



รายงานการวิจัย

การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด
กับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่เสริมแรงด้วยผงซีลี้อย
(Preparation and properties of poly(lactic acid)/poly(butylene
adipate-co-terephthalate) blends reinforced with sawdust)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด
กับพอลิบิวทีเรออะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่เสริมแรงด้วยผงขี้เลื่อย
(Preparation and properties of poly(lactic acid)/poly(butylene
adipate-co-terephthalate) blends reinforced with sawdust)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2559

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มกราคม 2563

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิবিธีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่เสริมแรงด้วยผงซีลี้อย ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2559 โดยงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายบุคคล ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย คือ นางสาวจิราพร โนใหม่ และนางสาวเกศจันทร์ ศรีทองนาค นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ โรงเลื่อยไม้แปรรูปปิยรัตน์ จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงซีลี้อยสำหรับใช้เป็นสารเสริมแรงในงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้สนใจอ่านงานวิจัยฉบับนี้จะได้รับประโยชน์ตามสมควร

รองศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร

(หัวหน้าโครงการวิจัย)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตถูกเตรียมที่อัตราส่วน 100/0, 90/10, 80/20 และ 70/30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดแกนคู่หมุนในทิศทางเดียวกัน และขึ้นงานทดสอบถูกเตรียมด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป มีการตรวจสอบสมบัติทางกล สมบัติทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม เมื่อปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสมีค่าต่ำลง ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดไม่เพียงแสดงลักษณะการแตกหักแบบเหนียวในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตแต่ยังแสดงให้เห็นความไม่เข้ากันระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต พอลิเมอร์ผสมมีความเสถียรทางความร้อนที่ดีกว่าพอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราตถูกใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากันเพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราตถูกเตรียมโดยเครื่องบดผสมภายในที่ปริมาณมาลิกแอนไฮดราต 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ 2, 5-บิวทีลเปอร์ออกไซด์ -2, 5 ไดเมทิลเฮกเซน 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราตคือ 3, 5 และ 7 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต การเติมพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราตที่ปริมาณ 3 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใส่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราตเป็น 5 และ 7 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง ความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราตความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใส่พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราต

พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราตถูกผสมกับผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณผงซีลี้อยู่ 20, 30, และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยผงซีลี้อยู่ถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 30 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณผงซีลี้อยู่ในพอลิเมอร์ผสม ค่าการต้านทานต่อแรงดึง ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก และค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดลดลง ขณะที่ค่ามอดูลัสมีค่าสูงขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดแสดงการรวมตัวกันของผงซีลี้อยู่ และการยึดติดที่ไม่มี

ค

ระหว่างผงซีลี้อยู่กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ ปริมาณผงซีลี้อยู่เพิ่มขึ้น



Abstract

In this study, poly(lactic acid) (PLA)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blends were prepared at 100/0, 90/10, 80/20, and 70/30 wt% using a co-rotating twin screw extruder. Test specimens were molded using an injection molding machine. Mechanical, morphological, and thermal properties of the blends were investigated. With increasing PBAT content, elongation at break and impact strength increased whereas tensile strength and modulus decreased. SEM micrographs revealed not only some features of ductile fracture in the PLA/PBAT blends but also incompatibility between PLA and PBAT. Polymer blends had better thermal stability than PLA. Poly(lactic acid) grafted with maleic anhydride (PLA-g-MA) was used as a compatibilizer to improve compatibility of PLA/PBAT blends. PLA-g-MA was prepared using an internal mixer. Maleic anhydride content was 5 wt% and (2,5-bis(tert-butyl peroxy)-2,5 dimethylhexane content was 1 wt%. PLA-g-MA contents were 3, 5, and 7 phr. The addition of 3 phr of PLA-g-MA led to increased mechanical properties of the blend due to improved adhesion between PLA and PBAT. However, mechanical properties were decreased with incorporating 5 and 7 phr of PLA-g-MA. Thermal stability of the blends was enhanced with the presence of PLA-g-MA.

PLA-g-MA compatibilized PLA/PBAT blends were mixed with 20, 30, and 40 wt% sawdust. Sawdust was treated with 2 wt% sodium hydroxide solution for 30 minutes. With increasing sawdust content, tensile strength, impact strength and elongation at break of the composites were decreased whereas modulus was increased. SEM micrographs showed agglomeration of sawdust and poor adhesion between sawdust and polymer matrix. Thermal stability of the composites was continuously decreased when sawdust content was increased.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิด.....	7
2.2 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม.....	10
2.3 การเสริมแรงของพอลิเมอร์ผสมด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส.....	14
2.4 การปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์.....	15
บทที่ 3 วัสดุและการทดลอง.....	20
3.1 วัสดุ.....	20
3.2 การทดลอง.....	20
3.2.1 การเตรียมผงซีลี้อย.....	20
3.2.2 การเตรียมพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดราไซด์.....	20
3.2.3 การวิเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดราไซด์.....	20
3.2.4 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิবিวิธีลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรต.....	21
3.2.5 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิবিวิธีลีนอะดิเปต โคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ที่มีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อย.....	22
3.2.6 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	24
4.1 ผลของปริมาณพอลิবিวิธีสื่อนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิবিวิธีสื่อนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต.....	24
4.1.1 สมบัติทางกล	24
4.1.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยา	27
4.1.3 สมบัติทางความร้อน.....	30
4.2 ผลของปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติก แอซิดกับพอลิবিวิธีสื่อนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต.....	32
4.2.1 การวิเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราไซด์.....	32
4.2.2 สมบัติทางกล.....	34
4.2.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา	38
4.2.4 สมบัติทางความร้อน.....	41
4.3 ผลของปริมาณขี้เลื่อยต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิทระหว่างพอลิแลคติกแอซิด กับพอลิবিวิธีสื่อนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต.....	43
4.3.1 สมบัติทางกล.....	43
4.3.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยา	46
4.3.3 สมบัติทางความร้อน.....	48
บทที่ 5 บทสรุป	50
บรรณานุกรม.....	51
ประวัตินักวิจัย	59

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 สมบัติทางกลของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ.....	24
4.2 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ.....	32
4.3 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ต่าง ๆ.....	38
4.4 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ต่าง ๆ.....	41
4.5 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลีอียที่ปริมาณต่าง ๆ.....	43
4.6 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลีอียที่ปริมาณต่าง ๆ.....	48

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
4.1 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ	25
4.2 ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ.....	25
4.3 ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ.....	26
4.4 ค่าความต้านทานต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ.....	27
4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (a) PLA, (b) PLA/PBAT10, (c) PLA/PBAT20, (d) PLA/PBAT30	28
4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดที่ กำลังขยาย 1,000 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระทำ (a) PLA, (b) PLA/PBAT10, (c) PLA/PBAT20, (d) PLA/PBAT30....	29
4.7 กราฟ TGA ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ.....	31
4.8 กราฟ DTA ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ.....	31
4.9 FTIR สเปกตรัมของพอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดไรด์และมาลีนิกแอนไฮดไรด์.....	33
4.10 FTIR สเปกตรัมแบบอนุพันธ์อันดับที่สองของพอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดไรด์และมาลีนิกแอนไฮดไรด์.....	34
4.11 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดไรด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	35

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.12 ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	36
4.13 ค่าการยึดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	36
4.14 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	37
4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (a) PLA/PBAT30, (b) PLA/PBAT30/PLA-g-MA3, (c) PLA/PBAT30/PLA-g-MA5, (d) PLA/PBAT30/PLA-g-MA7	39
4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (a) PLA/PBAT30, (b) PLA/PBAT30/PLA-g-MA3, (c) PLA/PBAT30/PLA-g-MA5, (d) PLA/PBAT30/PLA-g-MA7	40
4.17 กราฟ TGA ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ต่าง ๆ.....	42
4.18 กราฟ DTA ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ต่าง ๆ	42

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.19 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเลตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ	44
4.20 ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเลตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ	44
4.21 ค่าการยืดตัวสูงสุด ณจุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเลตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ	45
4.22 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเลตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ	46
4.23 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 300 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเลตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (a) PLA/PBAT30/PLA-g-MA3, (b) PLA/PBAT30/PLA-g-MA3/AT20, (c) PLA/PBAT30/PLA-g-MA3/AT30, (d) PLA/PBAT30/PLA-g-MA7/AT40	47
4.24 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเลตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ	49
4.25 กราฟ DTA ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเลตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ.....	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันทั่ว ๆ ไป ผลิตจากพอลิเมอร์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี วัสดุดิบเหล่านี้สร้างทดแทนขึ้นใหม่ได้ยากและการสร้างทดแทนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาตินั้นต้องอาศัยระยะเวลาอันยาวนาน อีกทั้งในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมปิโตรเคมีโดยเฉพาะกระบวนการเผาไหม้ยังก่อให้เกิดมลภาวะ นอกจากนี้พบปัญหาจากขยะพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นภายหลังการใช้งานของผู้บริโภคซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ในระยะเวลาอันสั้น ส่งผลกระทบอย่างมากต่อสิ่งแวดล้อม

พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymers) จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และกระบวนการกำจัด ปัจจุบันพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากนักวิจัยตลอดจนกลุ่มอุตสาหกรรม เนื่องจากพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นผลิตมาจากวัตถุดิบที่สามารถผลิตทดแทนขึ้นใหม่ได้ในธรรมชาติ (renewable resources) ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตต่ำ กระบวนการกำจัดซึ่งสามารถย่อยสลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้ด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดินตามธรรมชาติ โดยพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นยังคงมีคุณสมบัติในการใช้งานได้เทียบเท่ากับพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีทั่วไป (commodity polymer) และสามารถทดแทนการใช้งานที่มีอยู่ได้ [อรรถวิท, 2008] ดังนั้นการนำพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้ทดแทนพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี นอกจากจะเป็นการช่วยลดปัญหาขยะพลาสติกแล้วยังสามารถช่วยลดการใช้ทรัพยากรปิโตรเลียมที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อีกด้วย

พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่กำลังได้รับความนิยมอยู่ในภาคอุตสาหกรรมในขณะนี้ เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้ทั่วไปในภาคอุตสาหกรรมให้เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ โดยมีคุณสมบัติเทียบเคียงได้กับผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดปัจจุบัน และเมื่อสิ้นสุดการใช้งานก็ยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยใช้ระยะเวลาอันสั้น เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตจากวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อีกทั้งราคาของพอลิแลคติกแอซิดนั้นถือว่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดอื่น ๆ โดยพอลิแลคติกแอซิดนี้เป็นพอลิเมอร์ที่จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรง (aliphatic polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (lactic acid) ที่สามารถผลิตได้จากการหมักแป้งหรือน้ำตาล ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือ

น้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลี หรืออ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่องตามธรรมชาติ

ในอดีตการใช้งานของพอลิแลคติกแอซิดจำกัดอยู่ในวงการแพทย์ เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูง หาได้ยาก และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำให้มีสมบัติทางกลต่ำ แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิคใหม่ ๆ ที่ช่วยให้สามารถผลิตพอลิแลคติกแอซิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในเชิงพาณิชย์ขึ้นได้ ทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติทางกลที่ดีและได้รับความนิยมอย่างต่อเนื่องทั้งในวงการวิจัยรวมถึงภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ [กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2010] โดยเฉพาะในวงการอุตสาหกรรมยานยนต์ซึ่งมีการแข่งขันในด้านการตลาดที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ให้มีคุณภาพที่ดีกว่าคู่แข่ง โดยพยายามให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำและให้ความสำคัญด้านสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ดังนั้นแนวทางการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในปัจจุบันจึงเน้นไปที่การนำวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้ทดแทนวัสดุจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีทั่วไป

แต่อย่างไรก็ตามพอลิแลคติกแอซิดยังมีข้อจำกัดต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานในบางประเภท เนื่องด้วยพอลิแลคติกแอซิดมีมอดูลัส (modulus) ที่สูง เพราะ มีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (% elongation at break) ที่ต่ำ รวมทั้งมีราคาที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีทั่วไป ดังนั้นจึงได้มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องในวงการวิจัยเพื่อปรับปรุงข้อด้อยของพอลิแลคติกแอซิดทั้งในด้านของสมบัติและราคา เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในภาคอุตสาหกรรม การปรับปรุงเพื่อให้พอลิแลคติกแอซิดมีความเหนียวมากขึ้นสามารถทำได้หลายแนวทาง ได้แก่ การเติมพลาสติกไซเซอร์ [Xu and Qu, 2009; Rahman et al., 2013] การทำโคพอลิเมอร์ [Hwang et al., 2012] และการทำพอลิเมอร์ผสม [Zhao et al., 2010; Farsetti et al., 2011] เป็นต้น ทั้งนี้การทำพอลิเมอร์ผสมโดยใช้พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงมาเป็นสารเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิแลคติกแอซิดจัดเป็นแนวทางที่น่าสนใจ ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวได้ดี ง่าย สะดวกต่อกระบวนการผลิตและขึ้นรูป ในปัจจุบันพอลิเมอร์ที่กำลังได้รับความนิยมในการนำมาปรับปรุงความเหนียวให้กับพอลิแลคติกแอซิด คือ พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นสูง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ยังคงสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายหลังจากหมดอายุการใช้งาน เช่น พอลิคาร์โปแลคโตน (polycaprolactone, PCL) [Harada และคณะ, 2008] พอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ((polybutylene adipate-co-terephthalate), PBAT) [Jiang et al., 2005] และพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate, PBS) [Hassan et al., 2013] เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามปัญหาที่สำคัญคือความไม่เข้ากันระหว่างพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวกับพอลิแลคติกแอซิด ดังนั้นจึงต้องมี

การปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยการใส่สารช่วยให้เข้ากันได้ เพื่อปรับปรุงให้มีการยึดติดระหว่าง อินเทอร์เฟสที่ดี และได้วัสดุที่มีสมบัติทางกลที่ดี

สารช่วยให้เข้ากันที่นิยมใช้ปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นสูง ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮไดรด์ (poly(lactic acid)-g-maleic anhydride, PLA-g-MA) [Lee, 2009] ไกลซีดีลเมทาคริเลต (glycidyl methacrylate, GMA) [Kumar et al., 2010] และไลซีน ไตรไอโซไซยาเนต (lysine triisocyanate, LTI) [Harada et al., 2007] เป็นต้น โดยไลซีน ไตรไอโซไซยาเนตจัดเป็นสารปรับปรุงความเข้ากันได้ที่น่าสนใจสำหรับพอลิเมอร์ผสมที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เนื่องจากไลซีนมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยกลุ่มคาร์บอกซิล (carboxyl group) และกลุ่มอะมิโน (amino groups) 3 กลุ่ม ที่เป็นกรดอะมิโนธรรมชาติ (natural amino acid) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) และกลุ่มคาร์บอกซิลของพอลิแลคติกและพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นสูงได้ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติหลังการใช้งาน โดยไม่ก่อให้เกิดสารพิษที่จะกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [Lee and Wang, 2006]

อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสมให้มีความเหนียว (toughness) ที่ดีขึ้นนั้นย่อมทำให้พอลิเมอร์ผสมสูญเสียสมบัติด้านความแข็งแรง (strength) และ ความแข็งตึง (stiffness) ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญที่ต้องพิจารณาสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในบางประเภท โดยเฉพาะการนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนรถยนต์ที่จำเป็นต้องมีความสมดุลระหว่างความแข็งตึง ความแข็งแรง และความต้านทานต่อแรงกระแทก ดังนั้นจึงได้มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องเพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง และความแข็งตึงของพอลิเมอร์ผสมควบคู่ไปกับการลดต้นทุนการผลิต โดยแนวทางที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในขณะนี้คือการเติมสารเสริมแรง เนื่องจากให้ความแข็งแรงเฉพาะ (specific strength) ที่สูง โดยในอดีตวัสดุที่ใช้เสริมแรงจะเป็นกลุ่มเส้นใยสังเคราะห์ ได้แก่ เส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) เส้นใยเคฟลาร์ (Kevlar fiber) เป็นต้น แต่เส้นใยเหล่านี้ราคาแพงและเป็นอันตรายต่อสุขภาพของคนทำงาน ดังนั้นจึงได้มีการนำสารตัวเติมเซลลูโลส (lignocellulosic fillers) เช่น ผงขี้เลื่อยซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือจากอุตสาหกรรมไม้แปรรูป ราคาถูก หาได้ง่าย ความหนาแน่นต่ำ ไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องจักรและสุขภาพของคนงาน และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [Tao et al., 2011] มาใช้ทดแทนเส้นใยสังเคราะห์เพื่อเป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งหากการวิจัยและพัฒนาในการนำผงขี้เลื่อยมาใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสมย่อยสลายทางชีวภาพนี้ประสบผลสำเร็จในเชิงพาณิชย์ จะเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเหลือจากอุตสาหกรรมควบคู่ไปกับการลดต้นทุน

ในการผลิตแก้วภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมโดยการลดปริมาณขยะจากพลาสติก อีกทั้งยังได้องค์ความรู้ใหม่ที่สอดคล้องกับแนวทางพัฒนาประเทศที่ยั่งยืนอีกด้วย

ข้อจำกัดที่สำคัญในการใช้สารตัวเติมเซลลูโลสมาเป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสม คือ ความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและเมทริกซ์ (matrix) ที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การยึดติดที่อินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและเมทริกซ์ไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความเค้น (stress transfer) จากเมทริกซ์ไปยังสารตัวเติมเซลลูโลสต่ำ และทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตไม่ดี [Nabi and Jog, 1999] ดังนั้นการปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างเมทริกซ์และสารตัวเติมเซลลูโลสสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใส่สารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) การดัดแปรเมทริกซ์ (matrix modification) และการดัดแปรพื้นผิวสารตัวเติมเซลลูโลส (surface treatment) [Tapasi and Nhol, 2011] ซึ่งการดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติมเซลลูโลสนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ การดัดแปรทางกายภาพ (physical treatment) และการดัดแปรทางเคมี (chemical treatment) ซึ่งในแต่ละวิธีก็ให้ประสิทธิภาพในการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเมทริกซ์และสารตัวเติมเซลลูโลสที่แตกต่างกันออกไป โดยการดัดแปรทางกายภาพ เช่น การดัดแปรด้วยความร้อน (heat treatment) ซึ่งสามารถทำได้โดยง่าย สะดวก ไม่มีการใช้สารเคมี และมีประสิทธิภาพที่ดี นอกจากนี้วิธีการดัดแปรสารตัวเติมเซลลูโลสที่นิยมอีกชนิดหนึ่ง คือ การทำอัลคาไลน์เซชัน (alkalization) ซึ่งเป็นการดัดแปรทางเคมีที่สามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสกับเมทริกซ์ได้มีประสิทธิภาพเช่นกัน อีกทั้งยังมีราคาถูก และสามารถทำได้โดยง่าย

