิจารณาการเติมปริมาณ 5m-ZnO ที่ 1, 5 และ 10%wt นั้น มีค่าใกล้เคียงกันได้แก่ 1,054.59 ±28.45 MPa, 1,078.41 ±10.66 MPa และ 1,073.08 ±18.66 MPa ตามลำดับ ดังงานวิจัยของ Marius M. และ

คณะ [46] พบว่าการเติม ZnO ลงใน PLA ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัส เนื่องจากการกระจายตัวของอนุภาค ZnO ที่ดี ความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตจึงเพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ Tongsai J. และคณะ [32] กล่าวว่า ความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิตจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายโอนความเค้น (stress transfer) ระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์เมทริกซ์ เมื่อเติมอนุภาค ZnO เพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงและโมดูลัสลดลงเนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่ดี ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์เมทริกซ์

พิจารณาค่าความต้านทานต่อการดัดงอ ดังรูปที่ 4.28 พบว่าเมื่อทำการผสม 5m-ZnO ปริมาณ 1, 5 และ 10%wt ค่าความต้านทานต่อการดัดงอจะมีค่าใกล้เคียงกันที่ 106.72 ±0.94 MPa, 106.31 ±1.55 MPa และ 105.93 ±0.83 MPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อผสม 5m-ZnO เทียบกับ PLA/PBAT 80:20 ดังงานวิจัยของ Mostafa Ehsan A. และคณะ [45] งานวิจัยของ Nectarios V. และคณะ [57] พบว่าเมื่อเติม ZnO ในปริมาณที่มากขึ้น ค่าความต้านทานต่อการดัดงอของพอลิเมอร์จะมีค่าลดลง เนื่องมาจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของอนุภาค อนุภาคเกิดการรวมตัวกัน ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง เกิดการถ่ายโอนความเค้นที่ไม่ดี ทำให้ความต้านทานการดัดงอลดลง ค่าความต้านทานต่อการดัดงอจึงลดลง

ในส่วนของค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก ดังรูปที่ 4.29 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสม 5m-ZnO ได้แก่ 5.75 ±0.58 MPa ที่ปริมาณ 1%wt มีค่าลดลงเป็น 5.28 ±0.80 MPa และ 5.28 ±1.03 MPa ที่ปริมาณ 5m-ZnO 5 %wt และ 10%wt สอดคล้องกับงานวิจัยของ Samsul R. และคณะ [2] พบว่าเมื่อเติม ZnO ลงในพอลิเมอร์ ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก ZnO ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรง เมื่อได้รับแรงกระแทก ZnO จะช่วยกระจายแรงไปยังพอลิเมอร์เมทริกซ์ ช่วยให้วัสดุคอมโพสิตทนต่อแรงกระแทกได้ดีขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจึงสูงขึ้น และเมื่อปริมาณ ZnO เพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกัน ส่งผลให้การกระจายตัวของ ZnO ไม่สม่ำเสมอ เกิดจุดรวมความเค้น ความสามารถในการทนต่อแรงกระแทกลดลง ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกจึงลดลง

พิจารณาค่าความแข็งที่ผิว พบว่าค่าความแข็งที่ผิวของทั้ง 3 ตัวอย่าง ได้แก่ PLA/PBAT 80:20+1%5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5%5m-ZnO และ PLA/PBAT 80:20+10%5m-ZnO มีค่าใกล้เคียง มีค่าความแข็งที่ผิว 70.20 ±0.79, 70.50 ±1.35 และ 70.00 ±1.76 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.30 และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสม 5m-ZnO เมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20 ซึ่งมีค่าความแข็งที่ผิว 67.60 ±0.52 ดังงานวิจัยของ Firas Abd Kati A. และคณะ [1] พบว่าเมื่อเติม ZnO ค่าความแข็งที่ผิวของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจาก ZnO จะทำหน้าที่เป็นตัวเสริมแรงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เมื่อเกิดอันตรกิริยาที่ดี จะช่วยลดช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้วัสดุคอมโพสิตมีผิวที่แข็งขึ้น ค่าความแข็งที่ผิวจึงเพิ่มขึ้น

และสุดท้ายวัสดุคอมโพสิต PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 เมื่อทำการผสม 5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 1%wt และ 5%wt ค่าความต้านทานต่อแรงดึง มีค่า 58.10 ±0.85 MPa และ 58.27 ±1.45 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLA/PBAT 80:20 และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ 5m-TiO_2 เพิ่มขึ้น

ถึง 10%wt แสดงค่า 56.38 ±0.75 MPa ดังรูปที่ 4.25 เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Muhammad G. และคณะ [35] กล่าวว่าการเติมโลหะออกไซด์ในปริมาณเล็กน้อยสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึง เนื่องจากอนุภาคโลหะออกไซด์กระจายตัวได้สม่ำเสมอ เกิดการถ่ายเทแรงระหว่าง PLA กับอนุภาคได้ดี ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตสามารถรับแรงดึงได้มากขึ้น แต่เมื่อปริมาณโลหะออกไซด์มากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลง เนื่องจากการกระจายแรงที่ไม่ดี จากการรวมตัวกันของอนุภาคโลหะออกไซด์

เมื่อพิจารณาค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ดังรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่อผสม 5m-TiO_2 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจะลดลง เมื่อเทียบกับ PLA/PBAT 80:20 ดังงานวิจัยของ Haichen Z. และคณะ [67] พบว่าเมื่อเติม TiO_2 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจะลดลง เนื่องมาจาก TiO_2 ที่กระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่ PLA และขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PLA และเมื่อปริมาณ TiO_2 เพิ่มมากขึ้น ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจะมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาค TiO_2 ที่มากขึ้น จะยิ่งขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PLA ส่งผลให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดจึงลดลง

ในส่วนของค่าโมดูลัส ของ PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 1, 5 และ 10%wt ดังรูปที่ 4.27 มีค่า 1,067.20 ±9.21 MPa, 1,074.19 ±17.86 MPa และ 1,122.81 ±15.50 MPa ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อเติม 5m-TiO_2 ค่าโมดูลัส จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับ PLA/PBAT 80:20 ดังงานวิจัยของ Roberta A. L. และคณะ [42] พบว่าค่าโมดูลัสของวัสดุคอมโพสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติม TiO_2 เนื่องจากเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของอนุภาค TiO_2 กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้เกิดการถ่ายโอนความเค้นที่ดีในโครงสร้าง ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น ค่าโมดูลัสจึงสูงขึ้น พิจารณาค่าความต้านทานต่อการดัดงอดังรูปที่ 4.28 จะมีค่าลดลงเมื่อทำการผสม 5m-TiO_2 โดยค่าความต้านทานต่อการดัดงอ ที่ 5m-TiO_2 1%wt มีค่า 104.68 ±1.50 MPa และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการผสม 5m-TiO_2 เป็น 5%wt และ 10%wt มีค่า 102.47 ±1.61 MPa และ 102.86 ±1.00 MPa ตามลำดับ ดังงานวิจัยของ George C. P. และคณะ [48] อธิบายว่าการเติมอนุภาค TiO_2 ลงในพอลิเมอร์สามารถช่วยเพิ่มความต้านทานการดัดงอของวัสดุคอมโพสิตได้ เมื่อมีการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 อย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และเติมในปริมาณที่น้อย เนื่องจากอนุภาค TiO_2 ช่วยในการถ่ายโอนแรงระหว่างพอลิเมอร์ ในทางกลับกันเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานการดัดงอของวัสดุคอมโพสิตลดลงได้ เนื่องจากการรวมตัวกันของอนุภาค TiO_2 ทำให้เกิดช่องว่างและรอยต่อบริเวณพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้การกระจายแรงไม่สม่ำเสมอ ค่าความต้านทานต่อการดัดงอจึงลดลง

ตารางที่ 4.16 ค่าโมดูลัส, ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด, ค่าความต้านทานต่อการดัดงอ, ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก และค่าความแข็งที่ผิว ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 1, 5, 10 %wt และ PBAT

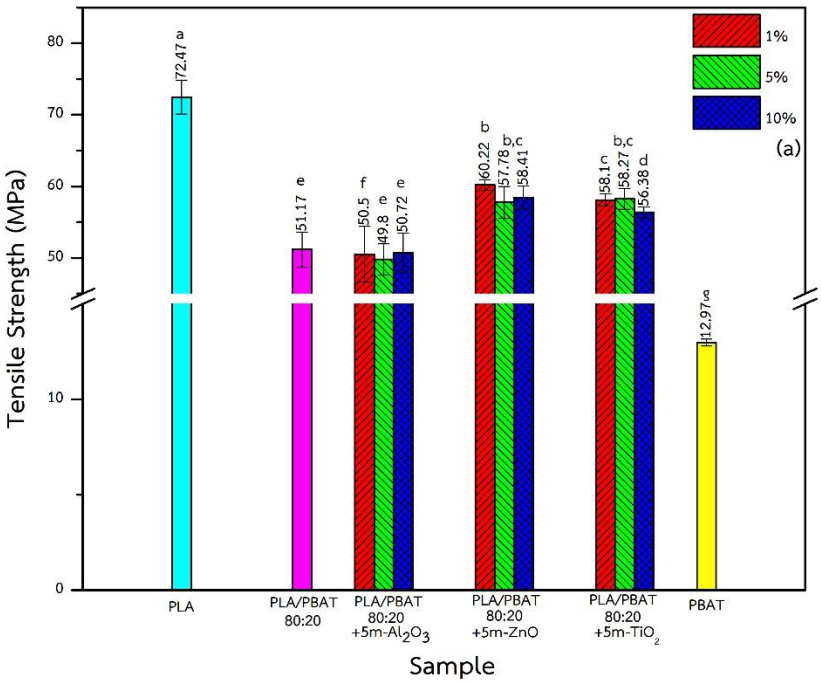
Sample	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural stress (MPa)	Impact strength (kJ/m^2)	Shore D Hardness
PLA	1148.29 ±100.34^{a}	72.47 ± 2.37^{a}	17.06 ± 2.87^{b,c,d}	140.09 ± 1.32^{a}	3.20 ± 0.45^{d}	74.70 ± 1.64^{a}
PLA/PBAT 80:20	930.20 ± 22.05^{e}	51.17 ± 2.45^{e}	24.35 ± 15.64^{b}	116.21 ± 1.99^{c}	3.51 ± 0.06^{d}	67.60 ± 0.52^{d}
PLA/PBAT 80:20+ 1% 5m-Al_2O_3	957.47 ± 34.76^{e}	50.50 ± 3.89^{f}	20.77 ± 2.39^{b,c}	119.22 ±0.82^{b}	3.62 ± 0.04^{d}	69.40 ±1.71^{c}
PLA/PBAT 80:20+ 5% 5m-Al_2O_3	1,007.42 ± 62.44^{d}	49.80 ± 2.17^{e}	16.67 ± 2.74^{b,c,d}	112.77 ±1.47^{d}	3.57 ± 0.02^{d}	69.70 ± 1.42^{b,c}
PLA/PBAT 80:20+ 10% 5m-Al_2O_3	991.36 ± 88.18^{d}	50.72 ± 2.73^{e}	16.01 ±1.39^{b,c,d}	105.56 ±2.22^{e}	3.49 ± 0.04^{d}	70.70 ± 1.48^{b}
PLA/PBAT 80:20+ 1% 5m-ZnO	1,054.59 ± 28.45^{c}	60.22 ± 0.75^{b}	13.34 ± 2.58^{c,d}	106.72 ±0.94^{e}	5.75 ± 0.58^{b}	70.20 ± 0.79^{b,c}
PLA/PBAT 80:20+ 5% 5m-ZnO	1,078.41 ± 10.66^{c}	57.78 ± 2.20^{b,c}	12.56 ± 3.13^{c,d}	106.31 ± 1.55^{e}	5.28 ± 0.80^{c}	70.50 ± 1.35^{b,c}
PLA/PBAT 80:20+ 10% 5m-ZnO	1,073.08 ± 18.66^{c}	58.41 ± 1.62^{b,c}	10.38 ± 2.08^{d}	105.93 ±0.83^{e}	5.28 ±1.03^{c}	70.00 ± 1.76^{b,c}
PLA/PBAT 80:20+ 1% 5m-TiO_2	1,067.20 ± 9.21^{c}	58.10 ± 0.85^{c}	12.59 ± 2.00^{d}	104.68 ±1.50^{f}	5.73 ±0.70^{b}	67.80 ± 1.99^{d}
PLA/PBAT 80:20+ 5% 5m-TiO_2	1,074.19 ±17.86^{c}	58.27 ±1.45^{b,c}	12.95 ±2.77^{d}	102.47 ±1.61^{g}	5.61 ±0.62^{c}	69.70 ±1.57^{b,c}
PLA/PBAT 80:20+ 10% 5m-TiO_2	1,122.81 ±15.50^{b}	56.38 ±0.75^{d}	12.25 ±1.21^{d}	102.86 ±1.00^{g}	6.22 ±1.02^{a}	68.10 ±1.52^{d}

ตารางที่ 4.16 ค่าโมดูลัส, ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด, ค่าความต้านทานต่อการดัดงอ, ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก และค่าความแข็งที่ผิว ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO, PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 1, 5, 10 %wt และ PBAT (ต่อ)

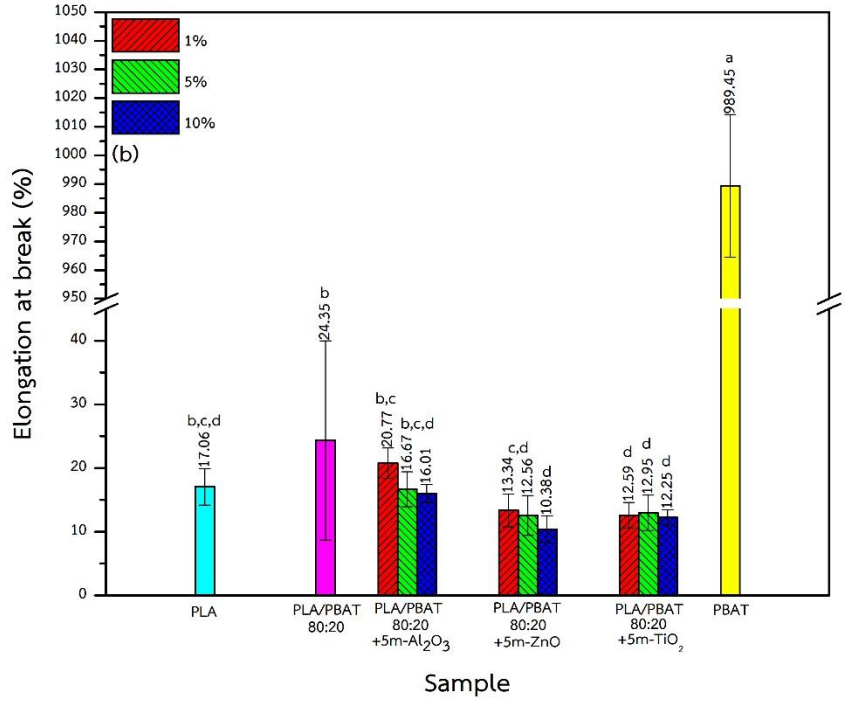
Sample	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural stress (MPa)	Impact strength (kJ/m^2)	Shore D Hardness
PBAT	35.52 $\pm$ 0.75[f]	12.97 $\pm$ 0.18[g]	989.45 $\pm$ 24.86[a] (ไม่ขาด)	9.41 $\pm$ 0.23[h]	ไม่แตกหัก	42.00 $\pm$1.05[e]

ในส่วนของค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+1%5m-TiO_2, PLA/PBAT 80:20+5%5m-TiO_2 และ PLA/PBAT 80:20+10%5m-TiO_2 มีค่า 5.73 $\pm$0.70 MPa, 5.61 $\pm$0.62 MPa และ 6.22 $\pm$1.02 MPa ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.29 ดังงานวิจัยของ Roberta A. L. และคณะ [42] พบว่าการเติม TiO_2 ลงในพอลิเมอร์ผสม จะทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เพราะอนุภาค TiO_2 ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานจากแรงกระแทก เนื่องจากการกระจายตัวที่ดีของอนุภาค TiO_2 ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เกิดอันตรกิริยาที่ดีระหว่าง TiO_2 กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตมีถ่ายเทแรงที่ดี

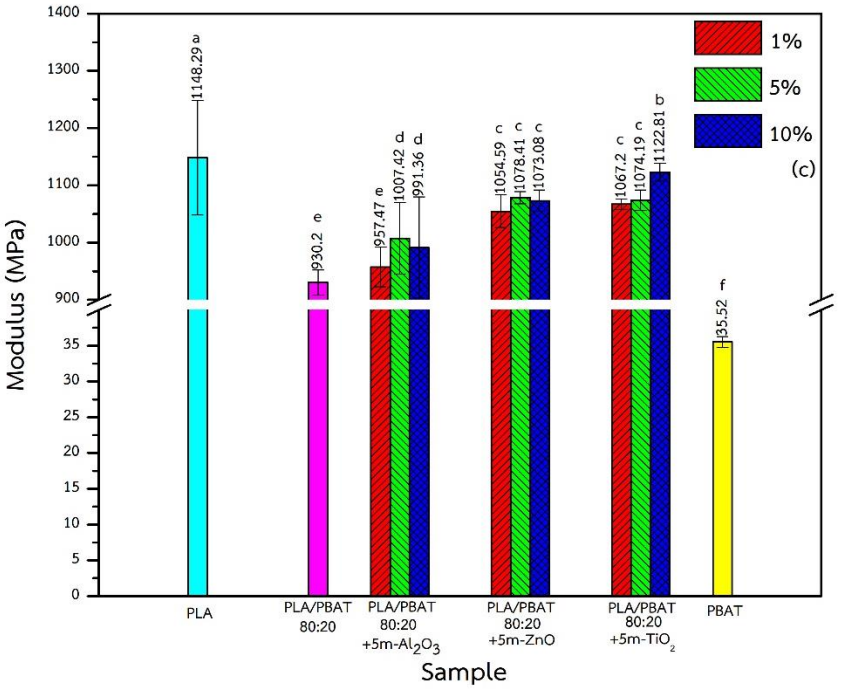
พิจารณาค่าความแข็งที่ผิว ดังรูปที่ 4.30 ในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+1%5m-TiO_2 และ PLA/PBAT 80:20+10%5m-TiO_2 มีค่าความแข็งที่ผิว 67.80 $\pm$1.99 และ 68.10 $\pm$1.52 ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20 และในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5%5m-TiO_2 มีค่าความแข็งที่ผิว 69.70 $\pm$1.57 ซึ่งมีค่าเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อย ดังงานวิจัยของ Bandar A. และคณะ [6] พบว่าการที่ค่าความแข็งที่ผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อเติม TiO_2 เนื่องมาจากการกระจายตัวของ TiO_2 ที่ไม่ดี ทำให้ TiO_2 ไม่ช่วยรับแรงกดจากการทดสอบ, การเติม TiO_2 ในปริมาณที่ต่ำ ไม่เพียงพอต่อการเพิ่มความแข็งที่ผิวของวัสดุคอมโพสิต, การเกิดอันตรกิริยาที่ไม่ดี ระหว่าง TiO_2 กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงไม่เกิดการถ่ายโอนแรงจากพอลิเมอร์ไปยัง TiO_2 ดังนั้นการเติม TiO_2 จึงไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่ผิว ได้เท่ากับเมื่อสังเกตในการทดสอบสมบัติเชิงกลก่อนหน้า



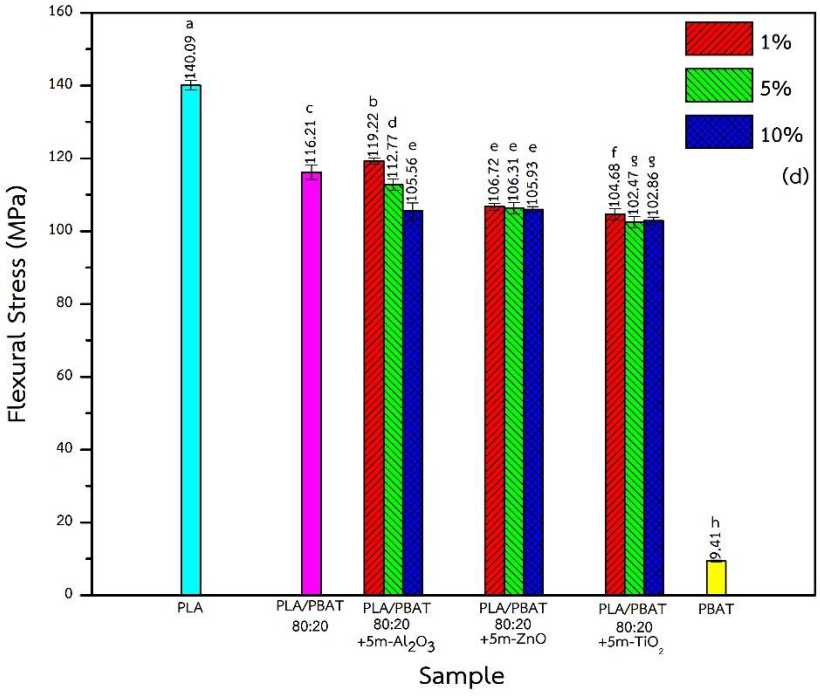
รูปที่ 4.25 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของวัสดุคอมโพสิต



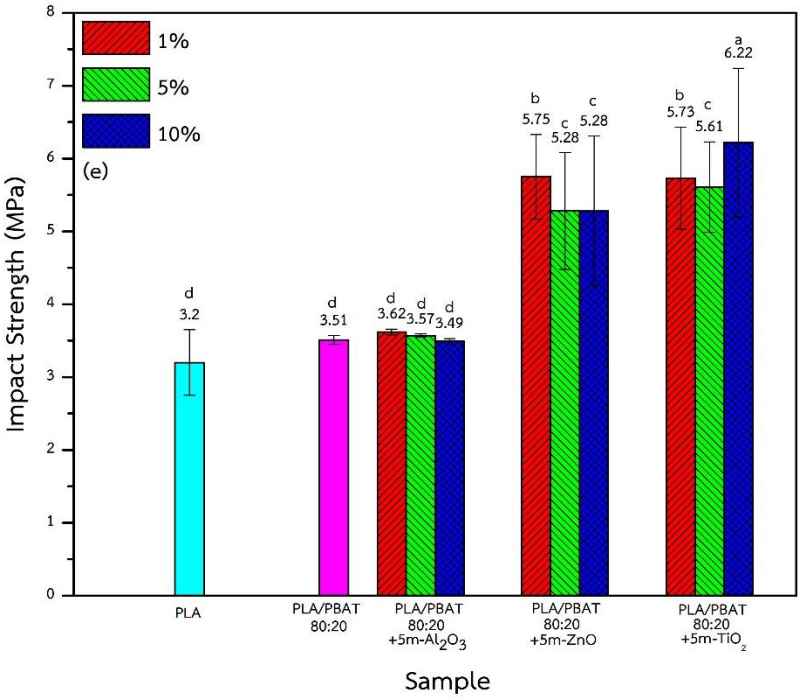
รูปที่ 4.26 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของวัสดุคอมโพสิต



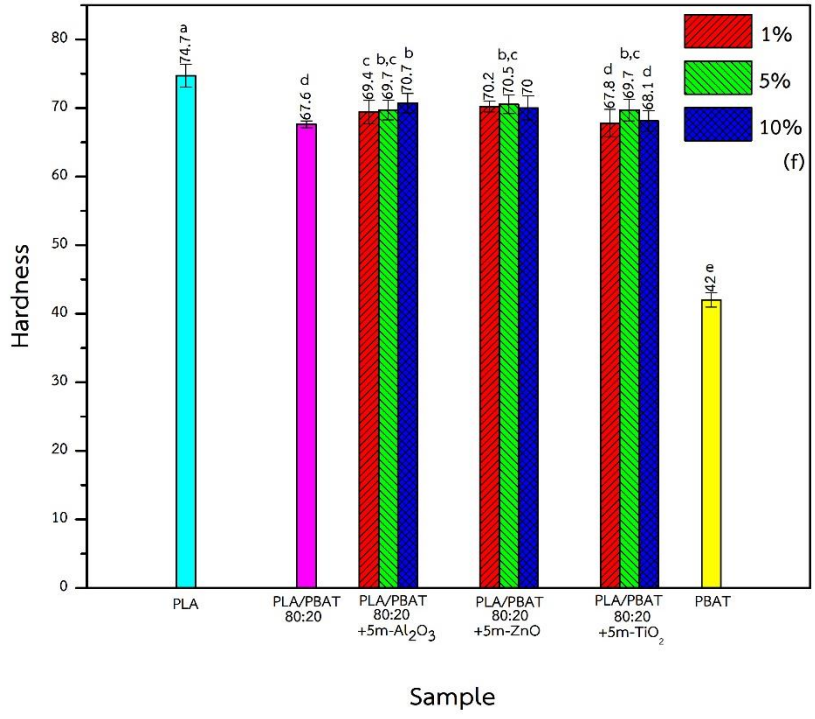
รูปที่ 4.27 ค่าโมดูลัสของวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 4.28 ค่าความต้านทานต่อการดัดงอของวัสดุคอมโพสิต



รูปที่ 4.29 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมโพสิต



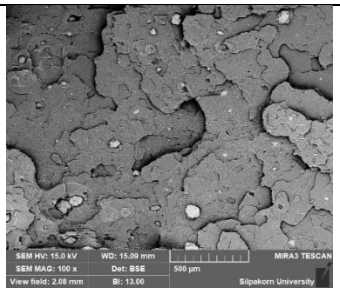
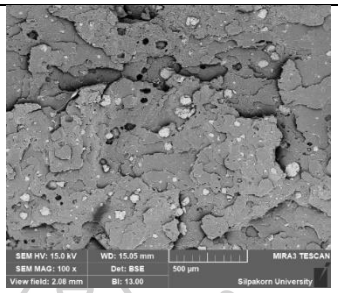
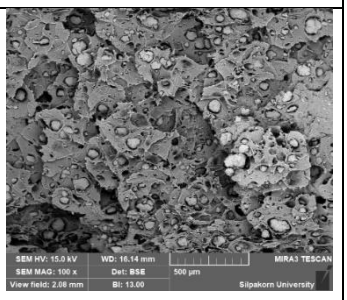
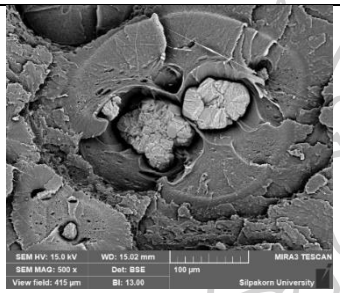
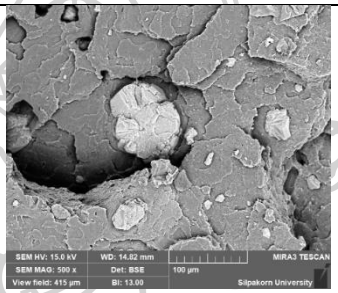
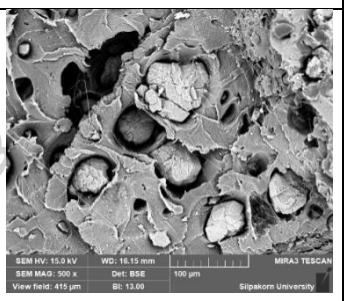
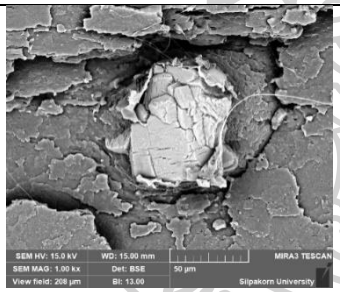
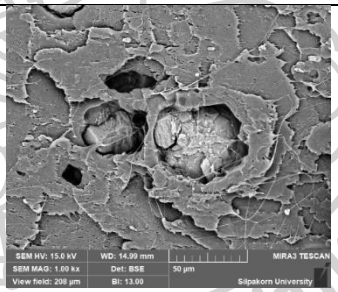
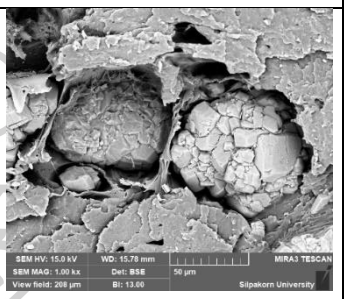
รูปที่ 4.30 ค่าความแข็งที่ผิวของวัสดุคอมโพสิต

4.2.2.5 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO) ด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM)

การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวและความเข้ากันได้ของ PLA, PLA/PBAT 80:20, PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3, PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO และPLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-MO 1, 5, 10 %wt ช่วงกำลังขยาย 100x, 500x, 1,000x, 2,500x, 5,000x และ 20,000x พลังงาน 15 kV โดยใช้ชิ้นงานจากการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง แสดงดังตารางที่ 4.17, 4.18 และ 4.19

