การเตรียมวัสดุคอมโพสิต ความเข้ากันได้ และสมบัติของนาโนซิลเวอร์ พอลิแลกติกแอซิด /พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

สำนักหอสมุดกลาง

โดย

นายศศิพงศ์ สุนทรเต็ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การเตรียมวัสดุคอมโพสิต ความเข้ากันได้ และสมบัติของนาโนซิลเวอร์ พอลิแลกติกแอซิด / พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต

สำนักหอสมุดกลาง

โดย

นายศศิพงศ์ สุนทรเต็ม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2555

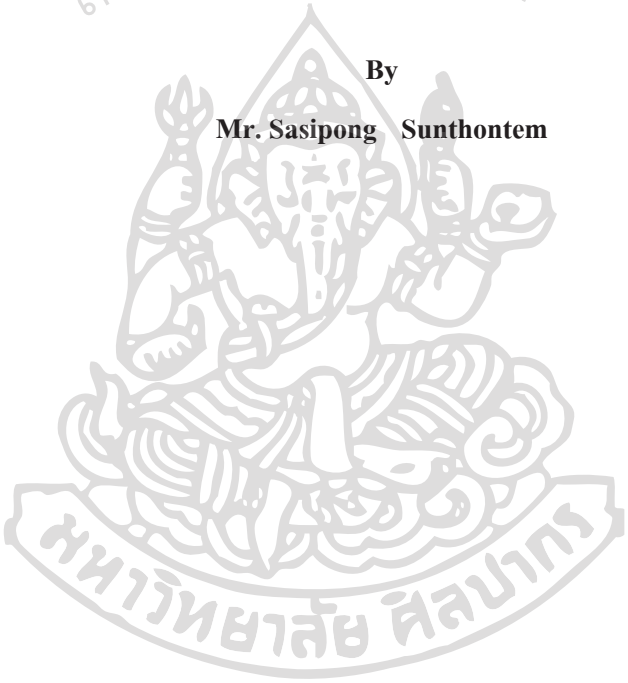
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

SILVER NANO/ POLY (LACTIC ACID)/ POLY (BUTYLENE SUCCINATE) NANOCOMPOSITE : PREPARATION, COMPATIBILITY AND PROPERTIES

สำนักหอสมุดกลาง

By

Mr. Sasipong Sunthontem



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

Master of Engineering Program in Polymer Science and Engineering

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2012

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การเตรียมวัสดุคอม-โพสิต ความเข้ากันได้ และสมบัติของนาโนซิลเวอร์พอลิแลกติกแอซิด / พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต ” เสนอโดย นายศศิพงศ์ สุนทรเต็ม เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

…….....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศนวงศ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

สำนักหอสมุดกลาง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ดร.ศิริพงษ์ โรจน์ลือชัย)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เฆษะปะบุตร)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

...../...../.....

52402236 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์
คำสำคัญ : พอลิแลกติกแอซิด/ พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/ อนุภาคซิเวอร์

ศศิพงศ์ สุนทรเต็ม : การเตรียมวัสดุคอมโพสิต ความเข้ากันได้ และสมบัติของนาโนซิลเวอร์พอลิแลกติกแอซิด / พอลีบิวทิลีนซัคซิเนต. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์. 152 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBS และการเตรียมคอมโพสิตกับอนุภาคซิลเวอร์ เพื่อให้มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนที่ดี สามารถป้องกันเชื้อแบคทีเรียได้ และปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิต เมื่อผสม PLA กับ PBS ส่งผลให้ Tensile modulus, Tensile strength, Flexural modulus, Flexural strength และ T_g มีแนวโน้มลดลง แต่ Elongation at break ความเป็นผลึกและความเสถียรทางความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน PBS ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตภาพ SEM ของพื้นผิวรอยแตกหักก็พบว่าเมื่อมีปริมาณของ PBS เพิ่มขึ้นถึง 20 wt% จะสังเกตเห็นการแยกกันระหว่างเฟสของ PLA และ PBS ดังนั้นจึงได้ทำการสังเคราะห์ PLA-MA-PBS เพื่อใช้เป็น Compatibilizer ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของ MA ใน Compatibilizer ซึ่งพบว่าปริมาณของ MA เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ PLA และ PBS มีความเข้ากันได้มากขึ้นรอยแยกระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสองลดลง Elongation at break ความเป็นผลึกและความเสถียรทางความร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อ Tensile modulus, Tensile strength, Flexural modulus, Flexural strength และ T_g สำหรับการเตรียม PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตเพื่อศึกษาการต้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่าความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย ความเป็นผลึกและความเสถียรทางความร้อนเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ที่เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็พบการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์ และเกิดการแยกกันระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ในคอมโพสิต ซึ่งส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่แย่ลงกว่าเดิม ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลเวอร์ด้วย MPA เพื่อป้องกันการรวมกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์ และเพิ่มแรงระหว่างอนุภาคซิลเวอร์และพอลิเมอร์ ซึ่งพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตมีการกระจายตัวดีขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น แต่ทำให้ความเป็นผลึก ความเสถียรทางความร้อนและการต้านเชื้อแบคทีเรียลดลงเล็กน้อย

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ลายมือชื่อนักศึกษา..... ปีการศึกษา 2555
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ .....

52402236 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING
KEY WORD : POLY(LACTIC ACID)/ POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/ SILVER
SASIPONG SUNTHONTEM : SILVER NANO/ POLY (LACTIC ACID)/ POLY (BUTYLENE SUCCINATE) NANOCOMPOSITE : PREPARATION, COMPATIBILITY AND PROPERTIES. THESIS ADVISOR : NATTAWUT CHAIYUT, Ph.D. 152 pp.

This thesis was to study about miscibilty improvement of PLA/PBS blends and to prepare PLA/PBS/silver composites, which aim to improve mechanical, thermal and antibacterial properties and to improve distribution of silver particles in the composites. Blending of PLA with PBS made tensile modulus, tensile strength, flexural modulus, flexural strength and T_g decreased, whereas elongation at break, crystallinity and thermal stability increased with increasing of PBS composition. Phases separation between PLA and PBS occurred as PBS composition was higher than 20 wt% under SEM. Therefore, PLA-MA-PBS was synthesized as a compatibilizer to improve miscibility of PLA/PBS blends. The increasing of MA containing in compatibilizer led to enhance miscibility of PLA/PBS blends. Phases separation was improved, as well as elongation at break, crystallinity and thermal stability. However, compatibilizer did not affect to tensile modulus, tensile strength, flexural modulus, flexural strength and T_g. Mixing of silver particles to PLA/PBS blends was to enhance antibacterial property, crystallinity and thermal stability which was increased with increasing of silver containing in the composites. However, agglomeration of silver particles and phases separation could be found, causing poor mechanical properties of the composites. Hence, silver particles were modified by surface functionalization with MPA to prevent particles agglomeration and increase interaction between silver particles and polymer matrix. Finally, good distribution of silver particles in the composites resulted in good mechanical properties. However, crystallinity, thermal stability and antibacterial slightly drop.

Department of Materials Science and Engineering Graduate School, Silpakorn University
Student's signature ..... Academic Year 2012
Thesis Advisor's signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุลวงไปได้ก็เพราะได้รับการสนับสนุนจากหลายบุคคลและหน่วยงาน ผู้จัดทำต้องขอขอบคุณบริษัท พีทีทีโพลิเมอร์ มาร์เก็ตติ้ง จำกัด ในการอนุเคราะห์เม็ดพลาสติกพอลีบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) สำหรับใช้ในงานวิจัย ขอบคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการให้บริการเครื่อง Injection molding สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในการให้บริการเครื่องมือทดสอบ Nuclear magnetic resonance spectrometer (NMR) Scanning electron Microscope (SEM) และ Wide Angle X-ray diffractometer (WAXD) รวมถึงการให้คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆ ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนวทาง ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณคุณพินิจ เจียรระลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุที่ช่วยจัดเตรียมอุปกรณ์ และสารเคมี รวมถึงให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในหลายๆ เรื่อง ขอขอบพระคุณคุณทิพาภรณ์ ทรัพย์สมบูรณ์ นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพที่ให้ความรู้เกี่ยวกับการศึกษาการต้านเชื้อแบคทีเรีย รวมถึงการให้ความอนุเคราะห์วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง ขอขอบพระคุณคุณไพโรจน์ ตั้งศุภธวัช วิศวกรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุในยามที่อุปกรณ์ เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการเกิดการชำรุดเสียหาย ช่วยซ่อมแซมให้กลับมาใช้งานได้ตามปกติ และขอบพระคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุและอาจารย์ทุกๆ ท่านที่สั่งสอนให้ความรู้จนสำเร็จการศึกษา

ขอบคุณเพื่อนๆ ป โททุกคนที่ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด ขอขอบคุณนางสาวปริ่มภาวรรณ ขันคำ ในการแนะนำการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์รวมถึงคอยเตือนสติ และให้กำลังใจ ขอบพระคุณมหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์สำหรับความสุขในรั้วมหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณพ่อสุพร และคุณแม่จรรยา สุนทรเต็ม ที่สนับสนุนในทุกๆ เรื่องตลอดการศึกษาและการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณนางสาวศศิวรรณ และนายวศิน สุนทรเต็ม น้องสาวและน้องชายที่ให้กำลังใจตลอดเวลา

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญตาราง		ฎ
สารบัญภาพ		ฐ
บทที่		
1	บทนำ	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
	แนวคิดและสมมติฐานของงานวิจัย	3
	ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย	3
	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	4
	ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
	พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic)	5
	พอลิแลกติกแอซิด Poly(lactic acid) (PLA)	9
	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต Poly(butylene succinate) (PBS)	14
	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBS (PLA/PBS blends)	15
	แบคทีเรีย	18
	การต้านเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์	19
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	23
	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	23
	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	24
	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	25
	วิธีการดำเนินงานวิจัย	25

สำนักหอสมุดกลาง

บทที่ หน้า

การเตรียม PLA/PBS blends..... 25
การสังเคราะห์ Compatibilizer (PLA-MA-PBS) 25
การสังเคราะห์ PLA-MA..... 25
การสังเคราะห์ PLA-MA-PBS..... 27
การปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PLA/PBS blends..... 28
การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโน..... 28
การเตรียมคอมโพสิตของ PLA/PBS/ซิลเวอร์..... 29
การปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชั่นบนอนุภาคซิลเวอร์..... 30
การเตรียมคอมโพสิตของอนุภาคซิลเวอร์ที่ผ่านการปรับเปลี่ยนหมู่
ฟังก์ชั่นบนอนุภาคซิลเวอร์กับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS..... 30
การทดสอบ SEM..... 31
การทดสอบสมบัติเชิงกล..... 31
การทดสอบสมบัติทางความร้อน..... 31
การทดสอบการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย..... 32
การเตรียม Stock เชื้อแบคทีเรีย..... 32
การเตรียม Nutrient Broth..... 32
การเตรียมเชื้อแบคทีเรียสำหรับการทดสอบ..... 33
การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย..... 33
การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย..... 33
การทำ Dilution..... 34
การเพาะเชื้อแบคทีเรีย..... 35
การนับจำนวนแบคทีเรีย..... 36
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 37
การศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBS (PLA/PBS blend)..... 37
สัณฐานวิทยา..... 37
สมบัติเชิงกล..... 39
การทดสอบการดึง (Tensile test)..... 39
การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test)..... 42

บทที่ หน้า

การทดสอบสมบัติทางความร้อน..... 44
การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC..... 44
การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA..... 47
การสังเคราะห์ Compatibilizer (PLA-MA-PBS)..... 48
การสังเคราะห์ PLA-MA..... 49
การสังเคราะห์ PLA-MA-PBS..... 51
การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ด้วย
Compatibilizer..... 55
สัณฐานวิทยา..... 55
สมบัติเชิงกล..... 56
การทดสอบการดึง (Tensile test)..... 57
การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test)..... 60
สมบัติทางความร้อน..... 62
การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC..... 62
การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA..... 63
การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตร..... 65
PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิต..... 74
สัณฐานวิทยา..... 74
สมบัติเชิงกล..... 77
การทดสอบการดึง (Tensile test)..... 77
การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test)..... 81
สมบัติทางความร้อน..... 83
การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC..... 83
การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA..... 84
การปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชั่นบนอนุภาคซิลเวอร์..... 86
สัณฐานวิทยา..... 88
สมบัติเชิงกล..... 90
การทดสอบการดึง (Tensile test)..... 90

บทที่ หน้า

การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test)..... 93

สมบัติทางความร้อน..... 95

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC..... 95

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA..... 97

การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial)..... 99

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 102

สรุปผลการทดลอง..... 102

ข้อเสนอแนะ..... 105

รายการอ้างอิง..... 106

ภาคผนวก..... 112

ภาคผนวก ก ผลการทดสอบการดึง (Tensile test)..... 113

ภาคผนวก ข ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test)..... 120

ภาคผนวก ค ผลการไตเตรต PLA-MA และ PLA-MA-PBS..... 127

ภาคผนวก ง การคำนวณ %Crystallinity..... 130

ภาคผนวก จ ^{1}H NMR spectra..... 133

ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย และการคำนวณ..... 139

ภาคผนวก ช SEM อนุภาคซิลเวอร์..... 144

ประวัติผู้วิจัย..... 152

สำนักหอสมุดกลาง
มหาวิทยาลัย ศิลปากร

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สัญลักษณ์และสัดส่วนการผสมของสารเคมีชนิดต่างๆ สำหรับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและสังเคราะห์ PLA-MA……	26
2	สัดส่วนการผสมของสารเคมีในการสังเคราะห์ PLA-MA-PBS……...	27
3	สัดส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์……..	29
4	Dilution factor ของแต่ละหลอดทดลองที่มีการเจือจางเชื้อแบคทีเรีย……..	35
5	การทดสอบทางความร้อนด้วย DSC ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ ……	46
6	การทดสอบทางความร้อนด้วย TGA ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ…….	48
7	ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย DSC ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ……	63
8	ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย TGA ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer …….	65
9	ขนาดผลึกของอนุภาคซิลเวอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้……..	69
10	ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย DSC ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ…….....	84
11	ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย TGA ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ…….....	86
12	ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย DSC ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA……..	97
13	ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย TGA ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA……..	99
14	ผลการทดสอบต้านเชื้อแบคทีเรีย E.coli และ S.aureus ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตชนิดต่างๆ……...	100
15	ผลการทดสอบการดึงของ PLA……...	114
16	ผลการทดสอบการดึงของ PBS……	114

ตารางที่		หน้า
17	ผลการทดสอบการดึงของ PLA90……...	115
18	ผลการทดสอบการดึงของ PLA80……...	115
19	ผลการทดสอบการดึงของ PLA70……...	116
20	ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB15……..	116
21	ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB30……...	117
22	ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB45……...	117
23	ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB15-Ag1%……...	118
24	ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB15-Ag2%……...	118
25	ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB15-Ag3%……...	119
26	ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB15-Ag1%-MPA…….	119
27	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA……	121
28	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PBS…….	121
29	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA90…….....	122
30	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80…….....	122
31	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA70…….....	123
32	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB15……...	123
33	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB30……...	124
34	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB45……...	124
35	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB15-Ag1%……	125
36	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB15-Ag2%……	125
37	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB15-Ag3%……	126
38	ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB15-Ag1%-MPA……..	126
39	ผลการไตเตรด PLA-MA ด้วย KOH……	128
40	ผลการไตเตรด PLA-MA-PBS ด้วย KOH……...	128
41	ค่า $\triangle H_c'$ $\triangle H_m$ และ %Crystallinity ของตัวอย่างต่างๆ……...	131
42	ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย E. coli……...	142
43	ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย S. aureus……...	142
44	Dilution factor ของแต่ละหลอดทดลองที่มีการเจือจางเชื้อแบคทีเรีย……..	142

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างทางเคมีของ (a) D-lactic acid และ (b) L-lactic acid……	11
2	การสังเคราะห์ PLA……..	12
3	โครงสร้างทางเคมีของ PBS……..	15
4	การสังเคราะห์ 1,4-บิวเทนไดออลจากสารตั้งต้นทางปิโตรเคมี และวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้……..	15
5	โครงสร้างของเซลล์แบคทีเรีย……..	18
6	SEM บริเวณพื้นผิวของรอยแตกหักของตัวอย่าง (a) PLA (b) PLA90 (c) PLA80 (d) PLA70 และ (e) PBS ที่กำลังขยาย 2000 เท่า……...	38
7	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ……..	40
8	Tensile modulus ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ…….	41
9	Tensile strength ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ……...	41
10	Elongation at break ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ……	42
11	Flexural modulus ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ……...	43
12	Flexural strength ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ……	44
13	DSC thermogram ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ……...	46
14	TGA thermogram ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ……...	47
15	โครงสร้างทางเคมีของ PLA-MA…….	49
16	^{1}H NMR spectra ของ (a) PLA (b) PLA-MA (LM45) และ (c) ภาพขยาย PLA-MA (LM45)…….....	50
17	แสดงโครงสร้างทางเคมีของ PLA-MA-PBS……	51
18	ความสามารถในการละลายของตัวอย่างแต่ละชนิดใน THF โดย (a) การละลายของตัวอย่างช่วงเริ่มต้น และ (b) หลังจากทิ้งไว้ประมาณ 12 ชั่วโมง….....	53
19	^{1}H NMR spectra ของ (a) PLA (b) PBS และ (c) PLA-MA-PBS (LMB15) หลังจากแยกออกมาจากการละลายใน THF……	54

ภาพที่ หน้า

20 SEM ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatiblizer ชนิดต่างๆ โดย (a) PLA80 (b) PLA80LMB15 (c) PLA80LMB30 และ (d) PLA80LMB45..... 56

21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ..... 58

22 Tensile modulus ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ..... 58

23 Tensile strength ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ..... 59

24 Elongation at break ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ..... 59

25 Flexural modulus ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ..... 61

26 Flexural strength ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ..... 61

27 DSC thermogram ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ..... 63

28 TGA thermogram ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ..... 63

29 แผนภาพขั้นตอนปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคซิลเวอร์..... 65

30 XRD pattern ของอนุภาคซิลเวอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ 66

31 SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Diethyl amine โดย (a) 25 mM (Ag1) (b) 50 mM (Ag2) และ (c) 100 mM (Ag3) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า..... 68

32 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาคซิลเวอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้..... 69

33 SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Glucose โดย (a) 25 mM (Ag2) (b) 50 mM (Ag4) และ (c) 100 mM (Ag5) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า..... 71

ภาพที่ หน้า

34 SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Silver nitrate โดย (a) 50 mM (Ag2) (b) 25 mM (Ag6) และ (c) 10 mM (Ag7) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า..... 73

35 SEM ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิต โดย (a) PLA80LMB15 (b) PLA80LMB15-Ag1% (c) PLA80LMB15-Ag2% และ (d) PLA80LMB15-Ag3%..... 75

36 SEM ในโหมด Back scattered ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิต (a) PLA80LMB15-Ag1% (b) PLA80LMB15-Ag2% และ (c) PLA80LMB15-Ag3%..... 76

37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ..... 78

38 Tensile modulus ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ..... 79

39 Tensile strength ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ..... 80

40 Elongation at break ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ..... 80

41 Flexural modulus ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ..... 82

42 Flexural strength ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ..... 82

43 DSC thermogram ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ..... 84

44 TGA thermogram ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ..... 85

45 โครงสร้างของอนุภาคซิลเวอร์ที่ได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วย 3-Mercaptopropionic acid (MPA)..... 87

ภาพที่ หน้า

46 FTIR spectra ของ (a) อนุภาคซิลเวอร์ที่ไม่มีการปรับปรุงผิว และ (b) อนุภาคซิลเวอร์ที่ได้ปรับปรุงผิวด้วย MPA…….. 87

47 SEM ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตโดย (a) PLA80LMB15 (b) PLA80LMB15-Ag1% และ (c) PLA80LMB15-Ag1%-MPA…… 89

48 SEM ในโหมด Back scattered ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตโดย (a) PLA80LMB15-Ag1% และ (b) PLA80LMB15-Ag1%-MPA ……... 90

49 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA……... 91

50 Tensile modulus ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA…… 92

51 Tensile strength ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA…… 92

52 Elongation at break ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA…… 93

53 Flexural modulus ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA…… 94

54 Flexural strength ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA…… 95

55 DSC thermogram ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA…… 97

56 TGA thermogram ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA…… 98

57 ^{1}H NMR spectra ของ LM15…… 134

58 ภาพขยาย ^{1}H NMR spectra ของ LM15…… 134

59 ^{1}H NMR spectra ของ LM30…… 135

60 ภาพขยาย ^{1}H NMR spectra ของ LM30…… 135

61 ^{1}H NMR spectra ของ LM45…… 136

62 ภาพขยาย ^{1}H NMR spectra ของ LM45…… 136

ภาพที่		หน้า
63	^{1}H NMR spectra ของ LMB15 หลังจากแยกออกมาจากการละลายใน THF…….	137
64	^{1}H NMR spectra ของ LMB30 หลังจากแยกออกมาจากการละลายใน THF…….	137
65	^{1}H NMR spectra ของ LMB45 หลังจากแยกออกมาจากการละลายใน THF…….	138
66	ผลการทดสอบต้านเชื้อแบคทีเรีย E. coli ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตชนิดต่างๆ (a) Control (b) PLA80LMB15 (c) PLA80LMB15-Ag1% (d) PLA80LMB15-Ag2% (e) PLA80LMB15-Ag3% และ (f) PLA80LMB15-Ag1%-MPA……..	140
67	ผลการทดสอบต้านเชื้อแบคทีเรีย S. aureus ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตชนิดต่างๆ (a) Control (b) PLA80LMB15 (c) PLA80LMB15-Ag1% (d) PLA80LMB15-Ag2% (e) PLA80LMB15-Ag3% และ (f) PLA80LMB15-Ag1%-MPA……..	141
68	SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Diethyl amine โดย (a) 25 mM (Ag1) (b) 50 mM (Ag2) และ (c) 100 mM (Ag3) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า……...	145
69	SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Glucose โดย (a) 25 mM (Ag2) (b) 50 mM (Ag4) และ (c) 100 mM (Ag5) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า……...	146
70	SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Silver nitrate โดย (a) 50 mM (Ag2) (b) 25 mM (Ag6) และ (c) 10 mM (Ag7) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า……...	147
71	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag1……..	148
72	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag2……..	148
73	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag3……..	149
74	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag4……..	149
75	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag5……..	150
76	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag6……..	150
77	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag7……..	151

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกเป็นวัตถุดิบในการผลิตบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ โดยพลาสติกเหล่านี้ผลิตมาจากพอลิเมอร์ที่มาจากปิโตรเลียม (Petroleum base) ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ในปัจจุบันมีความต้องการใช้บรรจุภัณฑ์ (Packaging) เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุอาหาร จึงทำให้เกิดขยะจากบรรจุภัณฑ์พลาสติกเหล่านี้จำนวนมาก และขยะพลาสติกเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติส่งผลให้เกิดมลภาวะขึ้น อีกทั้งมีวิธีการในการกำจัดขยะเหล่านี้ที่ค่อนข้างยุ่งยากทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณและพลังงาน หากมีการกำจัดที่ไม่เหมาะสม เช่น การนำไปเผาที่ไม่ถูกวิธีก็ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ และที่สำคัญยังสามารถก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก ซึ่งทำให้เกิดปัญหาโลกร้อนตามมาอีกด้วย พลาสติกที่ผลิตมาจากปิโตรเลียมนั้นได้มาจากแหล่งฟอสซิล เช่นแหล่งน้ำมันดิบและแหล่งก๊าซธรรมชาติ ซึ่งต้องขุดเจาะกลั่นและสังเคราะห์มอนอเมอร์ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และต้องใช้พลังงานจำนวนมาก ดังนั้นถ้าหากสามารถนำวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ (Biobase) มาผลิตพอลิเมอร์ทดแทนพอลิเมอร์ที่ผลิตมาจากปิโตรเลียม ก็จะสามารถลดผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมได้ และพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาตินั้นส่วนใหญ่แล้วเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ (Biodegradable plastic) ดังนั้นจึงสามารถลดปริมาณของขยะพลาสติกที่เกิดขึ้น

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) มีสมบัติที่ดีหลายอย่าง ได้แก่การมีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความโปร่งใส แต่มีข้อด้อยในเรื่องของความเปราะ การขึ้นรูปทำได้ค่อนข้างยากและมีขั้นตอนในการขึ้นรูปที่ซับซ้อน ดังนั้นการนำ PLA ไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ จึงต้องทำการปรับปรุงสมบัติที่ยังด้อยอยู่ของ PLA เสียก่อน นอกจากนี้ PLA ยังมีความเสถียรทางความร้อนต่ำจึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทบรรจุภัณฑ์บางประเภท จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนหากต้องการให้ผลิตภัณฑ์ถูกนำไปใช้สัมผัสกับความร้อน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการนำ PLA ไปใช้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติที่ยังด้อยอยู่ของ PLA ให้มีสมบัติที่ดีขึ้นเสียก่อน ซึ่งการปรับปรุงสมบัติของ PLA มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน และการปรับปรุงสมบัติในแต่ละด้านก็มีวิธีการที่ไม่เหมือนกัน เช่น การปรับปรุงสมบัติให้ PLA มีความเปราะที่ลดลงหรือให้มีความยืดหยุ่น (Flexible) มากขึ้น จะมีวิธีการในการปรับปรุงสมบัติด้านนี้อยู่สองวิธีการใหญ่ๆ คือ การทำการผสม (Blending) และการทำโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Copolymerization) เช่น การทำการผสมหรือการทำโคพอลิเมอร์ไรเซชันกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นเพื่อปรับปรุงให้มีความเปราะลดลง เช่น Poly(caprolactone) (PCL) Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) และ Poly(ethyleneglycol) (PEG) [1-3] เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงและพัฒนาบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้เองทางชีวภาพ สามารถขึ้นรูปได้ง่ายโดยใช้เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปพอลิเมอร์โดยทั่วไป สามารถทนต่อความร้อน สัมผัสความร้อน สามารถใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติในการป้องกันแบคทีเรียได้ด้วยตัวเอง และเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ดีกว่าเดิม สำหรับตัวอย่างของการนำไปใช้งานเช่น กล่อง หรือฟิล์มที่ใช้ในการบรรจุอาหารสด หรืออาหารพร้อมปรุงที่ต้องนำไปปรุงหรืออุ่นในไมโครเวฟก่อนนำไปรับประทาน โดยวัตถุดิบส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์นี้จะได้จากวัตถุดิบจากธรรมชาติ และมีสมบัติที่ดีมากกว่าเดิม ซึ่งวัตถุดิบหลักก็คือ PLA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี และได้มีการปรับปรุงสมบัติที่ยังคงด้อยอยู่ เช่นความเหนียว ความเสถียรทางความร้อน ความสามรถในการขึ้นรูป อีกทั้งมีการปรับปรุงให้มีสมบัติพิเศษคือสามารถป้องกันแบคทีเรียได้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติที่ยังด้อยอยู่ของ PLA ทั้งความเปราะและความเสถียรทางความร้อนด้วยการนำ PBS มาเตรียมเป็นพอลิเมอร์ผสมกับ PLA โดย PBS เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นที่ดี และมีความเสถียรทางความร้อน อย่างไรก็ตามการผสมกันของ PLA และ PBS นั้นเกิดความไม่เข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS ก่อน และในงานวิจัยนี้ยังได้เพิ่มสมบัติพิเศษในการต้านเชื้อแบคทีเรียให้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBS โดยการเตรียมคอมโพสิตกับอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตร สำหรับสมบัติของวัสดุที่เตรียมได้มีการทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อน อีกทั้งมีการทดสอบ

ความสามารถในการป้องกันแบคทีเรีย เพื่อการนำไปใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้ได้ในเชิงพาณิชย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBS

1.2.2 เพื่อปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิลเวอร์ในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS

1.2.3 เพื่อเตรียมบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติจากพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่มีสมบัติเชิงกล ความเสถียรทางความร้อนที่ดี และสามารถป้องกันแบคทีเรียได้

1.3 แนวคิดและสมมติฐานของงานวิจัย

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นพลาสติกที่มาจากวัตถุดิบจากธรรมชาติและสามารถย่อยสลายได้ มีสมบัติเชิงกลที่ดี สามารถนำมาใช้ทดแทนพอลิเมอร์ที่ได้มาจากวัตถุดิบทางปิโตรเคมีได้ แต่อย่างไรก็ตาม PLA ยังมีข้อด้อยในเรื่องของความเปราะจึงทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานในบางประเภท ดังนั้นเพื่อนำ PLA มาใช้งานให้มีความหลากหลายมากยิ่งขึ้นจึงได้มีการปรับปรุงให้ PLA มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น โดยการนำพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นมาผสมกับ PLA เพื่อช่วยปรับปรุงความเปราะของ PLA โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น มีความเสถียรทางความร้อนที่ดี และยังเป็นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ จึงนำมาผสมกับ PLA จึงช่วยให้ PLA มีความยืดหยุ่นมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าเกิดความไม่เข้ากันระหว่าง PLA กับ PBS ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS ให้มีความเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และในงานวิจัยนี้ยังได้เพิ่มสมบัติพิเศษในการต้านเชื้อแบคทีเรียให้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBS โดยการเตรียมคอมโพสิตกับอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตร

1.4 ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการผสมของพอลิเมอร์สองชนิดคือ PLA และ PBS โดยมี PLA เป็นส่วนผสมหลัก ซึ่งมีอัตราส่วน PLA/PBS เป็น 90/10 80/20 และ 70/30 wt% และปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBS ด้วย Compatibilizer ซึ่งประกอบด้วยส่วนของสายโซ่ PLA กับ PBS ที่กราฟท์ด้วย Maleic anhydride อีกทั้งเพิ่มความสามารถในการป้องกันแบคทีเรียด้วยการเตรียมเป็น

คอมโพสิตกับอนุภาคซิลเวอร์ที่ 1 2 และ 3 wt% และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการต้านเชื้อแบคทีเรีย

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการวิจัย

1.5.3 จัดหาอุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย

1.5.4 ดำเนินงานวิจัย

1.5.4.1 ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBS โดยทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยา

1.5.4.2 ปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS พร้อมทั้งทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยา

1.5.4.3 เตรียมอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตร และเตรียมคอมโพสิตกับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS และทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางสัณฐานวิทยา

1.5.4.4 ทดสอบสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียของคอมโพสิตที่เตรียมได้

1.5.5 วิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ได้

1.5.6 สรุปผลงานวิจัย

1.5.7 รายงานผลงานวิจัย

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBS

1.6.2 ปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคระดับนาโนของซิลเวอร์ในพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS

1.6.3 สามารถเตรียมบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติจากพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่มีสมบัติเชิงกลและความเสถียรเชิงความร้อน และสามารถป้องกันแบคทีเรียได้

1.6.4 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ประโยชน์ได้จริงในเชิงพานิช

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic)

พลาสติกเป็นอุตสาหกรรมวัสดุที่มีการเติบโตเร็วมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น เหล็ก แก้ว กระดาษ ไม้ อลูมิเนียม และซีเมนต์ พลาสติกถูกคาดว่าจะมาแทนที่อุตสาหกรรมวัสดุพวกแก้ว และเหล็กในอนาคต ในขณะที่ความสามารถในการนำพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่นั้นก็ยังมีสัดส่วนที่น้อย ถึงแม้ว่าจะมีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีสูง แต่ความสามารถในการนำขยะพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ยังไม่ทันต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้นทุกๆปี ซึ่งในปัจจุบันวัสดุ หรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีพลาสติกเป็นส่วนประกอบซึ่งได้มาจากปิโตรเคมี ถึงแม้ว่าจะมีข้อดีและประโยชน์ในหลายๆด้าน แต่ก็มีปัญหาในเรื่องของการย่อยสลายและการตกค้างในธรรมชาติ หากกำจัดด้วยการเผาอาจก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกซึ่งเป็นต้นเหตุที่ทำให้โลกร้อนขึ้น จึงทำให้พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในอุตสาหกรรมพลาสติกซึ่งไม่ก่อให้เกิดขยะ และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [4]

สำหรับวงจรของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จะเริ่มต้นจากพืชผลทางการเกษตร ถูกเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์และพอลิเมอร์ หลังจากนั้นพอลิเมอร์ก็จะผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ และเมื่อหมดอายุการใช้งานแล้วหากนำไปทิ้งในที่ที่มีสภาวะเหมาะสมก็จะทำให้พลาสติกเหล่านี้ย่อยสลายกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมวล ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช สำหรับวิธีการทดสอบการสลายตัวได้ทางชีวภาพประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักๆ [5] คือ

(1) การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีที่จะต้องไม่มีโลหะหนัก และมีสัดส่วนของสารตัวเติมที่ย่อยสลายไม่ได้ต้องไม่เกินร้อยละ 1 และสารตัวเติมอื่นๆ รวมกันทั้งหมดต้องไม่เกินร้อยละ 5

(2) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

(3) การศึกษาการย่อยสลายในสภาวะที่ควบคุมใกล้เคียงกับการย่อยสลายตามธรรมชาติ

(4) การทดสอบความเป็นพิษของอินทรีย์วัตถุ (ดิน) ที่ผ่านการย่อยสลายแล้วด้วยการปลูกพืชและการเจริญเติบโตของไส้เดือน

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยทั่วไปมักใช้เวลาในการทดสอบประมาณ 6 เดือน เช่น มาตรฐาน ASTM 5338 กำหนดไว้ว่าพลาสติกที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์เพียง 1 ชนิด จะต้องเกิดการย่อยสลายอย่างน้อย 60% โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบของอนินทรีย์ สารชีวมวล ภายใต้สภาวะการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนภายในเวลา 6 เดือน และในพอลิเมอร์ผสมจะต้องเกิดการย่อยสลาย 90% และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารปรับสภาพดินได้ และต้องไม่มีความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์ จึงจะถือได้ว่าเป็นพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และสามารถกำจัดได้ด้วยกระบวนการหมักขยะอินทรีย์ [6]

พลาสติกย่อยสลายได้มีกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรียในธรรมชาติ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช รวมถึงมันสำปะหลังและข้าวโพด ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พลาสติกชีวภาพมีสมบัติในการใช้งานเช่นเดียวกันกับพลาสติกโดยทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะ และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมคือ มีแบคทีเรียและเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพก็จะเกิดการย่อยสลายได้โดยจะไม่มีการย่อยสลายไปในขณะที่ใช้งาน ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานสั้นและไม่คุ้มค่าในการใช้งาน และหากไม่มีการทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ให้เป็นขยะ โดยเฉพาะเมื่อถูกฝังกลบและอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมกับการย่อยสลายก็จะไม่เกิดการย่อยสลาย [6]

พลาสติกชีวภาพแบ่งตามแหล่งกำเนิดของวัตถุดิบได้สองประเภทคือ พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (Petroleum-base biodegradable plastic) และพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากแหล่งวัตถุดิบชีวภาพ (Bio-base biodegradable plastic) [4] โดยพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีจะมีแหล่งวัตถุดิบจากแหล่งน้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่าน

หินใช้ในการผลิตมอนอเมอร์ แล้วผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อผลิตเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานและวัตถุดิบที่ใช้แล้วหมดไป

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากแหล่งวัตถุดิบชีวภาพมีแหล่งที่มาจากวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ ได้แก่พืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้ง และน้ำตาล เช่นข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง อ้อย และแป้งสาลี เป็นต้น ซึ่งนอกเหนือจากพืชผลทางการเกษตรแล้วยังมีการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมนมโคได้แก่หางนม (Whey permeate) มาผลิตเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์และยังมีชีวมวลประเภทอื่นที่มีศักยภาพและราคาต่ำมาใช้เป็นวัตถุดิบแทนแป้งและน้ำตาล ได้แก่ เซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลส ซึ่งมีอยู่ในพืช โดยสามารถนำไปย่อยสลายได้เป็นน้ำตาล ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อผ่านกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพแป้งก็จะเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาล ต่อมาน้ำตาลก็จะถูกเปลี่ยนให้เป็นมอนอเมอร์ เช่น Lactic acid, 1,4 Butanediol, Succinic acid แล้วผ่านกระบวนการทางเคมีเกิดเป็นพอลิเมอร์เช่น เกิดเป็น Poly(lactic acid) (PLA) Poly(butylene succinate) (PBS) หรือกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพที่เปลี่ยนแป้งเป็นพอลิเมอร์โดยตรง เช่น Polyhydroxyalkanoates (PHAs)

การย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่ยาวกลายเป็นสารโมเลกุลเล็ก ซึ่งกระบวนการย่อยสลายสามารถเกิดขึ้นได้ในสิ่งแวดล้อมหรือแม้กระทั่งในร่างกายของสิ่งมีชีวิต ซึ่งจากสมบัติการย่อยสลายนี้เองจึงได้นำเอาพลาสติกย่อยสลายทางชีวภาพมาใช้ประโยชน์ เช่นในด้านทางการแพทย์ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุนำพาและปลดปล่อยยาไปยังอวัยวะเป้าหมาย ซึ่งจะสามารถควบคุมอัตราและระยะเวลาในการปลดปล่อยยาได้ หรืออาจใช้เป็นวัสดุปิดแผลและไหมเย็บแผลที่สามารถสลายตัวได้เอง [6] นอกจากนี้หากมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้งาน และมีการกำจัดอย่างมีประสิทธิภาพจะสามารถให้ประโยชน์ในด้านอื่นๆอีก เช่น คอมโพสท์ที่ได้จากการสลายตัวทางชีวภาพซึ่งอยู่ร่วมกับขยะอินทรีย์อื่น สามารถใช้ในการให้สารอินทรีย์ ความชื้นและสารอาหารให้แก่ดิน การสังเคราะห์และผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะใช้พลังงานน้อยกว่าการผลิตพลาสติกทั่วไป ซึ่งหากผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากน้ำตาลที่ได้จากน้ำทิ้งในโรงงานผลิตแป้งหรือกากน้ำตาล ก็ยิ่งทำให้ใช้พลังงานลดน้อยลงไปอีก และประโยชน์ที่สำคัญอีกประการคือการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งพบว่าพลาสติกที่ย่อยสลายได้ก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปริมาณที่ต่ำกว่าพลาสติกทั่วไป

สำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกที่สังเคราะห์มาจากวัตถุดิบทางปิโตรเคมีที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าจะมีราคาถูก มีความแข็งแรง อายุการใช้งานที่นาน แต่ก่อให้เกิดปัญหาขยะซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้และกำจัดได้ยาก ดังนั้นการนำพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้จึงนับได้ว่าเป็นทางออกที่ดี

การกำจัดพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพจะก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่นๆ ดังต่อไปนี้ [6]

1. คอมโพสท์ที่ได้จากการย่อยสลายพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน โดยช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดิน ช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ย และลดการเกิดโรคในพืช การหมักพลาสติกย่อยสลายได้ทำให้เกิดการหมุนเวียนของธาตุในขณะที่การใช้พลาสติกโดยทั่วไปมักต้องกำจัดด้วยการฝังกลบหรือเผา

2. ลดเนื้อที่การใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ โดยการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และถุงที่ย่อยสลายได้ทำให้เพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบ และเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่บ่อฝังกลบได้ถูกออกแบบมาให้ผลิตและใช้ประโยชน์จากก๊าซมีเทน การใช้ฟิล์มพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นวัสดุคลุมหน้าบ่อฝังกลบแทนการฝังกลบด้วยหน้าดินในแต่ละวันเป็นการเพิ่มพื้นที่ให้บ่อฝังกลบ

3. ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเนื่องจากวัฏจักรของพลาสติกชีวภาพตั้งแต่การเริ่มต้นการผลิตจนถึงการกำจัดหลังจากการใช้งานแล้วเมื่อมีการย่อยสลายจะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาซึ่งพืชนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ดังนั้นจึงเกิดการหมุนเวียนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติ และเกิดสมดุลของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

4. การใช้พลังงานในการสังเคราะห์ และการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพน้อยกว่าการผลิตที่ได้จากวัตถุดิบทางปิโตรเคมี

ประเทศไทยนับได้ว่าเป็นประเทศเกษตรกรรมที่อุดมสมบูรณ์ไปด้วยชีวมวล และผลผลิตจากทางการเกษตร ได้แก่ ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด และปาล์มน้ำมัน เป็นต้น โดยผลผลิตทางการเกษตรที่มีส่วนประกอบของแป้ง น้ำตาล หรือเซลลูโลส สามารถนำมานำเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เมื่อพิจารณาแล้วพบว่ามันสำปะหลังมีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ เนื่องจากเมื่อเทียบกับผลิตผลทางการเกษตรอื่นๆ มันสำปะหลังมี

ราคาที่ถูก และประเทศไทยก็ยังส่งออกมันสำปะหลังเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยมันสำปะหลังส่วนใหญ่ที่ส่งออกจะอยู่ในรูปของมันเส้น และมันอัดเม็ดซึ่งมีราคาต่ำ ดังนั้นหากมีการนำมันสำปะหลังมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะทำให้มีมูลค่าสูงขึ้นเป็นร้อยละ 80 สำหรับกระบวนการผลิตนั้นเริ่มจากมันสำปะหลังได้ถูกทำให้เป็นแป้งมันสำปะหลังแล้วนำไปผ่านกระบวนการ Saccharificationโดยใช้เอนไซม์ได้เป็นกลูโคสเหลว และนำไปหมักด้วยจุลิลทรีย์จนได้ Lactic acid หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการ Polymerization ได้เป็น PLA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จะเห็นได้ว่าประเทศไทยมีความพร้อมในเรื่องของวัตถุดิบจึงเป็นโอกาสที่ดีในการนำวัตถุดิบมาใช้ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ โดยยังเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมให้มีศักยภาพยิ่งขึ้น และเป็นการเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบทางการเกษตร [4]

2.2 พอลิแลกติกแอซิด Poly(lactic acid) (PLA)

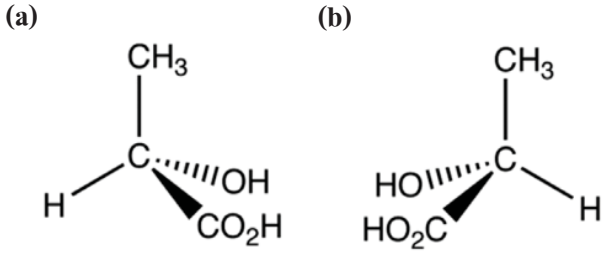
พอลิแลกติกแอซิด Poly(lactic acid) หรือ PLA เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม Aliphatic polyester สังเคราะห์ได้จาก Lactic acid ซึ่งสามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล มอนอเมอร์ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิต PLA จะได้จากกระบวนการหมักของพืชที่ให้น้ำตาล จำพวก อ้อย ข้าวโพดหรือมันสำปะหลัง โดยพืชเหล่านี้จะมีการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นวัตถุดิบในการผลิตแป้งและน้ำตาล หลังจากนั้นจึงนำแป้งและน้ำตาลจากพืชเหล่านี้มาผ่านกระบวนการหมักโดยแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน เพื่อย่อยแป้งและน้ำตาลที่มีโมเลกุลใหญ่ให้เป็น Lactic acid ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ในการสังเคราะห์ PLA ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่นข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลีหรืออ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง สมบัติของ PLA เป็นเทอร์โมพลาสติกมีความใส มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีความต้านทานต่อน้ำมันและไขมันสูง โดยที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำสามารถแพร่ผ่านได้ดี แต่มีความคงทนต่อแรงกระแทกต่ำ มีความสามารถในการย่อยสลายได้ดีในโรงหมักขยะอินทรีย์ที่อุณหภูมิในการหมักประมาณ 60 °C แต่ที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้ก็สามารถย่อยสลายได้ ในตอนแรก PLA จะถูกย่อยสลายให้ไปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้และกรดแลคติก โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นภายใน

2 สัปดาห์ ซึ่งสารประกอบที่ได้และ Lactic acid จะถูกย่อยด้วยจุลินทรีย์ด้วยการ Metabolisation แล้วเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และชีวมวล [7]

PLA จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การอัดขึ้นรูป (Compression molding) การอัดรีด (Extrusion) และการเป่าขึ้นรูป (Blown molding) เป็นต้น [7] ซึ่งหลังการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจาก PLA จะสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเมื่อนำไปฝังกลบในดินโดยใช้ระยะเวลาอันสั้นเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ในอดีตการใช้งานของ PLA จำกัดอยู่แต่ในวงการแพทย์ เช่น อุปกรณ์การปลูกถ่ายอวัยวะ (Implant devices) วัสดุค้ำจุนสำหรับการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (Tissue scaffolds) และไหมละลาย (Sutures) เป็นต้น[7] เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตสูง หาได้ยากและพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำให้มีสมบัติเชิงกลต่ำ แต่เมื่อมีการพัฒนาเทคนิคใหม่ๆ ช่วยให้สามารถผลิตพอลิแลกติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงสามารถใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ การใช้งานของพอลิเมอร์ชนิดนี้จึงเริ่มขยายออกไป โดย PLA เป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้และผลิตได้จากวัตถุดิบที่สร้างทดแทนใหม่ได้ จึงคาดกันว่าการใช้ PLA จะช่วยลดปัญหาขยะลงได้ สมบัติความไม่เป็นพิษและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมทำให้ PLA เป็นวัสดุในอุดมคติสำหรับงานด้านบรรจุภัณฑ์และผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคด้านอื่นๆ

สำหรับทิศทางงานวิจัยในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะพัฒนา PLA เพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งทนทาน (Semi-durable products) และสามารถใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี โดย PLA สังเคราะห์ขึ้นจาก Lactic acid มีชื่อทางเคมีคือ 2-Hydroxy propionic acid โดยมี Isomer สองรูปแบบคือแบบ D และ L ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งเป็น Enantiomer ที่มีความว่องไวต่อแสง (Optical active) ต่างกัน คือมีสูตรเคมีเหมือนกันแต่จัดเรียงตัวในสามมิติไม่เหมือนกัน และบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางต่างกัน ส่วนใหญ่พบในรูปแบบ L หรือพบในรูปของผสมระหว่าง L และ D เรียกว่า Racemic mixture เขียนแทนด้วย DL หรือสารประกอบ Meso-compound ซึ่งไม่มีสมบัติบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Optically inactive) ปัจจุบันการผลิตกรดแลกติกอาศัยการหมักเป็นหลัก ซึ่งสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical purity) ที่ดี การสังเคราะห์อาจทำโดยสังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาการควบแน่นแบบ Azeotropic dehydrative condensation ปฏิกิริยาการควบแน่นโดยตรง (Direct condensation polymerization) และสังเคราะห์ผ่านการเกิดแลกไทด์

(Lactide formation) [7] โดย PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากกว่า 100,000 ดาลตัน ในเชิงพาณิชย์จะสังเคราะห์โดยผ่านการเปิดวง (Ring-opening polymerization) ของแลกไทด์ โดยเริ่มจากปฏิกิริยาการรวมตัวของแลกติกแอซิดจำนวน 2 โมเลกุลกลายเป็นสารประกอบแบบวงที่เรียกว่า Lactide หลังจากนั้นจึงนำมาเปิดวงและสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ยาวและเรียกพอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการนี้ว่าพอลิแลกไทด์ [7]