ในโครงการวิจัยนี้ เป็นการพัฒनावัสดุพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต โดยศึกษาผลของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตและผลของปริมาณสารช่วยให้เข้ากันได้ต่อสมบัติทางกล สมบัติทางสัญญาณวิทยา และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ยังศึกษาผลของการปรับปรุงความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสมด้วยการใช้ผงซีลีไนด์เป็นวัสดุในการเสริมแรง ในการศึกษาที่ผงซีลีไนด์ถูกดัดแปรพื้นผิวด้วยการทำอัลคาไลน์เซชัน โดยจะมีการศึกษาทั้งปริมาณของผงซีลีไนด์และผลของการดัดแปรผงซีลีไนด์ต่อสมบัติทางกล สมบัติทางสัญญาณวิทยา และสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒनावัสดุคอมโพสิตสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นชิ้นส่วนภายในรถยนต์ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ต่อไป ซึ่งหากการวิจัยและพัฒนานี้ประสบผลสำเร็จในเชิงพาณิชย์จะเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับของเหลือจากอุตสาหกรรมควบคู่ไปกับการลดต้นทุนในการผลิตแก้วภาคอุตสาหกรรม อีกทั้งยังเป็นการรักษา

สิ่งแวดล้อมโดยการลดปริมาณขยะจากพลาสติกและได้องค์ความรู้ใหม่ที่สอดคล้องกับแนวทางพัฒนาประเทศที่ยั่งยืนอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรตต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรต
2. เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรต
3. เพื่อศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรต
4. เพื่อศึกษาผลของการดัดแปรพื้นผิวของผงซีลี้อยต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรต

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ
2. เปรียบเทียบสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรตผสมที่มีและไม่มีสารช่วยให้เข้ากันที่ปริมาณต่าง ๆ
3. ศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรตที่มีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยที่ปริมาณต่าง ๆ
4. เปรียบเทียบสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรตที่เสริมแรงด้วยผงซีลี้อยที่มีและไม่มี การดัดแปรพื้นผิว

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีแนวโน้มในการพัฒนาไปสู่การใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม
2. เป็นการส่งเสริมการพึ่งพาตนเองโดยใช้วัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศมาผลิตเป็นพอลิเมอร์คอมโพสิต
3. เป็นการเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานและเป็นการสร้างเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม

4. เป็นการสร้างและพัฒนาแก่นักวิจัยรุ่นใหม่ให้สามารถริเริ่มและพัฒนางานวิจัยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในภาคอุตสาหกรรม
5. ได้เอกสารทางวิชาการที่ตีพิมพ์ในระดับชาติหรือระดับนานาชาติ



บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

พอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งมีสมบัติทางกลที่ดีคือ มีความแข็งตึง (stiffness) และความแข็งแรง (strength) สูง แต่ข้อด้อยก็คือความเปราะ (brittle) และมีราคาสูง แนวทางเพื่อปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดสามารถทำได้โดยการทำให้พอลิเมอร์ผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวได้ดี ง่าย สะดวกต่อกระบวนการผลิตและขึ้นรูป ปัญหาที่สำคัญของพอลิเมอร์ผสมนี้คือความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมโดยใช้สารช่วยให้เข้ากัน นอกจากนี้การเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิเมอร์ผสมส่งผลให้ความแข็งแรง และความแข็งตึงต่ำลง ดังนั้นจึงมีการนำสารตัวเติมเซลลูโลสเข้ามาเสริมแรง แต่อย่างไรก็ตามจะเกิดปัญหาในเรื่องความไม่เข้ากันของพอลิเมอร์ผสมและสารตัวเติมเซลลูโลสทำให้การยึดติดที่อินเทอร์เฟซระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และสารตัวเติมเซลลูโลสต่ำ ทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเสริมแรงด้วยเซลลูโลสต่ำ การปรับปรุงการยึดติดระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์และสารตัวเติมเซลลูโลส สามารถทำได้โดยการดัดแปรพื้นผิวของสารตัวเติมซึ่งจะช่วยเพิ่มการยึดติดที่อินเทอร์เฟซระหว่างพอลิเมอร์ เมทริกซ์และสารตัวเติมเซลลูโลส ทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเสริมแรงด้วยเซลลูโลสสูงขึ้น

2.1 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิด

การปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเติมพลาสติกไซเซอร์ การทำโคพอลิเมอร์ และการทำพอลิเมอร์ผสม เป็นต้น การทำพอลิเมอร์ผสมโดยใช้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นสูงมาเป็นสารเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิแลคติกแอซิดเป็นแนวทางที่น่าสนใจ ซึ่งสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดเป็นวิธีที่สะดวกในกระบวนการขึ้นรูป และพอลิเมอร์ผสมยังคงย่อยสลายได้ตามธรรมชาติภายหลังสิ้นสุดการใช้งาน

Jiang และคณะ [Jiang et al., 2005] ศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ใช้คือ 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกและค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด (% elongation at break) เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดูลัส (modulus) ไม่ลดลงมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact strength) และค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตในพอลิ

เมอร์ผสม แสดงให้เห็นว่าการผสมพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตลงในพอลิแลคติกแอซิดนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการแตกหักของพอลิแลคติกแอซิดจากการแตกหักแบบเปราะมาเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว นอกจากนี้พอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มอัตราการเกิดผลึก (crystallization rate) ของพอลิแลคติกแอซิดอีกด้วย

Zhao และคณะ [Zhao, et al., 2010] ศึกษาผลของการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดด้วยพอลิเมอร์ย่อยสลายทางชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นสูงแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ พอลิบิวทีลีโนอะดิเปต (poly(butylene adipate), PBA) พอลิบิวทีลีโนซักซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) และพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) ที่ปริมาณสารเพิ่มความเหนียว 5 10 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้พอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงทั้ง 3 ชนิดมาช่วยปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิด สามารถเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการแตกหัก (fracture) ของพอลิแลคติกแอซิดให้มาเป็นพฤติกรรมการแตกหักแบบเหนียว (ductile fracture) ได้ ส่งผลให้ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงขึ้น โดยพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตสามารถปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นที่ปริมาณสารเพิ่มความเหนียวเท่ากัน โดยเมื่อผสมพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่อัตรา ส่วนการผสม 85:15 พบว่าสามารถเพิ่มค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิแลคติกแอซิดได้ถึงประมาณ 600 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสของพอลิแลคติกแอซิดนั้นลดลงอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้

Farsetti และคณะ [Farsetti et al., 2011] ศึกษาการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดด้วยพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด และค่าวิกฤติของอัตราการปล่อยพลังงานความเครียด (critical strain energy release rate หรือ G_c) ของพอลิแลคติกแอซิดสูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อใช้พอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพียง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงคล้ายยางซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิแลคติกแอซิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณของพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่เพิ่มขึ้น

Teamsinsungvon [Teamsinsungvon, 2011] ศึกษาพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่อัตราส่วน 100:0 90:10 80:20 และ 70:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมถูกเตรียมโดยเครื่องอัดรีดชนิดแกนคู่หมุนในทิศทางเดียวกัน พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต อัตราส่วน 100:0 90:10 80:20 และ 70:30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

มีค่าเท่ากับ 11.89, 44.72, 58.42 และ 73.02 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากผลการตรวจสอบทางสัณฐานวิทยาพบว่ามีความไม่เข้ากันระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสต่ำลง แต่ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีเฟสของพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมากขึ้น

Meng และคณะ [Meng et al., 2012] ศึกษาการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดด้วยพอลิบิวทิลอะคริเลต (poly(butyl acrylate), PBA) ที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 5 8 11 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิบิวทิลอะคริเลตสามารถเปลี่ยนพฤติกรรมการแตกหักของพอลิแลคติกแอซิดจากแตกหักแบบเปราะมาเป็นพฤติกรรมการแตกหักเป็นแบบเหนียวได้ ทำให้ค่าการยืดตัวสูงสุด จุดขาด และความเหนียว (toughness) ของพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อใช้พอลิบิวทิลอะคริเลตเป็นสารเพิ่มความเหนียว และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มสัดส่วนของพอลิบิวทิลอะคริเลตในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของพอลิแลคติกแอซิดลด ลงเล็กน้อย นอกจากนี้พอลิบิวทิลอะคริเลตยังช่วยเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดผลึกและเพิ่มปริมาณผลึกของพอลิแลคติกแอซิด

Hassan และคณะ [Hassan et al., 2013] ศึกษาผลของการใช้พอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (poly(butylene succinate), PBS) เป็นสารเพิ่มความเหนียวให้กับพอลิแลคติกแอซิด โดยเตรียมพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 40:60 20:80 และ 0:100 จากผลการศึกษาพบว่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสของพอลิแลคติกแอซิดลดลงตามปริมาณของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต แต่ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดเพิ่มขึ้นมากกว่าสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิดที่ไม่ได้มีการปรับปรุงความเหนียว โดยค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณของพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์ผสมมีความเสถียรทางความร้อนมากขึ้น

Sis และคณะ [Sis et al., 2013] เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่อัตราส่วน 90:10 80:20 70:30 60:40 และ 50:50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมถูกเตรียมโดยใช้เครื่องบดผสมแบบภายใน ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกและค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต เนื่องจากการมีสมบัติความยืดหยุ่นสูงของพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต การมีเฟสที่มีความยืดหยุ่นส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น 60.99 เปอร์เซ็นต์ และ 91.16 เปอร์เซ็นต์ สำหรับพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วน 90:10 และ 70:30 ตามลำดับ

2.2 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม

โดยทั่วไปพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความยืดหยุ่นสูงจะไม่เข้ากันหรือเข้ากันได้เพียงบางส่วนเท่านั้น ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้มาซึ่งสมบัติทางกลที่ดีขึ้น โดยส่วนใหญ่แล้วการเติมสารช่วยให้เข้ากัน (compatibilizer) เป็นแนวทางที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถทำได้โดยง่าย สะดวก และช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Harada และคณะ [Harada, et al., 2007] ศึกษาผลของการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตโดยใช้ไลซีน ไตรไอโซไซยาเนต (lysine triisocyanate, LTI) เป็นสารช่วยให้เข้ากันได้ที่ปริมาณ 0.15 ถึง 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (อัตราส่วนการผสม 90:10) ที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกอยู่ที่ 18 กิโลจูลต่อตารางเมตร และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนเดียวกันนี้มีค่าเพิ่มขึ้นถึง 50-70 กิโลจูลต่อตารางเมตร เมื่อใช้ไลซีน ไตรไอโซไซยาเนตเป็นสารปรับปรุงความเข้ากันได้เพียงปริมาณ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อใช้สารปรับปรุงความเข้ากันได้เพียงปริมาณเล็กน้อย ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากที่กลุ่มไอโซไซยาเนตของไลซีน ไตรไอโซไซยาเนตสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิลของพอลิเมอร์ทั้งสองได้ จึงทำให้เกิดการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตที่ดี ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

Harada และคณะ [Harada et al., 2008] ศึกษาผลของการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิคาร์โพลแลคโตน (poly(ϵ -caprolactone), PCL) ด้วยสารปรับปรุงความเข้ากันได้ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ ไอโซไซยาเนต-ไลซีน ไตรไอโซไซยาเนต (isocyanates-lysine triisocyanate, LTI) ไลซีน ไดไอโซไซยาเนต (lysine diisocyanate, LDI) 1,3,5-ทริส(6-ไอโซไซยาเนโทเฮกซิล)-1,3,5- ไตรอซิเนน-2,4,6-ไตรโอน (1,3,5-tris(6-isocyanatohexyl)-1,3,5-triazinane-2,4,6-trione, Duranate TPA-100) 1,3,5-ทริส(6-ไอโซไซยาเนโทเฮกซิล)ไบยูเรท (1,3,5-tris(6-isocyanatohexyl)biuret, Duranate 24A-100) และอินดัสเทรียล อีพอกไซด์-ไตรเมทิลโพรเพน ไตรไกลิไซด์ อีเทอร์ (industrial epoxide-trimethylolpropane triglycidyl ether, Epiclone 725) โดยใช้อัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิคาร์โพลแลคโตน 100:0 97:3 95:5 90:10 และ 80:20 และปรับเปลี่ยนปริมาณสารช่วยให้เข้ากันได้ที่ปริมาณ 0.15 0.3 และ 0.5 ส่วนใน 100 ส่วนของ

พอลิเมอร์ จากผลการศึกษาพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดสูงขึ้นอย่างมากเมื่อใช้พอลิคาร์โพลีโพรพิลีนเป็นสารปรับปรุงความเหนียวที่ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไอโซไซยาเนต-ไลซีน ไตรไอโซไซยาเนตเป็นสารช่วยให้เข้ากันได้ที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิคาร์โพลีโพรพิลีนได้ดีที่สุด โดยสามารถปรับปรุงค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสม (อัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิคาร์โพลีโพรพิลีนที่ 80:20) ให้มีค่ามากถึง 270 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงชันมากจนไม่สามารถทำให้ชิ้นงานแตกหักได้ภายใต้สภาวะการทดสอบที่ไม่ทำรอยบาก (un-notch) ให้กับชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องทำรอยบาก (notch) ให้กับชิ้นงานเพื่อใช้ศึกษาผลของปริมาณไอโซไซยาเนต-ไลซีน ไตรไอโซไซยาเนตต่อค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อใช้ปริมาณไอโซไซยาเนต-ไลซีน ไตรไอโซไซยาเนตเพียง 0.15 ส่วนใน 100 ส่วนของพอลิเมอร์ และค่อนข้างคงที่เมื่อเพิ่มปริมาณไอโซไซยาเนต-ไลซีน ไตรไอโซไซยาเนต โดยสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นอย่างมากนี้เป็นผลมาจากการที่กลุ่มไอโซไซยาเนตของไอโซไซยาเนต-ไลซีน ไตรไอโซไซยาเนต สามารถทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลและกลุ่มคาร์บอกซิลของพอลิเมอร์ทั้งสองที่เป็นองค์ประกอบ ของพอลิเมอร์ผสม ทำให้เกิดการกราฟท์ (grafting) และเกิดการเชื่อมโยง (crosslink part) ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง จึงทำให้มีการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟสดีขึ้น และส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้น

Zhang และคณะ [Zhang et al., 2009] ศึกษาผลของการใช้สารช่วยให้เข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต โดยสารปรับปรุงความเข้ากันได้ที่ใช้ คือ เทอร์พอลิเมอร์แบบสุ่มของเอทิลีน อะคริลิกเอสเทอร์ และไกลซีดิล เมธาไคลเลท (random terpolymer of ethylene, acrylic ester and glycidyl methacrylate หรือ T-GMA) โดยมีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารปรับปรุงความเข้ากันได้ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อสารช่วยเข้ากันปริมาณ 2 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงเพียงเล็กน้อย และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารช่วยให้เข้ากันได้เพียงปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งให้เห็นว่าเทอร์พอลิเมอร์แบบสุ่มของเอทิลีน อะคริลิกเอสเทอร์ และไกลซีดิล เมธาไคลเลท สามารถช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตได้ดี ซึ่งสามารถยืนยันได้ด้วยลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่แสดงให้เห็นถึงความเข้ากันได้ที่มากขึ้นระหว่างองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม

Kumar และคณะ [Kumar et al., 2010] ศึกษาผลของการใช้ไกลซีดิล เมธาโคลเลท (glycidyl methacrylate, GMA) เป็นสารช่วยให้เข้ากันในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต โดยใช้ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ 15 20 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเลือกอัตราส่วนพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ให้สมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุดมาศึกษาผลของปริมาณสารช่วยให้เข้ากัน โดยปรับเปลี่ยนปริมาณไกลซีดิล เมธาโคลเลทที่ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพื่อปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดนั้น สามารถช่วยปรับปรุงค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลคติกแอซิดให้เพิ่มขึ้นได้ถึงสองเท่า และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ไกลซีดิล เมธาโคลเลทเข้าไปปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากไกลซีดิล เมธาโคลเลทสามารถทำปฏิกิริยากับพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต แล้วเกิดเป็นพันธะเอสเทอร์ (ester linkage) ที่บริเวณอินเทอร์เฟซ ทำให้มีการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองดีขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมดีขึ้นด้วย โดยปริมาณไกลซีดิล เมธาโคลเลท 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงความเข้ากันได้ในระบบนี้ ซึ่งทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความสมดุลระหว่างค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก ความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัส

Lin และคณะ [Lin et al., 2012] ได้ศึกษาผลการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดด้วยพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต และปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมด้วย เตตระบิวทิว ไททาเนต (tetrabutyl titanate TBT) ที่ปริมาณต่าง ๆ คือ 0 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยเตตระบิวทิว ไททาเนต มีค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่ามอดูลัส ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด และค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกนั้นสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ ซึ่งสมบัติทางกลนี้เพิ่มขึ้นตามปริมาณของเตตระบิวทิว ไททาเนต โดยสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้สามารถยืนยันได้ว่าเตตระบิวทิว ไททาเนตช่วยให้พอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเข้ากันได้ และมีการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) ที่เกิดขึ้นระหว่างการผสม

Nomai [Nomai, 2013] ศึกษาผลของปริมาณพอลิแลคติกซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีการปรับปรุงความเหนียวด้วยการเติมพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต การเติมพอลิแลคติกซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความ

ด้านทานต่อแรงดึงและค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่ามอดูลัสไม่มีการเปลี่ยนแปลง และที่ปริมาณของพอลิแลคติกอซิติกกราฟท์มาลีอิกแอนไฮโดรไรต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่ามอดูลัส และค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น 50, 12 และ 193 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่ไม่ได้เติมพอลิแลคติกอซิติกกราฟท์มาลีอิกแอนไฮโดรไรต์ และสมบัติทางกลลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิแลคติกอซิติกกราฟท์มาลีอิกแอนไฮโดรไรต์เป็น 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อาจเป็นผลมาจากปริมาณของพอลิแลคติกอซิติกกราฟท์มาลีอิกแอนไฮโดรไรต์ที่มากเกินไปทำให้การแยกตัวออกบริเวณอินเทอร์เฟซ หรือการเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ที่บริเวณอินเทอร์เฟซ ทำได้ยากส่งผลให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงยี่ลดต่ำลง