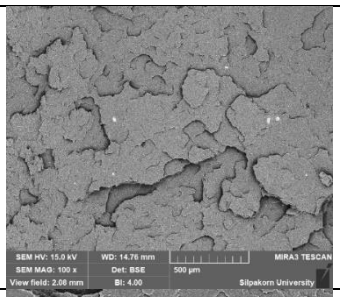
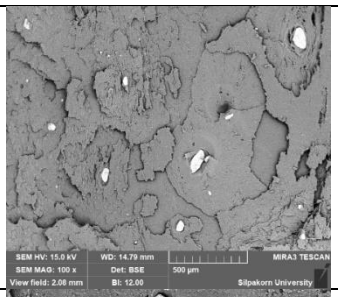
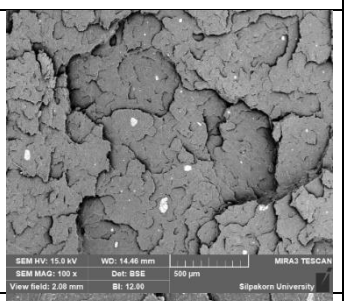
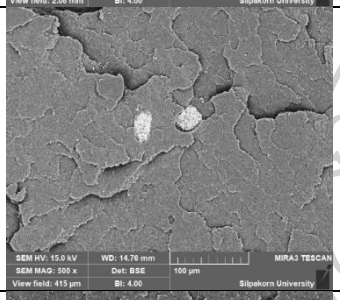
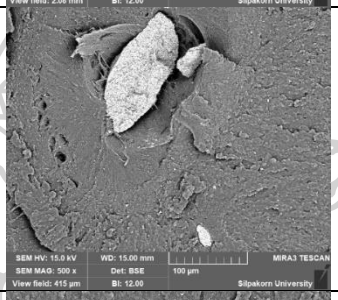
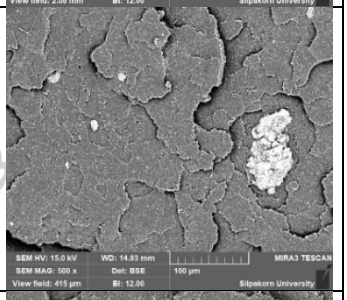
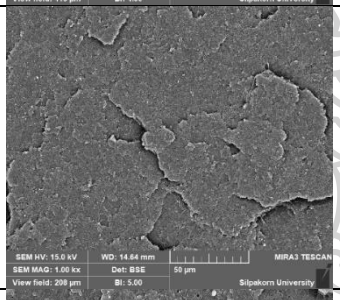
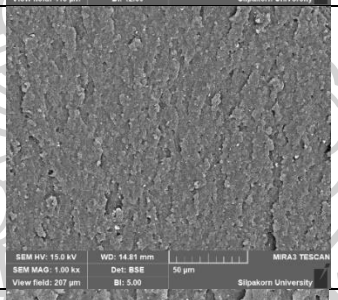
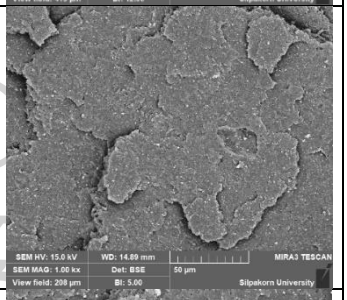
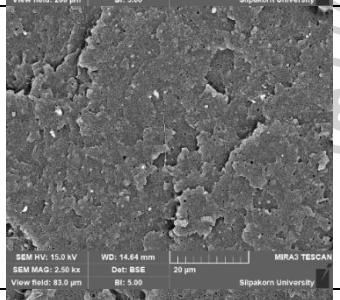
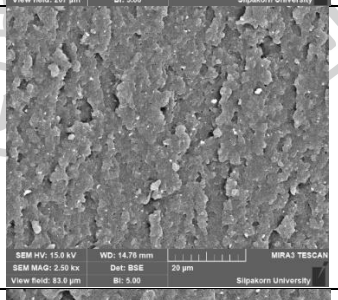
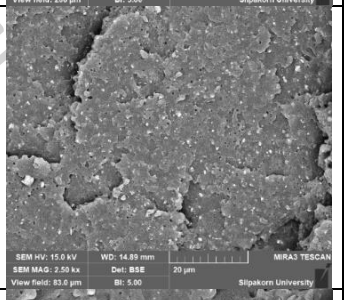
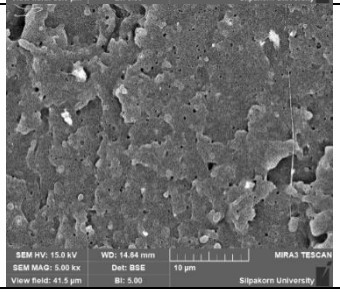
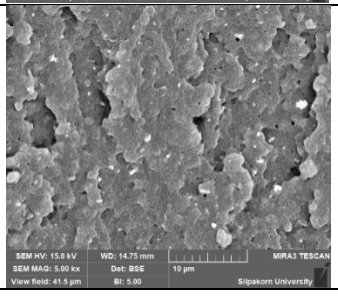
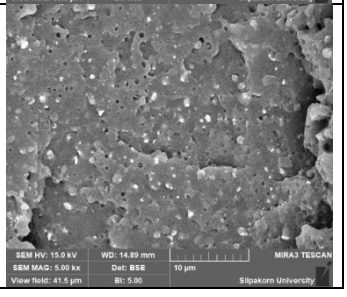
จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 ที่ปริมาณ 5m-Al_2O_3 1, 5, 10 %wt ดังตารางที่ 4.17 ที่กำลังขยาย 100x, 500x และ 1,000x ในการทดสอบ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 พบการกระจายตัวของอนุภาค 5m-Al_2O_3 ทั่วทั้งพอลิเมอร์เมทริกซ์ อนุภาคมีการกระจายตัวมากขึ้นตามปริมาณของ 5m-Al_2O_3 ที่ผสมลงไปเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 500x และ 1,000x พบว่าบริเวณรอบๆอนุภาค 5m-Al_2O_3 ถูกล้อมรอบด้วยเฟสของ PBAT สังเกตได้จากลักษณะผิวที่เกิดการยืดออก และบริเวณโดยรอบสามารถสังเกตเห็นผิวที่เกิดการแตกหักแบบหยาบและไม่สม่ำเสมอซึ่งเป็นลักษณะการแตกหักของเฟส PLA ในตัวอย่างที่มีการผสมอนุภาค 5m-Al_2O_3 ที่ปริมาณ 1% และ 5 %wt สังเกตได้ว่าอนุภาคจะมีการกระจายตัวที่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ในตัวอย่าง ของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 ที่ปริมาณ 10 %wt อนุภาค 5m-Al_2O_3 จะเกิดการรวมตัวกันส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ไม่ดี จากงานวิจัยของ Jie C. และคณะ [34] อธิบายสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Al_2O_3 พบลักษณะผิวที่แตกออกหยาบกว่าในพอลิเมอร์ผสมแสดงถึงการเสียรูปแบบถาวร ซึ่งสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความเหนียวเพิ่มขึ้น, การเติม Al_2O_3 จะช่วยลดขนาดของ PBAT ที่กระจายตัวภายในพอลิเมอร์ผสม และถ้าอนุภาค Al_2O_3 มีการกระจายตัวได้ดีจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลได้

ตารางที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT 80:20+5m-Al_2O_3 ปริมาณ 5m-Al_2O_3 1%, 5% และ 10%wt พลังงาน 15 kV กำลังขยาย 100x, 500x, และ 1000x

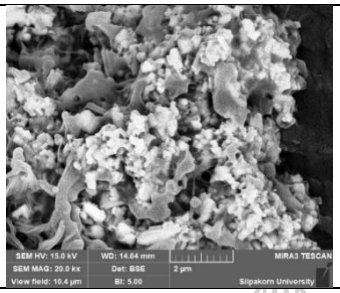
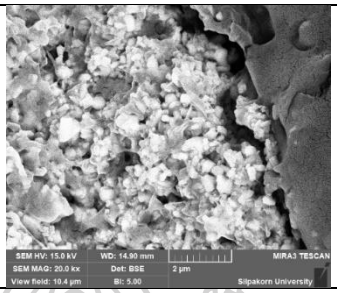
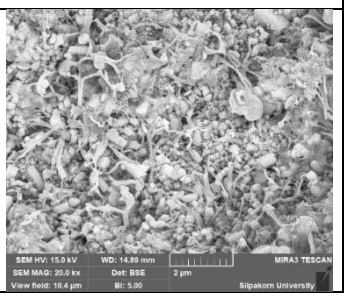
	PLA/PBAT 80:20 +1%5m-Al_2O_3	PLA/PBAT 80:20 +5%5m-Al_2O_3	PLA/PBAT 80:20 +10%5m-Al_2O_3
100x			
500x			
1,000x			

ในการทดสอบ PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO ที่ปริมาณ 5m-ZnO 1, 5, 10 %wt ดังตารางที่ 4.18 เนื่องจากอนุภาค ZnO มีขนาดเล็กกว่าอนุภาค Al_2O_3 เมื่อทดสอบด้วยกำลังขยาย 100x, 500x และ 1000x สังเกตสัณฐานวิทยาของตัวอย่างได้ไม่ชัดเจนจึงทำการทดสอบที่กำลังขยาย 2,500x, 5,000x, และ 20,000x เพิ่มเติม

ตารางที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO ปริมาณ 5m-ZnO 1%, 5% และ 10%wt พลังงาน 15 kV กำลังขยาย 100x, 500x, 1000x, 2,500x, 5,000x, และ 20,000x

	PLA/PBAT 80:20 +1%5m-ZnO	PLA/PBAT 80:20 +5%5m-ZnO	PLA/PBAT 80:20 +10%5m-ZnO
100x			
500x			
1,000x			
2,5000x			
5,000x			

ตารางที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO ปริมาณ 5m-ZnO 1%, 5% และ 10%wt พลังงาน 15 kV กำลังขยาย 100x, 500x, 1000x, 2,500x, 5,000x, และ 20,000x (ต่อ)

	PLA/PBAT 80:20 +1%5m-ZnO	PLA/PBAT 80:20 +5%5m-ZnO	PLA/PBAT 80:20 +10%5m-ZnO
20,000x			

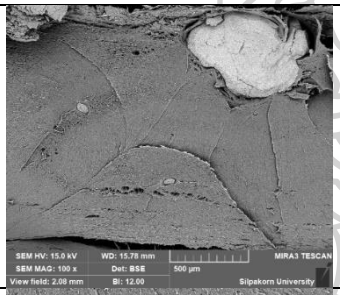
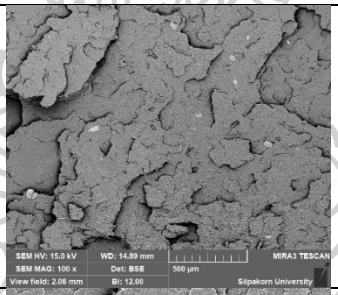
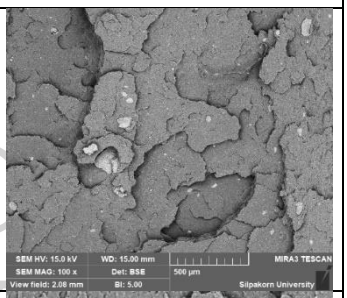
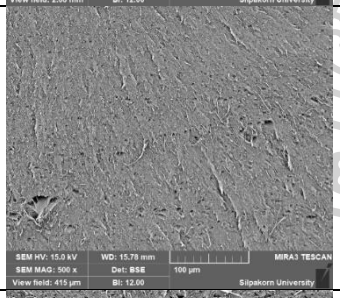
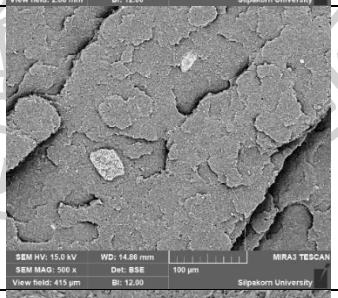
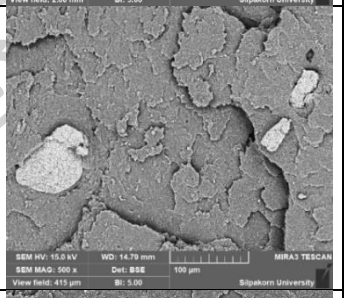
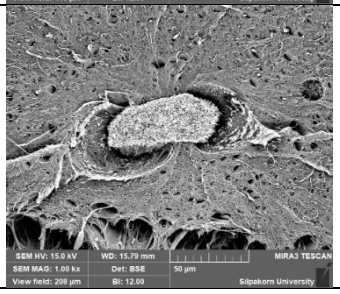
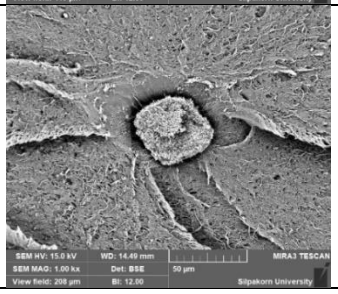
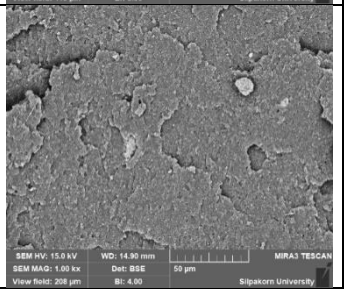
ในการทดสอบพบการกระจายตัวของอนุภาค 5m-ZnO ทั่วทั้งพอลิเมอร์เมทริกซ์ อนุภาคมีการกระจายตัวมากขึ้นในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5m-ZnO ที่ปริมาณ 5m-ZnO 1, 5, 10 %wt ตามลำดับ ในงานวิจัยของ Zhenya T. และคณะ [54] กล่าวว่าอนุภาคนาโนที่ปริมาณน้อยสามารถกระจายตัวได้ดีเป็นเนื้อเดียวกันกับเมทริกซ์ PLA ได้ แต่อนุภาคนาโนที่ปริมาณสูงจะไม่สามารถกระจายตัวแยกจากกันได้ ส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคเป็นก้อนขนาดต่างๆเล็กใหญ่ต่างกันไปตามปริมาณที่ผสม และส่งผลให้ผิวที่แตกหักมีความหยาบเพิ่มขึ้น

พิจารณาตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+1%5m-ZnO พบการแตกหักของผิวแบบเปราะและหยาบแสดงถึงเฟส PLA พบอนุภาค 5m-ZnO เกิดการรวมตัวกัน และพบบริเวณที่เกิดการยืดออกของ PBAT เล็กน้อยและสังเกตเห็นกลุ่มของอนุภาค 5m-ZnO กระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เมื่อเพิ่มกำลังขยายไปที่ 20,000x ในบริเวณกลุ่มของอนุภาค 5m-ZnO พบอนุภาค 5m-ZnO ที่เกาะกลุ่มกันนั้นมีพอลิเมอร์แทรกตัวอยู่ด้วย ซึ่งพอลิเมอร์นั้นคือเฟสของ PBAT สังเกตจากลักษณะผิวที่เกิดการยืดออก แสดงให้เห็นว่าอนุภาค 5m-ZnO เกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์เมทริกซ์

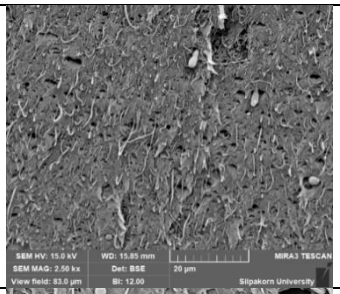
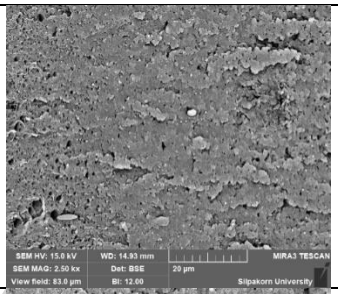
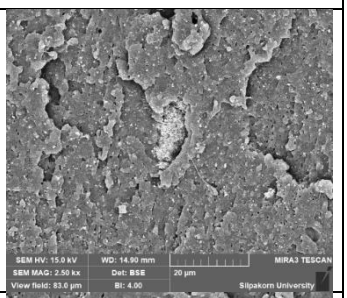
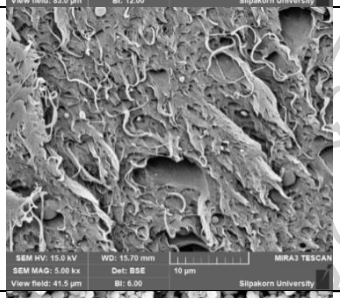
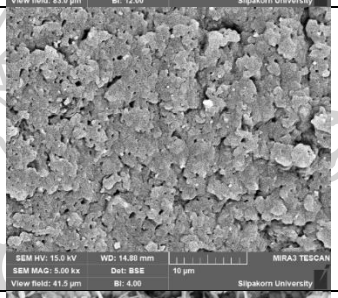
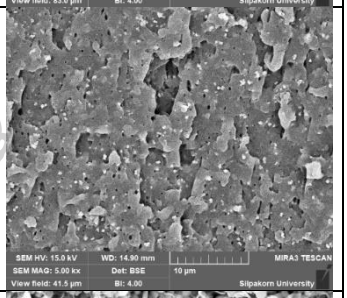
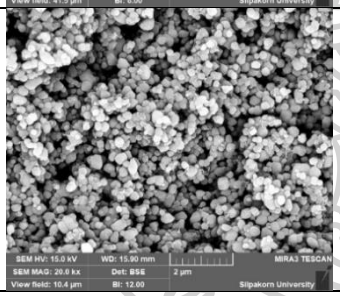
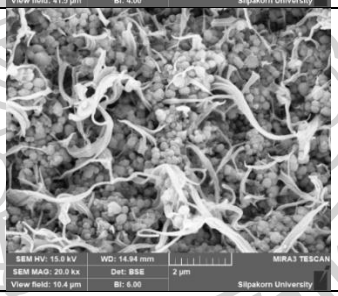
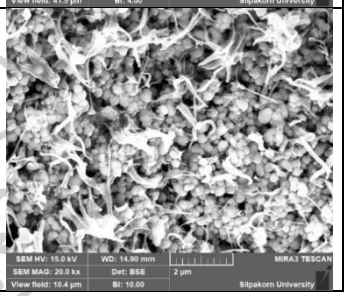
พิจารณาตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5%5m-ZnO ที่กำลังขยาย 100x และ 500x พบอนุภาค 5m-ZnO รวมตัวกันมากกว่าในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+1%5m-ZnO เนื่องจากปริมาณที่ผสมลงไปมากขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Insoo K. และคณะ [37] ศึกษาฟิล์ม PLA/ZnO พบว่าสัณฐานวิทยาของคอมโพสิตมีลักษณะผิวขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ ZnO รวมตัวเป็นกลุ่ม เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่าง ZnO และ PLA ที่ไม่ดี และเมื่อสังเกตที่กำลังขยาย 20,000x ภายในอนุภาค 5m-ZnO ที่เกิดการรวมตัวกันนั้นมีเฟสของพอลิเมอร์แทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาค ซึ่งพอลิเมอร์ที่แทรกตัวอยู่มีลักษณะผิวที่เกิดการยืดออกแสดงถึงเฟสของ PBAT

ส่วนในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+10%5m-ZnO พบการแตกหักของเฟส PLA มีลักษณะผิวหยาบ และมีการรวมตัวของอนุภาค 5m-ZnO เมื่อเพิ่มกำลังขยายถึง 20,000x พบเฟสของ PBAT แทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาค 5m-ZnO ที่รวมตัวกัน เช่นเดียวกับในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+1%5m-ZnO และ PLA/PBAT 80:20+5%5m-ZnO และงานวิจัยของ Jamileh S. และคณะ [52] ศึกษาอิทธิพลของ ZnO ต่อสมบัติของคอมโพสิต PLA/ZnO พบว่าเมื่อผสม ZnO ลงใน PLA ลักษณะผิวที่แตกหักจะมีความหยาบและไม่สม่ำเสมอ ความหยาบเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของ ZnO การกระจายตัวของอนุภาคนาโนในคอมโพสิตนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของ ZnO และมีแนวโน้มการรวมตัวกันมากขึ้นตามปริมาณ ZnO ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-TiO_2 1%, 5% และ 10%wt พลังงาน 15 kV กำลังขยาย 100x, 500x, 1000x, 2,500x, 5,000x, และ 20,000x

	PLA/PBAT 80:20 +1%5m-TiO_2	PLA/PBAT 80:20 +5%5m-TiO_2	PLA/PBAT 80:20 +10%5m-TiO_2
100x			
500x			
1,000x			

ตารางที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของ PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-TiO_2 1%, 5% และ 10%wt พลังงาน 15 kV กำลังขยาย 100x, 500x, 1000x, 2,500x, 5,000x, และ 20,000x (ต่อ)

	PLA/PBAT 80:20 +1%5m-TiO_2	PLA/PBAT 80:20 +5%5m-TiO_2	PLA/PBAT 80:20 +10%5m-TiO_2
2,500x			
5,000x			
20,000x			

ในการทดสอบ PLA/PBAT 80:20+5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 5m-TiO_2 1, 5, 10 %wt ดังตารางที่ 4.19 พิจารณาตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+1%5m-TiO_2 พบการรวมตัวกันของอนุภาค 5m-TiO_2 เป็นบริเวณกว้าง อนุภาคมีการกระจายตัวที่ไม่ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bandar A. และคณะ [6] พบว่าอนุภาค TiO_2 จะเกิดการกระจายตัวที่ไม่ดีในเมทริกซ์พอลิเมอร์ เกิดการรวมกลุ่มขนาดใหญ่ ส่งผลให้เกิดช่องว่างระหว่างเมทริกซ์ นำไปสู่สมบัติเชิงกลที่ต่ำลง เมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 2,500x และ 5,000x ผิวมีลักษณะการยืดออกของเฟส PBAT แสดงการแตกหักแบบเหนียว พบอนุภาค 5m-TiO_2 กระจายอยู่น้อยมาก เมื่อเพิ่มกำลังขยายไปที่ 20,000x ณ บริเวณที่มีการรวมตัวกันของอนุภาค พบเฟสของพอลิเมอร์แทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาค 5m-TiO_2 ที่เกิดการรวมตัวกันน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5%5m-TiO_2 และ PLA/PBAT 80:20+10%5m-TiO_2

เมื่อพิจารณาตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5%5m-TiO_2 พบอนุภาค 5m-TiO_2 รวมตัวกันเป็นก้อนเล็กกระจายอยู่ทั่วเมทริกซ์ ดังงานวิจัยของ Natnaree A. และคณะ [9] พบว่าการเติม TiO_2 ในปริมาณน้อย TiO_2 จะเกิดการกระจายตัวของอนุภาคได้ดี และพบการแตกหักแบบเปราะบริเวณผิวเมื่อเพิ่มกำลังขยาย 1,000x ณ บริเวณที่มีการรวมตัวกันของอนุภาค พบว่าบริเวณโดยรอบมีลักษณะการยืดออกของเฟส PBAT ล้อมรอบอนุภาคที่รวมตัวกัน และเมื่อเพิ่มกำลังขยายถึง 20,000x สังเกตเห็นเฟสของ PBAT ที่เกิดการยืดออกผสมอยู่กับอนุภาค 5m-TiO_2 แสดงให้เห็นว่า PBAT เกิดอันตรกิริยากับ 5m-TiO_2 ได้ดี

และสุดท้ายในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+10%5m-TiO_2 พบการแตกหักแบบเปราะของ PLA ในงานวิจัย Muhammad G. และคณะ [35] พบว่าการเติม TiO_2 จะทำให้ผิวของพอลิเมอร์เมทริกซ์หยาบมากขึ้นและเกิดรอยแตกร้าวได้ เนื่องจากอันตรกิริยาที่มีระหว่างอนุภาค TiO_2 กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และอนุภาค 5m-TiO_2 ที่เกิดการรวมตัวกัน ที่กำลังขยาย 2,500x และ 5,000x พบอนุภาคของ 5m-TiO_2 บางส่วนกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และเมื่อเพิ่มกำลังขยายถึง 20,000x พบลักษณะของเฟส PBAT ที่ผสมอยู่กับอนุภาค 5m-TiO_2 เช่นเดียวกับในตัวอย่าง PLA/PBAT 80:20+5%5m-TiO_2

มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตจากพอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท ที่ผสมโลหะออกไซด์ 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide: Al_2O_3), ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) และ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) โดยผ่านกระบวนการปรับปรุงผิวด้วยสารเชื่อมประสานไซเลน คือ γ-(triethoxysilyl) propyl methacrylate (TESPMA) ก่อนการนำไปผสมกับ PLA/PBAT 80:20 เพื่อศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดจากพอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และโลหะออกไซด์ ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างการเติมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท และ ศึกษาอิทธิพลของชนิดและอัตราส่วนการเติมโลหะออกไซด์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา ของวัสดุคอมโพสิต

5.1.1 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างการเติมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท

การศึกษาเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท พอลิเมอร์ผสมแสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัว 2 ขั้น ขั้นที่ 1 สอดคล้องกับอุณหภูมิการสลายตัวของ PLA และขั้นที่ 2 สอดคล้องกับอุณหภูมิการสลายตัวของ PBAT และ PBAT ที่ผสมส่งผลให้อุณหภูมิการสลายตัวของ PLA ลดลง เนื่องมาจากเมื่อผสม PBAT ลงใน PLA นั้น PBAT จะแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ ทำให้อันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์ PLA ลดลงจึงสลายตัว ณ อุณหภูมิต่ำลง

การศึกษาสมบัติทางความร้อนและการหาปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท พอลิเมอร์ผสมจะมีปริมาณผลึกลดลงเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ เนื่องจาก PBAT เป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม ที่ไม่มีโครงสร้างผลึกที่แน่นอน จึงรบกวนและขัดขวางการเกิดผลึกของ PLA ทำให้การจัดเรียงตัวเป็นระเบียบของสายโซ่พอลิเมอร์ของ PLA น้อยลง และปรากฏค่า T_m 2 ค่า เนื่องมาจากการเกิดผลึก 2 รูปแบบที่มีความเสถียรต่างกัน อุณหภูมิ T_g, T_m ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของ PBAT ที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท เมื่อ PBAT ในอัตราส่วนเพิ่มขึ้น ค่าดัชนีการไหลมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก

โมเลกุลของ PBAT ที่ผสมแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของ PLA ช่วยลดการเกี่ยวพันของสายโซ่ PLA เพิ่มช่องว่างระหว่างสายโซ่ ช่วยให้สายโซ่พอลิเมอร์ผสมเคลื่อนไหวได้ดีขึ้นขณะหลอมเหลว

การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมพอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท เมื่อปริมาณ PLA ในอัตราส่วนลดลงส่งผลให้ ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าโมดูลัส, ค่าความต้านทานต่อการดัดงอ, ค่าความแข็งที่ผิวลดลง, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนตามอัตราส่วนของพอลิเมอร์ที่เปลี่ยนแปลง

การศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาพบผิวการแตกหักแบบเปราะและเรียบในตัวอย่าง PLA บริสุทธิ์ เมื่อผสม PBAT ผิวที่แตกหักมีความหยาบมากขึ้น และ PBAT จะแสดงการแตกหักแบบ ductile มีการยืดออกของพอลิเมอร์อย่างชัดเจน

ซึ่งทางผู้วิจัยต้องการพอลิเมอร์ผสมที่มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นโดยมี PLA เป็นเฟสหลักและ PBAT เป็นเฟสรองและมีการผสมเฟสรองลงไปให้น้อยที่สุด จึงได้เลือกพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT อัตราส่วน 80:20 ซึ่งมีปริมาณผลึกสูงที่สุด สมบัติเชิงกลที่เหมาะสม และมีลักษณะสัณฐานวิทยาการกระจายตัว PBAT ใน PLA อย่างทั่วถึง ในการดำเนินงานวิจัยตอนที่ 2 ต่อไป

5.1.2 การเตรียมและการศึกษาเอกลักษณ์ของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท อัตราส่วน 80:20 ที่ผสมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5% โดยน้ำหนัก (PLA/PBAT 80:20+5m-MO)

การศึกษาหมู่ฟังก์ชั่นของโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิว พบการสั่นของหมู่ฟังก์ชั่น C=O และ C=C ในโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวทั้ง 3 ชนิด ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชั่นที่พบในหมู่เมทาคริเลตของ TESPMA และความเข้มของพีคทั้ง 2 จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณ TESPMA ที่เพิ่มขึ้น

การศึกษาเสถียรภาพ การสลายตัวทางความร้อน และประสิทธิภาพการปรับปรุงผิว โลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวจะมีน้ำหนักลดลงมากขึ้น เมื่อปริมาณ TESPMA เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการสลายตัวทางความร้อนของโมเลกุลไซเลน แสดงถึงการปรับปรุงผิวที่สมบูรณ์ และประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดจะมีค่ามากที่สุดเมื่อทำการปรับปรุงผิวด้วย TESPMA 5%wt

การทดสอบค่ามุมสัมผัส มุมสัมผัสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณ TESPMA ที่ปรับปรุงผิวเพิ่มมากขึ้น แสดงถึงการเพิ่มสมบัติความไม่ชอบน้ำให้กับผิวของโลหะออกไซด์

การศึกษาสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยโหมด EDS สัณฐานวิทยาแสดงรูปร่างของโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด มีผิวและขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ การปรับปรุงผิวไม่ส่งผลต่อการ

เปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของโลหะออกไซด์อย่างชัดเจน ผลการทดสอบ EDS ยืนยันว่าการปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์ด้วย TESPMA สมบูรณ์ด้วยการปรากฏพีคของธาตุองค์ประกอบ Si

การศึกษาเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พบว่า 5m-ZnO ที่ผสมในวัสดุคอมโพสิตส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุมากที่สุด โดยวัสดุคอมโพสิตจะมีเสถียรภาพทางความร้อนลดลงเมื่อผสม 5m-ZnO ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่วนโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวอีก 2 ชนิดไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนอย่างชัดเจน

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริดพบว่าโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของวัสดุคอมโพสิต และส่งผลต่อปริมาณผลึกของวัสดุคอมโพสิตเพียงเล็กน้อย

การศึกษาดัชนีการไหลของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พบว่า 5m-ZnO ส่งผลต่อดัชนีการไหลของวัสดุคอมโพสิตโดยดัชนีการไหลเพิ่มมากขึ้นเมื่อเติม 5m-ZnO ในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องมาจากการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ และดัชนีการไหลมีค่าลดลงเมื่อทำการผสม 5m-TiO_2 เนื่องมาจาก 5m-TiO_2 เกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่พอลิเมอร์

การศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตพบว่า ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าโมดูลัส, ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและ ค่าความต้านทานต่อการดัดงอลดลง ส่วนค่าความแข็งที่ผิวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อทำการเติมโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิวลงไป

การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด การกระจายตัวของโลหะออกไซด์จะเกิดได้ดีเมื่อผสมโลหะออกไซด์ในปริมาณที่น้อย ยกเว้นการผสม 5m-TiO_2 ที่ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก พบการรวมตัวของ 5m-TiO_2 เป็นกลุ่มขนาดใหญ่ และเมื่อปริมาณของโลหะออกไซด์เพิ่มมากขึ้น อนุภาคจะเกิดการรวมตัวกัน นำไปสู่การลดลงของสมบัติเชิงกล

เมื่อพิจารณาผลของโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิด พบว่าการผสม 5m-Al_2O_3 ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต ในด้านของสมบัติทางความร้อน 5m-Al_2O_3 ไม่ส่งผลต่อการอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของวัสดุคอมโพสิต ค่าดัชนีการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อผสม 5m-Al_2O_3 ในส่วนของสมบัติเชิงกลการผสม 5m-Al_2O_3 ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก และค่าความแข็งที่ผิว ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง, ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นเล็กน้อย, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง, ค่าความต้านทานต่อการดัดงอมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสม 5m-Al_2O_3 ที่ปริมาณ 1%wt และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ 5m-Al_2O_3 เพิ่มมากขึ้น

เมื่อผสม 5m-ZnO เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิตจะลดลง และอนุภาค 5m-ZnO ที่ผสมไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อน ค่าดัชนีการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อผสมอนุภาค 5m-ZnO ในส่วนของสมบัติเชิงกลนั้นเมื่อผสม 5m-ZnO ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าโมดูลัส และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น, ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อการดัดงอลดลง และค่าความแข็งที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

การผสม 5m-TiO_2 ไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุคอมโพสิต พิจารณาสมบัติทางความร้อนนั้น 5m-TiO_2 ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของวัสดุคอมโพสิต ค่าดัชนีการไหลมีค่าลดลงเมื่อผสมอนุภาค 5m-TiO_2 ในส่วนของสมบัติเชิงกลเมื่อผสม 5m-TiO_2 ค่าความต้านทานต่อแรงดึง, ค่าโมดูลัส และ ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อการดัดงอมีค่าลดลง ในส่วนของค่าความแข็งที่ผิว ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ปริมาณ 5m-TiO_2 1 และ 10%wt แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่ปริมาณ 5m-TiO_2 5%wt

ดังนั้นการผสมโลหะออกซ์ในปริมาณที่เหมาะสมลงในวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด สามารถที่จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตได้ดีขึ้น แสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมโพสิตแบบไฮบริด พอลิแลกติกแอซิด (PLA) พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT) และโลหะออกไซด์ที่ปรับปรุงผิว (m-MO) ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีและมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมนั้น สามารถใช้งานได้หลากหลายในทางอุตสาหกรรม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 กำหนดขนาดอนุภาคโลหะออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดให้เท่ากัน เพื่อลดผลของขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน

5.2.2 กำหนดช่วงของปริมาณสารเชื่อมประสานไซเลนที่ใช้เพิ่ม เพื่อหาปริมาณของสารเชื่อมประสานไซเลนที่ทำให้ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์มีค่าสูงขึ้น เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้กับวัสดุคอมโพสิต

5.2.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบสัณฐานวิทยาเพื่อดูการกระจายตัวของอนุภาคโลหะออกไซด์ในเมทริกซ์ของวัสดุคอมโพสิต ควรเตรียมโดยการหักชิ้นงานหลังจากการจุ่มแช่ไนโตรเจนเหลว เพื่อให้เห็นการกระจายตัวของอนุภาคอย่างชัดเจน

5.2.4 ควรเพิ่มการทดสอบการต้านเชื้อของวัสดุคอมโพสิต เพื่อให้วัสดุคอมโพสิตสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เช่น การผลิตวัสดุทางการแพทย์แบบใช้แล้วทิ้ง ช่วยเพิ่มความปลอดภัยและความเชื่อมั่นในการใช้งาน

5.2.5 การทดสอบต้านเชื้อ และการทดสอบอุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อน (HDT) เพื่อทดสอบวัสดุคอมโพสิตในสภาวะการใช้งานจริง สำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์

5.2.6 การทดสอบอุณหภูมิการเสียรูปภายใต้ความร้อน (HDT) และเทคนิคการวิเคราะห์เชิงกลแบบไดนามิก (DMA) เพื่อทดสอบความสามารถของวัสดุคอมโพสิตต่อการคงรูปในสภาวะการใช้งานจริง เพื่อใช้งานในอุตสาหกรรมยานยนต์ เช่น ชิ้นส่วนในรถยนต์