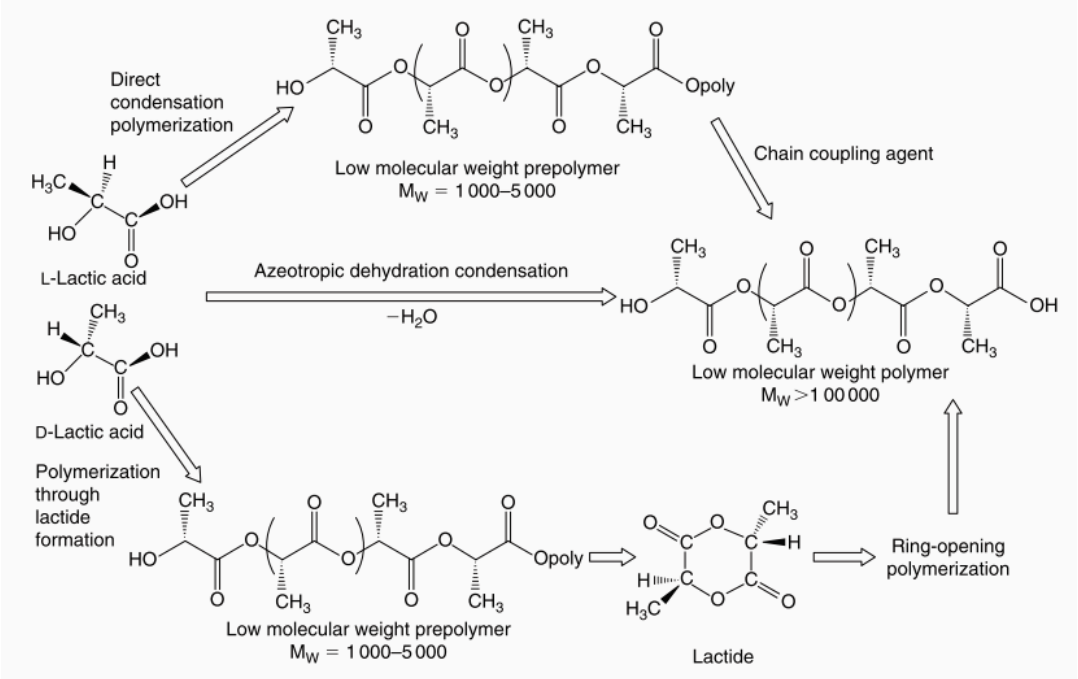


ภาพที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของ (a) D-lactic acid และ (b) L-lactic acid [7]

กระบวนการในการสังเคราะห์ PLA ได้แสดงในภาพที่ 2 อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะผลิตจากกระบวนการที่แตกต่างกันแต่ PLA ที่ได้ก็มีโครงสร้างทางเคมีที่เหมือนกัน มีสมบัติที่เหมือนกัน PLA ที่สังเคราะห์ได้ส่วนใหญ่ประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ชนิด L - isomer เกือบทั้งหมด (PLLA) หรือประกอบขึ้นจากมอนอเมอร์ที่มี Isomer ผสมกันระหว่าง L และ D (PDLLA) การผลิต PLA ที่สายโซ่หลักประกอบไปด้วยมอนอเมอร์ชนิด D หรือ PDLA ในเชิงพาณิชย์ยังไม่มีเพราะผลิตได้ยากมาก PLA มีโครงสร้างผลึกสามรูปแบบ ได้แก่ แอลฟา (α) เบตา (β) และแกมมา (γ) [7] ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของชนิดของ Isomer โครงสร้างแบบอัลฟาเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุด หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 185 °C ในขณะที่โครงสร้างเบต้าหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 175 °C ความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical purity) ของ PLA ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และสมบัติต้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (Barrier properties) PLA ที่มีสัดส่วนของ L – isomer สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) ในขณะที่ PLA ที่มี D – isomer ในองค์ประกอบเพิ่มขึ้น มีความบริสุทธิ์เชิงแสงต่ำลงและมีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) นอกจากนี้อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิคล้ายแก้วและระดับความเป็นผลึกมี

แนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของ L – isomer ที่ลดลงด้วย สัดส่วนของ Isomer ที่แตกต่างกันในสายโซ่ทำให้ PLA ที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีสมบัติได้หลากหลาย จึงสามารถปรับเปลี่ยนให้รองรับความต้องการการใช้งานได้กว้างขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเช่น Polyethylene terepthalate (PET) และ Polystyrene (PS) เป็นต้น โดย PLA มีความใส และมีสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติต้านการซึมผ่านของก๊าซที่ใกล้เคียงกัน

สมบัติทางกายภาพและทางกลของ PLA มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 โดย PLA ที่ไม่ผ่านการดึงยืด (Unoriented PLA) มีความเปราะมาก แต่มีความคงรูป (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) สูง เมื่อนำไปผ่านการดึงยืด (Oriented) จะมีสมบัติใกล้เคียงกับ Polyethylene terepthalate (PET) แต่ดีกว่า Polystyrene (PS) ที่ผ่านการดึงยืด (Oriented PS) โดย Tensile modulus และ Flexural modulus ของ PLA มีค่าสูงกว่า High density polyethylene (HDPE), Polypropylene (PP) และ Polystyrene (PS) แต่ความทนต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) และระยะยืดที่จุดขาดมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ [7]



ภาพที่ 2 การสังเคราะห์ PLA [8]

สมบัติทางความร้อน PLA มีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ค่อนข้างสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกทั่วไป อุณหภูมิ T_g มีค่าขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล โดยพบว่า T_g มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุล และขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง Isomer ชนิด L และ D นอกจากนี้ T_g ยังขึ้นอยู่กับประวัติทางความร้อน (Thermal history) อีกด้วย อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของ PLA ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์เชิงแสงของพอลิเมอร์ด้วย อุณหภูมิหลอมเหลวสูงที่สุดที่พบใน PLA ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (ทั้ง PLLA และ PDLA) มีค่าประมาณ 180 °C และมีค่า Enthalpy ประมาณ 40-50 J/g โดยอุณหภูมิหลอมเหลวมีค่าลดลงหากในโครงสร้างมีปริมาณของ D – isomer เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิหลอมเหลวลดลงได้มากถึง 50 °C โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของ PLA มีค่าประมาณ 130-160 °C [7]

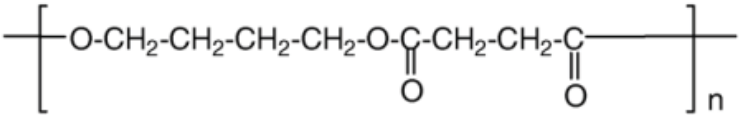
การเสื่อมสภาพของ PLA ส่วนใหญ่เกิดจากการขาดของสายโซ่หลักหรือสายโซ่ด้านข้างของโมเลกุล ในธรรมชาติการเสื่อมสภาพเกิดจากการกระตุ้นด้วยความร้อน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส กิจกรรมทางชีวภาพ ปฏิกิริยา Oxidation การแตกสลายด้วยแสง (Photolysis) และการแตกสลายด้วยรังสี (Radiolysis) เป็นต้น [7] เนื่องจากการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นทั้งจากกระบวนการทางชีวภาพและกายภาพ กลไกการเสื่อมสภาพจึงมักเกี่ยวโยงไปกับการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อม การเสื่อมสภาพของ PLA ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น น้ำหนักโมเลกุล ระดับความเป็นผลึก ความบริสุทธิ์ อุณหภูมิ สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระดับความเข้มข้นของเกลือ (Salinity) และการมีอยู่ของออกซิเจนหรือปริมาณอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในระบบ เป็นต้น นอกจากนี้การเสื่อมสภาพยังขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะทางเคมีและกายภาพ เช่น อัตราการแพร่ (Diffusivity) ความเป็นรูพรุน (Porosity) สัณฐาน (Morphology) และความแข็งแรงทางกล (Mechanical strength) เป็นต้น ซึ่ง PLA สลายตัวให้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในสภาวะปุ๋ยหมักที่มีการควบคุม (Controlled composting environment) ภายใน 90 วัน การเติม PLA ปริมาณเล็กน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) ในของเหลือทิ้งจากการทำสวนที่ยังไม่ผ่านการหมัก (Pre-composted yard waste) ทำให้การหมักมีประสิทธิภาพ PLA ถูกไฮโดรไลซ์ในน้ำเดือดหรือไอน้ำให้กรดแลกติกซึ่งสามารถนำกลับไปใช้เป็นมอนอเมอร์สำหรับสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้นใหม่ โดย PLA ถูก Hydrolyze ที่อุณหภูมิ 180 - 350 °C ในเวลา 30 นาที การย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA เกิดขึ้นได้จากเอนไซม์ที่ขับออกมาจากจุลินทรีย์

และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการแตกสลายด้วยน้ำทั้งหมดของ PLA สามารถถูกดูดซึมได้โดยจุลินทรีย์ เช่น เห็ดรา และแบคทีเรีย เป็นต้น

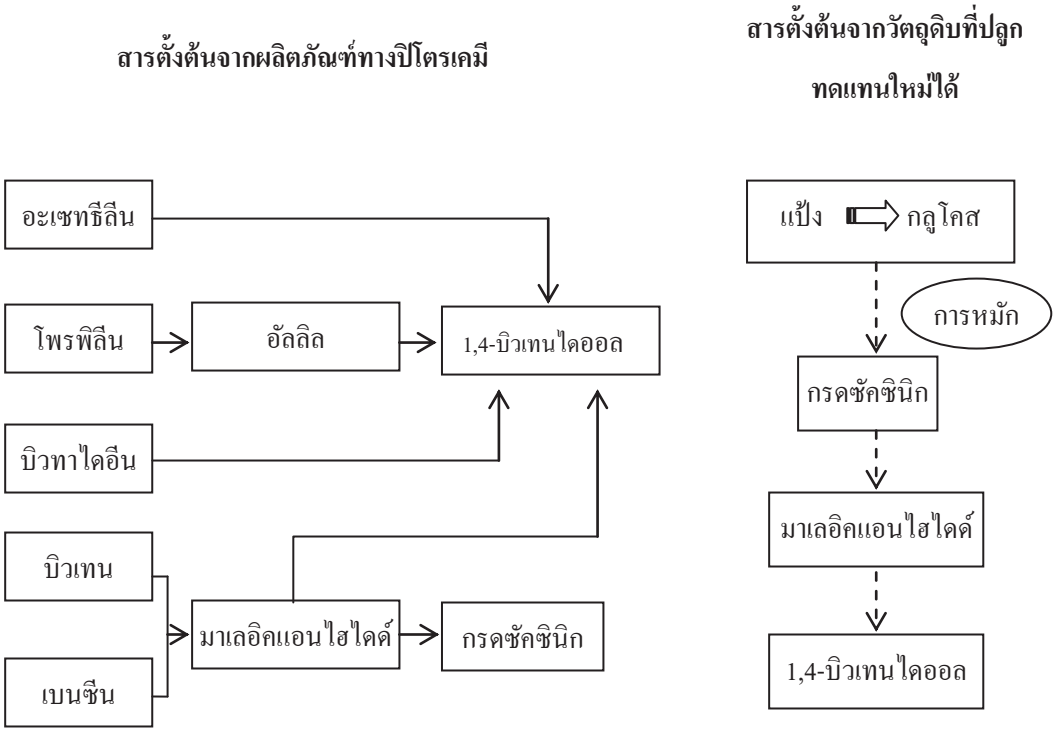
กระบวนการในการผลิต PLA ใช้วัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ และสามารถเกิดทดแทนได้ใหม่ โดยประเทศไทยมีความพร้อมทั้งในด้านชีวมวล (Biomass) และด้านอุตสาหกรรมพลาสติก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปลายน้ำ จึงเป็นโอกาสที่ดีในการนำวัตถุดิบมาใช้ในการผลิตวัสดุเพื่อสิ่งแวดล้อม และยังเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมที่มีอยู่ให้มีศักยภาพมากยิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถสร้างให้เกิดนวัตกรรมของประเทศและพัฒนาไปสู่ระดับที่มีกำลังต่อรองได้ในเวทีการค้าสากลด้วย ทั้งนี้เพราะการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพในปัจจุบันอยู่ในระดับของการบุกเบิกและการเริ่มสร้างเทคโนโลยีใหม่

2.3 พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต Poly(butylene succinate) (PBS)

Poly(butylene succinate) หรือ PBS เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดหนึ่ง อยู่ในประเภทพอลิเอสเทอร์ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีดังภาพที่ 3 ลักษณะเป็นสายโซ่ตรงสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยา Condensation polymerization ของ Succinic acid กับ 1,4-butanediol โดย PBS สามารถสังเคราะห์ได้ทั้งจากวัตถุดิบทางปิโตรเคมีโดยเริ่มจากก๊าซบิวเทนถูกเปลี่ยนเป็น Maleic anhydride ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิต Succinic acid และ 1,4-butanediol นอกจากนี้ PBS ยังสามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนได้จากกระบวนการทางชีวภาพจากวัตถุดิบจำพวกแป้ง และน้ำตาล ด้วยการเปลี่ยนกลูโคสไปเป็น Succinic acid ด้วยกระบวนการหมัก ซึ่ง Succinic acid สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต 1,4-butanediol โดยการเตรียมเป็น Maleic anhydride ก่อน ในกระบวนการนี้ทำให้เราได้มอนอเมอร์ทั้งสองชนิดที่ใช้ในการผลิต PBS ดังแสดงในภาพที่ 4 โดย PBS มีอุณหภูมิ T_g ประมาณ -44 ºC อุณหภูมิในการหลอมเหลวประมาณ 112-114 ºC อุณหภูมิในการเกิดผลึกประมาณ 6.6 ºC และมีความเป็นผลึก (Crystallinity) ประมาณ 45 % ซึ่งมีค่า Elongation at break และค่า Tensile strength ใกล้เคียงกับ PP และ LDPE [9] และสามารถนำไปใช้แทนพอลิโอเลฟินส์ได้ดี PBS เป็น Aliphatic polyester ที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติโดยผ่านกลไกของปฏิกิยาไฮโดรไลซิสซึ่งเกิดที่พันธะเอสเทอร์โดยจะส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลของ PBS ลดลง และเกิดการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ไปในที่สุด นอกจากนี้ PBS ยังมีความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) ที่ดีโดยมีอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อน (Decomposition temperature) ที่ 399 ºC และเกิด Weight loss 0.8 % ที่อุณหภูมิสูงถึง 300 ºC [9]



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของ PBS [9]



ภาพที่ 4 การสังเคราะห์ 1,4-บิวเทนไดออลจากสารตั้งต้นทางปิโตรเคมี
และวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ [6]

2.4 พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBS (PLA/PBS blends)

PBS เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact strength) สูง และมีความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ที่ดี [10] และสามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เหล่านั้นได้ โดยจะเกิดการผสมในลักษณะของ Miscible blend เช่น Poly(vinylidene fluoride), Poly(vinylidene chloride-co-vinylcloride), Poly(ethylene oxide) และ Poly(hydroxybutyrate) เป็นต้น

จากการศึกษาของ Yokohara และ Yamaguchi [11] พบว่าการผสมกันระหว่าง PLA และ PBS ถึงแม้ว่าจะเป็น Immiscible blend ซึ่งเกิดการแยกเฟสโดยมี Volume average radii of the

dispersed particle (Rv) = 0.98 μm (PLA/PBS = 80/20) 0.52 μm (PLA/PBS = 90/10) และ 0.27 μm (PLA/PBS = 95/5) (คำนวณจาก Emulsion model) และเมื่อศึกษาด้วย DMA ก็พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS เกิด T_g แยกกันของแต่ละส่วนประกอบ แต่การนำ PBS มาผสมกับ PLA ก็สามารถปรับปรุงให้ PLA เกิดผลึกได้เร็วขึ้น และมีปริมาณผลึกมากขึ้น เมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์ โดยพบว่า PBS droplets จะประพฤติตัวเป็น Crystallization nuclei ให้กับ PLA

จากการทดลองของ Park และ Soon Im [12] ซึ่งได้ศึกษาการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ด้วย WAXS พบว่า PBS มีพีคที่ 22.9º (110) และเกิดพีคขนาดเล็กที่ 19.7º (020) ส่วน PLA มีพีคที่ 16.5º และเกิดพีคขนาดเล็กที่ 19º และเมื่อศึกษาผลึกของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS เกิดเป็นพีคสองพีคซึ่งแสดงให้เห็นว่า PBS lamellae และ PLA lamellae เกิดผลึกในบริเวณที่แตกต่างกัน และเมื่อทำการศึกษาผลึกด้วย DSC ก็พบว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS มี พีค T_m 2 พีคแยกออกจากกันอย่างชัดเจน โดยส่วนของ PLA มี T_c ที่ 110-150 ^{O}C ส่วน PBS จะมี T_c ที่ 92 ^{O}C โดยพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS จะเกิดการเลื่อนของ T_c ไปที่อุณหภูมิที่ต่ำลง อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ที่อัตราส่วน 70/30 wt% มีความเป็นผลึกของ PLA เพิ่มขึ้นจาก 26% ไปเป็น 36-40% ซึ่งให้ผลการทดลองคล้ายกับ Liu และคณะ [13] ที่พบว่าเมื่อนำ PBS มาผสมกับ PLA จะช่วยทำให้ความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น Park และ Soon Im และ Liu และคณะ [12, 13] ได้สรุปเหมือนกันว่าพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS นั้นมีลักษณะเป็นแบบ Immiscible blend

จากการทดลองของ Bhatia และคณะ [14] ได้ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS พบว่าความเข้ากันได้ของ PLA และ PBS เป็นแบบ Miscible blend ที่อัตราส่วนการผสมของ PBS ไม่เกิน 20 wt% ซึ่งจะเกิดการแยกกันของพีค T_g เมื่อสังเกตด้วย DMA ไม่ค่อยชัดเจนนัก และเมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย SEM ก็พบว่าเมื่อมีปริมาณของส่วนประกอบของ PBS เพิ่มมากขึ้นขนาดของเฟส PBS ก็จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อมีปริมาณของส่วนประกอบของ PBS มากเกิน 20 wt% จะเกิดการแยกเฟสอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นลักษณะของ Immiscible blend และเมื่อมี PBS มากกว่า 20 wt% จะไม่เกิดการเลื่อนของอุณหภูมิ T_g และอุณหภูมิการหลอมเหลวทั้งในส่วนของ PLA และ PBS ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีปริมาณของ PBS เกินมากกว่า 20 wt% จะเกิดความไม่เข้ากันระหว่าง PLA และ PBS ส่วนในเรื่องของสมบัติเชิงกลพบว่าค่า Tensile strength และ Tensile modulus จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของ PBS ในพอลิเมอร์ผสมPLA/PBS แต่ค่า Elongation at break จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนแทบจะมีค่าคงที่เมื่อปริมาณของ PBS เพิ่มขึ้น และจากการศึกษาสมบัติการไหล (Rheological property) ด้วย Advanced Rheometric Expansion System (ARES) พบว่า PLA บริสุทธิ์จะมีความหนืดที่ต่ำกว่า PBS บริสุทธิ์ โดย PLA และ PBS จะมีพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian และ PLA/PBS blend ที่อัตราส่วนต่างๆ ก็แสดงพฤติกรรมการ

ไหลคล้ายกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองโดยจะไม่พบการเกิด Shear thinning ยกเว้นที่ PLA/PBS blend ที่ 50/50 wt% ซึ่งแสดง Shear thinning โดยค่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBS และจะมีค่าอยู่ระหว่างค่าความหนืดของ PLA บริสุทธิ์และ PBS บริสุทธิ์

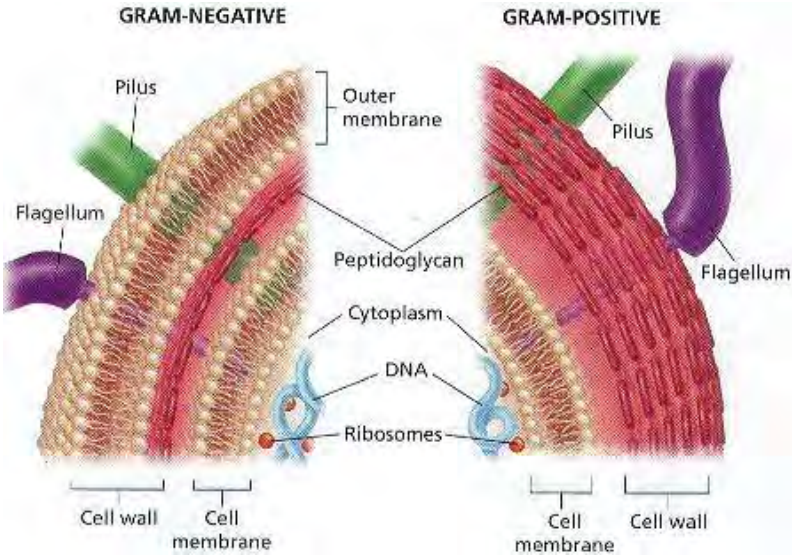
เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างเฟสของ PLA และ PBS เมื่อมีสัดส่วนของ PBS เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมของ PLA กับ PBS จึงต้องมีการปรับปรุงความเข้ากันได้ ซึ่งการทดลองของ Harada และคณะ [15] ได้ปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA กับ PBS โดยใช้กระบวนการ Reactive processing โดยใช้ Lysine diisocyanate (LDI) และ Lysine triisocyanate (LTI) เป็น Compatibilizer โดยจะเกิดปฏิกิริยา Chain extension reaction ระหว่างหมู่ Hydroxyl และหมู่ Carboxylic ที่ปลายสายโซ่ของ PLA และ PBS โดยปฏิกิริยาเกิดใน Melt reaction ในกระบวนการ Extrusion ภายใต้ความร้อน และสภาวะที่มี Shear stress สูง Zeng และคณะ [16] ก็ได้มีแนวคิดในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS โดยการใช้ Isocyanate เป็น Reactive processing agent เช่นเดียวกัน โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ Hydroxyl ที่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์กับหมู่ Diisoyanate ซึ่งในการทดลองพวกเขาได้ใช้ Toluene-2,4-diisocyanate (TDI) เป็น Chain extender

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้สนใจในการใช้ Maleic anhydride (MA) มาใช้ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PLA/PBS blends เนื่องจาก MA เป็นสารที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกริยาได้ดี โดยงานวิจัยของ Ho [17] ได้ทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง TPO กับ PLA โดยการเตรียม TPO-MA-PLA เป็น Compatibilizer ซึ่งเป็นการนำ TPO กราฟท์กับ PLA โดยใช้ MA มากราฟท์ระหว่างสองสายโซ่พอลิเมอร์ และหลังจากนั้นจึงนำ TPO-MA-PLA ที่สังเคราะห์ได้มาผสมกับ TPO/PLA blends โดย Brabender mixer ซึ่งพบว่า TPO-MA-PLA สามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของ TPO/PLA blends โดยจะไปเพิ่ม Interfacail adhesion ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสม

Chen และคณะ [18] ได้ทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ผสมของแป้งกับ PLA โดยสังเคราะห์ PLA กราฟท์กับแป้งด้วย MA เป็น Compatibilizer ซึ่งพวกเขาได้กล่าวว่า Compatibilizer จะประกอบไปด้วยสองส่วนคือส่วนที่เป็นสายโซ่ของ PLA ซึ่งสายโซ่ของ PLA ใน Compatibilizer ก็สามารถเข้ากันกับเฟสที่เป็น PLA ในพอลิเมอร์ผสม และส่วนของสายโซ่ของแป้งใน Compatibilizer ก็สามารถเข้ากันได้กับเฟสของแป้งในพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นจึงเป็นตัวเชื่อมให้พอลิเมอร์ผสมทั้งสองเข้ากันได้

2.5 แบคทีเรีย

แบคทีเรียเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่และมีความสำคัญมากในสิ่งแวดล้อม ถูกพบครั้งแรกโดย Antonjvan Leeuwenhooh เป็นสิ่งมีชีวิตพวก Procaryotic cell มีเซลล์เดียว ขนาดเล็กมากไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แบคทีเรียมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.2 – 3.0 ไมครอน และมีความยาวระหว่าง 0.5 – 10 ไมโครเมตร [19, 20] เซลล์ไม่มีนิวเคลียส สืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ สามารถพบได้ทั่วไปทั้งในอากาศ ดิน ในอาหาร ในร่างกายมนุษย์ บางชนิดสามารถเคลื่อนที่และว่ายน้ำไปตามของเหลว แต่จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยตัวเอง [19] แบคทีเรียมีองค์ประกอบที่สำคัญได้แก่ ผนังเซลล์ (Cell wall) เยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrane) ไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) โครโมโซม (Chromosome) และไรโบโซม (Ribosome) [21] ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 โครงสร้างของเซลล์แบคทีเรีย [22]

ผนังเซลล์ของแบคทีเรียมีลักษณะที่เป็นชั้นที่มีความแข็งแรงซึ่งล้อมรอบเยื่อหุ้มเซลล์และมีหน้าที่เป็นโครงสร้างของเซลล์ โดยป้องกันเซลล์จากแรงดันออสโมติก และแรงกลจากภายนอก ผนังเซลล์ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยสาร N-acetyl glucosamine และ N-acetyl muramic acid ต่อสลับกัน โดยสารชนิดแรกเป็นองค์ประกอบของไคติน ส่วนชนิดหลังเป็น Amino sugar สารทั้งสองชนิดเกาะกันด้วยกรดอะมิโนทำให้ได้โครงสร้างสามมิติ เรียกว่า Peptidoglycan ในแบคทีเรียแกรม

บวกและแบคทีเรียแกรมลบมีองค์ประกอบของโครงสร้างผนังเซลล์ที่แตกต่างกัน ชั้นของ Peptidoglycan ในแบคทีเรียแกรมลบบางกว่าแบคทีเรียแกรมบวกมาก โดยบางกว่าประมาณ 1 ใน 10 มีชั้นของพันธะเปบไตด์เชื่อมระหว่างเส้น Peptidoglycan น้อยกว่า มีความแข็งแรงน้อยกว่า ในส่วนของเยื่อหุ้มเซลล์นั้นมีลักษณะเป็นชั้นบางๆ ของโครงสร้างที่ประกอบด้วยไขมันและโปรตีนที่กั้นอยู่ระหว่างไซโตพลาสซึมและภายนอกเซลล์มีความหนาเพียง 7 นาโนเมตร ประกอบด้วยฟอสโฟไลปิด 2 ชั้นที่มีโมเลกุลของโปรตีนอื่นๆ อยู่ตรงกลาง หน้าที่ของเยื่อหุ้มเซลล์คือควบคุมการเข้าออกของสารภายในเซลล์ และภายในเซลล์จะมีไซโตพลาสซึมซึ่งมีลักษณะเป็นของไหลประกอบด้วยน้ำประมาณร้อยละ 75 รวมทั้งโปรตีน เอนไซม์ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เกลืออนินทรีย์ ไรโบโซม และ DNA โดยไรโบโซมมีรูปร่างกลมขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 นาโนเมตรประกอบไปด้วยโปรตีนและ RNA ไรโบโซมมีหน้าที่สังเคราะห์โปรตีนให้กับเซลล์ และสำหรับโมเลกุลของ DNA กินเนื้อที่ภายในไซโตพลาสซึมประมาณร้อยละ 15 – 25 [21]

ปัจจัยที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้แก่ อุณหภูมิโดยแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 25 – 40 °C แบคทีเรียแต่ละชนิดมีความต้องการออกซิเจนที่ไม่เหมือนกัน ซึ่งบางชนิดอาจไม่ต้องการออกซิเจนก็ได้ โดยออกซิเจนจะใช้ในการกระบวนการหายใจระดับเซลล์ โดยความเป็นกรดด่างของสภาวะแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 6 – 8 [19]

2.6 การต้านเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์

แบคทีเรียเป็นสาเหตุของการเกิดโรคให้กับคนเรา แบคทีเรียแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ แบคทีเรียแกรมบวก (Gram-positive bacteria) และแบคทีเรียแกรมลบ (Gram-negative bacteria) โดยแบคทีเรียแกรมบวกมีผนังเซลล์ที่ประกอบไปด้วยชั้นของ Peptidolycan ที่หนาประมาณ 30 นาโนเมตร ในขณะที่แบคทีเรียแกรมลบจะมีชั้นของ Peptidolycan หนาเพียง 2-3 นาโนเมตร และมีเยื่อหุ้มชั้นนอกหุ้มด้านนอกอยู่อีกชั้นหนึ่ง อย่างไรก็ตามแบคทีเรียแกรมลบเป็นพวกที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงของอุณหภูมิของร่างกาย ซึ่งเจริญเติบโตได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมบวก โดยแบคทีเรียแกรมลบเป็นสาเหตุของการเกิดโรคในคนเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Feng และคณะ [23]ได้ทดลองใช้ซิลเวอร์ไอออน (Ag+) กับแบคทีเรียแกรมบวก S. aureus และ

แบคทีเรียแกรมลบ E.coli พบว่าซิลเวอร์ไอออนสามารถยับยั้งการเจริญเติบโต และฆ่าเชื้อแบคทีเรียทั้งสองชนิดได้ และยังพบอีกว่าซิลเวอร์ไอออนจะกระจายตัวอยู่ตามผนังเซลล์ โดยซิลเวอร์ไอออนจะไปจับกับโปรตีนที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรียที่มีหมู่ Thiol (-SH) แล้วจะทำให้โปรตีนเกิดการแปรสภาพ ส่งผลให้การควบคุมการขนส่งสารเข้าและออกจากเซลล์ผิดปกติ นอกจากนี้ซิลเวอร์ไอออนสามารถแทรกเข้าสู่เซลล์ได้ และเมื่อเข้าสู่เซลล์แล้วจะทำให้ DNA ภายในเซลล์ซึ่งประกอบไปด้วยฟอสฟอรัสจำนวนมากเกิดการรวมตัว และสูญเสียความสามารถในการเพิ่มจำนวน แบคทีเรียจึงไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ อีกทั้งซิลเวอร์ไอออนที่แทรกเข้าไปในเซลล์ยังสามารถเข้าไปจับกับโปรตีนที่สำคัญตัวอื่นๆภายในเซลล์ได้ เช่นโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการหายใจระดับเซลล์ และเมื่อโปรตีนเหล่านั้นทำงานไม่ได้ตามปกติก็จะทำให้แบคทีเรียตายตามไปด้วย และการขนส่งสารเข้าออกเซลล์ที่ผิดปกติก็จะทำให้เซลล์ของแบคทีเรียแตกและตายในที่สุด อย่างไรก็ตามซิลเวอร์ไอออนจะมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบมากกว่าแบคทีเรียแกรมบวกเนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบนั้นมีชั้น Peptidoglycan บางกว่าแบคทีเรียแกรมบวก

สำหรับอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรก็สามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้เช่นเดียวกัน [24] แต่ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียก็ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียด้วยเช่นกัน อนุภาคของซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรจะกระจายตัวอยู่ที่ผนังเซลล์ และแทรกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรียและเกิดการรวมตัวของ DNA ภายในเซลล์เช่นเดียวกับซิลเวอร์ไอออน เมื่อขนาดอนุภาคของซิลเวอร์มีขนาดที่เล็กลงก็จะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของอนุภาคซิลเวอร์เพิ่มขึ้น โดยผิวหน้าของอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรที่สามารถจับกับแบคทีเรียได้ดีคือระนาบ (111) โดยกลไกในการต่อต้านแบคทีเรียคือในขั้นตอนแรกอนุภาคระดับนาโนเมตรของซิลเวอร์จะไปจับที่ผิวหน้าของเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรียและไปรบกวนการทำงานระดับเซลล์ของแบคทีเรีย เช่น การขนส่งสารเข้าออกเซลล์ และการหายใจ อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรสามารถแทรกเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรียโดยจะไปจับกับสารที่มีฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ ซึ่งได้แก่ DNA ก็จะทำให้เซลล์แบคทีเรียทำงานผิดปกติ ยิ่งไปกว่านั้นอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรสามารถเกิดการสลายตัวและปลดปล่อยซิลเวอร์ไอออนซึ่งสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้อีกด้วย

การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์นั้นจะเข้าไปรบกวนการสังเคราะห์ผนังเซลล์ ยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีน รบกวนการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิกและยับยั้งกระบวนการเมตาบอลิ-

ซึมของเซลล์แบคทีเรีย [25] สำหรับกลไกในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์มี 3 ขั้นตอน [25] ในตอนแรกอนุภาคซิลเวอร์จะไปเกาะที่ผิวของเยื่อหุ้มเซลล์ทำให้ไปรบกวนการแพร่ผ่าน (Permeability) และการหายใจ (Respiration) ของเซลล์ แต่ก็ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคด้วยเช่นกัน โดยอนุภาคขนาดเล็กซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าจึงสามารถเข้าไปเกาะได้มากกว่า จึงส่งผลกระทบต่อเซลล์แบคทีเรียมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ในขั้นที่สองอนุภาคซิลเวอร์สามารถที่จะเข้าไปภายในเซลล์ของแบคทีเรียซึ่งจะส่งผลต่อเซลล์อย่างมาก โดยอนุภาคซิลเวอร์จะไปเกาะกับฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ DNA โดยจะทำให้เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้และเป็นสาเหตุให้เซลล์ตายในที่สุด ฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์เป็นธาตุที่สำคัญของแบคทีเรียโดยพบได้มากที่เยื่อหุ้มเซลล์ อนุภาคซิลเวอร์สามารถทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์ที่อยู่ในโปรตีนที่ภายนอกเซลล์และภายในเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของเซลล์ และในขั้นที่สามอนุภาคซิลเวอร์จะปล่อยซิลเวอร์ไอออนออกมาซึ่งจะไปเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ถึงแม้ว่าอนุภาคซิลเวอร์จะอยู่ในรูปของ Ag° แต่ก็ยังคงมี Ag^{+} ที่มีความเข้มข้นระดับ Micromolar อยู่ด้วย โดยทั้ง Ag^{+} และ Ag° จะร่วมกันยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยซิลเวอร์ไอออนจะไปเกิดปฏิกิริยากับ DNA ซึ่งทำให้ DNA สูญเสียความสามารถในการจำลองตัวเอง และยังเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบต่างๆที่อยู่ในไซโตพลาสซึมและกรดนิวคลีอิก

ในงานวิจัยของ Rai และคณะ [26] และงานวิจัยของ Sharma [27] ก็ได้อธิบายกลไกในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียเหมือนกับที่กล่าวมาข้างต้นคือ อนุภาคซิลเวอร์จะเข้ามาเกาะที่เยื่อหุ้มเซลล์และเข้าไปภายในเซลล์แบคทีเรีย โดยที่เยื่อหุ้มเซลล์จะมีโปรตีนซึ่งมีซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบซึ่งอนุภาคซิลเวอร์ก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโปรตีนนี้ ซึ่งส่งผลต่อการแพร่ผ่าน และการหายใจของเซลล์ และเข้าไปทำปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสและซัลเฟอร์ที่เป็นส่วนประกอบของ DNA ซึ่งส่งผลต่อการการแบ่งเซลล์ซึ่งทำให้เซลล์ตายในที่สุด

อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรนอกจากสามารถต่อต้านเชื้อแบคทีเรียได้แล้วยังสามารถต่อต้านและยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและไวรัสได้อีกด้วย [24] ถึงแม้ว่าอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรจะส่งผลต่อเซลล์ของแบคทีเรีย แต่กลับไม่ส่งผลที่เป็นอันตรายต่อเซลล์มนุษย์ [24] เซลล์ของมนุษย์เป็นเซลล์ Eukaryotic cell ซึ่งเป็นเซลล์ขนาดใหญ่ มีโครงสร้างของเซลล์ที่ซับซ้อน มีหน่วยต่างๆ ทำงานอยู่ในเซลล์ที่มากกว่าเซลล์ของแบคทีเรียซึ่งเป็นเซลล์ Procaryotic cell ทั้งนี้หาก

มองไปที่โครงสร้างของส่วนต่างๆ ในเซลล์แบคทีเรียก็พบว่าโปรตีนที่ใช้ในการขนถ่ายอิเล็กตรอนของเซลล์แบคทีเรียอยู่ภายนอกเซลล์จึงง่ายต่อการที่อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรจะเข้าไปจับและส่งผลกระทบต่อเซลล์ แต่สำหรับเซลล์ของมนุษย์โปรตีนที่ใช้ในการขนถ่ายอิเล็กตรอนของเซลล์นั้นอยู่ภายใน Mitochondria และ Mitochondria ก็อยู่ภายในเซลล์อีกทีหนึ่ง และเซลล์ก็มีเยื่อหุ้มเซลล์ นอกจากนี้แล้วภายในเซลล์ก็มี Mitochondria อยู่จำนวนมาก ดังนั้นหากต้องการให้เซลล์มนุษย์ซึ่งเป็นเซลล์ Eukaryotic cell ถูกผลกระทบจากอนุภาคซิลเวอร์ต้องใช้อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรในปริมาณที่มากกว่าที่ใช้กับเซลล์แบคทีเรียมาก และจำเป็นต้องผ่านชั้นต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นจำนวนหลายชั้น ซึ่งความแตกต่างของปริมาณอนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตรที่ทำให้เซลล์แบคทีเรียถูกทำลายโดยที่เซลล์ของมนุษย์ไม่ได้รับผลกระทบ

ซิลเวอร์ถูกนำมาใช้ในการป้องกันแบคทีเรียมาตั้งแต่ในสมัยโบราณ และมีการศึกษาค้นคว้าอย่างแพร่หลาย อนุภาคซิลเวอร์จะไม่มีผลต่อมนุษย์ที่ความเข้มข้นต่ำๆ สำหรับการใช้อนุภาคซิลเวอร์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียนั้นพบว่ามีความเป็นไปได้น้อยมากที่แบคทีเรียที่จะพัฒนาตัวเองให้มีความต้านทานต่ออนุภาคซิลเวอร์ เมื่อเทียบกับการใช้ยาปฏิชีวนะ เพราะอนุภาคซิลเวอร์ได้ไปโจมตีเป้าหมายที่หลากหลายในเซลล์แบคทีเรีย [26] สำหรับการนำอนุภาคซิลเวอร์ไปใช้งาน เช่น นำไปเคลือบอุปกรณ์ทางการแพทย์เพื่อป้องกันฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ที่เกิดจากเชื้อแบคทีเรีย ผ้าปิดแผล ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของยาปฏิชีวนะ รักษาบาดแผลไฟไหม้ ใช้ในเครื่องกรองน้ำ และเครื่องปรับอากาศ [26, 27]

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. Poly(lactic acid) (PLA) (Bio Green World)
2. Poly(butylene succinate) (PBS) (Mitsubishi Chemical)
3. Maleic anhydride (MA) (Fluka, $\geq$ 99.0%)
4. Tetrahydrofuran (THF) (RCI Labscan, 99.8%)
5. Benzoyl peroxide (BPO) (Panreac, 98%)
6. Distilled water
7. Methanol (Union Intraco, 99.5%)
8. 4-Dimethylaminopyridine (DMAP) (Sigma-aldrich, 99%)
9. Chloroform และ Deuterated chloroform (RCI Labscan, 95.5%)
10. Silver nitrate ($AgNO_3$) (Merck-chemicals, Analysis)
11. Diethyl amine (DEA) (Sigma-aldrich, $\geq$ 99.5% (GC))
12. Glucose (Sigma-aldrich, $\geq$ 99% (GC) crystalline powder)
13. Deionized water
14. 3-Mercaptopropionic acid (MPA) (Sigma-aldrich, $\geq$ 99%)
15. Nutrient agar (LAB M, LAB014)
16. Sodium hydroxide(NaOH) (RCI Labscan, 99% A.R.)
17. Nutrient broth (LAB M, LAB008)
18. Ethanol (Union Intraco, 99.5%)
19. Sodium chloride (NaCl) (Lab-Scan analytical science, Analytical reagent A.R. 99%)
20. Potassium chloride (KCl) (Ajax Finechem, 99.8%)
21. Disodium hydrogen phosphate (Na_2HPO_4) (Carlo Erba, 99.5%)
22. Potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4) (Ajax Finechem, 99%)
23. Plate count agar (LAB M, LAB149)

24. Potassium hydroxide (KOH) (Lab-Scan analytical science, Analytical reagent A.R. 85%)
25. Phenolphthalein
26. Nitrogen gas
27. Liquid Nitrogen

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. Twin screw extruder (Enmach)
2. Injection molding machine (Benfield)
3. Compression molding machine (Labtech)
4. Sonicator (Vibra-Cell)
5. Vacuum oven (Eyela)
6. Autoclave (Tommy)
7. Incubator (Memmert)
8. Beaker
9. Three round bottom flask
10. Graduated cylinder
11. Dropper
12. Magnetic bar และ Stirrer
13. Reflux condenser
14. pH meter
15. Burette
16. Thermometer
17. Pipette
18. Buchner funnel Buchner flask และ Suction
19. Filter paper
20. Oil bath
21. Temperature control
22. Cooling refrigerator
23. Sterilize petre disc
24. Cotton และ Aluminum foil

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. Differential scanning calorimeter (Mettler Toledo: DSC1)
2. Thermogravimetric analyzer (Mettler Toledo: TGA/DSC1)
3. Fourier transform infrared spectrometer (Bruker Optik GmbH: Vertex70)
4. Nuclear magnetic resonance spectrometer (Bruker: 300 Ultrasheild)
5. Scanning electron Microscope (CamScan: MX-2000)
6. Wide Angle X-ray diffractometer (Rigaku: Miniflex II)
7. Universal testing machine (INSTRON: 5969)

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียม PLA/PBS blends

ทำการอบ PLA และ PBS ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วผสม PLA และ PBS ใน 3 อัตราส่วนคือ PLA/PBS = 90/10 80/20 และ 70/30 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ในการผสมมีการตั้งอุณหภูมิจาก Feed zone ไปจนถึง Die เป็น 125 130 135 140 145 150 155 และ 160 °C ตามลำดับ ด้วยความเร็วรอบของสกรูที่ 60 rpm หลังจากที่ผสมเสร็จแล้วจะนำ PLA/PBS blends ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding ซึ่งใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปจาก Feed zone ไปจนถึง Nozzle เป็น 130 140 150 และ 165 °C ตามลำดับ สัดส่วนการผสมระหว่าง PLA กับ PBS ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1

3.4.2 การสังเคราะห์ Compatibilizer (PLA-MA-PBS)

การเตรียม Compatibilizer แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยคือในตอนแรกจะทำการสังเคราะห์ PLA-MA ซึ่งเป็นการนำ Maleic anhydride (MA) มากราฟท์เข้าไปที่สายโซ่ของ PLA ที่ด้านข้างสายโซ่ ขั้นตอนต่อไปจึงนำ PBS มาทำการกราฟท์กับ PLA-MA ที่หมู่ฟังก์ชั่นของ MA ซึ่งเป็นตัวเชื่อม PLA กับ PBS (PLA-MA-PBS) ขั้นตอนการเตรียมเป็นไปตามหัวข้อ 3.4.2.1 และ 3.4.2.2 ตามลำดับ

3.4.2.1 การสังเคราะห์ PLA-MA

ชั่ง PLA จำนวน 10 กรัมใส่ลงไปในขวดสามคอขนาด 500 ml แล้วเติม THF ลงไป 100 ml กวนด้วย Magnetic stirrer จนกระทั่ง PLA ละลายทั้งหมด จากนั้นเติม MA และ BPO ลงไป โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณ MA จำนวน 3 อัตราส่วนคือ 15 30 และ 45 wt% ของ

น้ำหนัก PLA (ตัวอย่างชื่อ LM15 LM30 และ LM45 ตามลำดับ) และเติม BPO ปริมาณ 1 wt% ของน้ำหนัก PLA หลังจากนั้นต่อขวดสามคอเข้ากับ Reflux condenser แล้วนำไปวางในอ่างน้ำมันให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C และทำปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยให้ความร้อนพร้อมกับกวนด้วย Magnetic stirrer เป็นเวลา 20 ชั่วโมง [28] ทิ้งไว้ให้เย็น นำไปตกตะกอนใน Methanol ล้างตะกอนประมาณ 3 ครั้ง นำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สัดส่วนการผสมของสารเคมีในการสังเคราะห์ PLA-MA แสดงดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์และสัดส่วนการผสมของสารเคมีชนิดต่างๆ สำหรับการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและสังเคราะห์ PLA-MA

ชื่อตัวอย่าง	สัดส่วนการผสม			
	PLA (wt%)	PBS (wt%)	MA (wt% of PLA)	BPO (wt% of PLA)
PLA	100	0	-	-
PLA90	90	10	-	-
PLA80	80	20	-	-
PLA70	70	30	-	-
PBS	0	100	-	-
LM15	100	-	15	1
LM30	100	-	30	1
LM45	100	-	45	1

%Grafting ของ MA บน PLA หาโดยวิธีการทำไตเตรชั่น ซึ่งเริ่มจากการละลาย PLA-MA ปริมาณ 2 กรัมใน Chloroform ปริมาตร 80 ml แล้วหยดน้ำกลั่นลงไปประมาณ 3 หยดเพื่อไฮโดรไลซ์หมู่ Anhydride ให้กลายเป็นหมู่ Carboxylic acid โดยกวนด้วย Magnetic stirrer ประมาณ 12 ชั่วโมงแล้วนำสารละลายที่ได้มา 20 ml มาทำการไตเตรตกับ KOH ใน Methanol ความเข้มข้น 0.01 M จนถึงจุดยุติของ Phenolphthalein โดยระหว่างการไตเตรตต้องระวังไม่ให้เกิดการตกตะกอนขึ้น [29] ซึ่งมีสมการในการคำนวณดังสมการ (1) โดย N คือความเข้มข้นของ KOH ส่วน V คือปริมาตรของ KOH และ W คือน้ำหนักของตัวอย่าง PLA-MA ในส่วนของการพิสูจน์

เอกลักษณ์จะใช้เทคนิค ^{1}H NMR ใช้ตัวอย่างประมาณ 5 mg ละลายใน Deuterated chloroform ($CDCl_3$) สำหรับการทดสอบ

$$\% \text{ Grafting} = \frac{98 \times N \times V}{2W} \times 100 \quad (1)$$

3.4.2.2 การสังเคราะห์ PLA-MA-PBS

ชั่ง PBS จำนวน 5 กรัม และชั่ง PLA-MA (ตัวอย่าง LM15 LM30 และ LM45) จำนวน 5 กรัม เพื่อทำการสังเคราะห์ LMB15 LMB30 และ LMB45 ตามลำดับ โดยเติมลงไปในขวดสามคอขนาด 500 ml แล้วเติม Chloroform ลงไป 100 ml กวนด้วย Magnetic stirrer จนกระทั่ง PLA-MA และ PBS ละลายจนหมด จากนั้นเติม DMAP ปริมาณ 1 wt% ของน้ำหนัก PLA-MA แล้วนำไปวางในอ่างน้ำมันให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C และทำปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยให้ความร้อนพร้อมกับกวนด้วย Magnetic stirrer เป็นเวลา 16 ชั่วโมง [17, 30] ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปตกตะกอนใน Methanol ล้างตะกอนประมาณ 3 ครั้งนำไปอบให้แห้งด้วยตู้อบสุญญากาศที่ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมงสัดส่วนการผสมของสารเคมีในการสังเคราะห์ PLA-MA-PBS แสดงดังในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัดส่วนการผสมของสารเคมีในการสังเคราะห์ PLA-MA-PBS

ชื่อตัวอย่าง	PLA-MA		PBS (wt%)	DMAP (wt% of PLA-MA)
	ชนิด	ปริมาณ (wt%)		
LMB15	LM15	50	50	1
LMB30	LM30	50	50	1
LMB45	LM45	50	50	1

การหาปริมาณของ MA ในสายโซ่ของ PLA-MA ที่เหลืออยู่หลังจากการเกิดปฏิกิริยากับ PBS โดยการไตเตรชั่นซึ่งเริ่มจากการละลาย PLA-MA-PBS ปริมาณ 2 กรัมใน Chloroform ปริมาตร 80 ml แล้วหยดน้ำกลั่นลงไปประมาณ 3 หยดเพื่อไฮโดรไลซ์หมู่ Anhydride ให้กลายเป็นหมู่ Carboxylic acid โดยกวนด้วย Magnetic stirrer ประมาณ 12 ชั่วโมงแล้วนำสารละลายที่ได้มา 20 ml มาทำไตเตรตกับ KOH ใน Methanol ที่ความเข้มข้น 0.01 M จนถึงจุดยุติ

ของ Phenolphthalein โดยระหว่างการไตเตรตต้องระวังไม่ให้เกิดการตกตะกอนขึ้น [29] แล้วคำนวณหาปริมาณ MA ด้วยสมการที่ (1) ในส่วนของการพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PLA-MA-PBS ทำโดยการนำตัวอย่างมา 10 กรัมละลายใน THF ปริมาตร 100 ml และเมื่อละลายจนหมดแล้วนำมาใส่ในกรวยแยกแล้วทิ้งไว้ข้ามคืนเพื่อให้เกิดการแยกชั้นแล้วนำสารละลายใสชั้นบนมาตกตะกอนใน Methanol แล้วล้างตะกอน และอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค ^{1}H NMR ใช้ตัวอย่างประมาณ 5 mg ละลายใน Deuterated chloroform ($CDCl_3$) สำหรับการทดสอบ

3.4.3 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PLA/PBS blends

การปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS จะใช้ Compatibilizer ที่สังเคราะห์ได้จากขั้นตอน 3.4.2 โดยผสม Compatibilizer ปริมาณ 4 %wt ลงใน PLA80 โดย LMB15 ผสมกับ PLA80 จะได้ตัวอย่าง PLA80LMB15 LMB30 ผสมกับ PLA80 จะได้ตัวอย่าง PLA80LMB30 และ LMB45 ผสมกับ PLA80 จะได้ตัวอย่าง PLA80LMB45 ตามลำดับ นำมาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการผสมด้วยเครื่อง Twin screw extruder โดยตั้งอุณหภูมิจาก Feed zone ไปจนถึง Die เป็น 125 130 135 140 145 150 155 และ 160 °C ตามลำดับ และใช้ความเร็วรอบของสกรูที่ 60 rpm หลังจากที่ผสมเสร็จแล้วจะนำ PLA/PBS blends ที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding เป็นชิ้นทดสอบ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปจาก Feed zone ไปจนถึง Nozzle เป็น 130 140 150 และ 165 °C ตามลำดับ

3.4.4 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโน

เตรียมสารละลายของ Silver nitrate สารละลายของ Glucose และสารละลายของ Diethyl amine (DEA) ในน้ำกลั่นชนิดละ 200 ml แล้วนำสารละลายของ Silver nitrate และสารละลายของ Glucose ผสมกันในบีกเกอร์ขนาด 1000 ml พร้อมกับกวนด้วย Magnetic stirrer หลังจากนั้นเติมสารละลายของ Diethyl amine [31] โดยสัดส่วนของสารละลายทั้ง 3 ชนิดในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์แสดงดังในตารางที่ 3 ซึ่งสารละลายจะเปลี่ยนจากใสกลายเป็นสีน้ำตาลอ่อน แล้วเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม และเปลี่ยนเป็นสีเทา ตามลำดับ เมื่อกวนต่อไปจะเกิดโลหะเกาะที่ผิวของบีกเกอร์ลักษณะคล้ายกับกระจกเงา (Mirror reaction) และสังเกตเห็นตะกอนของอนุภาคซิลเวอร์ (ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 10 นาที) กรองตะกอนด้วยกระดาษกรอง ล้างตะกอน

ด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง นำไปอบแห้งที่ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้อนุภาคซิลเวอร์สีเทาออกมา และพิสูจน์เอกลักษณ์อนุภาคซิลเวอร์ด้วย WAXD ในช่วง 2-theta เท่ากับ 30 - 80º ด้วย Scan speed เท่ากับ 2 deg./min.