Gardella และคณะ [Gardella et al., 2014] ศึกษาการใช้พอลิแลคติกอซิติกกราฟท์มาลีอิกแอนไฮโดรไรต์เป็นสารช่วยให้เข้ากันในการปรับปรุงความระหว่างพอลิแลคติกอซิติกและพอลิคาร์โปแลคโตน (poly(ϵ -caprolactone), PCL) โดยพอลิแลคติกกราฟท์มาลีอิกแอนไฮโดรไรต์ถูกเตรียมด้วยกระบวนการใช้อนุมูลอิสระและทดสอบด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear magnetic resonance, NMR) และจากการวิเคราะห์พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การกราฟท์ของมาลีอิกแอนไฮโดรไรต์ 0.7 เปอร์เซ็นต์บนพอลิเมอร์ จากการเติมและ 2, 5-บิวทิลเปอร์ออกไซด์ -2, 5 ไดเมทิล เฮกเซน 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและมาลีอิกแอนไฮโดรไรต์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าพอลิแลคติกกราฟท์มาลีอิกแอนไฮโดรไรต์มีประสิทธิภาพการทำหน้าที่เป็นสารช่วยให้เข้ากัน สามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดพบว่าขนาดของอนุภาคของคาร์โปแลคโตนมีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณของพอลิแลคติกอซิติกกราฟท์มาลีอิกแอนไฮโดรไรต์เพิ่มขึ้น พอลิคาร์โปแลคโตนมีค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดสูงถึง 1,200 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกอซิติกและพอลิคาร์โปแลคโตนที่อัตราส่วน 70:30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าใกล้เคียงกับพอลิแลคติกอซิติก เนื่องจากแรงยึดติดระหว่างอินเทอร์เฟซไม่ดี และเมื่อเติมสารช่วยให้เข้ากันที่ 7 เปอร์เซ็นต์พบว่าค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นจาก 7 เปอร์เซ็นต์ เป็น 53 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างพอลิแลคติกอซิติกและพอลิคาร์โปแลคโตนเพิ่มขึ้น เมื่อสายโซ่ของมาลีอิกแอนไฮโดรไรต์ในระบบมีปริมาณมากขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีเกิดโครงสร้างของสายโซ่ที่แข็งแรงขึ้น และค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิแลคติกอซิติกกราฟท์มาลีอิกแอนไฮโดรไรต์เพิ่มขึ้น

2.3 การเสริมแรงของพอลิเมอร์ผสมด้วยสารตัวเติมเซลลูลอส

โดยปกติแล้วการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกอซิติกด้วยการทำพอลิเมอร์ผสมกับพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงนั้นย่อมทำให้สมบัติด้านความแข็งแรง (strength) และความแข็งตึง (stiffness) ของพอลิเมอร์ผสมลดลงไปด้วย ดังนั้นจึงต้องหาแนวทางในการปรับปรุงเพื่อให้ได้วัสดุพอลิเมอร์ที่มีความสมดุลระหว่างความแข็งตึง ความแข็งแรง และความต้านทานต่อแรงกระทำ โดยแนวทางที่

น่าสนใจอยู่ในขณะนี้คือการใช้สารตัวเติมเซลลูโลส (lignocellulosic fillers) ซึ่งราคาถูก หาได้ง่าย ความหนาแน่นต่ำ สามารถปลูกทดแทนได้ ไม่เป็นอันตรายต่อเครื่องจักรและสุขภาพของคนงาน และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มาใช้ทดแทนเส้นใยสังเคราะห์เพื่อเป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งนอกจากจะช่วยเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ได้แล้ว ยังสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย

Ishiaku และคณะ [Ishiaku et al., 2007] ศึกษาผลของการใช้เส้นใยปอ (jute fiber) มาเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิคาร์โปแลคโตน โดยใช้อัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิคาร์โปแลคโตนที่ 70:30 และปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยปอที่ 5 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษพบว่าค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เส้นใยปอกระเจามาเป็นสารเสริมแรงและเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย โดยค่าความต้านทานต่อแรงดึงค่อนข้างไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณตามเส้นใย ในขณะที่ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณของเส้นใย

Lee [Lee, 2009] ศึกษาผลของการใช้เส้นใยไผ่ (bamboo fiber) เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โดยใช้อัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิเมอร์ที่เป็นสารเพิ่มความเหนียว 90:10 และปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยไผ่ที่ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษพบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองระบบมีค่าลดลงเมื่อใช้เส้นใยไผ่เป็นสารเสริมแรง และลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อใช้สัดส่วนเส้นใยไผ่ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันระหว่างเส้นใยไผ่กับองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมทั้งสอง จึงทำให้มีการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซไม่ดี ดังนั้นการถ่ายโอนแรงเค้น (stress transfer) จากพอลิเมอร์เมทริกซ์ไปสู่เส้นใยจึงไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สมบัติทางกลต่ำลง

Qiang และคณะ [Qiang et al., 2012] ได้ศึกษาผลของการใช้ผงไม้ (wood flour) เป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalkanoates, PHAs) โดยใช้อัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต และผงไม้ที่ใช้ในการศึกษา คือ 65:25:10 55:25:20 และ 45:25:30 โดยจากผลการศึกษพบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ผงไม้มาเป็นสารเสริมแรง ซึ่งค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของผงไม้ที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าผงไม้ซึ่งมีความแข็ง (rigid) กว่าพอลิเมอร์ทั่วไปนั้น สามารถช่วยเสริมแรงให้วัสดุพอลิเมอร์มีความแข็งแรงขึ้นได้

Sis และคณะ [Sis et al., 2013] ศึกษาผลของการใช้เส้นใยปอควบา (kenaf fiber) เพื่อเป็นสารเสริมแรงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต โดยใช้อัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ 90:10 และ

ปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยที่ 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่เส้นใยปอแก้วเป็นสารเสริมแรงที่ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณของเส้นใย ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากความไม่เข้ากันของเส้นใยกับองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองจึงทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ไม่ดีเท่าที่ควร

Ibrahim และคณะ [Ibrahim et al., 2014] ศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยปาล์มต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิคาร์โปแลคโตนที่อัตราส่วน 90:10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยเกิดการเกาะกลุ่มกัน ส่งผลเสียต่อการถ่ายโอนความเค้นระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์

2.4 การปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์

โดยทั่วไปแล้วปัญหาที่สำคัญในการเสริมแรงพอลิเมอร์ด้วยสารตัวเติมเซลลูโลส คือการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและเมทริกซ์ต่ำ ซึ่งทำให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตต่ำลงไปด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงการยึดติดระหว่างอินเทอร์เฟซเพื่อให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารตัวเติมเซลลูโลสดีขึ้น โดยการปรับปรุงการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟซระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสและพอลิเมอร์มีหลายวิธี ซึ่งในโครงการวิจัยนี้นำเสนอวิธีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างสารตัวเติมเซลลูโลสกับพอลิเมอร์เมทริกซ์โดยวิธีการดัดแปร พื้นผิวของสารตัวเติมเซลลูโลสด้วยวิธีการทำอัลคาไลน์เซชัน (alkalization)

การดัดแปรสารตัวเติมเซลลูโลสด้วยการทำอัลคาไลน์เซชัน เป็นวิธีการดัดแปรทางเคมีที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในช่วงที่ผ่านมา เนื่องจากมีขั้นตอนการทำที่ง่าย มีราคาถูกกว่าการดัดแปรทางเคมีชนิดอื่น ๆ สามารถลดปริมาณลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และสิ่งสกปรกที่ปกคลุมพื้นผิวของสารตัวเติมเซลลูโลสได้ ส่งผลให้พื้นผิวของสารตัวเติมเซลลูโลสมีความสะอาดและมีความขรุขระมากขึ้น ทำให้สามารถยึดติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ด้วยกลไกการเชื่อมต่อกันทางกล (mechanical interlocking) ได้ดีขึ้น

Liu และคณะ [Liu et al., 2004] ศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อโครงสร้างของเส้นใย ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติทางความร้อนของเส้นใยหญ้าพื้นเมือง (native grass fibers) โดยนำเส้นใยมาทำการดัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 2 4 8 และ 16 ชั่วโมง จากการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) พบว่าหลังจากการทำอัลคาไลน์เซชัน พีคของเฮมิเซลลูโลสที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2918 และ 1737 cm^{-1} และพีคของลิกนินที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1515 และ 1254 cm^{-1} ลดลงเนื่องจากการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ โดยปริมาณเฮมิเซลลูโลสและ

ลิกนินลดลง เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำอัลคาไลน์เซชันเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ลักษณะทางสัณฐานวิทยา แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีการแยกตัว (separation) เนื่องมาจากการที่ลิกนิน บางส่วนและเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไป ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการทดสอบอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี จากผลการทดสอบทางความร้อนยังพบอีกว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถทนต่อ ความร้อนได้ดีกว่าเส้นใยที่ไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน และเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำอัลคาไลน์เซชันเพิ่มขึ้น พบว่าเส้นใยมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อน (thermal decomposition temperature) เพิ่มขึ้น

Lopattananon และคณะ [Lopattananon et al., 2006] ศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อโครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยใบสับปะรด (pineapple leaf fiber) โดยเส้นใยใบสับปะรดจะถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน คือ 1 3 5 และ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส จากการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีพบว่าพีคของลิกนินที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1436 cm^{-1} และพีคของเฮมิเซลลูโลสที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1254 cm^{-1} ลดลง เนื่องมาจากการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากเส้นใยได้ ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron micrograph) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีการแยกตัวของเส้นใย เนื่องมาจากการที่ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไปจากเส้นใย และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น พบว่าลิกนินและเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดออกไปจากเส้นใยในปริมาณที่มากขึ้น

Bwire และคณะ [Bwire et al., 2007] ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผงแกลบข้าวที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 4 6 และ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากการตรวจสอบหาองค์ประกอบทางเคมีของผงแกลบข้าว พบว่าการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถกำจัดลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสออกไปได้ที่มีความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งลิกนินและเฮมิเซลลูโลสสามารถถูกกำจัดออกได้ด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่สูงมากนัก แต่อย่างไรก็ตามจากผลทดสอบทางความร้อนพบว่าผงแกลบข้าวที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีสมบัติทางความร้อนที่ต่ำลง เนื่องการสลายตัวของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และซิลิกาบางส่วน

Hu และ Lim [Hu, and Lim, 2007] ศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันของเส้นใยป่าน (hemp fiber) ต่อการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยป่านกับพอลิแลคติกแอซิด โดยเส้นใยป่านทั้งผ่านและไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันถูกนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิแลคติกแอซิดที่ปริมาณต่างกัน คือ 30 35 40 45 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าเส้นใยป่านที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร (%)

w/v) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยกับพอลิแลคติกแอซิดให้ดีขึ้นได้ เนื่องจากการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถกำจัดลิกนิน และสารพวกขี้ผึ้ง (wax) ออกจากพื้นผิวของเส้นใย ปาน ทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการช่วยให้เกิดการยึดติดระหว่างเส้นใยปาน กับพอลิแลคติกแอซิดได้ด้วยกลไกการยึดติดแบบการเชื่อมต่อทางกล จึงทำให้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น โดยปริมาณเส้นใยปานที่ให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสที่สูงที่สุด คือ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Edeerozey และคณะ [Edeerozey et al., 2007] ศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อ โครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเส้นใยปอกระเจา (kenaf fiber) โดยเส้นใยถูกตัดแปรด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 6 และ 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำอัลคาไลน์เซชัน โดยเส้นใยปอ กระเจาถูกตัดแปรที่อุณหภูมิต่างกัน คือ อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส (ที่ความเข้มข้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่ความเข้มข้น สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีพื้นผิวของเส้นใยที่สะอาดมากที่สุด และค่า ความต้านแรงต่อแรงดึงของเส้นใยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญหลังผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน โดยสภาวะ การทำอัลคาไลน์เซชันที่เหมาะสมที่สุดคือที่ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความต้านแรงดึงของเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันที่ อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าเส้นใยที่ถูกเตรียมที่อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากการทำ ความสะอาดพื้นผิวเส้นใยที่มีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิสูง

Ishiaku และคณะ [Ishiaku et al., 2007] ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวเส้นใยปอกระเจา (jute fiber) ด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันเพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิคาร์โพลีแลคโตน โดยใช้อัตราส่วนการผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิด กับพอลิคาร์โพลีแลคโตนที่ 70:30 และปรับเปลี่ยนปริมาณเส้นใยปอกระเจาที่ 10 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง สามารถปรับปรุงการยึดติดระหว่างเส้นใยปอกระเจากับ องค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมทั้งสองให้ดีขึ้นได้ จึงทำให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของพอลิ เมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันดีกว่าพอลิเมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยที่ ไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน ซึ่งค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณของเส้นใยในการเสริมแรงมากขึ้น

Morsyleide และคณะ [Morsyleide et al., 2009] ศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันของเส้นใยมะพร้าวต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (ethylene vinyl alcohol copolymers) กับแป้ง (starch) ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าว โดยเส้นใยมะพร้าวถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากผลการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นถึง 53 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เตรียมจากเส้นใยที่ไม่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน ซึ่งสามารถยืนยันได้จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นว่ามีการยึดติดที่บริเวณอินเทอร์เฟสระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ดีขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้การถ่ายโอนความเค้นจากเมทริกซ์ไปยังเส้นใยดีขึ้น ทำช่วยให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตดีขึ้นด้วย

Tran และคณะ [Tran et al., 2011] ศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันของเส้นใยมะพร้าว (coir fiber) ต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต (polybutylene succinate, PBS) โดยเส้นใยมะพร้าวถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 24 48 72 และ 96 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ลักษณะทางสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าการทำอัลคาไลน์เซชันสามารถเพิ่มความขรุขระของพื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวได้ โดยพื้นผิวของเส้นใยมีความขรุขระมากที่สุดเมื่อผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ดังนั้นเส้นใยมะพร้าวที่ถูกตัดแปรด้วยสภาวะการทำอัลคาไลน์เซชันนี้ถูกนำไปใช้เป็นสารเสริมแรงในพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตเพื่อศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างเส้นใยมะพร้าวกับพอลิบิวทีลีนซัคซิเนต โดยปริมาณเส้นใยมะพร้าวที่ใช้คือ 10 15 20 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและสมบัติความต้านทานต่อแรงดัดโค้งดีกว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมะพร้าวที่ไม่ผ่านการตัดแปรด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันในทุกสัดส่วนการผสม เนื่องมาจากการทำอัลคาไลน์เซชันทำให้พื้นผิวของเส้นใยมะพร้าวมีความขรุขระมากขึ้น ซึ่งช่วยให้แรงยึดติดระหว่างเส้นใยมะพร้าวและพอลิบิวทีลีนซัคซิเนตผ่านกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกลดีขึ้น จึงส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตสูงขึ้น

Qian และคณะ [Qian et al., 2013] ศึกษาผลของการทำอัลคาไลน์เซชันของผงไม้ไผ่ (bamboo particles) ต่อสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างผงไม้ไผ่กับพอลิแลคติกแอซิด ผงไม้ไผ่ถูกตัดแปรด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ (molar) ในเวลาที่ต่างกันคือ 0.25 0.5 1 2 3 4 5 6 7 8 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกเตรียมจากผงไม้ไผ่ทั้งที่ผ่านการตัดแปรและไม่ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการทำอัลคาไลน์เซชันที่ปริมาณผงไม้ไผ่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ผลจากการทดสอบด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่าหลังจากการทำอัลคาไลน์เซชันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น 3428 2919 และ 1736 cm^{-1} ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เป็นผลเนื่องมาจากเฮมิเซลลูโลสและลิกนินถูกกำจัดออกจากผนังไม้ไผ่ระหว่างการทำอัลคาไลน์เซชัน ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของผนังไม้ไผ่ที่แสดงให้เห็นว่าปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อตัดแปรผนังไม้ไผ่ด้วยวิธีการทำอัลคาไลน์เซชันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการทำอัลคาไลน์เซชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้สิ่งสกปรกที่อยู่บนพื้นผิวของผนังไม้ไผ่ถูกกำจัดออกไปมากขึ้น อีกทั้งความขรุขระของพื้นผิวของผนังไม้ไผ่ยังเพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยบริเวณพื้นที่ผิวที่เฉพาะเจาะจง (specific surface area) ของผนังไม้ไผ่มีค่าสูงสุดเมื่อผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้การยึดติดกันระหว่างผนังไม้ไผ่กับพอลิแลคติกแอซิดผ่านกลไกแบบการเชื่อมต่อกันทางกลดีขึ้น จึงส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตที่เสริมแรงด้วยผนังไม้ไผ่ที่ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชันมีค่าสูงขึ้น



บทที่ 3

วัสดุและการทดลอง

3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วยพอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เกรด 3052D จากบริษัทเนเจอร์เวิร์ค (Nature Works LLC) ผงขี้เลื่อยชนิดไม้ตะเคียนทอง (*Hopea odorata Roxb*) จากโรงเลื่อยไม้แปรรูปปิยรัตน์ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา พอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเพทาเรต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) เกรด Ecoflex FBX 7011 จากบริษัท บีเอเอสเอฟ (BASF) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) จากบริษัท คาร์โรเออบาร์ (Carlo Erba) มาลีอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) และเปอร์ออกไซด์ชนิด 2,5 บิส(เทอ-บิวทิลเพอออกซี)-2,5 ไดเมทิลเฮกเซน (2,5-bis(tert-butyl peroxy)-2,5 dimethylhexane, Luperox 101) จากบริษัท ซิกม่า-แอลดริช (Sigma-Aldrich)

3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมผงขี้เลื่อย

คัดแยกผงขี้เลื่อยที่มีขนาดอยู่ในช่วง 300-425 ไมครอน นำผงขี้เลื่อยไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นผงขี้เลื่อยที่ยังไม่ผ่านการตัดแปร (untreated sawdust, UT) จากนั้นนำผงขี้เลื่อยนี้มาผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการทำอัลคาไลน์เซชัน (alkalization) โดยการนำผงขี้เลื่อยแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำเส้นใยไปล้างด้วยน้ำจนได้สารละลายที่เป็นกลาง และนำผงขี้เลื่อยไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้เป็นผงขี้เลื่อยที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการทำอัลคาไลน์เซชัน (alkali treated sawdust, AT) [Nomai, 2013]

3.2.2 การเตรียมพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์

พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์ (poly(lactic acid) grafted with maleic anhydride, PLA-g-MA) ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องบดผสมภายใน (internal mixer, Hakke Rheomix 3000P) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที โดยปริมาณมาลีอิกแอนไฮไดรด์ที่ใช้คือ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณเปอร์ออกไซด์ที่ใช้คือ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก [Teamsinsungvon, 2010]