รายการอ้างอิง

1. Abd, F., & Kati, F. (2016). Effect of metal oxides on some mechanical properties of clear acrylic specific for artificial eye. Mustansiria Dental journal, 13, 77-84.
2. Adlie, T., Rizal, S., Ali, N., & Huzni, S. (2021). The Effect of Additional Zinc Oxide (ZnO) in Polymeric Foam Composites on Impact Strength. Proceedings of the 2nd International Conference on Science, Technology, and Modern Society (ICSTMS 2020). https://doi.org/10.2991/assehr.k.210909.062
3. Ahmed, B., El-Sherbini, E.S., El-sayed, G., Eladl, M., & Akiyoshi Taniguchi, A. (2021). Applications of titanium dioxide nanoparticles in nanomedicine. Mansoura Veterinary Medical Journal, 22(3), 111-116. https://doi.org/10.21608/mvmj.2021.196036
4. Aldas, M., Ferri, J. M., Motoc, D. L., Peponi, L., Arrieta, M. P., & López-Martínez, J. (2021). Gum Rosin as a Size Control Agent of Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT) Domains to Increase the Toughness of Packaging Formulations Based on Polylactic Acid (PLA). Polymers, 13(12).
5. Alhareb, A., Akil, H. B. M., & Ahmad, Z. A. B. (2015). Poly(methyl methacrylate) denture base composites enhancement by various combinations of nitrile butadiene rubber/treated ceramic fillers. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 30. https://doi.org/10.1177/0892705715616856
6. Almeshari, B., Junaedi, H., Baig, M., & Almajid, A. (2024). Effect of titanium dioxide on the mechanical properties of 3D printed short carbon-fibers composite. Journal of Materials Research and Technology, 33, 8590-8597. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.209
7. Arfat, Y. A., Ahmed, J., Al Hazza, A., Jacob, H., & Joseph, A. (2017). Comparative effects of untreated and 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane treated ZnO nanoparticle reinforcement on properties of polylactide-based nanocomposite films. International Journal of Biological Macromolecules, 101, 1041-1050. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.176
8. Arruda, L., Magaton, M., Bretas, R., & Ueki, M. (2015). Influence of chain extender on

mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA/PBAT blends. Polymer Testing, 43. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.02.005

9. Arssanasuwan, N., Threepopnatkul, P., & Sittattrakul, A. (2020). Effect of titanium dioxide on the properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate) films. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 965(1), 012016. https://doi.org/10.1088/1757-899X/965/1/012016
10. Bianchi, M., Dorigato, A., Morreale, M., & Pegoretti, A. (2023). Evaluation of the Physical and Shape Memory Properties of Fully Biodegradable Poly(lactic acid) (PLA)/Poly(butylene adipate terephthalate) (PBAT) Blends. Polymers, 15(4).
11. Boro, U., Kashyap, N., & Moholkar, V. S. (2022). Sonochemical Synthesis of Poly(lactic acid) Nanocomposites with ZnO Nanoflowers: Effect of Nanofiller Morphology on Physical Properties. ACS Engineering Au, 2(1), 46-60. https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.1c00018
12. Cabello-Alvarado, C., Reyes-Rodríguez, P., Andrade-Guel, M., Cadenas-Pliego, G., Pérez-Alvarez, M., Cruz-Delgado, V. J., Melo-López, L., Quiñones-Jurado, Z. V., & Ávila-Orta, C. A. (2019). Melt-Mixed Thermoplastic Nanocomposite Containing Carbon Nanotubes and Titanium Dioxide for Flame Retardancy Applications. Polymers, 11(7).
13. Cao, J., Wang, Y., Liu, G., Shang, Q., Wang, B., Sun, J., Bai, Y., Liu, M., Yu, F., Ma, G., & Wang, H. (2024). Surface Modification of Nano-Al_2O_3 with Silane Coupling Agent and Its Effect on the Compressive Strength of PI/Al_2O_3 Composites. Coatings, 14(1).
14. Chaiwutthinan, P., Chuayjuljit, S., Srasomsub, S., & Boonmahitthisud, A. (2019). Composites of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend with wood fiber and wollastonite: Physical properties, morphology, and biodegradability. Journal of Applied Polymer Science, 136(21), 47543. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.47543
15. Chen, H., Chen, F., Chen, H., Liu, H., Chen, L., & Yu, L. (2023). Thermal degradation and combustion properties of most popular synthetic biodegradable polymers. Waste Management & Research, 41(2), 431-441.

https://doi.org/10.1177/0734242x221129054

16. Chen, J., Hu, R. R., Jin, F. L., & Park, S. J. (2021). Synergistic reinforcing of poly(lactic acid) by poly(butylene adipate-co-terephthalate) and alumina nanoparticles. Journal of Applied Polymer Science, 138(16), 50250. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.50250
17. Chen, W., Qi, C., Li, Y., & Tao, H. (2021). The degradation investigation of biodegradable PLA/PBAT blend: Thermal stability, mechanical properties and PALS analysis. Radiation Physics and Chemistry, 180, 109239. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109239
18. Chinh, N., Nguyen Tien, D., Vu, D. T., Dinh, D. P., Nguyen, A. H., Ly Thi Ngoc, L., Phi Hung, D., Nguyen, T. L., Bach, L. G., & Thai, H. (2020). Modification of Titanium Dioxide Nanoparticles with 3-(Trimethoxysilyl)propyl Methacrylate Silane Coupling Agent. Journal of Chemistry, 2020, 1-10. https://doi.org/10.1155/2020/1381407
19. Chiu, H. T., Huang, S. Y., Chen, Y. F., Kuo, M. T., Chiang, T. Y., Chang, C. Y., & Wang, Y. H. (2013). Heat Treatment Effects on the Mechanical Properties and Morphologies of Poly (Lactic Acid)/Poly (Butylene Adipate-co-terephthalate) Blends. International Journal of Polymer Science, 2013. https://doi.org/10.1155/2013/951696
20. Çoban, O., Bora, M. Ö., Kutluk, T., & Özkoç, G. (2018). Mechanical and thermal properties of volcanic particle filled PLA/PBAT composites. Polymer Composites, 39(S3), E1500-E1511. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.24393
21. Cuadri, A. A., & Martín-Alfonso, J. E. (2018). Thermal, thermo-oxidative and thermomechanical degradation of PLA: A comparative study based on rheological, chemical and thermal properties. Polymer Degradation and Stability, 150, 37-45. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.02.011
22. Manyasree, D., Kiranmayi, P., & Ravi Kumar, R. V. S. S. N. (2018). Synthesis, characterzation and antibacterial activity of aluminium oxide nanoparticles. International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences, 10(1), 32-35. https://doi.org/10.22159/ijpps.2018v10i1.20636

23. Deng, Y., Yu, C., Wongwiwattana, P., & Thomas, N. (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. https://doi.org/10.1007/s10924-018-1256-x
24. DeStefano, V., Khan, S., & Tabada, A. (2020). Applications of PLA in modern medicine. Engineered Regeneration, 1, 76-87. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engreg.2020.08.002
25. Eftekharipour, F., Jamshidi, M., & Ghamarpoor, R. (2023). Fabricating core-shell of silane modified nano ZnO; Effects on photocatalytic degradation of benzene in air using acrylic nanocomposite. Alexandria Engineering Journal, 70, 273-288. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.02.047
26. Ghozali, M., Fahmiati, S., Triwulandari, E., Restu, W., Farhan, D., Wulansari, M., & Fatriasari, W. (2020). PLA/metal oxide biocomposites for antimicrobial packaging application. Polymer-Plastics Technology and Materials, 59, 1-11. https://doi.org/10.1080/25740881.2020.1738475
27. Girimurugan, R., Vairavel, M., Moorthy, A. A., Prakash, E., & Madheswaran, S. (2021). Experimental studies on mechanical behaviour of polylactide (PLA) matrix—aluminium oxide (Al_2O_3) particles reinforced composites. Advances in Materials Research.
28. Greenpeace. พลาสติก. https://www.greenpeace.org/thailand/tag/plastic/
29. Hamzah, M. S., Mariatti, M., & Ismail, H. (2019). Melt flow index and flammability of alumina, zinc oxide and organoclay nanoparticles filled cross-linked polyethyelene nanocomposites. Materials Today: Proceedings, 17, 798-802. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.365
30. Han, Q., Setchi, R., & Evans, S. L. (2016). Synthesis and characterisation of advanced ball-milled Al-Al_2O_3 nanocomposites for selective laser melting. Powder Technology, 297, 183-192. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.04.015
31. Hassanpour, P., Panahi, Y., Ebrahimi-Kalan, A., Akbarzadeh, A., Davaran, S., Nasibova, A. N., Khalilov, R., & Kavetskyy, T. (2018). Biomedical applications of aluminium oxide nanoparticles. Micro & Nano Letters, 13(9), 1227-1231.

https://doi.org/https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5070

32. Jamnongkan, T., Jaroensuk, O., Khankhuean, A., Laobuthee, A., Srisawat, N., Pangon, A., Mongkholrattanasit, R., Phuengphai, P., Wattanakornsiri, A., & Huang, C. F. (2022). A comprehensive evaluation of mechanical, thermal, and antibacterial properties of PLA/ZnO nanoflower biocomposite filaments for 3D printing application. Polymers, 14(3).
33. Jiang, J., Pi, J., & Cai, J. (2018). The advancing of zinc oxide nanoparticles for biomedical applications. Bioinorganic Chemistry and Applications, 2018, 1062562. https://doi.org/10.1155/2018/1062562
34. Jiang, L., Wolcott, M. P., & Zhang, J. (2006). Study of biodegradable polylactide/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends. Biomacromolecules, 7(1), 199-207. https://doi.org/10.1021/bm050581q
35. BYJU's. Titanium Dioxide. https://byjus.com/chemistry/titanium-dioxide/
36. Khurana, N., Arora, P., Pente, A. S., Pancholi, K. C., Kumar, V., Kaushik, C. P., & Rattan, S. (2021). Surface modification of zinc oxide nanoparticles by vinyltriethoxy silane (VTES). Inorganic Chemistry Communications, 124, 108347. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.108347
37. Kim, I., Viswanathan, K., Kasi, G., Sadeghi, K., Thanakkasaranee, S., & Seo, J. (2019). Poly(lactic acid)/ZnO bionanocomposite films with positively charged ZnO as potential antimicrobial food packaging materials. Polymers, 11(9).
38. Kim, J. H., Hossain, S. M., Kang, H. J., Park, H., Tijing, L., Park, G. W., Suzuki, N., Fujishima, A., Jun, Y. S., Shon, H. K., & Kim, G. J. (2021). Hydrophilic/hydrophobic silane grafting on TiO_2 nanoparticles: photocatalytic paint for atmospheric cleaning. Catalysts, 11(2).
39. Lendvai, L., & Fekete, I. (2020). Preparation and characterization of poly(lactic acid)/boehmite alumina composites for additive manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 903. https://doi.org/10.1088/1757-899X/903/1/012057
40. Li, Y., Xu, W., & Zhang, G. (2015). Effect of coupling agent on nano-ZnO modification and antibacterial activity of ZnO/HDPE nanocomposite films. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 87.

https://doi.org/10.1088/1757-899X/87/1/012054

41. Life, A. C. F. (2014). Zinc oxide. https://www.acs.org/molecule-of-the-week/archive/z/zinc-oxide.html
42. Lima, R., Oliveira, R., Rangari, V., Jeelani, S., & Moura, E. (2015). Investigation on mechanical and thermal behaviours of copolyester/PLA blend reinforced with TiO_2 nanoparticle. Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2015, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) (763-768). https://doi.org/10.1007/978-3-319-48191-3_96
43. Ma, P., Wang, R., Wang, S., Zhang, Y., & Hristova, D. (2008). Effects of fumed silica on the crystallization behavior and thermal properties of poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate). Journal of Applied Polymer Science, 108, 1770-1777. https://doi.org/10.1002/app.27577
44. Mathew, J., Das, J. P., Tp, M., & Kumar, S. (2022). Development of poly (butylene adipate-co-terephthalate) PBAT toughened poly (lactic acid) blends 3D printing filament. Journal of Polymer Research, 29(11), 474. https://doi.org/10.1007/s10965-022-03320-y
45. Mostafa, E., & Sadoon, M. (2023). Flexural strength, hardness and surface roughness of 3D printed denture base resin reinforced by zinc oxide nanoparticles. Journal of Research in Medical and Dental Science. 11, 194-200.
46. Murariu, M., Benali, S., Paint, Y., Dechief, A. L., Murariu, O., Raquez, J. M., & Dubois, P. (2021). Adding value in production of multifunctional polylactide (PLA)–ZnO nanocomposite films through alternative manufacturing methods. Molecules, 26(7).
47. Nakonieczny, D. S., Kern, F., Dufner, L., Dubiel, A., Antonowicz, M., & Matus, K. (2021). Effect of calcination temperature on the phase composition, morphology, and thermal properties of ZrO_2 and Al_2O_3 modified with APTES (3-aminopropyltriethoxysilane). Materials, 14(21).
48. Papanicolaou, G. C., Manara, A. E., & Kontaxis, L. C. (2020). Experimental and prediction study of displacement-rate effects on flexural behaviour in nano and micro TiO_2 particles-epoxy resin composites. Polymers, 12(1).
49. Restrepo, I., Benito, N., Medinam, C., Mangalaraja, R. V., Flores, P., & Rodriguez-

Llamazares, S. (2017). Development and characterization of polyvinyl alcohol stabilized polylactic acid/ZnO nanocomposites. Materials Research Express, 4(10), 105019. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa8b8d

50. Sanchez, C., & Soler-Illia, G. (2006). Hybrid Materials (Organic–Inorganic). In Encyclopedia of Chemical Processing. Taylor & Francis. https://doi: 10.1081/E-ECHP-120018068
51. Shankar, S., Wang, L. F., & Rhim, J. W. (2018). Incorporation of zinc oxide nanoparticles improved the mechanical, water vapor barrier, UV-light barrier, and antibacterial properties of PLA-based nanocomposite films. Materials Science and Engineering: C, 93, 289-298. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.002
52. Shojaeiarani, J., Bajwa, D., Jiang, L., Liaw, J., & Hartman, K. (2019). Insight on the influence of nano zinc oxide on the thermal, dynamic mechanical, and flow characteristics of Poly(lactic acid)– zinc oxide composites. Polymer Engineering & Science, 59(6), 1242-1249. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pen.25107
53. 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
54. Tang, Z., Fan, F., Chu, Z., Fan, C., & Qin, Y. (2020). Barrier properties and characterizations of Poly(lactic acid)/ZnO nanocomposites. Molecules, 25(6).
55. Titanium dioxide coatings in medical device applications. (2007). In M. J. Jackson & W. Ahmed (Eds.), Surface Engineered Surgical Tools and Medical Devices (pp. 49-63). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-27028-9_3
56. Venkatesan, R., & Rajeswari, N. (2017). ZnO/PBAT nanocomposite films: investigation on the mechanical and biological activity for food packaging. Polymers for Advanced Technologies, 28(1), 20-27. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pat.3847
57. Vidakis, N., Petousis, M., Maniadi, A., Koudoumas, E., Kenanakis, G., Romanitan, C., Tutunaru, O., Suchea, M., & Kechagias, J. (2020). The mechanical and physical properties of 3D-printed materials composed of ABS-ZnO nanocomposites and ABS-ZnO microcomposites. Micromachines, 11(6).

58. Wanag, A., Sienkiewicz, A., Rokicka-Konieczna, P., Kusiak-Nejman, E., & Morawski, A. W. (2020). Influence of modification of titanium dioxide by silane coupling agents on the photocatalytic activity and stability. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(4), 103917. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103917

59. Wang, C., Mao, H., Wang, C., & Fu, S. (2011). Dispersibility and hydrophobicity analysis of titanium dioxide nanoparticles grafted with silane coupling agent. Industrial & Engineering Chemistry Research, 50(21), 11930-11934. https://doi.org/10.1021/ie200887x

60. Wen, B., Ma, L., Zou, W., & Zheng, X. (2020). Enhanced thermal conductivity of poly(lactic acid)/alumina composite by synergistic effect of tuning crystallization of poly(lactic acid) crystallization and filler content. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 31(8), 6328-6338. https://doi.org/10.1007/s10854-020-03189-x

61. Wikipedia. (2023). Hybrid material. https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_material

62. Xiang, S., Feng, L., Bian, X., Li, G., & Chen, X. (2020). Evaluation of PLA content in PLA/PBAT blends using TGA. Polymer Testing, 81, 106211. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106211

63. Yakdoumi, F. Z., & Hadj-Hamou, A. S. (2020). Effectiveness assessment of TiO_2-Al_2O_3 nano-mixture as a filler material for improvement of packaging performance of PLA nanocomposite films. Journal of Polymer Engineering, 40(10), 848-858. https://doi.org/doi:10.1515/polyeng-2020-0105

64. Yeh, J. T., Tsou, C. H., Huang, C. Y., Chen, K. N., Wu, C. S., & Chai, W. L. (2010). Compatible and crystallization properties of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends. Journal of Applied Polymer Science, 116(2), 680-687. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.30907

65. Yu, G., & Cheng, Y. (2020). Effects of inorganic ZnO particle doping on crystalline polymer morphology and space charge behavior. Coatings, 10(10).

66. Yu, W., Li, M., Lei, W., & Chen, Y. (2024). FDM 3D printing and properties of PBAT/PLA blends. Polymers, 16(8).

67. Zhang, H., Huang, J., Yang, L., Chen, R., Zou, W., Lin, X., & Qu, J. (2015). Preparation,

characterization and properties of PLA/TiO_2 nanocomposites based on a novel vane extruder. RSC Advances, 5(6), 4639-4647. https://doi.org/10.1039/C4RA14538K

68. Zhao, P., Liu, W., Wu, Q., & Ren, J. (2010). Preparation, mechanical, and thermal properties of biodegradable polyesters/poly(lactic acid) blends. Journal of Nanomaterials, 2010(1), 287082. https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2010/287082
69. Zhao, Z., Balu, R., Gangadoo, S., Duta, N. K., & Choudhury, N. R. (2024). Poly(butylene adipate-co-terephthalate)/polylactic acid/tetrapod-zinc oxide whisker composite films with antibacterial properties. Polymers, 16(8).
70. Ziental, D., Czarczynska-Goslinska, B., Mlynarczyk, D. T., Glowacka-Sobotta, A., Stanisz, B., Goslinski, T., & Sobotta, L. (2020). Titanium dioxide nanoparticles: prospects and applications in medicine. Nanomaterials, 10(2). https://doi.org/10.3390/nano10020387
71. Zou, H., Yi, C., Wang, L., Liu, H., & Xu, W. (2009). Thermal degradation of poly(lactic acid) measured by thermogravimetry coupled to Fourier transform infrared spectroscopy. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 97, 929-935. https://doi.org/10.1007/s10973-009-0121-5
72. กาญจนเมฆานันต์, ก. (2020). ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมในทางทันตกรรมรากเทียม. Journal of the Dental Association of Thailand, 70.
73. จึงถาวรรณ, ส. (2020). ความบกพร่องในโลหะออกไซด์. https://www.thep-center.org/en/
74. เพชรวโรทัย, ว., & ตันรัตนกุล, ว. (2013). การพัฒนาความสามารถในการยืดตัวและความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพลาสติไซด์พอลิแลกไทด์และพอลิบิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรฟแทเลต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
75. เพ็ชรวัฒนา, น. (2565). พอลิแลกติกแอซิด: การเพิ่มความเหนียวและเสริมสภาพพลาสติก.
76. ศิริวงษ์, ช. (2550). ผลของแพลเลเดียมต่อความสามารถโฟโตแคทาลิติกของอนุภาคนาโนซิงก์ออกไซด์ ที่สังเคราะห์โดยสเปรย์ไพโรลิซิส มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2550/mat0350cs_ch2.pdf
77. ศิลาเกษ, ป. การเตรียมตัวกรองอะลูมินาที่มีรูพรุนระดับไมครอนโดยการหล่อแบบ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2550/ichem0450ps_ch2.pdf

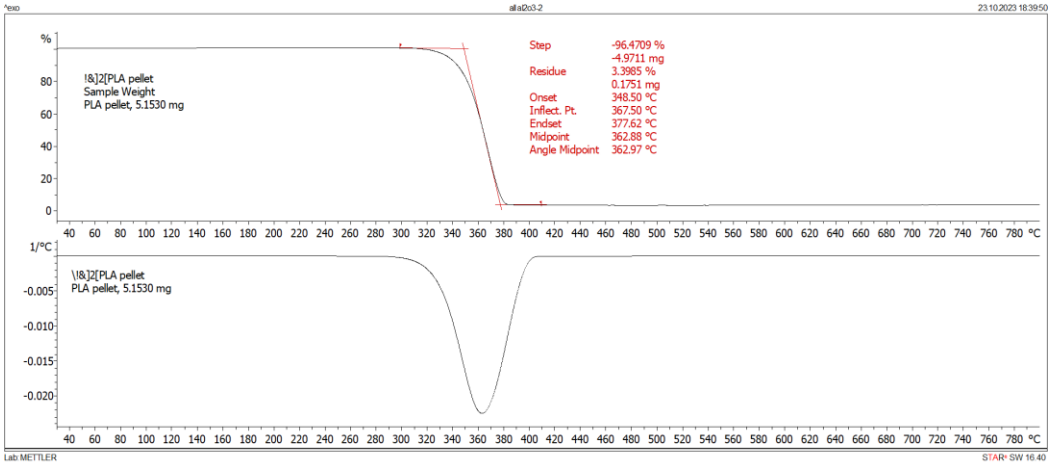
78. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (2015). บทที่ 4 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภท พอลิแลคติคแอซิด (Poly(lactic acid). โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ. http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624235102u.pdf
79. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. (2015). บทที่ 9 รายละเอียดข้อมูลพลาสติกชีวภาพประเภท พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Polybutylene adipate-co-terephthalate). โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ. http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20180624234830u.pdf
80. ชัยคำ, ว., & ทองธนะเศรษฐ์, ก. (2561). การเตรียมและการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มผสมระหว่างพอลิ(แอล-แลคไทด์)/พอลิ(บิวทิลีน อดิเพท-โค-เทอเรฟทาเลท)โดยวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย.
81. สังข์สนิท, ก. (2555). การพัฒนาสมบัติพอลิแลคติกแอซิดเพื่อการผลิตเป็นฟิล์มแบบยืดหยุ่น. การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม.
82. อรัญญาเกษมสุข, ว. (2555). รีแอกตีฟเบลนด์ของพอลิแลคติกแอซิด พอลิบิวทิลีน อะดิเพตโคเทอเรพธาเลต และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ภาคผนวก

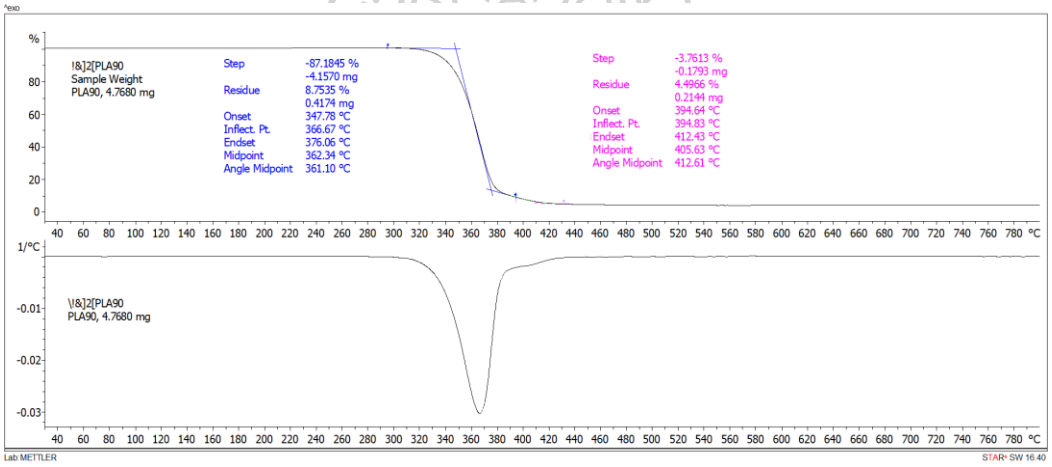
ภาคผนวก ก.

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

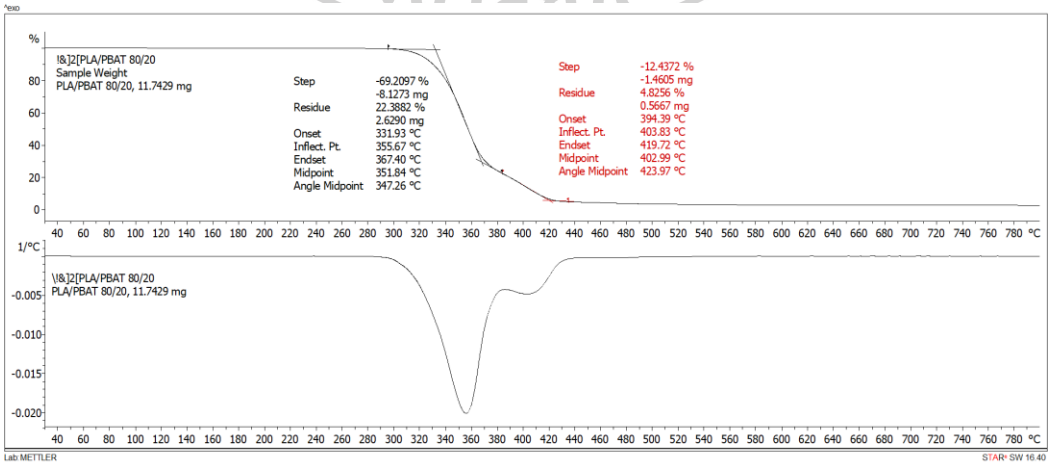
ภาคผนวก ก.1 ผลการทดสอบเสถียรภาพและการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



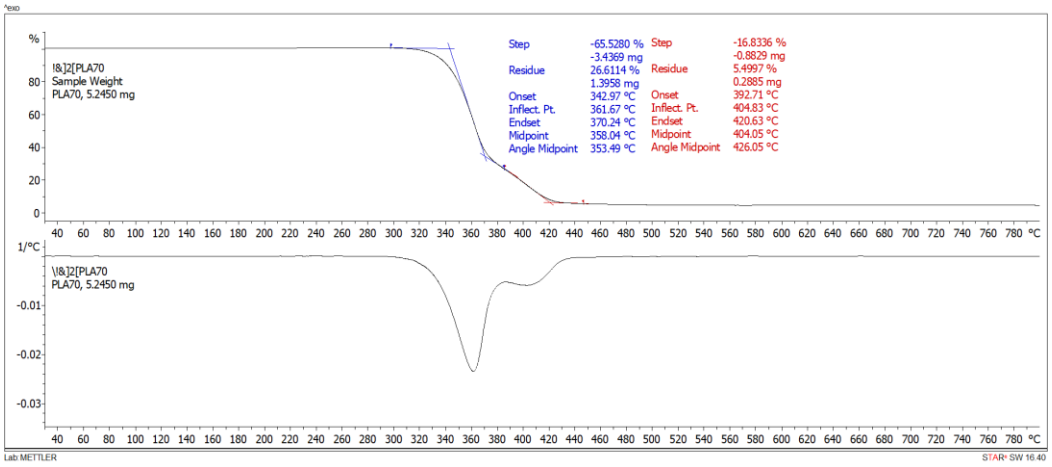
รูปที่ ก.1 TGA Thermogram ของ PLA



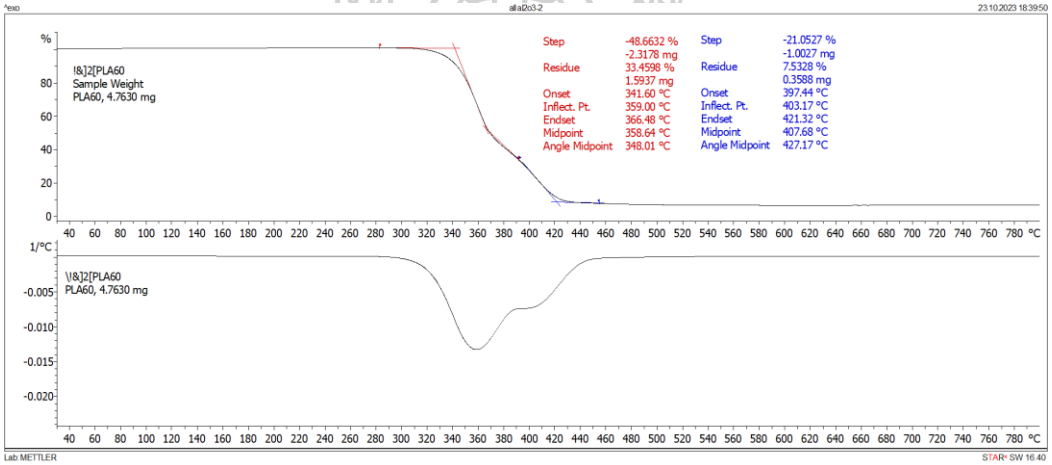
รูปที่ ก.2 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 90:10



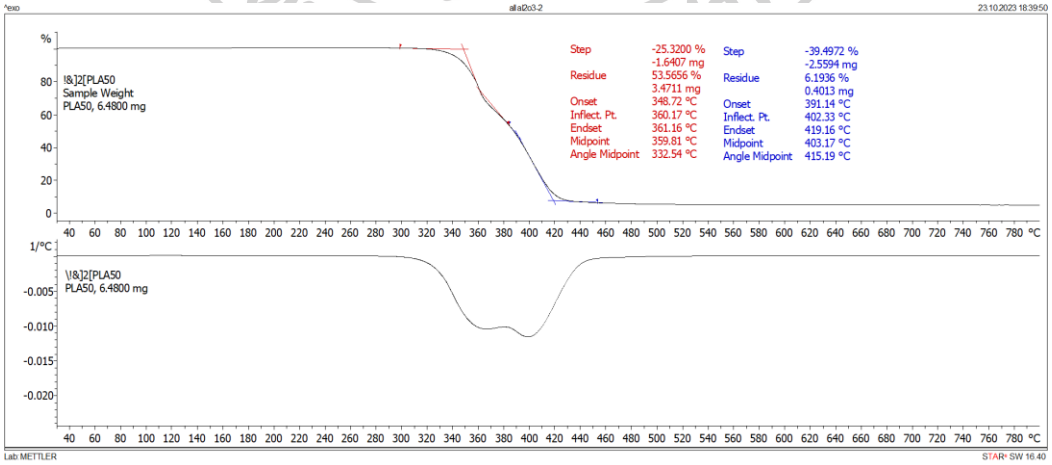
รูปที่ ก.3 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20



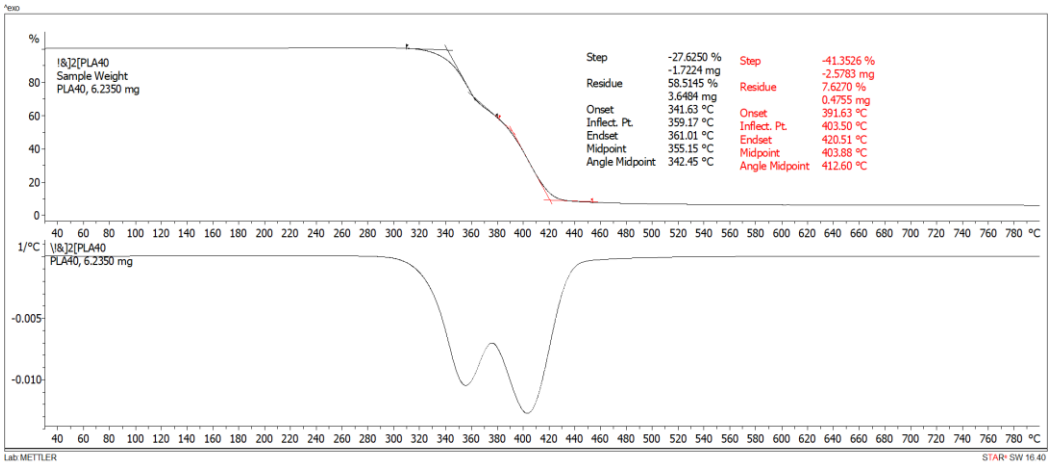
รูปที่ ก.4 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 70:30