ตารางที่ 3 สัดส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์

ตัวอย่าง	Silver nitrate (mM)	Glucose (mM)	DEA (mM)
Ag1	50	25	25
Ag2	50	25	50
Ag3	50	25	100
Ag4	50	50	50
Ag5	50	100	50
Ag6	25	25	50
Ag7	10	25	50

3.4.5 การเตรียมคอมโพสิตของ PLA/PBS/ซิลเวอร์

การเตรียมคอมโพสิตของอนุภาคซิลเวอร์กับ PLA/PBS blends โดยใช้ PLA/PBS bends ที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ ซึ่งได้แก่ (PLA80LMB15) มาผสมกับอนุภาคซิลเวอร์ที่เตรียมได้จากขั้นตอน 3.4.4 ซึ่งได้แก่ Ag6 โดยใช้อัตราส่วนการผสมอนุภาคซิลเวอร์ที่ 1 2 และ 3 wt% ของ PLA80LMB15 โดย PLA80LMB15 ผสมกับซิลเวอร์ 1 wt% จะได้ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% ส่วน PLA80LMB15 ผสมกับซิลเวอร์ 2 wt% จะได้ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15 ผสมกับซิลเวอร์ 3 wt% จะได้ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag3% นำส่วนผสมทั้งหมดมาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการผสมด้วยเครื่อง Twin screw extruder โดยตั้งอุณหภูมิจาก Feed zone ไปจนถึง Die เป็น 125 130 135 140 145 150 155 และ 160 °C ตามลำดับ และใช้ความเร็วรอบของสกรูที่ 60 rpm หลังจากที่ผสมเสร็จแล้วนำคอมโพสิตที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง

Injection molding เป็นชิ้นทดสอบ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปจาก Feed zone ไปจนถึง Nozzle เป็น 130 140 150 และ 165 °C ตามลำดับ

3.4.6 การปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชั่นบนอนุภาคซิลเวอร์

นำอนุภาคซิลเวอร์ 10 กรัมมาล้างด้วย Deionized water ประมาณ 3 ครั้ง แล้วนำไปแขวนลอยในน้ำ 100 ml โดยทำการ Sonicate ประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นเติม 3-Mercaptopropionic acid (MPA) ลงไป 0.03 mol แล้ว Sonicate อีกครั้งประมาณ 5 นาที จากนั้นนำมากวนด้วย Magnetic stirrer เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง [32] แล้วกรองอนุภาคซิลเวอร์ (Ag-MPA) ออกมา นำไปล้างด้วยน้ำ DI ประมาณ 3 ครั้ง แล้วอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย FTIR โดยนำตัวอย่างมาบดกับ KBR แล้วอัดเป็นแผ่น Disk ก่อนที่นำไปทดสอบด้วย FTIR โดยทดสอบในช่วง Wave number 4000 – 800 cm^{-1} ในโหมด Transmittance

3.4.7 การเตรียมคอมโพสิตของอนุภาคซิลเวอร์ที่ผ่านการปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชั่นบนอนุภาคซิลเวอร์กับพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS

การเตรียมคอมโพสิตของอนุภาคซิลเวอร์ที่ผ่านการปรับปรุงแล้วกับ PLA/PBS blends (PLA80LMB15) โดยใช้อัตราส่วนการผสม Ag-MPA ที่ 1wt% ได้เป็นตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA นำส่วนผสมทั้งหมดมาอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการผสมด้วยเครื่อง Twin screw extruder โดยตั้งอุณหภูมิจาก Feed zone ไปจนถึง Die เป็น 125 130 135 140 145 150 155 และ 160 °C ตามลำดับ และใช้ความเร็วรอบของสกรูที่ 60 rpm หลังจากที่ผสมเสร็จแล้วนำคอมโพสิตที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding เป็นชิ้นทดสอบ ซึ่งใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปจาก Feed zone ไปจนถึง Nozzle เป็น 130 140 150 และ 165 °C ตามลำดับ

3.4.8 การทดสอบ SEM

เพื่อการศึกษาพื้นผิวรอยแตกหักของชิ้นตัวอย่างทดสอบจะใช้ Scanning Electron Microscope (MX-2000, CamScan) ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยนำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding มาทำรอยบาก แล้วนำไปจุ่มลงในไนโตรเจนเหลวครึ่งหนึ่งของความยาวที่บริเวณรอยบาก แล้วนำมาทำให้หักโดยวิธีการของ Impact test แบบ Izod โดยนำด้านที่ไม่ได้จุ่มลงในไนโตรเจนเหลววางอยู่ด้านล่างขณะตี Impact แล้วนำชิ้นส่วนด้านล่างที่หักไปศึกษาด้วย SEM ซึ่งตัวอย่างจะถูกเคลือบด้วยทองก่อนนำไปทดสอบ ในการศึกษาจะใช้กำลังขยาย 2,000 เท่า สำหรับตัวอย่างที่เป็นคอมโพสิตของอนุภาคซิลเวอร์จะศึกษาการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตด้วย SEM ในโหมด Back scattered electron image และการศึกษาขนาดของอนุภาคซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยกำลังขยาย 5,000 เท่าและ 10,000 เท่า ก่อนนำไปศึกษาจะถูกเคลือบด้วยทองเช่นเดียวกัน

3.4.9 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลจะแบ่งเป็นการทดสอบการดึง (Tensile test) และการดัดโค้ง (Flexural test) ด้วย Universal testing machine (INSTRON: 5969) ซึ่งในการทดสอบการดึงทำตาม ASTM D 638 โดยใช้กับตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding ใช้ความเร็วการทดสอบเท่ากับ 5 mm/min โดยทำการดึงจนตัวอย่างเกิดการแตกหัก ในส่วนของการทดสอบการดัดโค้งจะทำตาม ASTM D 790 โดยใช้กับตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding ในการทดสอบจะทำการดัดโค้งตัวอย่างจนถึง 5% Strain หรือจนตัวอย่างเกิดการแตกหักก่อนถึง 5% Strain ด้วยความเร็ว 1.64 mm/min และ Support span เท่ากับ 64 mm

3.4.10 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนแบ่งเป็นการทดสอบด้วย Differential Scanning Calorimeter (DSC1, Mettler Toledo Switzerland) และ Thermogravimetric Analyzer (TGA/DSC1, Mettler Toledo Switzerland) ซึ่งในการทดสอบทั้งสองนี้จะใช้กับตัวอย่างที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding โดยนำมาทดสอบประมาณ 10 mg สำหรับการทดสอบ DSC นั้นจะเริ่มทดสอบที่อุณหภูมิ 30 °C แล้วให้ความร้อนด้วยอัตรา 5 °C/min จนถึงอุณหภูมิ 180 °C แล้วคงไว้ที่

อุณหภูมินี้นาน 5 นาที หลังจากนั้นให้ความเย็นด้วยอัตรา 5 °C/min จนถึงอุณหภูมิ 30 °C แล้วให้ความร้อนอีกครั้งหนึ่งด้วยอัตรา 5 °C/min จนถึงอุณหภูมิ 180 °C เมื่อเสร็จแล้วทำการหาอุณหภูมิ T_g T_{cc} T_c T_m และคำนวณหา %Crystallinity ในส่วนของ TGA เริ่มทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C แล้วเพิ่มความร้อนด้วยอัตรา 5 °C/min จนถึงอุณหภูมิ 500 °C เมื่อเสร็จแล้วหาอุณหภูมิ T_{onset} และ T_d ทั้งนี้ในการทดสอบ DSC และ TGA จะทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

3.4.11 การทดสอบการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย

การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียของตัวอย่างจะทดสอบกับแบคทีเรีย E. coli และ S. aureus ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบและแกรมบวกตามลำดับ ด้วยวิธี Dynamic shake flask test ตาม ASTM E 2149-10 ทำการทดสอบเปรียบเทียบความสามารถต้านเชื้อแบคทีเรียระหว่างตัวอย่างที่มีการผสม และไม่มีการผสมอนุภาคซิลเวอร์ และความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบและแกรมบวก

3.4.11.1 การเตรียม Stock เชื้อแบคทีเรีย

เติม Nutrient Agar 2.8 กรัม ลงในน้ำกลั่น 100 ml ให้ความร้อนพร้อมกับกวนจนละลาย หลังจากนั้นปรับ pH ด้วย NaOH ความเข้มข้น 1 M จนได้ค่า pH อยู่ในช่วง 6.8 - 7.2 แล้วแบ่งใส่หลอดทดลองจำนวน 10 หลอด หลอดละ 8 ml ปิดปากหลอดด้วยสำลี และปิดทับด้วยอลูมิเนียมฟอยล์อีกชั้นหนึ่ง นำไป Sterilize ด้วยเครื่อง Autoclave ที่ 121 °C เป็นเวลา 15 นาที นำมาวางให้เอียงประมาณ 15° จนกระทั่ง Nutrient Agar แข็งตัว จากนั้นใช้ Inoculating loop ในการ Transfer เชื้อแบคทีเรียลงบน Nutrient Agar โดย Inoculating loop ก่อนนำมาใช้ต้องลนไฟจนแดงก่อน และหลอดทดลองที่ใส่ Nutrient Agar ต้องลนไฟที่ปากหลอดทุกครั้งที่มีการเปิดปากหลอดเพื่อป้องกันการปนเปื้อน และหลังจากที่ Transfer เชื้อแบคทีเรียเสร็จแล้วให้นำไป Incubate ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.11.2 การเตรียม Nutrient Broth

เตรียม Nutrient Broth 25 กรัมในน้ำกลั่น 1000 ml กวนจนละลาย แล้วปรับ pH ด้วย NaOH ความเข้มข้น 1 M จนได้ค่า pH อยู่ในช่วง 6.8 - 7.2 แบ่งใส่หลอดทดลอง

จำนวน 10 หลอด หลอดละ 4 ml ปิดปากหลอดด้วยสำลี และปิดทับด้วยอลูมิเนียมฟอยล์อีกชั้นหนึ่ง นำไป Sterilize ด้วยเครื่อง Autoclave ที่ 121 °C เป็นเวลา 15 นาที ส่วน Nutrient Broth ที่เหลือให้เก็บไว้ใช้ต่อไปในข้อที่ 3.4.11.5

3.4.11.3 การเตรียมเชื้อแบคทีเรียสำหรับการทดสอบ

ปล่อยให้ Nutrient Broth ในหลอดทดลองที่ผ่านการ Sterilize จากข้อ 3.4.11.2 เย็นลง แล้ว Transfer เชื้อแบคทีเรียจาก Stock เชื้อแบคทีเรียในข้อ 3.4.11.1 ใส่ในหลอด Nutrient Broth ด้วย Inoculating loop โดยเลือกหลอดที่มีเชื้อแบคทีเรียสมบูรณ์และมีปริมาณที่พอเหมาะ สำหรับ Inoculating loop ก่อนนำมาใช้ต้องลนไฟจนแดงก่อน และหลอดทดลองที่ใส่ Nutrient Broth ต้องลนไฟที่ปากหลอดทุกครั้งที่มีการเปิดปากหลอดเพื่อป้องกันการปนเปื้อน หลังจากนั้นนำไป Incubate ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.11.4 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย

นำชิ้นตัวอย่างที่ขึ้นรูปสำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลของตัวอย่าง PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% PLA80LMB15-Ag3% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่อง Compression molding ให้ได้ชิ้นงานขนาด 50 x 50 mm^2 และมีความหนาประมาณ 0.5 mm โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูป 170 °C และความดัน 80 psi หลังจากนั้นนำฟิล์มตัวอย่างแต่ละชนิดมาตัดเป็นชิ้นขนาด 10 x 10 mm^2 จำนวน 25 ชิ้น

3.4.11.5 การทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย

นำ Nutrient Broth ส่วนที่เหลือจากข้อ 3.4.11.2 มาแบ่งใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 150 ml ขวดละ 50 ml จำนวน 6 ขวด แล้วนำฟิล์มที่เตรียมไว้ในข้อ 3.4.11.4 ใส่ลงไปในขวดรูปชมพู่ 1 ขวดต่อ 1 ชนิดตัวอย่าง (ตัวอย่าง 1 ชนิดจะใส่ฟิล์มขนาด 10 x 10 mm^2 จำนวน 25 ชิ้น) โดยจะมีหนึ่งขวดที่ไม่ได้ใส่ฟิล์มตัวอย่างลงไปซึ่งจะใช้เป็น Control หลังจากนั้นปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยสำลี และปิดทับด้วยอลูมิเนียมฟอยล์อีกชั้นหนึ่ง นำไป Sterilize ด้วยเครื่อง Autoclave ที่

121 °C เป็นเวลา 15 นาที รอให้เย็น แล้วปิเปตเชื้อแบคทีเรียจากที่เตรียมไว้ในหลอดทดลองในข้อที่ 2.4.11.3 โดยเลือกหลอดที่มีเชื้อแบคทีเรียที่มีความสมบูรณ์และมีปริมาณที่พอเหมาะ ปิเปตใส่ในขวดรูปชมพู่ที่มีฟิล์มตัวอย่างแต่ละชนิด โดยปิเปตเชื้อแบคทีเรียใส่ขวดละ 500 µl พร้อมทั้งลนไฟที่ปากหลอดทุกครั้งที่มีการเปิดปากหลอดเพื่อป้องกันการปนเปื้อน จากนั้นนำขวดรูปชมพู่ที่มีฟิล์มตัวอย่าง และขวด Control ที่ได้เติมเชื้อแบคทีเรียลงไปแล้ว ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.11.6 การทำ Dilution

เริ่มจากเตรียม Phosphate buffered saline (PBS) โดยชั่ง NaCl จำนวน 8 กรัม KCl จำนวน 0.2 กรัม Na_2HPO_4 จำนวน 1.44 กรัม และ KH_2PO_4 จำนวน 0.25 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 ml แล้วเติมน้ำกลั่นลงไป 800 ml กวนจนละลาย แล้วปรับ pH ด้วย NaOH ความเข้มข้น 1 M จนได้ค่า pH อยู่ในช่วง 6.8 - 7.2 หลังจากนั้นปรับปริมาตรให้ได้ปริมาตรรวม 1000 ml แล้วแบ่งใส่หลอดทดลองหลอดละ 4.5 ml โดยฟิล์มตัวอย่าง PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% PLA80LMB15-Ag3% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA รวมทั้ง Control แต่ละชนิดจะใช้สาละลาย PBS จำนวน 9 หลอด (ทั้งหมดใช้จำนวน 54 หลอด) ปิดปากหลอดด้วยสำลี และปิดทับด้วยอลูมิเนียมฟอยล์อีกชั้นหนึ่ง นำไป Sterilize ด้วยเครื่อง Autoclave ที่ 121 °C เป็นเวลา 15 นาที รอให้เย็น แล้วนำขวดรูปชมพู่ที่มีฟิล์มตัวอย่างและเชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการเขย่าโดยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากข้อ 3.4.11.5 มาทำการเจือจางเชื้อแบคทีเรีย โดยการปิเปตเชื้อแบคทีเรียจากขวดรูปชมพู่มา 500 µl ใส่ลงในหลอด PBS หลอดที่ 1 แล้วเขย่าให้เข้ากัน หลังจากนั้นปิเปตเชื้อแบคทีเรียจากหลอดที่ 1 มา 500 µl ใส่ลงในหลอด PBS หลอดที่ 2 แล้วเขย่าให้เข้ากัน และปิเปตเชื้อแบคทีเรียจากหลอดที่ 2 มา 500 µl ใส่ลงในหลอด PBS หลอดที่ 3 ทำอย่างนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงหลอดที่ 9 พร้อมทั้งลนไฟที่ปากหลอดทุกหลอดทุกครั้งที่มีการเปิดปากหลอดเพื่อป้องกันการปนเปื้อน เมื่อครบแล้วก็เริ่มทำการเจือจางเชื้อแบคทีเรียจากขวดรูปชมพู่ที่มีฟิล์มตัวอย่างอื่นๆจนครบ ตารางที่ 4 แสดงค่า Dilution factor ของแต่ละหลอดทดลองในการเจือจางเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 4 Dilution factor ของแต่ละหลอดทดลองที่มีการเจือจางเชื้อแบคทีเรีย

หลอดสารละลาย PBS ที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรีย	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Dilution factor	10	10^{2}	10^{3}	10^{4}	10^{5}	10^{6}	10^{7}	10^{8}	10^{9}

3.4.11.7 การเพาะเชื้อแบคทีเรีย

เตรียมจานเพาะเชื้อโดยการเตรียม Plate count agar จำนวน 20.5 กรัม ในน้ำกลั่น 1000 ml ให้ความร้อนและกวนจนละลาย แล้วปรับ pH ด้วย NaOH ความเข้มข้น 1 M จนได้ค่า pH อยู่ในช่วง 6.8 - 7.2 แบ่งใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 ml จำนวน 3 ขวด ปิดปากขวดด้วยสำลีและปิดทับด้วยอลูมิเนียมฟอยล์อีกชั้นหนึ่ง นำไป Sterilize ด้วยเครื่อง Autoclave ที่ 121 °C เป็นเวลา 15 นาที เสร็จแล้วรอให้อุณหภูมิลดลงประมาณ 60 °C แล้วนำ Plate count agar เทลงในจานเพาะเชื้อจานละประมาณ 10 ml แล้วเขย่าเบาๆ ให้ Plate count agar กระจายทั่วจานเพาะเชื้อ ปิดฝาจานแล้ววางทิ้งไว้จน Plate count agar แข็งตัว ลนไฟที่ปากขวดรูปชมพู่ที่บรรจุ Plate count agar ทุกครั้งที่มีการเปิดปากขวด และขณะที่เท Plate count agar ลงในจานเพาะเชื้อไม่ควรเปิดฝาจานกว้างเกินไปเพื่อป้องกันการปนเปื้อน ฟิล์มตัวอย่าง PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% PLA80LMB15-Ag3% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA รวมทั้ง Control แต่ละชนิดจะใช้จานเพาะเชื้อทั้งหมด 9 จาน (รวมทั้งหมด 54 จาน) เมื่อ Plate count agar ในจานเพาะเชื้อแข็งตัวแล้วให้นำหลอดทดลองที่ได้ทำการเจือจางเชื้อแบคทีเรียจากข้อ 3.4.11.6 โดยนำหลอดที่ 9 มาปิเปตเชื้อแบคทีเรียครั้งละ 10 µl แล้วหยดลงบนจานเพาะเชื้อ โดยทำการหยดทั้งหมด 10 หยด (ปริมาตรรวม 100 µl) ขณะหยดไม่ควรเปิดฝาจานเพาะเชื้อกว้างเกินไป และลนไฟที่ปากหลอดทดลองทุกครั้งที่มีการเปิดปากหลอดเพื่อป้องกันการปนเปื้อน โดยทำซ้ำอีก 2 จาน (รวมใช้จานเพาะเชื้อ 3 จานต่อหนึ่งหลอดที่ได้มาจากการทำการเจือจางเชื้อแบคทีเรียในหัวข้อ 3.4.11.6) ต่อจากนั้นนำหลอดที่ 8 และ 7 มาทำการหยดเชื้อแบคทีเรียใส่จานเพาะเชื้อเช่นเดียวกับหลอดที่ 9 (รวมใช้จานเพาะเชื้อ 9 จานต่อหนึ่งชนิดของฟิล์มตัวอย่างที่ได้มาจากการทำการเจือจางเชื้อ

แบคทีเรีย และใช้จานเพาะเชื้อรวมทั้งหมดทุกตัวอย่าง 54 จาน) และทำการหยดเชื้อแบคทีเรียจากตัวอย่างชนิดอื่นๆลงจานเพาะเชื้อจนเสร็จ แล้วนำจานเพาะเชื้อที่มีเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดไป Incubate ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.11.8 การนับจำนวนแบคทีเรีย

หลังจากนำจานเพาะเชื้อที่มีเชื้อแบคทีเรียไป Incubate ที่อุณหภูมิ 37 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้ว ให้เลือกจานเพาะเชื้อที่มีจำนวนของโคโลนีอยู่ในช่วง 30 – 300 โคโลนี โดยนำมาหาจำนวนเชื้อแบคทีเรีย และคำนวณการต้านเชื้อแบคทีเรีย ตามสมการที่ (2) และ (3)

$$\text{จำนวนเชื้อแบคทีเรีย (CFU/ml)} = \frac{\text{จำนวนโคโลนีที่นับได้} \times \text{Dilution factor}}{\text{ปริมาตรที่หยดลงในจานเพาะเชื้อ (0.1 ml)}} \times 100 \qquad (2)$$

$$\%\ \text{Antibacteria} = \frac{\text{CFU/ml ของ control} - \text{CFU/ml ของตัวอย่าง}}{\text{CFU/ml ของ control}} \times 100 \qquad (3)$$

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

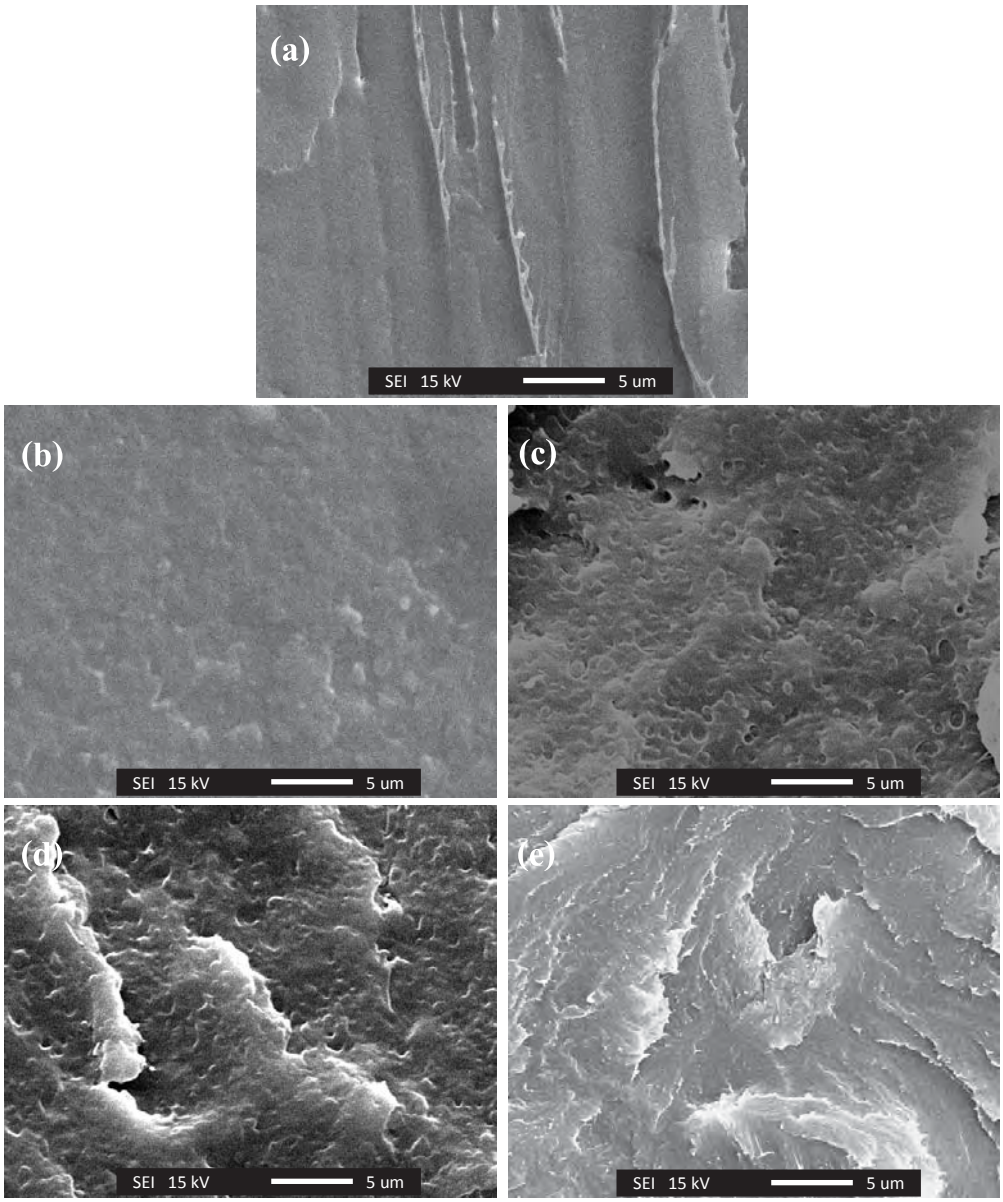
4.1 การศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBS (PLA/PBS blend)

การทดสอบสมบัติของ PLA/PBS blends จะประกอบไปด้วยการศึกษาสัณฐานวิทยาพื้นผิวรอยแตกหัก การทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน โดย PLA/PBS blends มีอัตราส่วนการผสมกันระหว่าง PLA กับ PBS ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักที่ 90/10 (PLA90) 80/20 (PLA80) และ 70/30 (PLA70) ทำการผสม PLA กับ PBS ด้วยเครื่อง Twin screw extruder และขึ้นรูปตัวอย่างด้วยเครื่อง Injection molding

4.1.1 สัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาทำการศึกษาโดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ซึ่งตัวอย่างก่อนจะที่นำมาทดสอบจะถูกขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding หลังจากนั้นนำมาจุ่มลงในไนโตรเจนเหลว แล้วนำมาทำให้แตกหักโดยวิธีการของ Impact test แบบ Izod และนำไปศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่แตกหัก

การดูพื้นผิวรอยแตกหักของตัวอย่างด้วย SEM เพื่อศึกษาความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBS ในพอลิเมอร์ผสมซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในภาพที่ 6 โดยใช้กำลังขยาย 2000 เท่า ซึ่งมีการเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PLA และ PBS กับ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วน 90/10 (PLA90) 80/20 (PLA80) และ 70/30 (PLA70) จากภาพ SEM ของ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนการผสมที่ 90/10 (PLA90) จะไม่พบการแยกเฟสของ PLA และ PBS ลักษณะของพื้นผิวมีความเข้ากันได้ดี แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ PBS ใน PLA/PBS blends จะสังเกตพบการแยกเฟสของ PLA และ PBS ได้ชัดเจนมากขึ้น โดยจะพบเม็ดทรงกลมขนาดเล็กของ PBS กระจายตัวอยู่ในเฟสของ PLA และขนาดของเฟส PBS ใหญ่ขึ้นตามปริมาณการเติม PBS ใน PLA/PBS blends โดยลักษณะของพื้นผิวไม่มีความราบเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของ PBS ใน PLA/PBS blends มีอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้นถึง 20 wt% จะทำให้ PLA กับ PBS ในพอลิเมอร์ผสมไม่เข้ากัน (Immiscible blend) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhatia และคณะ [14] ซึ่งพบว่า PLA/PBS blends เมื่อมีอัตราส่วนการผสมของ PBS มากกว่า 20 wt% จะเกิดการแยกเฟสระหว่างเฟส PLA และ PBS



ภาพที่ 6 SEM บริเวณพื้นผิวรอยแตกหักของตัวอย่าง (a) PLA (b) PLA90 (c) PLA80 (d) PLA70 และ (e) PBS ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

4.1.2 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลจะประกอบไปด้วยการทดสอบการดึง (Tensile test) และการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) โดยเครื่อง Universal testing machine ทดสอบตาม ASTM D 638 และ D 790 ตามลำดับ ซึ่งตัวอย่าง PLA/PBS blends ในแต่ละอัตราส่วนผสมจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของ PLA และ PBS บริสุทธิ์

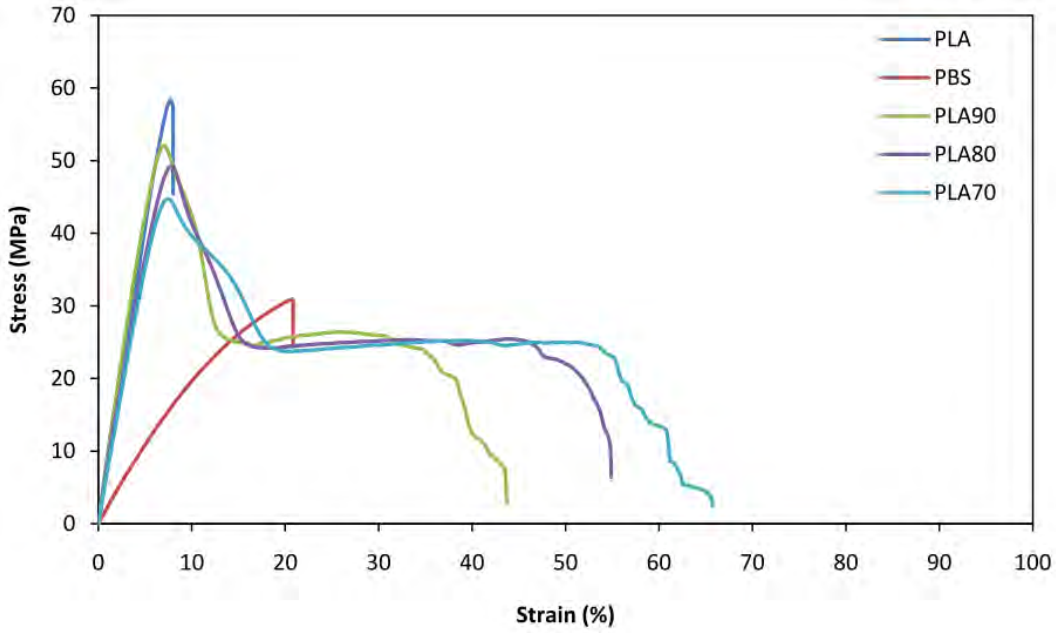
4.1.2.1 การทดสอบการดึง (Tensile test)

การทดสอบการดึง (Tensile test) ซึ่งทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ในแต่ละอัตราส่วนจะมีการทดสอบเปรียบเทียบกับ PLA และ PBS โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Stain ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงดังภาพที่ 7 ซึ่งค่า Tensile modulus ของ PLA/PBS blends ได้แสดงในภาพที่ 8 จากการทดสอบพบว่า PLA และ PBS มีค่า Tensile modulus ประมาณ 960 และ 230 MPa ตามลำดับ และเมื่ออัตราส่วนของ PBS ใน PLA/PBS blends เพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีค่า Tensile modulus ลดลงเมื่อเทียบกับ PLA โดยค่า Tensile modulus ลดลงจากตัวอย่าง PLA90 PLA80 และลดลงมากสุดที่ตัวอย่าง PLA70 เมื่อเทียบกับ PLA

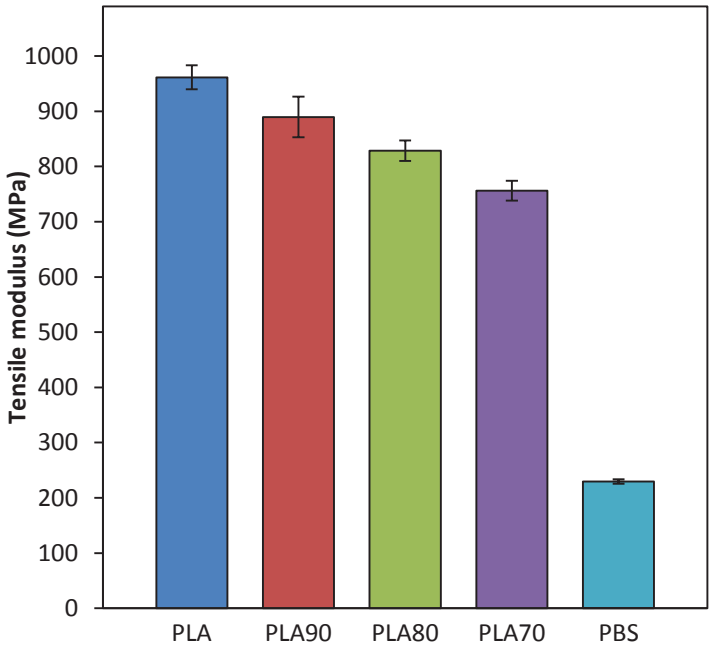
ในส่วนของค่า Tensile strength ของ PLA/PBS blends ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 9 พบว่าค่า Tensile strength มีค่าลดลงเมื่อมีอัตราส่วนของ PBS เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับค่า Tensile modulus โดยมีค่าลดลงจากตัวอย่าง PLA90 PLA80 และมีค่า Tensile strength ลดลงมากสุดที่ตัวอย่าง PLA70 ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของ Tensile strength เมื่อมีสัดส่วนของ PBS ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้นอาจเกิดจากการที่พอลิเมอร์ผสมเกิดความไม่เข้ากันระหว่างเฟสเพิ่มขึ้นดัง SEM ในภาพที่ 6 จึงทำให้ Tensile strength มีค่าลดลง โดยแนวโน้มของค่า Tensile modulus และ Tensile strength ของ PLA/PBS blends สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhatia และคณะ [14] ซึ่งพบว่าเมื่อมีปริมาณของ PBS ใน PLA/PBS blends เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ทั้งค่า Tensile modulus และ Tensile strength มีแนวโน้มลดลง

เมื่อมาพิจารณาค่าของ Elongation at break ของ PLA/PBS blends ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 10 ก็พบว่าค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน PBS ที่เพิ่มขึ้นใน PLA/PBS bends โดย PLA มีค่า Elongation at break ประมาณ 7% แต่หลังจากมีการผสม PBS ทำให้มีค่า Elongation at break เพิ่มมากขึ้น โดยผสม PBS ลงไปใน PLA/PBS blends ที่อัตราส่วน 10 wt% (PLA90) จะทำให้ค่า Elongation at break มีค่าสูงถึงประมาณ 45% และค่า Elongation at break

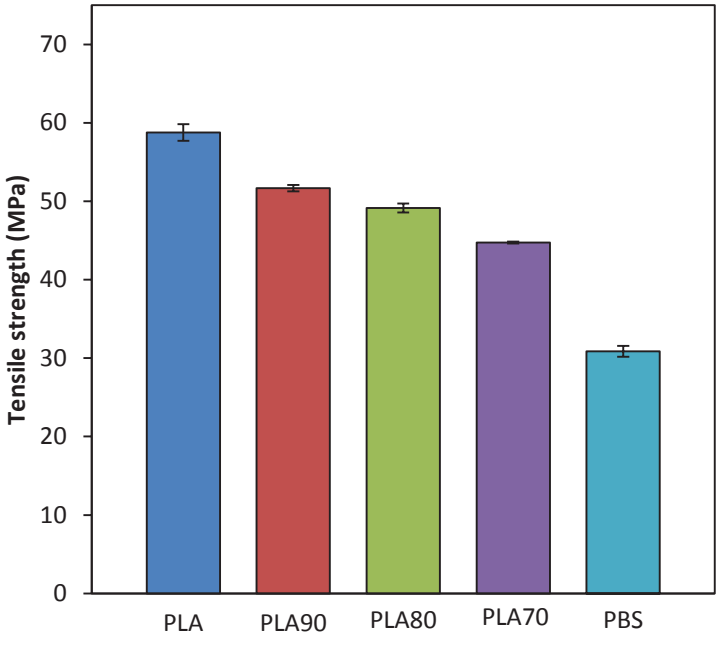
จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มมากขึ้น [33] โดยค่า Elongation จะเพิ่มจากตัวอย่าง PLA90 PLA80 และมีค่ามากที่สุดที่ตัวอย่าง PLA70 โดยมีค่า Elongation at break ประมาณ 45% 50% และ 75% ตามลำดับ พบว่า Elongation at break ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้ง PLA และ PBS [33] ซึ่งมี Elongation at break ประมาณ 7 และ 20% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากแนวโน้มของค่า Tensile modulus Tensile strength และค่า Elongation at break ของ PLA/PBS blends อาจเกิดจากการที่ PBS เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นกว่า PLA ทำให้เมื่อนำมาผสมกัน PBS จึงช่วยให้พอลิเมอร์ผสมมีความยืดหยุ่นมากขึ้นซึ่งสังเกตจากค่า Elongation at break ที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มมากขึ้นในส่วนผสม แต่อย่างไรก็ตามการที่ PLA/PBS blends มีความยืดหยุ่นมากขึ้นก็ส่งผลให้ค่า Tensile modulus และค่า Tensile strength มีค่าลดลงตามไปด้วย ซึ่งผลการทดสอบแรงดึงสอดคล้องกับผล SEM ซึ่งจากภาพ SEM ของ PLA และ PBS ในภาพที่ 6 (a และ e) จะพบลักษณะรอยแตกหักที่เรียบแสดงถึงความเปราะ ส่วนรอยแตกหักของ PBS แสดงถึงความเหนียว และเมื่อมีการผสม PBS กับ PLA ทำให้รอยแตกหักแสดงลักษณะที่มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น



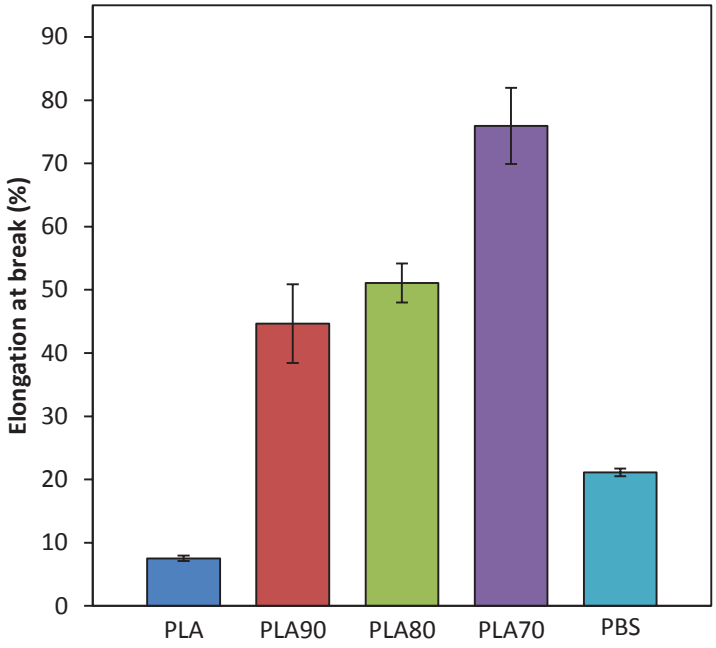
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 8 Tensile modulus ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 9 Tensile strength ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ

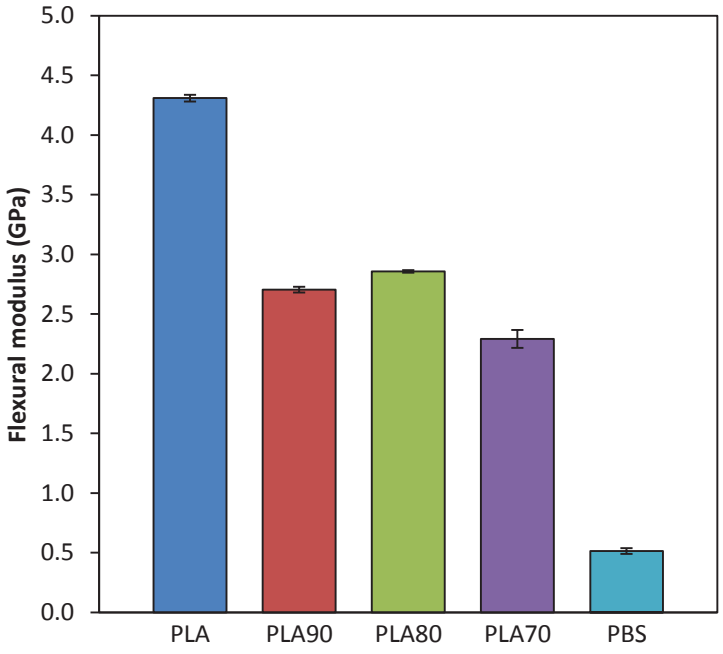


ภาพที่ 10 Elongation at break ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ

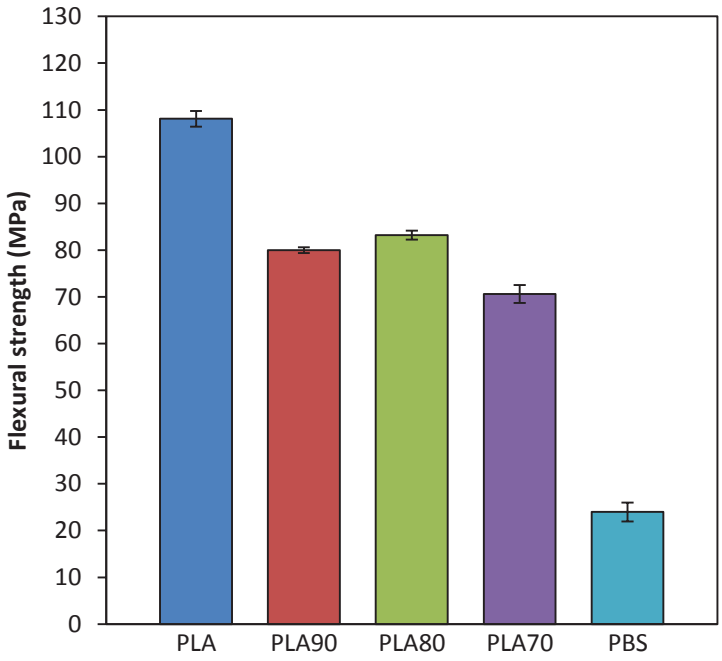
4.1.2.2 การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test)

การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) ซึ่งทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 11 และ 12 ซึ่งแสดงค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ตามลำดับ โดยจากการทดสอบพบว่า PLA เกิดการแตกหักก่อนที่จะถึง 5% strain แต่เมื่อมีการผสม PBS ใน PLA/PBS blends จะไม่พบการแตกหักในช่วงการทดสอบภายใน 5% strain สำหรับค่า Flexural modulus ของ PLA/PBS blends ในแต่ละอัตราส่วนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ PLA และ Flexural modulus จะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ PBS ใน PLA/PBS blends อย่างไรก็ตามเมื่อดูที่อัตราส่วนการผสมของ PLA กับ PBS ที่ 80/20 (PLA80) ก็พบว่ามีค่า Flexural modulus เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอัตราส่วนการผสมของ PLA กับ PBS ที่ 90/10 (PLA90) และที่อัตราส่วนการผสมที่ 70/30 (PLA70) พบว่า Flexural modulus มีค่าลดลงมากที่สุด

ในส่วนของผล Flexural strength ก็พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่า Flexural modulus คือ PLA/PBS blends จะมีค่า Flexural strength ที่ลดลงเมื่อเทียบกับ PLA และ Flexural strength จะลดลงตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของ PBS ใน PLA/PBS blends แต่อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนการผสมของ PLA กับ PBS ที่ 80/20 (PLA80) พบว่ามีค่า Flexural strength ที่เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนการผสมของ PLA กับ PBS ที่ 90/10 (PLA90) และ 70/30 (PLA70) พบว่า Flexural modulus มีค่าลดลงมากที่สุด อย่างไรก็ตามทั้ง Flexural modulus และ Flexural strength มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อผสม PBS มากขึ้น เนื่องจากการเติม PBS ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า PLA จึงทำให้ Flexural modulus และ Flexural strength มีค่าลดลง [34] และการทดลองก็สอดคล้องกับการทดสอบการดึง ซึ่งมีค่า Tensile modulus และ Tensile strength ที่ลดลง แต่มีค่า Elongation at break ที่เพิ่มมากขึ้นตามอัตราส่วนของ PBS ใน PLA/PBS blends ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีความยืดหยุ่นและความเหนียวที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งทำให้ PLA ที่ปกติมีความเปราะและเกิดการแตกหักขณะการทดสอบแรงดัด ได้รับการปรับปรุงให้มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้นเมื่อผสมด้วย PBS



ภาพที่ 11 Flexural modulus ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ



ภาพที่ 12 Flexural strength ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.1.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของ PLA/PBS blends จะทำการศึกษาด้วยการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC เพื่อศึกษามีอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิ Cold crystalline (T_{cc}) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และ Degree of crystallinity และการทดสอบสมบัติความเสถียรทางความร้อนด้วย TGA เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (T_d)

4.1.3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC

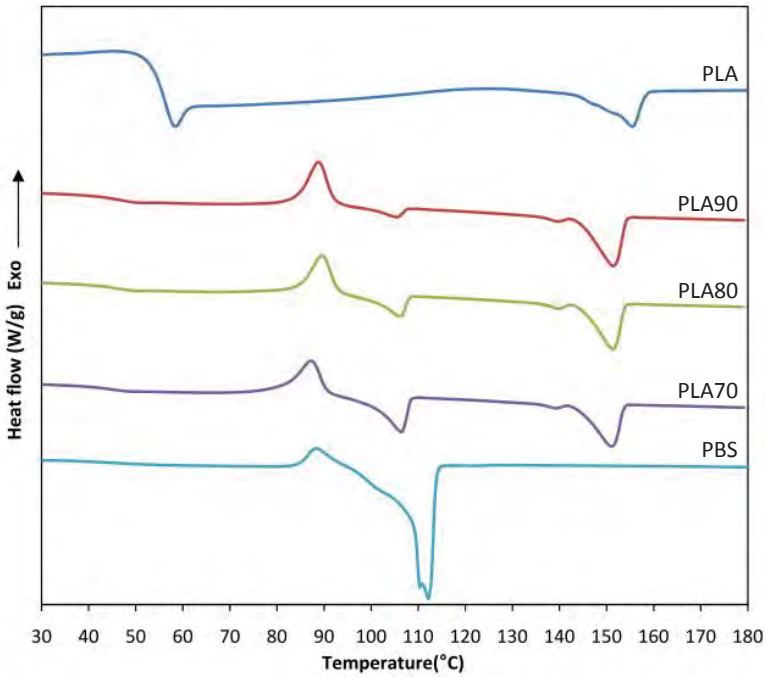
การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC เริ่มตั้งแต่ 30 – 180 °C โดยใช้ Heating rate ในการทดสอบที่ 5 °C/min และใช้ตัวอย่างในการทดสอบประมาณ 10 mg ซึ่งผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC แสดงดังภาพที่ 13 และได้สรุปไว้ในตารางที่ 5 ซึ่งพบว่า PLA มี T_g ที่ 54.62 °C และมี T_m ที่ 155.36 °C ขณะที่ PBS มี T_g ที่ -38.99 °C และมี T_m ที่ 111.46 °C สำหรับการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ของ PLA/PBS blends พบว่า T_g ของ PLA/PBS blends มีค่าน้อยกว่า PLA และมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของ PBS ใน PLA/PBS blends เพิ่ม