3.2.3 การวิเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์

ปริมาณมาลีอิกแอนไฮไดรด์บนพอลิแลคติกแอซิดถูกวิเคราะห์โดยการไตเตรทหมู่กรดซึ่งมาจากหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดรด์ ใช้ฟีนอล์ฟทาเลอิน (phenolphthalein) เป็นตัวบ่งชี้ (indicator) ตัวอย่างถูกละลายโดยใช้คลอโรฟอร์มและตกตะกอนด้วยเมทานอลเพื่อกำจัดมาลีอิกแอนไฮไดรด์และตัวริเริ่ม

ปฏิกิริยาที่เหลืออยู่ จากนั้นนำพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรไรต์ที่ซึ่งน้ำหนักมาละลายในสารละลายของคลอโรฟอร์มและเมทานอลที่อัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยปริมาตร แล้วทำการไตเตรททันทีด้วยสารละลายโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เลขกรด (acid number) และปริมาณการกราฟท์ (graft content) ถูกคำนวณจากสมการ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ พอลิแลคติกแอซิดที่ไม่มีมาลิกแอนไฮดรไรต์ถูกไตเตรทภายใต้สภาวะเดียวกัน [Wu, 2003]

$$\text{Acid number (mg KOH/g)} = \frac{V_{\text{KOH}}(\text{ml}) \times N_{\text{KOH}}(\text{N})}{\text{sample (g)}} \times 56.11 \quad (3.1)$$

$$\%G = \frac{(\text{Acid number} - M_0)}{2 \times 256} \times 98.06 \quad (3.2)$$

เมื่อ N คือนอมอลลิตี (normality, mol/l) V คือปริมาตร (ml) 56.11 คือน้ำหนักโมเลกุลของโปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ M_0 คือค่าการไตเตรทของพอลิแลคติกแอซิด (blank titration value) และ 98.06 คือน้ำหนักโมเลกุลของมาลิกแอนไฮดรไรต์

อินฟราเรดสเปกตรัมของพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรไรต์ถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของพอลิแลคติกแอซิดโดยใช้เครื่องฟูเรียทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, Bruker, Tensor 27) โดยใช้ attenuated total reflectance (ATR) mode จำนวนการสแกน 32 และความละเอียด (resolution) 4 cm^{-1} ในช่วงเลขคลื่น $4000\text{-}600 \text{ cm}^{-1}$

3.2.4 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิবিริลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต

นำพอลิแลคติกแอซิดและพอลิবিริลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออก จากนั้นทำการผสมพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิবিริลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตในอัตราส่วน 90:10, 80:20, 70:30 และเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Irganox 1010 และ Irgafos 168 ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก) ใช้ในปริมาณ 1 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม หลังจากนั้นทำการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ แบบสกรูชิดกันและหมุนตามกัน (co-rotating intermeshing twin screw extruder, Brabender DSE 35/17D) โดยตั้งอุณหภูมิที่กระบอกหุ้มสกรูเป็น 175/170/165/160/155 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 15 รอบต่อนาที หลังจากที่พอลิเมอร์ผสมออกมาจากหัวอัดรีด ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศก่อนที่จะนำไปกดด้วยเครื่องกดหยาบ หลังจากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อใช้สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีด (injection molding machine, Chuan Lih Fa, CLF 80T) ใช้อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปที่ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วใน

การฉีด 46 มิลลิเมตรต่อวินาที ความดันคงค้าง 1400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส

พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ถูกใช้เป็นสารช่วยให้เข้ากันในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต โดยเลือกพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ให้สมบัติทางกลที่เหมาะสมมาศึกษา โดยปริมาณของพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ที่ใช้คือ 3, 5 และ 7 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม การผสมถูกเตรียมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และขึ้นทสดอบถูกเตรียมด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบฉีด

3.2.5 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ที่มีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อย

พอลิเมอร์ผสมที่การปรับปรุงความเข้ากันได้ที่ให้สมบัติทางกลที่เหมาะสมที่สุดถูกนำไปศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติทางกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เสริมแรงด้วยผงซีลี้อย โดยปริมาณของผงซีลี้อยที่ใช้คือ 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งผงซีลี้อยที่นำมาศึกษานี้ได้ผ่านการทำอัลคาไลน์เซชัน ก่อนการผสมทำการอบพอลิแลคติกแอซิด พอลิบิวทิลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตและพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ส่วนผงซีลี้อยอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ แบบสกรูชิดกันและหมุนตามกัน (co-rotating intermeshing twin screw extruder, Brabender DSE 35/17D) โดยตั้งอุณหภูมิที่กระบอกหุ้มสกรูเป็น 175/170/165/160/155 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบสกรูเท่ากับ 15 รอบต่อนาที หลังจากที่พอลิเมอร์ผสมออกมาจากหัวอัดรีดปล่อยให้เย็นตัวในอากาศก่อนที่จะนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบ หลังจากนั้นนำเม็ดที่บดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อใช้สำหรับการเตรียมชิ้นงานทดสอบ โดยทำการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีด (injection molding machine, Chuan Lih Fa, CLF 80T) ใช้อุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปที่ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วในการฉีด 46 มิลลิเมตรต่อวินาที ความดันคงค้าง 1400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 30 องศาเซลเซียส

3.2.6 การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิต

3.2.6.1 สมบัติทางกล

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile properties) ทำตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้เครื่อง universal testing machine (Instron, 5565) ขนาดของเซลล์รับแรง (load cell) คือ 5 กิโลนิวตัน (kN) ความยาวของเกท (gauge length) คือ 50 มิลลิเมตร (mm) และความเร็วในการดึง คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min)

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact properties) ทำตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยเครื่อง impact testing machine (Atlas, BPI) และพลังงานการกระแทก (impact energy) ที่ใช้ในการทดสอบ คือ 2.7 จูล (J) โดยไม่ต้องทำรอยบากที่ชิ้นทดสอบ

3.2.6.2 สมบัติทางความร้อน

อุณหภูมิการเสื่อมสลายถูกวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง thermogravimetric analyzer (Perkin Elmer, SDT 2960) ที่อุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 600 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน คือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน

3.2.6.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวชิ้นงานทดสอบที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง (tensile fractured surface) และ/หรือ พื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก (impact fractured surface) ของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมโพสิตถูกศึกษาด้วยเครื่อง scanning electron microscope (JEOL, JCM6010) ที่ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (keV) โดยพื้นผิวของชิ้นงานถูกเคลือบด้วยทองคำก่อนนำไปศึกษา



บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต

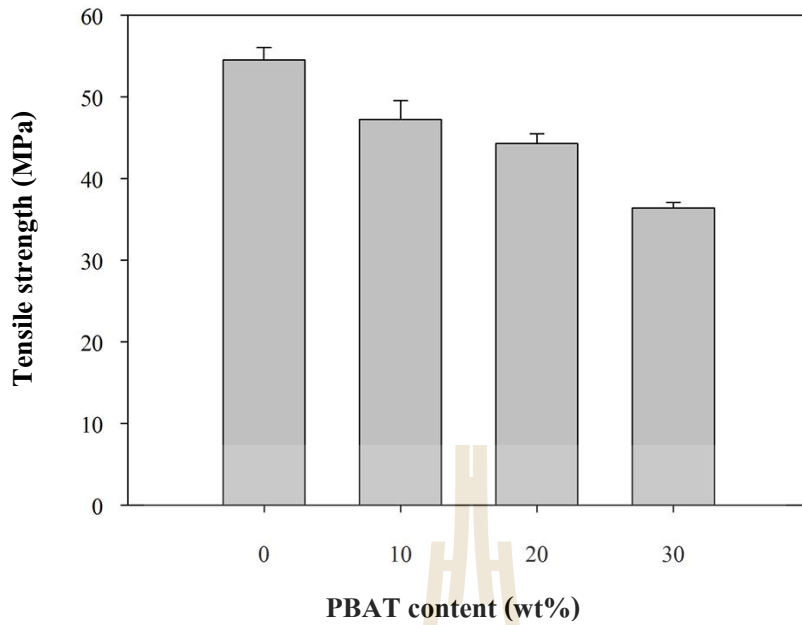
4.1.1 สมบัติทางกล

4.1.1.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

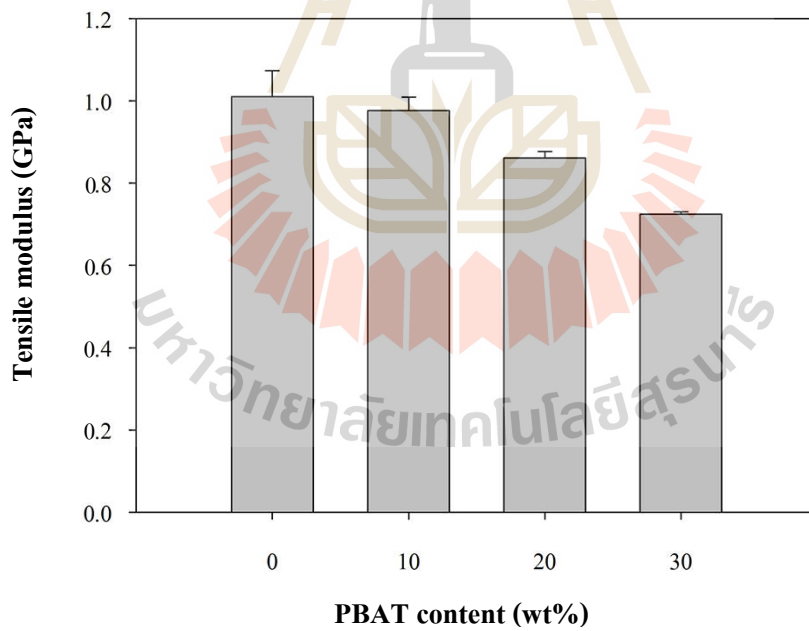
ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต แสดงดังตารางที่ 4.1 เมื่อปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมลดลงดังแสดงรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ แต่ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น โดยค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณของพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง 296 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสที่ต่ำกว่าพอลิแลคติกแอซิด ส่งผลให้มีการปรับปรุงความเหนียวของพอลิแลคติกแอซิดอย่างมาก ผลการทดลองที่คล้ายกันนี้ถูกพบโดย Jiang และคณะ [Jiang et al., 2006]

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกลของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ

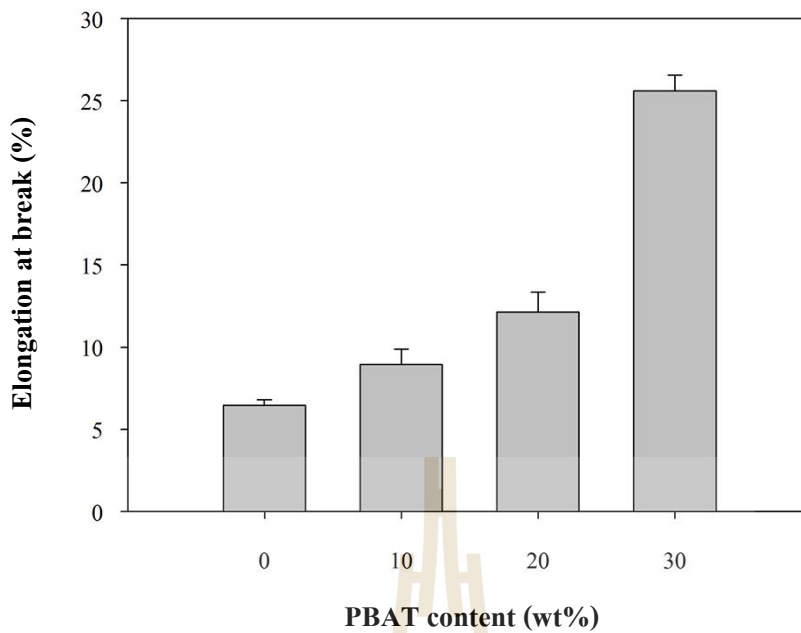
Composition [wt%]	Tensile strength [MPa]	Tensile modulus [GPa]	Elongation at break [%]	Impact strength [kJ/m ²]
PLA	54.5±1.5	1.01±0.06	6.5±0.3	1.47±0.03
PLA/PBAT10	47.2±2.3	0.98±0.03	8.9±0.9	1.65±0.08
PLA/PBAT20	44.3±1.2	0.86±0.02	12.1±1.2	2.50±0.04
PLA/PBAT30	36.4±0.7	0.72±0.01	25.6±0.9	2.91±0.06



รูปที่ 4.1 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ



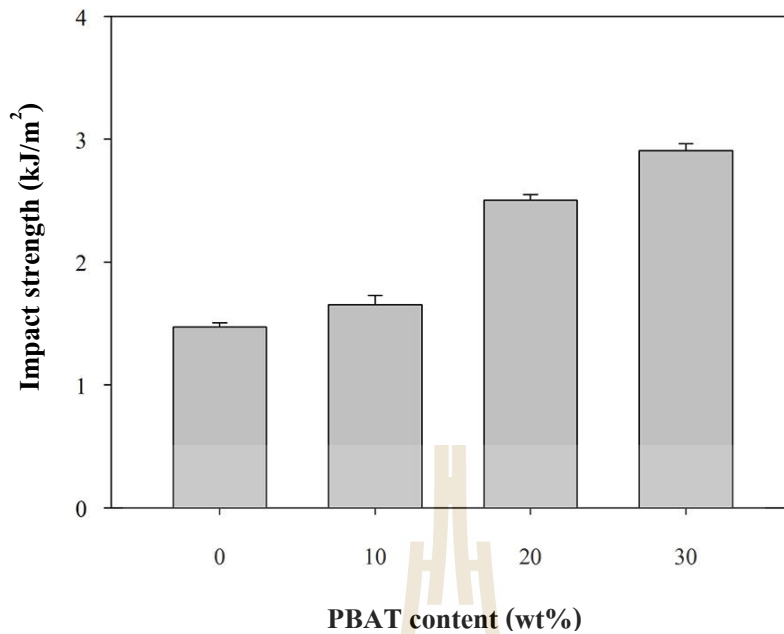
รูปที่ 4.2 ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ



รูปที่ 4.3 ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ

4.1.1.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้นโดยการเติมพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น 12 70 และ 97 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด เนื่องจากการมีเฟสยืดหยุ่นช่วยให้การกระจายพลังงานได้มากขึ้น [Jiang et al., 2006]