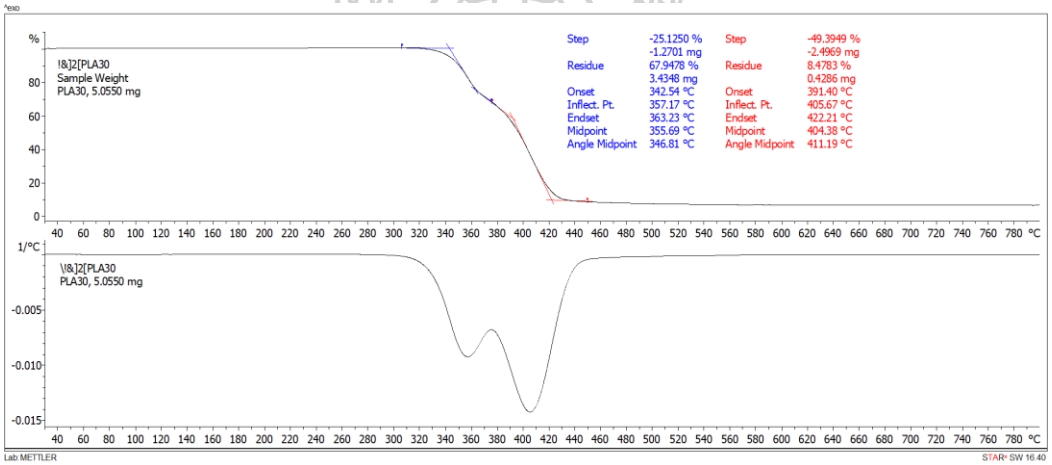
รูปที่ ก.5 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 60:40



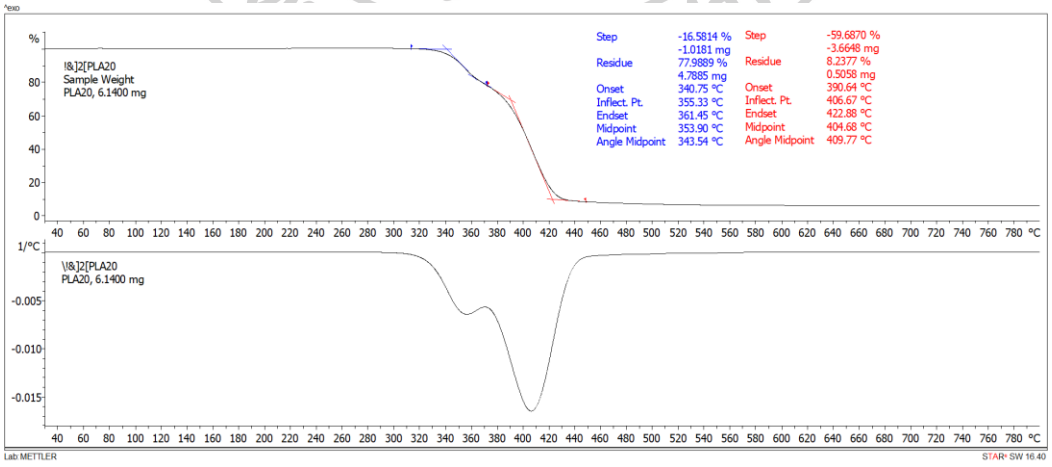
รูปที่ ก.6 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 50:50



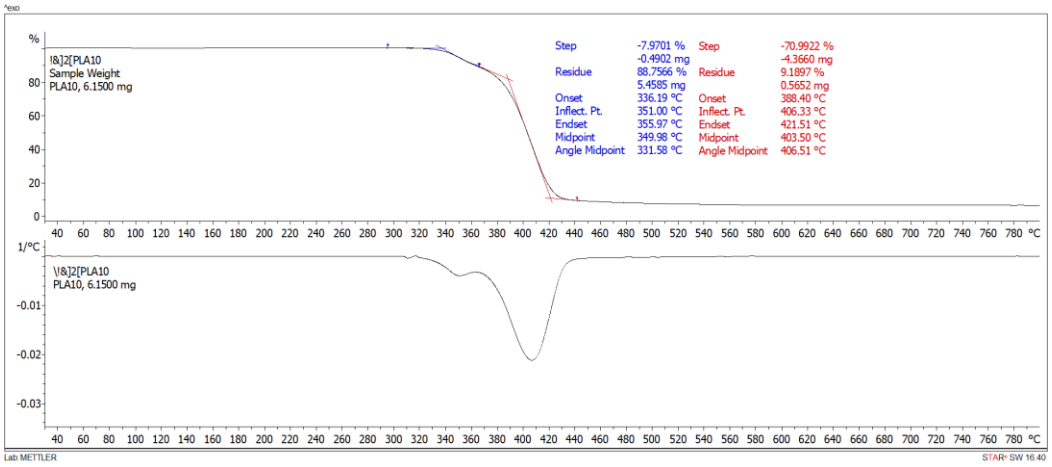
รูปที่ ก.7 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 40:60



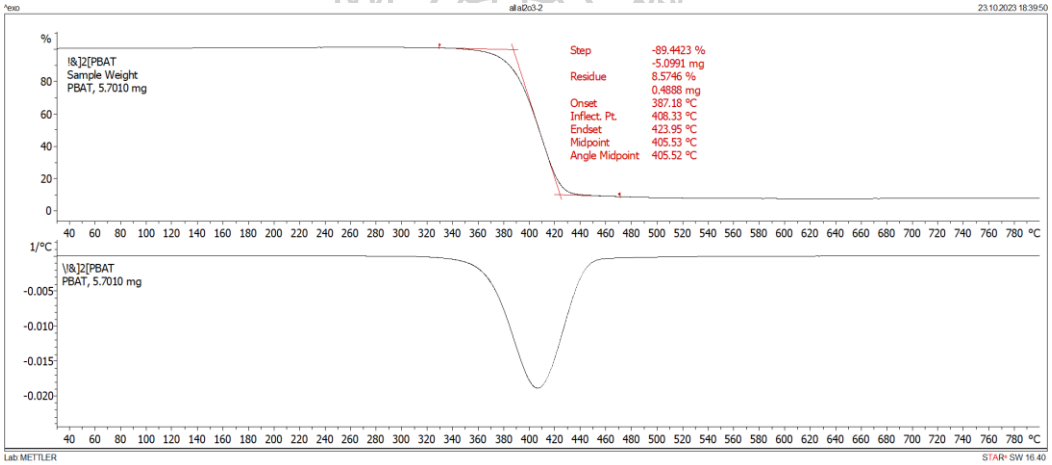
รูปที่ ก.8 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 30:70



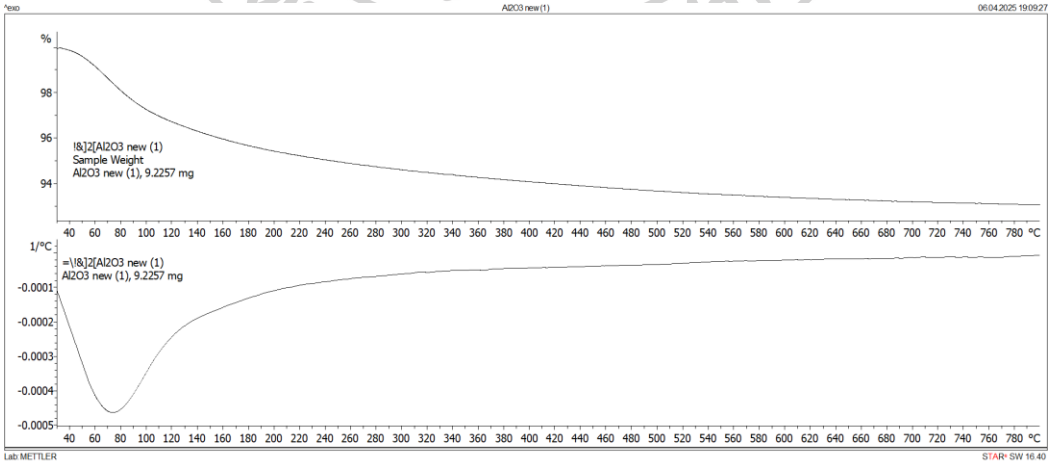
รูปที่ ก.9 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 20:80



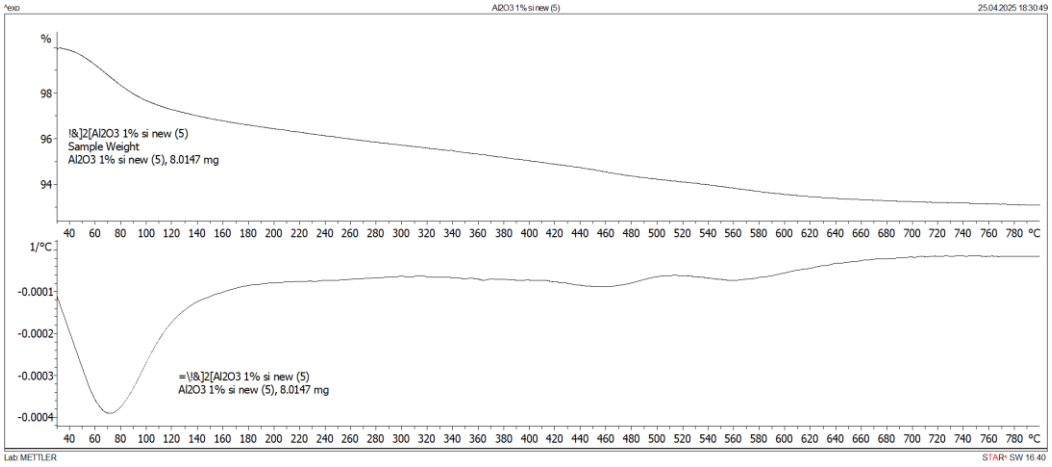
รูปที่ ก.10 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 10:90



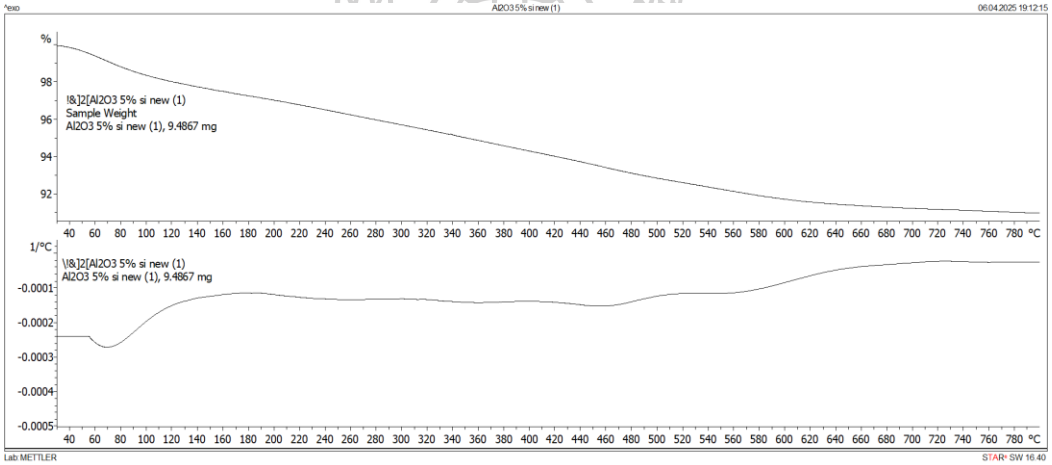
รูปที่ ก.11 TGA Thermogram ของ PBAT



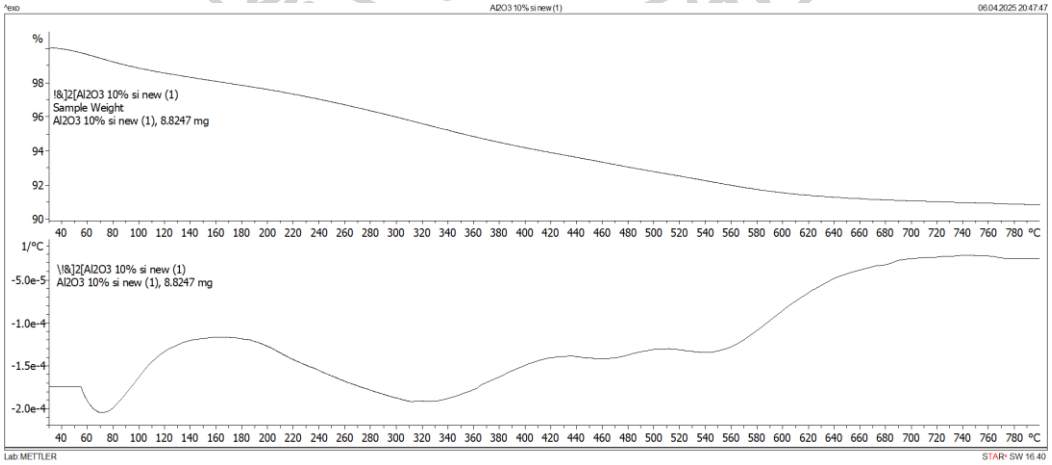
รูปที่ ก.12 TGA Thermogram ของ Al_2O_3



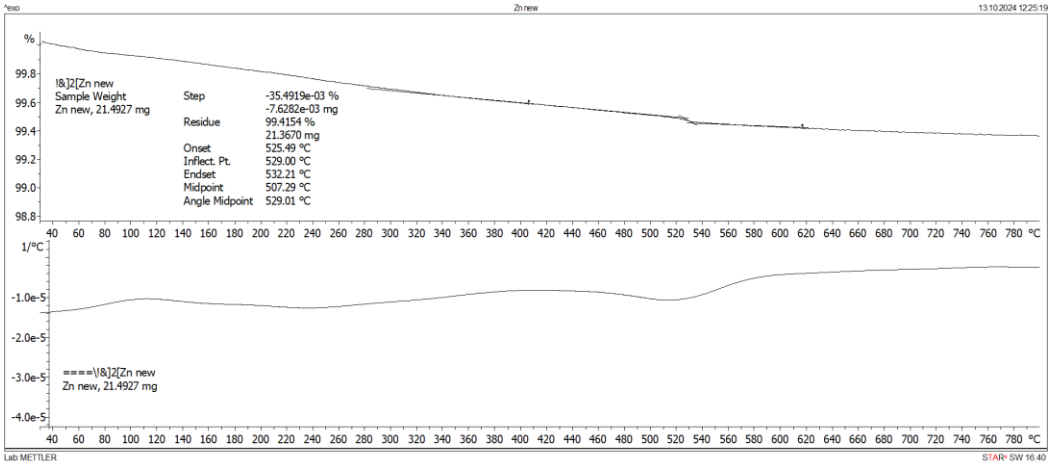
รูปที่ ก.13 TGA Thermogram ของ 1m-Al_2O_3



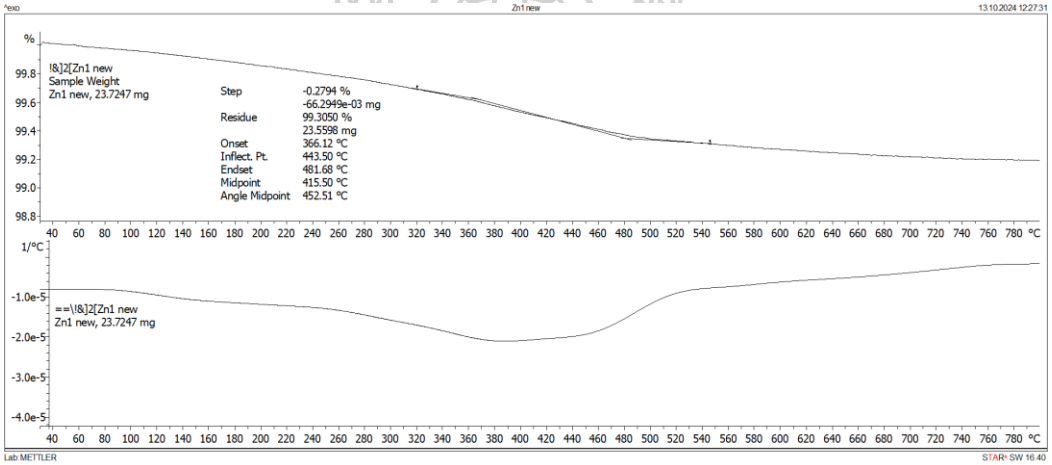
รูปที่ ก.14 TGA Thermogram ของ 5m-Al_2O_3



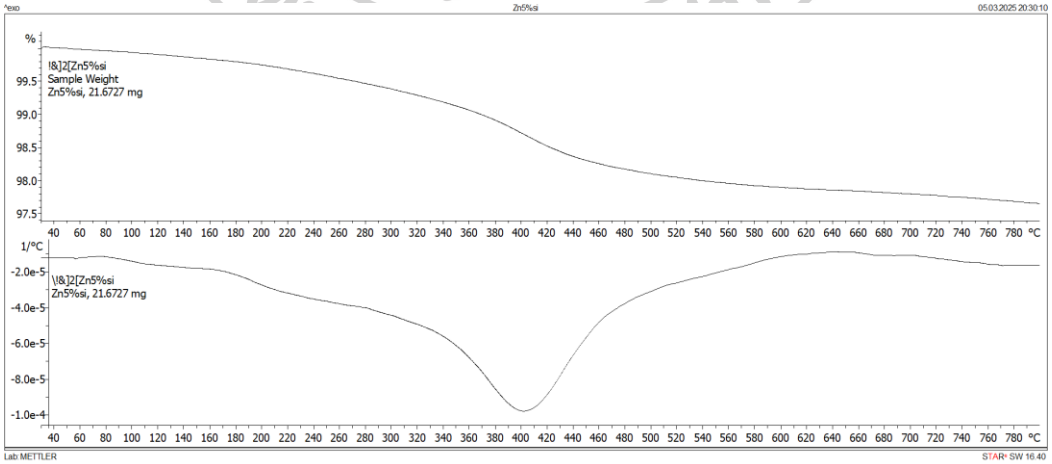
รูปที่ ก.15 TGA Thermogram ของ 10m-Al_2O_3



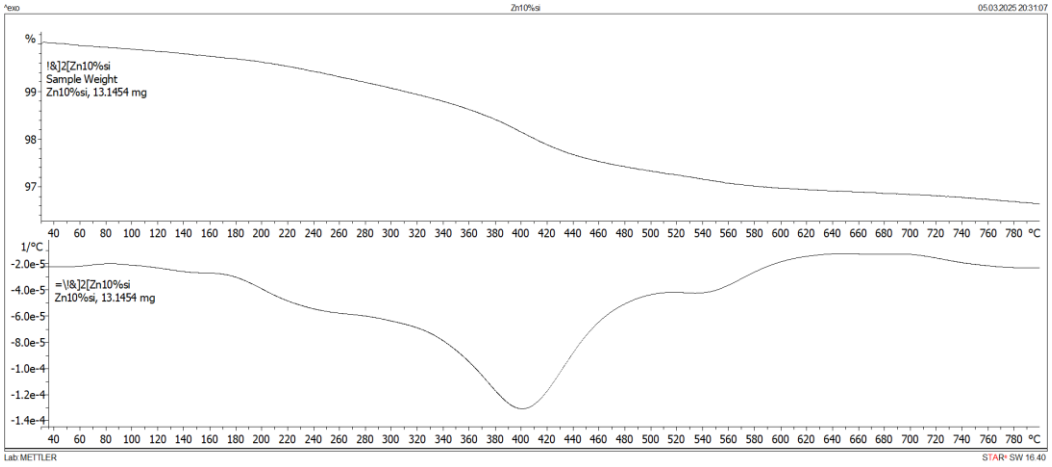
รูปที่ ก.16 TGA Thermogram ของ ZnO



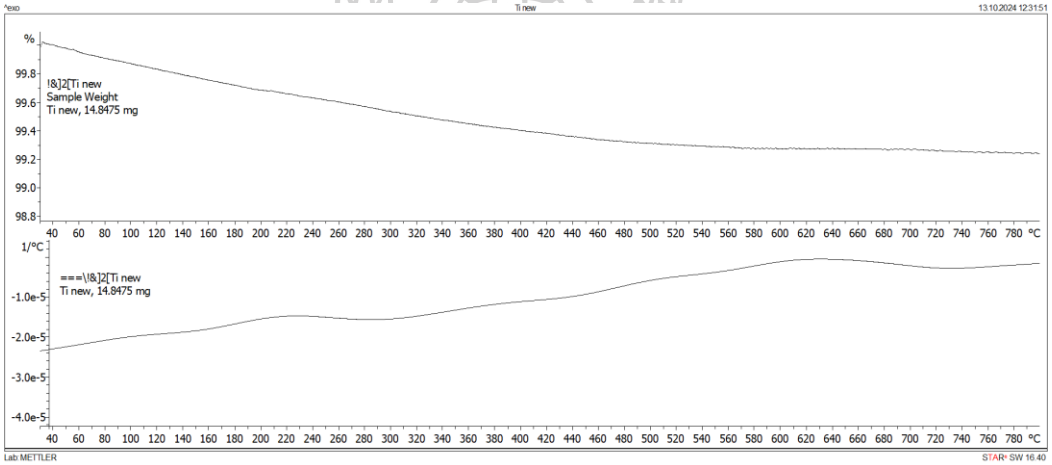
รูปที่ ก.17 TGA Thermogram ของ 1m-ZnO



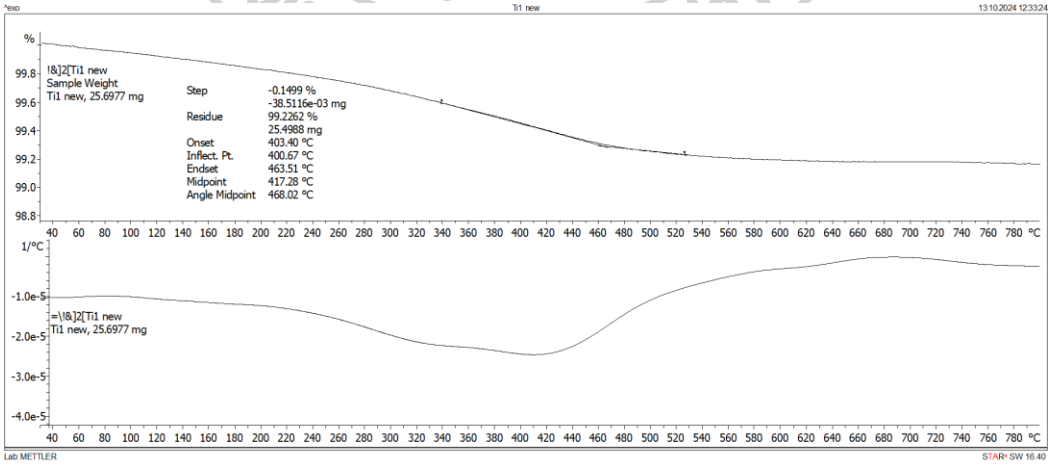
รูปที่ ก.18 TGA Thermogram ของ 5m-ZnO



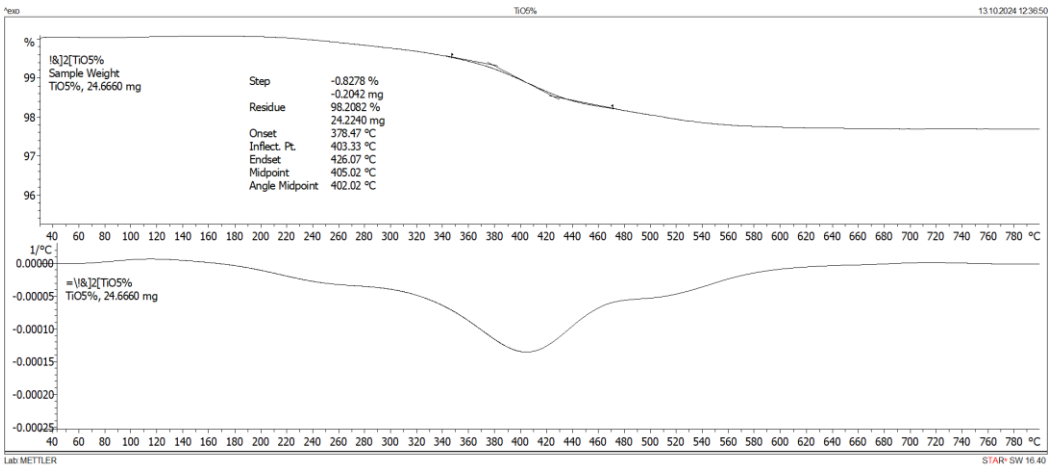
รูปที่ ก.19 TGA Thermogram ของ 10m-ZnO



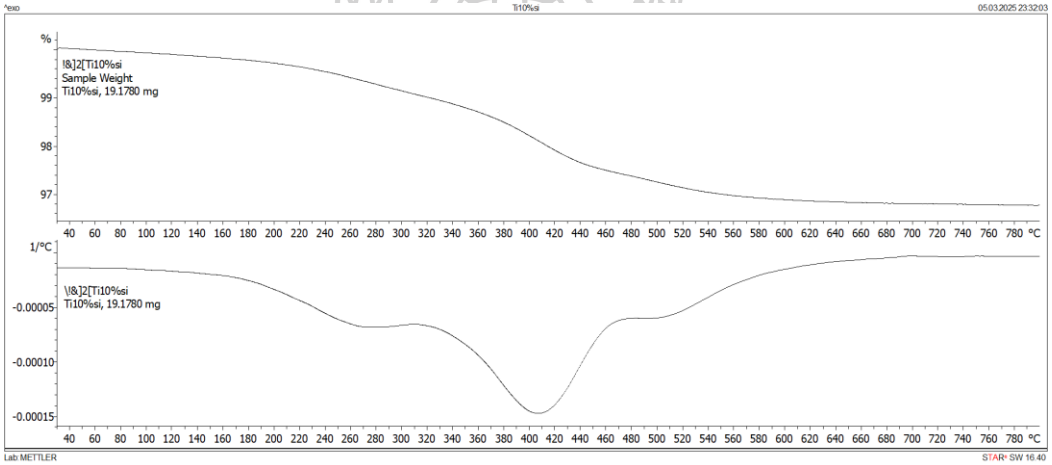
รูปที่ ก.20 TGA Thermogram ของ TiO_2



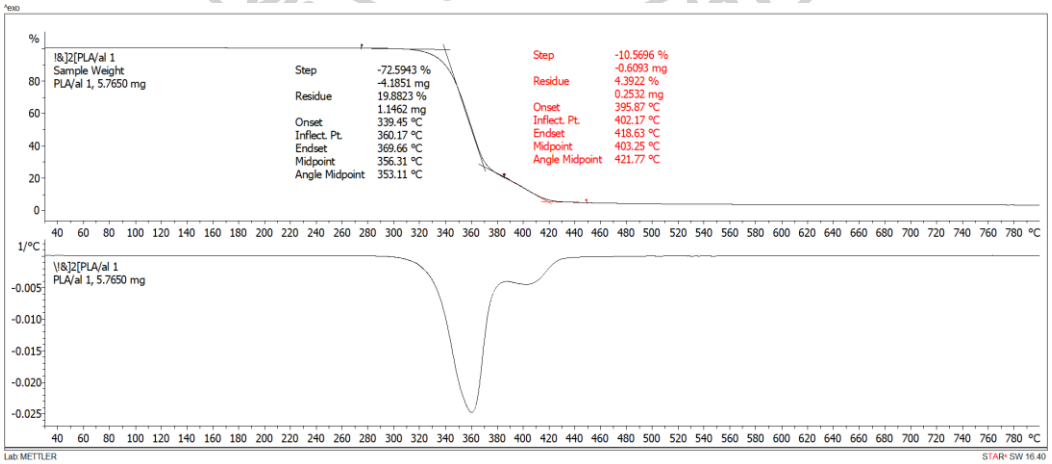
รูปที่ ก.21 TGA Thermogram ของ 1m-TiO_2



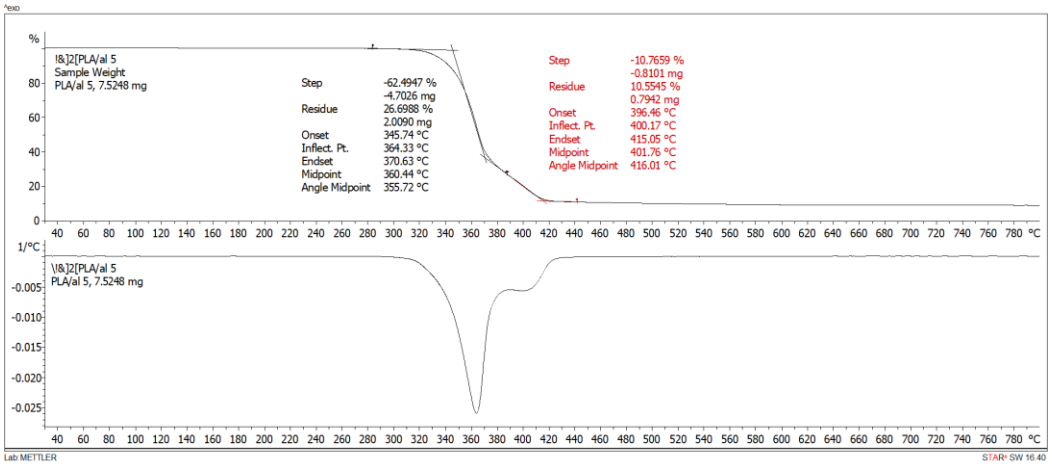
รูปที่ ก.22 TGA Thermogram ของ 5m-TiO_2



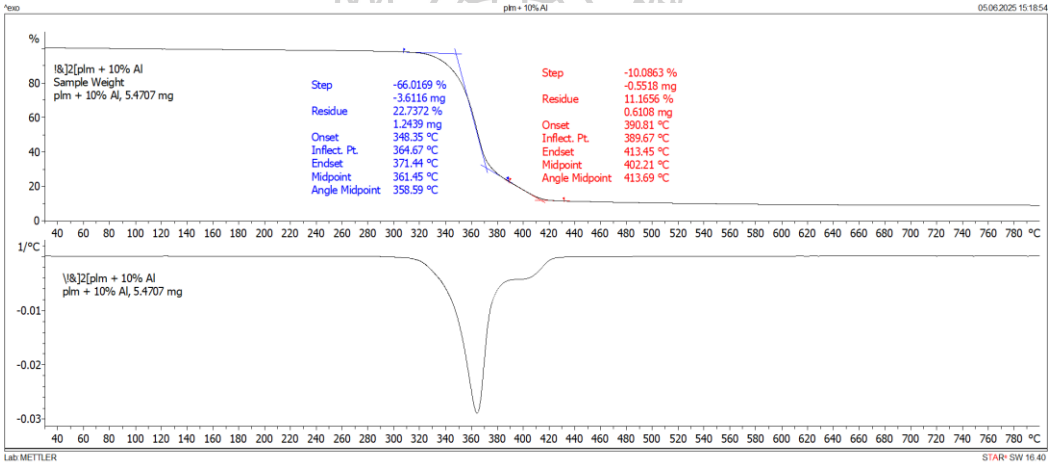
รูปที่ ก.23 TGA Thermogram ของ 10m-TiO_2



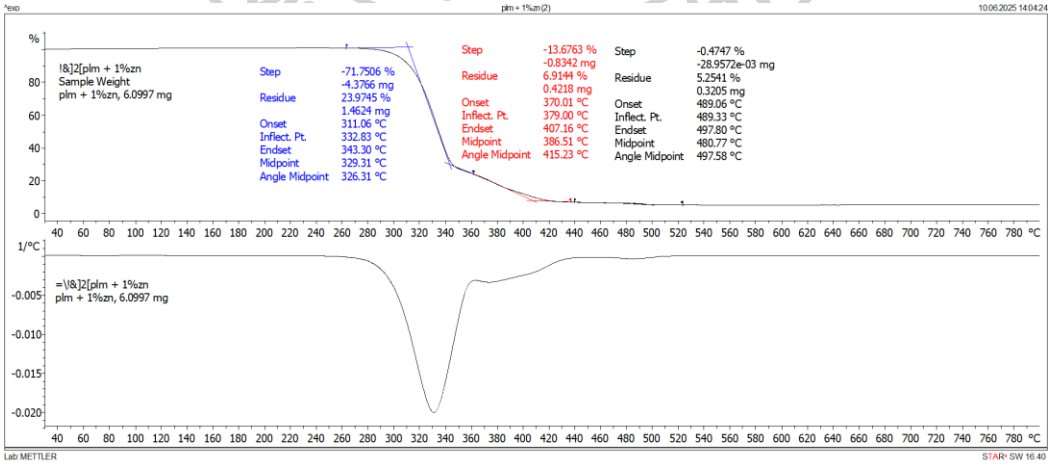
รูปที่ ก.24 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +1%5m-Al_2O_3