มากขึ้น โดย T_g ของ PLA/PBS blends ในตัวอย่าง PLA90 PLA80 และ PLA70 มีค่าลดลงจาก T_g ของ PLA ประมาณ 9 10 และ 12 °C ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม T_g ของ PLA/PBS blends ยังคงมีค่าอยู่ระหว่าง T_g ของ PLA และ PBS ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Shibata และคณะ [33] ซึ่งพบว่าเมื่อมีอัตราส่วนของ PBS เพิ่มขึ้นใน PLA/PBS blends จะทำให้ T_g มีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งสนับสนุนผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่มีความยืดหยุ่นและความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ PBS ที่เพิ่มขึ้นใน PLA/PBS blends โดยการลดลงของ T_g ของ PLA/PBS blends จะส่งผลให้พอลิเมอร์มีลักษณะคล้ายยางมากขึ้น จึงทำให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น การเติม PBS ในพอลิเมอร์ผสมอาจทำให้สายโซ่ของ PLA สามารถเคลื่อนตัวได้ง่ายขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงทำให้ T_g เคลื่อนมายังอุณหภูมิที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับ PLA บริสุทธิ์

นอกจากนี้ PLA/PBS blends ได้แสดง T_{cc}ของ PBS ที่อุณหภูมิประมาณ 88 °C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ T_{cc} ของ PBS ในส่วนของ T_m ของ PLA/PBS blends พบว่ามีการแยกกันเป็นสองบริเวณที่สอดคล้องกับ T_m ของ PLA และ PBS บริสุทธิ์ โดย T_m ของ PLA/PBS blends แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีปริมาณของ PBS เพิ่มขึ้น แต่มีค่าที่ลดลงจาก T_m ของ PLA และ PBS บริสุทธิ์เล็กน้อย [11]

ในส่วนของผลึกที่เกิดขึ้นใน PLA/PBS blends โดย PLA และ PBS มีความร้อนแฝงของการเกิดผลึก 100% ($\triangle H_c^0$) เท่ากับ 93 [33] และ 210 J/g [9] ตามลำดับ ซึ่งพบว่า PLA บริสุทธิ์จะมี Degree of crystallinity เพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสม PBS ลงไปใน PLA/PBS blends โดย PLA บริสุทธิ์มี Degree of crystallinity แค่ประมาณ 3% แต่ตัวอย่าง PLA90 ซึ่งมี PBS ผสมอยู่ 10 wt% ก็ทำให้ Degree of crystallinity ในส่วนของ PLA ใน PLA/PBS blends เพิ่มเป็นประมาณ 10% แต่ในตัวอย่าง PLA80 และ PLA70 จะมี Degree of crystallinity ในส่วนของ PLA ลดลงเมื่อเทียบกับ PLA90 เนื่องจากอัตราส่วนของ PLA ใน PLA/PBS blends มีปริมาณที่ลดลง จึงทำให้ปริมาณของผลึกในส่วนของ PLA ใน PLA/PBS blends ลดลง แต่จะพบว่า Degree of crystallinity ในส่วนของ PBS ใน PLA/PBS blends จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มมากขึ้น โดยในงานวิจัยของ Yokohara และ Yamaguchi ซึ่งได้ศึกษา PLA/PBS blends ซึ่งได้ผสม PBS ในอัตราส่วน 5 10 และ 20 wt% โดยพวกเขาได้สรุปว่า PBS จะช่วยในการเกิดผลึกของ PLA โดย PBS

จะทำตัวเป็น Crystallization nuclei ให้กับ PLA จึงทำให้ PLA เกิดผลึกมากขึ้นเมื่อมีการนำ PBS มาผสมกัน [11, 33]



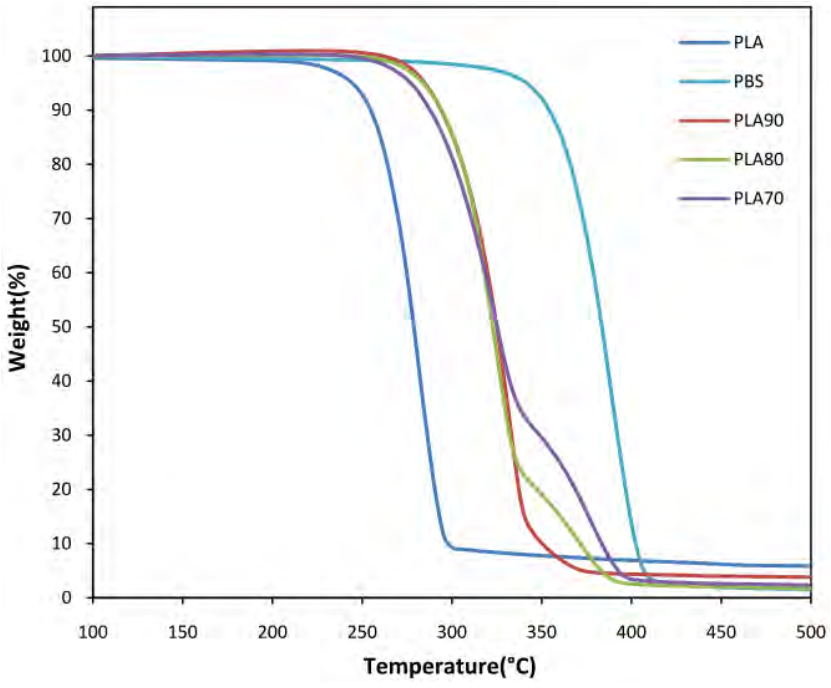
ภาพที่ 13 DSC thermogram ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 5 การทดสอบทางความร้อนด้วย DSC ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ

Sample	Temperature (°C)					Crystallinity (%)	
	T_g	T_{cc}	T_mPBS	T_{m1}PLA	T_{m2}PLA	PBS	PLA
PLA	54.62	-	-	-	155.36	-	3.06
PLA90	45.35	88.78	105.21	139.18	151.10	18.81	10.56
PLA80	44.58	89.52	105.85	140.00	150.95	23.81	7.69
PLA70	42.11	87.18	106.08	139.00	150.63	29.86	7.17
PBS	-38.99	89.00	111.46	-	-	40.72	-

4.1.3.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 100 – 500 °C ในการทดสอบใช้ Heating rate ในการทดสอบที่ 5 °C/min ซึ่งผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของ PLA/PBS blends แสดงดังภาพที่ 14 และได้สรุปไว้ในตารางที่ 6 จากการทดสอบพบว่า PLA มีอุณหภูมิ Onset (T_{onset}) ที่ 252.84 °C และมี T_d ที่ 281.57 °C ส่วน PBS มี T_{onset} ที่ 353.94 °C และมี T_d ที่ 390.82 °C เมื่อมีการนำ PBS มาผสมกับ PLA เป็น PLA/PBS blends พบว่ามี T_{onset} ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 292 °C แต่เกิดการสลายตัวทางความร้อนสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกมีการสลายตัวทางความร้อน (T_{d1}) ที่ใกล้เคียงกันของทุกตัวอย่าง PLA/PBS blends คือที่อุณหภูมิประมาณ 325 °C แต่สำหรับการสลายตัวทางความร้อนในขั้นที่สอง (T_{d2}) นั้นพบว่ามีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBS ใน PLA/PBS blends ที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PBS สามารถช่วยให้ PLA/PBS blends มีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าที่เพิ่มขึ้นก็ยังคงอยู่ระหว่างอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ PLA และ PBS ซึ่งผลทางความร้อน TGA คล้ายกับงานวิจัยของ Zhu และคณะ [35] ซึ่งได้ศึกษาพอลิเมอร์ผสมกับ PBS โดยพบว่ามีการสลายตัวทางความร้อนในสองขั้นตอน และ T_d ก็จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ PBS ที่เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 14 TGA thermogram ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ

ตารางที่ 6 การทดสอบทางความร้อนด้วย TGA ของ PLA PBS และ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนต่างๆ

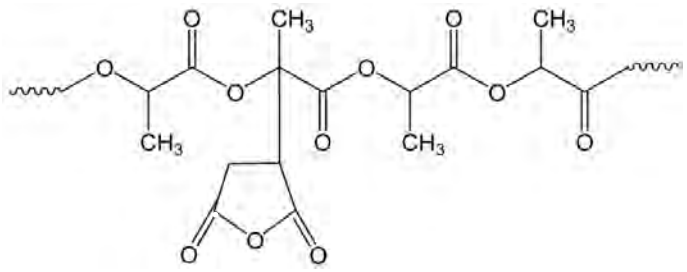
Sample	Degradation temperature (°C)		
	T_{Onset}	T_{d1}	T_{d2}
PLA	252.84	281.57	-
PLA90	291.51	324.92	362.50
PLA80	292.51	322.67	369.26
PLA70	293.19	325.25	376.50
PBS	353.94	-	390.82

4.2 การสังเคราะห์ Compatibilzer (PLA-MA-PBS)

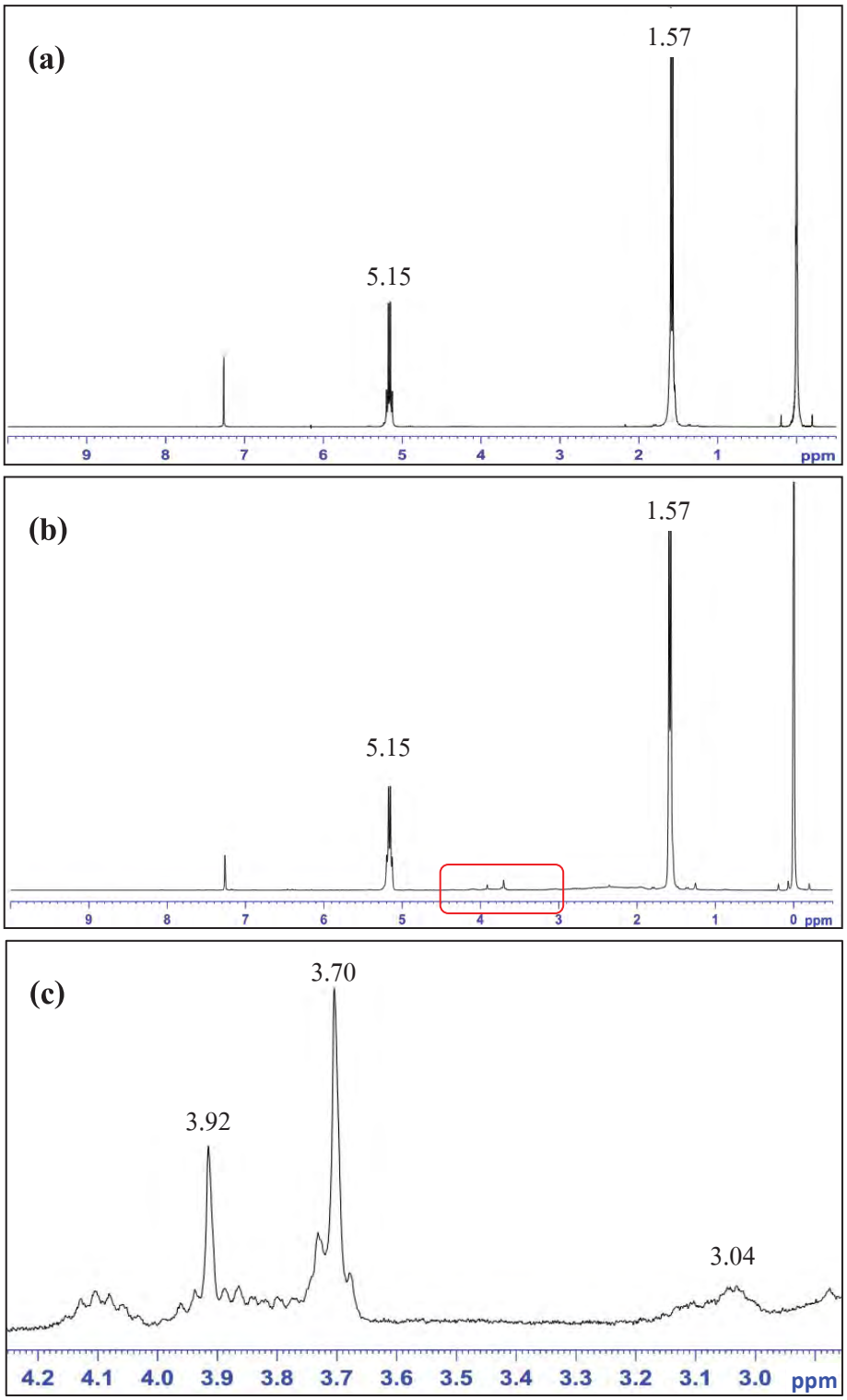
Compatibilizer ที่สังเคราะห์ขึ้นมาจะประกอบไปด้วยสายโซ่พอลิเมอร์ของ PLA และ PBS ซึ่งกราฟท์กันด้วย Maleic anhydride (PLA-MA-PBS) โดยส่วนที่เป็นสายโซ่ PLA ใน Compatibilizer จะสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับเฟสของ PLA ในพอลิเมอร์ผสม และส่วนของสายโซ่ PBS ใน Compatibilizer จะสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับเฟสของ PBS ดังนั้นเมื่อนำไปผสมกับ PLA/PBS blends จึงช่วยให้พอลิเมอร์ผสมทั้งสองสามารถเข้ากันได้ดีขึ้น ในการสังเคราะห์ Compatibilizer ประกอบไปด้วยสองขั้นตอนย่อยคือในขั้นตอนแรกจะทำการสังเคราะห์ให้ MA มากราฟท์ที่สายโซ่ PLA (PLA-MA) และหลังจากนั้นจึงนำ PBS เข้ามากราฟท์ที่สายโซ่ของ PLA-MA โดยมี MA เป็นตัวเชื่อมระหว่าง PLA และ PBS (PLA-MA-PBS) ได้เป็น Compatibilizer

4.2.1 การสังเคราะห์ PLA-MA

ในการสังเคราะห์นำ MA มากราฟท์กับสายโซ่ของ PLA ผ่านปฏิกิริยา Free radical โดยมี BPO เป็น Initiator ซึ่งจะทำให้สายโซ่ของ PLA เกิดเป็น Radical โดยเกิดที่ตำแหน่ง Tertiary carbon atom ในสายโซ่ PLA ก่อนที่ MA จะเข้าไปกราฟท์ที่สายโซ่ของ PLA [36, 37] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียม PLA-MA 3 ชนิดได้แก่ LM15 LM30 และ LM45 ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณของ MA เป็น 15 30 และ 45 wt% ตามลำดับ โดยโครงสร้างทางเคมีของ PLA-MA แสดงดังภาพที่ 15 และ ^{1}H NMR ของ PLA แสดงดังภาพที่ 16(a) ซึ่งมีพีคเอกลักษณ์ที่ 1.57 ppm ซึ่งเป็น Chemical shifts ของ Methyl proton และที่ 5.15 ppm ซึ่งเป็นของ Methine proton ในสายโซ่ของ PLA [38, 39] และผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ PLA-MA ด้วย ^{1}H NMR แสดงดังภาพที่ 16(b) พบ Chemical shifts ที่สำคัญของคือที่ 1.57 และ 5.15 ppm ซึ่งเป็น Chemical shifts เอกลักษณ์ของ PLA นอกจากนี้ยังได้พบพีคเพิ่มเติมที่ประมาณ 3.5 – 4.0 ppm ซึ่งเป็น Chemical shifts ของ Proton ที่อยู่ใน Anhydride ring [28, 40] โดยเมื่อขยายภาพในช่วงดังกล่าวดังแสดงไว้ในภาพที่ 16(c) จะพบ Chemical shifts ที่ 3.04 และ 3.70 ppm ซึ่งเป็น Chemical shifts ของ Methine proton และ Methylene proton ใน MA ตามลำดับ [29, 41] นอกจากนี้ยังพบ Chemical shifts ที่ 3.92 ppm ซึ่งอาจเกิดจากการที่ MA เข้าไปกราฟท์เข้ากับสายโซ่ PLA ที่บริเวณเดียวกันมากกว่าหนึ่งโมเลกุลเกิดเป็น Poly(maleic anhydride) [41] สำหรับการหาปริมาณของ MA ที่เกิดการกราฟท์กับ PLA ได้จากการทำไตเตรตกับ KOH ซึ่งพบว่าตัวอย่าง LM15 มี %Grafting = 3.19 LM30 มี %Grafting = 5.00% และ LM45 มี %Grafting = 5.83%



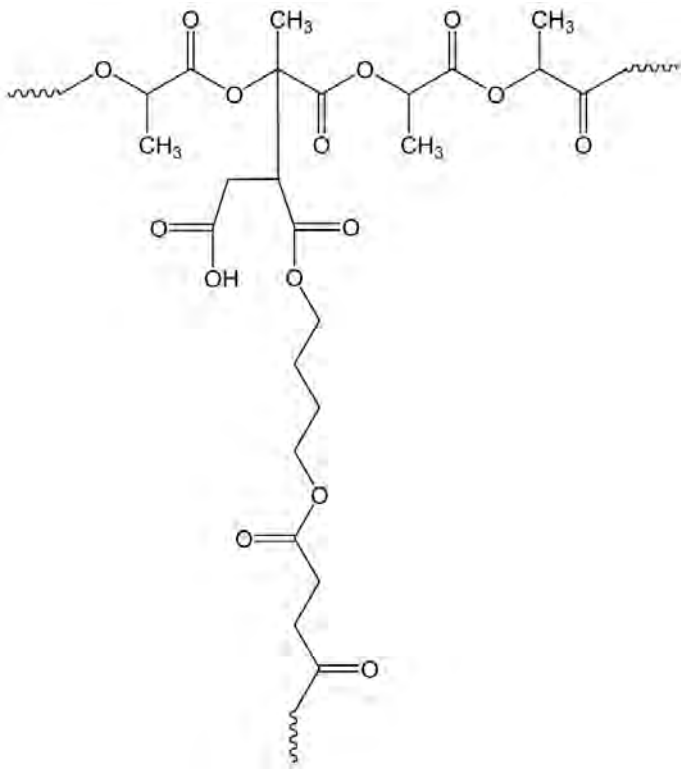
ภาพที่ 15 โครงสร้างทางเคมีของ PLA-MA [28]



ภาพที่ 16 ^{1}H NMR spectra ของ (a) PLA (b) PLA-MA (LM45) และ (c) ภาพขยาย PLA-MA (LM45)

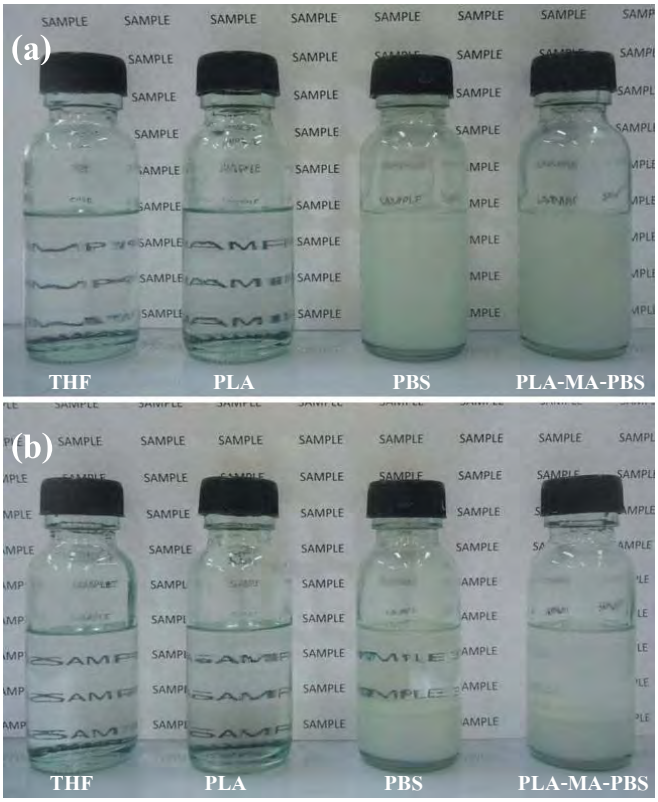
4.2.2 การสังเคราะห์ PLA-MA-PBS

หลังจากการสังเคราะห์ PLA-MA แล้วจึงนำ PBS มากราฟท์เข้ากับ PLA-MA ที่หมู่ MA ในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ PLA-MA-PBS 3 ชนิดได้แก่ LMB15 LMB30 และ LMB45 โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่ Hydroxyl ที่ปลายสายโซ่ของ PBS กับหมู่ MA โดยโครงสร้างทางเคมีของ PLA-MA-PBS แสดงดังภาพที่ 17 และได้มีการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยอาศัยความสามารถในการละลายที่แตกต่างกันระหว่าง PLA และ PBS ใน Tetrahydrofuran (THF) สำหรับ PLA เมื่อนำมาละลายใน THF จะละลายจนหมดได้เป็นสารละลายใส ส่วน PBS เมื่อนำมาละลายใน THF จะเกิดการตกตะกอนดังแสดงในภาพที่ 18 และเมื่อทำการทดสอบการละลายของ PLA-MA-PBS กับ THF จะได้เป็นสารละลายสีขาวขุ่นและเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง จะเกิดการแยกชั้นกัน โดยชั้นบนยังคงมีความขุ่น ส่วนชั้นล่างจะเป็นตะกอนสีขาวซึ่งทั้ง 2 ชั้นนี้ไม่ได้แยกออกจากกันอย่างชัดเจนเหมือนกับการละลายของ PBS ใน THF ซึ่งคาดว่าสารละลายชั้นบนน่าจะยังมีส่วนของ PLA บริสุทธิ์และ PLA ใน PLA-MA-PBS ที่ละลายใน THF และชั้นล่างที่ตกตะกอนน่าจะยังมีส่วนของ PBS บริสุทธิ์และ PBS ใน PLA-MA-PBS ที่ไม่ละลายใน THF

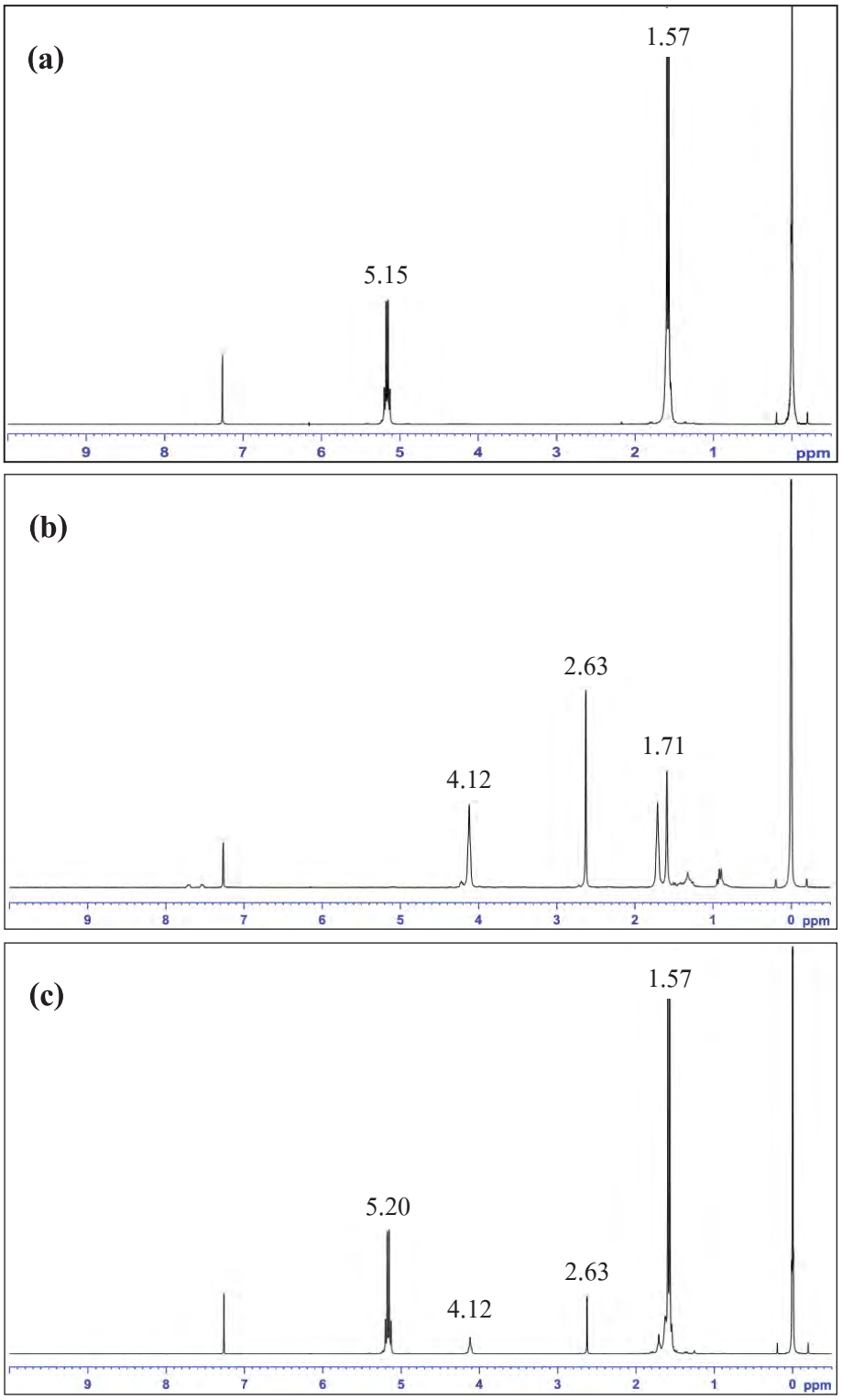


ภาพที่ 17 โครงสร้างทางเคมีของ PLA-MA-PBS

ทำการแยกชั้นทั้งสองออกจากกันโดยใช้กรวยแยก และได้นำสารละลายชั้นบนที่คาดว่าน่าจะเป็น PLA ไปทำการตกตะกอนใน Methanol ซึ่งพบว่าได้เป็นตะกอนสีขาวออกมา แล้วจึงนำตะกอนที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วย ^{1}H NMR ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในภาพที่ 19(c) เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับ ^{1}H NMR spectra ของ PLA บริสุทธิ์และ PBS บริสุทธิ์ซึ่ง ^{1}H NMR spectra ของ PLA บริสุทธิ์แสดงในภาพที่ 19(a) จะปรากฏพีคที่ 1.57 ppm ซึ่งเป็น Chemical shifts ของ Methyl proton และที่ 5.15 ppm เป็น Chemical shifts ของ Methine proton ในสายโซ่ของ PLA [28, 39] ส่วนภาพที่ 19(b) เป็น ^{1}H NMR spectra ของ PBS บริสุทธิ์ โดยพีคที่ 2.63 ppm เป็น Chemical shifts ของ Methylene proton ที่อยู่ในส่วนของมอนอเมอร์ที่เป็น Succinic acid และพีคที่ 1.71 และ 4.12 ppm เป็น Chemical shifts ของ Methylene proton ที่อยู่ในส่วนของมอนอเมอร์ที่เป็น Butanediol โดยพีคที่ 4.12 ppm จะเป็น Chemical shifts ของ Methylene proton ที่อยู่ติดกับหมู่ Ester ในสายโซ่ของ PBS [9, 42] สำหรับ ^{1}H NMR spectra ของ PLA-MA-PBS แสดงไว้ในภาพที่ 19(c) พบพีคที่ 1.57 และ 5.20 ppm ซึ่งเป็น Chemical shifts เอกลักษณ์ของ PLA และยังพบ Chemical shifts ที่ 2.63 และ 4.12 ppm ซึ่งเป็น Chemical shifts เอกลักษณ์ของ PBS แต่อย่างไรก็ตาม Chemical shifts เอกลักษณ์ของ PBS อีกพีคที่ 1.70 ppm นั้นสังเกตเห็นเพียงพีคขนาดเล็กเนื่องจากถูกบดบังด้วยพีค 1.57 ppm ของ PLA ซึ่งจากผลการทดสอบด้วย ^{1}H NMR เป็นการยืนยันว่า PLA กับ PBS เกิดการกราฟท์ติดกันด้วย MA และเมื่อนำตัวอย่างของ PLA-MA-PBS ไปทำการไตเตรตกับ KOH เพื่อหาปริมาณของ MA ที่ยังคงเหลืออยู่ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้คือ LMB15 มี MA เหลืออยู่ 0.39% LMB30 มี MA เหลืออยู่ 0.59% และ LMB45 มี MA เหลืออยู่ 0.59%



ภาพที่ 18 ความสามารถในการละลายของตัวอย่างแต่ละชนิดใน THF โดย (a) การละลายของตัวอย่างช่วงเริ่มต้น และ (b) หลังจากทิ้งไว้ประมาณ 12 ชั่วโมง



ภาพที่ 19 ^{1}H NMR spectra ของ (a) PLA (b) PBS และ
(c) PLA-MA-PBS (LMB15) หลังจากแยกออกมาจากการละลายใน THF

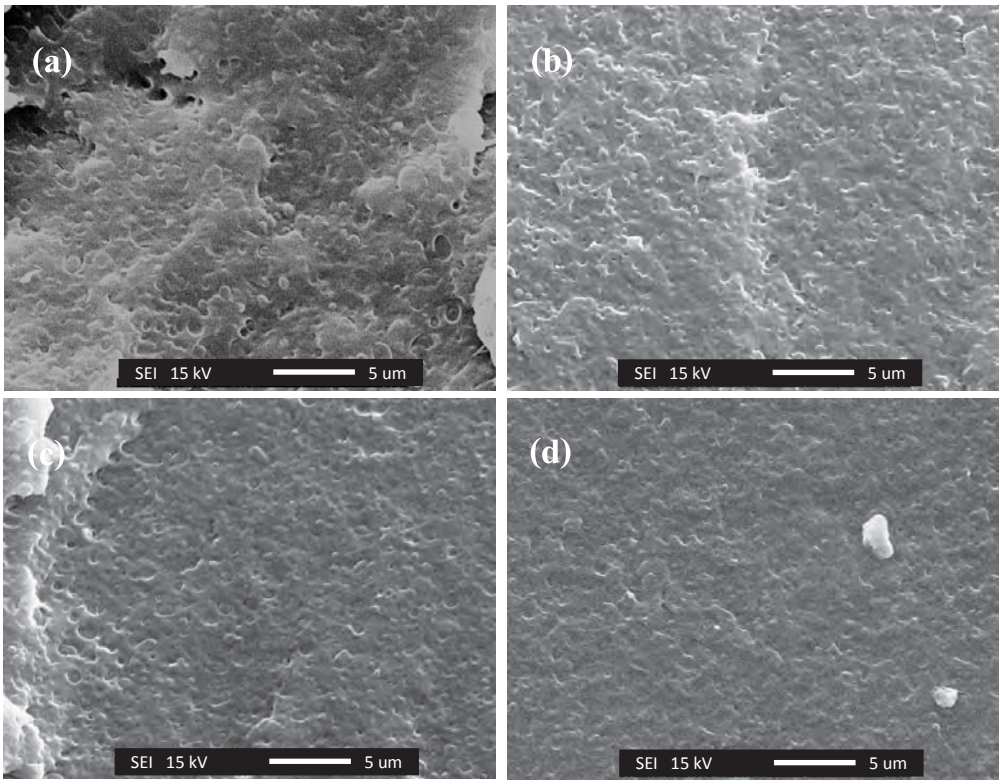
4.3 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม PLA/PBS ด้วย Compatibilizer

การทดลองในขั้นตอนนี้จะทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PLA/PBS blends โดยการเติม PLA-MA-PBS ซึ่งเป็น Compatibilizer ลงไปผสมกับ PLA/PBS blends โดยเลือกใช้อัตราส่วนการผสมโดยน้ำหนักระหว่าง PLA กับ PBS เท่ากับ 80/20 (PLA80) เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้พบการแยกเฟสระหว่างพอลิเมอร์ผสม โดย Compatibilizer ที่ทำหน้าที่ปรับปรุงความเข้ากันให้กับ PLA/PBS blends นั้นจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็น PLA และส่วนที่เป็น PBS ซึ่งเข้ากับเฟส PLA และ PBS ใน PLA/PBS blends ตามลำดับ จะเป็นตัวเชื่อมระหว่างเฟสทั้งสองเพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ โดย PLA/PBS blends และ Compatibilizer ถูกผสมด้วยเครื่อง Twin screw extruder และขึ้นรูปตัวอย่างด้วยเครื่อง Injection molding และ Compatibilizer จะมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดคือ LMB15 LMB30 และ LMB45 ซึ่งในแต่ละชนิดจะมีปริมาณของ MA อยู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 15 30 และ 45 wt% ของ PLA ตามลำดับ และการนำ Compatibilizer ในแต่ละชนิดมาผสมกับ PLA/PBS blends จะนำมาผสมในปริมาณ 4 wt% โดยน้ำหนักของ PLA/PBS blends ทำให้ได้เป็น PLA80LMB15 PLA80LMB30 และ PLA80LMB45 ตามลำดับ

4.3.1 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า แสดงดังภาพที่ 20 ซึ่งเป็นภาพสัณฐานวิทยาของ PLA/PBS blends ที่อัตราส่วนการผสมระหว่าง PLA กับ PBS ที่ 80/20 (PLA80) เปรียบเทียบกับภาพสัณฐานวิทยาของ PLA/PBS blends ที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ (PLA80LMB15 PLA80LMB30 และ PLA80LMB45) โดยภาพ SEM ของตัวอย่าง PLA80LMB15 (ภาพที่ 20(b)) จะเห็นเฟสของ PBS ที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของ PLA ได้ไม่ชัดเจนเหมือนกับภาพ SEM ของตัวอย่าง PLA80 (ภาพที่ 20(a)) รอยแยกระหว่างเฟสทั้งสองพบเห็นได้น้อยลง และผิวของรอยแตกหักมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB30 และ PLA80LMB45 ซึ่งมีปริมาณของ MA ใน Compatibilizer ที่มากขึ้น (%Grafting เพิ่มขึ้น) ก็พบว่าเฟสของ PBS ที่กระจายตัวอยู่ใน PLA มีความเข้ากันมากขึ้น รอยแยกระหว่างเฟสลดลง และพื้นผิวรอยแตกหักมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ดังนั้นถ้าปริมาณของ MA ใน Compatibilizer ที่ใช้ในการปรับปรุงความเข้ากันมีปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ความเข้ากันได้ระหว่าง PLA และ PBS มีมากขึ้นตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่า Compatibilizer สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS เนื่องจากส่วนของ PLA และ PBS ใน Compatibilizer สามารถเข้ากันได้กับเฟส PLA และ PBS ใน PLA/PBS blends ตามลำดับและทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างเฟสทั้งสอง [18] ผลการทดลองนี้คล้ายกับงานวิจัยของ

Ho และคณะ [17] ซึ่งได้ปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PLA/TPO blend โดยใช้ TPO-MA-PLA เป็น Compatibilizer โดยจะเข้าไปเพิ่ม Interfacail adhesion ระหว่างเฟสและปรับปรุงความเข้ากันได้



ภาพที่ 20 SEM ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ โดย (a) PLA80 (b) PLA80LMB15 (c) PLA80LMB30 และ (d) PLA80LMB45

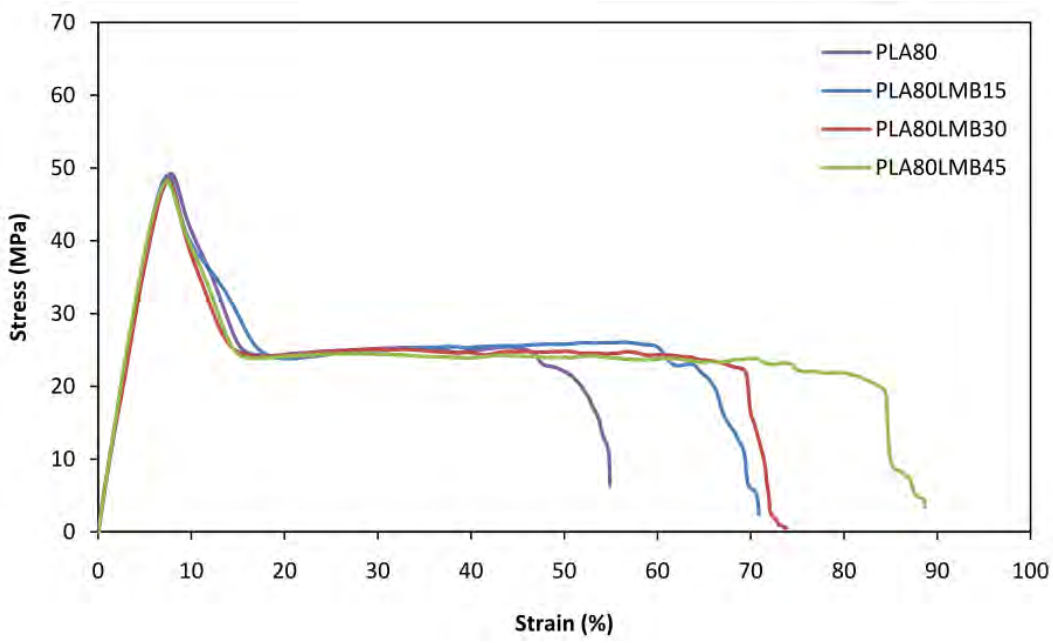
4.3.2 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลจะประกอบไปด้วยการทดสอบการดึง (Tensile test) และการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) ด้วยเครื่อง Universal testing machine ทดสอบตาม ASTM D 638 และ D 790 ตามลำดับ โดย PLA/PBS blends มีอัตราส่วนการผสมโดยน้ำหนักระหว่าง PLA กับ PBS ที่อัตราส่วน 80/20 และมีการเติม Compatibilizer เพื่อช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS ซึ่งการทดสอบสมบัติเชิงกลของ PLA/PBS blends ที่ผ่านการปรับปรุงด้วย Compatibilizer จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของตัวอย่าง PLA80

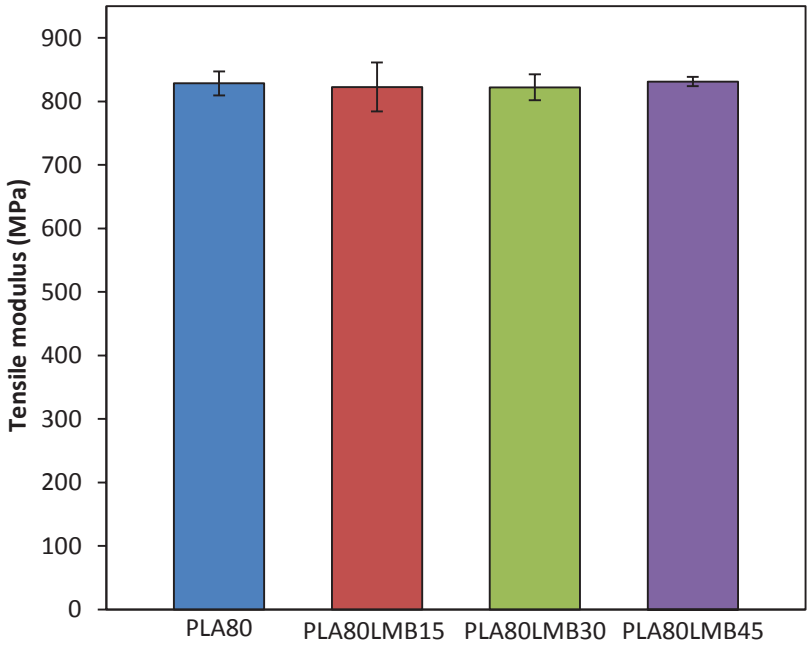
4.3.2.1 การทดสอบการดึง (Tensile test)

ผลการทดสอบการดึง (Tensile test) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 21 และผลของ Tensile modulus Tensile strength และ Elongation at break แสดงไว้ในภาพที่ 22 23 และ 24 ตามลำดับ พบว่า Tensile modulus ของ PLA/PBS blends ที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer แต่ละชนิด (PLA80LMB15 PLALMB30 และ PLA80LMB45) ดังภาพที่ 22 แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80 ซึ่งมีอัตราส่วนการผสมโดยน้ำหนักระหว่าง PLA กับ PBS ที่ 80/20 และ Tensile strength ของ PLA/PBS blends ที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ในแต่ละชนิด ดังภาพที่ 23 ก็พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า Tensile modulus คือค่า Tensile strength แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80

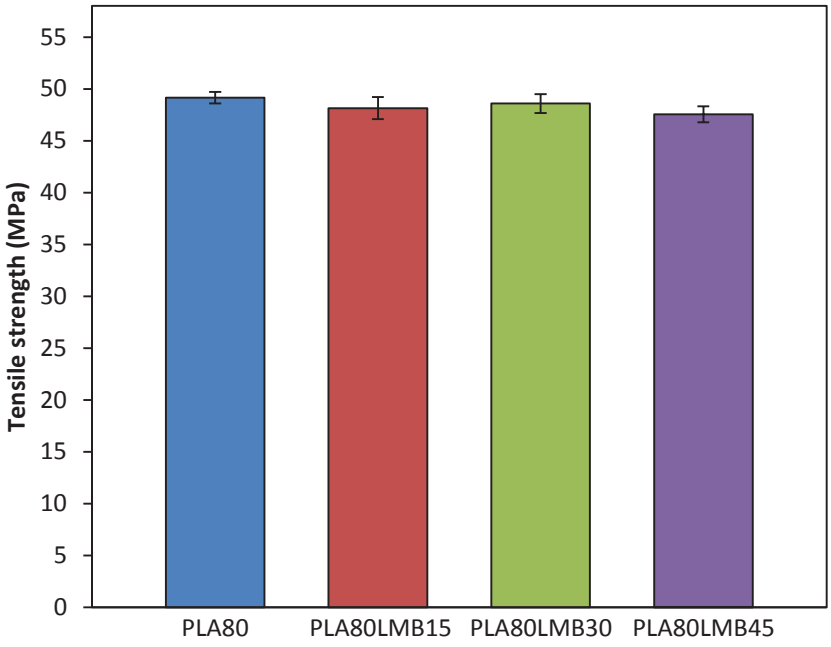
อย่างไรก็ตามพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดสำหรับค่า Elongation at break ของ PLA/PBS blends ที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ดังภาพที่ 24 โดยพบว่าค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80 และเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MA ที่อยู่ใน Compatibilizer ซึ่งใช้ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ให้กับ PLA และ PBS โดยตัวอย่าง PLA80 มีค่า Elongation at break ประมาณ 50% แต่ในส่วนของ PLA/PBS blends ที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ในตัวอย่าง PLA80LMB15 PLA80LMB30 และ PLA80LMB45 มีค่า Elongation at break ที่เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 60 70 และ 80% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า Compatibilizer จะไปช่วยให้ PLA/PBS blends มีความเหนียวและยืดหยุ่นมากขึ้น แต่ยังคงทำให้ค่า Tensile modulus และค่า Tensile strength มีค่าเท่าเดิมไม่ได้ลดน้อยลงไป ดังนั้นความแข็งแรงของ PLA/PBS blends ยังคงเหมือนเดิม แต่จะมีความยืดหยุ่น และความเหนียวมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ho และคณะ [17] ซึ่งได้ปรับปรุงความเข้ากันได้ของ PLA/TPO blend โดยใช้ TPO-MA-PLA เป็น Compatibilizer โดยการเติม Compatibilizer ไม่ได้ทำให้ค่า Tensile modulus และค่า Tensile strength มีค่าเปลี่ยนแปลงไปมากนัก แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงค่า Elongation at break เพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นผลจากการเติม Compatibilizer จะช่วยเพิ่ม Interfacal adhesion ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมทำให้ PLA มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น และผลของการเพิ่มขึ้นของค่า Elongation at break นี้ก็สอดคล้องกับภาพ SEM ในภาพที่ 20 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ PLA และ PBS ที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของ MA ใน Compatibilizer โดยเฟสของ PLA และ PBS ที่เข้ากันได้มากขึ้นก็ส่งผลให้ Interfacal adhesion ระหว่างเฟสเพิ่มมากขึ้นความเหนียวจึงเพิ่มขึ้น



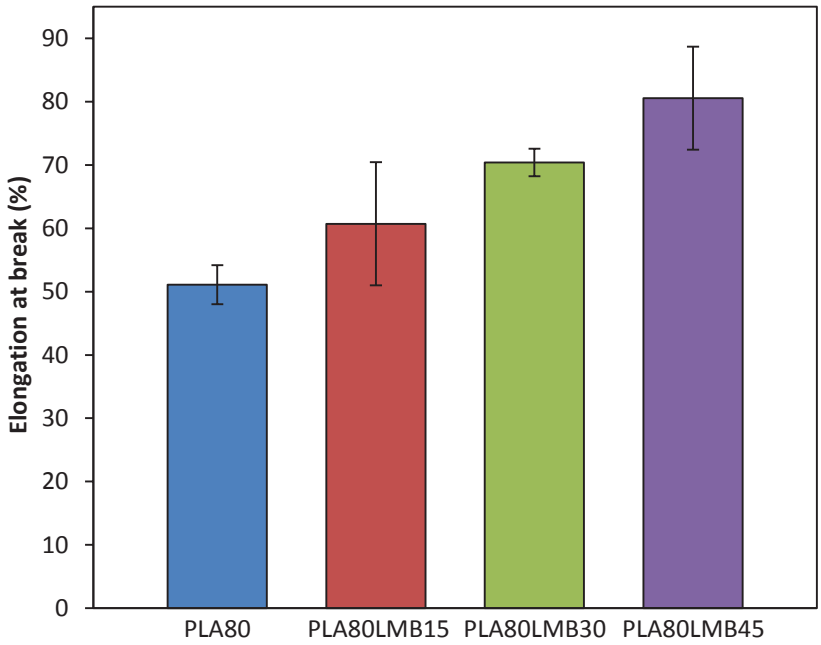
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ



ภาพที่ 22 Tensile modulus ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ



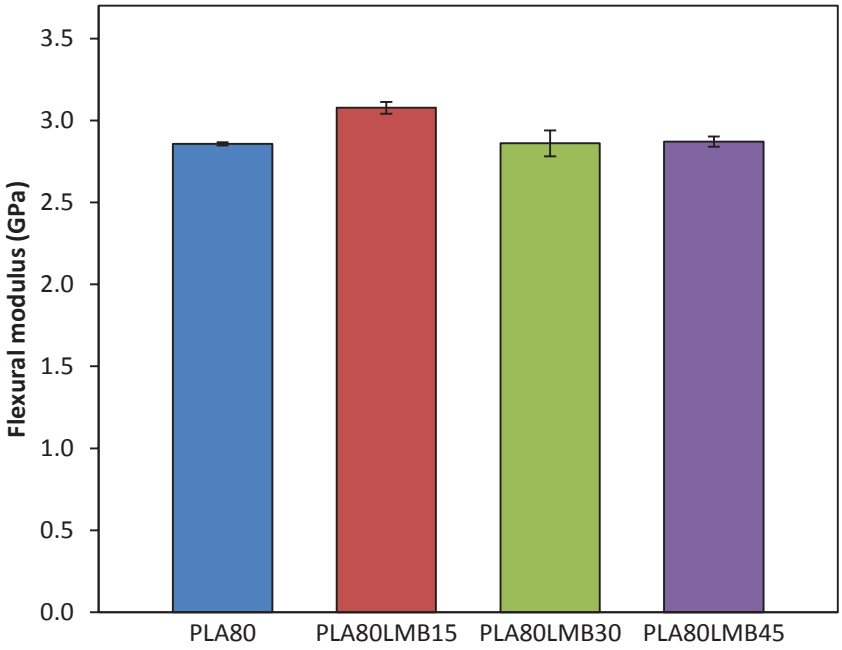
ภาพที่ 23 Tensile strength ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ