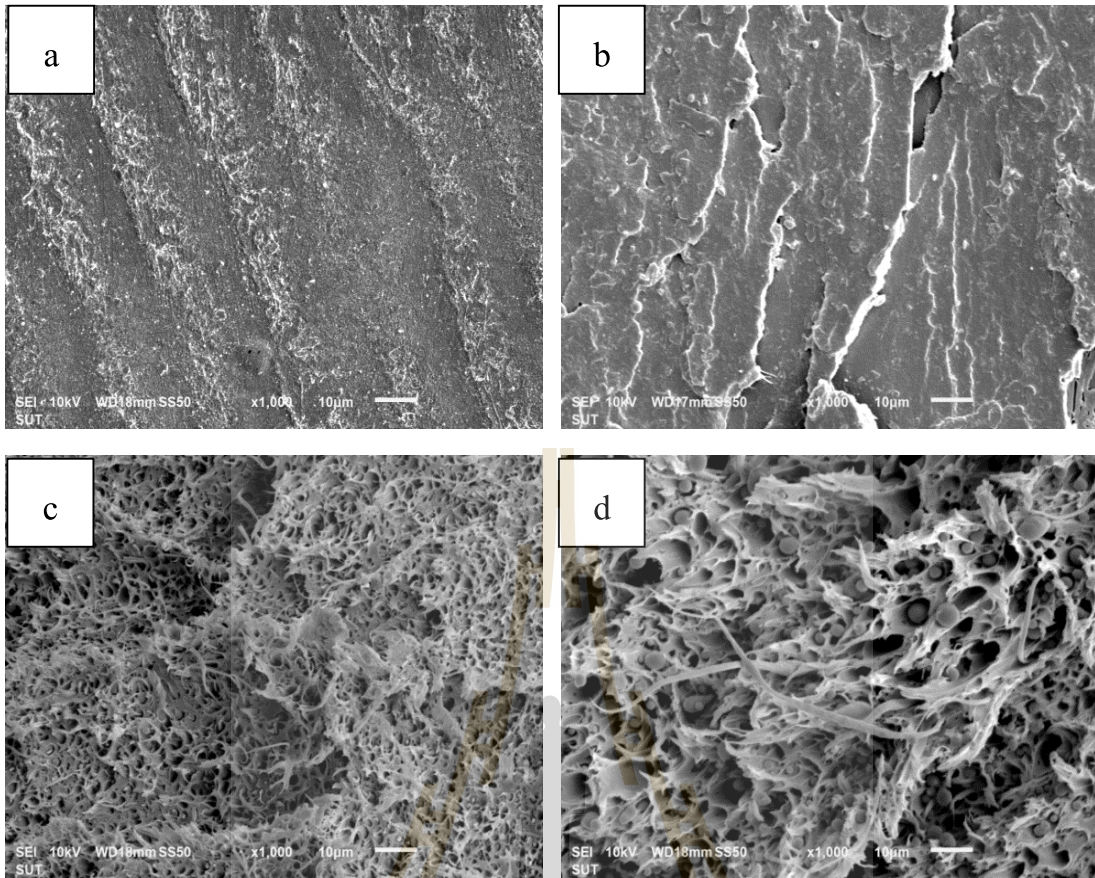


รูปที่ 4.4 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ

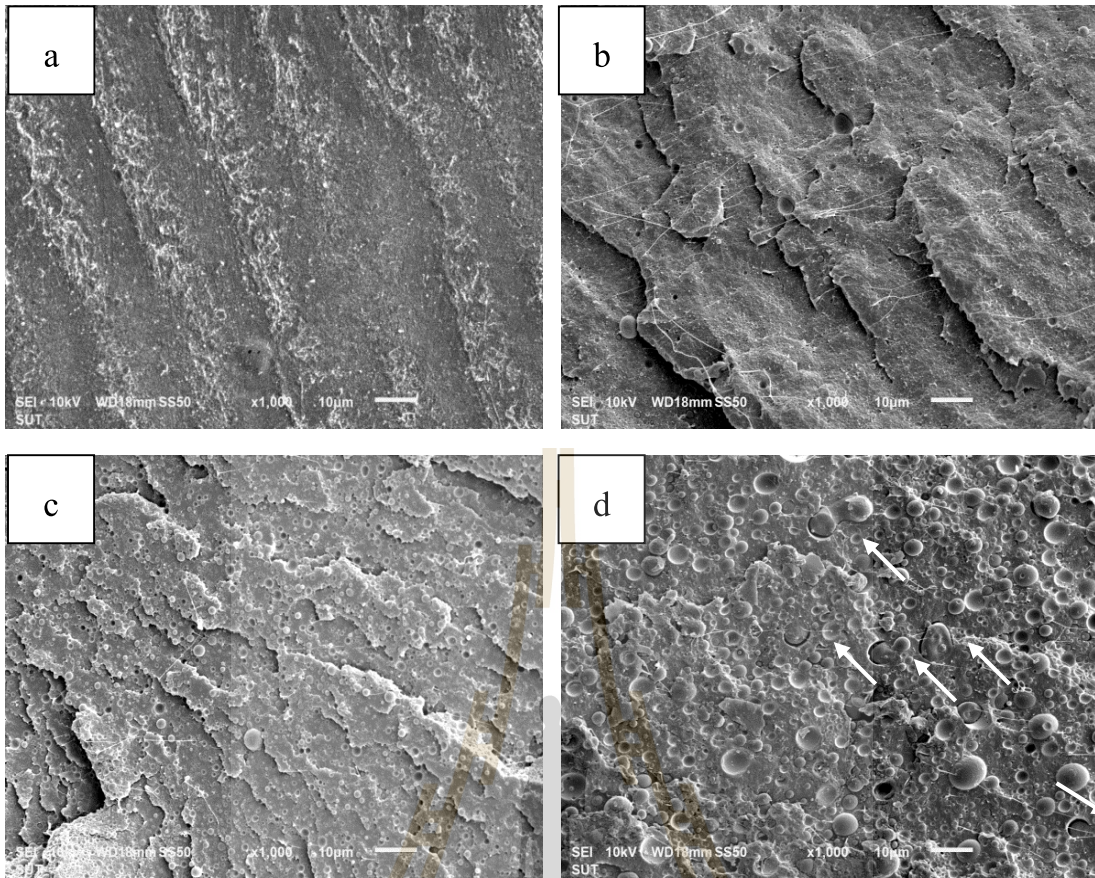
4.1.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงที่ปริมาณพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 พบลักษณะผิวเรียบของพอลิแลคติกแอซิดซึ่งแสดงพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะ (รูปที่ 4.5 a) และพบลักษณะเป็นเส้นใยที่เกิดขึ้นเนื่องจากถูกดึงยึดในพอลิเมอร์ผสม (รูปที่ 4.5 b-d) ซึ่งสามารถสนับสนุนการเพิ่มขึ้นของค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ปริมาณพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.6 พบอนุภาคของพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตในพอลิแลคติกแอซิด แสดงว่าพอลิเมอร์ผสมนี้จัดเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่เข้ากัน (immiscible blends) เมื่อปริมาณของพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น ขนาดของเฟสกระจายมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการเกิดการเกาะกลุ่ม (coalescence) ของพอลิบิวทีลีโนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลง



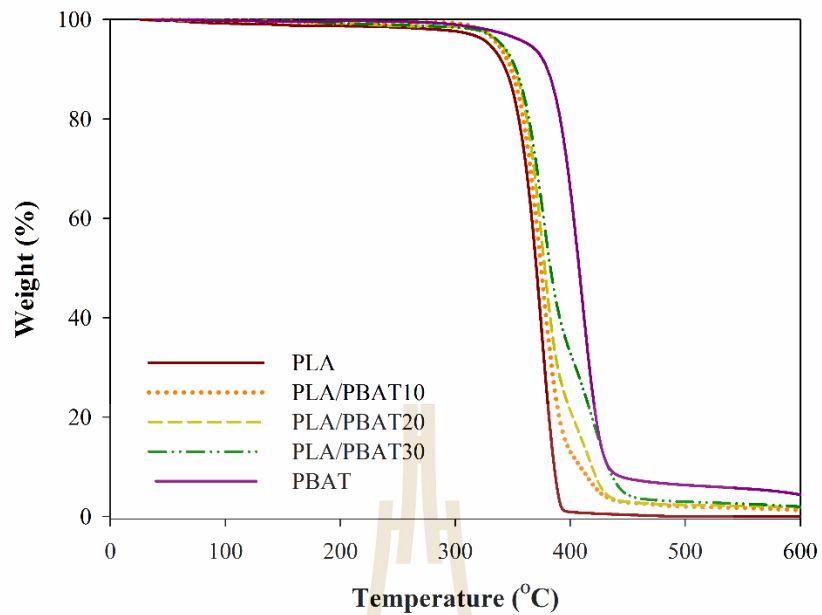
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (a) PLA, (b) PLA/PBAT10, (c) PLA/PBAT20, (d) PLA/ PBAT30



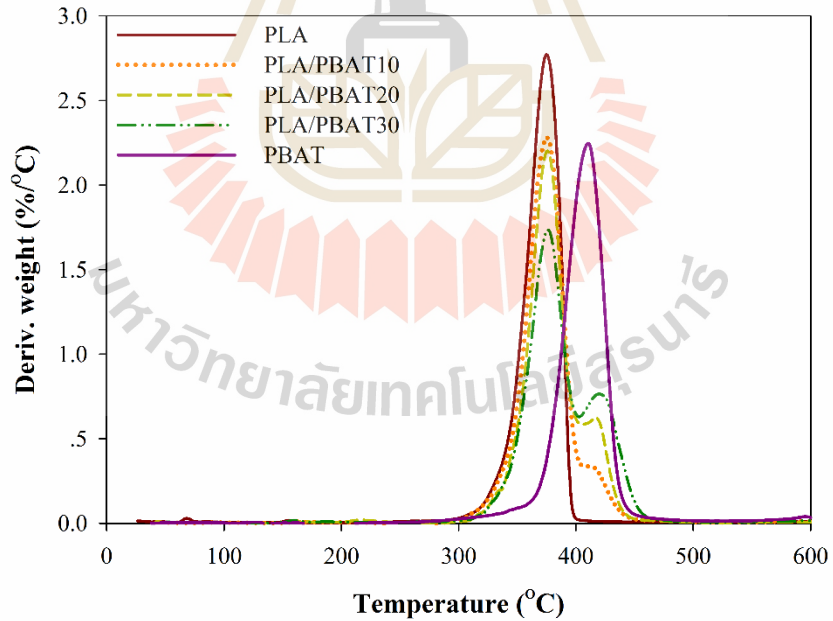
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (a) PLA, (b) PLA/PBAT10, (c) PLA/PBAT20, (d) PLA/PBAT30

4.1.3 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และ DTA ของพอลิแลคติกแอซิด พอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต และพอลิเมออร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 5 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 5% weight loss, T_5) อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 50 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 50% weight loss, T_{50}) และอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อน (thermal decomposition temperature, T_d) ของพอลิแลคติกแอซิด พอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตและพอลิเมออร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมี T_5 T_{50} และ T_d สูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด แสดงว่าพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าพอลิแลคติกแอซิด จากกราฟ DTA ของพอลิแลคติกแอซิดในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าพอลิแลคติกแอซิดมีขั้นตอนในการเสื่อมสลายด้วยความร้อนหนึ่งขั้นตอน และมีค่า T_5 T_{50} และ $T_{d,1}$ ที่อุณหภูมิ 330 371 และ 374 องศาเซลเซียสตามลำดับ ไม่มีเถ้าเหลือ พอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมีขั้นตอนในการเสื่อมสลายด้วยความร้อนหนึ่งขั้นตอน และมีค่า T_5 T_{50} และ $T_{d,1}$ ที่อุณหภูมิ 372 413 และ 414 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในกรณีพอลิเมออร์ผสมพบว่าการเสื่อมสลายด้วยความร้อน 2 ขั้นตอน โดยอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่หนึ่ง ($T_{d,1}$) เป็นของพอลิแลคติกแอซิด และอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่สอง ($T_{d,2}$) เป็นของพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต เมื่อเติมพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตลงไปในพอลิแลคติกแอซิดพบว่า T_5 และ T_{50} เพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ส่วน T_d และปริมาณเถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.7 กราฟ TGA ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 กราฟ DTA ของพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่าง ๆ

Formulation	T ₅ (°C)	T ₅₀ (°C)	T _{d,1} (°C)	T _{d,2} (°C)	Residue at 600°C (%)
PLA	330	371	374	-	0.00
PBAT	372	413	-	419	5.8
PLA/PBAT10	337	375	377	418	1.3
PLA/PBAT20	341	378	377	418	1.8
PLA/PBAT30	343	383	377	417	1.9

เมื่อพิจารณาสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักให้สมบัติที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งสัดส่วนการผสมนี้ถูกนำไปใช้ในการศึกษาในส่วนถัดไป

4.2 ผลของปริมาณสารช่วยให้เข้ากันต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต

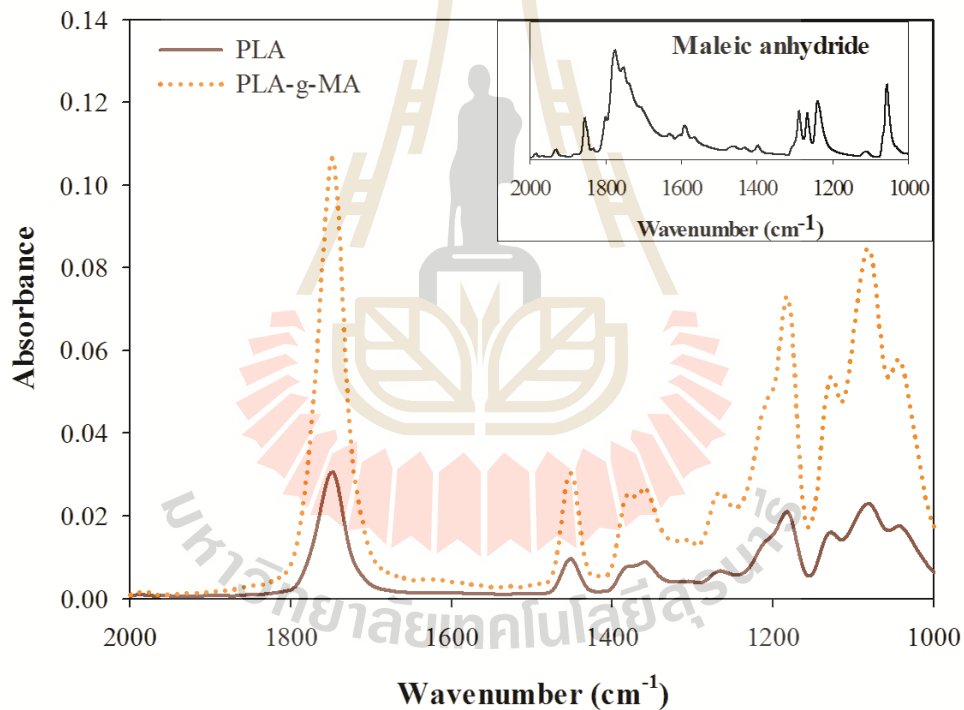
4.2.1 การวิเคราะห์พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดรายด์

ปริมาณการกราฟท์ของมาลีอิกแอนไฮดรายด์บนพอลิแลคติกแอซิดที่ได้จากการไตเตรทของหมู่กรดที่ได้จากหมู่ฟังก์ชันแอนไฮดรายด์มีค่า 0.86 เปอร์เซ็นต์

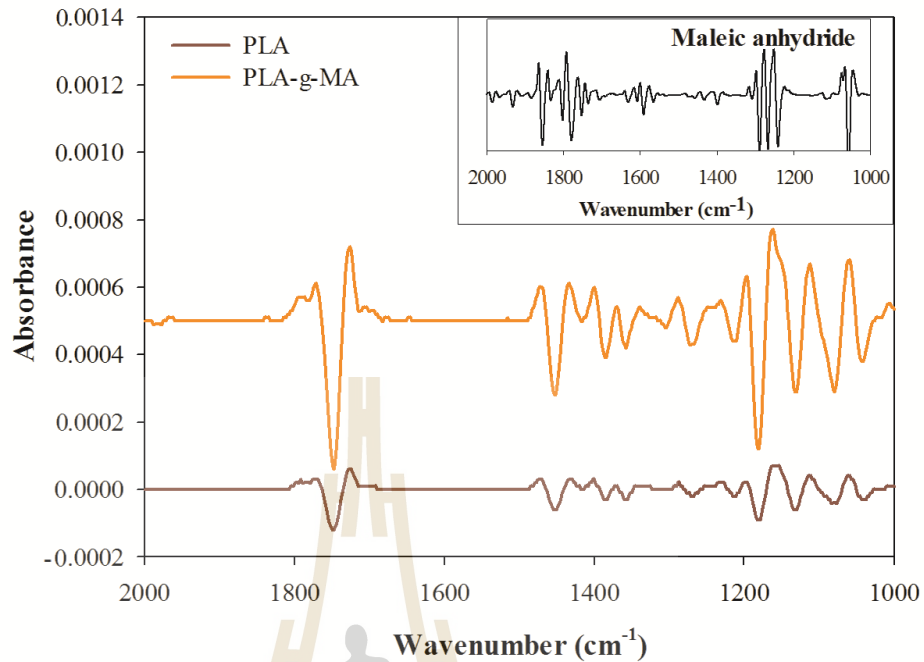
FTIR ถูกใช้ในการยืนยันการกราฟท์ของพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดรายด์ สเปกตรัมของพอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดรายด์ และมาลีอิกแอนไฮดรายด์ แสดงในรูปที่ 4.9 โดยทั่วไป หมู่ซัคซินิค แอนไฮดรายด์ (succinic anhydride groups) แสดงการดูดกลืนที่มาก (intensive absorption) ที่ 1780 cm^{-1} และการดูดกลืนที่อ่อน (weak absorption) ที่ 1850 cm^{-1} เนื่องจากการสั่นแบบสมมาตร (symmetric stretching) และไม่สมมาตร (asymmetric stretching) ของ C=O [Zhu et al., 2012; Mani et al., 1999] จากรูปพบว่าการดูดกลืนที่อ่อนที่ 1780 cm^{-1} และอาจจะซ้อนทับกับการดูดกลืนของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) ของพอลิแลคติกแอซิด นอกจากนี้พบว่าการ

ดูดกลืนที่ 1850 cm^{-1} ยากต่อการสังเกต ดังนั้นสเปกตรัมแบบอนุพันธ์อันดับที่สอง (secondary derivative of FTIR spectrum) ถูกใช้สำหรับการปรับปรุงของการซ้อนทับของพีค

สเปกตรัมแบบอนุพันธ์อันดับที่สองของพอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดรอยด์ และมาลีอิกแอนไฮดรอยด์แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดรอยด์มีการดูดกลืนที่ 1780 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบสมมาตรของ C=O เนื่องจากการดูดกลืนของหมู่แอนไฮดรอยด์แบบวงแหวน (cyclic anhydride group) และพบการดูดกลืนที่ 1850 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบไม่สมมาตรของ C=O เป็นพีคเล็ก ๆ ในสเปกตรัมของพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดรอยด์ จากผลดังกล่าวเป็นการยืนยันว่ามาลีอิกแอนไฮดรอยด์ถูกกราฟท์บนพอลิแลคติกแอซิด [Zhu et al., 2012]



รูปที่ 4.9 FTIR สเปกตรัมของพอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดรอยด์ และมาลีอิกแอนไฮดรอยด์



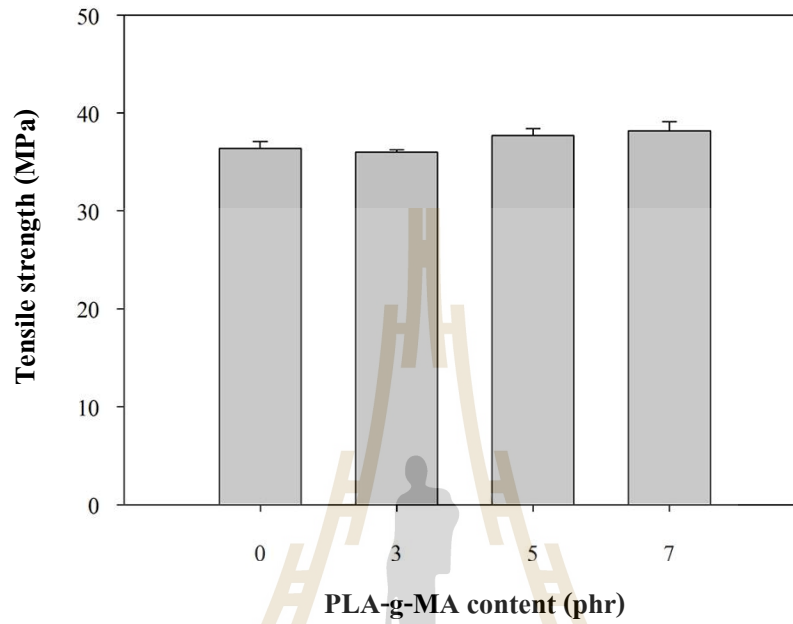
รูปที่ 4.10 FTIR สเปกตรัมแบบอนุพันธ์อันดับที่สองของพอลิแลคติกแอซิด พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์ และมาลีอิกแอนไฮไดรด์

4.2.2 สมบัติทางกล

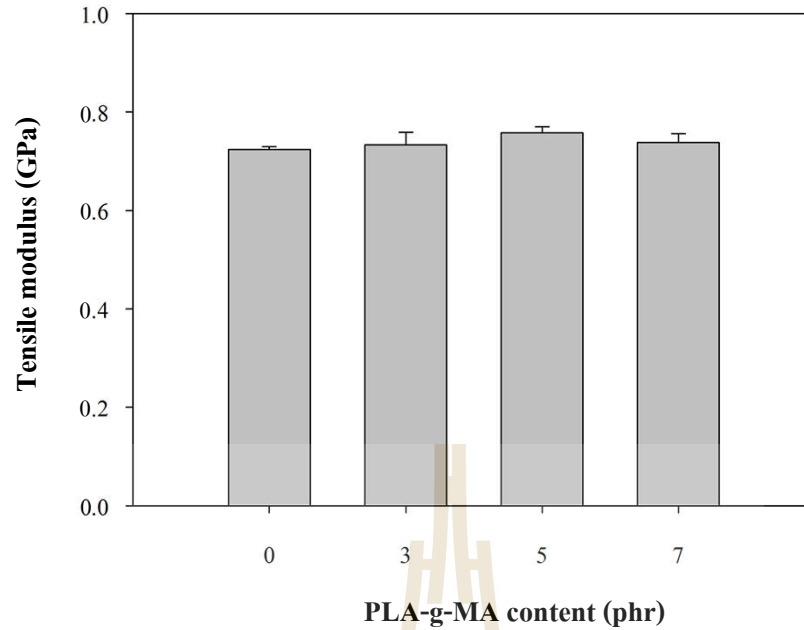
4.2.2.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์เป็นสารช่วยให้เข้ากันแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าการเมื่อเติมสารช่วยให้เข้ากัน 3 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสมไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น 63.37 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต [Yuan et al., 2009] เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮไดรด์ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนค่ามอดูลัสไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดมีค่าต่ำลง อาจเป็นผลมาจากการอิมมัตว์ที่อินเทอร์เฟซ [Lomellini et al., 1996] ปริมาณ