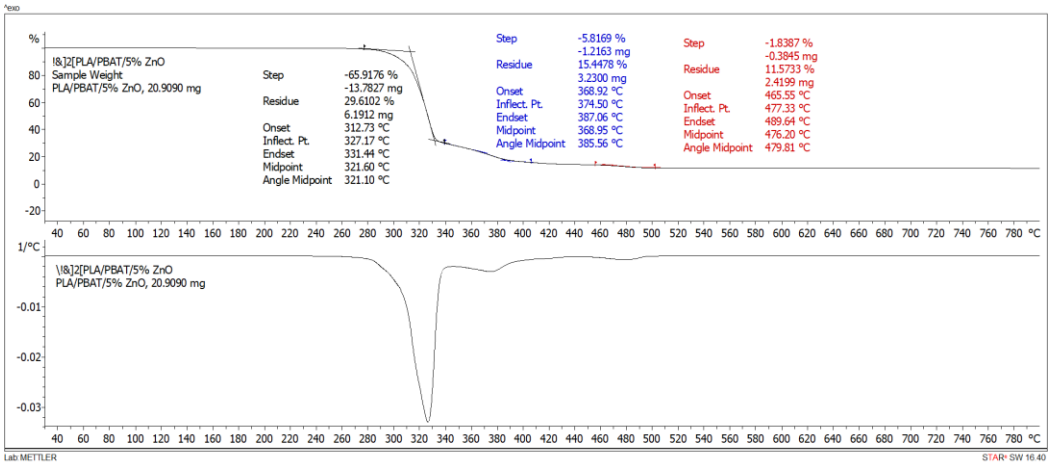
รูปที่ ก.25 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +5%5m-Al_2O_3



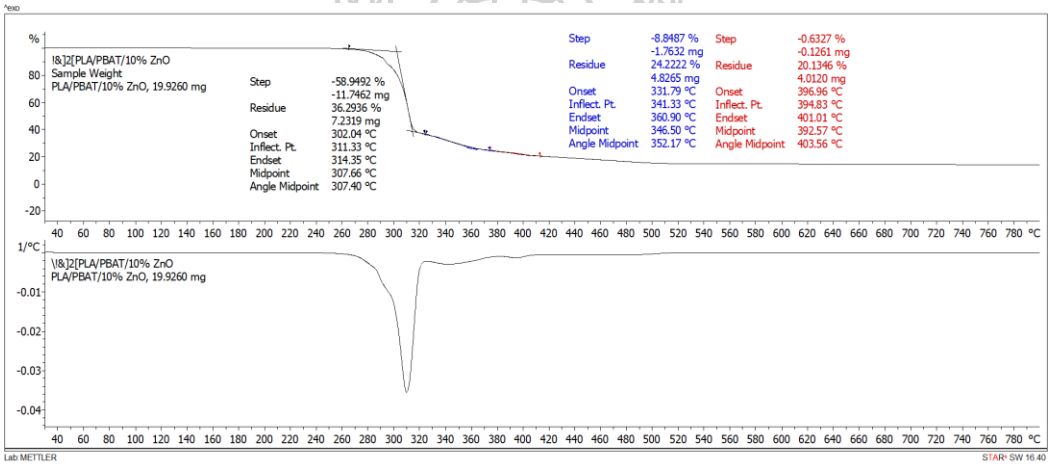
รูปที่ ก.26 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +10%5m-Al_2O_3



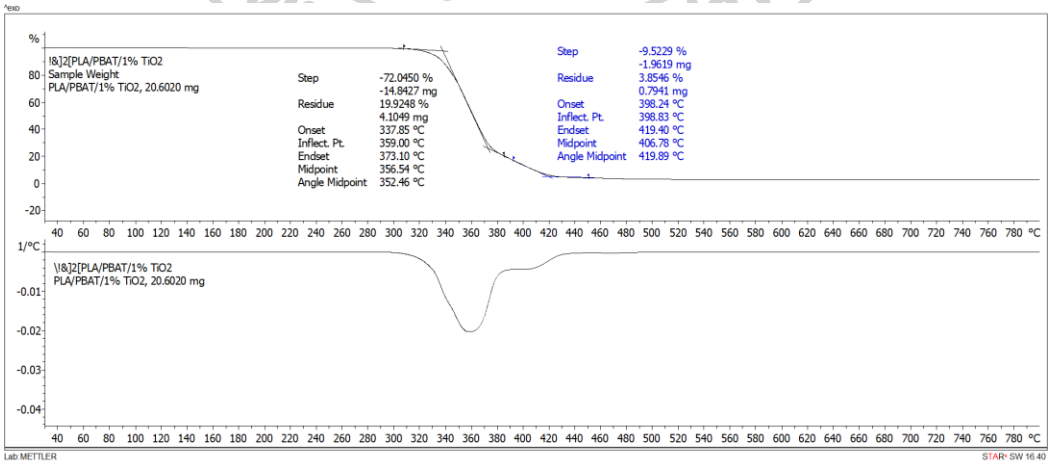
รูปที่ ก.27 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +1%5m-ZnO



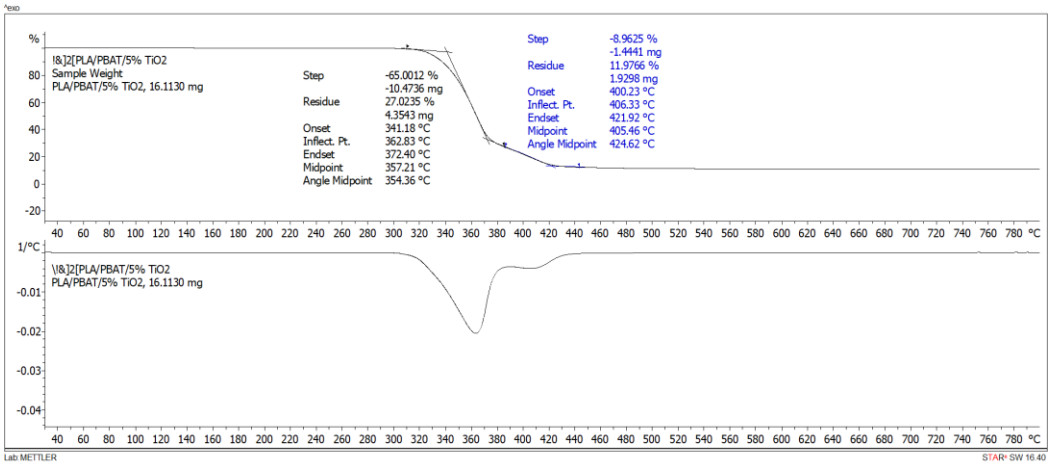
รูปที่ ก.28 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +5%5m-ZnO



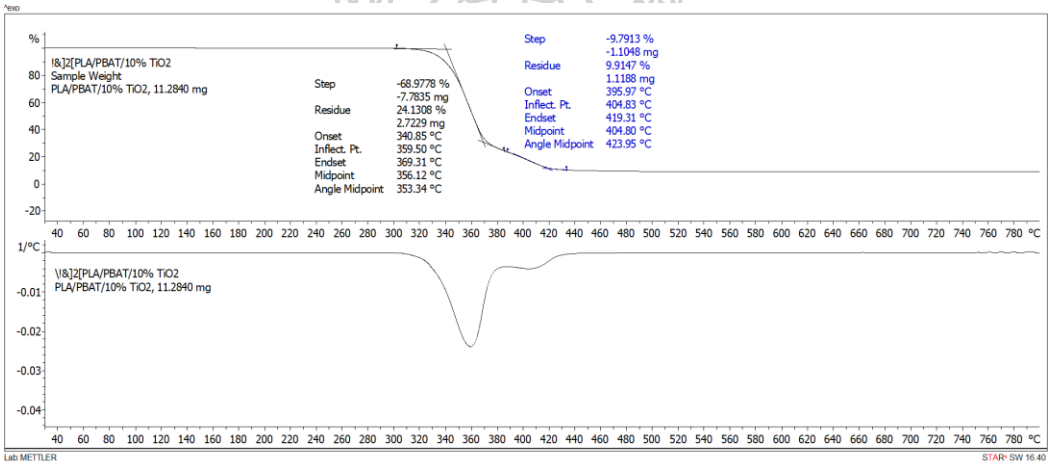
รูปที่ ก.29 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +10%5m-ZnO



รูปที่ ก.30 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +1%5m-TiO_2

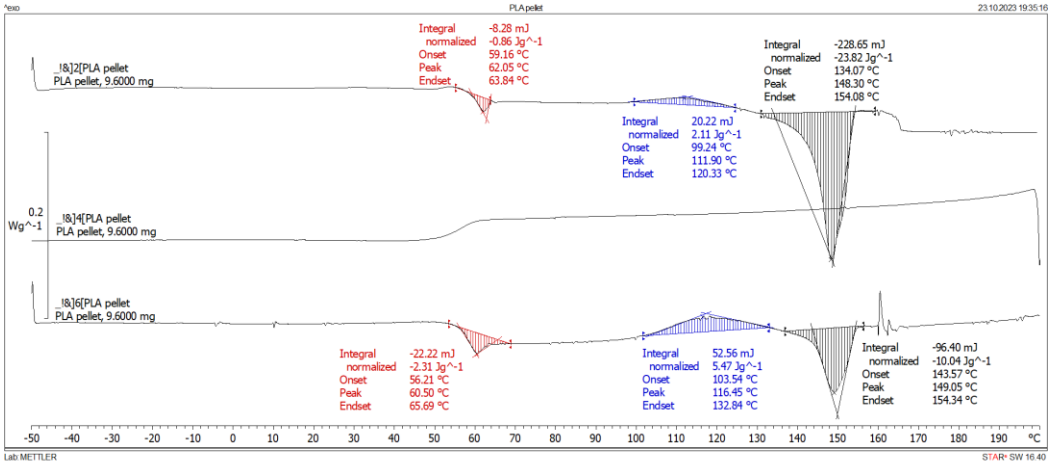


รูปที่ ก.31 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +5%5m-TiO_2

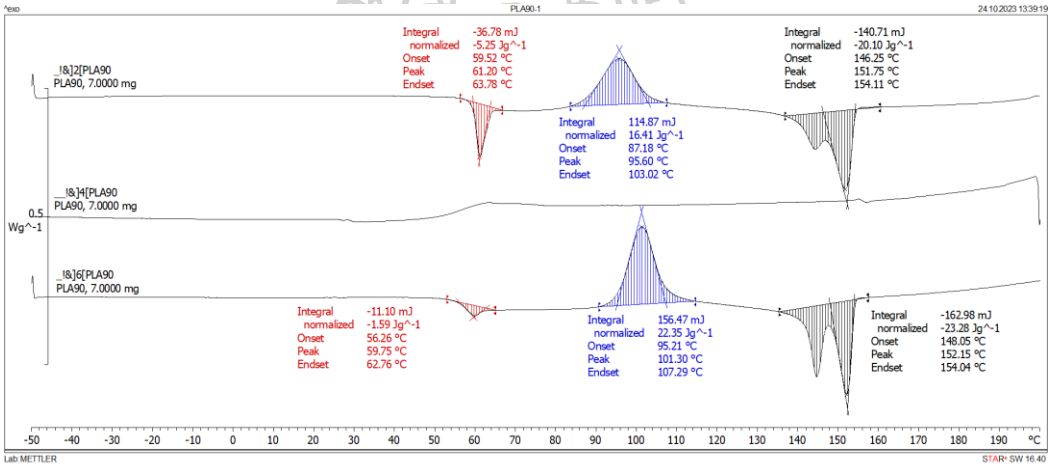


รูปที่ ก.32 TGA Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +10%5m-TiO_2

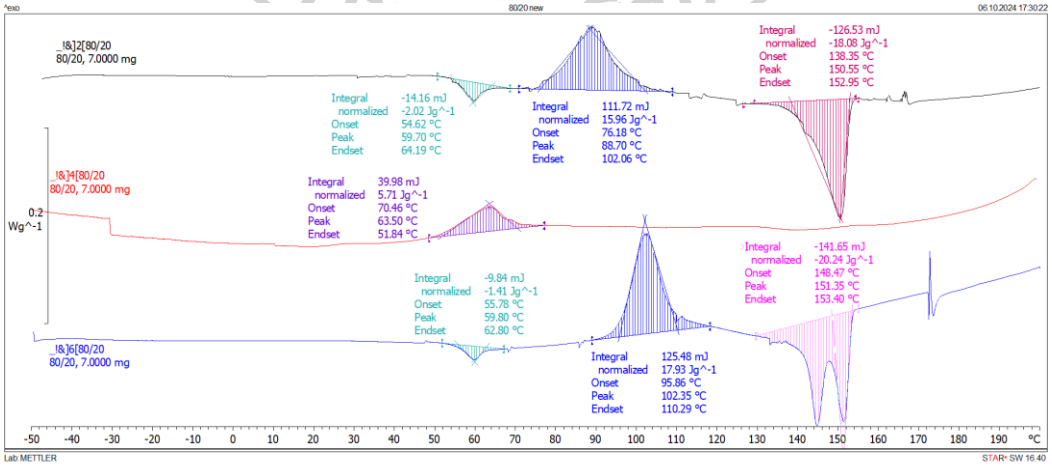
ภาคผนวก ก.2 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC



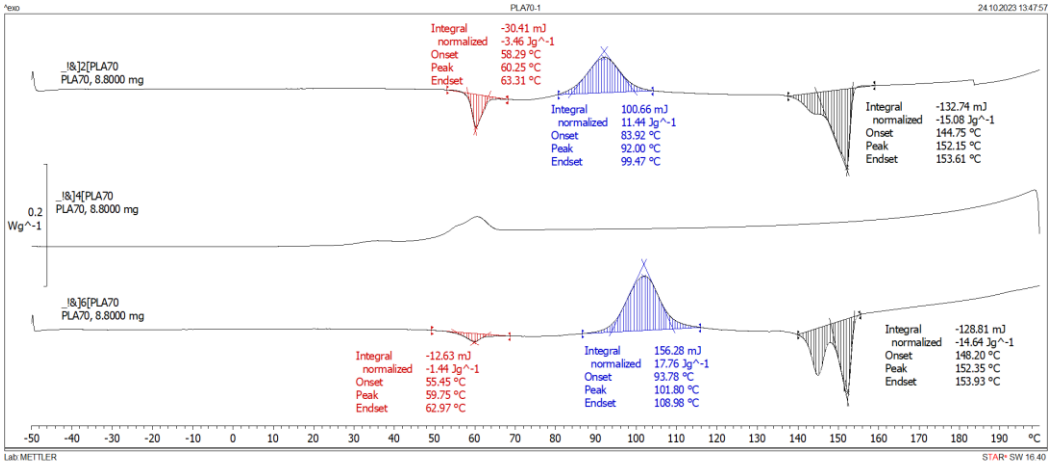
รูปที่ ก.33 DSC Thermogram ของ PLA



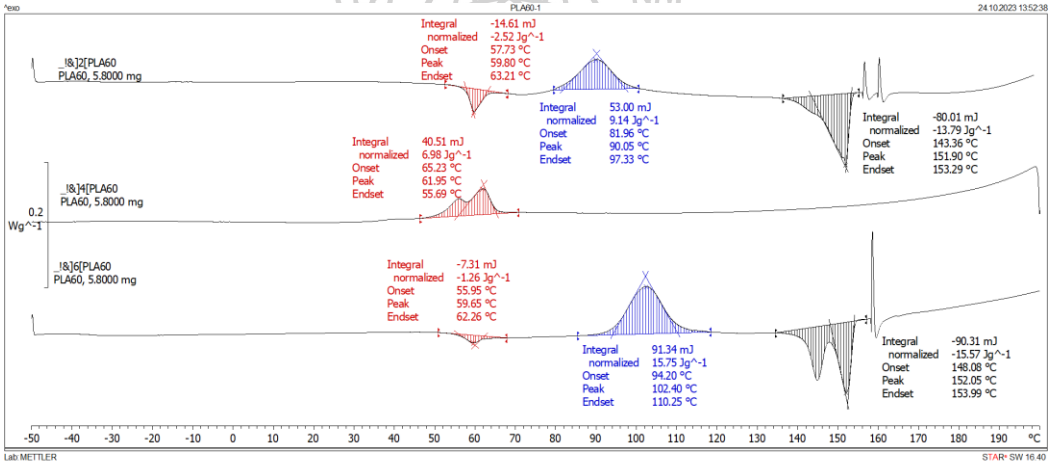
รูปที่ ก.34 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 90:10



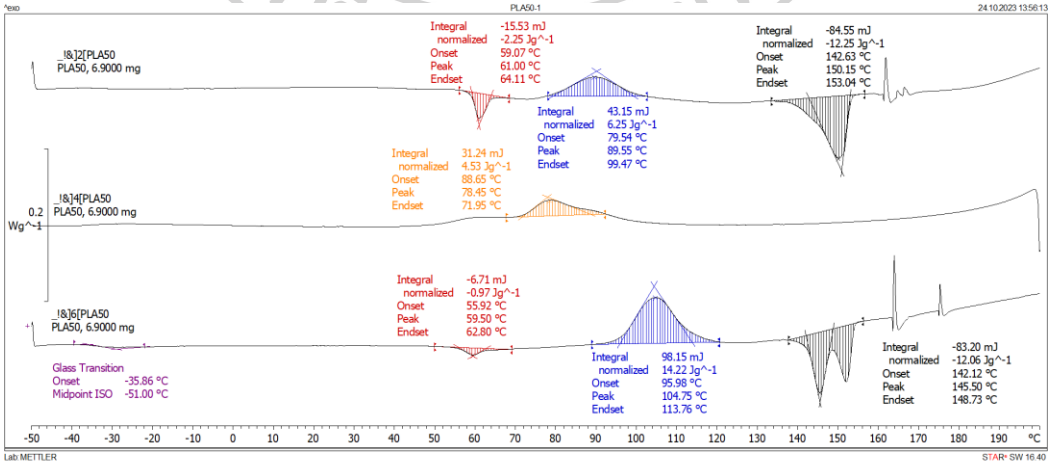
รูปที่ ก.35 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20



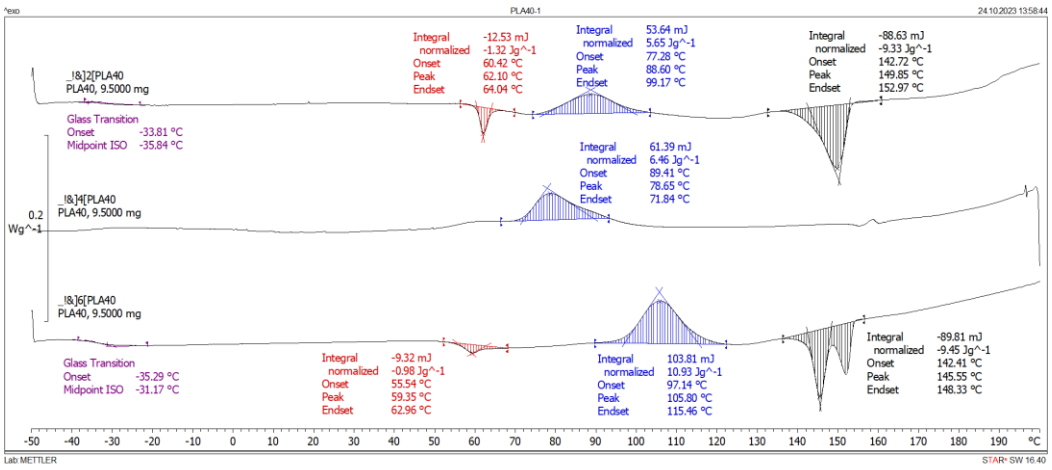
รูปที่ ก.36 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 70:30



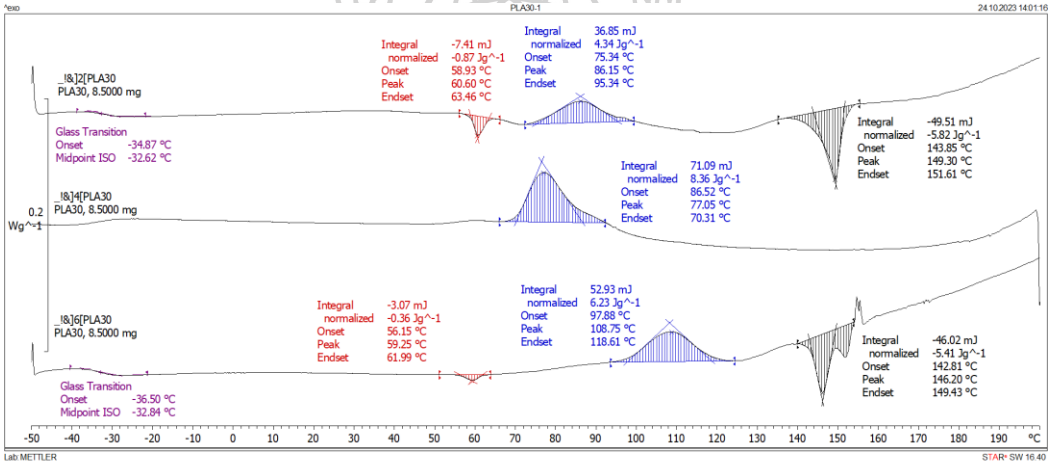
รูปที่ ก.37 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 60:40



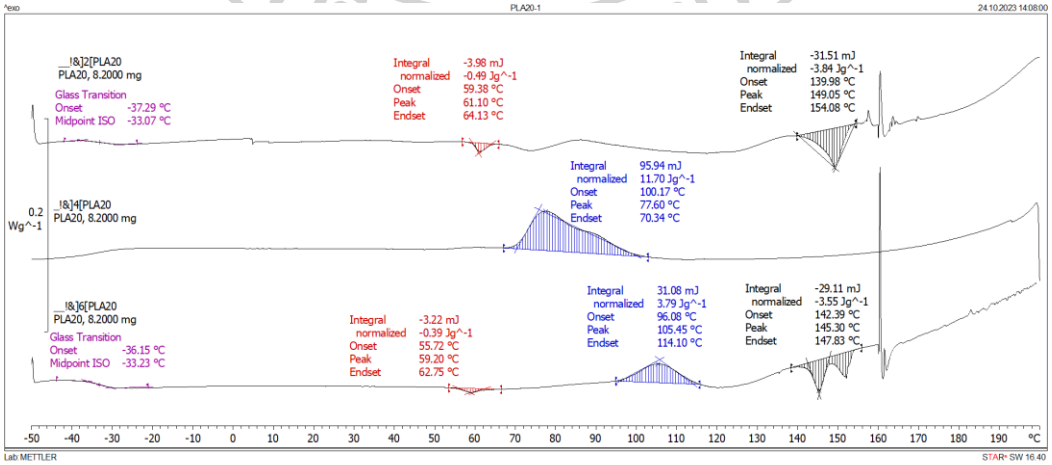
รูปที่ ก.38 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 50:50



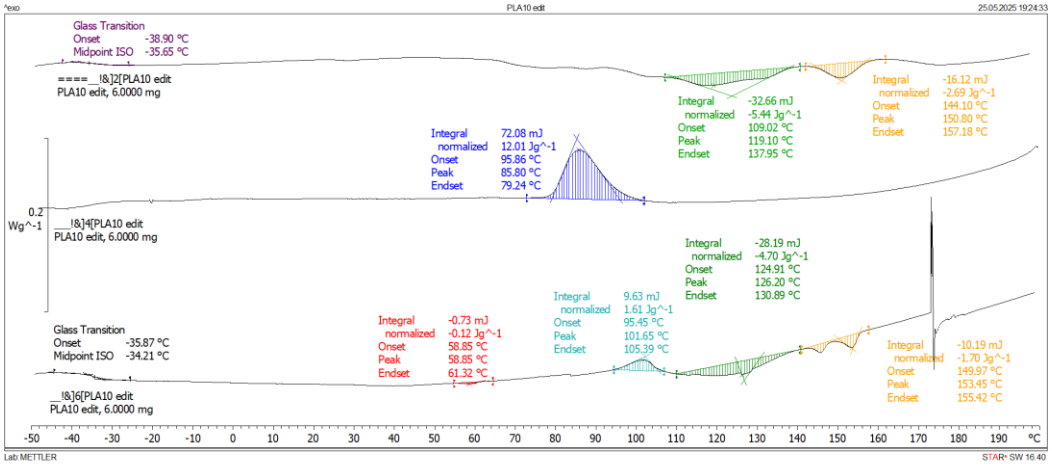
รูปที่ ก.39 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 40:60



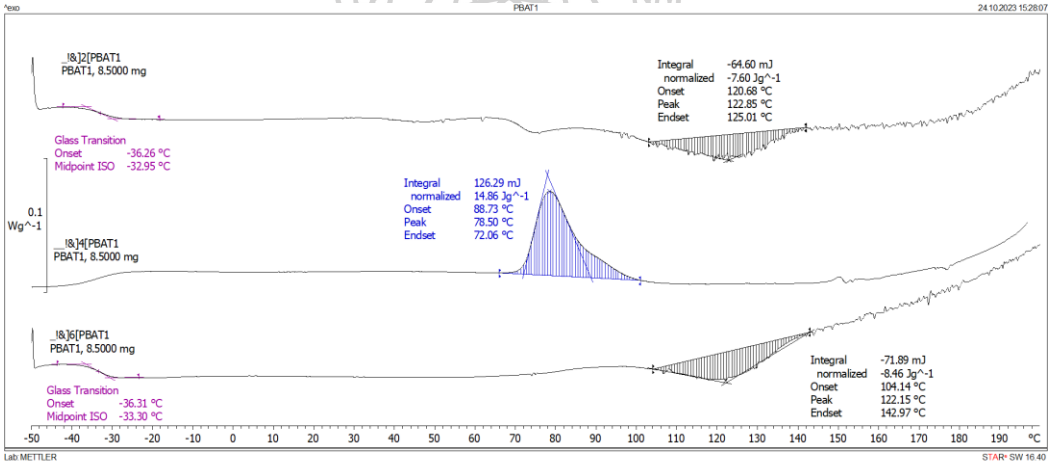
รูปที่ ก.40 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 30:70



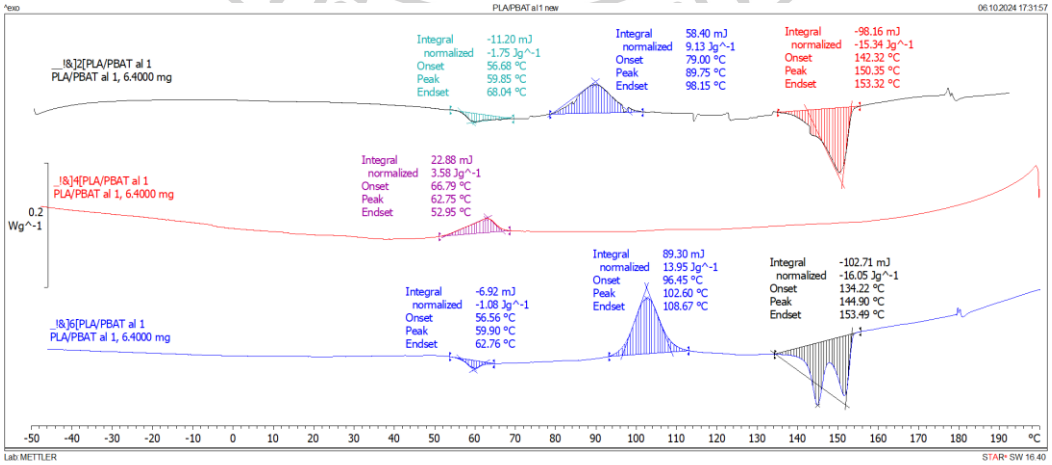
รูปที่ ก.41 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 20:80



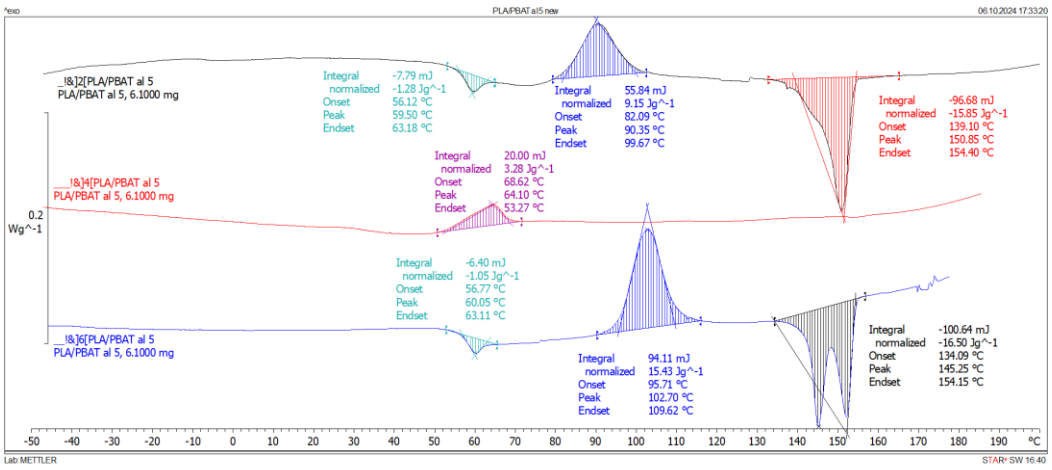
รูปที่ ก.42 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 10:90



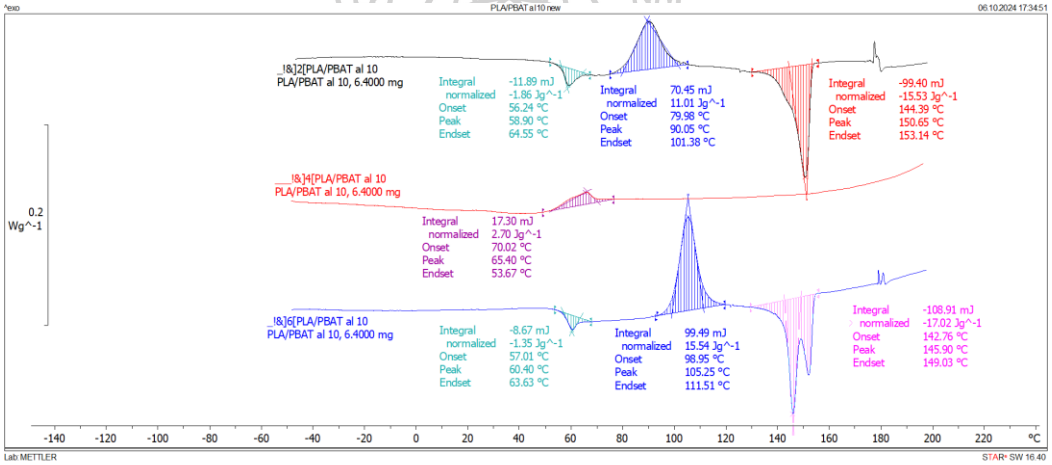
รูปที่ ก.43 DSC Thermogram ของ PBAT



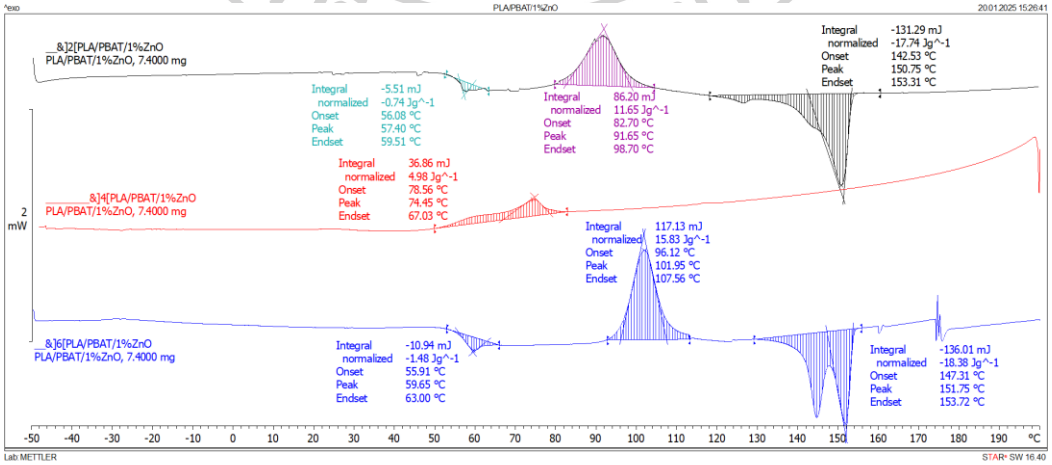
รูปที่ ก.44 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +1%5m-Al_2O_3