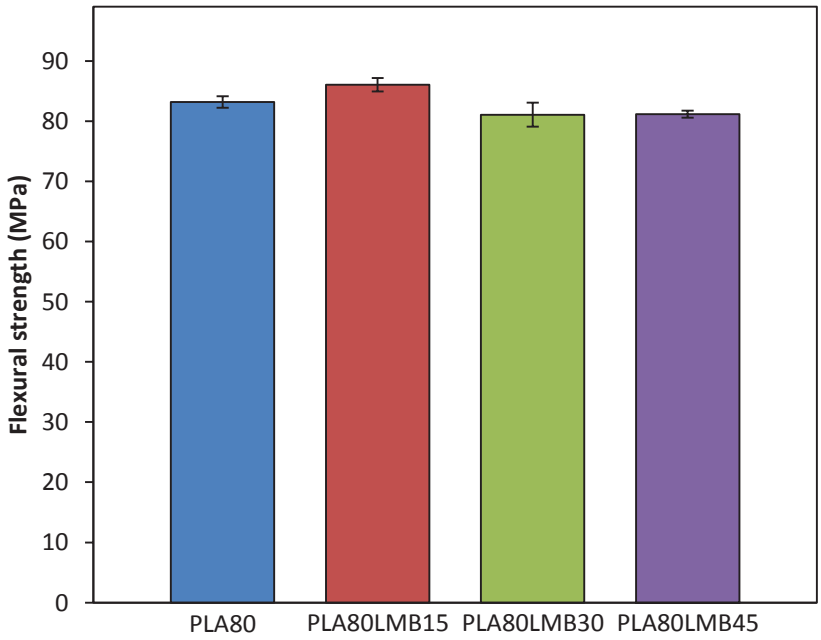
ภาพที่ 24 Elongation at break ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ

4.3.2.2 การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test)

ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) แสดงในภาพที่ 25 และ 26 ซึ่งแสดงค่า Flexural modulus และ strength ตามลำดับ โดยพบว่าค่า Flexural modulus ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันด้วย Compatibilizer ในภาพที่ 25 ตัวอย่าง PLA80LMB15 มีค่า Flexural modulus มากกว่าตัวอย่าง PLA80 ซึ่งเป็น PLA/PBS blends ที่มีอัตราส่วนผสมโดยน้ำหนักระหว่าง PLA กับ PBS ที่อัตราส่วน 80/20 แต่อย่างไรก็ตามที่สูตรการปรับปรุงอื่นๆ ที่มีปริมาณ MA ใน Compatibilizer ที่เพิ่มมากขึ้น (PLA80LMB30 และ PLA80LMB45) พบว่า Flexural modulus มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 และมีค่าที่ใกล้เคียงกับ PLA80 และผลของ Flexural strength ในภาพที่ 26 ก็ให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับค่า Flexural modulus คือ ตัวอย่าง PLA80LMB15 จะมีค่า Flexural strength มีค่ามากกว่า PLA80 และสูตรปรับปรุงอื่นๆ (PLA80LMB30 และ PLA80LMB45) ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณของ MA ใน Compatibilizer ที่ใช้ในการปรับปรุงความเข้ากันได้มีปริมาณมากขึ้นแต่ก็ไม่ได้ทำให้ค่า Flexural strength มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80 ซึ่งไม่มีการเติม Compatibilize โดยผลการทดสอบการดัดโค้งมีแนวโน้มดังกล่าวอาจเกิดจากการผสม Compatibilizer เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS ในพอลิเมอร์ผสมซึ่งทำให้ความเข้ากันได้ของ PLA กับ PBS มีมากขึ้นจึงทำให้มีค่า Flexural modulus และ Flexural strength เพิ่มขึ้น (PLA80LMB15) แต่เมื่อมีปริมาณของ MA ใน Compatibilizer เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ %grafting เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย จึงส่งผลให้มี PBS ซึ่งเป็นส่วนที่มีความนิ่มเพิ่มมากขึ้นใน Compatibilizer ดังนั้นเมื่อมีปริมาณ MA ใน Compatibilizer เพิ่มมากขึ้น (LMB30 และ LMB45) เมื่อนำมาปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS ในพอลิเมอร์ผสมจึงทำให้ Flexural modulus และ Flexural strength มีค่าลดลง



ภาพที่ 25 Flexural modulus ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ



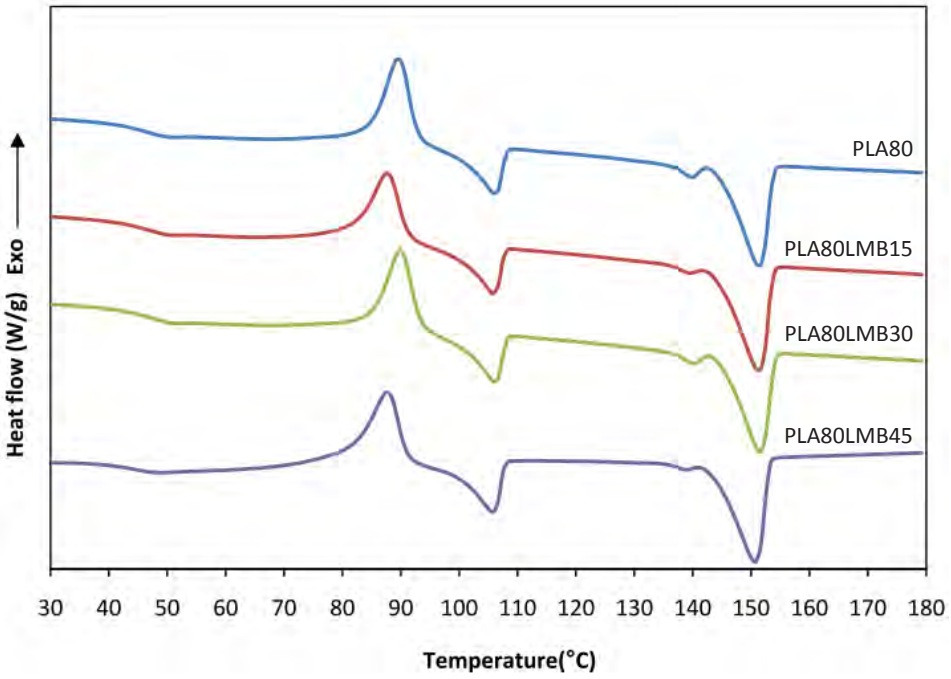
ภาพที่ 26 Flexural strength ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ

4.3.3 สมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer จะประกอบไปด้วยการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC เพื่อศึกษาอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิ Cold crystalline (T_{cc}) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และ Degree of crystallinity และทดสอบสมบัติความเสถียรทางความร้อนด้วย TGA เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (T_d)

4.3.3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ในการทดสอบใช้ Heating rate ที่ 5 °C/min และในช่วง 30 – 180 °C ใช้ตัวอย่างในการทดสอบประมาณ 10 mg ซึ่งผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC แสดงดังภาพที่ 27 และสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7 ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง PLA80LMB15 PLA80LMB30 และ PLA80LMB45 กับตัวอย่าง PLA80 พบว่า PLA/PBS blends ที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ในแต่ละชนิดนั้นมีอุณหภูมิ T_g แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจาก T_g ของตัวอย่าง PLA80 ในส่วน T_{cc} ของ PLA/PBS blends ที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ในแต่ละชนิดก็ยังคงพบว่า T_{cc} แทบไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80 และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ T_m ของ PLA/PBS blends ที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ในแต่ละชนิดก็ยังคงแสดง T_m แยกกันระหว่าง T_m ของ PLA และ PBS โดย T_m ของ PLA และ PBS ที่ปรากฏใน PLA/PBS blends แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม แต่อย่างไรก็ตาม Degree of crystallinity ของ PLA/PBS blends ที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ในแต่ละชนิดมีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้งในส่วนของ PLA และ PBS เมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80 โดยตัวอย่าง PLA80LMB15 PLA80LMB30 และ PLA80LMB45 มี Degree of crystallinity ในส่วนของผลึก PLA ประมาณ 10 – 11% ซึ่งเพิ่มขึ้นจาก PLA80 ประมาณ 3% และในส่วนผลึกของ PBS ในตัวอย่าง PLA80LMB15 PLA80LMB30 และ PLA80LMB45 มี Degree of crystallinity ที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของ MA ที่อยู่ใน Compatibilizer ซึ่งส่งผลให้ %Grafting เพิ่มมากขึ้นปริมาณของ PBS ใน Compatibilizer จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ผลึกของ PBS จึงเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มขึ้นของ Degree of crystallinity เมื่อมีการเติม Compatibilizer ทั้งในส่วนของผลึก PLA และ PBS อาจเกิดจากการที่ Compatibilizer อาจจะทำตัวเป็น Plasticizer ให้กับ PLA/PBS blends [43] ซึ่งจะทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนตัวมาจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่ายขึ้นจึงส่งผลให้ Degree of crystallinity เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 27 DSC thermogram ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ

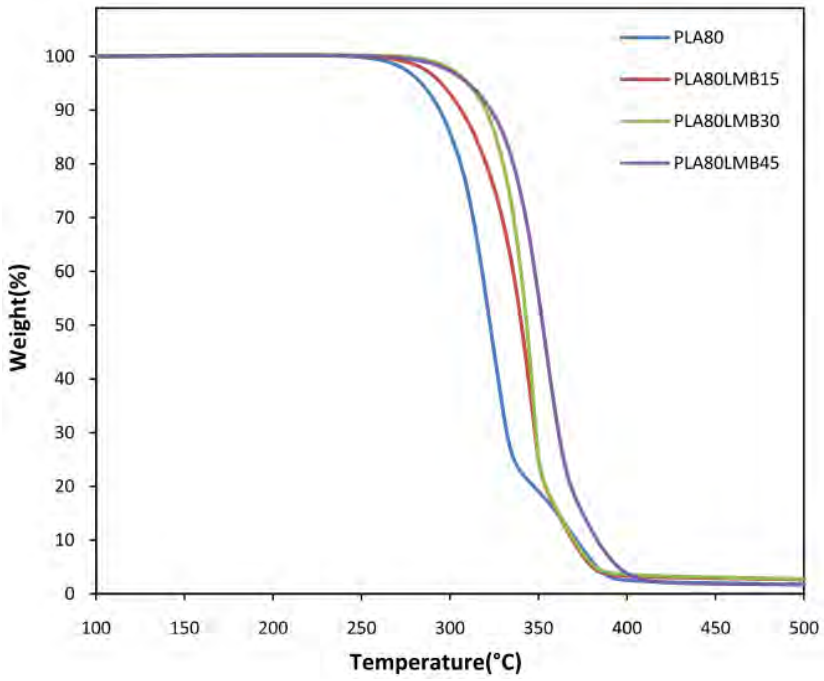
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย DSC ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ

Sample	Temperature (°C)					Crystallinity (%)	
	T_g	T_{cc}	T_mPBS	T_{m1}PLA	T_{m2}PLA	PBS	PLA
PLA80	44.58	89.52	105.85	140.00	150.95	23.81	7.69
PLA80LMB15	44.11	87.59	105.62	139.50	150.89	24.88	11.32
PLA80LMB30	46.27	89.85	105.85	140.20	151.13	26.36	10.66
PLA80LMB45	43.79	87.70	105.64	139.00	150.47	28.95	10.50

4.3.3.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA ในการทดสอบเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิ 100 – 500 °C ใช้ Heating rate ที่ 5 °C/min ซึ่งผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA แสดงดังภาพที่ 28 และได้สรุปไว้ในตารางที่ 8 ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบกันระหว่าง ตัวอย่าง PLA80LMB15 PLA80LMB30 และ PLA80LMB45 กับตัวอย่าง PLA80 โดยพบว่าตัวอย่าง

PLA80LMB15 มี T_{onset} เพิ่มขึ้นสูงกว่า PLA80 ประมาณ 30 °C ในส่วน T_d ของ PLA80LMB15 ก็ยังคงมีการสลายตัวทางความร้อนสองขั้นตอนเหมือนกันกับ PLA80 โดย T_{d1} และ T_{d2} เพิ่มขึ้นจาก T_{d1} และ T_{d2} ของ PLA80 ประมาณ 18 °C และ 6 °C ตามลำดับ สำหรับในตัวอย่าง PLA80LMB30 และ PLA80LMB45 มี T_{onset} และ T_{d1} ที่เพิ่มขึ้นจาก PLA80 ใกล้เคียงกันประมาณ 40 °C และ 30 °C ตามลำดับ แต่ T_{d2} ของ PLA80LMB30 และ PLA80LMB45 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก T_{d2} ของ PLA80 ประมาณ 5 °C และ 10 °C ตามลำดับ โดยภาพรวมแล้วการเติม Compatibilizer จะช่วยปรับปรุงความเสถียรทางความร้อนให้กับ PLA/PBS blends ความเสถียรทางความร้อนจะมีความสัมพันธ์กับ Interfacial adhesion ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสม หากมีความเข้ากันระหว่างเฟสทั้งสองเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ความเสถียรทางความร้อนเพิ่มขึ้น [44] เมื่อพิจารณาจากภาพ SEM ของ PLA/PBS blends ที่ผสม Compatibilizer (ภาพที่ 20) ก็พบว่าความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของ PLA และ PBS เพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเติม Compatibilizer เมื่อเทียบกับ PLA/PBS blends ที่ไม่ผสม Compatibilizer จึงทำให้มีความเสถียรทางความร้อนเพิ่มมากขึ้น และยังพบอีกว่าเมื่อมีปริมาณของ MA ใน Compatibilizer มากขึ้นก็มีแนวโน้มทำให้มีความเข้ากันได้เพิ่มมากขึ้น และมีปริมาณของ PBS ใน Compatibilizer มากขึ้นจึงส่งผลให้ความเสถียรทางความร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 28 TGA thermogram ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer ชนิดต่างๆ

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย TGA ของ PLA/PBS blends ที่ปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatibilizer

Sample	Degradation temperature (°C)		
	T_{Onset}	T_{d1}	T_{d2}
PLA80	292.51	322.67	369.26
PLA80LMB15	322.86	340.33	375.00
PLA80LMB30	331.36	353.33	375.00
PLA80LMB45	331.22	352.33	380.00

4.4 การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ระดับนาโนเมตร

การสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ได้ใช้ Silver nitrate เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ โดยมี Glucose เป็น Reducing agent และมี Diethyl amine (DEA) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคซิลเวอร์ในขั้นตอนแรกเกิดเมื่อ Diethyl amine ละลายน้ำแล้วจะแตกตัวให้ Hydroxyl ion อยู่ในสารละลาย ส่วน Hydrated amine ion จะไปเกิดปฏิกิริยากับ Silver nitrate เกิดเป็น Silver complex ส่วน Hydroxyl ion ที่แตกตัวออกมาจะไปออกซิไดซ์หมู่ Aldehyde ของ Glucose ให้เกิดเป็น Gluconic acid ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา และอิเล็กตรอนจะไปรีดิวซ์ให้ Silver complex เปลี่ยนเป็น Metallic silver [31] ซึ่งแสดงปฏิกิริยาในภาพที่ 29

$$NH(C_2H_5)_2 + H_2O \longrightarrow {}^{+}NH_2(C_2H_5)_2 + {}^{-}OH$$

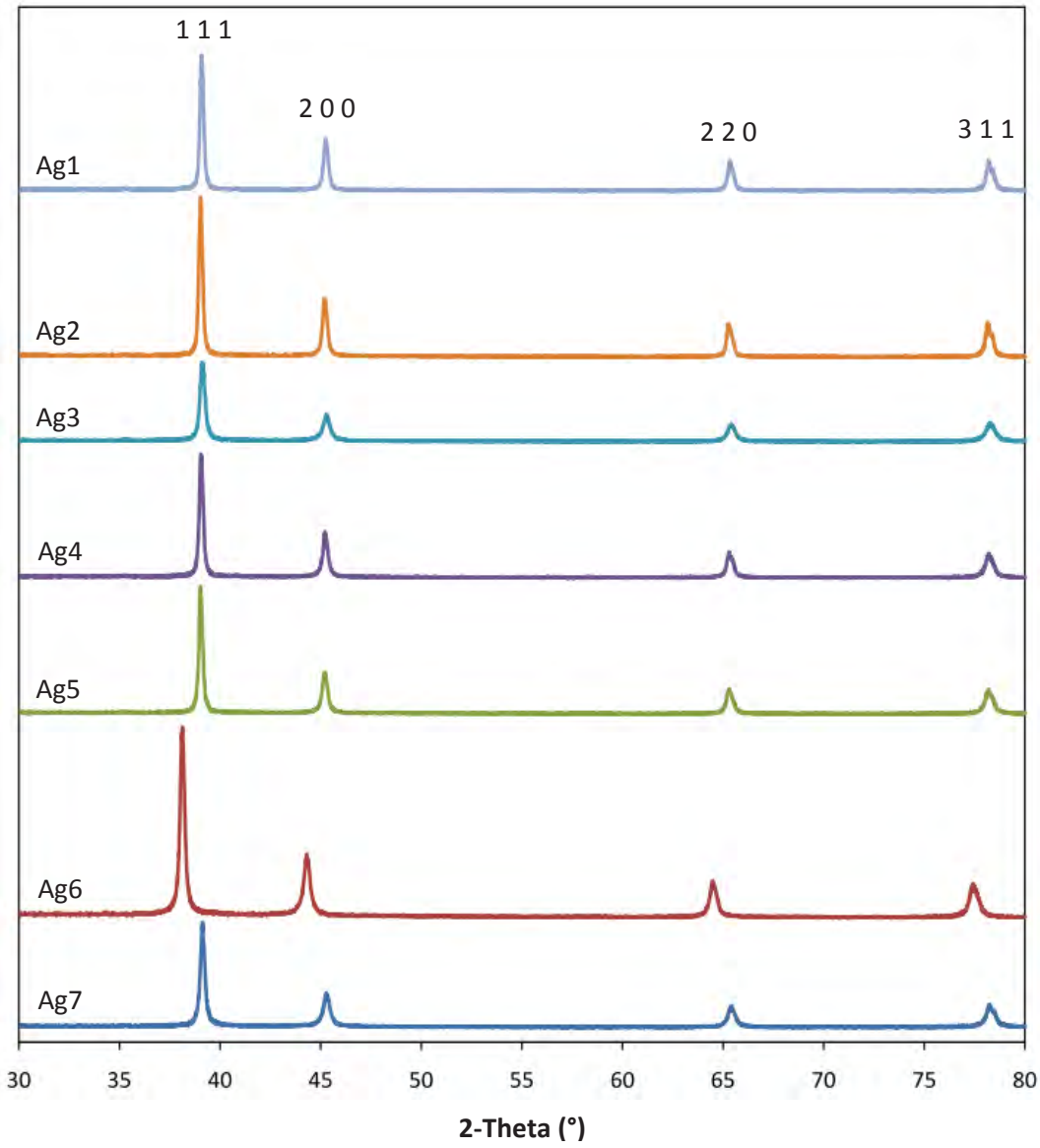
$$HOCH_2(CHOH)_4CHO + 2{}^{-}OH \longrightarrow HOCH_2(CHOH)_4COOH + H_2O + 2e^{-}$$

$$AgNO_3 + 2({}^{+}NH_2(C_2H_5)_2) + e^{-} \longrightarrow [Ag2(NH(C_2H_5)_2)]^{+} + NO_2 + H_2O$$

$$[Ag2(NH(C_2H_5)_2)]^{+} + e^{-} \longrightarrow Ag^{0} + 2NH(C_2H_5)_2$$

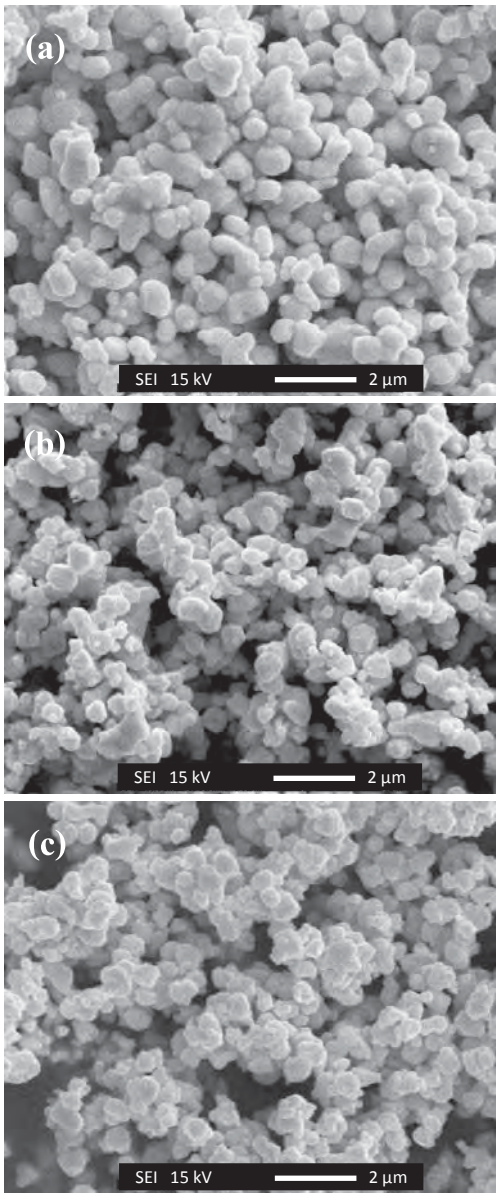
ภาพที่ 29 แผนภาพขั้นตอนปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคซิลเวอร์ [31]

ในการทดลองได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์คือ ความเข้มข้นของ Silver nitrate Glucose และ Diethyl amine ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 3 ของบทที่ 3 โดยได้ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของอนุภาคซิลเวอร์ด้วย X-ray diffraction (XRD) ซึ่งผลการทดสอบพบว่า XRD pattern จะปรากฏพีคตำแหน่ง 2-Theta ที่ 38.10° (1 1 1) 44.31° (2 0 0) 64.47° (2 2 0) และ 77.36° (3 1 1) ซึ่งแสดงถึง XRD pattern ของซิลเวอร์ดังที่แสดงในภาพที่ 30 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Janardhanan และคณะ [31]

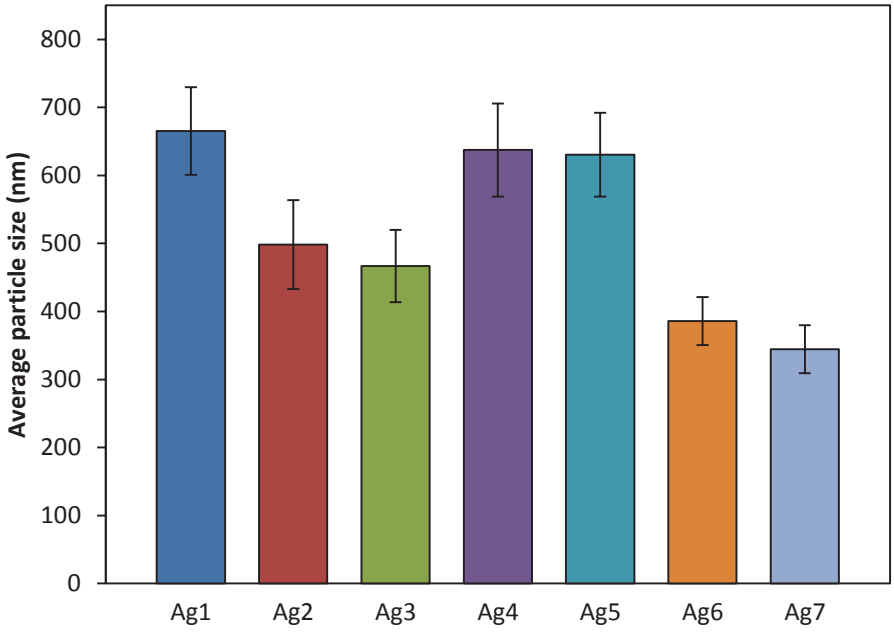


ภาพที่ 30 XRD pattern ของอนุภาคซิลเวอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้

สำหรับผลของความเข้มข้นของ Silver nitrate Glucose และ Diethyl amine ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ จะศึกษาโดย SEM เพื่อศึกษาความเข้มข้นของแต่ละตัวแปรว่ามีผลต่อขนาดอนุภาคซิลเวอร์อย่างไร พบว่าผลของความเข้มข้นของ Diethyl amine ซึ่งกำหนดให้ความเข้มข้นของ Silver nitrate และ Glucose คงที่เป็น 50 และ 25 mM ตามลำดับ แสดงดัง SEM ของอนุภาคซิลเวอร์ในภาพที่ 31 โดย Diethyl amine ที่มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นเป็น 25 50 และ 100 mM (ตัวอย่าง Ag1 Ag2 และ Ag3 ตามลำดับ) พบว่าส่งผลให้ขนาดของอนุภาคซิลเวอร์มีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลง และภาพที่ 32 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้พบว่าตัวอย่าง Ag1 Ag2 และ Ag3 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 670 500 และ 470 nm ตามลำดับ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยมีแนวโน้มที่เล็กลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Diethyl amine มากขึ้น โดยผลการทดลองสอดคล้องกับขนาดของผลึกซึ่งคำนวณด้วยสมการ Scherrer โดยคำนวณที่ระนาบผลึก (1 1 1) ดังแสดงในตารางที่ 9 พบว่าขนาดของผลึกมีแนวโน้มที่เล็กลงตามความเข้มข้น Diethyl amine ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 31 SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Diethyl amine โดย (a) 25 mM (Ag1) (b) 50 mM (Ag2) และ (c) 100 mM (Ag3) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

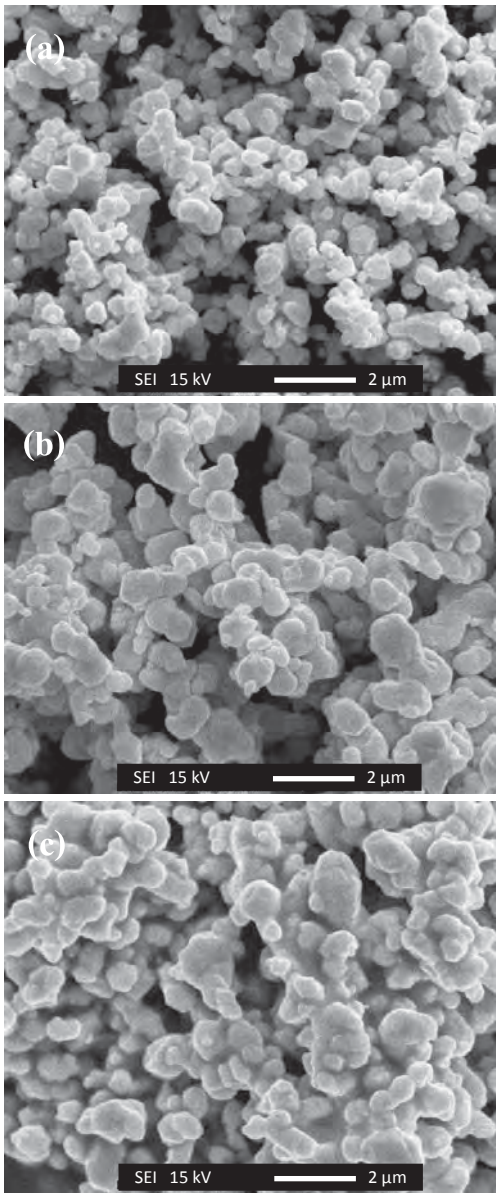


ภาพที่ 32 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาคซิลเวอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้

ตารางที่ 9 ขนาดผลึกของอนุภาคซิลเวอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้

ตัวอย่าง	2-theta (°)	FWHM (°)	Crystallite size (nm)
Ag1	39.07	0.17	100.31
Ag2	39.02	0.17	98.54
Ag3	39.10	0.24	69.07
Ag4	39.04	0.18	95.20
Ag5	39.02	0.17	97.40
Ag6	38.10	0.22	77.43
Ag7	39.11	0.22	78.03

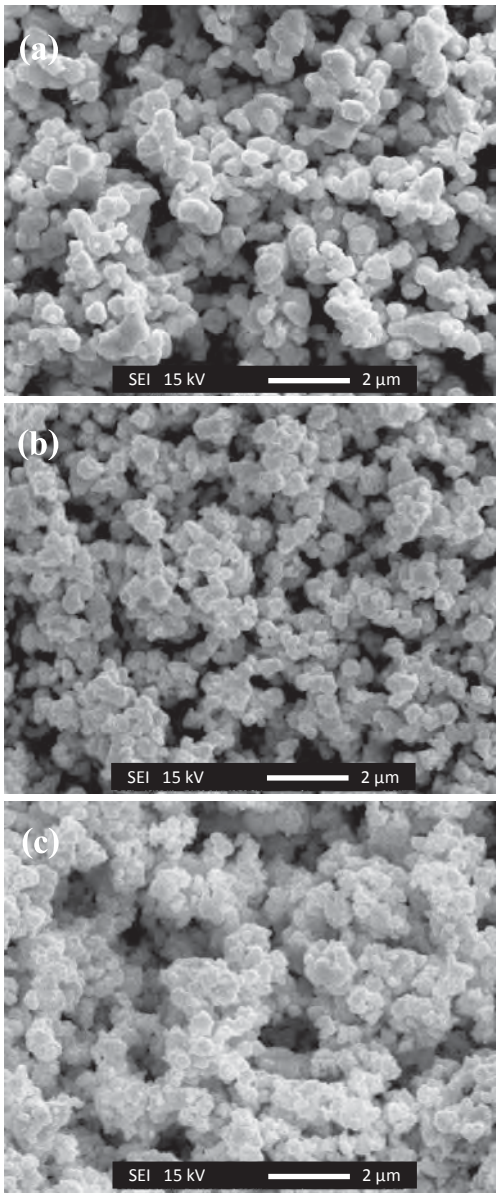
การศึกษาผลของความเข้มข้นของ Glucose ที่มีต่อขนาดอนุภาคซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ ได้กำหนดให้ความเข้มข้นของ Silver nitrate และ Diethyl amine คงที่เป็น 50 mM ซึ่งแสดงดัง SEM ของอนุภาคซิลเวอร์ในภาพที่ 33 พบว่าความเข้มข้นของ Glucose ที่เพิ่มขึ้นจาก 25 mM เป็น 50 mM (ตัวอย่าง Ag4) ทำให้อนุภาคมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นได้อย่างชัดเจน และเมื่อความเข้มข้นของ Glucose เพิ่มมากขึ้นถึง 100 mM (ตัวอย่าง Ag5) พบว่าอนุภาคซิลเวอร์มีการเกาะกลุ่มกัน และภาพที่ 32 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาคซิลเวอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ ตัวอย่าง Ag2 Ag4 และ Ag5 ซึ่งเพิ่มความเข้มข้นของ Glucose ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ ทำให้อนุภาคมีแนวโน้มที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น โดยตัวอย่าง Ag2 Ag4 และ Ag5 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 500 640 และ 640 nm ตามลำดับ ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของ Glucose ไม่ได้ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคมีขนาดที่เล็กลง แต่กลับทำให้มีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น สำหรับการคำนวณหาขนาดผลึกด้วยสมการ Scherrer ที่ระนาบผลึก (1 1 1) พบว่าตัวอย่าง Ag2 Ag4 และ Ag5 มีขนาดผลึกที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ Glucose แทบไม่ส่งผลต่อขนาดของผลึกของอนุภาคซิเวอร์



ภาพที่ 33 SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Glucose โดย (a) 25 mM (Ag2) (b) 50 mM (Ag4) และ (c) 100 mM (Ag5) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

การศึกษาผลของการศึกษาผลของความเข้มข้นของ Silver nitrate ที่มีผลต่อขนาดอนุภาคซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ ซึ่งได้กำหนดให้ความเข้มข้นของ Glucose และ Diethyl amine คงที่เป็น 25 และ 50 mM แสดงดังภาพ SEM ของอนุภาคซิลเวอร์ภาพที่ 34 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ Silver nitrate ลดลงจาก 50 mM เป็น 25 และ 10 mM (ตัวอย่าง Ag6 และ Ag7) อนุภาคซิลเวอร์มีแนวโน้มที่มีขนาดเล็กลงเมื่อความเข้มข้นของ Silver nitrate ลดลง และภาพที่ 32 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาคซิลเวอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ โดยตัวอย่าง Ag2 Ag6 และ Ag7 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 500 390 และ 350 nm ตามลำดับ ซึ่งขนาดอนุภาคมีแนวโน้มที่มีขนาดที่เล็กลงตามการลดลงของความเข้มข้น Silver nitrate โดยผลการทดลองสอดคล้องกับการหาขนาดของผลึกด้วยสมการ Scherrer ซึ่งคำนวณขนาดผลึกจากระนาบผลึก (1 1 1) ดังแสดงในตารางที่ 9 ซึ่งพบว่าขนาดของผลึกมีแนวโน้มที่เล็กลงเมื่อความเข้มข้น Silver nitrate ลดลง

ผลการทดลองในปัจจัยของความเข้มข้นของ Diethyl amine และ Silver nitrate สอดคล้องกับผลการทดลองของ Janardhanan และคณะ พบว่าความเข้มข้นของ Diethyl amine ที่เพิ่มมากขึ้นและความเข้มข้นของ Silver nitrate ที่ลดลงมีแนวโน้มทำให้อนุภาคซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดที่เล็กลง [31]



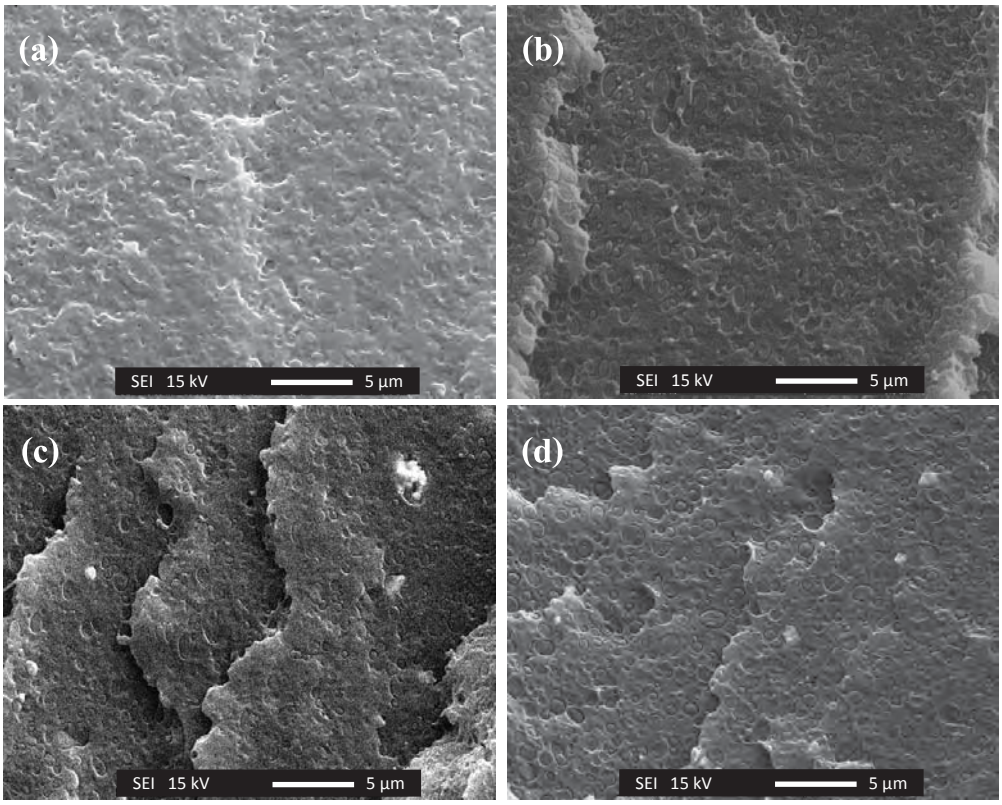
ภาพที่ 34 SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Silver nitrate โดย (a) 50 mM (Ag2) (b) 25 mM (Ag6) และ (c) 10 mM (Ag7) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.5 PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิต

ในการเตรียม PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตจะทำการผสม PLA80 ที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatbilizer กับอนุภาคซิลเวอร์ โดยการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย Compatbilizer ทำให้มีความเข้ากันได้ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ความเข้ากันมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณ MA ใน Compatibilizer แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่ได้ทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ดังนั้นจึงเลือกใช้ PLA80LMB15 มาปรับปรุงให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยการเตรียมเป็นวัสดุคอมโพสิตกับอนุภาคซิลเวอร์กับตัวอย่าง Ag6 เนื่องจากมีขนาดอนุภาคที่พอเหมาะ ลักษณะค่อนข้างกลม มีการเกาะกลุ่มกันน้อย และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 390 นาโนเมตร โดยเตรียมคอมโพสิตด้วยเครื่อง Twin screw extruder และทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยเครื่อง Injection molding

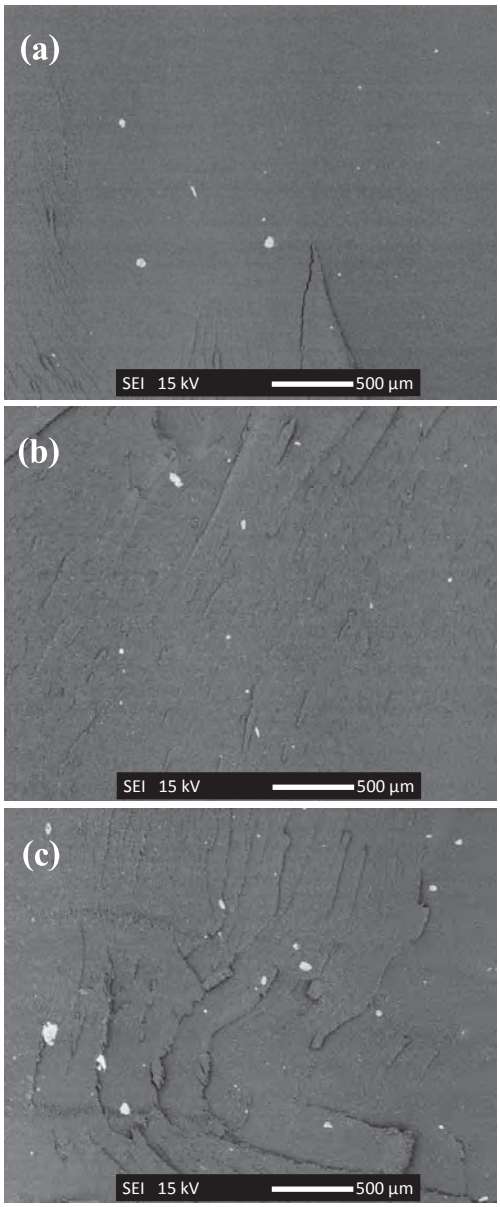
4.5.1 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตด้วย SEM แสดงดังภาพที่ 35 ซึ่งจากภาพ SEM ของตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% ซึ่งมีอนุภาคซิลเวอร์ปริมาณ 1wt% โดยน้ำหนักใน PLA/PBS blends ที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วย LMB15 พบว่าลักษณะของพื้นผิวรอยแตกหักนั้นมีลักษณะคล้ายกับพื้นผิวของตัวอย่าง PLA80LMB15 แต่สังเกตเห็นรอยแยกระหว่างเฟสของ PLA และ PBS เกิดขึ้นและเมื่อมีอนุภาคซิลเวอร์ผสมกับ PLA/PBS blends ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นที่ 2 wt% และ 3 wt% ในตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% ตามลำดับ จะสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มของอนุภาคซิลเวอร์ที่ผิวหน้าของรอยแตกหักทั้งในตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% ลักษณะของพื้นผิวไม่มีความราบเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน สังเกตเห็นรอยแยกระหว่างเฟสของ PLA และ PBS เกิดขึ้น โดยพบว่าเฟสของ PBS ที่กระจายตัวอยู่ใน PLA จะมีขนาดทรงกลมที่ใหญ่มากขึ้นเมื่อมีปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15



ภาพที่ 35 SEM ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิต โดย (a) PLA80LMB15 (b) PLA80LMB15-Ag1% (c) PLA80LMB15-Ag2% และ (d) PLA80LMB15-Ag3%

เมื่อพิจารณาถึงการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตดังแสดงในภาพที่ 36 ซึ่งเป็นภาพ SEM ในโหมด Back scattered electron image พบว่าตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% มีการเกาะกันเป็นกลุ่มของอนุภาคซิลเวอร์ และเมื่อมีปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้นก็มีแนวโน้มทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเพิ่มมากขึ้น โดยในงานวิจัยของ Radheshkumar และ Munstedt [45] ได้ศึกษาพอลิเอไมด์/ซิล-เวอร์คอมโพสิต โดยผสมอนุภาคซิลเวอร์ 2 4 และ 8 wt% ได้พบการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์ เมื่อมีการผสมอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตในปริมาณที่มากขึ้นก็จะทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์มีความเป็นขั้ว ดังนั้นเมื่อนำมากระจายตัวในตัวกลางที่ไม่มีขั้วจึงเกิดการเกาะกลุ่มกัน [32]



ภาพที่ 36 SEM ในโหมด Back scattered ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิต

(a) PLA80LMB15-Ag1% (b) PLA80LMB15-Ag2% และ (c) PLA80LMB15-Ag3%

4.5.2 สมบัติเชิงกล

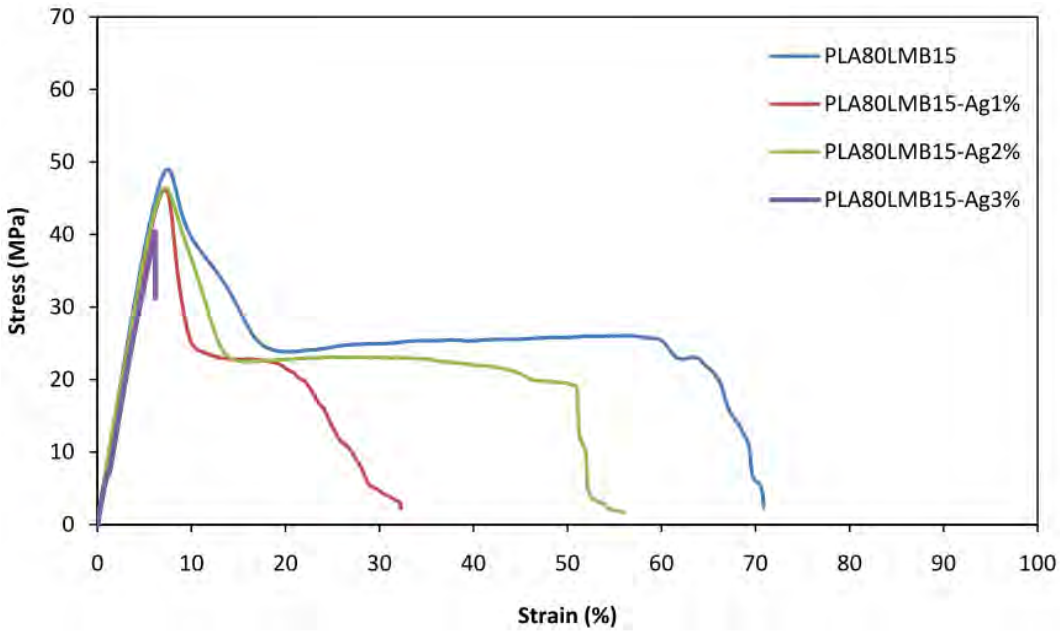
การทดสอบสมบัติเชิงกลจะประกอบไปด้วยการทดสอบการดึง (Tensile test) และการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine ทดสอบตาม ASTM D 638 และ D 790 ตามลำดับ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบตัวอย่างซิลเวอร์คอมโพสิตที่มีการผสมอนุภาคซิลเวอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ กับตัวอย่าง PLA80LMB15 ซึ่งไม่มีการผสมอนุภาคซิลเวอร์

4.5.2.1 การทดสอบการดึง (Tensile test)

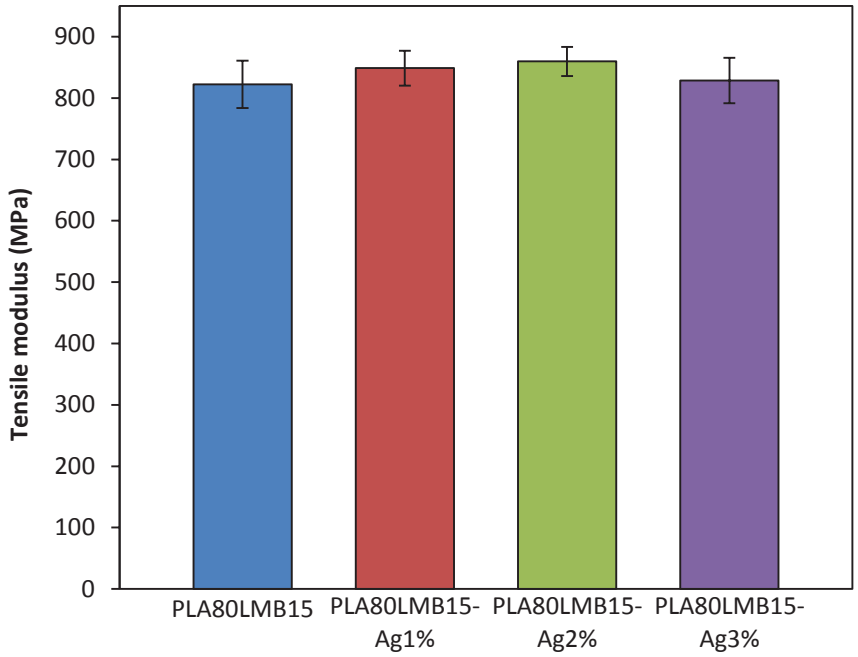
การทดสอบการดึง (Tensile test) ของซิลเวอร์คอมโพสิตซึ่งทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% เทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 โดยภาพที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าค่า Tensile modulus ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตในภาพที่ 38 ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลเวอร์ที่ 1 wt% และ 2 wt% (ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag2%) มีการเพิ่มขึ้นของค่า Tensile modulus เล็กน้อยตามปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตที่มากขึ้น แต่ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคซิลเวอร์ที่ 3 wt% (ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag3%) พบว่ามีการลดลงของค่า Modulus เล็กน้อยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag2% ซึ่งภาพรวมแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า Modulus ที่ชัดเจน ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Radheshkumar และ Munstedt [45] พบว่าการเติมอนุภาคซิลเวอร์ลงไปในคอมโพสิตไม่ได้ทำให้ค่า Tensile modulus เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ที่เพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาค่า Tensile strength ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตในภาพที่ 39 พบว่าตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag2% มีการลดลงของค่า Tensile strength เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 แต่ที่ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag3% มีการลดลงของค่า Tensile strength อย่างมากเนื่องจากการเติมอนุภาคซิลเวอร์ลงไปอาจทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเฟสของพอลิเมอร์และอนุภาคซิลเวอร์ที่เติมลงไป และเกิดเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์ทำให้เกิดจุดรวมแรง (Stress concentration) จึงทำให้ค่า Tensile strength ลดลง [45, 46]