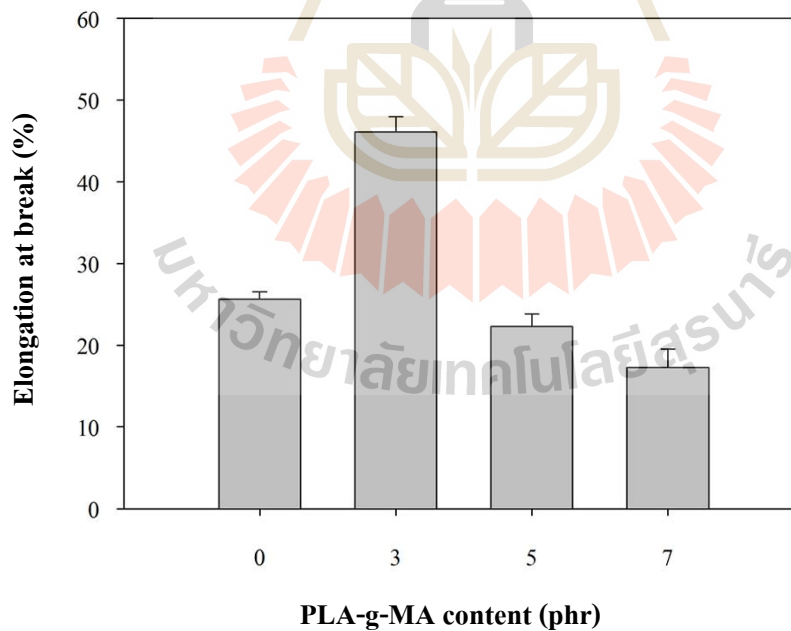
ของพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดรไรต์ที่มากเกินไป จะเคลื่อนที่ไปที่อินเทอร์เฟซได้ยากและอาจอยู่ที่เฟสใดเฟสหนึ่ง [Sailaja et al., 2005]



รูปที่ 4.11 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิবিธีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดรไรต์ที่ปริมาณต่าง ๆ



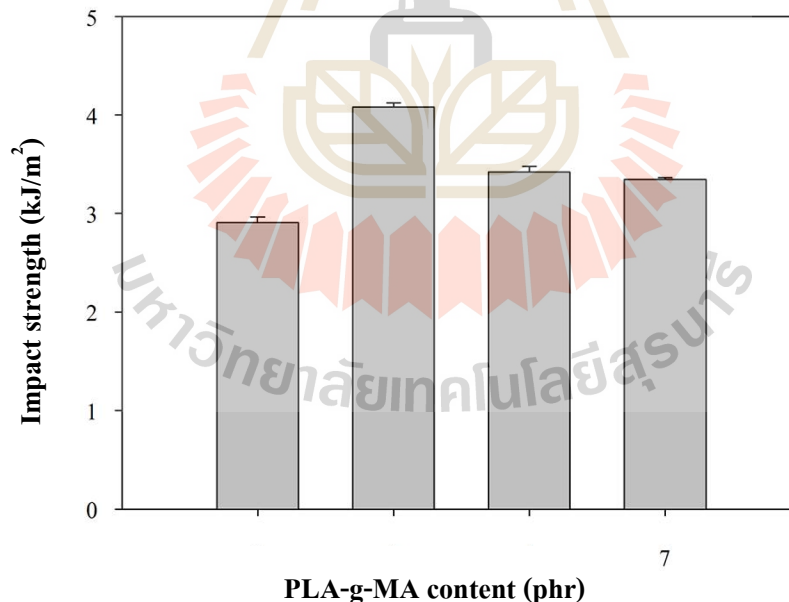
รูปที่ 4.12 ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดีเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ที่ปริมาณต่าง ๆ

4.2.2.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมและที่เติมสารช่วยให้เข้ากันที่ปริมาณต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.14 พอลิเมอร์ผสมที่มีการเติมพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราต 3 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสมมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น 40.30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเติมพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราต แสดงว่าพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราตปรับปรุงความเข้ากันได้โดยการยึดติดระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราต 5 และ 7 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสมค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลง Lin และคณะ (2012) พบว่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยเตตระบิวทิวไททาเนต (tetrabutyl titanate, TBT) 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าเพิ่มขึ้น 76 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับพอลิแลคติกแอซิด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเตตระบิวทิวไททาเนต ไม่พบการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานต่อแรงกระแทก [Lin et al., 2012]



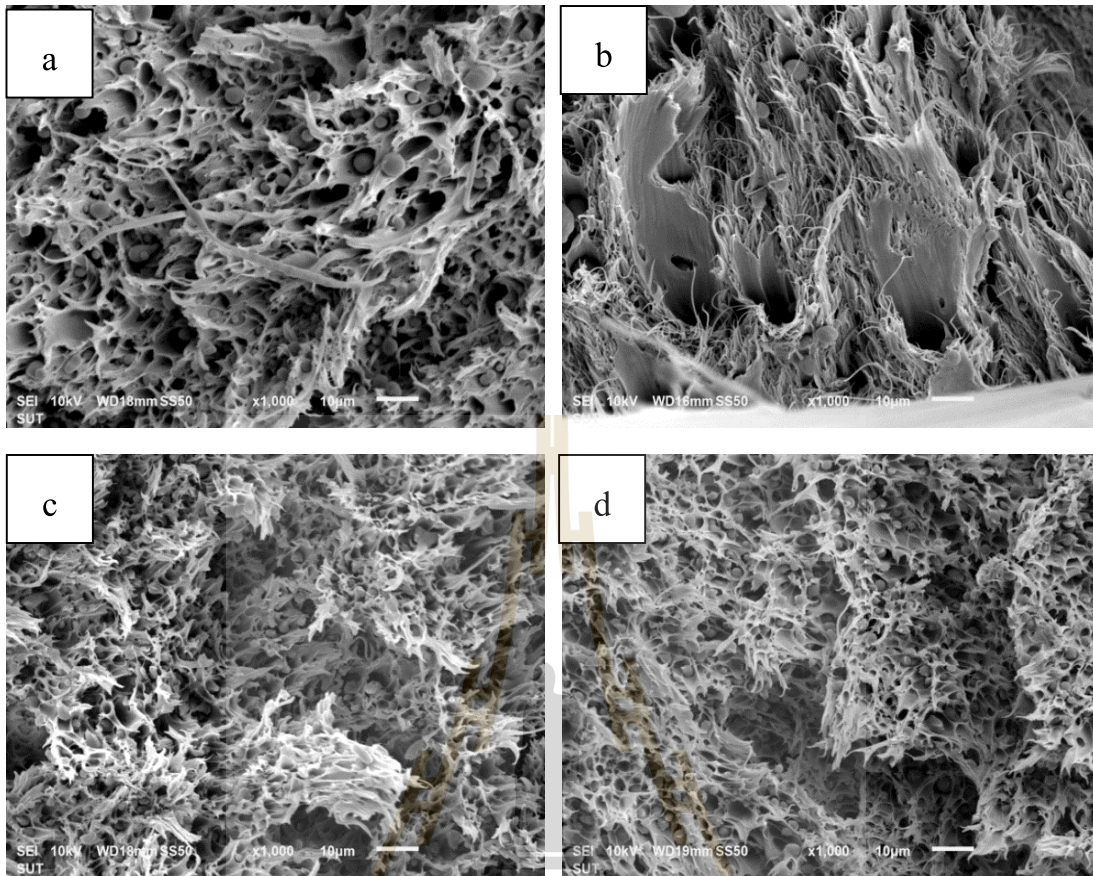
รูปที่ 4.14 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราตที่ปริมาณต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ต่าง ๆ

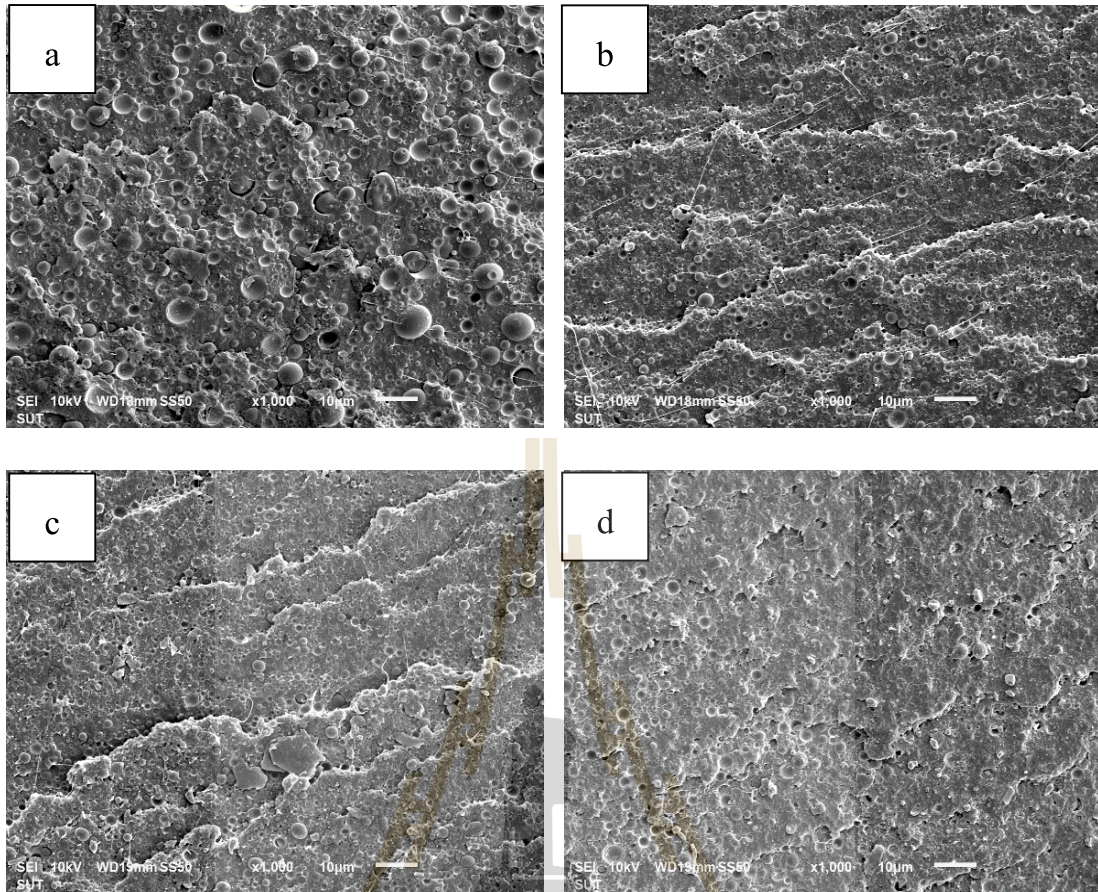
Composition [wt%]	Tensile strength [MPa]	Tensile modulus [GPa]	Elongation at break [%]	Impact strength [kJ/m ²]
PLA/PBAT30	36.4±0.7	0.72±0.01	25.6±0.9	2.91±0.06
PLA/PBAT30/PLA-g-MA 3	37.0±0.2	0.73±0.03	46.1±1.9	4.08±0.15
PLA/PBAT30/PLA-g-MA 5	37.7±0.7	0.74±0.01	22.4±1.5	3.42±0.06
PLA/PBAT30/PLA-g-MA 7	38.2±0.9	0.74±0.02	17.3±2.3	3.35±0.02

4.2.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ต่าง ๆ ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงแสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าพอลิเมอร์ผสมแสดงการแตกหักแบบเหนียว มีการดึงยืดเป็นเส้นใยยาว ที่ปริมาณพอลิแลคติกกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ 3 ส่วนในร้อยละส่วน แสดงลักษณะของเส้นใยมีการดึงยืดได้มากกว่าที่ปริมาณอื่น ซึ่งสอดคล้องกับค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก ในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้พบว่าขนาดอนุภาคของพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมีขนาดใหญ่ แต่ในพอลิเมอร์ผสมที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ที่ปริมาณ 3 ส่วนในหนึ่งร้อยละของพอลิเมอร์ผสม พบว่าเฟสกระจายมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิด กราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์ไปเพิ่มแรงยึดติดบริเวณอินเทอร์เฟซ แต่เมื่อปริมาณพอลิแลคติกแอซิด กราฟท์มาลีนิกแอนไฮดรายด์เพิ่มขึ้นไม่พบการเปลี่ยนแปลงของขนาดของเฟสกระจาย



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดรายด์ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (a) PLA/PBAT30, (b) PLA/PBAT30/PLA-g-MA3, (c) PLA/PBAT30/PLA-g-MA5, (d) PLA/PBAT30/PLA-g-MA7



รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดราดที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงกระแทก (a) PLA/PBAT30, (b) PLA/PBAT30/PLA-g-MA3, (c) PLA/PBAT30/PLA-g-MA5, (d) PLA/PBAT30/PLA-g-MA7

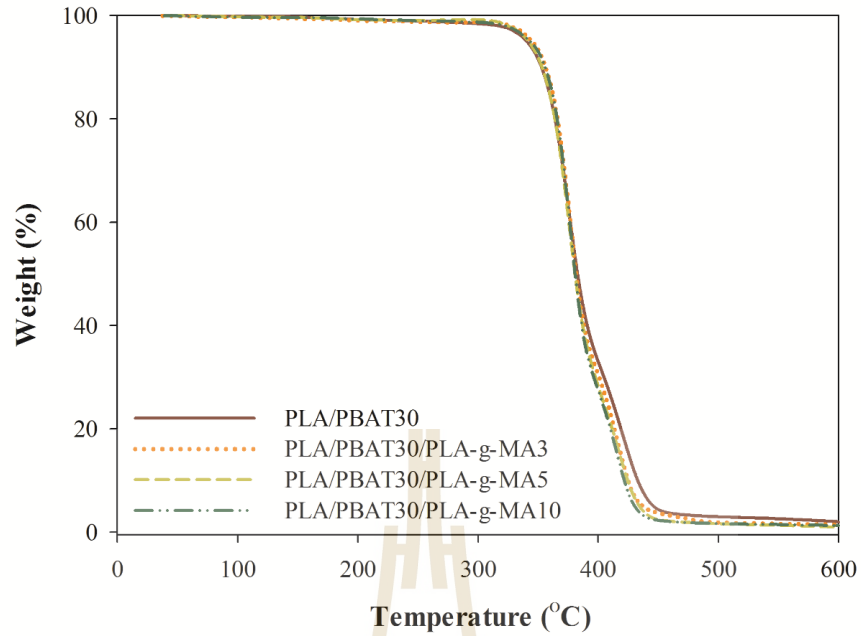
4.2.4 สมบัติทางความร้อน

กราฟ TGA และ DTA ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิ บิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 5 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 5% weight loss, T_5) อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสีย น้ำหนัก 50 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 50% weight loss, T_{50}) และอุณหภูมิ การเสื่อมสลายด้วยความร้อน (thermal decomposition temperature, T_d) ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณของพอลิแลคติกแอซิด กราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.4 จากกราฟ DTA ของพอลิเมอร์ผสมในรูปที่ 4.18 แสดง ให้เห็นพอลิเมอร์ผสมมีการเสื่อมสลายด้วยความร้อน 2 ขั้นตอน เมื่อเติมพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอน ไฮดรายด์ 3 ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสมลงไปในพอลิเมอร์ผสม พบว่า T_5 T_{50} และ T_d เพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอน ไฮดรายด์เพิ่มขึ้น พบว่า T_5 T_{50} และ T_d ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

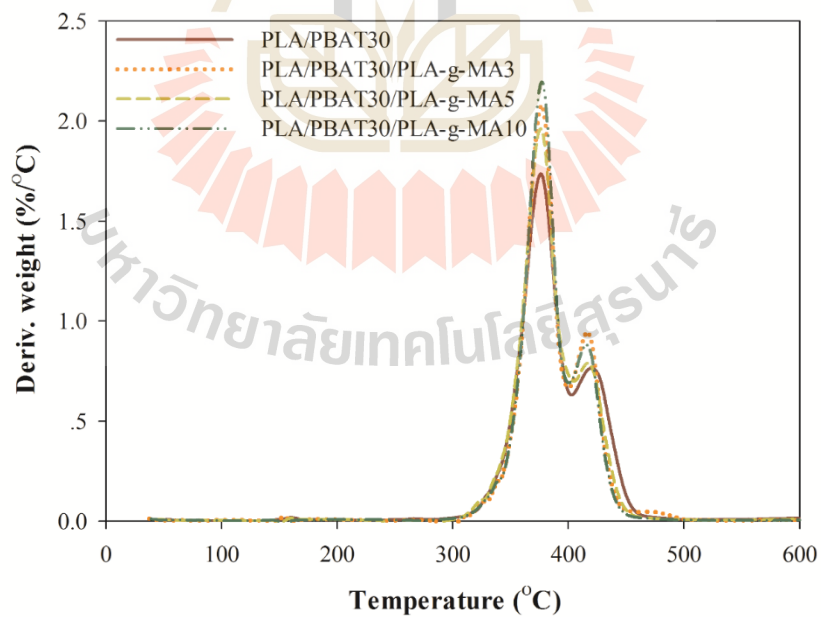
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์ มาลิกแอนไฮดรายด์ต่าง ๆ

Formulation	T_5 (°C)	T_{50} (°C)	$T_{d,1}$ (°C)	$T_{d,2}$ (°C)	Residue at 600°C (%)
PLA/PBAT30	343	383	376	417	1.9
PLA/PBAT30/PLA-g-MA3	345	384	378	417	1.3
PLA/PBAT30/PLA-g-MA7	342	380	376	417	0.9
PLA/PBAT30/PLA-g-MA10	341	381	376	417	1.3

จากสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์ มาลิกแอนไฮดรายด์ พบว่าปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลิกแอนไฮดรายด์ที่ 3 ส่วนในหนึ่งร้อย ส่วนของพอลิเมอร์ผสมเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการนำไปศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติของพอลิเมอร์ ผสม



รูปที่ 4.17 กราฟ TGA ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิ
 บิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอีกแอนไฮดราย์ต่าง ๆ



รูปที่ 4.18 กราฟ DTA ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิ
 บิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอีกแอนไฮดราย์ต่าง ๆ