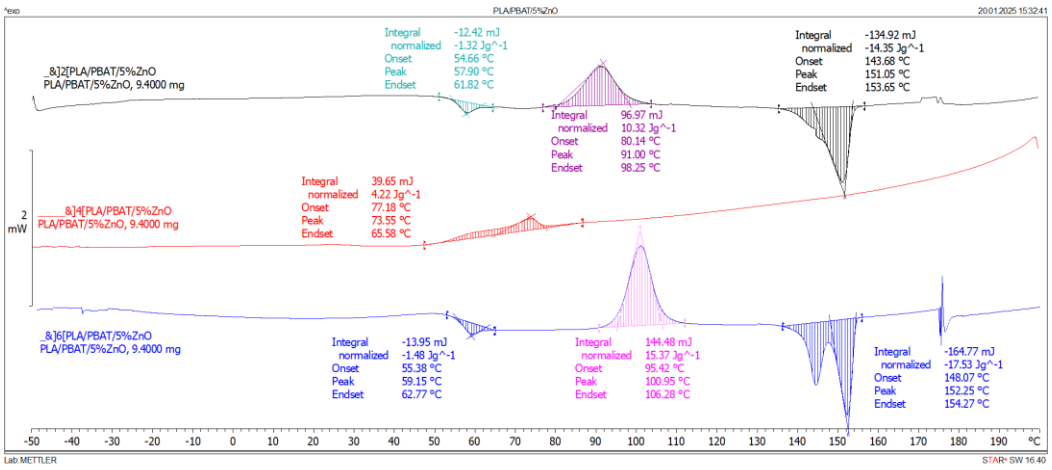
รูปที่ ก.45 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +5%5m-Al_2O_3



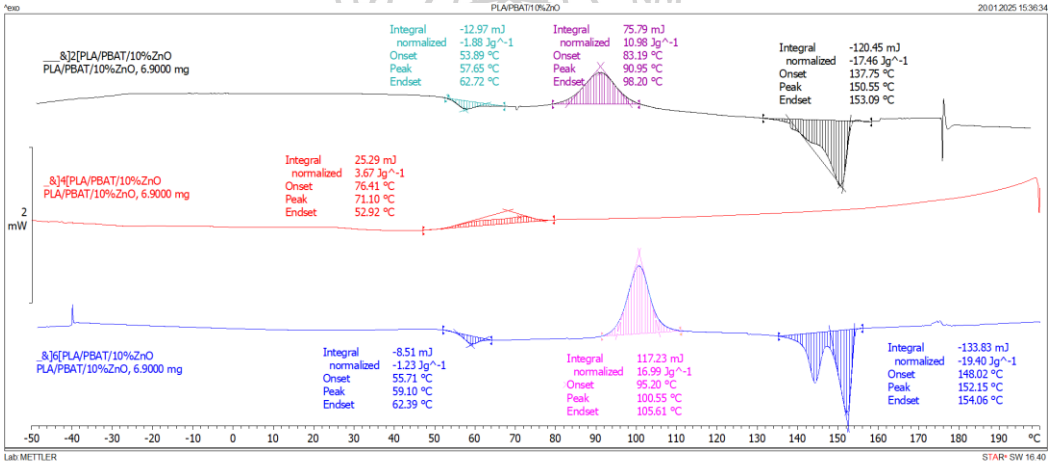
รูปที่ ก.46 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +10%5m-Al_2O_3



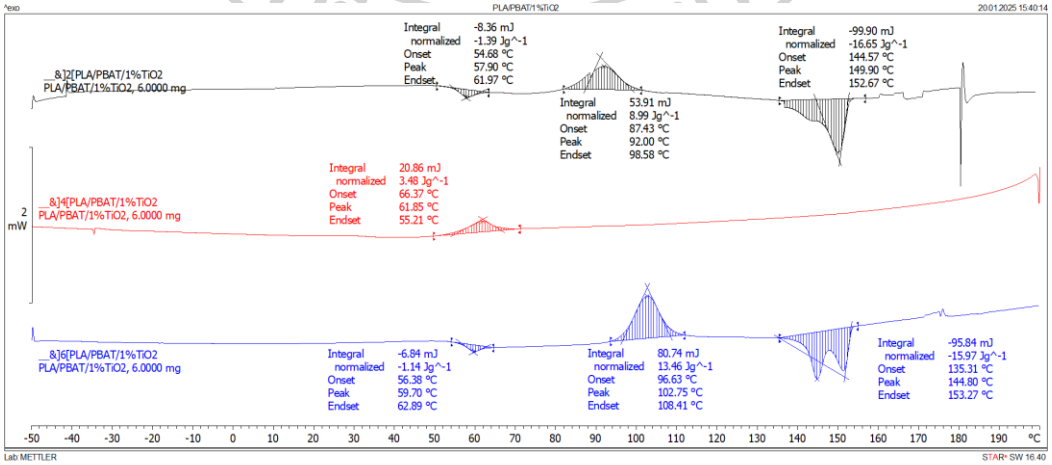
รูปที่ ก.47 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +1%5m-ZnO



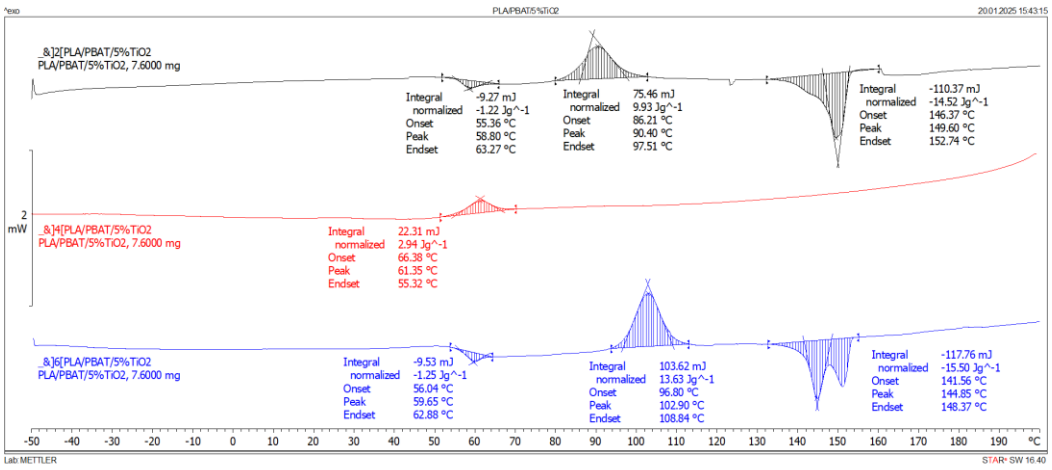
รูปที่ ก.48 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +5%5m-ZnO



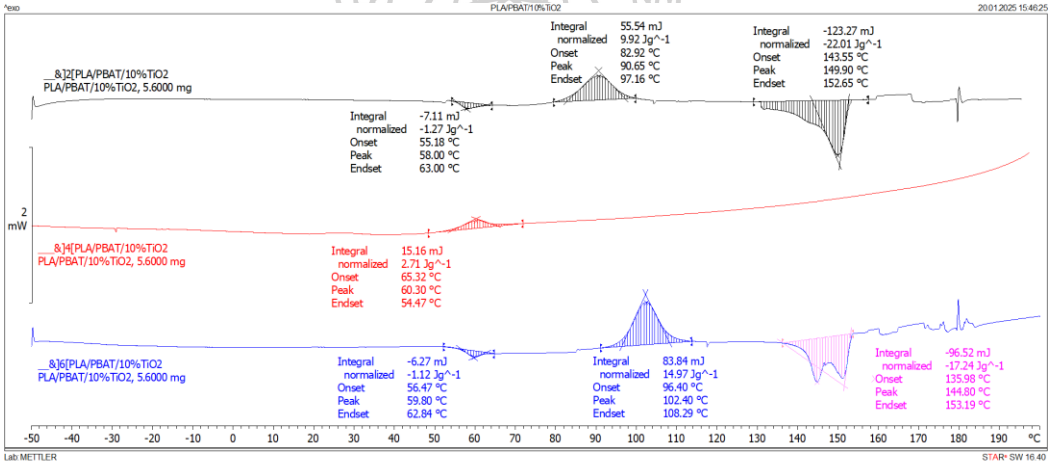
รูปที่ ก.49 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +10%5m-ZnO



รูปที่ ก.50 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +1%5m-TiO_2



รูปที่ ก.51 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +5%5m-TiO_2



รูปที่ ก.52 DSC Thermogram ของ PLA/PBAT 80:20 +10%5m-TiO_2

ตารางที่ ก.1 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม

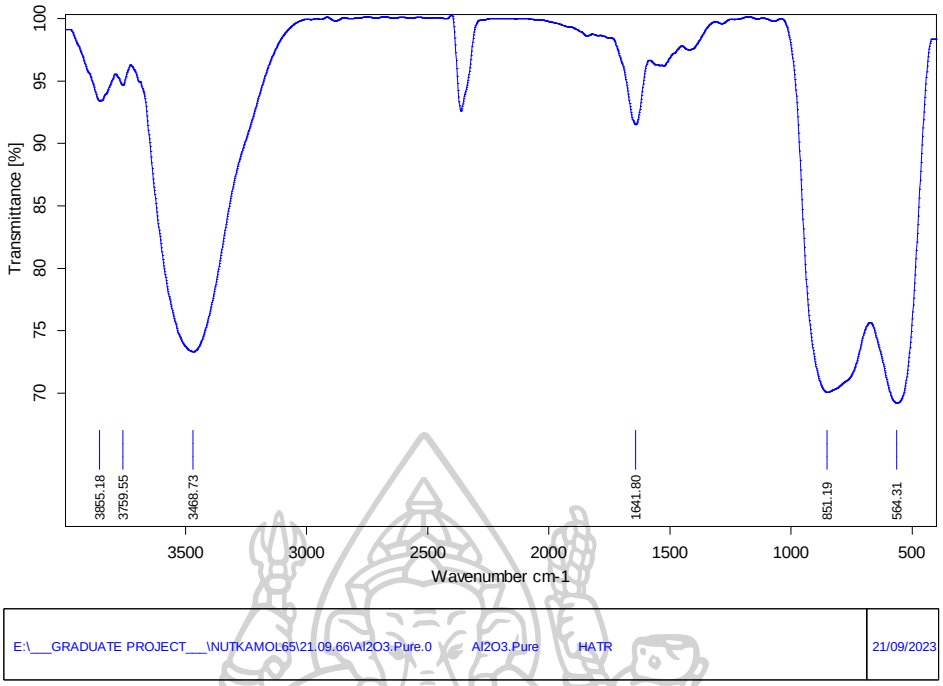
สาร	ตัวอย่าง	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFR g/10min	MFR เฉลี่ย	sd
PLA	1	131	1.11	5.08	5.77	0.71
	2	107	1.16	6.50		
	3	123	1.17	5.71		
PLA/PBAT 90:10	1	88	1.22	8.32	8.63	0.52
	2	95	1.32	8.34		
	3	78	1.2	9.23		
PLA/PBAT 80:20	1	78	1.22	9.38	9.57	0.37
	2	90	1.4	9.33		
	3	90	1.5	10.00		
PLA/PBAT 70:30	1	64	1.5	14.06	12.29	2.37
	2	90	1.44	9.60		
	3	70	1.54	13.20		
PLA/PBAT 60:40	1	60	1.97	19.70	17.02	3.94
	2	70	2.2	18.86		
	3	60	1.25	12.50		
PLA/PBAT 50:50	1	60	2.74	27.40	26.63	0.75
	2	60	2.66	26.60		
	3	60	2.59	25.90		
PLA/PBAT 40:60	1	61	3.13	30.79	31.66	0.87
	2	72	3.8	31.67		
	3	64	3.47	32.53		
PLA/PBAT 30:70	1	72	4.79	39.92	39.44	1.39
	2	48	3.03	37.88		
	3	57	3.85	40.53		
PLA/PBAT 20:80	1	60	4.22	42.20	42.57	0.47
	2	60	4.31	43.10		
	3	60	4.24	42.40		

ตารางที่ ก.1 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม (ต่อ)

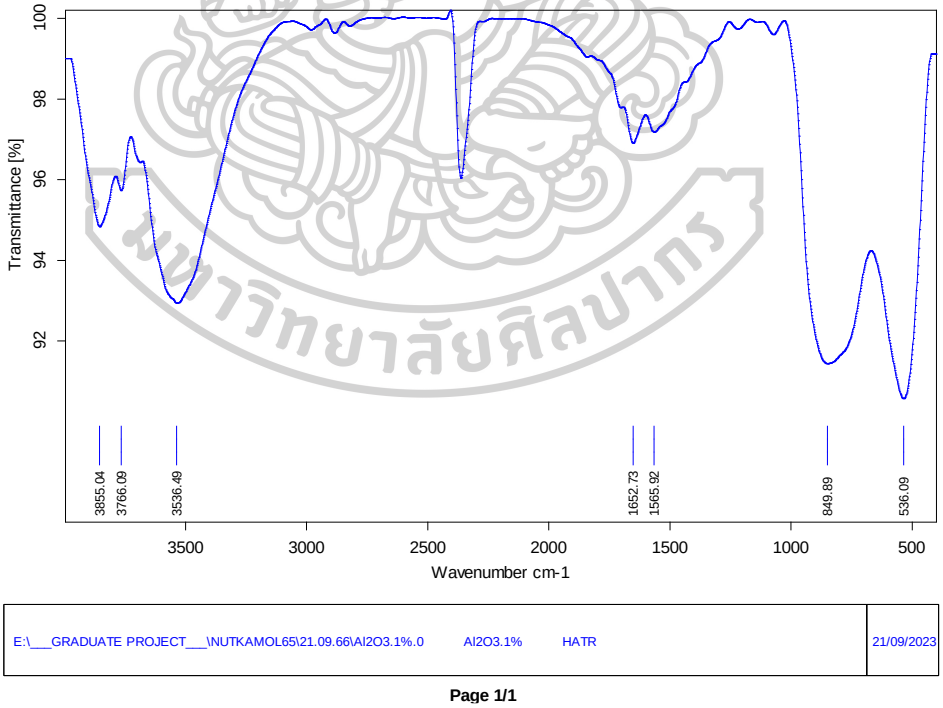
สาร	ตัวอย่าง	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFR g/10min	MFR เฉลี่ย	sd
PLA/PBAT 10:90	1	60	4.76	47.60	48.47	0.78
	2	60	4.91	49.10		
	3	60	4.87	48.70		
PBAT	1	60	5.34	53.40	48.90	5.55
	2	60	4.27	42.70		
	3	60	5.06	50.60		

ตารางที่ ก.2 ค่าดัชนีการไหลของวัสดุคอมโพสิต

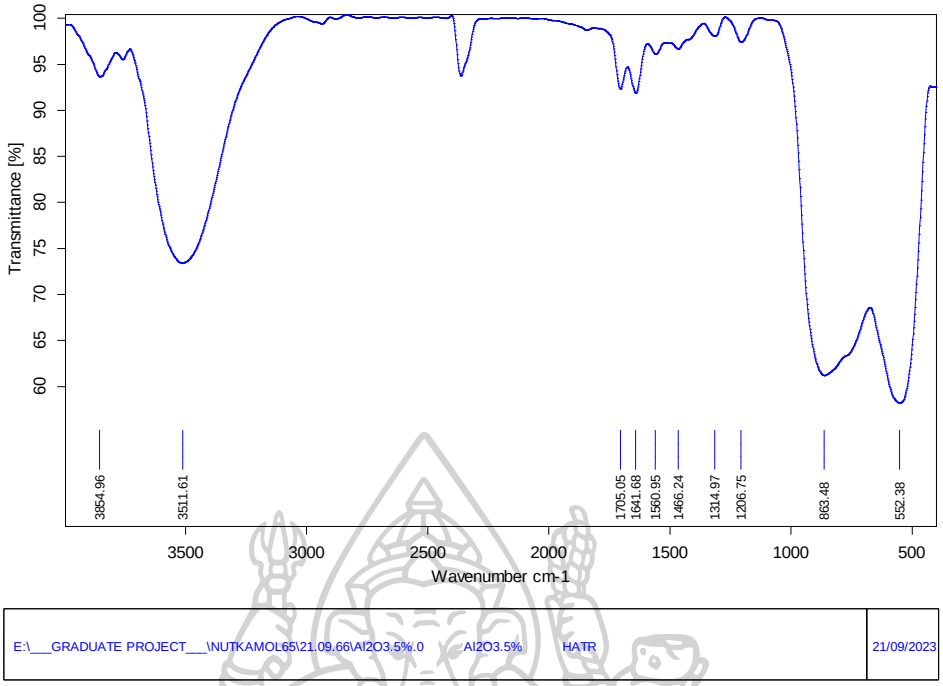
สาร	ตัวอย่าง	เวลา (s)	น้ำหนัก (g)	MFR g/10min	MFR เฉลี่ย	sd
PLA/PBAT + 1% 5m-Al2O3	1	68	1.05	9.26	11.99	3.70
	2	60	1.62	16.20		
	3	80	1.4	10.50		
PLA/PBAT + 5% 5m-Al2O3	1	72	1.38	11.50	11.31	0.18
	2	68	1.28	11.29		
	3	70	1.3	11.14		
PLA/PBAT + 10% 5m-Al2O3	1	70	1.27	10.89	11.90	1.27
	2	50	1.11	13.32		
	3	60	1.15	11.50		
PLA/PBAT + 1% 5m-ZnO	1	60	1.69	16.90	18.35	1.28
	2	50	1.61	19.32		
	3	50	1.57	18.84		
PLA/PBAT + 5% 5m-ZnO	1	75	3.97	31.76	30.16	3.26
	4	97	4.27	26.41		
	5	83	4.47	32.31		
PLA/PBAT + 10% 5m-ZnO	1	75	4.4	35.20	36.39	3.00
	2	79	4.5	34.18		
	3	71	4.71	39.80		
PLA/PBAT + 1% 5m-TiO2	1	98	1.5	9.18	7.99	1.10
	2	59	0.7	7.00		
	3	60	0.78	7.80		
PLA/PBAT + 5% 5m-TiO2	1	95	1.15	7.26	7.59	0.29
	2	59	0.77	7.70		
	3	61	0.78	7.80		
PLA/PBAT + 10% 5m-TiO2	1	107	1.01	5.66	6.92	1.09
	2	60	0.75	7.50		
	3	62	0.76	7.60		



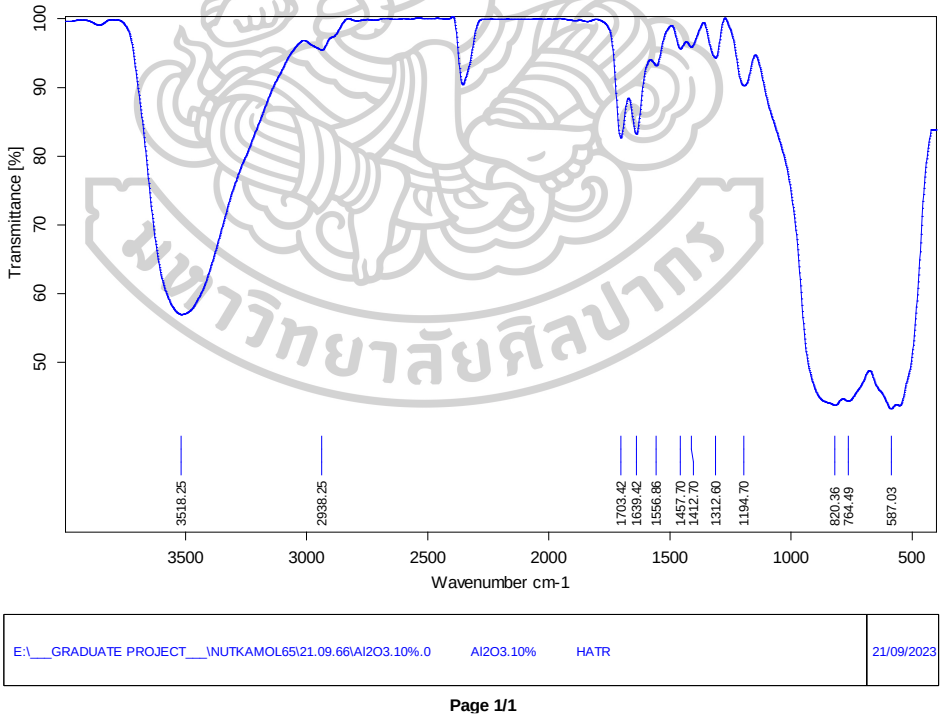
รูปที่ ก.53 FTIR spectra ของ Al_2O_3



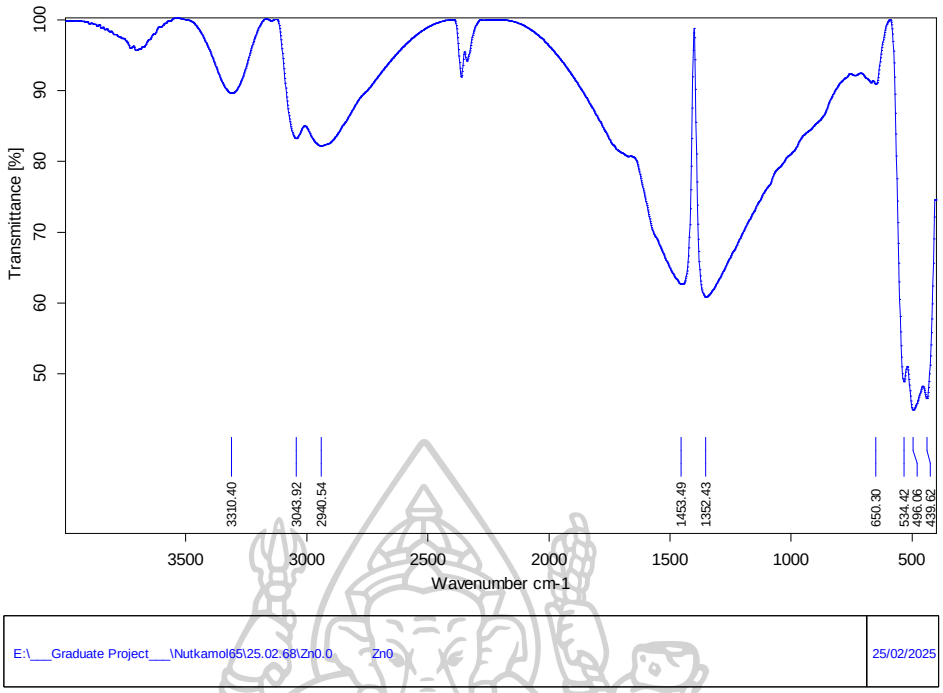
รูปที่ ก.54 FTIR spectra ของ 1m-Al_2O_3



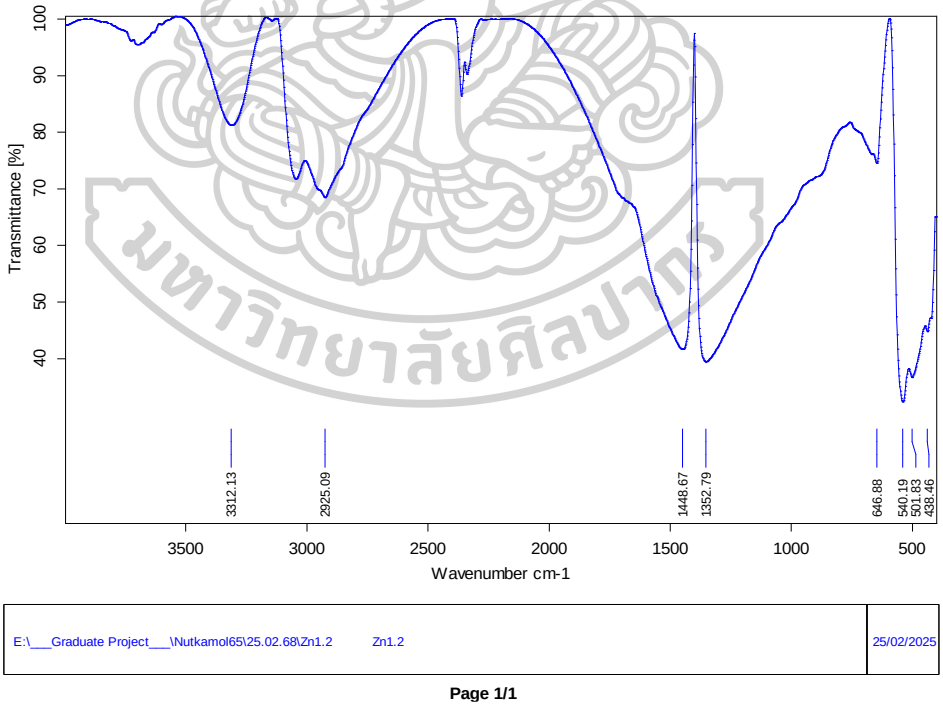
รูปที่ ก.55 FTIR spectra ของ 5m-Al_2O_3



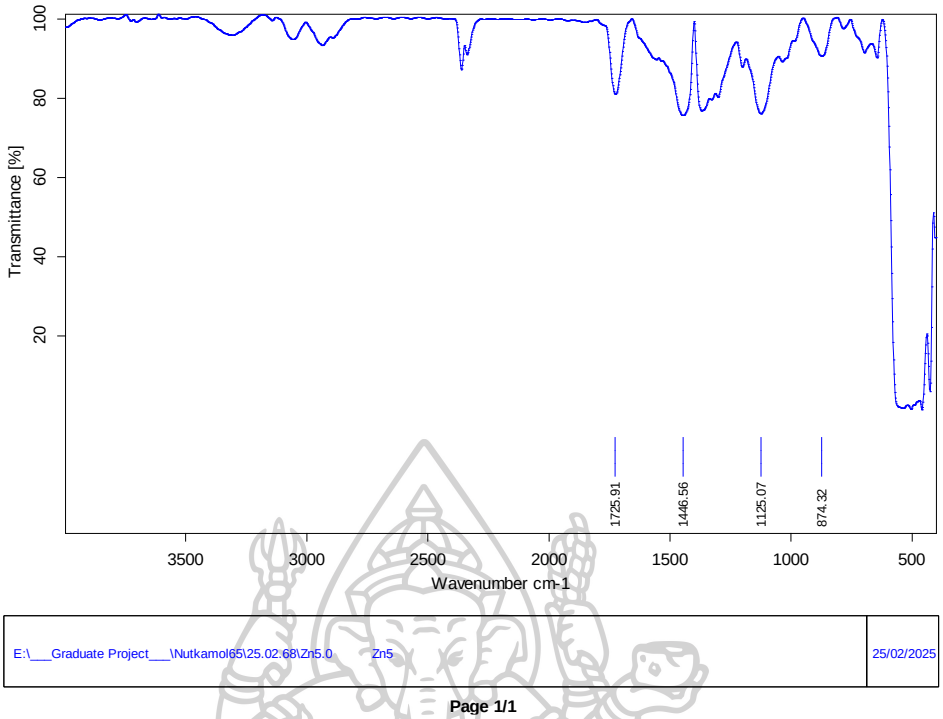
รูปที่ ก.56 FTIR spectra ของ 10m-Al_2O_3



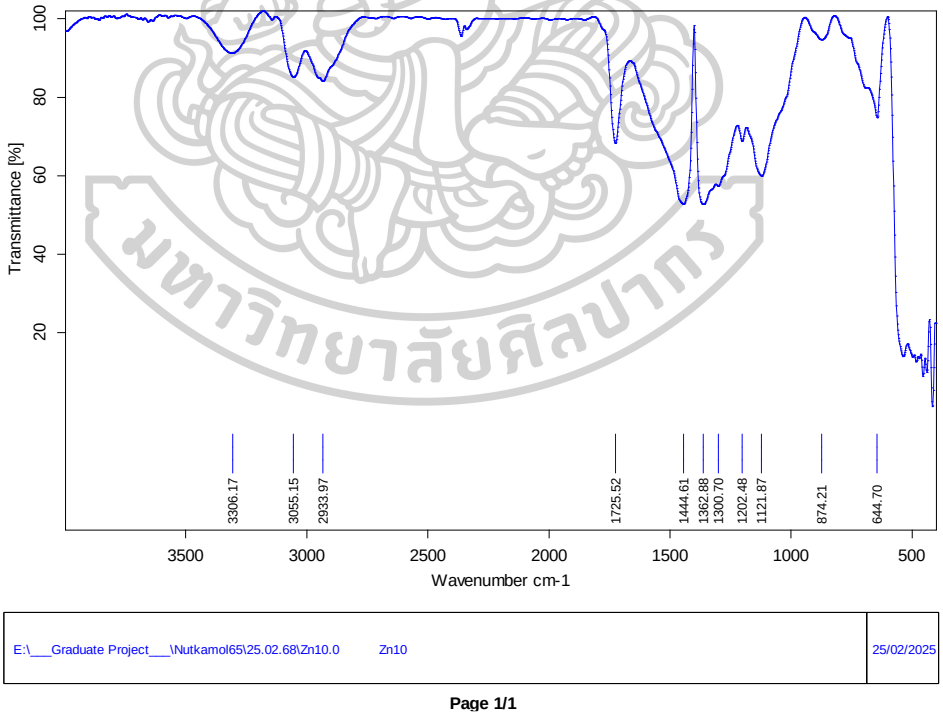
รูปที่ ก.57 FTIR spectra ของ ZnO



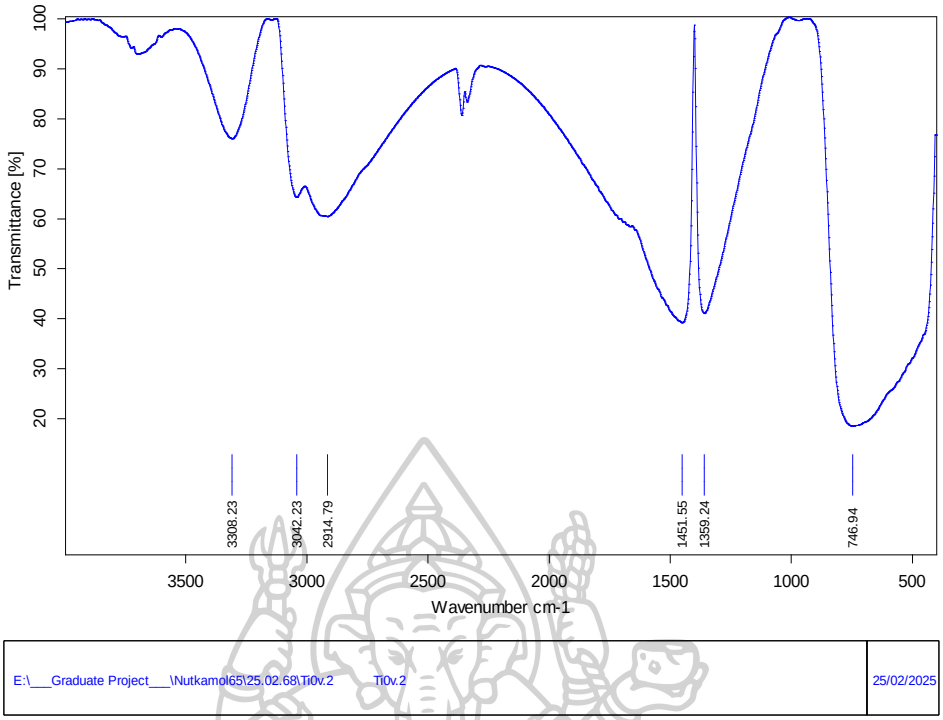
รูปที่ ก.58 FTIR spectra ของ 1m-ZnO



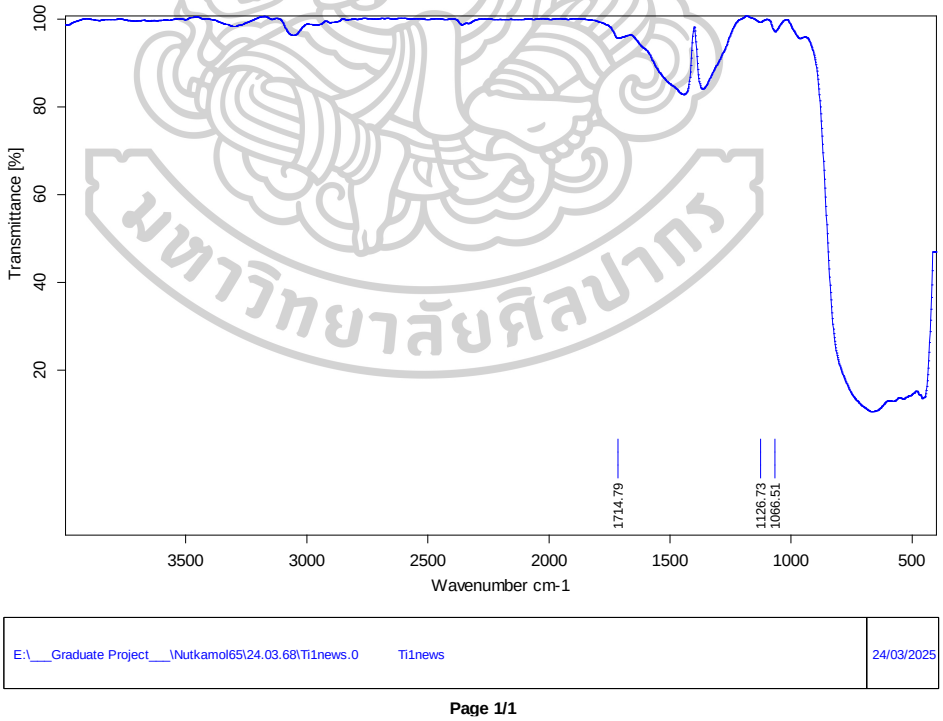
รูปที่ ก.59 FTIR spectra ของ 5m-ZnO



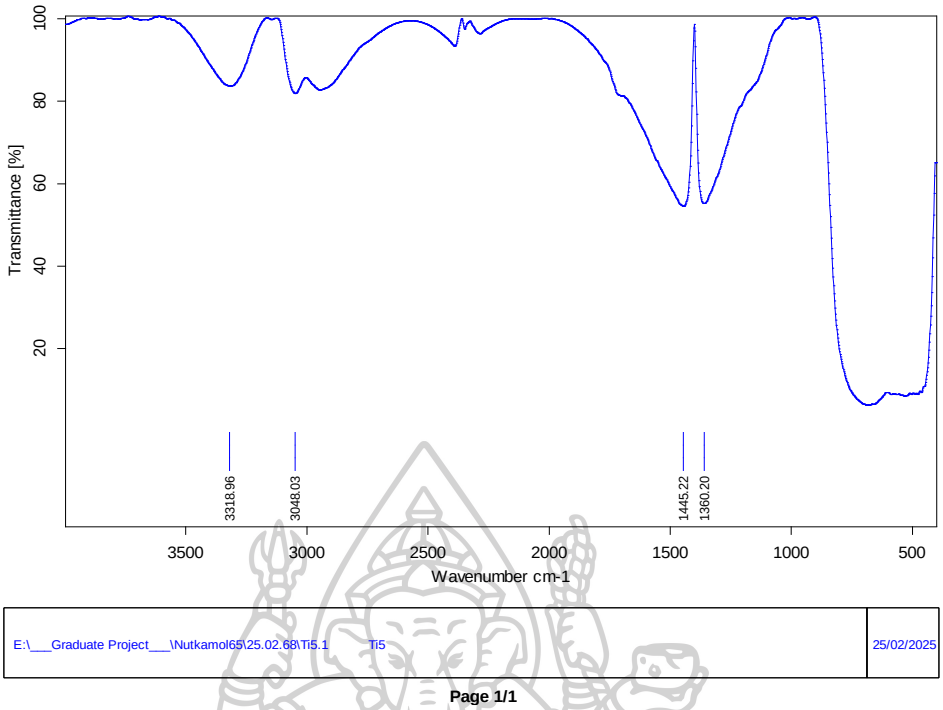
รูปที่ ก.60 FTIR spectra ของ 10m-ZnO



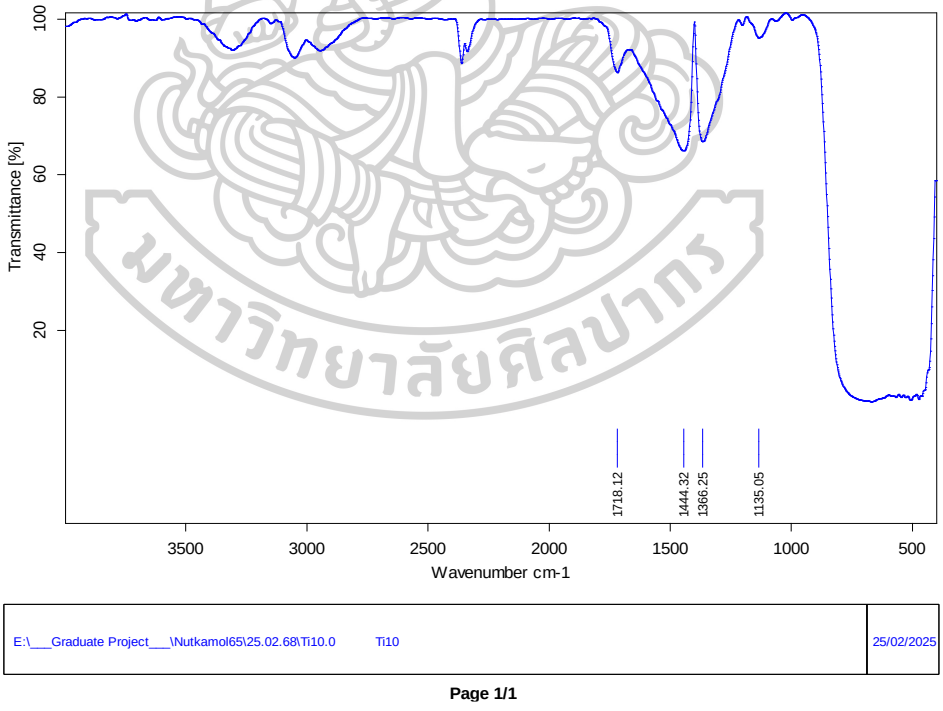
รูปที่ ก.61 FTIR spectra ของ TiO_2



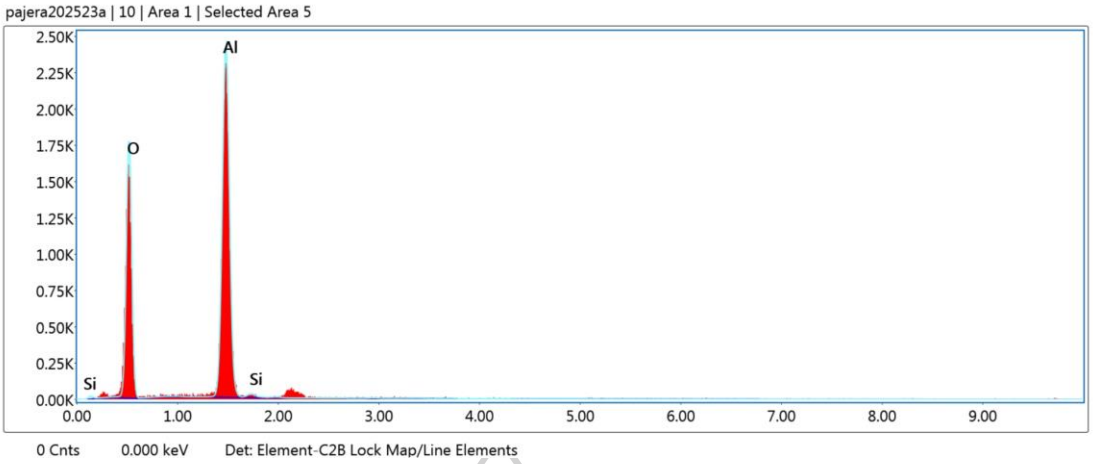
รูปที่ ก.62 FTIR spectra ของ 1m-TiO_2



รูปที่ ก.63 FTIR spectra ของ 5m-TiO_2



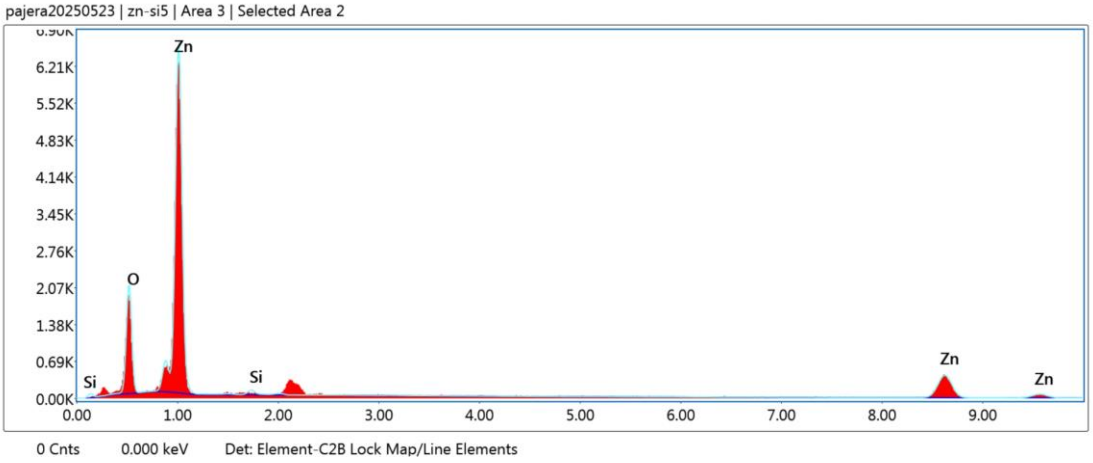
รูปที่ ก.64 FTIR spectra ของ 10m-TiO_2



รูปที่ ก.65 EDS spectra ของ 5m-Al_2O_3

ตารางที่ ก. 3 องค์ประกอบธาตุของ 5m-Al_2O_3

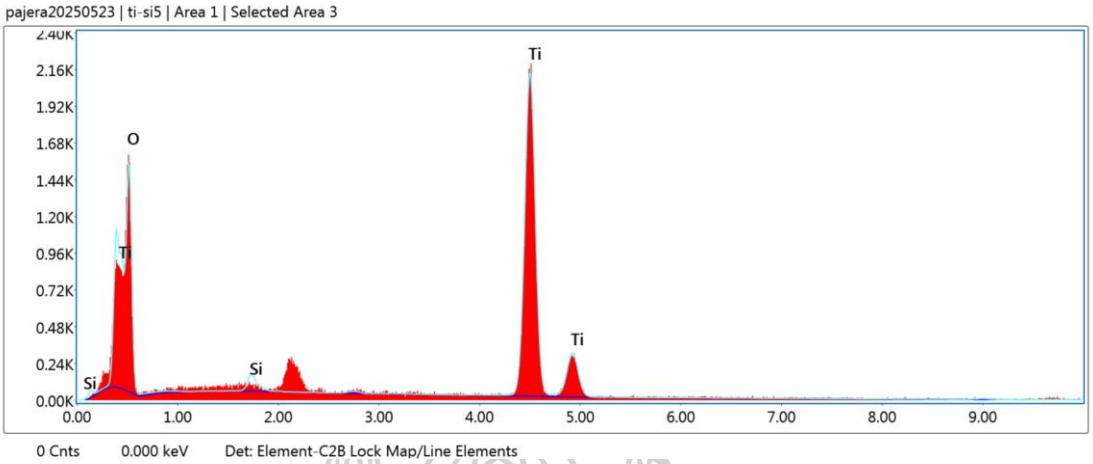
Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio
O K	46.29	59.26	2329.56	7.21	0.2489
AlK	52.91	40.16	4073.24	3.63	0.4189
SiK	0.80	0.58	43.45	30.69	0.0046



รูปที่ ก.66 EDS spectra ของ 5m-ZnO

ตารางที่ ก. 4 องค์ประกอบธาตุของ 5m-ZnO

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio
O K	19.78	49.81	668.24	8.36	0.1005
SiK	0.94	1.34	36.58	19.90	0.0054
ZnK	79.28	48.85	356.55	5.08	0.7316



รูปที่ ก.67 EDS spectra ของ 5m-TiO_2

ตารางที่ ก. 5 องค์ประกอบธาตุของ 5m-TiO_2

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio
O K	40.30	66.67	480.62	11.31	0.0667
SiK	0.85	0.80	49.41	10.86	0.0068
TiK	58.85	32.52	1372.02	2.55	0.5260

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณหาปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสม

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

(สมการที่ 3.1)

ตารางที่ ข.1 สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBAT 80:20

Sample	T_g (°C) PLA	T_g (°C) PBAT	T_m (°C) PLA		T_m (°C) PBAT	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	ΔH_m (J/g)	X_c of PLA (%)
			1	2					
PLA/PBAT 80:20	59.8	-	144.8	151.6	-	102.4	17.9	20.2	3.1

ΔH_m^0 เป็น heat of fusion ของ completely crystalline PLA มีค่า 93.6 J/g

$$X_c\ (\%) = \frac{20.2 - 17.9}{\frac{80}{100} \times 93} \times 100\ \% = 3.1$$

2. การคำนวณหาประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของโลหะออกไซด์

$$\text{Grafting efficiency (\%)} = \frac{\text{Weight loss obtained of sample - Weight loss obtained of metal oxide}}{\text{Percentage of initial silane in that sample}}$$

(สมการที่ 3.2)

ตารางที่ ข.2 ประสิทธิภาพการปรับปรุงผิวของ Al_2O_3

Sample	Percentage of initial silane (%)	Weight loss obtained from TGA (%)	Percentage of silane (%)	Grafting efficiency (%)
Al_2O_3	0	6.97	-	-
1m- Al_2O_3	1	7.02	0.05	5.0

$$\text{Grafting efficiency (\%)} = \frac{7.02 - 6.97}{1} \times 100 = 5\%$$

ภาคผนวก ค.

การนำเสนอผลงานวิจัย

ภาคผนวก ค.1 งานประชุมวิชาการ

Preparation and Property Study of Composite Based on Poly(Lactic Acid), Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) and Surface-Modified Aluminum Oxide

Nutkamol Srisomphun[1], Nattakarn Hongsriphan[1], Pajaera Patanathabutr[1]*
[1]Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakhon Pathom 7300, Thailand
* *Email: Patanathabutr_p@su.ac.th*

Abstract

The incorporation of inorganic particles into organic polymer blends enhances material's performance by optimizing strength, flexibility, and thermal stability of the hybrid composite. This research investigated the effects of compounding aluminum oxide (Al_2O_3) on mechanical and thermal properties of polylactic acid (PLA) and polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) blends. The composites were prepared with Al_2O_3 contents of 1%, 5%, and 10% by weight, with surface modification using 3-(triethoxysilyl) propyl methacrylate (TESPMA) to enhance compatibility between Al_2O_3 particles and PLA/PBAT matrix, which had a composition ratio of 80:20. The optimal mechanical performance, offering the best balance of tensile strength, impact resistance, and flexural rigidity, was observed with 1% silane-modified Al_2O_3, compared to those of higher concentrations. However, thermal stability increased with silane-modified Al_2O_3 up to 5%, but decreased at 10% by weight due to particle agglomeration. Scanning electron microscopy (SEM) was employed to observe the uniform distribution and interaction of silane-modified Al_2O_3 particles within the composite matrix. The addition of silane-modified Al_2O_3 enhanced the matrix's load-bearing capacity and overall performance of PLA/PBAT blends, making these hybrid composites well-suited for advanced engineering and manufacturing applications.

Keywords: Hybrid Composites, Aluminum oxide, 3-(triethoxysilyl) propyl methacrylate, PLA/PBAT blends

1. Introduction

Hybrid composite materials contain a mixture of organic and inorganic components. The inorganic component contributes to increased mechanical strength, while the organic component is associated with forming strong bonds that hold the inorganic components together. These materials can be classified according to the interactions between the organic and inorganic components: Class I hybrid composite materials are based on van der Waals forces, hydrogen bonding, or weak electrostatic forces, while Class II hybrid composite materials rely on covalent bonds. These materials have been developed since the 1980s.[1] Recent advances have allowed for the control of the composition and structure of these materials, enabling a wide range of properties to be tailored for specific applications, making hybrid composite materials highly promising for various uses.[1, 2]

Polylactic acid (PLA) is a linear aliphatic polyester produced from renewable materials, such as corn starch, sugarcane, and other plant-based sources. It is synthesized from lactic acid, which is derived from the fermentation of starch or sugar. With various properties such as high strength, compatibility with the human body, low toxicity, environmental friendliness, and biodegradability, PLA has gained popularity to replace petroleum-based polymers for sustainability. However, it has some disadvantages, including brittleness and susceptibility to thermal deterioration. These drawbacks have been addressed in various ways, one of which is mixing with flexible polymers.[2, 3, 4] Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) is an aliphatic-aromatic copolyester that is frequently blended with PLA to enhance its properties. PBAT offers outstanding characteristics, including toughness, flexibility, durability, ease of processing, and biodegradability. However, PBAT has a high production cost. When mixed with PLA, it can help reduce costs while also improving the properties of the blended polymer.[2, 3] Aluminium oxide is a chemical compound composed of aluminium and oxygen. It appears as a white crystalline powder which is odourless, insoluble in water, and non-toxic. Aluminium oxide has been used throughout history and exhibits high hardness, density, chemical resistance, environmentally friendly, and resistance to abrasion and corrosion, as well as high fire resistance. Due to its high melting point, it finds applications in various industries, including ceramics, paper, and refractories.[4, 5, 6, 7, 8, 9]

The aim of this research was to study the preparation of hybrid composite materials from PLA and PBAT blends mixed with aluminium oxide (Al_2O_3). The aluminium oxide was surface modified with a silane coupling agent to enhance compatibility before mixing with PLA/PBAT blends. Then, the study examined the effects of varying amounts of aluminium oxide on the mechanical properties, thermal properties, and morphology of the hybrid PLA/PBAT composite.

2. Materials and Methods

2.1 Materials. Polylactic acid (PLA, Ingeo 4043D) with a density of 1.24 g/cm^3 and a melt flow rate of 6 g/10 min at 190 °C under a load of 2.16 kg was purchased from Smart Bioplastic, Thailand. Polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT, Ecoflex Mulch C1200) with a density ranging from 1.25 to 1.27 g/cm^3 and a melt flow rate of 2.7 to 4.9 g/10 min at 190 °C under a load of 2.16 kg, was purchased from Unic Technology (Thailand) Co. Ltd. Aluminium oxide anhydrous (KA18, Kemaus, Australia) had the particle size of >0.063 mm, a purity of >72% and a density of 3.93 g/cm^3. γ-(triethoxysilyl) propyl methacrylate (TESPMA, Tokyo Chemical Industry), stabilized with BHT and with a purity of >98.0% (GC), was purchased from Chemical Express Company Limited, Thailand. Other chemicals in surface modification methods were ethanol (95%) used as the solvent and ammonia solution (25%) used as the catalyst for hydrolysis reaction of silane to silanol (Qrec, New Zealand).

2.2 Modification of Al_2O_3 with TESPMA. The surface modification ratios of Al_2O_3 with varying amounts of TESPMA were presented in Table 1. Firstly, 1%, 5%, and 10%wt of γ-(triethoxysilyl) propyl methacrylate (TESPMA) silane was hydrolyzed in a mixture of 150 ml ethanol and 50 ml distilled water, along with 2 ml ammonia, at 50 °C for 60 min on a magnetic stirrer. Next, 10 g of Al_2O_3 was added to the solution, and the mixture was stirred continuously for 150 min at 50 °C. The residue of TESPMA after surface treatment was removed from the mixture using a Soxhlet process for 4 h at 150 °C in a water/ethanol solution (1:1 v/v). The resulting

precipitate was obtained by centrifugation of 6,000 rpm at room temperature, washed with ethanol to remove any silane residue, and then dried in an air-circulating oven at 120 °C for 12 h.[10]

Table 1. Composition and abbreviation of modified Al_2O_3

Composition	Abbreviation	Al_2O_3 content (g)	TESPMA content (ml)
Al_2O_3 + 1% TESPMA	1m-Al_2O_3	10	0.1
Al_2O_3 + 5% TESPMA	5m-Al_2O_3	10	0.5
Al_2O_3 + 10% TESPMA	10m-Al_2O_3	10	1.0

2.3 Preparation of PLA/PBAT/Al_2O_3 composites. Al_2O_3 with 5% TESPMA modification was chosen to be compounded with a PLA/PBAT at a ratio of 80:20 by varying contents of Al_2O_3 at 1%, 5%, and 10% by weight using a twin-screw extruder (SHJ-25, China) imported by Enmach Co., Ltd., Thailand. The temperature profile was set from 150 °C in the feed zone to 180 °C in the die zone. The weight ratios of PLA, PBAT, PLA/PBAT, and PLA/PBAT with 5m-Al_2O_3 were presented in Table 2. Following melt compounding, the material was immersed in a water bath to cool and then pelletized. Finally, the compounding pellets were dried thoroughly and formed into specimens using the injection moulding process, following ASTM-D638 for dog bone specimens and ASTM-D790 for flexural testing.[2]

Table 2. Composition of PLA, PBAT, PLA/PBAT, and PLA/PBAT composites with 1, 5 and 10%wt of 5m-Al_2O_3

Sample	PLA content (%wt)	PBAT content (%wt)	5m-Al_2O_3 content (%wt)
PLA	100.0	-	-
PLA/PBAT 80:20	80.0	20.0	-
PLA/PBAT/1%wt 5m-Al_2O_3	79.2	19.8	1.0
PLA/PBAT/5%wt 5m-Al_2O_3	76.0	19.0	5.0
PLA/PBAT/10%wt 5m-Al_2O_3	72.0	18.0	10.0
PBAT	100.0	-	-

2.4 Characterization

2.4.1 Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis. Surface modified aluminium oxide was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR-VERTEX70, Bruker, USA) at wavenumbers of 4000-400 cm^{-1}.

2.4.2 Morphological analysis. The morphological analysis of surface modified aluminium oxide and PLA/PBAT/Al_2O_3 composite was investigated using a scanning electron microscope (TM3030, Hitachi, Japan), acquired at an energy of 5 kV and 15 kV with magnifications of 100-1200x. Cross-sectional surface of cryo-fractured specimens was also examined using a FE-SEM/EDS (Tescan, Mira 3, Czech Republic).

2.4.3 Thermal analysis

2.4.3.1 Thermogravimetric Analysis (TGA). Thermogravimetric analysis was performed using a thermogravimetric analyzer (TGA/DSC 3+, Mettler Toledo, Switzerland) to determine surface modification of Al_2O_3 and the thermal stability of PLA/PBAT/5m-Al_2O_3 in nitrogen gas with a heating rate of 10 ºC/min at temperature range from 30 to 800 °C. The samples were dried before testing at 60 °C.

*2.4.3.2 Differential scanning calorimetry (DSC).*The thermal properties were assessed using a differential scanning calorimeter (TGA/DSC 3+, Mettler Toledo, Switzerland). The PLA/PBAT/5m-Al_2O_3 sample was contained in an aluminium pan. The sample was firstly cooled from room temperature to -50 °C at a rate of 3 °C/min. After maintaining this temperature for 1 minute, it was heated to 200 °C at the same rate. Following a 1-minute hold at 200 °C, the sample was cooled from 200 °C to -50 °C at a rate of 3 °C/min. It was then maintained at -50 °C for 1 minute before being heated again to 200 °C at the same rate.

2.4.4 Mechanical testing

2.4.4.1 Tensile testing. The universal testing machine (Model 5960, Instron, USA), equipped with a 50 kN load cell was used to evaluate the tensile properties of the specimens in according to ASTM-D638, with the standard specimen type 1, a gauge length of 50.2 mm, and a crosshead speed of 50 mm/min.

2.4.4.2 Impact testing. Impact testing was measured using the pendulum impact tester with a hammer weight of 2.75 J in accordance to ASTM-D256 (Izod). Specimens were notched prior to the testing.

2.4.4.3 Flexural testing. Flexural properties were tested using the universal testing machine (Model 5960, Instron, USA) based on ASTM-D790 standard. The testing was carried out with the 50 kN load cell, a span length of 56 mm, and a speed of 1.49 mm/min.

3. Results and Discussion

3.1 FTIR analysis of Al_2O_3 and modified Al_2O_3 with 1%, 5% and 10%wt TESPMA

The FTIR spectra of Al_2O_3 and modified Al_2O_3 with 1%, 5%, and 10% by weight of TESPMA were illustrated in Figure. 1

The FTIR spectra of modified Al_2O_3 with 1%, 5%, and 10% by weight of TESPMA revealed a peak at 2973 cm^{-1}, corresponding to the C–H stretching vibrations in TESPMA.[10] The peaks observed at 1720 and 1639 cm^{-1} were attributed to the vibrations of the C=O and C=C functional groups within the methacrylate group, respectively. Furthermore, the vibrations at 1449, 1314, and 1206 cm^{-1} corresponded to the bending of C–H and the stretching of C–O and C–C in the methacrylate group, respectively. The spectra indicated that the intensity of the C=O and C=C peaks increased with the increasing amount of TESPMA, suggesting a significant interaction between Al_2O_3 and TESPMA, thereby confirming the successful surface modification of Al_2O_3.[10, 11]

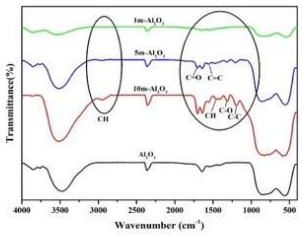


Figure 1 IR spectra of Al_2O_3 and modified Al_2O_3 with 1%, 5% and 10%wt TESPMA.

3.2 Thermogravimetric analysis of Al_2O_3 and modified Al_2O_3 with 1%, 5% and 10%wt TESPMA

The results of the thermogravimetric analysis of Al_2O_3 and modified Al_2O_3 with 1%, 5%, and 10% by weight of TESPMA were presented in Figure. 2(a) as the TGA curves and in Figure. 2(b) as the DTG curves.

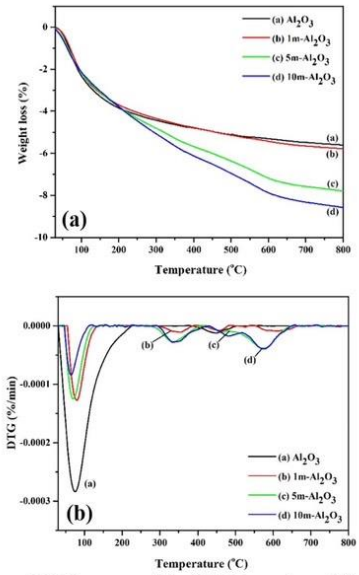


Figure 2 TGA curves (a) and DTG curves (b) of Al_2O_3 and modified Al_2O_3 with 1%, 5% and 10%wt TESPMA.

The TGA and DTG curves of Al_2O_3 before and after modification with different amount of TESPMA in Figure. 2 showed that Al_2O_3 and modified Al_2O_3 were slightly decomposed at 80-100 °C for all tested samples, corresponding to the vaporization of bound water in Al_2O_3 particles, and then remained relatively stable with heat. However, the weight of modified Al_2O_3 with TESPMA was lost continuously from 300 to 650 °C due to degradation of organosilane chains grafted on Al_2O_3.[10] Figure. 2(a) presented the TGA curves of Al_2O_3 and modified Al_2O_3, showing total weight loss percentages of 5.61%, 5.78%, 7.79%, and 8.57% for Al_2O_3, 1m-Al_2O_3, 5m-Al_2O_3, and 10m-Al_2O_3, respectively. It was evident that as the amount of TESPMA increased, the weight loss percentage increased, indicating that the modified TESPMA was effectively attached to the surface of the Al_2O_3 particles via the hydrogen bonding between the hydroxyl groups of the silanol groups and Al_2O_3.[12] Figure. 2(b) illustrates the DTG curves, showing the decomposition of organic part in organosilane chains occurred in the 1m-Al_2O_3, 5m-Al_2O_3, and 10m-Al_2O_3 samples at around 350 °C. This phenomenon was not found in neat Al_2O_3 sample, suggesting that TESPMA had adhered to the surface of Al_2O_3. Furthermore, the thermal decomposition of TESPMA in the modified Al_2O_3, was noted at approximately 450-600 °C as the maximum degradation temperature which were higher than neat Al_2O_3 particles. This also correlated to the grafting of TESPMA on Al_2O_3 particles that was decomposed by heat.[10, 12, 13]

3.3 Grafting efficiency of modified Al_2O_3 with 1%, 5% and 10%wt TESPMA

The grafting efficiencies of TESPMA at concentrations of 1%, 5%, and 10% by weight on modified Al_2O_3, derived from the TGA analysis results, were shown in Table 3.

Table 3. Grafting efficiency of modified Al_2O_3 with 1%, 5% and 10%wt TESPMA

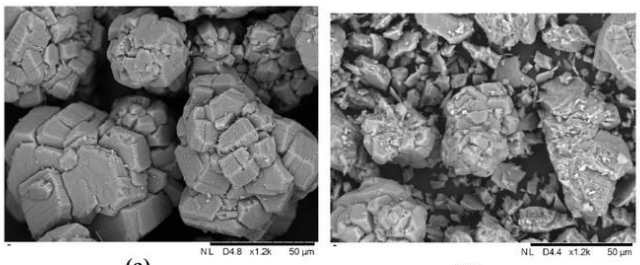
Sample	Percentage of initial silane (%)	Weight loss obtained from TGA (%)	Percentage of silane (%)	Grafting efficiency (%)
Al_2O_3	0	5.61	-	-
1m-Al_2O_3	1	5.78	0.17	17.00
5m-Al_2O_3	5	7.79	2.18	43.60
10m-Al_2O_3	10	8.57	2.96	29.60

Table 3 indicated that the grafting efficiencies of modified Al_2O_3 with 1%, 5%, and 10% by weight of TESPMA were calculated as 17%, 43.6%, and 29.6% for the 1m- Al_2O_3, 5m-Al_2O_3, and 10m-Al_2O_3 samples, respectively. Notably, the grafting efficiency was the highest at 43.6% for the 5m-Al_2O_3 sample because the silane formed uniformly as a monodentate layer on surface of Al_2O_3.[10] As the TESPMA content increased, grafting efficiency was reduced due to steric hindrance of the bidentate or tridentate structures of silane. Moreover, the low concentration of -OH group on Al_2O_3 surface also caused the decrease in grafting efficiency of TESPMA at its high content. As the results, the 5m-Al_2O_3 sample was selected for further properties investigation of the hybrid composites. The grafting efficiencies of modified Al_2O_3 were calculated according to this equation.

$$\text{Grafting efficiency (\%)} = \frac{\text{Weight loss obtained of } Al_2O_3 \text{ - Weight loss obtained of sample}}{\text{Percentage of initial silane in that sample}}$$

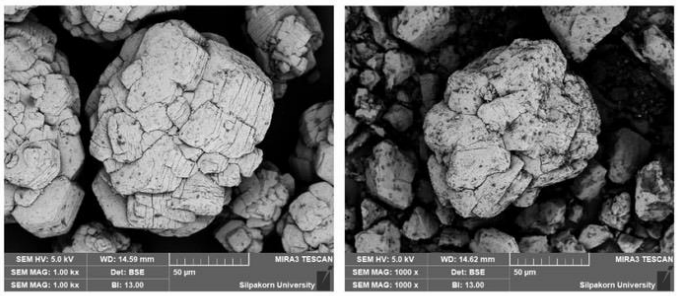
3.4 Morphological analysis of Al_2O_3 and modified Al_2O_3 with 5%wt TESPMA

Morphological analysis in this study was conducted on Al_2O_3 and modified Al_2O_3 containing 5% by weight of TESPMA, as illustrated in Figure. 3 (a, b) at 15 kV and 1200x magnification.



(a) **(b)**

Figure 3 SEM images of Al_2O_3 (a) and modified Al_2O_3 with 5%wt TESPMA (b), both acquired at an energy of 15 kV with a magnification of 1200x.