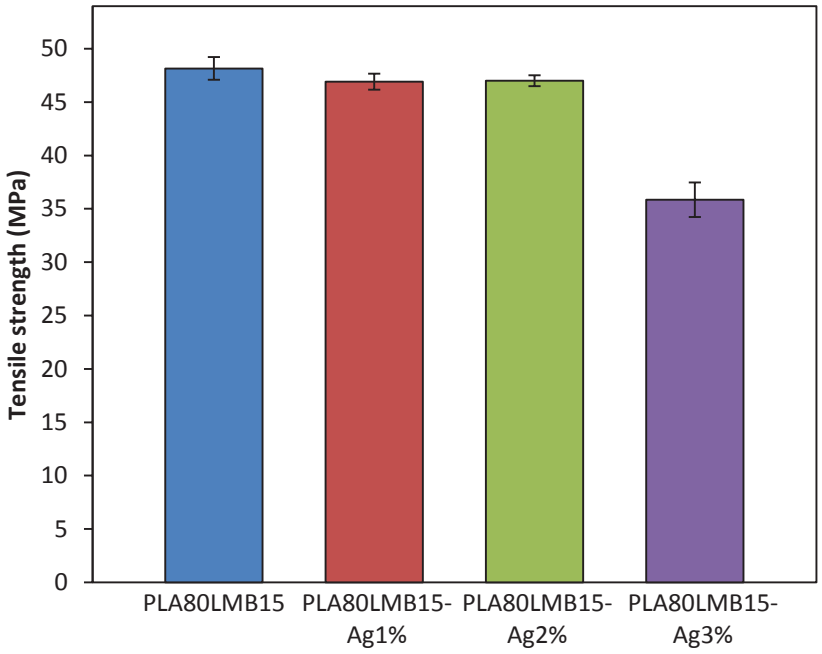
อย่างไรก็ตามค่า Elongation at break ในภาพที่ 40 ปรากฏว่ามีการลดลงของค่า Elongation at break ของทุกอัตราส่วนที่มีการผสมอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 โดยตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag3% มีการลดลงของค่า Elongation at break มากที่สุดเหลือประมาณ 5% เท่านั้น ซึ่งการเติมอนุภาคซิลเวอร์ทำให้เฟสของพอลิเมอร์ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงทำให้ความเหนียวลดลง ค่า Elongation at break ลดลง [45] อีกทั้งการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตก็เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตที่เพิ่มขึ้นดังภาพ SEM ในภาพที่ 36 อย่างไรก็ตามที่ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag2% พบว่าค่า Elongation at break มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% โดยเมื่อพิจารณาภาพ SEM ในภาพที่ 36(a) และ (b) ซึ่งเป็นภาพการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตของตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag2% ตามลำดับ ถึงแม้ว่าตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag2% จะมีการเกาะกลุ่มของอนุภาคซิลเวอร์เพิ่มมากขึ้น แต่หากพิจารณาที่การกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์แล้วพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ในตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag2% มีการกระจายตัวที่ดีกว่า และขนาดของกลุ่มของอนุภาคซิลเวอร์ที่เกาะกลุ่มกันมีขนาดที่เล็กกว่า จึงส่งผลให้มีค่า Elongation at break ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงน้อยกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์



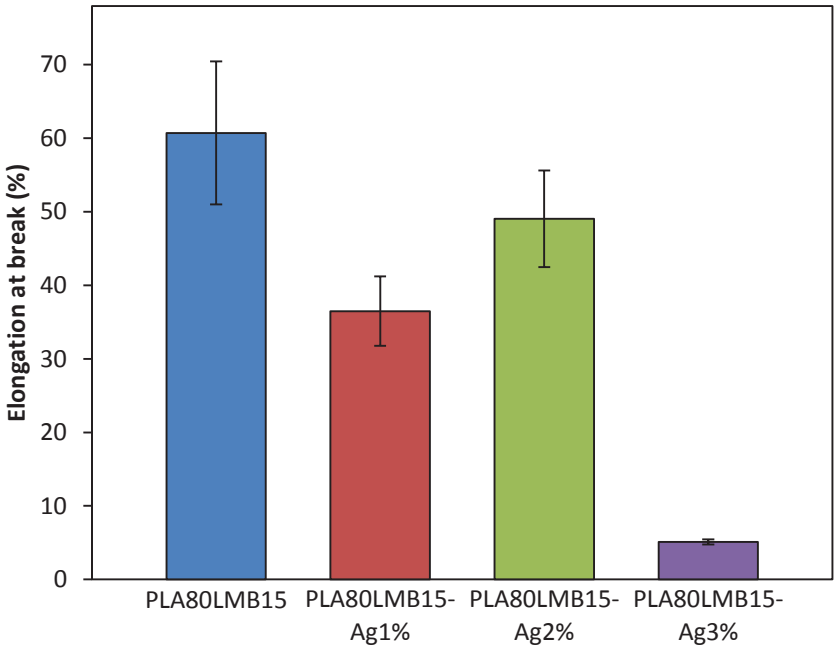
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิต ที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ



ภาพที่ 38 Tensile modulus ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ



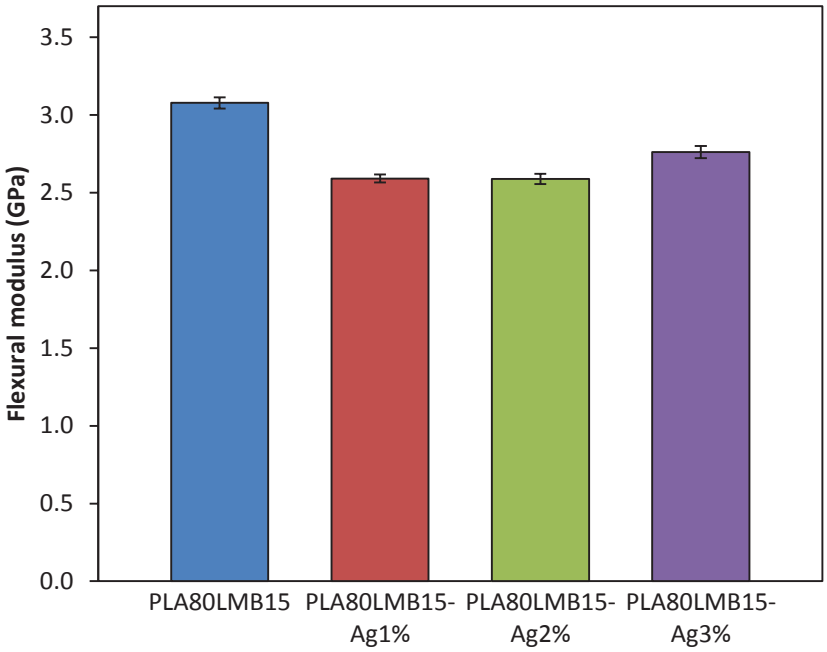
ภาพที่ 39 Tensile strength ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ



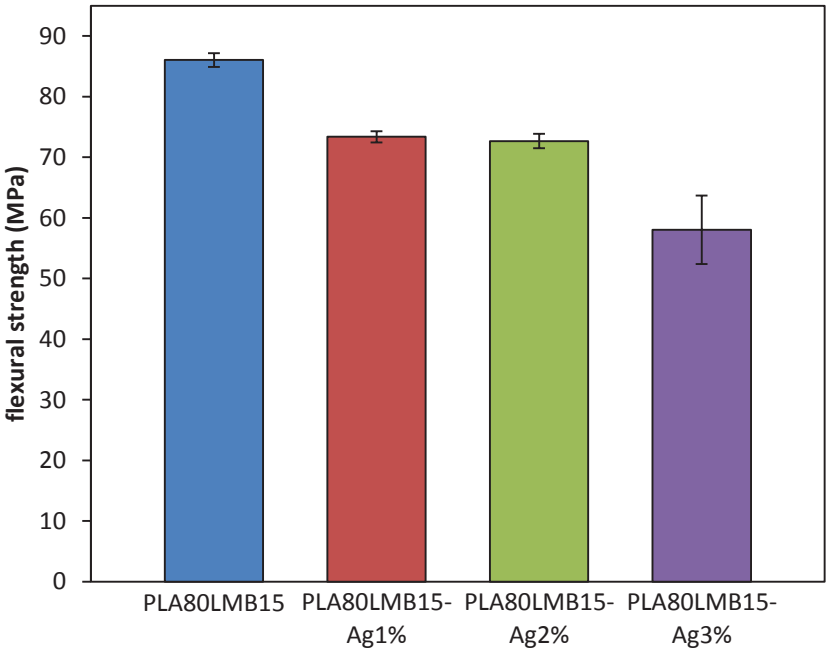
ภาพที่ 40 Elongation at break ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ

4.5.2.2 การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test)

การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิต ทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% โดยเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 โดยผลของ Flexural modulus และ Flexural strength แสดงในภาพที่ 41 และ 42 ตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าค่า Flexural modulus ในทุกๆ ตัวอย่างที่มีการผสมอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 โดยตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag2% จะมีค่า Flexural modulus ที่ใกล้เคียงกัน ส่วนตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag3% จะมีค่า Flexural modulus เพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag2% เล็กน้อย ในส่วนของค่า Flexural strength พบว่า PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตจะมีค่าลดลงตามปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ที่เพิ่มมากขึ้นในคอมโพสิต โดยตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag2% จะมีค่า Flexural strength ที่ใกล้เคียงกัน แต่ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag3% จะมีค่า Flexural strength ลดลงไปมาก สาเหตุที่ทำให้สมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดสอบ Flexural test ทั้งค่า Flexural modulus และ Flexural strength มีค่าลดลงกว่าตัวอย่าง PLA80LMB15 อาจเนื่องมาจากการที่ผสมอนุภาคซิลเวอร์ลงไปในคอมโพสิต แล้วเกิดการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ที่ไม่ดี มีการเกาะรวมตัวกันเป็นกลุ่มของอนุภาคซิลเวอร์ และเมื่อผสมอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น การเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก็เพิ่มปริมาณมากขึ้นตามไปด้วย โดยสังเกตได้จากภาพ SEM ในภาพที่ 36 ซึ่งการเกาะกันเป็นกลุ่มของอนุภาคซิลเวอร์ทำให้เกิด Stress concentration และมี Interfacial adhesion กับพอลิเมอร์ในคอมโพสิตไม่ดีส่งผลให้สมบัติ Flexural modulus และ Flexural strength ด้อยลงกว่าเดิม [46, 47]



ภาพที่ 41 Flexural modulus ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ



ภาพที่ 42 Flexural strength ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ

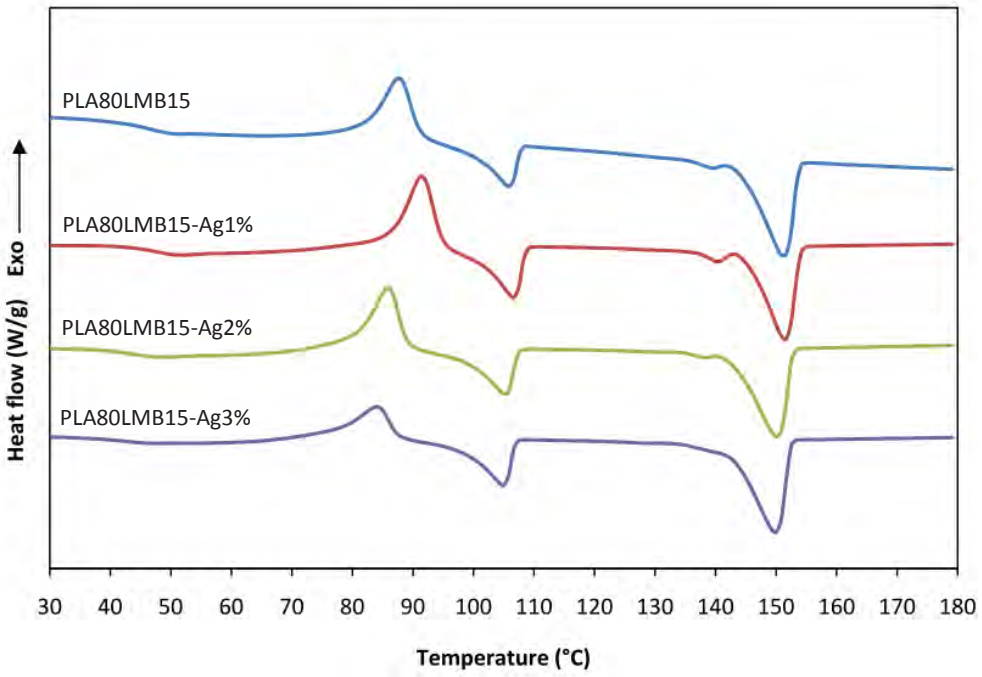
4.5.3 สมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของ PLA/PBS/ซิเวอร์คอมโพสิตจะประกอบไปด้วยการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC เพื่อศึกษาอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิ Cold crystalline (T_{cc}) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และ Degree of crystallinity และทดสอบสมบัติความเสถียรทางความร้อนด้วย TGA เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (T_d)

4.5.3.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ใช้ Heating rate ที่ 5 °C/min ตั้งแต่ 30 – 180°C และใช้ตัวอย่างในการทดสอบประมาณ 10 mg ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 43 และได้สรุปผลไว้ในตารางที่ 10 ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% กับตัวอย่าง PLA80LMB15 โดยเมื่อพิจารณาที่ T_g ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตของตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% ซึ่งมีอนุภาคซิลเวอร์ผสมใน PLA/PBS blends อยู่ 1 wt% เปรียบเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 ซึ่งไม่มีอนุภาคซิลเวอร์ผสมอยู่ พบว่ามีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจากตัวอย่าง PLA80LMB15 ประมาณ 3 °C แต่เมื่อปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตเพิ่มขึ้นเป็น 2 wt% และ 3 wt% (ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag2% และตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag3% ตามลำดับ) พบว่า T_g มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 ประมาณ 1 และ 5 °C ตามลำดับ ในส่วนของ T_{cc} ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับ T_g คือที่ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% จะมี T_{cc} ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 แต่ที่ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% จะมี T_{cc} ที่ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 ตามลำดับ ซึ่งการลดลงของ T_g และ T_{cc} อาจเกิดจากการที่เติมอนุภาคซิลเวอร์ลงไปแล้วทำให้เกิด Free volume มากขึ้นทำให้สายโซ่ของ PLA สามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นจึงทำให้ T_g และ T_{cc} เคลื่อนไปยังอุณหภูมิที่ต่ำลง [48]

เมื่อพิจารณาที่ T_m พบว่าในตัวอย่าง PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงของ T_m เมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 แต่อย่างไรก็ตามพบว่า Degree of crystallinity ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 โดยเมื่อมีปริมาณอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ Degree of crystallinity ทั้งในส่วนของ PLA และ PBS มีแนวโน้มที่สูงมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Fortunati และคณะ [49] ซึ่งได้ทำคอมโพสิตระหว่าง PLA กับอนุภาคซิลเวอร์ โดยพบว่าอนุภาคซิลเวอร์จะทำหน้าที่เป็น Nucleating agent ให้กับทั้ง PLA และ PBS ดังนั้นการเติมอนุภาคซิลเวอร์ลงไปในคอมโพสิตได้ไปช่วยให้ผลึกของคอมโพสิตมีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 43 DSC thermogram ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย DSC ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ

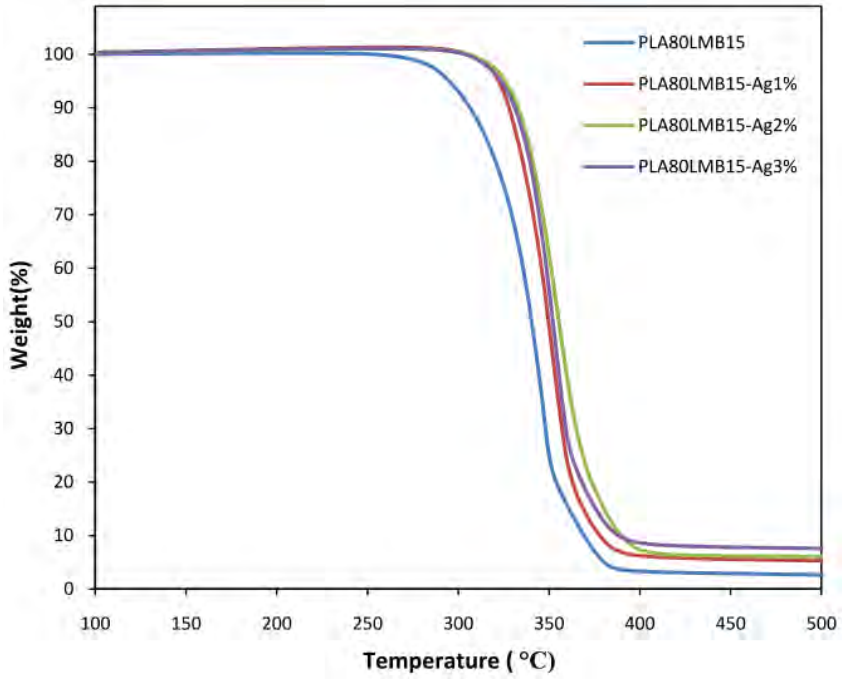
Sample	Temperature (°C)					Crystallinity (%)	
	T_g	T_{cc}	T_mPBS	T_{m1}PLA	T_{m2}PLA	PBS	PLA
PLA80LMB15	44.11	87.59	105.62	139.50	150.89	24.88	11.32
PLA80LMB15-Ag 1 %	47.47	91.52	106.45	140.24	151.29	30.05	14.09
PLA80LMB15-Ag 2 %	42.91	85.85	105.10	138.31	149.90	31.43	14.14
PLA80LMB15-Ag 3 %	39.95	83.97	104.70	138.00	149.69	29.55	19.30

4.5.3.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA ใช้ Heating rate ที่ 5 °C/min ตั้งแต่ 100 – 500°C และใช้ตัวอย่างประมาณ 10 mg ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 44 และได้สรุปผลไว้ในตารางที่ 11 ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบกันระหว่างตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% กับตัวอย่าง PLA80LMB15 พบว่า PLA/PBS/-

ซิลเวอร์คอมโพสิตในทุกๆ ตัวอย่างจะมี T_{onset} เพิ่มมากขึ้นมากกว่าตัวอย่าง PLA80LMB15 โดยจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ที่เติมในคอมโพสิต โดยตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% มี T_{onset} เพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง PLA80LMB15 ประมาณ 7° 10 ° และ 11 °C ตามลำดับ

อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิต พบว่ามีการเกิดขึ้นสองขั้นตอน โดย T_{d1} ซึ่งเป็นการสลายตัวของ PLA จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิต สำหรับ T_{d2} ซึ่งเป็นการสลายตัวในส่วนของ PBS จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตเช่นเดียวกับที่พบใน T_{d1} ซึ่งผลการทดลองคล้ายกับงานวิจัยของ Mbhele และคณะ [50] ได้ศึกษาคอมโพสิตของซิลเวอร์กับ Poly(vinyl alcohol) (PVA) พบว่าเมื่อผสมอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตในปริมาณที่เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความเสถียรทางความร้อนของคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยอนุภาคซิลเวอร์จะเข้าไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ในการเกิด Chain transfer ทำให้การสลายตัวทางความร้อนจึงเคลื่อนไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น [50]



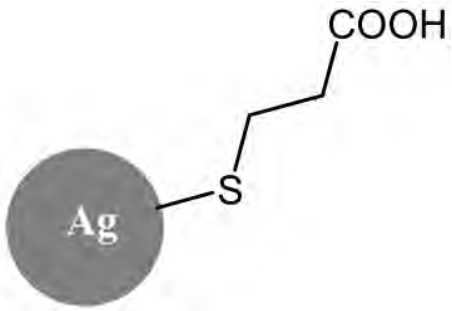
ภาพที่ 44 TGA thermogram ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย TGA ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่ปริมาณการเติมซิลเวอร์ต่างๆ

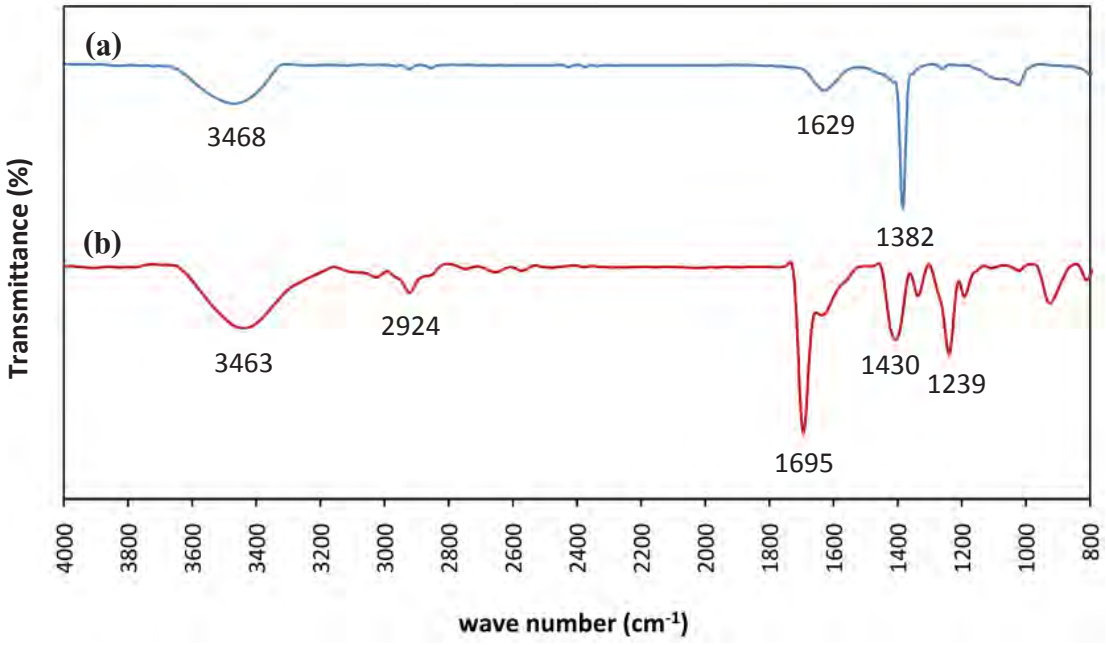
Sample	Degradation temperature (°C)		
	T_{Onset}	T_{d1}	T_{d2}
PLA80LMB15	322.86	340.33	375.00
PLA80LMB15-Ag1%	329.58	349.67	378.00
PLA80LMB15-Ag2%	332.62	355.25	385.00
PLA80LMB15-Ag3%	333.04	352.00	382.00

4.5.4 การปรับเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชั่นบนอนุภาคซิลเวอร์

อนุภาคซิลเวอร์โดยปกติจะมีพื้นผิวเป็น Hydrophilic ซึ่งทำให้การกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ใน PLA/PBS blends เกิดขึ้นได้ไม่ดี พบการรวมกลุ่มกันของอนุภาค ดังนั้นการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลเวอร์ด้วย 3-Mercaptopropionic acid (MPA) ซึ่งมีปลายด้านหนึ่งเป็นหมู่ Thiol ส่วนปลายอีกด้านเป็นหมู่ Carboxylic acid โดยหมู่ Thiol จะเกิด Metal-sulfur bond กับอนุภาคซิลเวอร์ [32, 51] แสดงดังภาพที่ 45 โดย FTIR spectra ของอนุภาคซิลเวอร์ที่ยังไม่มีการปรับปรุงผิวด้วย MPA แสดงดังในภาพที่ 46(a) พบพีค 3468 และ 1629 cm^{-1} ซึ่งเป็นของหมู่ Hydroxyl (OH) ใน Glucose ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ ส่วนพีคที่ 1382 cm^{-1} เป็นของ Nitrate ions ที่มาจาก Silver nitrate [32] ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีสารตั้งต้นบางส่วนยังคงติดมากับอนุภาคซิลเวอร์ที่สังเคราะห์ได้ และในภาพที่ 46(b) เป็น FTIR spectra ของอนุภาคซิลเวอร์ที่ได้ปรับปรุงผิวด้วย MPA โดยพบพีคที่ 3463 1695 และ1239 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคของหมู่ Carboxylic ใน MPA คือพีคของ O-H C=O และ C-O ตามลำดับ ส่วนพีคที่ 2924 cm^{-1} เป็นของ C-H stretching และพีคที่ 1430 cm^{-1} เป็นของ C-H bending ในโมเลกุลของ MPA [51, 52] ในส่วนของหมู่ Thiol ซึ่งเกิดพีคที่ 2550 cm^{-1} ไม่ปรากฏใน FTIR spectra ซึ่งเป็นการยืนยันว่าหมู่ Thiol ของ MPA ได้ไปเกาะที่ผิวของอนุภาคซิลเวอร์เกิดเป็นพันธะระหว่างซัลเฟอร์กับซิลเวอร์[51, 53]



ภาพที่ 45 โครงสร้างของอนุภาคซิลเวอร์ที่ได้ปรับปรุงพื้นผิวด้วย 3-Mercaptopropionic acid (MPA) [32, 51]



ภาพที่ 46 FTIR spectra ของ (a) อนุภาคซิลเวอร์ที่ไม่มีการปรับปรุงผิว และ (b) อนุภาคซิลเวอร์ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย MPA

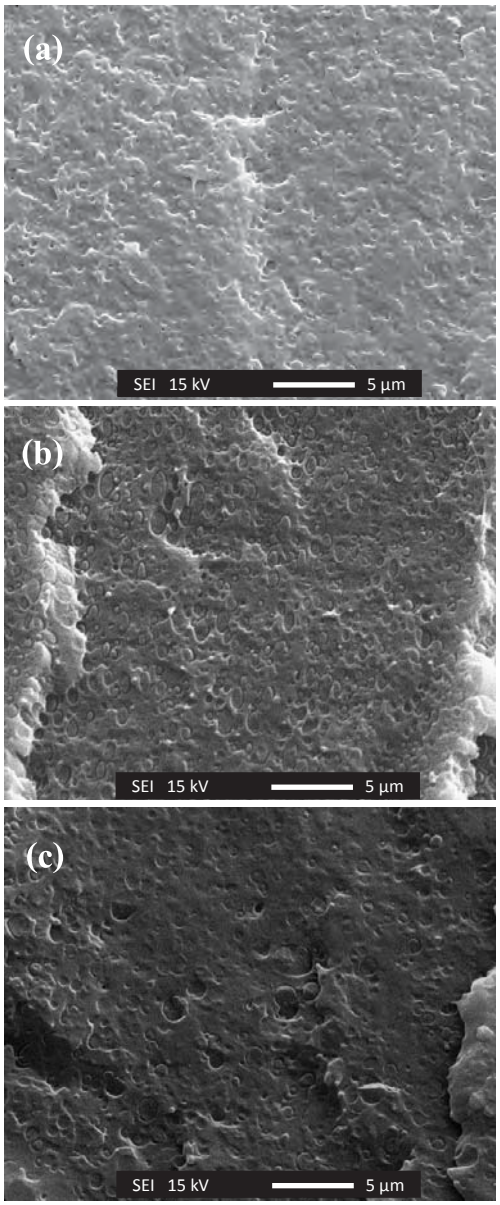
การเตรียมคอมโพสิตของ PLA80LMB15 กับอนุภาคซิลเวอร์ที่อัตราส่วนต่างๆ (1 2 และ 3 wt%) พบว่าการผสมอนุภาคซิลเวอร์กับ PLA80LMB15 จะพบการรวมกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์และทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการแยกเฟส และเมื่อมีปริมาณอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง จึงนำอนุภาคซิลเวอร์มาปรับปรุงพื้นผิวด้วย MPA และนำไปทำการผสมกับ PLA/PBS blends เป็นวัสดุคอมโพสิตในปริมาณ 1 wt% โดยผสมด้วยเครื่อง

Twin screw extruder และขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding อนุภาคซิลเวอร์โดยปกติมีพื้นผิวเป็น Hydrophilic มีการเกาะกลุ่มกันเองกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียง ซึ่งการปรับปรุงผิวด้วย MPA ทำให้ผิวของอนุภาคซิลเวอร์มีส่วนของสารอินทรีย์เกาะอยู่ซึ่งป้องกันการจับรวมกลุ่มกับอนุภาคซิลเวอร์ที่อยู่ใกล้เคียง [32, 51, 54] และการปรับปรุงผิวอนุภาคซิลเวอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชั่นจะช่วยให้มีแรงระหว่างผิวของอนุภาคซิลเวอร์กับหมู่ฟังก์ชั่นในสายโซ่ของพอลิเมอร์ซึ่งช่วยเพิ่มการกระจายตัวในพอลิ-เมอร์ [54]

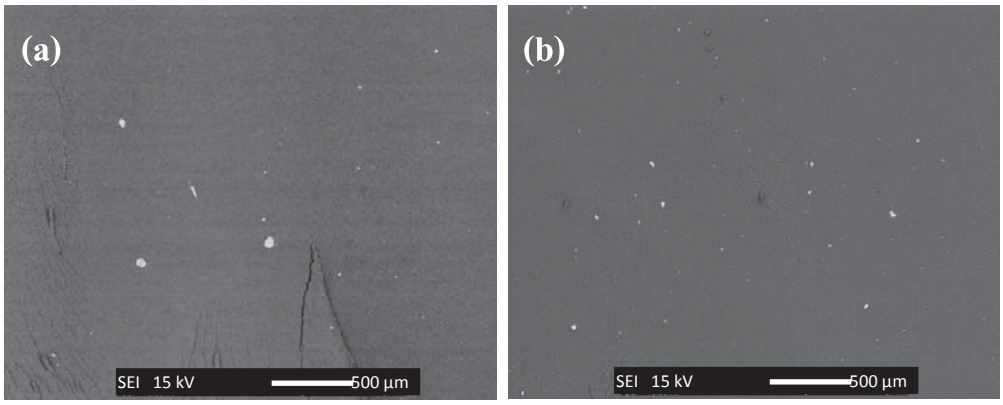
4.5.5 สัณฐานวิทยา

การศึกษาสัณฐานวิทยาด้วย Scanning electron microscope (SEM) พื้นผิวรอยแตกหักของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA แสดงดังภาพที่ 47 พบว่าแต่ละตัวอย่างมีสภาพของพื้นผิวรอยแตกหักมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% (ภาพที่ 47(b)) จะสังเกตเห็นการแยกเฟสของ PLA และ PBS เมื่อมีการเติมอนุภาคซิลเวอร์ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงผิวลงไป อย่างไรก็ตามตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA ซึ่งมีการเติมอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตปริมาณที่เท่ากันกับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% แต่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย MPA และเมื่อสังเกตภาพพื้นผิวรอยแตกหัก (ภาพที่ 47(c)) พบว่าเฟสของ PLA และ PBS มีความเข้ากันได้มากขึ้น มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ส่วนภาพที่ 48 แสดงภาพ SEM ในโหมด Back scattered electron เปรียบเทียบกันระหว่างตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA โดยตัวอย่างที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลเวอร์แสดงให้เห็นว่ามีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์ และมีการกระจายตัวไม่ทั่วทั้งคอมโพสิต แต่ในตัวอย่างที่มีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลเวอร์ด้วย MPA พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ที่ดีกว่าและพบกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ทั่วทั้งเนื้อวัสดุคอมโพสิตถึงแม้ว่าจะยังพบการจับตัวเป็นกลุ่มของอนุภาคซิลเวอร์อยู่บ้าง แต่การรวมกลุ่มของอนุภาคซิลเวอร์มีขนาดของกลุ่มที่เล็กลงเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลเวอร์ การปรับปรุงผิวอนุภาคซิลเวอร์ด้วย MPA ทำให้มีสารอินทรีย์เกาะอยู่ที่ผิวซึ่งป้องกันการจับรวมกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์ที่อยู่ใกล้เคียง [32, 51, 54] จะทำให้พื้นผิวของอนุภาคมีหมู่

Carboxylic ซึ่งอาจเพิ่มแรง (Interaction) ระหว่างผิวของอนุภาคและหมู่ฟังก์ชั่นในสายโซ่พอลิเมอร์ [54]



ภาพที่ 47 SEM ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตโดย (a) PLA80LMB15 (b) PLA80LMB15-Ag1% และ (c) PLA80LMB15-Ag1%-MPA



ภาพที่ 48 SEM ในโหมด Back scattered ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตโดย
(a) PLA80LMB15-Ag1% และ (b) PLA80LMB15-Ag1%-MPA

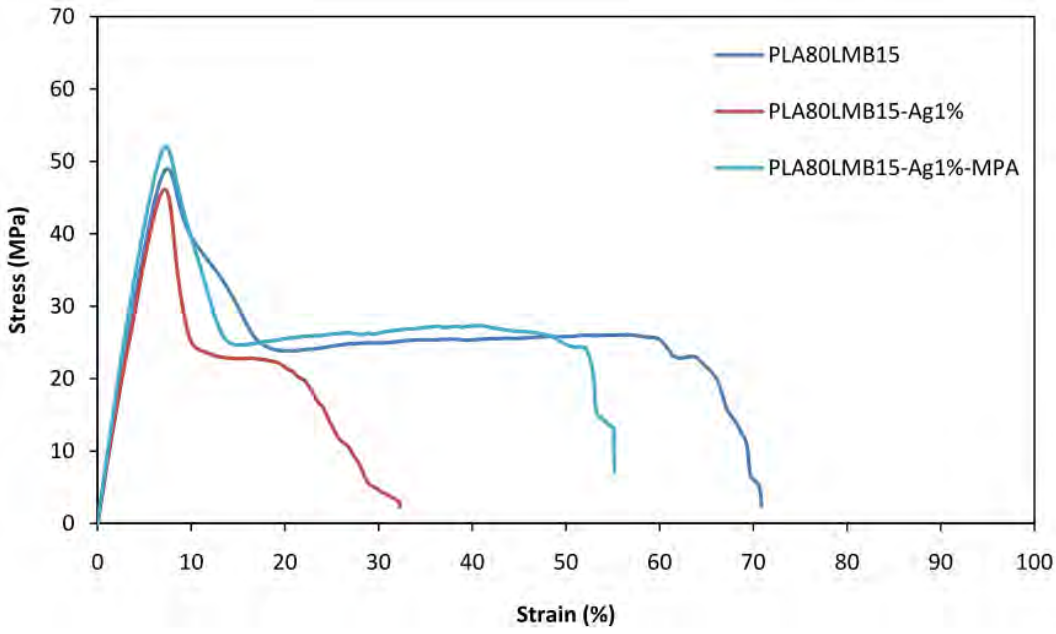
4.5.6 สมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลจะประกอบไปด้วยการทดสอบการดึง (Tensile test) และการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) โดยใช้เครื่อง Universal testing machine ทดสอบตาม ASTM D 638 และ D 790 ตามลำดับ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบตัวอย่างของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตที่มีการผสมอนุภาคซิลเวอร์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิว (Functionalization) ด้วย MPA (ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA) กับตัวอย่างซึ่งไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลเวอร์ (ตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%)

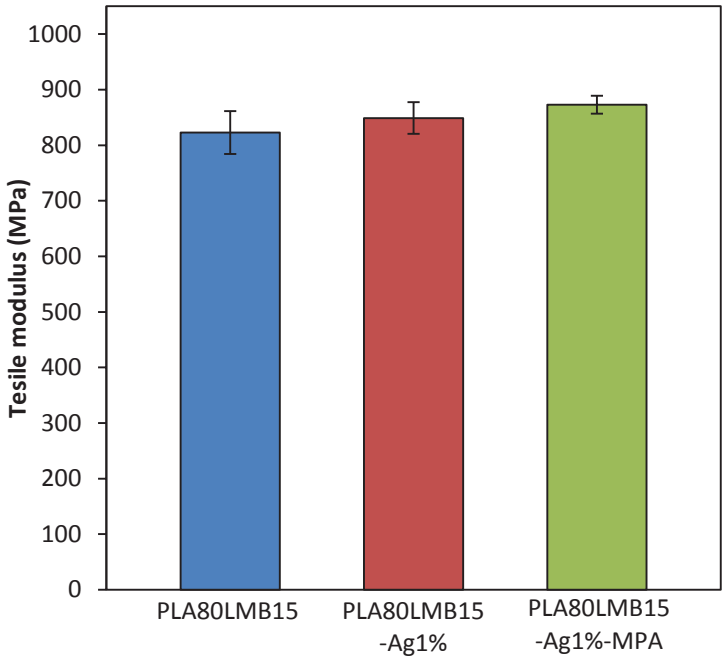
4.5.6.1 การทดสอบการดึง (Tensile test)

ผลการทดสอบการดึง (Tensile test) ของ PLA80LMB15-Ag1%-MPA เทียบกับ PLA80LMB15 และ PLA80LMB15-Ag1% ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain แสดงในภาพที่ 49 และในภาพที่ 50 51 และ 52 แสดงผล Tensile modulus Tensile strength และ Elongation at break ตามลำดับ โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA กับตัวอย่าง PLA80LMB15 และ PLA80LMB15-Ag1% พบว่าตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA ซึ่งมีการปรับปรุงผิวอนุภาคซิลเวอร์ก่อนเตรียมเป็นคอมโพสิตมีค่า Tensile modulus และ Tensile strength ที่สูงมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 และ PLA80LMB15-Ag1% ส่วนค่า Elongation at break ของตัวอย่างที่มีการเติมอนุภาคซิลเวอร์ลงไปในคอมโพสิตจะมีค่า

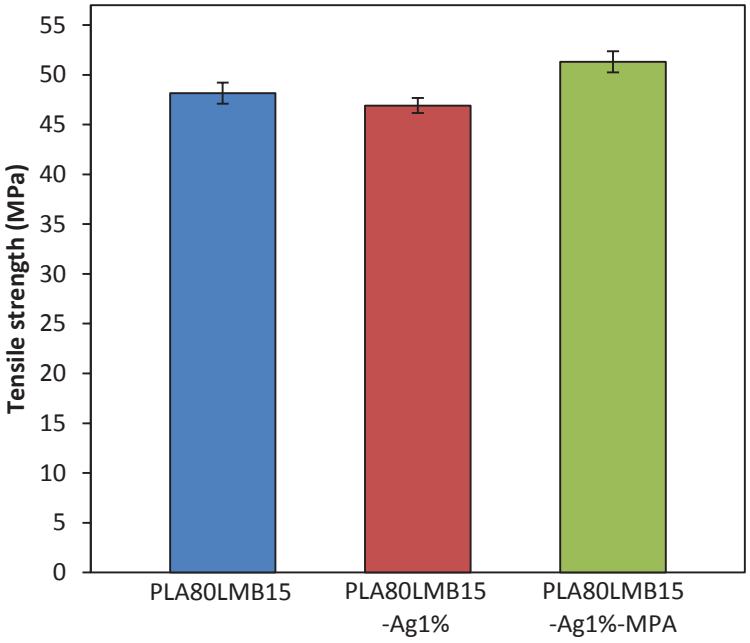
ลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เติมอนุภาคซิลเวอร์ แต่เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลเวอร์ด้วย MPA (PLA80LMB15-Ag1%-MPA) ทำให้ค่า Elongation at break เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 20 % เมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% แต่อย่างไรก็ตามยังคงน้อยกว่าตัวอย่าง PLA80LMB15 อยู่ประมาณ 10% ซึ่งการเพิ่มมากขึ้นของค่า Tensile modulus Tensile strength และ Elongation at break สอดคล้องกับผลของ SEM ในภาพที่ 47 และ 48 ซึ่งพบว่าเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลเวอร์ด้วย MPA เมื่อนำมาเตรียมเป็นคอมโพสิตจะทำให้พื้นผิวของคอมโพสิตมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลเวอร์ การปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลเวอร์ด้วย MPA เป็นการทำให้ผิวของอนุภาคมีสารอินทรีย์เกาะอยู่ที่ผิวซึ่งทำให้ความเป็น Hydrophilic ของอนุภาคซิลเวอร์ลดลง การเกาะกลุ่มกันลดลง ทำให้สามารถกระจายตัวในคอมโพสิตได้ดีขึ้นกว่าเดิมจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น



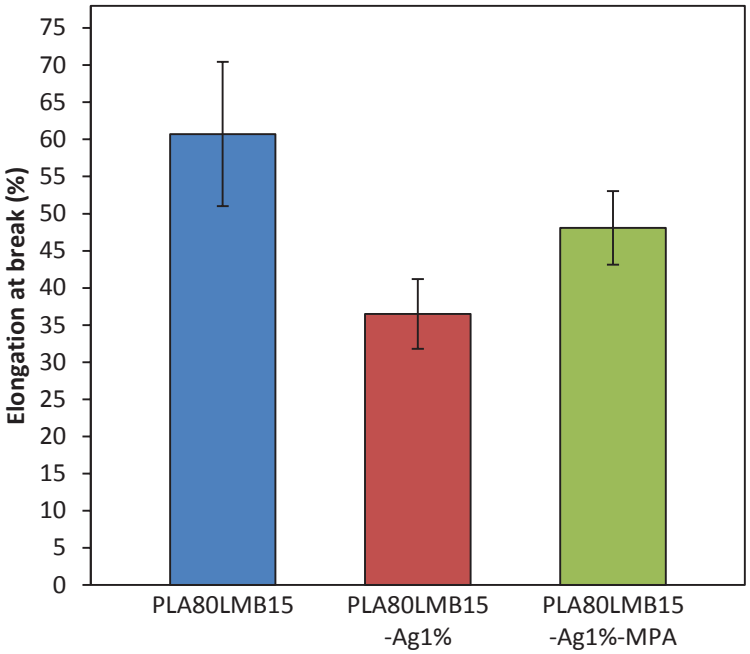
ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA



ภาพที่ 50 Tensile modulus ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA



ภาพที่ 51 Tensile strength ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA

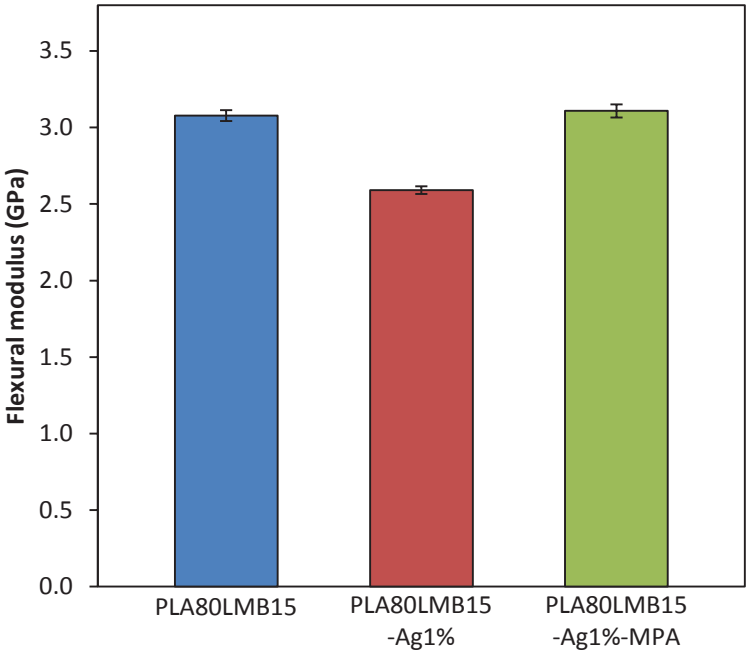


ภาพที่ 52 Elongation at break ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA

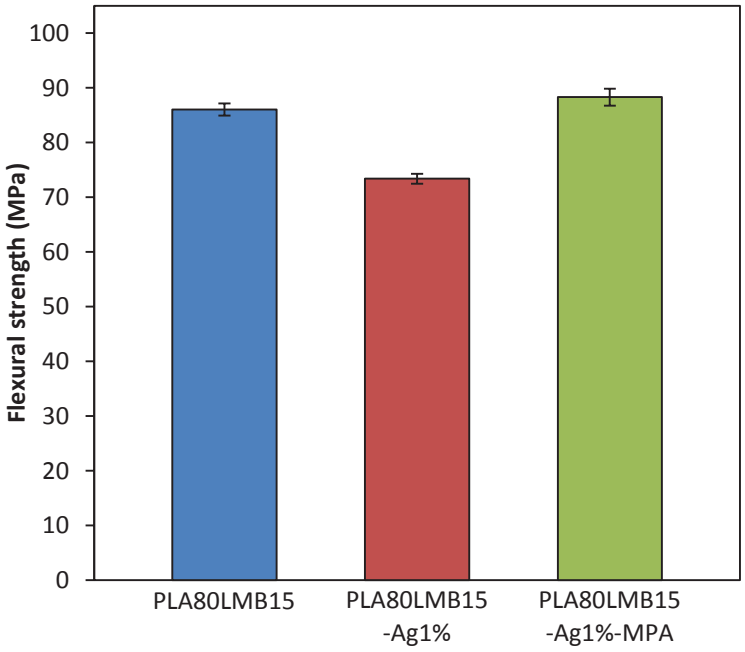
4.5.6.2 การทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test)

ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test) แสดงดังภาพที่ 53 และ 54 โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA กับตัวอย่าง PLA80LMB15 และ PLA80LMB15-Ag1% ซึ่งผลการทดสอบการดัดโค้งพบว่าเมื่อมีการเติมอนุภาคซิลเวอร์ลงไปในคอมโพสิตจะทำให้ทั้ง Flexural modulus และ Flexural strength ลดลงแต่เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลเวอร์ด้วย MPA พบว่าทั้งค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของคอมโพสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้นกว่าในกรณีที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิว โดยพบว่า Flexural modulus และ Flexural strength มีค่าสูงกว่าตัวอย่าง PLA80LMB15 (เป็นตัวอย่างที่ไม่มีการผสมอนุภาคซิลเวอร์) อยู่เล็กน้อย ซึ่งผลการทดสอบแรงดัดทั้ง Flexural modulus และ Flexural strength ให้แนวโน้มเช่นเดียวกันกับการทดสอบการดึง เมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลเวอร์ด้วย MPA จะช่วยปรับปรุงให้คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เมื่อสังเกตที่ภาพ SEM ของคอมโพสิต (ภาพที่ 47 และ

48) พบว่าอนุภาคซิลเวอร์มีการกระจายตัวในคอมโพสิตที่ดีขึ้น และอนุภาคกระจายตัวไปทั่วทั้งคอมโพสิตจึงทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น



ภาพที่ 53 Flexural modulus ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA



ภาพที่ 54 Flexural strength ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA

4.5.7 สมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของ PLA/PBS/ซิเวอร์คอมโพสิต ซึ่งมีการปรับปรุงพื้นผิวอนุภาคซิลเวอร์ก่อนการผสมเป็นคอมโพสิต จะประกอบไปด้วยการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC เพื่อศึกษาอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิ Cold crystalline (T_{cc}) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และ Degree of crystallinity และทดสอบสมบัติความเสถียรทางความร้อนด้วย TGA เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (T_d)

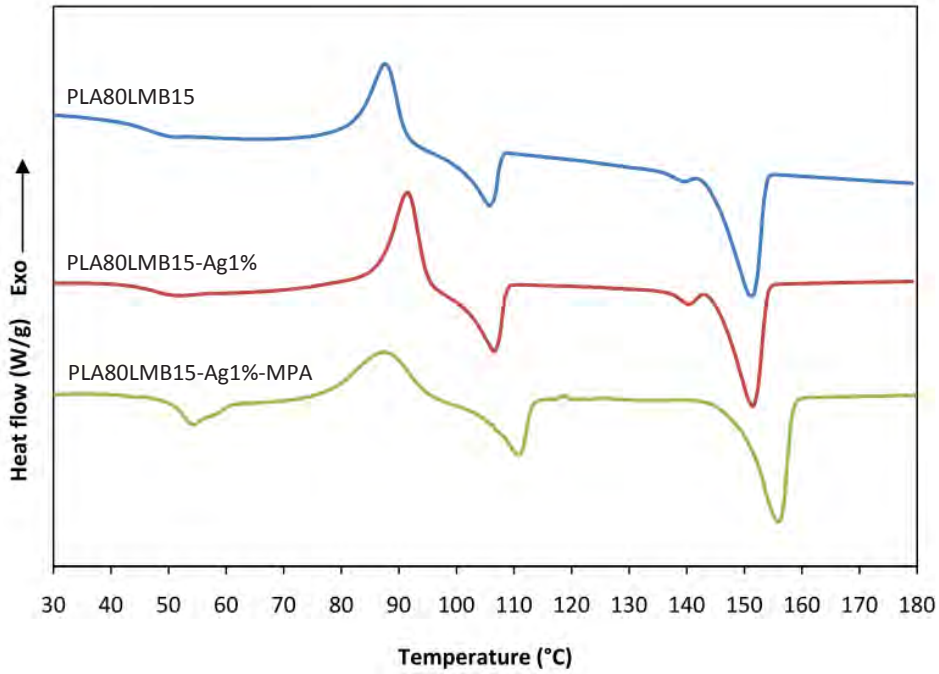
4.5.7.1 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ของตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA โดยใช้ Heating rate ที่ 5 °C/min ช่วง 30 – 180°C และใช้ตัวอย่างประมาณ 10 mg ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15 และตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% ดังแสดงไว้ในภาพที่ 55 และตารางที่ 12 พบว่าตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA มี T_g ที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อ

เทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% ซึ่งมีปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์อยู่ในปริมาณที่เท่ากันที่ 1 wt% โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 3 °C แต่มี T_{cc} ที่ลดต่ำลงมากกว่า แต่มีค่าที่ใกล้เคียงกับตัวอย่าง PLA80LMB15

ในส่วนของ T_m ของ PLA80LMB15-Ag1%-MPA ยังคงมีการเกิดแยกกันระหว่าง T_m ของ PLA และ PBS ในสองบริเวณ แต่มีอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% ทั้งในส่วนของ PLA และ PBS

สำหรับปริมาณผลึกของ PLA ในคอมโพสิตกรณีที่มีการปรับปรุงผิวอนุภาคซิลเวอร์ %Crystallinity แทบไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับปริมาณผลึกของ PLA ในกรณีที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวอนุภาคซิลเวอร์ แต่ส่วนของผลึก PBS นั้นพบว่า %Crystallinity มีค่าลดลงประมาณ 11% เมื่อเทียบกับผลึก PBS ในกรณีที่ไม่ได้ปรับปรุงผิวอนุภาคซิลเวอร์ ซึ่งผลของสมบัติทางความร้อนของคอมโพสิตกรณีที่มีการปรับปรุงผิวอนุภาคซิลเวอร์ด้วย MPA อาจเกิดจากการที่อนุภาคซิลเวอร์ที่มีการปรับปรุงผิวให้มีสารอินทรีย์อยู่ที่ผิวและมีหมู่ฟังก์ชั่นจึงทำให้ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนทำให้ T_g และ T_m เคลื่อนไปยังอุณหภูมิที่สูงขึ้น และการที่มีสารอินทรีย์เกาะที่ผิวอนุภาคอาจไปขัดขวางการเกิดผลึกจึงทำให้ผลึกของคอมโพสิตมีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 55 DSC thermogram ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA

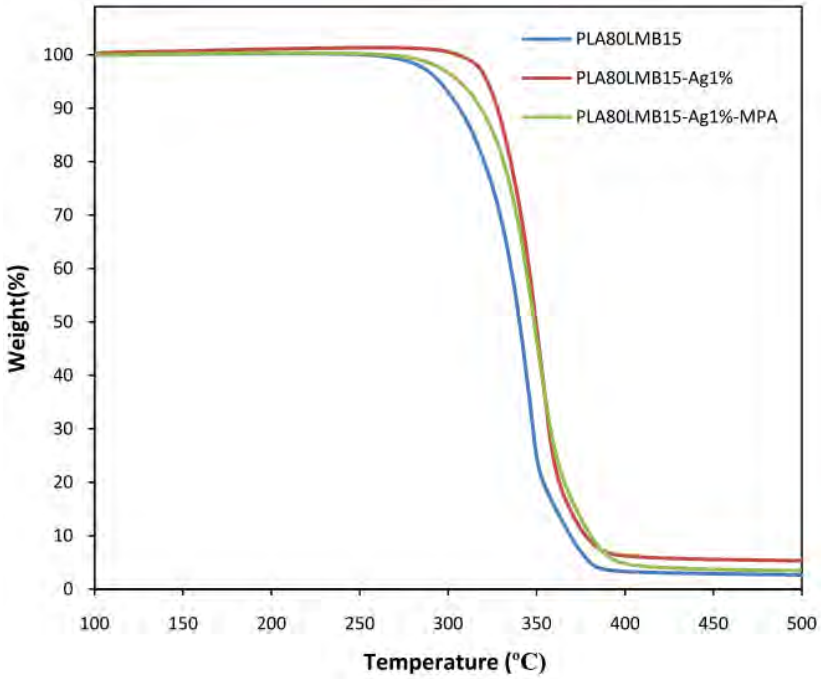
ตารางที่ 12 ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย DSC ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA

Sample	Temperature (°C)					Crystallinity (%)	
	T_g	T_{cc}	T_mPBS	T_{m1}PLA	T_{m2}PLA	PBS	PLA
PLA80LMB15	44.11	87.59	105.62	139.50	150.89	24.88	11.32
PLA80LMB15Ag1 %	47.47	91.52	106.45	140.24	151.29	30.05	14.09
PLA80LMB15Ag1%-MPA	51.58	88.41	110.96	145.00	154.05	19.17	13.59

4.5.7.2 การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA

การทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย TGA ใช้ Heating rate ที่ 5 °C/min ตั้งแต่ 100 – 500°C และใช้ตัวอย่างประมาณ 10 mg ซึ่งผลการทดสอบสมบัติการสลายตัวทางความร้อนแสดงดังภาพที่ 56 และได้สรุปผลไว้ในตารางที่ 13 ซึ่งได้เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง

PLA80LMB15-Ag1%-MPA กับตัวอย่าง PLA80LMB15 และ PLA80LMB15-Ag1% พบว่าตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA ยังคงแสดงการสลายตัวทางความร้อนสองขั้นตอน ซึ่งทั้งสองขั้นตอนนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับ T_d ของตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำ MPA มาทำการปรับปรุงอนุภาคซิลเวอร์ไม่ได้ส่งผลต่อ T_d ของคอมโพสิต อย่างไรก็ตามเมื่อสังเกตที่ TGA thermogram ของตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 300°C ตัวอย่างที่มีการปรับปรุงผิวอนุภาคซิลเวอร์มีการลดลงของน้ำหนักมากกว่า ซึ่งอาจเกิดจาก MPA ที่ใช้ในการปรับปรุงผิวเกิดการสลายตัวทางความร้อนโดยในงานวิจัยของ Amoli และคณะ [51] พบการสลายตัวทางความร้อนของอนุภาคซิลเวอร์ที่มีการปรับปรุงผิวด้วย MPA ที่อุณหภูมิช่วง 270 – 350°C



ภาพที่ 56 TGA thermogram ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบทางความร้อนด้วย TGA ของ PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA

Sample	Degradation temperature (°C)		
	T_{Onset}	T_{d1}	T_{d2}
PLA80LMB15	322.86	340.33	375.00
PLA80LMB15-Ag1%	329.58	349.67	378.00
PLA80LMB15-Ag1%-MPA	325.00	349.89	380.00

4.6 การทดสอบสมบัติการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial test)

การทดสอบสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียด้วยวิธี Dynamic shake flask test ตาม ASTM E 2149-10 โดยทำการทดสอบกับเชื้อแบคทีเรียสองชนิด คือแบคทีเรียแกรมลบชนิด E. coli และแบคทีเรียแกรมบวกชนิด S. aureus ซึ่งในการทดสอบนี้ได้ขึ้นรูปตัวอย่างเป็นฟิล์ม สำหรับตัวอย่างที่ได้นำมาทดสอบประกอบไปด้วยตัวอย่าง PLA80LMB15 PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% PLA80LMB15-Ag3% และ PLA80LMB15-Ag1%-MPA ในการทดสอบทำโดยนำฟิล์มตัวอย่างแช่ในอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียซึ่งมีแบคทีเรียอยู่แล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำเชื้อแบคทีเรียที่ถูกแช่ด้วยฟิล์มตัวอย่างมาเลี้ยงเชื้อต่อในจานเพาะเชื้อเพื่อดูผลของการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย

ผลการทดสอบการต้านเชื้อ E. coli ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบแสดงในตารางที่ 14 โดย Control เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียที่มีแบคทีเรีย E. coli อยู่แต่ไม่ได้ใส่ฟิล์มตัวอย่างลงไป เมื่อนำมานับจำนวนแบคทีเรียพบว่ามีจำนวนแบคทีเรียอยู่ประมาณ 3.28×10^{12} CFU/ml และตัวอย่าง PLA80LMB15 พบว่ามีจำนวนแบคทีเรียอยู่ประมาณ 3.43×10^{12} CFU/ml ซึ่งใกล้เคียงกับจำนวนของแบคทีเรียที่เจริญเติบโตในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีฟิล์มตัวอย่าง (Control) แต่ผลของการทดสอบต้านเชื้อแบคทีเรีย E. coli ของตัวอย่างที่มีอนุภาคซิลเวอร์ผสมอยู่ด้วย (PLA80LMB15-Ag) โดยมีอนุภาคซิลเวอร์ผสมในคอมโพสิตอยู่ 1 2 และ 3 wt% ตามลำดับ จะพบว่าปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่ได้จากการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียมีปริมาณที่ลดลงเมื่อเทียบกับ Control และ PLA80LMB15 ซึ่งเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียในตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%

PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% จะมีเท่ากับ 95.07 97.90 และ 98.02% ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย E. coli เพิ่มขึ้นตามไปด้วย สำหรับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA ซึ่งอนุภาคซิลเวอร์ได้ถูกปรับปรุงผิวด้วย MPA ทำให้เกิดมีหมู่ Carboxylic เกาะอยู่ที่ผิว จากการทดสอบพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ในการต้านเชื้อแบคทีเรีย E. coli ที่ 94.78% โดยมีค่าที่ใกล้เคียงกับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% ซึ่งมีปริมาณอนุภาคซิลเวอร์ในคอม-โพสิตที่เท่ากัน แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงผิวอนุภาคซิลเวอร์ให้มีหมู่ Carboxylic ที่พื้นผิวนั้นไม่ได้มีผลต่อความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิด E. coli

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบต้านเชื้อแบคทีเรีย E. coli และ S. aureus ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์-คอมโพสิตชนิดต่างๆ

ตัวอย่าง	E. coli		S. aureus	
	จำนวนแบคทีเรีย (CFU/ml)	Antibacterial (%)	จำนวนแบคทีเรีย (CFU/ml)	Antibacterial (%)
Control	3.28×10^{12}	-	6.10×10^{9}	-
PLA80LMB15	3.43×10^{12}	-	6.20×10^{9}	-
PLA80LMB15-Ag1%	1.69×10^{11}	95.07	3.50×10^{9}	43.55
PLA80LMB15-Ag2%	7.20×10^{10}	97.90	3.30×10^{9}	46.77
PLA80LMB15-Ag3%	6.80×10^{10}	98.02	2.80×10^{9}	54.84
PLA80LMB15-Ag1%-MPA	1.79×10^{11}	94.78	3.80×10^{9}	38.71

ในกรณีของการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกชนิด S. aureus แสดงไว้ในตารางที่ 14 โดย Control ซึ่งเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียที่มีแบคทีเรีย S. aureus อยู่และไม่ได้ใส่ฟิล์มตัวอย่างลงไป เมื่อนำมานับจำนวนแบคทีเรียพบว่ามีอยู่ประมาณ 6.10×10^{9} CFU/ml และตัวอย่าง PLA80LMB15 พบว่ามีจำนวนแบคทีเรีย S. aureus อยู่ประมาณ 6.20×10^{9} CFU/ml ซึ่งมีปริมาณที่ใกล้เคียงกับจำนวนแบคทีเรีย S. aureus ที่เจริญเติบโตในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มีฟิล์มตัวอย่าง

(Control) และผลของการทดสอบต้านเชื้อแบคทีเรีย S. aureus ของตัวอย่างที่มีอนุภาคซิลเวอร์ผสมอยู่ด้วย (PLA80LMB15-Ag) ซึ่งมีอนุภาคซิลเวอร์ผสมในคอมโพสิตอยู่ 1 2 และ 3 wt% ตามลำดับ พบว่าเชื้อแบคทีเรีย S. aureus ที่ได้จากการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียมีปริมาณที่ลดลงเมื่อเทียบกับ Control และ PLA80LMB15 โดยตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% PLA80LMB15-Ag2% และ PLA80LMB15-Ag3% จะมีเปอร์เซ็นต์ในการต้านเชื้อแบคทีเรียคิดเป็น 43.55 46.77 และ 54.84% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่อมีปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตเพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้ความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้นด้วย และในตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA ซึ่งได้มีการปรับปรุงผิวของอนุภาคซิลเวอร์ให้มีหมู่ Carboxylic เกาะอยู่ที่ผิวก่อน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์ในการต้านเชื้อแบคทีเรีย S. aureus ที่ 38.71% ซึ่งพบว่ามีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียที่ลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% อาจเป็นผลมาจากตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1%-MPA มีการทำให้ผิวของอนุภาคซิลเวอร์มีหมู่ Carboxylic จึงทำให้การแพร่ออกมาของอนุภาคซิลเวอร์เพื่อทำการต้านเชื้อแบคทีเรียได้น้อยลง เนื่องจากหมู่ Carboxylic ที่ผิวของอนุภาคซิลเวอร์อาจเกิดแรงกระทำกับหมู่ Ester ของ PLA และ PBS ในคอมโพสิตจึงทำให้การแพร่ออกมาของอนุภาคซิลเวอร์ออกจากฟิล์มตัวอย่างได้น้อยลง อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิด E. coli ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบ กับแบคทีเรียชนิด S. aureus ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก พบว่าความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิด E. coli มีค่าประมาณ 95 – 98% แต่ในกรณีของแบคทีเรียชนิด S. aureus ความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียมีค่าประมาณ 40 – 55 % ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคซิลเวอร์ที่เติมลงไปในคอมโพสิตมีความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรีย E. coli มากกว่าเชื้อแบคทีเรีย S. aureus สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเชื้อแบคทีเรีย S. aureus เป็นแบคทีเรียแกรมบวกจะมีชั้นของผนังเซลล์ที่หนากว่าแบคทีเรียแกรมลบ (E. coli) จึงทำให้การแทรกตัวเข้าไปในเซลล์ของอนุภาคซิลเวอร์เป็นไปได้ยากกว่า และต้องใช้อนุภาคซิลเวอร์ปริมาณที่มากกว่า จึงทำให้ความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียชนิด S. aureus น้อยกว่าแบคทีเรียชนิด E. coli [23]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS และการเตรียม PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิต โดยศึกษาถึงสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และความสามารถในการป้องกันเชื้อแบคทีเรีย รวมถึงการปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิต ซึ่งในการทดลองได้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่คือ การหาปริมาณที่เหมาะสมของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA และ PBS หลังจากนั้นจะทำการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง และสุดท้ายจะทำการผสมกับอนุภาคซิลเวอร์เพื่อเตรียมเป็นคอมโพสิต

ในการทดลองเมื่อทำการผสม PLA กับ PBS ด้วยเครื่อง Twin screw extruder และขึ้นรูปตัวอย่างด้วยเครื่อง Injection molding แล้วนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่าอัตราส่วนของ PBS ในพอลิเมอร์ผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ Tensile modulus และ Tensile strength มีแนวโน้มลดลง แต่จะทำให้ Elongation at break มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ส่วน Flexural modulus และ Flexural strength มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน แต่ไม่เกิดการแตกหักระหว่างการทดสอบช่วง 5 % Strain เหมือนกับ PLA และผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ก็พบการลดลงของ T_g เมื่อมีอัตราส่วน PBS เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเปราะของ PLA ได้ถูกปรับปรุงให้มีความเหนียวที่เพิ่มขึ้นเมื่อผสมกับ PBS นอกจากนี้ยังส่งผลให้มีปริมาณผลึกที่เพิ่มขึ้น และพบการแยกกันของ Tm ของ PLA และ PBS โดยไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากพอลิเมอร์บริสุทธ์มากนัก และผลการทดสอบความเสถียรทางความร้อนด้วย TGA พบว่า T_d มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามอัตราส่วนของ PBS ที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามภาพ SEM สังเกตพบการแยกกันระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ทั้งสอง เมื่อมีอัตราส่วนของ PBS ในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มมากขึ้นถึง 20 wt% โดยเฟสของ PBS มีลักษณะเป็นทรงกลมกระจายตัวอยู่ในเฟส PLA และมีแนวโน้มที่มีขนาดที่ใหญ่มากขึ้นเมื่อมีปริมาณของ PBS มากขึ้น ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากัน ดังนั้นจึงมีการสังเคราะห์ PLA-MA-PBS เพื่อใช้เป็น Compatibilizer ในการปรับปรุง

ความเข้ากันได้ระหว่าง PLA กับ PBS โดย Compatibilizer จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ PLA และสายโซ่ PBS ซึ่งสามารถเข้าได้กับเฟส PLA และ PBS ในพอลิเมอร์ผสมตามลำดับ

การปรับปรุงความเข้ากันได้จะมีการปรับเปลี่ยนปริมาณของ MA ใน Compatibilizer คือ ปริมาณ 15 30 และ 45 wt% ของปริมาณของ PLA ใน PLA-MA-PBS ซึ่งในการทดลองจะทำการผสม Compatibilizer ปริมาณ 4 wt% กับ PLA/PBS blends ในอัตราส่วนการผสมที่ 80/20 (PLA80) เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้ได้สังเกตเห็นการแยกกันระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากัน โดยพบว่าปริมาณของ MA ใน Compatibilizer เพิ่มมากขึ้นความเข้ากันได้ระหว่างพอลิ-เมอร์ทั้งสองมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยสังเกตจากภาพ SEM พบพื้นผิวรอยแตกหักมีความเป็นเนื้อเดียวมากขึ้น เฟสของ PBS ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมที่กระจายอยู่ในเฟสของ PLA มีขนาดที่เล็กลง และมีความเป็นเนื้อเดียวกับเฟสของ PLA เพิ่มมากขึ้น มีความเข้ากันได้ระหว่างเฟสเพิ่มมากขึ้น และในการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณ MA ใน Compatibilizer ไม่ได้ทำให้ Tensile modulus และ Tensile strength มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก แต่อย่างไรก็ตามทำให้ Elongation at break มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ความเหนียวจึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณ MA ใน Compatibilizer แต่สำหรับ Flexural modulus และ Flexural strength พบว่าการเติม Compatibilizer ทำให้มีค่าที่สูงขึ้นในตอนแรก (PLA80LMB15) แต่เมื่อมีปริมาณของ MA ใน Compatibilizer ที่เพิ่มมากขึ้นก็ทำให้ Flexural modulus และ Flexural strength มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณของ MA ที่เพิ่มมากขึ้นทำให้มีการกราฟท์ PBS ซึ่งเป็นส่วนที่นิ่มมากขึ้นใน Compatibilizer จึงส่งผลให้ Flexural modulus และ Flexural strength ลดลง ในส่วนของผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนการเติม Compatibilizer ไม่ได้ทำให้ T_g เปลี่ยนแปลงมากนัก และ T_m ยังคงเกิดแยกกันระหว่าง PLA และ PBS โดยค่าไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากพอลิเมอร์บริสุทธ์ อย่างไรก็ตามพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกทั้งส่วนของ PLA และ PBS เมื่อมีการเติม Compatibilizer โดยเฉพาะ PBS จะมีการเพิ่มขึ้นของผลึกตามปริมาณ MA ใน Compatibilizer ซึ่งเนื่องจากเมื่อ MA เพิ่มขึ้นจึงการกราฟท์ PBS ใน Compatibilizer เพิ่มขึ้นผลึกของ PBS จึงเพิ่มตามไปด้วย ในส่วนของความความเสถียรทางความร้อนเมื่อปริมาณ MA ใน Compatibilizer เพิ่มขึ้นทำให้มีความเข้ากันได้ระหว่างเฟสเพิ่มขึ้น T_dจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

การเตรียมคอมโพสิตกับอนุภาคซิลเวอร์จะใช้ PLA80LMB15 เนื่องจากการเติม Compatibilizer ได้ปรับปรุงให้มีความเข้ากันระหว่างเฟสเพิ่มมากขึ้น และมีสมบัติทางความร้อนที่ดีขึ้น แต่ไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลมากนัก เมื่อมีปริมาณ MA ใน Compatibilizer เพิ่มมากขึ้น จึงใช้สูตรการผสมนี้ในการปรับปรุงให้มีสมบัติต่างๆ ดีขึ้นโดยการเตรียมเป็นซิลเวอร์คอมโพสิตจะผสมอนุภาคซิลเวอร์ที่ 1 2 และ 3 wt% โดยใช้อนุภาคซิลเวอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคประมาณ 390 nm ในการศึกษาสัณฐานด้วย SEM พบว่าพบการรวมกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์และสังเกตเห็นการแยกเฟสเกิดขึ้นในคอมโพสิตเมื่อมีปริมาณอนุภาคซิลเวอร์ผสมมากขึ้น อาจเกิดจากความแตกต่างกันระหว่างขั้วของอนุภาคซิลเวอร์กับพอลิเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า Tensile modulus ไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ Tensile strength มีค่าที่ลดลงเมื่อมีปริมาณอนุภาคซิลเวอร์ผสมมากขึ้น และ Flexural modulus และ Flexural strength มีค่าที่ลดลงเมื่อมีปริมาณอนุภาคซิลเวอร์ผสมมากขึ้น ซึ่งการลดลงของสมบัติเชิงกลอาจเกิดจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์และการแยกเฟสที่เกิดขึ้น ในการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า T_g มีแนวโน้มที่มีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตเพิ่มขึ้นทั้งนี้อาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของ Free volume ในคอมโพสิต และ T_m ของคอมโพสิตยังคงเกิดแยกกันระหว่าง PLA และ PBS และมีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงจากพอลิเมอร์บริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณผลึกทั้งในส่วนของผลึก PLA และผลึกของ PBS ซึ่งอาเกิดจากการตัวเป็น Nucleating agent ของอนุภาคซิลเวอร์ และความเสถียรทางความร้อนก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตเพิ่มขึ้น

ผลการทดสอบสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่าความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตที่เพิ่มมากขึ้นทั้งในกรณีของเชื้อแบคทีเรียชนิดแกรมบวก (S. aureus) และแกรมลบ (E. coli) แต่ความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของซิลเวอร์คอมโพสิตต่อแบคทีเรียชนิดแกรมลบมีมากกว่า ซึ่งต้านได้มากกว่า 90% เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบมีชั้นของผนังเซลล์ที่บางกว่าแบคทีเรียแกรมบวก

อย่างไรก็ตามการผสมอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตส่งผลให้เฟสของพอลิเมอร์เกิดการแยกเฟสและอนุภาคซิลเวอร์มีการรวมกลุ่มกัน ซึ่งส่งต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตมีค่าด้อยลง ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงพื้นผิวของอนุภาคซิลเวอร์ที่มีความมีขั้วสูงชอบจับกลุ่มกันด้วย MPA โดยเป็นการ

ทำให้ผิวของอนุภาคซิลเวอร์มีสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชั่นเกาะอยู่ โดยเมื่อนำไปผสมเป็นคอมโพสิต ซึ่งผสม Ag-MPA ในปริมาณ 1 wt% กับ PLA80LMB15 เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการปรับปรุงผิวอนุภาคซิลเวอร์ (PLA80LMB15-Ag1%) พบว่าเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคซิลเวอร์ในคอมโพสิตมีขนาดของกลุ่มที่เล็กลงและมีการกระจายตัวไปทั่วทั้งคอมโพสิตมากขึ้นเมื่อสังเกตด้วย SEM และพบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้น แต่ทำให้ T_g มีค่าเพิ่มขึ้น มีปริมาณผลึกที่ลดลง และมีความเสถียรทางความร้อนลดลงเล็กน้อย สำหรับการต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่าไม่ส่งผลกระทบต่อการต้านแบคทีเรียชนิดแกรมลบ แต่ในแบคทีเรียชนิดแกรมบวกมีการต้านเชื้อลดลงเล็กน้อย

ข้อเสนอแนะ

1 ควรปรับปรุงการสังเคราะห์ PLA-MA ให้มี %Grafting ที่มากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมมีมากขึ้น

2 ควรปรับปรุงการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ให้มีขนาดที่เล็กลงมากขึ้น และปรับปรุงการกระจายตัวของอนุภาคในคอมโพสิตให้ดีขึ้น ซึ่งอาจช่วยส่งผลให้คอมโพสิตมีสมบัติเชิงกล ความเสถียรทางความร้อน และการป้องกันเชื้อแบคทีเรียที่ดีขึ้น

รายการอ้างอิง

[1] Lemmouchi, Yahia et al. "Plasticization of poly(lactide) with blends of tributyl citrate and low molecular weight poly(d,l-lactide)-b-poly(ethylene glycol) copolymers." European Polymer Journal 45 (2009): 2839-2848.

[2] Cohn, D. ,and A. Hotovely Salomon. "Designing biodegradable multiblock PCL/PLA thermoplastic elastomers." Biomaterials 26 (2005): 2297-2305.

[3] Zhang, Naiwen et al. "Preparation and properties of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend with glycidyl methacrylate as reactive processing agent." Journal of Materials Science 44 (2009): 250-256.

[4] สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. อุตสาหกรรมไบโอพลาสติก [Online]. Accessed 4 June 2012. Available from http://goo.gl/ulgVc

[5] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. สรุปรายงานการสัมมนา “Bioplastic Focus: พลาสติกชีวภาพ...นวัตกรรมเพื่อโลกสีเขียว” [Online]. Accessed 4 June 2012. Available from http://www.nia.or.th/bioplastics/download/events/42.pdf

[6] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegrable plastic) [Online]. Accessed 10 June 2012. Available from http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf

[7] เลิศวรสิริกุล, อมรรัตน์. "พอลิแลกติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้." วิศวกรรมสาร มก. 77 (2554): 99-110.

[8] Avérous, L., Belgacem Mohamed Naceur ,and Gandini Alessandro. "Chapter 21 - Polylactic Acid: Synthesis, Properties and Applications." In Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources, 433-450. Amsterdam: Elsevier, 2008.

[9] Chrissafis, K., K. M. Paraskevopoulos ,and D. N. Bikiaris. "Thermal degradation mechanism of poly(ethylene succinate) and poly(butylene succinate): Comparative study." Thermochimica Acta 435 (2005): 142-150.

[10] Bhatia, Amita et al. "An investigation of melt rheology and thermal stability of poly(lactic acid)/ poly(butylene succinate) nanocomposites." Journal of Applied Polymer Science 114 (2009): 2837-2847.

[11] Yokohara, Tadashi ,and Masayuki Yamaguchi. "Structure and properties for biomass-based polyester blends of PLA and PBS." European Polymer Journal 44 (2008): 677-685.

[12] Park, Jun Wuk ,and Seung Soon Im. "Morphological changes during heating in poly (L-lactic acid)/poly(butylene succinate) blend systems as studied by synchrotron X-ray scattering." Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics 40 (2002): 1931-1939.

[13] Liu, X. et al. "Thermal and mechanical properties of poly(lactic Acid) and poly(ethylene/butylene Succinate) blends." Journal of environmental polymer degradation 5 (1997): 225-235.

[14] Bhatia, A, Gupta, R, Bhattacharya, S and Choi, H. "Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application." Korea-Australia Rheology Journal 19 (2007): 25-131.

[15] Harada, Masaki et al. "Increased impact strength of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene succinate) blend composites by using isocyanate as a reactive processing agent." Journal of Applied Polymer Science 106 (2007): 1813-1820.

[16] Zeng, Jian-Bing et al. "A novel biodegradable multiblock poly(ester urethane) containing poly(l-lactic acid) and poly(butylene succinate) blocks." Polymer 50 (2009): 1178-1186.

[17] Ho, Chang-Hong et al. "Synthesis and characterization of TPO-PLA copolymer and its behavior as compatibilizer for PLA/TPO blends." Polymer 49 (2008): 3902-3910.

[18] Chen, Li et al. "Poly(l-lactide)/starch blends compatibilized with poly(l-lactide)-g-starch copolymer." Carbohydrate Polymers 65 (2006): 75-80.

[19] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลย, สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ. แบคทีเรียในอาหาร (Bacteria in food) [Online]. Accessed 5 October 2012. Available from http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR19.pdf

[20] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลย, สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ. แบคทีเรียในอาหาร (Bacteria in food) [Online]. Accessed 5 October 2012. Available from http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR19.pdf

[21] กงบังเกิด, ธีรพร. จุลชีววิทยาอาหาร [Online]. Accessed 5 October 2012. Available from http://conf.agi.nu.ac.th/agmis/download/publication/41_file.pdf

[22] Antibacterials startups with drugs targeting gram-nevagive bacteria and infections draw serious venture capital [Online]. Accessed 24 October 2012. Available from http://tommytoy.typepad.com/tommy-toy-pbt-consultin/2011/11/antibacterials-startups-draw-venture-capital-for-drugs-targeting-gram-nevagive-bacteria-and-infectio.html

[23] Feng, Q. L. et al. "A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on escherichia coli and staphylococcus aureus." Journal of biomedical materials research 52 (2000): 662-668.

[24] พร้อมพงศ์ เพียรพินิจธรรม, ชูชาติ ธรรมเจริญ, สนอง เอกสิทธิ์. อนุภาคนาโนของเงินฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้อย่างไร? [Online]. Accessed 10 June 2012. Available from http://www.sru.research.chula.ac.th/service/AgNPkillbacterial.pdf

[25] Guzman, Maribel, Jean Dille ,and Stephane Godet. "Synthesis and antibacterial activity of silver nanoparticles against gram-positive and gram-negative bacteria." Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine 8 (2012): 37-45.

[26] Rai, Mahendra, Alka Yadav ,and Aniket Gade. "Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials." Biotechnology Advances 27 (2009): 76-83.

[27] Sharma, Virender K., Ria A. Yngard ,and Yekaterina Lin. "Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities." Advances in Colloid and Interface Science 145 (2009): 83-96.

[28] Pan, Jun et al. "Grafting reaction of poly(D,L)lactic acid with maleic anhydride and hexanediamine to introduce more reactive groups in its bulk." Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials 74B (2005): 476-480.

[29] Zhu, Rui. "Preparation of maleic anhydride grafted poly(lactid acid) (pla) and its compatibilization effects on pla/soy protein composites." Master of Science Washington State University, 2011.

[30] Teramoto, Naozumi et al. "Thermal properties and biodegradability of the copolymers of l-lactide, ъ-caprolactone, and ethylene glycol oligomer with maleate units and their crosslinked products." Polymer 45 (2004): 7927-7933.

[31] Janardhanan, Revathi et al. "Synthesis and surface chemistry of nano silver particles." Polyhedron 28 (2009): 2522-2530.

[32] Vasiliev, Aleksey N. et al. "Highly dispersible polymer-coated silver Nanoparticles." Surface and Coatings Technology 203 (2009): 2841-2844.

[33] Shibata, Mitsuhiro, Yusuke Inoue ,and Masanao Miyoshi. "Mechanical properties, morphology, and crystallization behavior of blends of poly(l-lactide) with poly(butylene succinate-co-l-lactate) and poly(butylene succinate)." Polymer 47 (2006): 3557-3564.

[34] Ren, Jie et al. "Preparation, characterization and properties of binary and ternary blends with thermoplastic starch, poly(lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate)." Carbohydrate Polymers 77 (2009): 576-582.

[35] Zhu, Wenfu et al. "Miscibility, crystallization, and mechanical properties of poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate)/ poly(butylene succinate) blends." Journal of Applied Polymer Science 114 (2009): 3923-3931.

[36] Hassouna, Fatima et al. "New approach on the development of plasticized polylactide (PLA): Grafting of poly(ethylene glycol) (PEG) via reactive extrusion." European Polymer Journal 47 (2011): 2134-2144.

[37] Carlson, Denise et al. "Maleation of polylactide (PLA) by reactive extrusion." Journal of Applied Polymer Science 72 (1999): 477-485.

[38] Xiao, Guoqi et al. "Bulk ring-opening polymerization (ROP) of L-lactide catalyzed by Ni(ii) and Ni(ii)-Sm(iii) complexes based on a salen-type schiff-base ligand." Polymer Chemistry 2 (2011): 659-664.

[39] Meng, Qingkai, Marie-Claude Heuzey ,and Pierre J. Carreau. "Control of thermal degradation of polylactide/clay nanocomposites during melt processing by chain extension reaction." Polymer Degradation and Stability 97 (2012): 2010-2020.

[40] Qi, Rongrong, Zhefeng Chen ,and Chixing Zhou. "Solvothermal preparation of maleic anhydride grafted onto acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer (ABS)." Polymer 46 (2005): 4098-4104.

[41] Li, Hua-Ming et al. "Preparation and characterization of maleic anhydride-functionalized syndiotactic polystyrene." Polymer 43 (2002): 5455-5461.

[42] Zeng, Jian-Bing et al. "Bio-based blends of starch and poly(butylene succinate) with improved miscibility, mechanical properties, and reduced water absorption." Carbohydrate Polymers 83 (2011): 762-768.

[43] Jang, Woo Yeul et al. "Thermal properties and morphology of biodegradable PLA/starch compatibilized blends." Journal of Industrial and Engineering Chemistry-Seoul- 13 (2007): 457-464.

[44] George, S., K. T. Varughese ,and S. Thomas. "Thermal and crystallisation behaviour of isotactic polypropylene/nitrile rubber blends." Polymer 41 (2000): 5485-5503.

[45] Radheshkumar, C. ,and Helmut M₹₩nstedt. "Morphology and mechanical properties of antimicrobial polyamide/silver composites." Materials Letters 59 (2005): 1949-1953.

[46] Chou, P. M. et al. "Evaluation of the flexural properties and bioactivity of bioresorbable PLLA/PBSL/CNT and PLLA/PBSL/TiO2 nanocomposites." Composites Part B: Engineering 43 (2012): 1374-1381.

[47] Balakrishnan, Harintharavimal et al. "Novel toughened polylactic acid nanocomposite: Mechanical, thermal and morphological properties." Materials & Design 31 (2010): 3289-3298.

[48] Lee, Jong Hoon et al. "Thermal and mechanical characteristics of poly(l-lactic acid) nanocomposite scaffold." Biomaterials 24 (2003): 2773-2778.

[49] Fortunati, E. et al. "Development and thermal behaviour of ternary PLA matrix composites." Polymer Degradation and Stability 95 (2010): 2200-2206.

[50] Mbhele, Z. H. et al. "Fabrication and Characterization of Silver-Polyvinyl Alcohol Nanocomposites." Chemistry of Materials 15 (2003): 5019-5024.

[51] Amoli, Behnam Meschi et al. "Thiocarboxylate functionalization of silver nanoparticles: effect of chain length on the electrical conductivity of nanoparticles and their polymer composites." Journal of Materials Chemistry 22 (2012): 20048-20056.

[52] Bagaria, Hitesh G. et al. "Understanding Mercapto Ligand Exchange on the Surface of FePt Nanoparticles." Langmuir 22 (2006): 7732-7737.

[53] Yonezawa, Tetsu ,and Toyoki Kunitake. "Practical preparation of anionic mercapto ligand-stabilized gold nanoparticles and their immobilization." Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 149 (1999): 193-199.

[54] Manz, Connie et al. "Dispersibility of organically coated silver nanoparticles in organic media." Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 385 (2011): 201-205.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบการดึง (Tensile test)

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบการดึงของ PLA

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	1,090	59.5	8.35
2	1,010	58.8	6.97
3	997	58.1	7.35
4	968	59.5	7.06
5	964	59.2	7.45
6	961	59.5	7.63
7	942	56.9	7.39
8	936	59.4	8.33
9	883	58.8	7.82
10	853	58.3	7.98

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบการดึงของ PBS

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	224	31.5	23.8
2	229	31.4	21.9
3	231	30.7	21.6
4	237	31.8	21.6
5	230	31.2	21.3
6	227	30.9	20.8
7	224	29.7	20.4
8	231	30.4	20.4
9	230	26.2	15.6
10	255	22.2	11.1

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบการดึงของ PLA90

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	823	50.8	82.6
2	853	49	73.4
3	901	52.3	53.9
4	888	51.5	51.1
5	870	51.5	48.1
6	921	52.1	45.7
7	929	52.1	43.7
8	840	51.2	34.7
9	888	51.7	32.4
10	927	52.3	30.6

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบการดึงของ PLA80

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	824	49.1	70.9
2	795	49.6	62.5
3	792	49	55.5
4	841	49.2	54.9
5	830	49.1	51
6	817	48.1	50.9
7	845	49.7	49.1
8	832	49.1	48.8
9	842	49.8	47.4
10	812	48.9	42.8

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบการดึงของ PLA70

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	741	44.7	90.3
2	814	45.7	83.1
3	759	44.6	80.8
4	742	44.8	78.9
5	786	44.7	78.7
6	746	44.9	75.6
7	748	44.7	65.7
8	727	44.5	59.6
9	759	44	56.4
10	742	44.4	48.8

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB15

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	817	49	75.6
2	876	49.9	71.7
3	813	49	70.8
4	760	47.8	55.9
5	812	47.5	53.3
6	841	47.4	51.9
7	834	47.3	48.5
8	831	46.9	48.4
9	893	47.3	48.3
10	817	49.6	46.5

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB30

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	824	48.1	73.8
2	833	49.2	73
3	853	50	69.9
4	792	47.5	69.7
5	835	48.5	69.6
6	808	47.7	69
7	811	49.1	67.8
8	824	49.3	62
9	817	49.4	25.3
10	705	47.7	8.02

ตารางที่ 22 ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB45

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	830	46.7	144
2	816	46.7	119
3	841	48.1	88.6
4	830	47.9	85.9
5	821	46.2	83.2
6	833	47.9	76.9
7	832	47.6	68.2
8	760	48.6	59.7
9	865	53	26.4
10	789	47.4	22.3

ตารางที่ 23 ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB15-Ag1%

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	768	46.6	50.4
2	753	46.6	35.6
3	880	47.1	42.7
4	865	46.3	42.2
5	869	46.4	39.9
6	807	48.5	37.5
7	825	47	34
8	877	46.5	32.5
9	819	46.2	32.2
10	849	47.3	30.9

ตารางที่ 24 ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB15-Ag2%

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	896	46.8	7.73
2	887	46.3	51.3
3	875	47.3	54.1
4	870	47.3	39.7
5	865	47.2	42.2
6	835	47.5	51
7	827	46.4	56
8	869	42.1	5.53
9	824	47.1	6.96
10	820	47.6	43

ตารางที่ 25 ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB15-Ag3%

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	891	43.9	5.84
2	857	36.9	5.24
3	853	35.9	4.82
4	852	37.1	4.69
5	809	36.3	5.57
6	772	33.1	5.08
7	767	37.3	5.55
8	757	40.4	6.15
9	740	35	5.42
10	718	41.9	6.92

ตารางที่ 26 ผลการทดสอบการดึงของ PLA80LMB15-Ag1%-MPA

ตัวอย่าง	Modulus (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
1	841	51.10	46.00
2	843	49.50	56.00
3	854	49.50	45.40
4	859	51.10	57.50
5	869	52.10	44.50
6	873	50.80	45.60
7	888	51.90	49.80
8	895	52.40	45.70
9	934	52.00	55.10
10	949	52.80	43.90

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบการดัดโค้ง (Flexural test)

ตารางที่ 27 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA

ตัวอย่าง	Flexural modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)
1	4,348	109.13
2	4,322	104.79
3	4,322	108.69
4	4,319	107.06
5	4,313	108.62
6	4,272	109.50
7	4,271	108.83
8	4,161	108.64
9	4,159	106.78
10	3,626	96.81

ตารางที่ 28 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PBS

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	520	24.49
2	517	24.18
3	515	23.99
4	514	24.27
5	513	23.69
6	513	24.31
7	509	23.84
8	509	23.80
9	505	23.22
10	491	23.79

ตารางที่ 29 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA90

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	2,778	82.06
2	2,746	81.13
3	2,725	80.00
4	2,711	80.39
5	2,707	79.10
6	2,707	80.09
7	2,699	80.10
8	2,673	79.82
9	2,669	79.38
10	2,624	79.46

ตารางที่ 30 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	2,900	83.72
2	2,869	84.85
3	2,862	82.83
4	2,861	83.51
5	2,861	83.23
6	2,851	82.01
7	2,841	82.71
8	2,757	80.89
9	2,743	80.14
10	2,493	75.81

ตารางที่ 31 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA70

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	2,805	81.63
2	2,588	77.35
3	2,503	75.18
4	2,476	74.24
5	2,387	73.34
6	2,359	71.88
7	2,243	69.12
8	2,242	69.56
9	2,230	69.08
10	2,202	69.30

ตารางที่ 32 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB15

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	3172	86.92
2	3149	89.48
3	3132	87.04
4	3108	87.78
5	3092	86.32
6	3081	85.91
7	3055	85.04
8	3047	85.74
9	3031	84.50
10	2972	84.60

ตารางที่ 33 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB30

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	3013	85.55
2	2951	83.50
3	2948	82.81
4	2902	80.89
5	2872	81.42
6	2825	81.72
7	2771	79.48
8	2757	77.67
9	2725	77.87
10	2657	75.90

ตารางที่ 34 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB45

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	2954	82.26
2	2904	81.70
3	2888	80.83
4	2888	81.41
5	2885	81.55
6	2871	81.81
7	2871	81.27
8	2861	80.29
9	2803	80.40
10	2723	77.44

ตารางที่ 35 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB15-Ag1%

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	2622	73.15
2	2,620	77.95
3	2617	74.90
4	2593	73.69
5	2586	73.34
6	2578	72.06
7	2555	73.17
8	2535	71.67
9	2522	72.18
10	2,504	75.18

ตารางที่ 36 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB15-Ag2%

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	2661	74.55
2	2646	73.98
3	2628	73.24
4	2619	73.65
5	2606	72.40
6	2577	73.38
7	2558	70.44
8	2548	72.94
9	2539	72.11
10	2537	69.64

ตารางที่ 37 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB15-Ag3%

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	2904	52.58
2	2874	63.55
3	2803	52.22
4	2793	62.91
5	2783	62.91
6	2756	56.08
7	2730	63.01
8	2703	50.99
9	2683	50.42
10	2650	49.87

ตารางที่ 38 ผลการทดสอบการดัดโค้งของ PLA80LMB15-Ag1%-MPA

ตัวอย่าง	Flexural modulus(MPa)	Flexural strength (MPa)
1	3,269	91.54
2	3,241	90.96
3	3,177	90.81
4	3,123	88.53
5	3,088	87.93
6	3,080	86.86
7	3,076	87.39
8	2,766	82.26
9	2,742	80.79
10	2,722	80.17

ภาคผนวก ค

ผลการไตเตรด PLA-MA และ PLA-MA-PBS

ตารางที่ 39 ผลการไตเตรด PLA-MA ด้วย KOH

ตัวอย่าง	ปริมาตร KOH (ml)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	%Grafting
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
LM15	29.0	33.5	35.0	32.5	3.12	3.19
LM30	49.0	50.0	54.0	51.0	2.65	5.00
LM45	58.0	58.5	62.0	59.5	2.18	5.83

ตารางที่ 40 ผลการไตเตรด PLA-MA-PBS ด้วย KOH

ตัวอย่าง	ปริมาตร KOH (ml)			ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	Grafting%
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
LMB15	4.0	4.0	4.0	4.0	0	0.39
LMB30	6.0	6.0	6.0	6.0	0	0.59
LMB45	6.0	6.0	6.0	6.0	0	0.59

การคำนวณค่า % Grafting

สมการ

$$\% \text{ Grafting} = \frac{98 \times N \times V}{2W} \times 100 \qquad (4)$$

ตัวแปร

- 98 คือมวลโมเลกุลของ Maleic anhydride (g/mol)
- N คือความเข้มข้นของ KOH (mol/l)
- V คือปริมาตรของ KOH (l)
- W คือน้ำหนักของตัวอย่าง (g)

ตัวอย่าง ไตเตรดตัวอย่าง LM15 จำนวน 2 g ด้วย KOH ความเข้มข้น 0.01 mol/l ซึ่งใช้ KOH จำนวน 32.5 ml ในการเปลี่ยนสี Indicator

วิธีคำนวณ

แทนค่าในสมการ (4)

$$\% \text{ Grafting} = \frac{98(\text{g/mol}) \times 0.01(\text{mol/l}) \times 32.5 \times 10^{-3}(\text{l})}{2 \times 0.5(\text{g})} \times 100$$

$$= 3.19\ \%$$

ภาคผนวก ง

การคำนวณ %Crystallinity

ตารางที่ 41 ค่า $\triangle H_c^{/}$ $\triangle H_m$ และ %Crystallinity ของตัวอย่างต่างๆ

ตัวอย่าง	PLA			PBS	
	$\triangle H_c^{/}$(J/g)	$\triangle H_m$(J/g)	Crystallinity(%)	$\triangle H_m$(J/g)	Crystallinity(%)
PLA	-	2.85	3.06	-	-
PBS	-	-	-	85.52	40.72
PLA90	23.02	31.86	10.56	3.95	18.81
PLA80	22.03	27.75	7.69	10	23.81
PLA70	22.03	26.7	7.17	18.81	29.86
PLA80LMB15	20.71	29.13	11.32	10.45	24.88
PLA80LMB30	19.46	27.39	10.66	11.07	26.36
PLA80LMB45	21.27	28.75	10.05	12.16	28.95
PLA80LMB15-Ag1%	20.4	30.89	14.10	12.62	30.05
PLA80LMB15-Ag2%	18.91	29.43	14.14	13.2	31.43
PLA80LMB15-Ag3%	14.35	28.71	19.30	12.41	29.55
PLA80LMB15-Ag1%-MPA	13.47	23.58	13.59	8.05	19.17

การคำนวณหาปริมาณผลึก

สมการ

$$\%\text{Crystallinity} = \frac{\triangle H_m\,(J/g) - \triangle H_c^{/}(J/g)}{X\triangle H_c^{o}(J/g)} \times 100 \qquad (5)$$

ตัวแปร

- $\triangle H_m$ คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว
- $\triangle H_c^{/}$ คือ ความร้อนแฝงของการเกิดผลึก
- $\triangle H_c^{o}$ คือ ความร้อนแฝงของการเกิดผลึก 100%

- X คือ สัดส่วนของพอลิเมอร์ในพอลิเมอร์ผสม

ตัวอย่าง ในการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วย DSC ตัวอย่าง PLA90 ซึ่งมีสัดส่วนระหว่าง PLA กับ PBS ที่ 90/10 ซึ่งหลังจากการทดสอบได้ $\triangle H_c'$ และ $\triangle H_m$ ของ PLA เท่ากับ 23.02 J/g และ 31.86 J/g ตามลำดับ ส่วน $\triangle H_m$ ของ PBS เท่ากับ 3.95 J/g โดย PLA และ PBS มีความร้อนแฝงของการเกิดผลึก 100% ($\triangle H_c^o$) เท่ากับ 93 [27] และ 210 J/g [29] ตามลำดับ

วิธีการคำนวณ %Crystallinity ของ PLA

แทนค่าในสมการ (5)

$$\%\text{Crystallinity} = \frac{31.86\ (\text{J/g}) - 23.02\ (\text{J/g})}{0.90 \times 93\ (\text{J/g})} \times 100$$

$$= 10.56\ \%$$

วิธีการคำนวณ %Crystallinity ของ PBS

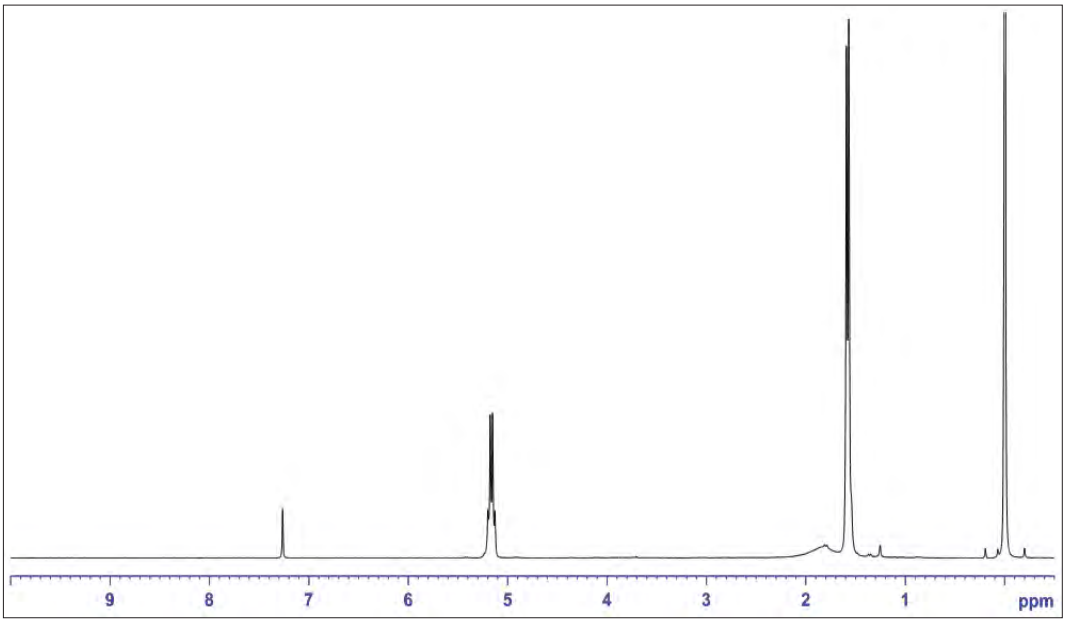
แทนค่าในสมการ (5)

$$\%\text{Crystallinity} = \frac{3.95\ (\text{J/g})}{0.10 \times 210\ (\text{J/g})} \times 100$$