4.3 ผลของปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต

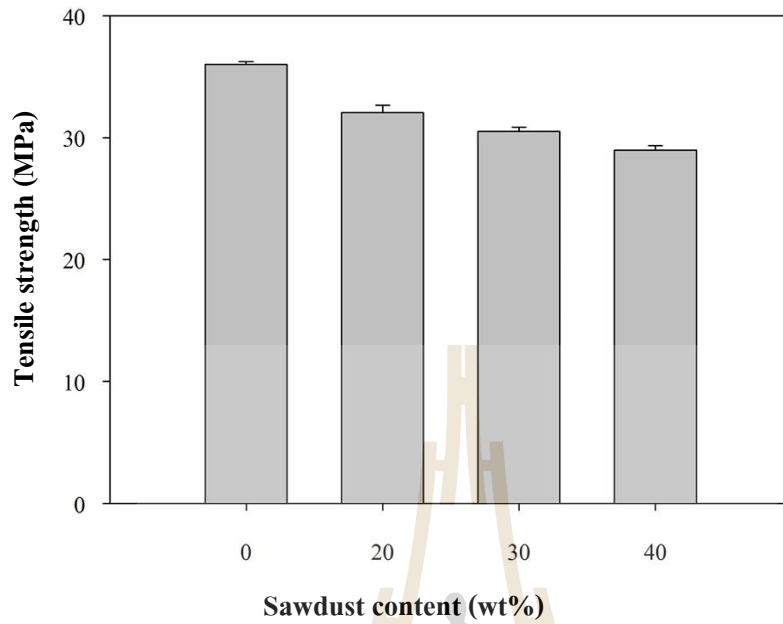
4.3.1 สมบัติทางกล

4.3.1.1 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

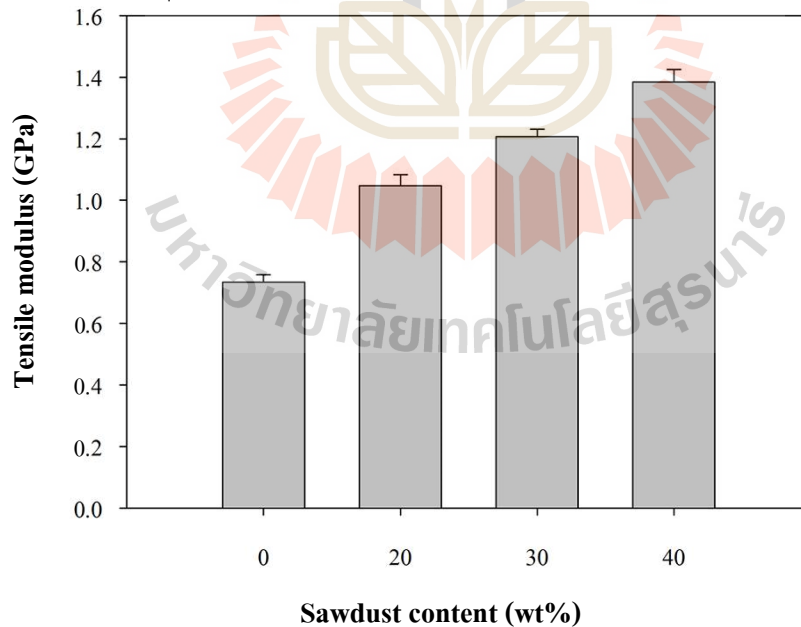
สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อย แสดงดังตารางที่ 4.5 ผลของปริมาณของผงซีลี้อยต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงแสดงดังรูปที่ 4.19 โดยผงซีลี้อยที่นำมาศึกษานี้ได้ผ่านกระบวนการตัดแปรพื้นผิวด้วยการทำอัลคาไลน์เซชันที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติมผงซีลี้อยในปริมาณ 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดลดลง 10.96, 15.29, 19.55 เปอร์เซ็นต์ และ 86.33, 90.21 และ 92.63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อย ในขณะที่ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น 42.89, 64.63 และ 88.68 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลการทดลองสอดคล้องกับ Ibrahim และคณะ ซึ่งศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยพาล์มต่อสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดและพอลิคาร์โพรแลคโตน ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์คอมโพสิตเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น เนื่องจากเส้นใยเกิดการเกาะกลุ่มกัน ส่งผลเสียต่อการถ่ายโอนความเค้นระหว่างเส้นใยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ [Ibrahim et al., 2014]

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีรีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยที่ปริมาณต่าง ๆ

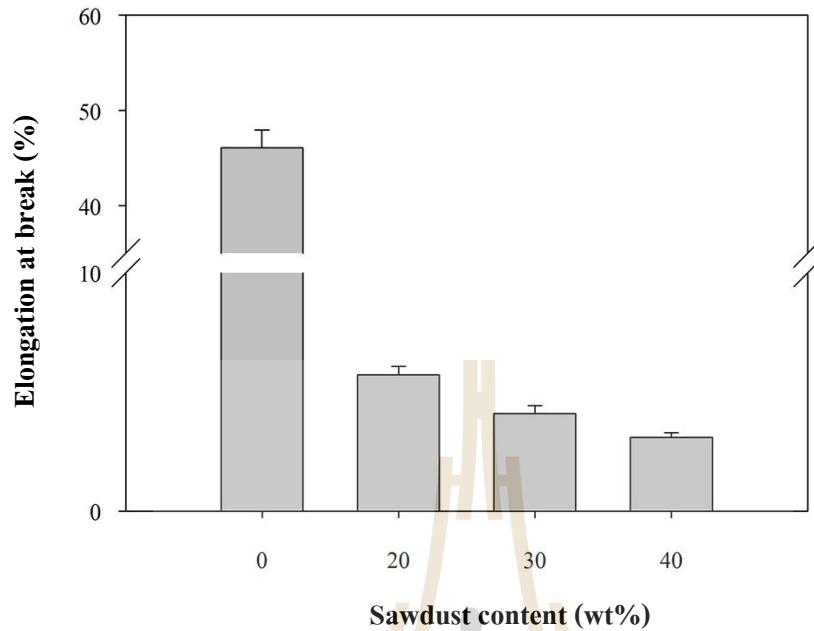
Composition [wt%]	Tensile strength [MPa]	Tensile Modulus [GPa]	Elongation at break [%]	Impact strength [kJ/m ²]
PLA/PBAT30/PLA-g-MA3	36.4±0.7	0.72±0.01	25.6±0.9	2.91±0.06
PLA/PBAT30/PLA-g-MA3/AT20	36.0±0.2	0.73±0.03	41.8±0.1	4.00±0.22
PLA/PBAT30/PLA-g-MA3/AT30	37.7±0.7	0.75±0.01	22.1±3.3	3.42±0.06
PLA/PBAT30/PLA-g-MA3/AT40	38.2±0.9	0.74±0.02	16.8±2.9	3.35±0.02



รูปที่ 4.19 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิอีพ็อกซีเรซินอะดิเปตโคเทอเรพทาเลตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ



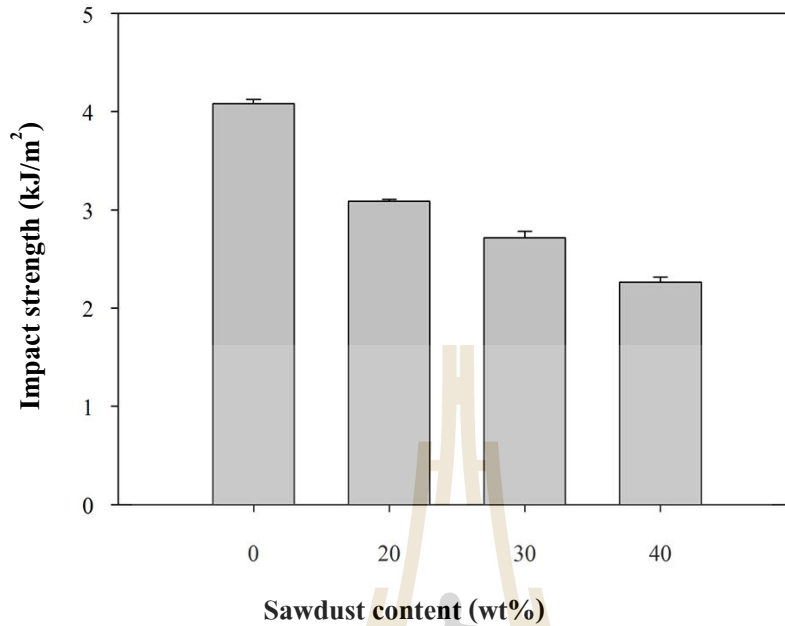
รูปที่ 4.20 ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิอีพ็อกซีเรซินอะดิเปตโคเทอเรพทาเลตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.21 ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ

4.3.1.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทก

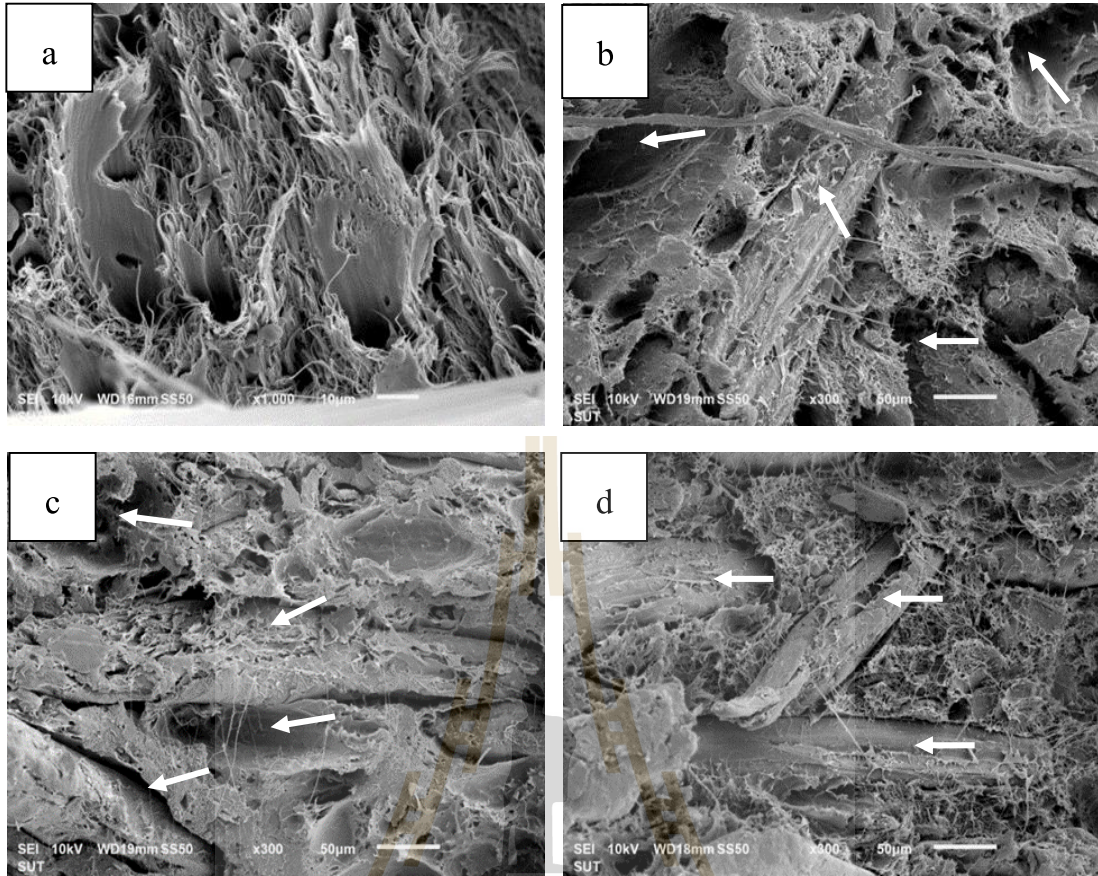
พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ มีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำลงเมื่อปริมาณของผงซีลี้อยู่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.22 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าลดลงจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ 22.93, 32.17 และ 43.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อปริมาณของผงซีลี้อยู่เพิ่มขึ้นทำให้มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และแรงยึดติดระหว่างซีลี้อยู่และพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ดีจึงส่งผลเสียต่อการถ่ายโอนพลังงานระหว่างเฟสทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย [Nomai, 2013] จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด พบการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและช่องว่างระหว่างผงซีลี้อยู่กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 ค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิবিวธี ลินอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยที่ ปริมาณต่าง ๆ

4.3.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมแสดงดังรูปที่ 4.23 (a) และพอลิเมอร์คอมโพสิต ที่ปริมาณของผงซีลี้อย 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.23 (b-d) พบว่าเมื่อมีการเติม ผงซีลี้อย ลักษณะการตั้งยัดของพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดได้น้อยลงและไม่มีลักษณะเป็นเส้นใยที่เกิดเนื่องจากการ ตั้ง จากรูปที่ 4.23 (b) พบว่าพอลิเมอร์เมทริกซ์มีลักษณะเป็นเส้นใยเล็ก ๆ เชื่อมติดอยู่ระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับผงซีลี้อย แต่ยังไม่พบการหลุดออกของผงซีลี้อยและเกิดช่องว่างระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับผงซีลี้อย เนื่องจากแรงยึดติดระหว่างผงซีลี้อยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่ไม่ดี และเมื่อเพิ่มปริมาณของผงซีลี้อย 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักดังแสดงในรูปที่ 4.23 (c-d) พบว่ามีการเกาะกลุ่มกันของผงซีลี้อยและมีการกระจายตัว ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติทางกลที่มีค่าต่ำลงเมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้น



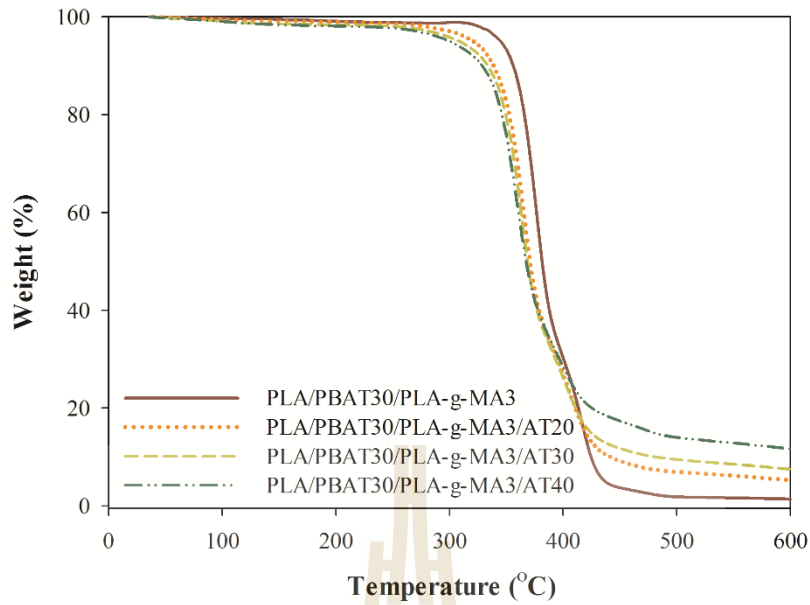
รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราดที่กำลังขยาย 300 เท่า ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิবিธีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้ด้วยพอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอกแอนไฮดรายด์มีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ผ่านการทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง (a) PLA/PBAT30/PLA-g-MA3, (b) PLA/PBAT/PLA-g-MA3/AT20 (c) PLA/PBAT30/PLA-g-MA3/AT30 (d) PLA/PBAT/PLA-g-MA3/AT40

4.3.3 สมบัติทางความร้อน

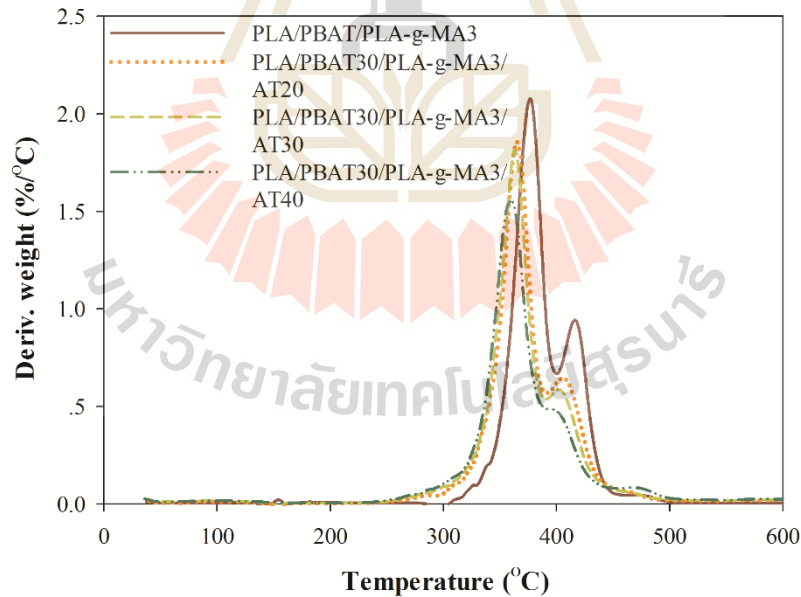
กราฟ TGA และ DTA ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 5 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 5% weight loss, T_5) อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนที่การสูญเสียน้ำหนัก 50 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 50% weight loss, T_{50}) และอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อน (thermal decomposition temperature, T_d) ของพอลิแลคติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.6 เมื่อเติมผงซีลี้อย่างลงในพอลิเมอร์ผสม พบว่า T_5 T_{50} และ T_d ลดลง และลดลงต่อเนื่องตามปริมาณผงซีลี้อยู่ที่เพิ่มขึ้น Huda และคณะ พบว่าความเสถียรทางความร้อนของพอลิแลคติกแอซิดลดลงเมื่อเติมผงไม้ลงไป และอุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์คอมโพสิตลดลง เมื่อปริมาณผงไม้เพิ่มขึ้น [Huda et al., 2006] และปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นตามปริมาณผงซีลี้อยู่ที่ใส่ลงไปในพอลิเมอร์ผสม

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการเสื่อมสลายด้วยความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อยู่ที่ปริมาณต่าง ๆ

Formulation	T_5 (°C)	T_{50} (°C)	$T_{d,1}$ (°C)	$T_{d,2}$ (°C)	Residue at 600°C (%)
PLA/PBAT30/PLA-g-MA3	345	384	37	418	1.3
PLA/PBAT30/PLA-g-MA3/AT20	321	371	365	406	5.3
PLA/PBAT30/PLA-g-MA3/AT30	309	369	364	404	7.5
PLA/PBAT30/PLA-g-MA3/AT40	300	367	360	400	11.6



รูปที่ 4.24 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลีเนียมที่ปริมาณต่าง ๆ



รูปที่ 4.25 กราฟ DTA ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลีเนียมที่ปริมาณต่าง ๆ

บทที่ 5

บทสรุป

จากการศึกษาผลของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตต่อสมบัติทางกล สมบัติทางสัญญาณวิทยาและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสมีค่าต่ำลงเมื่อปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีเฟสยืดหยุ่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน ขนาดของพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการรวมตัวของอนุภาคพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต พอลิแลคติกแอซิดมีการแตกหักแบบเปราะ ส่วนพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตมีการแตกหักแบบเหนียว พอลิเมอร์ผสมมีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่าพอลิแลคติกแอซิด

พอลิแลคติกแอซิดกราฟท์มาลีอิกแอนไฮดไรด์ปรับปรุงค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเฟสของพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ขนาดอนุภาคของพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้มีขนาดเล็กกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ และความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแลคติกแอซิด กราฟท์มาลีอิกแอนไฮดไรด์ 5 และ 7 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม สมบัติทางกลและความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมลดลง

จากการศึกษาผลของปริมาณผงซีลี้อยต่อสมบัติทางกล สมบัติทางสัญญาณวิทยาและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตที่ผ่านการปรับปรุงความเข้ากันได้และมีการเสริมแรงด้วยผงซีลี้อย พบว่าเมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานต่อแรงดึง ค่าการยืดตัวสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกมีค่าต่ำลง ในขณะที่ค่ามอดูลัสสูงขึ้น เมื่อปริมาณผงซีลี้อยเพิ่มขึ้นพบการหลุดออกของผงซีลี้อย เกิดช่องว่างระหว่างผงซีลี้อยกับพอลิเมอร์เมทริกซ์และมีการเกาะกลุ่มของผงซีลี้อยซึ่งส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง ความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณผงซีลี้อยที่เพิ่มขึ้น

บรรณานุกรม

- กรมวิทยาศาสตร์บริการ. 2010. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) (ออนไลน์). เข้าได้จาก: <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR12.pdf>.
- อรรณวิท เตชะวิบูลย์วงศ์. (2008). พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ อุตสาหกรรมเพื่ออนาคต. (ออนไลน์) [อ้างถึง 1 สิงหาคม 2012] เข้าได้ จาก: <http://www.oknation.net/blog/Industry/2008/06/10/entry-1>
- Afrifah, K. A., and Matuana, L. M. (2013). Fracture toughness of poly(lactic acid)/ethylene acrylate copolymer/wood-flour composite ternary blends. Polym. Int. 62 (7): 1053-1058.
- Arbelaz, A., Fernández, B., Valea, A., and Mondragon, I. (2006). Mechanical properties of short flax fibre bundle/poly(ϵ -caprolactone) composites: Influence of matrix modification and fibre content. Carbohydr. Polym. 64 (2): 224-232.
- Aydin, M., Tozlu, H., Kemaloglu, S., Aytac, A., and Ozkoc, G. (2011). Effects of alkali treatment on the properties of short flax fiber-poly(lactic acid) eco-composites. J. Polym. Environ. 19 (1): 11-17.
- Bachtiar, D., Sapuan, S. M., Zainudin, E. S., Khalina, A., and Dahlan, K. Z. H. M. (2013). Thermal properties of alkali-treated sugar palm fibre reinforced high impact polystyrene composites. Pertanika J. Sci. & Technol. 21 (1): 141-150.
- Bettini, S. H. P., Bonse, B. C., Melo, E. A., and Muñoz, P. A. R. (2010). Effect of sawdust surface treatment and compatibilizer addition on mechanical behavior, morphology, and moisture uptake of polypropylene/sawdust composites. Polym. Eng. Sci. 50 (5): 978-985.
- Bwire, S. N., Christian, N., and Joseph, T. (2007). Chemical and thermal stability of rice husks against alkali treatment. BioRes. 3 (4): 1267-1277.
- Cai, G., Wang, J., Nie, Y., Tian, X., Zhu, X., and Zhou, X. (2011). Effects of toughening agents on the behaviors of bamboo plastic composites. Polym. Compos. 32 (12): 1945-1952.

- Chen, F., Liu, L., Cooke, P. H., Hicks, K. B., and Zhang, J. (2008). Performance enhancement of poly(lactic acid) and sugar beet pulp composites by improving interfacial adhesion and penetration. Ind. Eng. Chem. Res. 47 (22): 8667-8675.
- Chun, K., Husseinsyah, S., and Osman, H. (2012). Mechanical and thermal properties of coconut shell powder filled polylactic acid biocomposites: Effects of the filler content and silane coupling agent. J. Polym. Res. 19 (5): 1-8.
- Edeerozey, A. M. M., Akil, H. M., Azhar, A. B., and Ariffin, M. I. Z. (2007). Chemical modification of kenaf fibers. Mater. Lett. 61 (10): 2023-2025.
- Gassan, J., Gutowski, V. S., and Bledzki, A. K. (2000). About the surface characteristics of natural fibres. Macromol. Mater. Eng. 283 (1): 132-139.
- Goriparthi, B. K., Suman, K. N. S., and Nalluri, M. R. (2012). Processing and characterization of jute fiber reinforced hybrid biocomposites based on polylactide/polycaprolactone blends. Polym. Compos. 33 (2): 237-244.
- Hakkou, M., Petrissana, M., Zoulalian, A., and Gerardin, P. (2005). Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. Polym. Degrad. Stab. 89 (1): 1-5.
- Haq, M., Burgueño, R., Mohanty, A. K., and Misra, M. (2008). Hybrid bio-based composites from blends of unsaturated polyester and soybean oil reinforced with nanoclay and natural fibers. Compos. Sci. Technol. 68 (15-16): 3344-3351.
- Hong, J. S., Namkung, H., Ahn, K. H., Lee, S. J., and Kim, C. (2006). The role of organically modified layered silicate in the breakup and coalescence of droplets in PBT/PE blends. Polymer. 47 (11): 3967-3975.
- Hu, R. and Lim, J. K. (2007). Fabrication and mechanical properties of completely biodegradable hemp fiber reinforced poly(lactic acid) composites. J. Compos. Mater. 41 (13): 1655-1669.
- Huda, M. S., Drzal, L. T., Misra, M., and Mohanty, A. K. (2006). Wood-fiber-reinforced poly(lactic acid) composites: evaluation of the physicomechanical and morphological properties. J. Appl. Polym. Sci. 102 (5): 4856-4869.
- Islam, M. S., Pickering, K. L., and Foreman, N. J. (2010). Influence of alkali treatment on the interfacial and physico-mechanical properties of industrial hemp fibre reinforced polylactic acid composites. Composites Part A. 41 (5): 596-603.

- Jafari, S. H., Asadinezhad, A., Yavari, A., Khonakdar, H. A., Böhme, F. (2005). Compatibilizing effects on the phase morphology and thermal properties of polymer blends based on PTT and m-LLDPE. Polym. Bull. 54: 417-426.
- Jandas, P. J., Mohanty, S., Nayak, S. K., and Srivastava, H. (2011). Effect of surface treatments of banana fiber on mechanical, thermal, and biodegradability properties of PLA/banana fiber biocomposites. Polym. Compos. 32 (11): 1689-1700.
- Jiang, F. and Qin, T. (2006). Toughening wood/polypropylene composites with polyethylene octene elastomer (POE). J. For. Res. 17 (4): 312-314.
- Kfoury, G., Raquez, J. M., Hassouna, F., Odent, J., Toniazzo, V., Ruch, D., and Dubois, P. (2013). Recent advances in high performance poly(lactide): From “green” plasticization to super-tough materials via (reactive) compounding. Front. Chem. 1 (32): 1-46.
- Ko, S. W., Hong, M. K., Park, B. J., Gupta, R. K., Choi, H. J., and Bhattacharya, S. N. (2009). Morphological and rheological characterization of multi-walled carbon nanotube/PLA/PBAT blend nanocomposites. Polym. Bull. 63 (1): 125-134.
- Kumar, A., Negi, Y. S., Choudhary, V., Bhardwaj, N. K. (2014). Characterization of cellulose nanocrystals produced by acid-hydrolysis from sugarcane bagasse as agro-waste. J. Mater. Phys. Chem. 2 (1): 1-8.
- Kumar, M., Mohanty, S., Nayak, S. K., and Rahail Parvaiz, M. (2010). Effect of glycidyl methacrylate (GMA) on the thermal, mechanical and morphological property of biodegradable PLA/PBAT blend and its nanocomposites. Bioresour. Technol. 101 (21): 8406-8415.
- Lee, S. (2009). Evaluation on the high flexible polylactic acid and bamboo flour biocomposite by melting blend. Master Thesis. Program in Environmental Materials Science. Seoul National University.
- Lee, S. H. and Wang, S. (2006). Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. Composites Part A. 37 (1): 80-91.
- Lee, S. Y., Kang, I. A., Doh, G. H., Yoon, H. G., Park, B. D., and Wu, Q. (2008). Thermal and mechanical properties of wood flour/talc-filled polylactic acid composites: effect

- of filler content and coupling treatment. J. Thermoplast. Compos. Mater. 21: 209-223.
- Li, Z., Zhou, X., and Pei, C. (2011). Effect of sisal fiber surface treatment on properties of sisal fiber reinforced polylactide composites. Int. J. Polym. Sci. 2011. doi:10.1155/2011/803428.S
- Lin, S., Guo, W., Chen, C., Ma, J., and Wang, B. (2012). Mechanical properties and morphology of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends compatibilized by transesterification. Mater. Design. 3: 604-608.
- Liu, H., Wu, Q., Han, G., Yao, F., Kojima, Y., and Suzuki, S. (2008). Compatibilizing and toughening bamboo flour-filled HDPE composites: Mechanical properties and morphologies. Composites Part A. 39 (12): 1891-1900.
- Liu, L., Yu, J., Cheng, L., and Yang, X. (2009). Biodegradability of poly(butylene succinate) (PBS) composite reinforced with jute fibre. Polym. Degrad. Stab. 94 (1): 90-94.
- Liu, T., Yu, F., Yu, X., Zhao, X., Lu, A., and Wang, J. (2012). Basalt fiber reinforced and elastomer toughened polylactide composites: Mechanical properties, rheology, crystallization, and morphology. J. Appl. Polym. Sci. 125 (2): 1292-1301.
- Liu, W., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Askel, P., and Misra, M. (2004). Effects of alkali treatment on the structure, morphology and thermal properties of native grass fibers as reinforcements for polymer matrix composites. J. Mater. Sci. 39: 1051-1054.
- Lomellini, P., Matos, M., and Favis., B. D. (1996). Interfacial modification of polymer blends-the emulsion curve: 2 Predicting the critical concentration of interfacial modifier from geometrical considerations. Polymer. 37 (25): 5689-5694.
- Lopattananon, N., Panawarangkul, K., Sahakaro, K., and Ellis, B. (2006). Performance of pineapple leaf fiber-natural rubber composites: The effect of fiber surface treatments. J. Appl. Polym. Sci. 102: 1974-1984.
- Mani. R., Bhattachatya, M., and Tang, J. (1999). Functionalization of polyesters with maleic anhydride by reactive extrusion. J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem. 37 (11): 1693-1702.

- Ming-Zhu, P., Chang-Tong, M., Xu-Bing, Z., and Yun-Lei, P. (2011). Effects of rice straw fiber morphology and content on the mechanical and thermal properties of rice straw fiber high density polyethylene composites. J. Appl. Polym. Sci. 121 (5): 2900-2907.
- Mohamad Haafiz, M. K., Eichhorn, S. J., Hassan, A., and Jawaid, M. (2013). Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from oil palm biomass residue. Carbohydr. Polym. 93 (2): 628-634.
- Nomai, J. (2013). Improvement of compatibility and toughness of sawdust/poly(lactic acid) composites. Master Thesis. School of Polymer Engineering. Suranaree University of Technology.
- Ochi, S. (2006). Development of high strength biodegradable composites using manila hemp fiber and starch-based biodegradable resin. Composites Part A. 37: 1879-1883.
- Petinakis, E., Yu, L., Edward, G., Dean, K., Liu, H., and Scully, A. (2009). Effect of matrix-particle interfacial adhesion on the mechanical properties of poly(lactic acid)/wood-flour micro-composites. J. Polym. Environ. 17 (2): 83-94.
- Pilla, S., Gong, S., O'Neill, E., Rowell, R. M., and Krzysik, A. M. (2008). Polylactide-pine wood flour composites. Polym. Eng. Sci. 48 (3): 578-587.
- Qian, S., Mao, H., Sheng, K., Lu, J., Luo, Y., and Hou, C. (2013). Effect of low-concentration alkali solution pretreatment on the properties of bamboo particles reinforced poly(lactic acid) composites. J. Appl. Polym. Sci. 130 (3): 1667-1674.
- Qiang, T., Yu, D., and Gao, H. (2012). Wood flour/polylactide biocomposites toughened with polyhydroxyalkanoates. J. Appl. Polym. Sci. 124 (3): 1831-1839.
- Ragoubi, M., George, B., Molina, S., Bienaimé, D., Merlin, A., Hiver, J. M., and Dahoun, A. (2012). Effect of corona discharge treatment on mechanical and thermal properties of composites based on miscanthus fibres and polylactic acid or polypropylene matrix. Composites Part A. 43 (4): 675-685.
- Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Liu, Y., Yang, G. C., and Zeng, H. M. (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. Compos. Sci. Technol. 61 (10): 1437-1447.

- Rosa, M. F., Chiou, B., Medeiros, E. S., Wood, D. F., Williams, T. G., Mattoso, L. H. Orts, W. J., and Imam, S. H. (2009). Effect of fiber treatments on tensile and thermal properties of starch/ethylene vinyl alcohol copolymers/coir biocomposites. Bioresour. Technol. 100 (21): 5196-5202.
- Sawpan, M. A., Pickering, K. L., and Fernyhough, A. (2011). Improvement of mechanical performance of industrial hemp fibre reinforced polylactide biocomposites. Composites Part A. 42 (3): 310-319.
- Sailaja, R. R., Reddy, A. P., and Chanda, M. (2001). Effect of epoxy functionalized compatibilizer on the mechanical properties of low-density polyethylene/plasticized tapioca starch blends. Polym. Int. 50. 12. 1352-1359.
- Seong, O. H., Mehdi, K., Sim, I. N., Bhuiyan, M. A., Jang, Y. H., Ghaffar, J., and Kalaitzidon, K. (2012). Understanding the reinforcing mechanisms in kenaf fiber/PLA and kenaf fiber/PP composites: A comparative study. Int. J. Polym. Sci. 2012. 1-8. doi:10.1155/2012/679252
- Sis, A., Ibrahim, N., and Yunus, W. (2013). Effect of (3-aminopropyl)trimethoxysilane on mechanical properties of PLA/PBAT blend reinforced kenaf fiber. Iran. Polym. J. 22 (2): 101-108.
- Sombatsompop, N., Yotinwattanakumtorn, C., and Thongpin, C. (2005). Influence of type and concentration of maleic anhydride grafted polypropylene and impact modifiers on mechanical properties of PP/wood sawdust composites. J. Appl. Polym. Sci. 97 (2): 475-484.
- Srubar Iii, W. V., Pilla, S., Wright, Z. C., Ryan, C. A., Greene, J. P., Frank, C. W., and Billington, S. L. (2012). Mechanisms and impact of fiber-matrix compatibilization techniques on the material characterization of PHBV/oak wood flour engineered biobased composites. Compos. Sci. Technol. 72 (6): 708-715.
- Tawakkal, I. S. M. A., Talib, R. A., Abdan, K. and Ling, C. N. (2012). Mechanical and physical properties of kenaf derived cellulose (KDC)-filled polylactic acid (PLA) composites. BioRes. 7 (2): 1643-1655.
- Teamsinsungvon, A. (2010). Physical properties of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends and their composites. Master Thesis. School of Polymer Engineering. Suranaree University of Technology.

- Tran, H. N., Ogihara, S., and Kobayashi, S. (2011). Mechanical properties of short coir/PBS biodegradable composites: effect of alkali treatment and fiber content. 18TH International Conference on Composite Materials (ICCM-18). Jeju, Korea, August 21-26.
- Tran, H. N., Ogihara, S., Nguyen, H. T., and Kobayashi, S. (2011). Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly(butylene succinate) biodegradable composites. Composites Part B. 42 (6): 1648-1656.
- Wenjia, J., Kaushlendra, S., and John, Z. (2013). Pyrolysis kinetics of physical components of wood and wood-polymers using isoconversion method. Agriculture. 3 (1): 12-32.
- Wootthikanokkhan, J., Kasemwananimit, P., Sombatsompop, N., Kositchaiyong, A., Isarankura na Ayutthaya, S., and Kaabbuathong, N. (2012). Preparation of modified starch-grafted poly(lactic acid) and a study on compatibilizing efficacy of the copolymers in poly(lactic acid)/thermoplastic starch blends. J. Appl. Polym. Sci. 126 (S1): E389-E396.
- Wu, C. S. (2011). Process, characterization and biodegradability of aliphatic aromatic polyester/sisal fiber composites. J. Polym. Environ. 19 (3): 706-713.
- Yao, F. (2008). Rice straw fiber polymer composites: thermal and mechanical performance. Master Thesis. School of Renewable Natural Resources. Louisiana State University.
- Yao, F., Wu, Q., Liu, H., Lei, Y., and Zhou, D. (2011). Rice straw fiber reinforced high density polyethylene composite: Effect of coupled compatibilizing and toughening treatment. J. Appl. Polym. Sci. 119 (4): 2214-2222.
- Yu, T., Ren, J., Li, S., Yuan, H., and Li, Y. (2010). Effect of fiber surface-treatments on the properties of poly(lactic acid)/ramie composites. Composites Part A. 41 (4): 499-505.
- Yuan, H., Liu, Z., and Ren, J. (2009). Preparation, characterization, and foaming behavior of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-butylene terephthalate) blend. Polym. Eng. Sci. 49 (5): 1004-1012.

- Zhang, N., Wang, Q., and Wang, L. (2009). Preparation and properties of biodegradable poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend with glycidyl methacrylate as reactive processing agent. *J. Mater. Sci.* 44 (1):250-256.
- Zhu, R., Liu, H., and Zhang, J. (2012). Compatibilizing effects of maleated poly(lactic acid) (PLA) on properties of PLA/soy protein composites. *Ind. Eng. Chem. Res.* 51 (22): 7786-7792.



ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

นางสาว กษมา จารุกำจร ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล และ Ph.D. (Polymer Engineering) University of Akron, OH, USA สาขาวิชาการที่มีความสนใจ กระบวนการขึ้นรูปและตรวจสอบพอลิเมอร์ (polymer processing and characterization) และพอลิเมอร์ผสมและคอมโพสิต (polymer blends and composites) ผลงานทางวิชาการ ประกอบด้วย บทความทางวิชาการ 35 บทความ และ รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 15 ฉบับ