(a) **(b)**

Figure 4 SEM images of Al_2O_3 (a) and modified Al_2O_3 with 5%wt TESPMA (b), both acquired at an energy of 5 kV with a magnification of 1000x.

The morphological analysis of Al_2O_3 and modified Al_2O_3 incorporating 5% by weight of TESPMA revealed significant surface characteristics of Al_2O_3 particles prior to surface modification. It was observed that these Al_2O_3 particles, characterized by smooth and angular surfaces, were agglomerated together and exhibited variability in size, ranging between 10-60 microns. Conversely, Figure. 3(b) depicted the Al_2O_3 particles after surface modification with 5% by weight of TESPMA. These modified particles appeared fragmented and smaller in size, ranging between 5-30 microns, with a rougher surface texture resulting from breakage induced by the mechanical stirring, which contributed to the reduction in particle size. The SEM analysis,

performed at 5 kV and 1000x magnification as shown in Figure. 4(a), presented that the surface of Al_2O_3 particles before modification, while Figure. 4(b) illustrates the surface of Al_2O_3 particles subsequent to modification with 5% by weight of TESPMA. Notably, the surface of the modified 5m-Al_2O_3 displayed a substance of a distinct color, suggesting the presence of TESPMA adhered to the surface of the Al_2O_3 particles. The surface modification methods used in this research indicated that the silane modification caused some change in size and surface morphology of the modified Al_2O_3.

3.5 Thermogravimetric analysis of PLA, PBAT, PLA/PBAT blend and PLA/PBAT composites with 1%, 5% and 10%wt of 5m-Al_2O_3

The thermogravimetric analysis results for PLA, PBAT, PLA/PBAT blend and PLA/PBAT composites with 1%, 5%, and 10%wt of 5m-Al_2O_3 were presented in Figure. 5 (a) and (b) and summarized in Table 4.

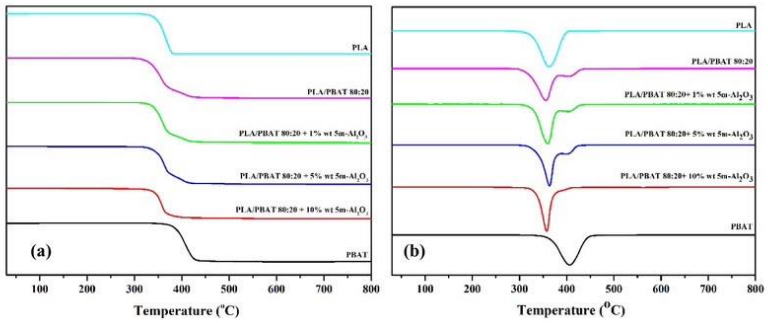


Figure 5 TGA curves (a) and DTG curves (b) of PLA, PBAT, PLA/PBAT blend, and PLA/PBAT composites with 1%, 5% and 10%wt of 5m-Al_2O_3.

The decomposition temperature of PLA/PBAT blends at ratio of 80:20 as presented in Figure. 5 (a) and (b) and Table 4, was observed to occur in two steps: the first steps, at 330-380 °C, corresponds to the decomposition of PLA, while the second step, at 385-425 °C, relates to the decomposition of PBAT.[6]

In the PLA/PBAT/5m-Al_2O_3 composites, the two decomposition steps were similar to those of PLA/PBAT blends. With the addition of 5m-Al_2O_3, the decomposition temperature (T_d) increased with amounts of 1%wt and 5%wt, respectively. The addition of Al_2O_3 could impeded heat transfer to polymer.[13] However, when the amount of 5m-Al_2O_3 increased to 10%wt, the decomposition temperature (T_d) decreased, indicating that while the addition of 5m-Al_2O_3, which provided uniform distribution of the particles in polymer matrix, enhanced the thermal stability of the hybrid composites, increasing the amount of 5m-Al_2O_3 up to 10%wt decreased the T_d. This was due to larger agglomeration of 5m-Al_2O_3 particles, reducing the interaction of silanol functional groups on the surface of Al_2O_3 particles with polymer matrix.[6]

Table 4. The decomposition temperatures of PLA, PBAT, PLA/PBAT blend and PLA/PBAT composites with 1%, 5%, and 10%wt of 5m-Al_2O_3

Sample	PLA (°C)			PBAT (°C)			Residue (%)
	T_d	T_{onset}	T_{endset}	T_d	T_{onset}	T_{endset}	
PLA	367.5	348.5	377.6	-	-	-	3.4
PLA/PBAT 80:20	355.7	331.9	367.4	403.8	394.4	419.7	4.8
PLA/PBAT/ 1%wt 5m-Al_2O_3	360.2	339.5	369.7	402.2	395.9	418.6	4.4
PLA/PBAT/ 5%wt 5m-Al_2O_3	364.3	345.7	370.6	400.2	396.5	415.1	10.6
PLA/PBAT/ 10%wt 5m-Al_2O_3	358.2	342.4	369.8	-	-	-	28.8
PBAT	-	-	-	408.3	387.2	423.9	8.6

3.6 Differential scanning calorimetry analysis results of PLA, PBAT, PLA/PBAT and PLA/PBAT with 1%, 5% and 10%wt of 5m-Al_2O_3

The results of the differential scanning calorimetry (DSC) for PLA, PBAT, PLA/PBAT, and PLA/PBAT containing 1%, 5%, and 10% by weight of 5m-Al_2O_3 were presented in Table 5. The corresponding DSC curves for these samples were illustrated in Figure. 6.

Table 5. The glass transition temperature (T_g), Crystalline melting temperature (T_m), Cold crystallization temperature (T_{cc}), Heat of crystallization (ΔH_{cc}), Heat of melting (ΔH_m) and degree of crystallinity (X_c) of PLA, PBAT, PLA/PBAT and PLA/PBAT with 1%, 5% and 10%wt of 5m-Al_2O_3

Sample	T_g (°C) PLA	T_g (°C) PBAT	T_m (°C) PLA		T_m (°C) PBAT	T_{cc} (°C)	ΔH_{cc} (J/g)	ΔH_m (J/g)	X_c (%)
			1	2					
PLA	60.5	-	149.1	-	-	116.5	5.5	10.0	4.9
PLA/PBAT 80:20	59.8	-	144.8	151.6	-	102.4	17.9	20.2	3.1
PLA/PBAT/ 1%wt 5m-Al_2O_3	59.9	-	144.9	151.7	-	102.6	13.9	16.1	2.9
PLA/PBAT/ 5%wt 5m-Al_2O_3	60.0	-	145.2	152.2	-	102.1	15.4	16.5	1.5
PLA/PBAT/ 10%wt 5m-Al_2O_3	60.4	-	145.9	152.2	-	105.3	15.5	17.0	2.2
PBAT	-	-33.3	-	-	122.2	-	-	8.5	-

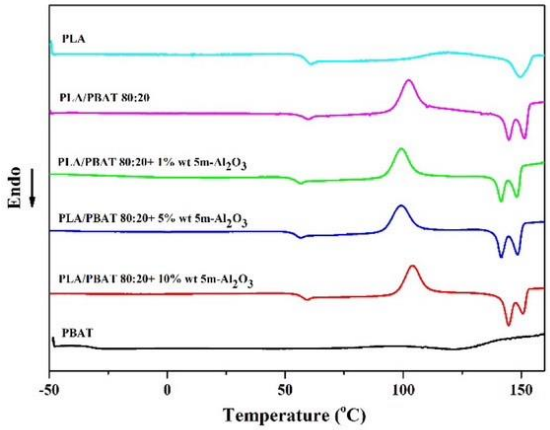


Figure 6 DSC thermograms of PLA, PBAT, PLA/PBAT and PLA/PBAT with 1%, 5% and 10%wt of 5m-Al_2O_3.

The DSC test results showed that the T_g value of PLA peaked at approximately 60 °C, while the T_m value peaked at around 149 °C. For PBAT, the T_g value peaked at about -33 °C, and the T_m value peaked at approximately 122 °C. When the two polymers were blended in an 80:20 ratio of PLA/PBAT, the test results did not detect the T_g and T_m values of PBAT. The T_g value of PLA remained unchanged at around 60 °C. However, the T_m value of PLA exhibited two peaks: T_{m1} at approximately 144-146 °C and T_{m2} at about 151-153 °C, indicating the formation of two different crystal sizes. The T_{cc} value of PLA peaked at approximately 116 °C, with no T_{cc} detected in the PBAT sample. The T_{cc} value for the PLA/PBAT mixture decreased to approximately 102 °C, except for the PLA/PBAT/10%wt 5m-Al_2O_3 sample, which had a T_{cc} of approximately 105 °C.[2, 3, 4, 14]

In terms of degree crystallinity (X_c), the PLA sample showed 4.91% crystallinity, while the PLA/PBAT blend exhibited 3.10% crystallinity. The addition of PBAT decreased the crystallinity, as PBAT was a random co-polymer that lacked a fixed crystal structure, hindering the crystallization of PLA and resulting in a less ordered arrangement.[4] The incorporation of PBAT reduced the crystallinity of PLA due to its random copolymeric structure, which disrupted crystallization.

For the PLA/PBAT composites with 1%, 5%, and 10%wt of 5m-Al_2O_3, the X_c values were 2.85%, 1.51%, and 2.21%, respectively. This indicated that the addition of 5m-Al_2O_3 particles also hindered the crystallization of PLA, leading to a decrease in crystallinity. However, when the amount of 5m-Al_2O_3 increased to 10%wt, the X_c of PLA increased. This may have been due to the phase separation of higher amounts of 5m-Al_2O_3 particles in 20PBAT matrix, which enhanced PLA chain re-arrangement in PLA/PBAT blends and promoted nucleation and crystalline domain growth of PLA. This resulted in a higher crystallinity of PLA during solidification in cold mould.

3.7 Mechanical properties of PLA, PBAT, PLA/PBAT blend and PLA/PBAT composites with 1%, 5% and 10%wt of 5m-Al_2O_3

The mechanical properties of PLA, PBAT, PLA/PBAT blend and PLA/PBAT composites containing 1%, 5%, and 10% by weight of 5m-Al_2O_3 were presented in Table 6. The bar graphs illustrating the relationship of these values across each sample were shown in Figure. 7 (a, b, c, d, and e).

Table 6. Modulus, Tensile stress at yield, Tensile stress at break, Elongation at break, Flexural stress, and Impact strength of PLA, PBAT, PLA/PBAT blend and PLA/PBAT composites with 1%, 5% and 10%wt of 5m-Al_2O_3

Sample	Modulus (MPa)	Tensile stress at break (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural stress (MPa)	Impact strength (kJ/m^2)
PLA	1187.80 ± 30.79	62.72 ± 3.57	15.76 ± 0.97	140.09 ± 1.31	3.20 ± 0.44
PLA/PBAT 80:20	899.54 ± 24.11	23.04 ± 1.53	58.65 ± 10.72	116.21 ± 1.99	3.51 ± 0.06
PLA/PBAT/ 1%wt 5m-Al_2O_3	959.99 ± 35.90	39.14 ± 4.36	20.84 ± 2.43	119.21 ± 0.81	3.62 ± 0.04
PLA/PBAT/ 5%wt 5m-Al_2O_3	1012.41 ± 66.86	41.38 ± 1.73	16.06 ± 2.43	112.77 ± 1.46	3.57 ± 0.02
PLA/PBAT/ 10%wt 5m-Al_2O_3	991.36 ± 88.18	42.40 ± 2.61	16.01 ± 1.38	105.56 ± 2.22	3.49 ± 0.03
PBAT	35.52 ± 0.75	12.97 ± 0.18	989.45 ± 24.86	9.40 ± 0.23	-

The tensile results reported in Table 6 showed that tensile stress at break of neat PLA was 62.72 MPa, which decreased upon mixing with PBAT, resulting in a value of 23.04 MPa for the PLA/PBAT blend at an 80:20 ratio. The tensile stress at break values for PLA/PBAT composites containing 5m-Al_2O_3, were 39.14 MPa, 41.38 MPa, and 42.40 MPa for the 1%, 5%, and 10%wt 5m-Al_2O_3 samples, respectively. The increase in tensile stress at break with higher 5m-Al_2O_3 content indicated that 5m-Al_2O_3 within the polymer matrix were able to absorb and distribute the applied force more effectively across the surrounding polymer chains. The elongation at break for PLA/PBAT was 58.65%, compared to 15.75% for PLA. The increase in elongation with the addition of PBAT was attributed to its superior elasticity. However, in the PLA/PBAT composites with 1%, 5%, and 10%wt 5m-Al_2O_3, the elongation at break was reduced due to the dispersed 5m-Al_2O_3 particles. These particles hindered the absorption of tensile forces by the polymer chains and promoted the formation of voids at the interphase between 5m-Al_2O_3 particles and polymer matrix.

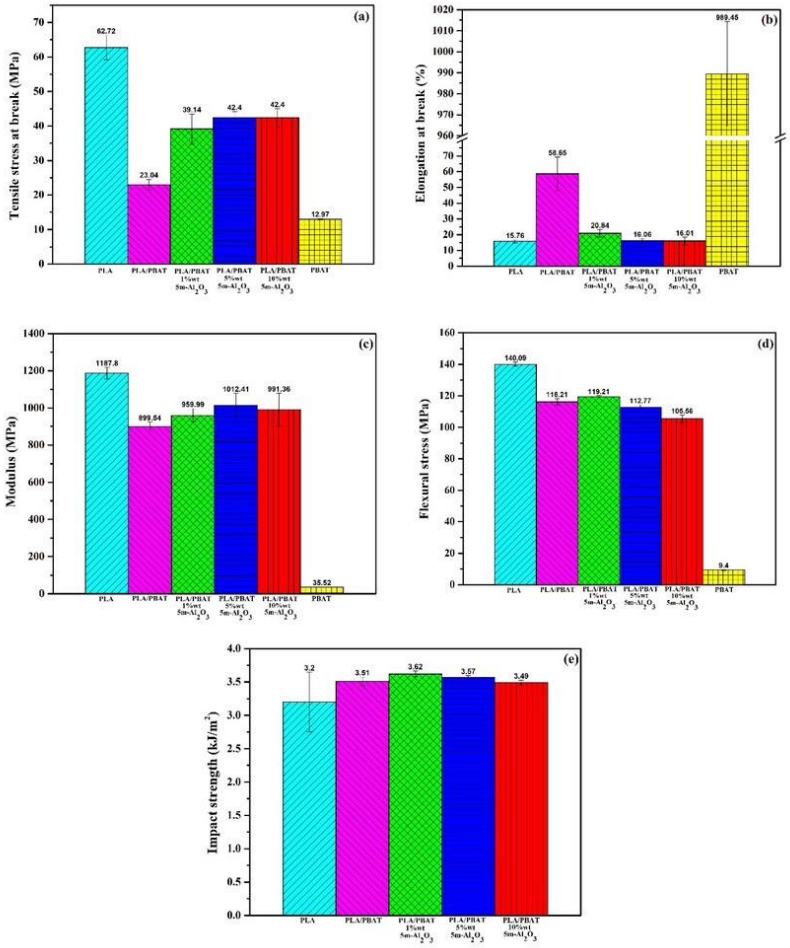


Figure 7 Tensile stress at break (a), Elongation at break (b) Modulus (c), Flexural stress (d), and Impact strength (e) of PLA, PBAT, PLA/PBAT and PLA/PBAT with 1%, 5% and 10%wt of 5m-Al_2O_3.

For the PBAT, the tensile specimens could not reach a break point, and the reported value represented only the maximum elongation measured by the universal testing machine used in this research.[2] The modulus value of neat PLA measured was 1187.80 MPa. When PBAT was mixed in, the modulus value of PLA/PBAT blend at an 80:20 ratio decreased to 899.54 MPa. With the addition of 1% and 5%wt of 5m-Al_2O_3, the modulus values of PLA/PBAT composites increased to 959.99 MPa and 1012.41 MPa, respectively. However, when the 5m-Al_2O_3 content reached 10%wt, the modulus value of PLA/PBAT composites decreased, indicating that while increasing 5m-Al_2O_3 content generally enhanced the strength of the samples, excessive amounts led to void formation at the interphase of agglomerated 5m-Al_2O_3 particles and PLA/PBAT matrix, which reduced strength.[2, 6]

In the flexural testing, the neat PLA exhibited the highest flexural stress at 140.09 MPa. The PLA/PBAT blend showed a reduced flexural stress of 116.21 MPa, indicating that the addition of the flexible PBAT phase decreased stiffness of the polymer blends. For the PLA/PBAT composite with 1%wt 5m-Al_2O_3 specimen, the flexural stress increased to 119.21 MPa. However, as the 5m-Al_2O_3 content increased to 5% and 10%wt, the flexural stress decreased to 112.77 MPa and 105.56 MPa, respectively.[6]

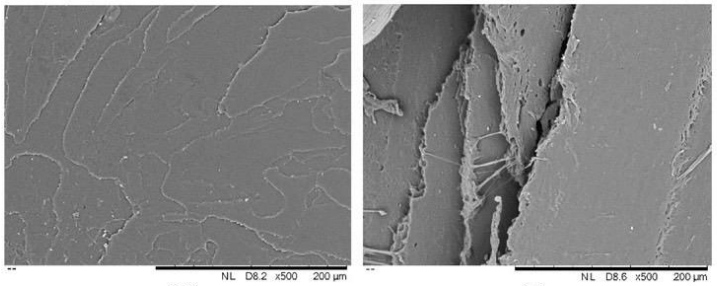
In the impact testing, neat PLA specimen demonstrated an impact strength of 3.2 kJ/m², while the PLA/PBAT blend showed an enhanced impact strength of 3.51 kJ/m², indicating that the addition of PBAT improved impact resistance. The PLA/PBAT composite with 1%wt 5m-Al_2O_3 had an impact strength of 3.62 kJ/m², which was higher than that of the PLA/PBAT blend, suggesting that the 5m-Al_2O_3 particles contributed to impact absorption or energy dissipation. In contrast, the impact strengths for the PLA/PBAT/5%wt 5m-Al_2O_3 and PLA/PBAT/10%wt 5m-Al_2O_3 samples were 3.57 kJ/m² and 3.49 kJ/m², respectively, indicating a decrease in impact strength with increasing 5m-Al_2O_3 content.[6, 7]

This confirms that when the 5m-Al_2O_3 content increased to 10%wt, the particles agglomerated and acted as stress concentrators, reducing energy dissipation. Based on the test results, it was concluded that the tensile stress values increased while elongation at break decreased with higher 5m-Al_2O_3 content, with no significant difference between the 5% and 10%wt samples. The modulus values were the highest for PLA/PBAT/5%wt 5m-Al_2O_3, followed by PLA/PBAT/10%wt 5m-Al_2O_3 and PLA/PBAT/1%wt 5m-Al_2O_3. In terms of flexural stress and impact strength, PLA/PBAT composite with 5%wt 5m-Al_2O_3 exhibited the optimal performance.

3.8 Morphological analysis of PLA and PLA/PBAT 80:20

Morphological analysis of PLA and PLA/PBAT in an 80:20 ratio was conducted at 15 kV and 500x magnification, as shown in Figure. 8 (a, b).
ification of 500x.

From Figure. 8, the SEM images of PLA (a) and PLA/PBAT in an 80:20 ratio (b) are presented at a magnification of 500x. In Figure. 8 (a) (SEM image of PLA), the surface characteristics of PLA exhibit a smooth surface consistent with brittle fracture. When mixing PLA/PBAT at a ratio of 80:20, as shown in Figure. 8 (b), some surfaces display elongation consistent with the ductile fracture characteristics of PBAT, while other smooth surfaces retain the characteristics of PLA. In the smooth surface area, it can be observed that another phase is distributed on the surface, indicating that PBAT is thoroughly integrated into the PLA matrix.[2, 3, 6, 14]



(a) (b)

Figure 8 SEM images of PLA (a) and PLA/PBAT 80:20 (b) acquired at an energy of 15 kV with a magn

3.9 Morphological analysis of PLA/PBAT with 1%, 5% and 10%wt of 5m-Al_2O_3

The morphology of PLA/PBAT with 1%, 5%, and 10% by weight of 5m-Al_2O_3 is presented in Figure. 9 (a1, a2, a3), (b1, b2, b3), and (c1, c2, c3), captured at magnifications of 100x, 500x, and 1000x, respectively. In the tests of PLA/PBAT with 1%, 5%, and 10%wt of 5m-Al_2O_3, the distribution of 5m-Al_2O_3 particles was found throughout the polymer matrix (in Figure.9 (a1), (b1) and (c1)). The number of dispersed particles increased with the weight of added 5m-Al_2O_3. At higher magnifications, it was observed that the area around the 5m-Al_2O_3 particles was surrounded by the PBAT phase, which exhibited elongation characteristics. The surrounding area further displayed a smooth fracture surface, indicating the presence of the PLA phase (in Figure.9 (a2), (a3), (b2), (b3), (c2) and (c3)).

The samples with 1% and 5%wt of 5m-Al_2O_3 were well dispersed in the polymer blend matrix. As a result, the decomposition temperatures of both samples increased. In terms of mechanical properties, the values of tensile stress at break, modulus, impact strength, and flexural stress increased as well. However, in the PLA/PBAT sample with 10%wt of 5m-Al_2O_3, the Al_2O_3 particles agglomerated, leading to decreased dispersion within the polymer.[6] The decomposition temperatures, modulus, impact strength, and flexural stress decreased, while the tensile stress at break remained similar to that of 5% wt of 5m-Al_2O_3.

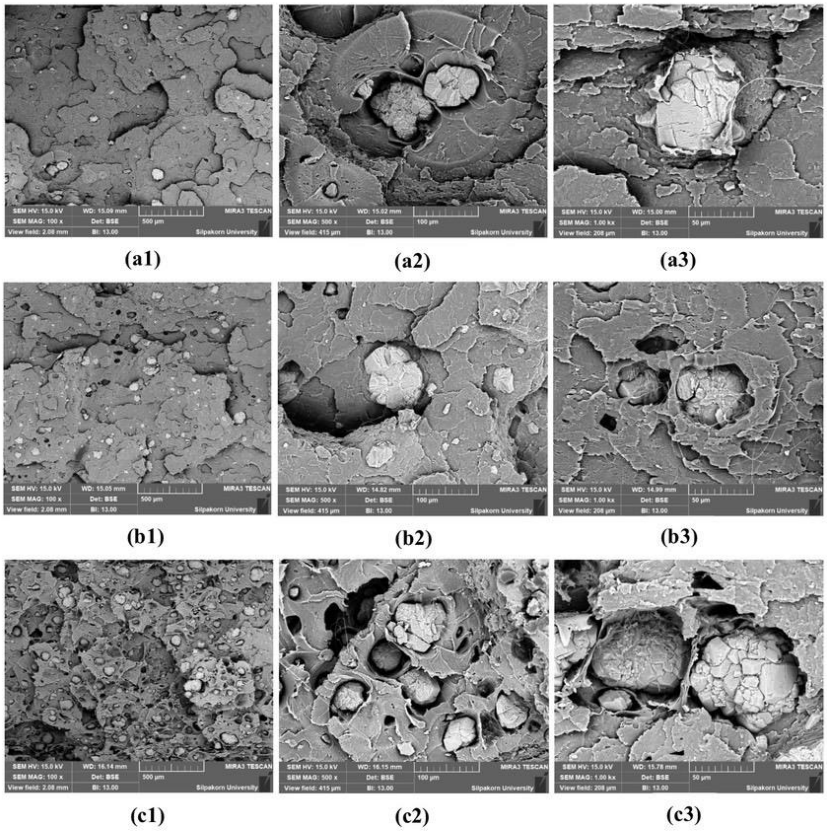


Figure 9 SEM images of PLA/PBAT with 1 (a1, a2, a3), 5 (b1, b2, b3) and 10%wt (c1, c2, c3) of 5m-Al_2O_3 acquired at an energy of 15 kV with magnifications of 100x, 500x, and 1000x respectively.

4. Conclusion

The analysis showed that surface modification of Al_2O_3 with TESPMA was successful. FTIR results indicated methacrylate functional group vibrations, TGA results showed weight loss from TESPMA, and SEM images revealed modified Al_2O_3 surfaces.

The mechanical properties of PLA/PBAT composite with 5%wt 5m-Al_2O_3 exhibited optimal performance in terms of tensile stress, elongation at break, impact strength, and flexural stress due to the good distribution of aluminium oxide particles throughout the matrix. TGA result

showed that as the amount of aluminium oxide increased, thermal stability of the composite improved. However, the thermal stability decreased when the concentration of modified Al_2O_3 reached to 10% by weight.

Acknowledgments

This research was supported by the Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Thailand.

Conflict of Interest

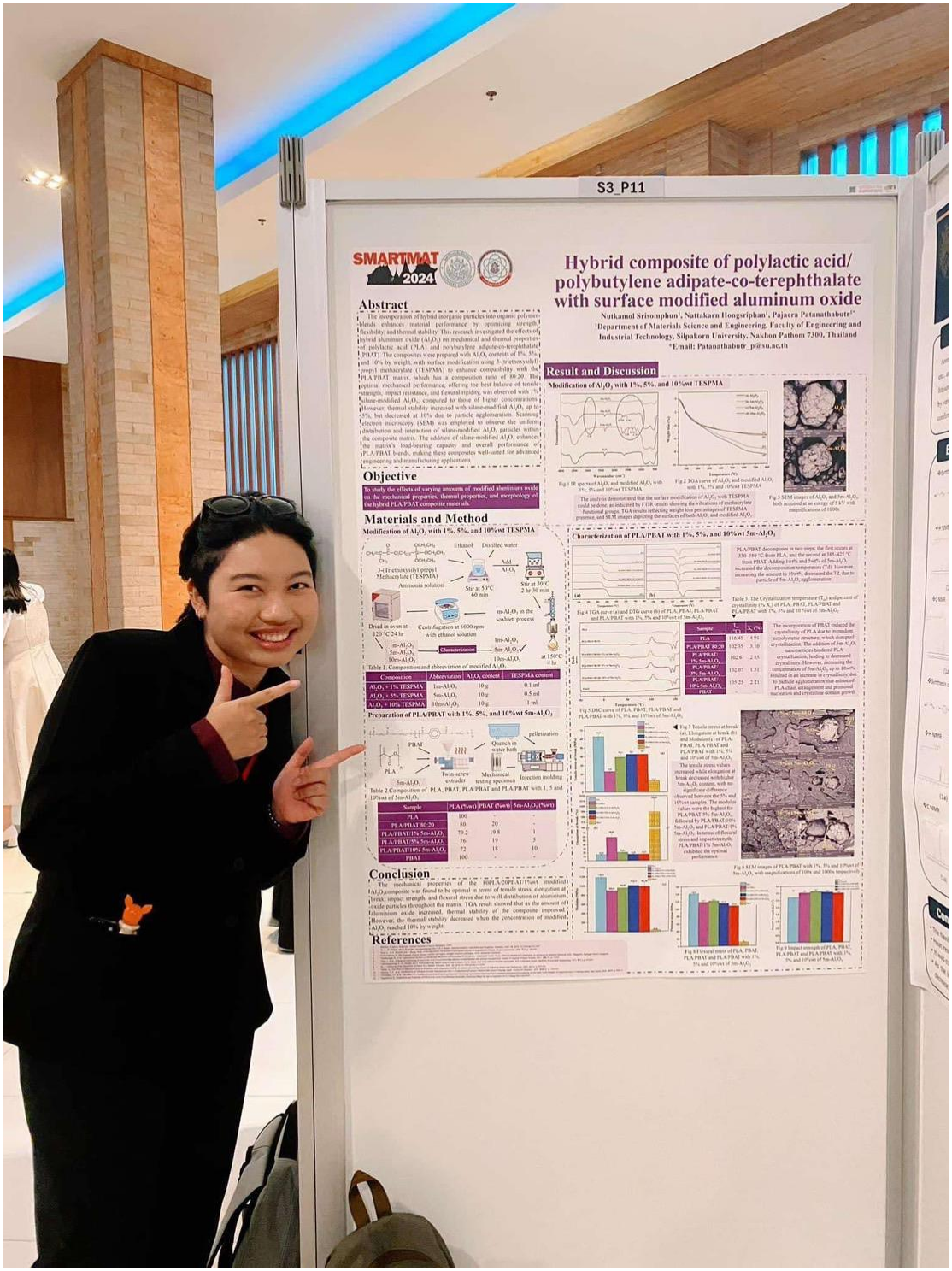
The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Sanchez C, Soler-Illia G. Hybrid Materials (Organic–Inorganic). 2006.doi:10.1081/E-ECHP-120018068
2. Su S, Duhme M, Kopitzky R. Uncompatibilized PBAT/PLA blends: manufacturability, miscibility and properties. Materials [Internet]. 2020; 13(21).doi:10.3390/ma13214897
3. Jiang L, Wolcott MP, Zhang J. Study of biodegradable polylactide/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends. Biomacromolecules. 2006;7(1):199-207.doi:10.1021/bm050581q
4. Chumsamrong P. Development of good thermal stability and impact strength bioplastic packaging: Suranaree University; 2018.
5. Girimurugan R, Vairavel M, Moorthy AA, Prakash E, Madheswaran S, editors. Experimental studies on mechanical behaviour of polylactide (PLA) matrix—aluminium oxide (Al_2O_3) particles reinforced composites. Advances in Materials Research; 2021; Singapore: Springer Nature Singapore.
6. Chen J, Hu R-R, Jin F-L, Park S-J. Synergistic reinforcing of poly(lactic acid) by poly(butylene adipate-co-terephthalate) and alumina nanoparticles. Journal of Applied Polymer Science. 2021;138(16):50250.doi:10.1002/app.50250
7. Likittanaprasong N, Seadan M, Suttiruengwong S. Impact property enhancement of poly (lactic acid) with different flexible copolymers. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015;87(1):012069.doi:10.1088/1757-899X/87/1/012069
8. Su S. Prediction of the miscibility of PBAT/PLA blends. Polymers [Internet]. 2021; 13(14).doi:10.3390/polym13142339
9. Parker A. The effect of silane hydrolysis on aluminum oxide dispersion stability in ceramics processing. Journal of Adhesion Science and Technology. 2002 16 (6):679-701.doi: 10.1163/156856102760099889
10. Nguyen T-C, Nguyen T-D, Vu D-T, Dinh D-P, Nguyen A-H, Ly T-N-L, et al. Modification of titanium dioxide nanoparticles with 3-(trimethoxysilyl)propyl methacrylate silane coupling agent. Journal of Chemistry. 2020;2020(1):1381407.doi:10.1155/2020/1381407
11. Matinlinna JP, Ozcan M, Lassila LV, Vallittu PK. The effect of a 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane and vinyltriisopropoxysilane blend and tris(3-trimethoxysilylpropyl)isocyanurate on the shear bond strength of composite resin to titanium metal. Dent Mater. 2004;20(9):804-13.doi:10.1016/j.dental.2003.10.009
12. Nakonieczny DS, Kern F, Dufner L, Dubiel A, Antonowicz M, Matus K. Effect of calcination temperature on the phase composition, morphology, and thermal properties of

ZrO_2 and Al_2O_3 modified with APTES (3-aminopropyltriethoxysilane). Materials [Internet]. 2021; 14(21).doi:10.3390/ma14216651
13. Cao J, Wang Y, Liu G, Shang Q, Wang B, Sun J, et al. Surface modification of nano-Al_2O_3 with silane coupling agent and its effect on the compressive strength of PI/Al_2O_3 composites. Coatings [Internet]. 2024; 14(1).doi:10.3390/coatings14010027
14. Noppakoon S. Prerartion and properties of poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) plasticized blend for use as bioplastic. 2015, Chiang Mai University.

The International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat@2024) November 5 - 8, 2024: Chiang Mai Grandview Hotel in Chiang Mai, Thailand, Poster presentation



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐกมล ศรีสมผัน
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (เกียรตินิยมอันดับ 1)
ผลงานตีพิมพ์	Nutkamol Srisomphun, Nattakarn Hongsriphan, Pajaera Patanathabutr "Preparation and Property Study of Composite Based on Poly(Lactic Acid), Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) and Surface-Modified Aluminum Oxide" International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SMARTMAT@2024)
รางวัลที่ได้รับ	ทุนการศึกษา ประเภททุนค่าเล่าเรียน และทุนผู้ช่วยสอนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สังกัดภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร (ปีการศึกษา 2565 - 2566)

มหาวิทยาลัยศิลปากร