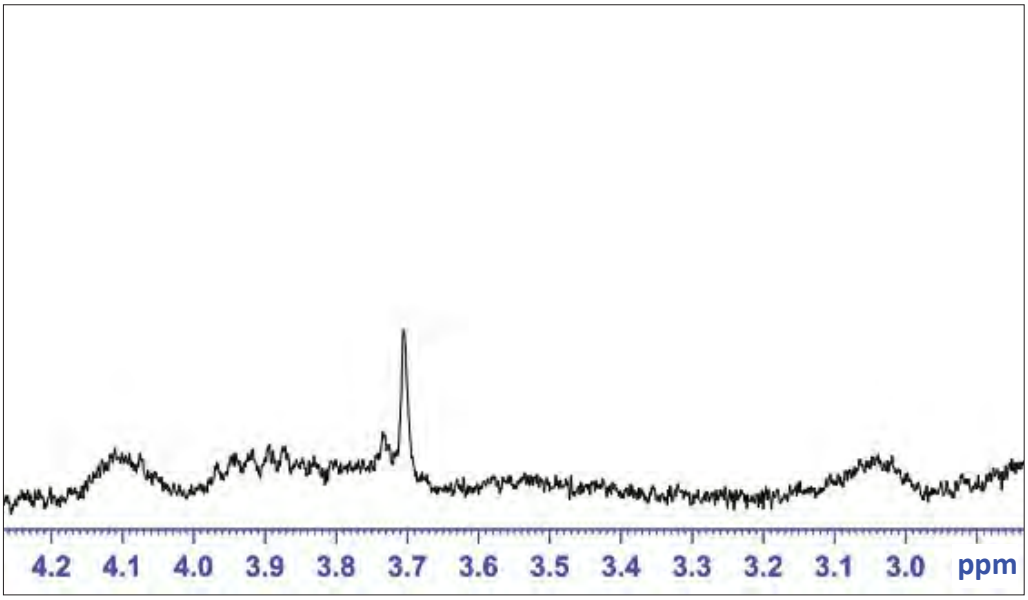
$$= 18.81\ \%$$

ภาคผนวก จ

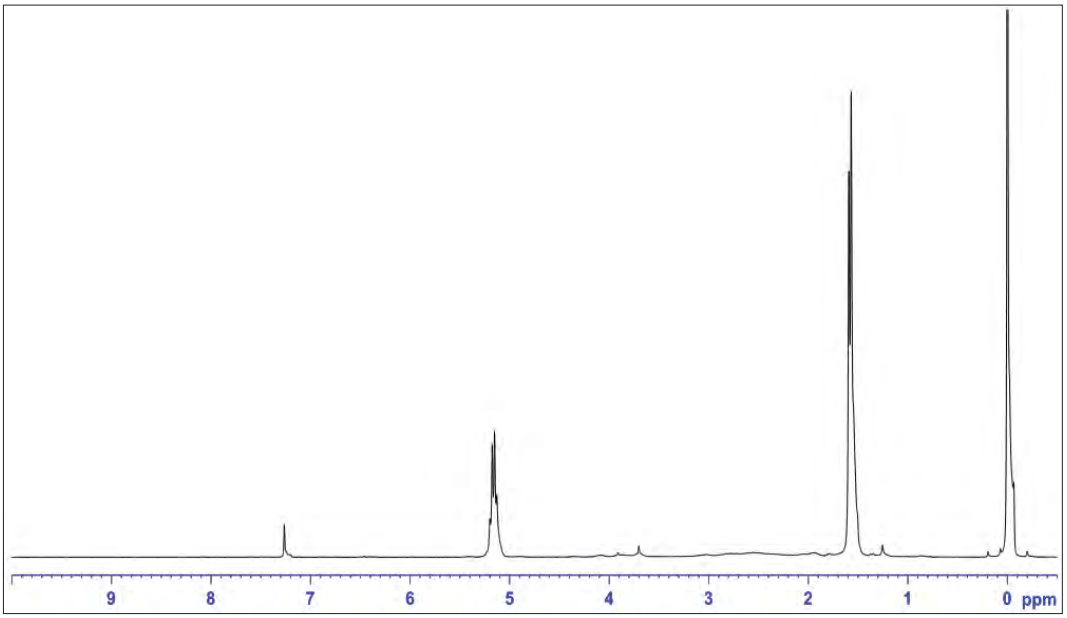
^{1}H NMR spectra



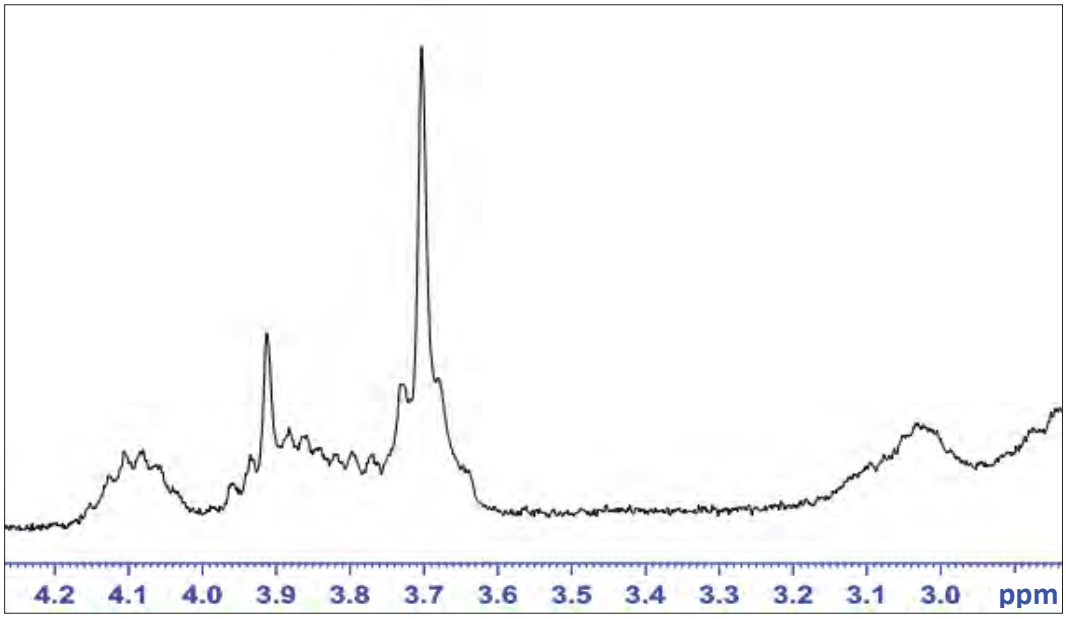
ภาพที่ 57 ^{1}H NMR spectra ของ LM15



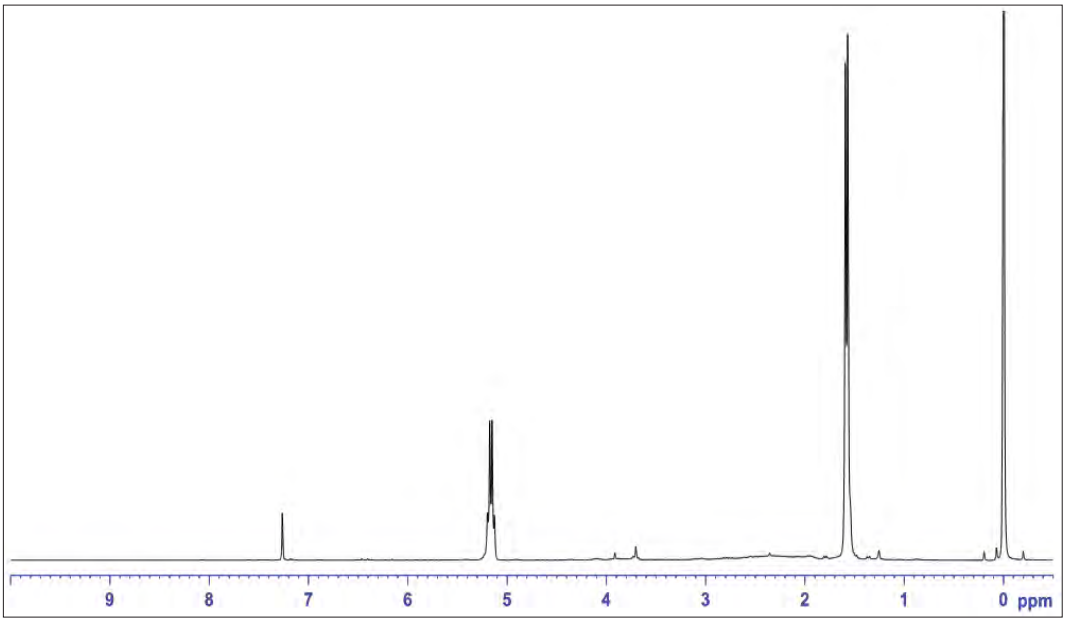
ภาพที่ 58 ภาพขยาย ^{1}H NMR spectra ของ LM15



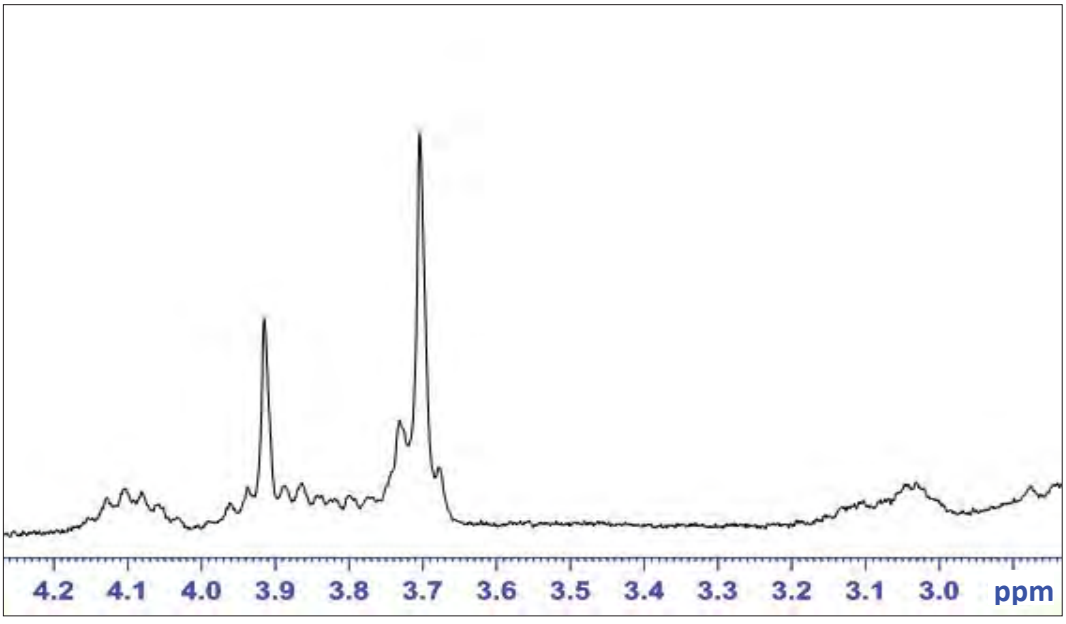
ภาพที่ 59 ^{1}H NMR spectra ของ LM30



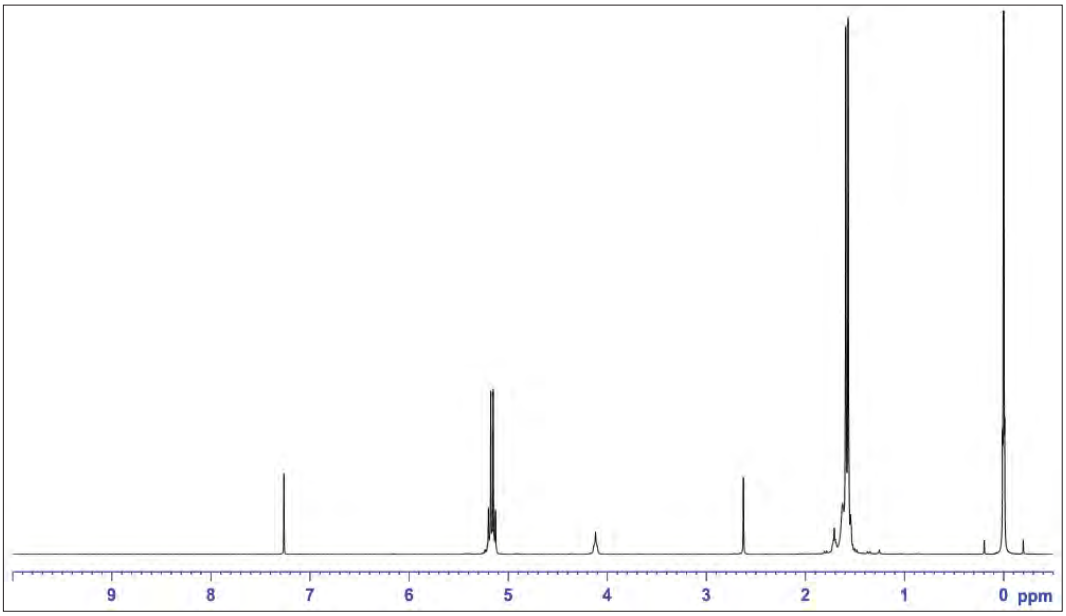
ภาพที่ 60 ภาพขยาย ^{1}H NMR spectra ของ LM30



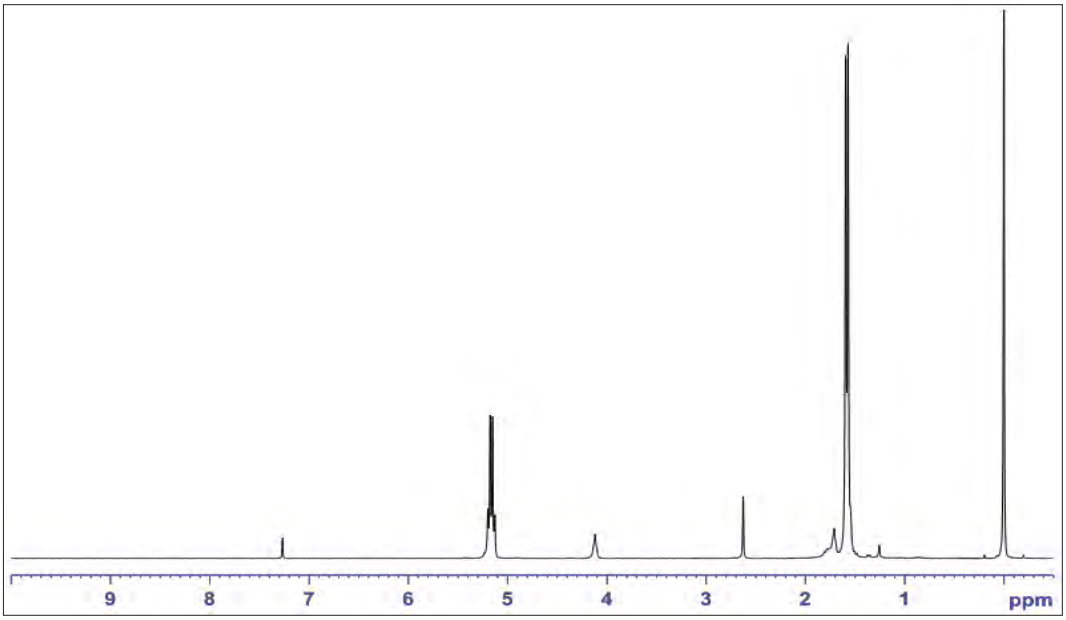
ภาพที่ 61 ^{1}H NMR spectra ของ LM45



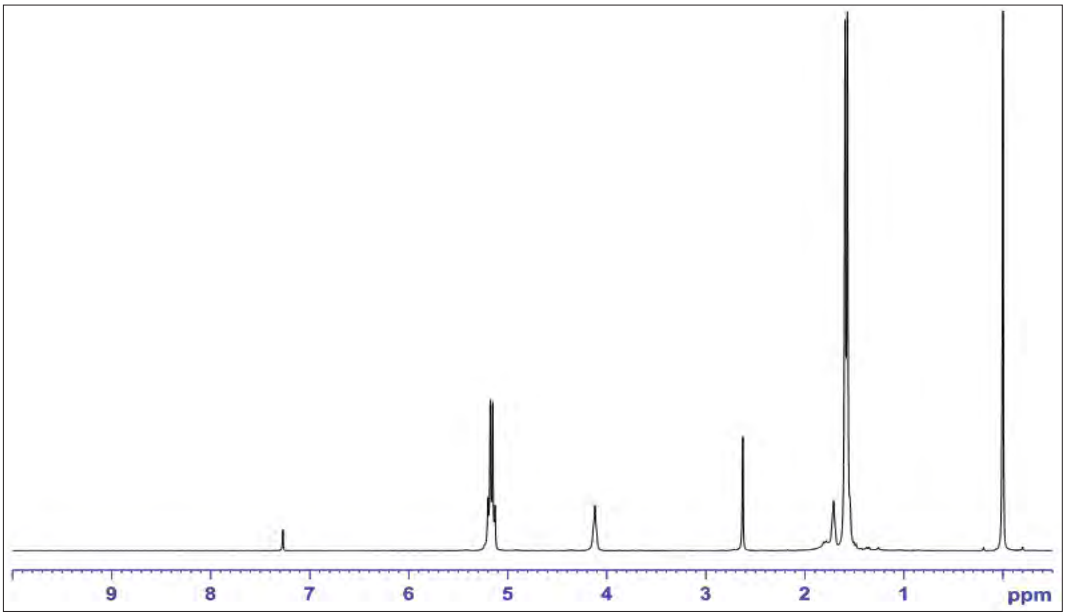
ภาพที่ 62 ภาพขยาย ^{1}H NMR spectra ของ LM45



ภาพที่ 63 ^{1}H NMR spectra ของ LMB15 หลังจากแยกออกมาจากการละลายใน THF



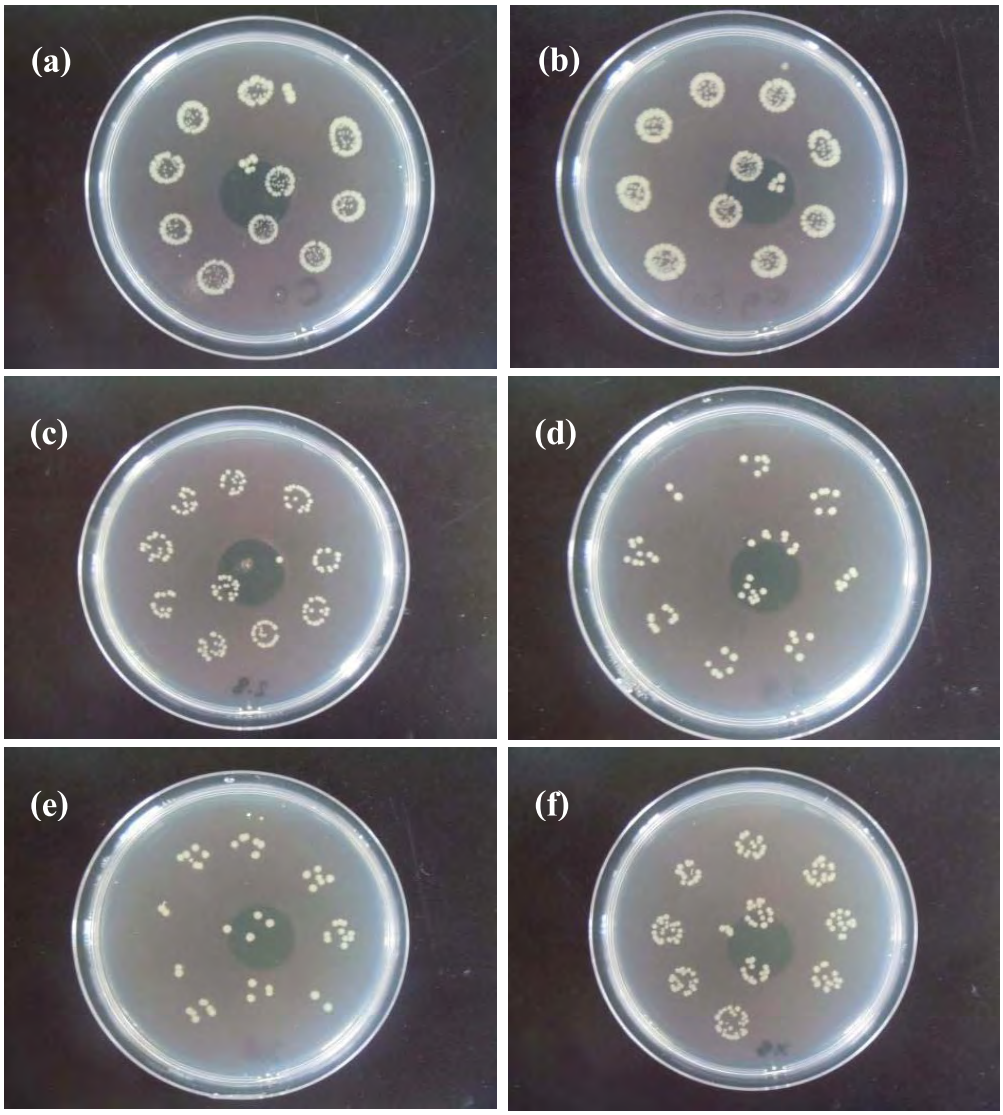
ภาพที่ 64 ^{1}H NMR spectra ของ LMB30 หลังจากแยกออกมาจากการละลายใน THF



ภาพที่ 65 ^{1}H NMR spectra ของ LMB45 หลังจากแยกออกมาจากการละลายใน THF

ภาคผนวก ฉ

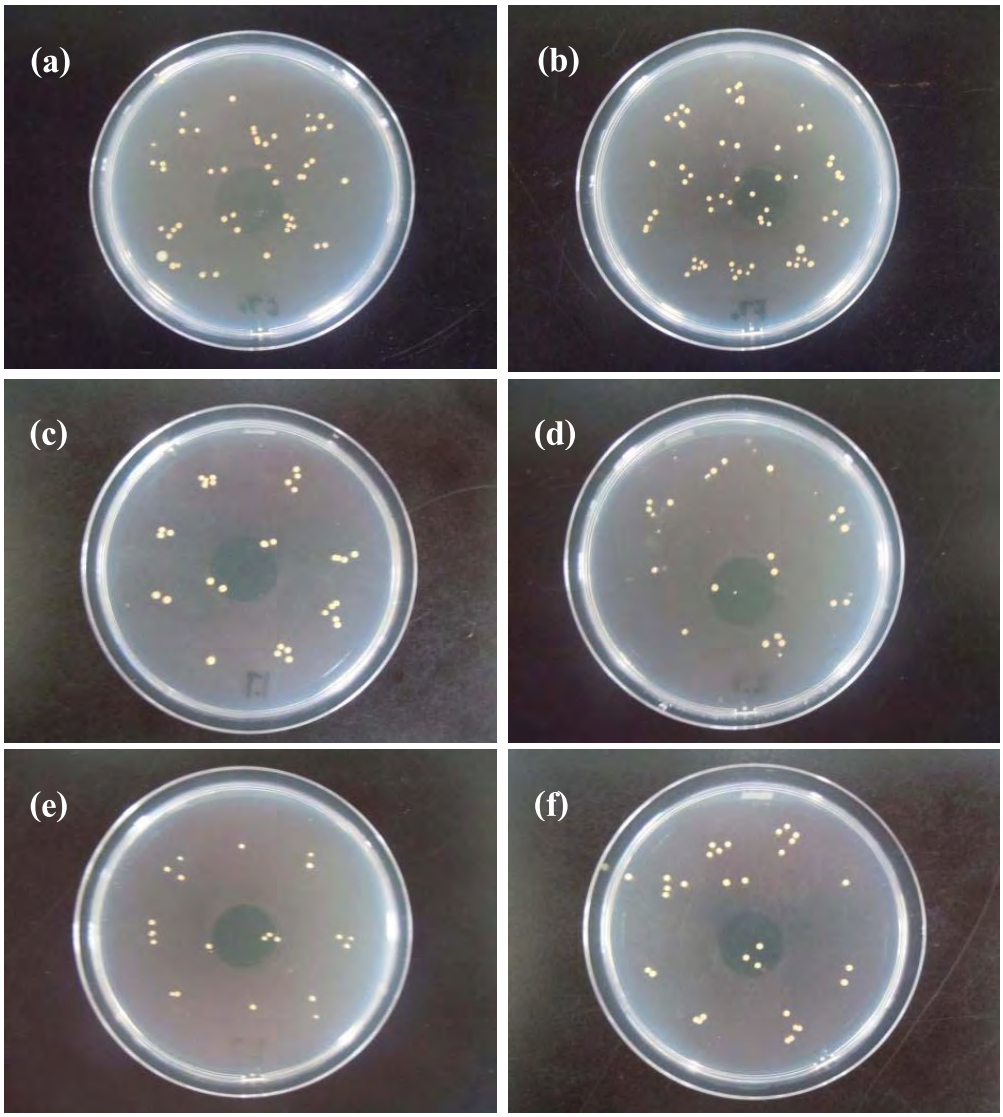
ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย และการคำนวณ



ภาพที่ 66 ผลการทดสอบต้านเชื้อแบคทีเรีย E. coli ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตชนิดต่างๆ

(a) Control (b) PLA80LMB15 (c) PLA80LMB15-Ag1% (d) PLA80LMB15-Ag2%

(e) PLA80LMB15-Ag3% และ (f) PLA80LMB15-Ag1%-MPA



ภาพที่ 67 ผลการทดสอบต้านเชื้อแบคทีเรีย S. aureus ของ PLA/PBS/ซิลเวอร์คอมโพสิตชนิดต่างๆ

(a) Control (b) PLA80LMB15 (c) PLA80LMB15-Ag1% (d) PLA80LMB15-Ag2%

(e) PLA80LMB15-Ag3% และ (f) PLA80LMB15-Ag1%-MPA

ตารางที่ 42 ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย E. coli

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น	จำนวนโคโลนี	CFU	Antibacterial%
Control	10^{-9}	328	$3.28x10^{12}$	-
PLA80-15	10^{-9}	343	$3.43x10^{12}$	-
PLA80LMB15-Ag1%	10^{-8}	169	$1.69\ x10^{11}$	95.07%
PLA80LMB15-Ag2%	10^{-8}	72	$7.2\ x10^{10}$	97.90%
PLA80LMB15-Ag3%	10^{-8}	68	$6.8\ x10^{10}$	98.02%
PLA80LMB15-Ag1%-MPA	10^{-8}	179	$1.79\ x10^{11}$	94.78%

ตารางที่ 43 ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรีย S. aureus

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น	จำนวนโคโลนี	CFU	Antibacterial%
Control	10^{-7}	61	$6.1\ x10^{9}$	-
PLA80LMB15	10^{-7}	62	$6.2x10^{9}$	-
PLA80LMB15-Ag1%	10^{-7}	35	$3.5\ x10^{9}$	43.55%
PLA80LMB15-Ag2%	10^{-7}	33	$3.3\ x10^{9}$	46.77%
PLA80LMB15-Ag3%	10^{-7}	28	$2.8\ x10^{9}$	54.84%
PLA80LMB15-Ag1%-MPA	10^{-7}	38	$3.8\ x10^{9}$	38.71%

ตารางที่ 44 Dilution factor ของแต่ละหลอดทดลองที่มีการเจือจางเชื้อแบคทีเรีย

หลอดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรีย	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Dilution factor	10	10^{2}	10^{3}	10^{4}	10^{5}	10^{6}	10^{7}	10^{8}	10^{9}

การคำนวณหาจำนวนเชื้อแบคทีเรีย

สมการ

$$\text{CFU/ml} = \frac{\text{จำนวนโคโลนีที่นับได้ x Dilution Factor}}{\text{ปริมาตรที่หยดลงในจานเพาะเชื้อ (0.1 ml)}} \quad (6)$$

การคำนวณ % Antibacteria

สมการ

$$\%\ \text{Antibacteria} = \frac{\text{CFU/ml ของ control - CFU/ml ของตัวอย่าง}}{\text{CFU/ml ของ control}} \times 100 \quad (7)$$

ตัวอย่าง การเพาะเชื้อ E.coli ในตัวอย่าง PLA80LMB15 นับจำนวนโคโลนีที่ความเข้มข้น 10^{-9} ได้จำนวน 343 โคโลนี และการเพาะเชื้อ E.coli ในตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% นับจำนวนโคโลนีที่ความเข้มข้น 10^{-8} ได้จำนวน 169 โคโลนี

หาจำนวนเชื้อแบคทีเรียใน PLA80LMB15 (ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ) แทนค่าในสมการ (6)

$$\text{CFU/ml} = \frac{343 \times 10^{9}}{0.1\ (\text{ml})}$$

$$= 3.43 \times 10^{12} \quad \text{CFU/ml}$$

หาจำนวนเชื้อแบคทีเรียตัวอย่าง PLA80LMB15-Ag1% แทนค่าในสมการ (6)

$$\text{CFU/ml} = \frac{169 \times 10^{8}}{0.1\ (\text{ml})}$$

$$= 1.69 \times 10^{11} \quad \text{CFU/ml}$$

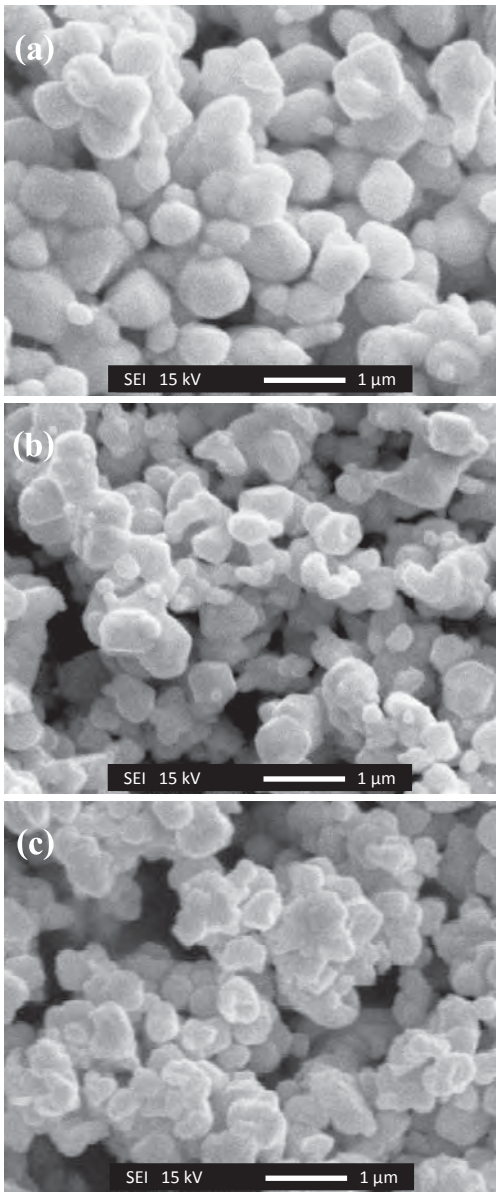
การคำนวณ % Antibacteria แทนค่าในสมการ (7)

$$\%\ \text{Antibacteria} = \frac{3.43 \times 10^{12} - 1.69 \times 10^{11}}{3.43 \times 10^{12}} \times 100$$

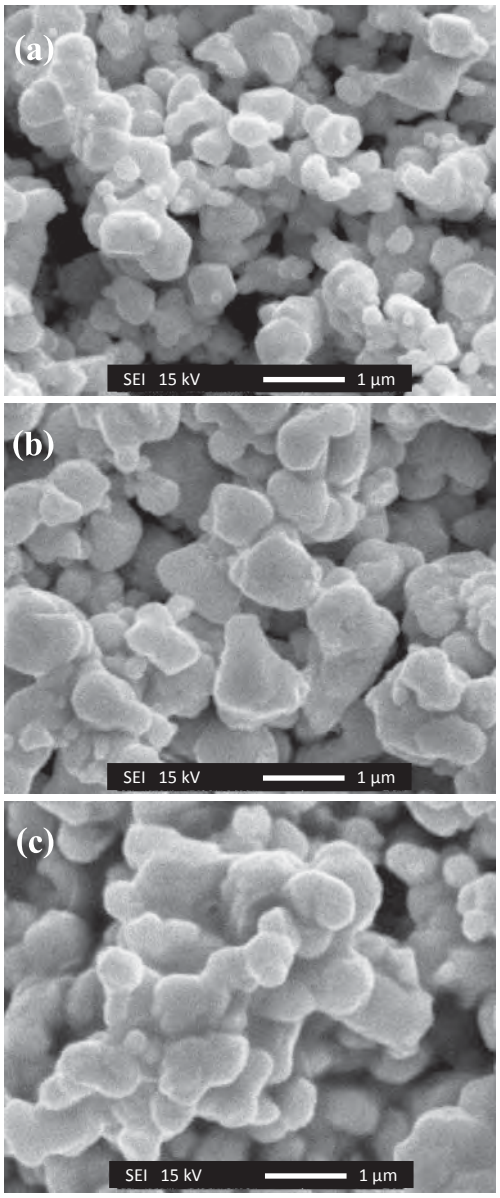
$$= 94.84\%$$

ภาคผนวก ช

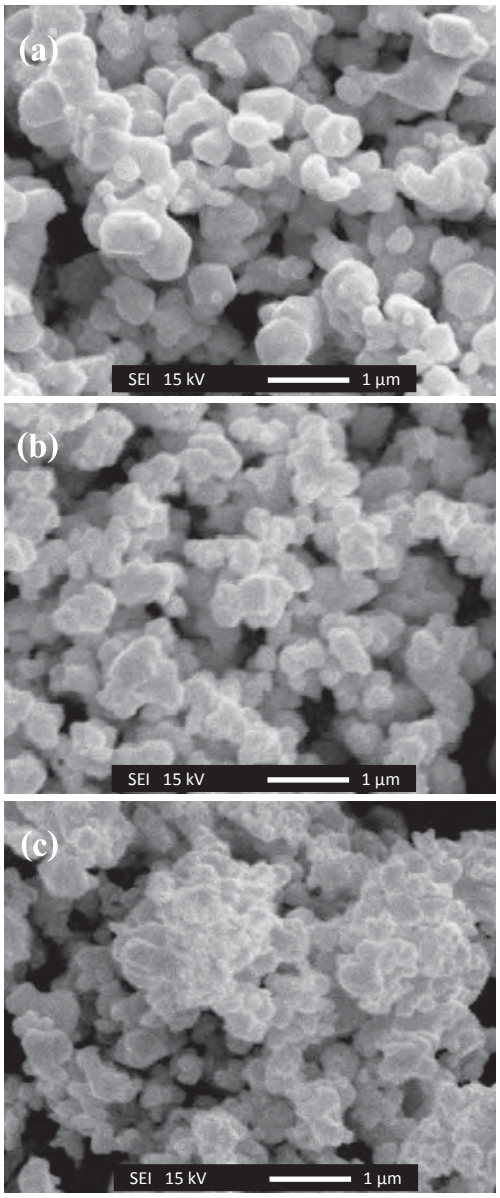
SEM อนุภาคซิลเวอร์



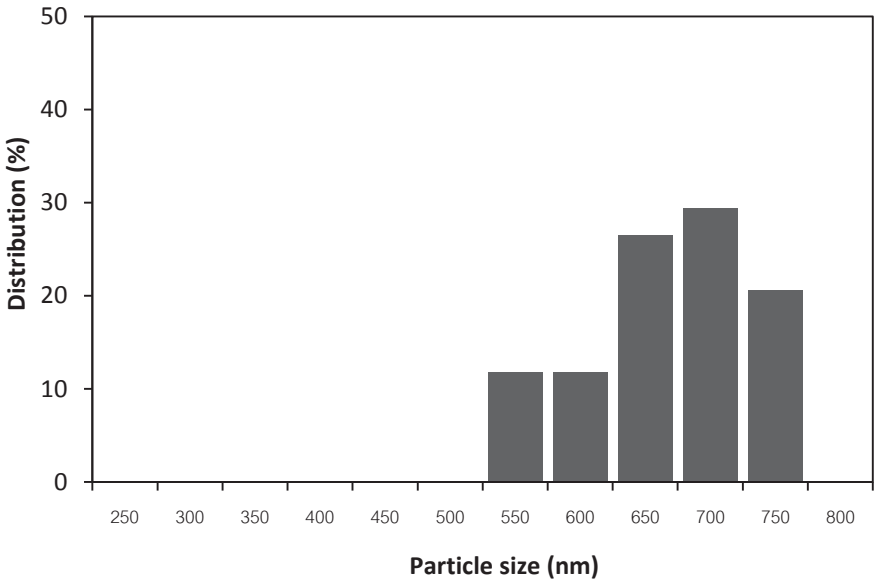
ภาพที่ 68 SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Diethyl amine โดย (a) 25 mM (Ag1) (b) 50 mM (Ag2) และ (c) 100 mM (Ag3) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า



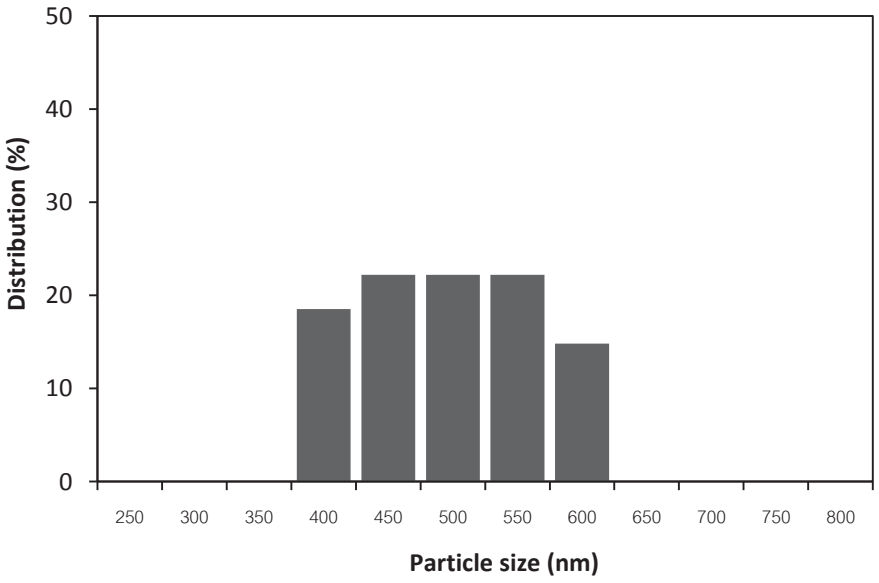
ภาพที่ 69 SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Glucose โดย (a) 25 mM (Ag2) (b) 50 mM (Ag4) และ (c) 100 mM (Ag5) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า



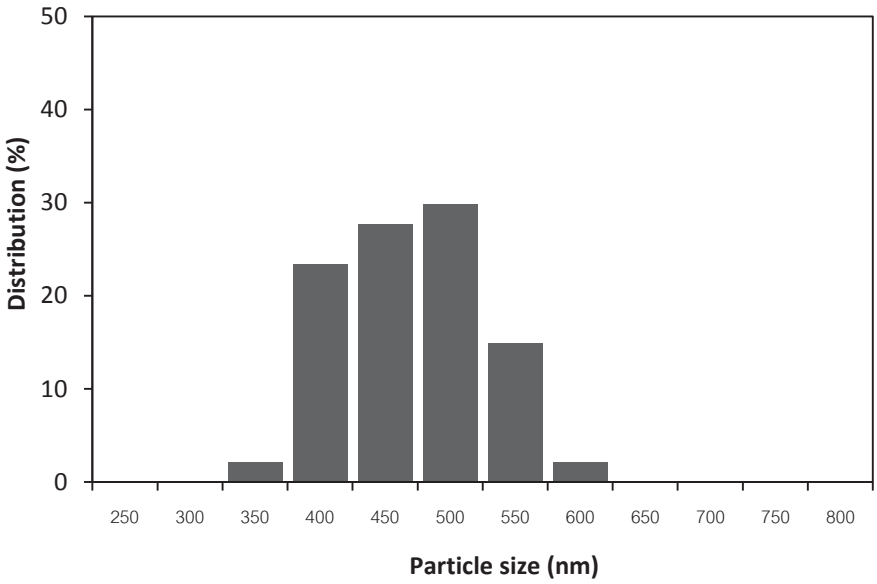
ภาพที่ 70 SEM ของอนุภาคซิลเวอร์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ Silver nitrate โดย (a) 50 mM (Ag2) (b) 25 mM (Ag6) และ (c) 10 mM (Ag7) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า



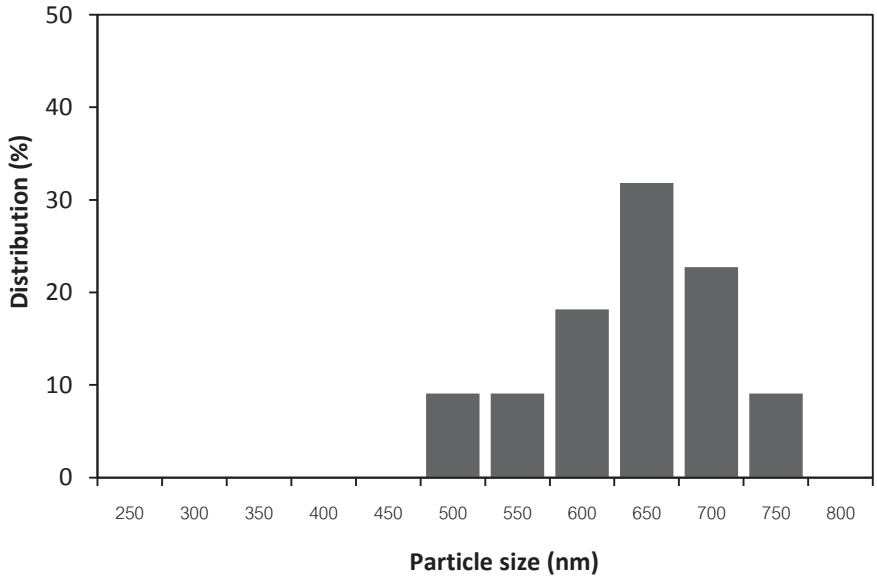
ภาพที่ 71 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag1



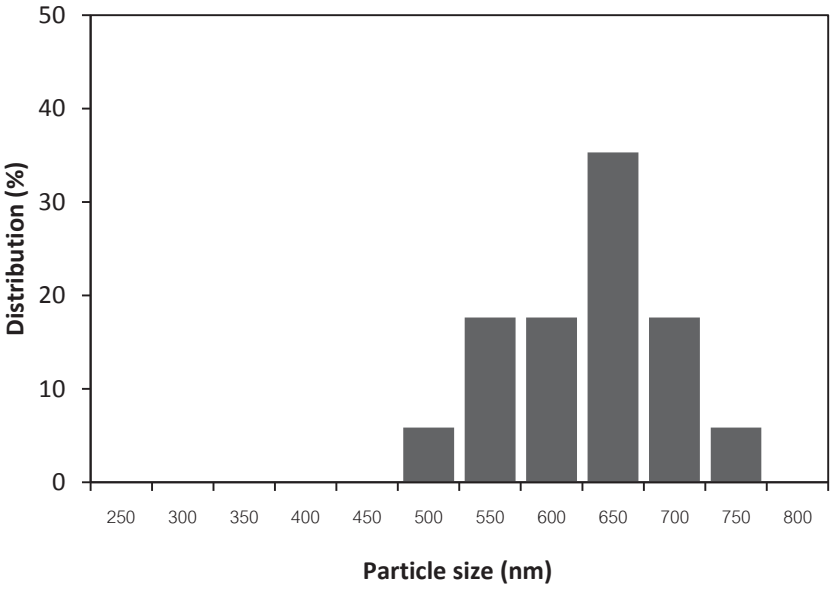
ภาพที่ 72 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag2



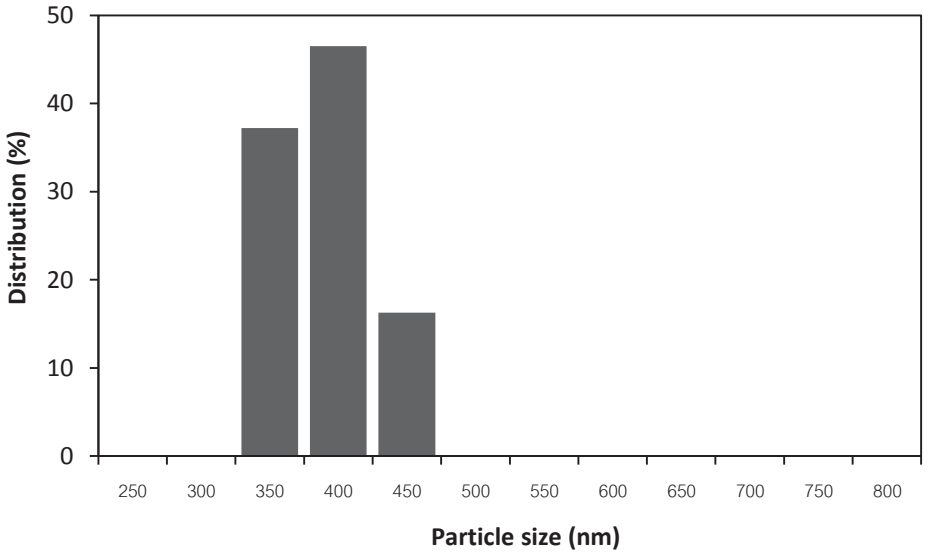
ภาพที่ 73 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag3



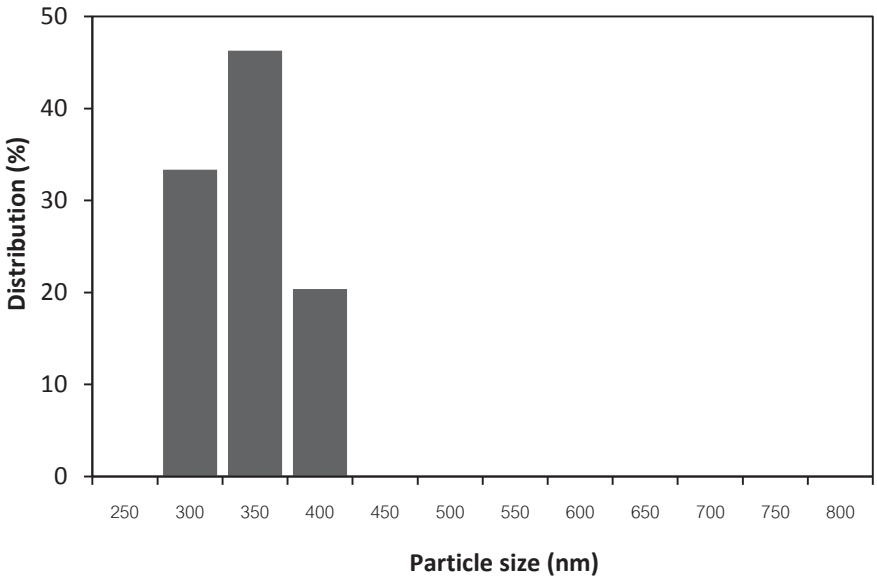
ภาพที่ 74 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag4



ภาพที่ 75 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag5



ภาพที่ 76 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag6



ภาพที่ 77 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคซิลเวอร์ของตัวอย่าง Ag7

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ-สกุล	นายศศิพงศ์ สุนทรเต็ม
ที่อยู่	31/1 หมู่ 1 ตำบล คลองลุ อำเภอ กันตัง จังหวัด ตรัง 92110
E-mail address	sas_ipong@hotmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2548	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนจุฬาภรณราช-วิทยาลัย ตรัง
พ.ศ. 2552	สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
พ.ศ. 2552	ศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติการฝึกงาน

พ.ศ. 2551	บริษัท วรรณประไพ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

ทุนการศึกษาที่ได้รับระหว่างการศึกษา

พ.ศ. 2552-2554	ทุนผู้ช่วยอาจารย์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม