



รายงานวิจัย

การปรับปรุงความเข้ากันได้และความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โม

พลาสติกสตาอ์ซกับพอลิแลกติกแอซิด

(Compatibility and toughness improvement of
thermoplastic/poly(lactic acid) blends)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานวิจัย

การปรับปรุงความเข้ากันได้และความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โม

พลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิด

(Compatibility and toughness improvement of
thermoplastic/poly(lactic acid) blends)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. กษมา จารุกำจร

สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงความเข้ากันได้และความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2556 ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัย นางสาวสุจารี เตชะพิบูลย์ทรัพย์ นักศึกษาสาขาวิชา วิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และเจ้าหน้าที่ศูนย์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิดที่อัตราส่วนต่างๆ คือ 10/90 20/80 30/70 40/60 และ 50/50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถูกเตรียมด้วยเครื่องบดผสมภายใน และขึ้นงานทดสอบถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องกดอัด เทอร์โมพลาสติกสตาโรลได้มาจากแป้งมันสำปะหลัง และกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 70/30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถูกเตรียมด้วยเครื่องบดผสมภายใน สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และ สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิดถูกศึกษา ค่าความต้านแรงดึง ค่ามอดูลัสแรงดึง และ ค่าความต้านทานต่อแรงกระทำของพอลิแลกติกแอซิดลดลง เมื่อใส่เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิดที่อัตราส่วน 10/90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงค่าสมบัติทางกลที่สูงที่สุด อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอม และอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อใส่เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมไม่เปลี่ยนแปลง แต่อุณหภูมิการเกิดผลึกลดลง เมื่อปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิดไม่เข้ากัน พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาลิกแอนไฮดราตถูกใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และปริมาณของพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาลิกแอนไฮดราตคือ 3 5 และ 7 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม สมบัติทางกลและความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิดถูกปรับปรุงเมื่อปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาลิกแอนไฮดราต เพิ่มขึ้นถึง 5 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตามที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาลิกแอนไฮดราต 7 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอม และอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิแลกติกแอซิด กราฟมาลิกแอนไฮดราต ในขณะที่ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาลิกแอนไฮดราตปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลและพอลิแลกติกแอซิด

พอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ถูกใช้เป็นสารปรับปรุงความเหนียวสำหรับพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ และปริมาณของสารปรับปรุงความเหนียวคือ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าความยืดสูงสุด ณ จุดขาดและค่าความต้านทานต่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตแต่ค่าความต้านแรงดึงและค่ามอดูลัสแรงดึงลดลง เมื่อใส่พอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิการ

เกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมลดลง ในขณะที่อุณหภูมิหลอมไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณของพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรตไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการตกผลึก และอุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม ปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อใส่พอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการแตกหักแบบเหนียวในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเหนียวด้วยพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทอเรพทาเรต



Abstract

In this study, thermoplastic starch (TPS)/poly(lactic acid) (PLA) blends at various ratios of 10/90, 20/80, 30/70, 40/60, and 50/50%wt were prepared using an internal mixer and their test specimens were molded using a compression molding machine. TPS obtained from cassava starch and glycerol at a ratio of 70/30 %wt was mixed using an internal mixer. Mechanical, thermal, and morphological properties of TPS/PLA blends were studied. Tensile strength, tensile modulus, and impact strength of PLA were decreased with adding 10 %wt TPS while elongation at break was increased. Mechanical properties of the blends were continuously decreased with increasing TPS content. TPS/PLA (10/90) blend showed the highest mechanical properties. Glass transition temperature (T_g), melting temperature (T_m), and cold crystallization temperature (T_{cc}) of PLA were decreased with incorporating 10 %wt TPS whereas degree of crystallinity (χ_c) was increased. With increasing TPS content, T_g and T_m of PLA in the blends did not change but T_{cc} was decreased. As TPS content was increased χ_c of PLA in the blends was increased. Thermal stability of PLA was decreased with increasing TPS content. SEM micrographs showed that TPS and PLA were immiscible. PLA grafted with maleic anhydride (PLA-g-MA) was used as a compatibilizer and its contents were 3, 5, and 7 phr. Mechanical properties and thermal stability of TPS/PLA blends were improved when PLA-g-MA content was increased to 5 phr. However, at PLA-g-MA content of 7 phr, mechanical properties of the blend were decreased. T_g , T_m , and T_{cc} of PLA in the blends were decreased with increasing PLA-g-MA content whereas χ_c was increased. SEM micrographs revealed that PLA-g-MA improved compatibility between TPS and PLA.

Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) was used as a toughening agent for the compatibilized blends and their contents were 10, 20, and 30 %wt. Elongation at break and impact strength of the blends were increased with increasing PBAT content but tensile strength and tensile modulus were decreased. With the addition of 10 %wt PBAT, T_g and T_{cc} of PLA in the blend decreased whereas T_m did not change. PBAT content showed no effect on T_g , T_{cc} , and T_m of PLA in the blends. χ_c of PLA in the blends increased with adding PBAT. Thermal stability of the blends was enhanced with increasing PBAT content. SEM micrographs showed ductile fracture in the blends toughened with PBAT.

สารบัญ

บทที่		หน้า
กิตติกรรมประกาศ		ก
บทคัดย่อภาษาไทย		ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ง
สารบัญ.....		จ
สารบัญตาราง.....		ญ
สารบัญรูปภาพ.....		ฉ
บทที่ 1	บทนำ.....	1
	1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
	1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2	ทบทวนวรรณกรรม	4
	2.1 เทอร์โมพลาสติกสตาโรล	4
	2.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด.....	8
	2.3 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติก สตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด.....	11
	2.3.1 การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้.....	11
	2.3.2 การดัดแปรพอลิแลกติกแอซิด.....	16
	2.3.3 การดัดแปรเทอร์โมพลาสติกสตาโรล	17
	2.4 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล กับพอลิแลกติกแอซิด.....	20
บทที่ 3	วัสดุและวิธีการทดลอง	24
	3.1 วัสดุ	24
	3.2 การทดลอง.....	24
	3.2.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

3.2.2	การเตรียมและการวิเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรย	24
3.2.2.1	การวิเคราะห์ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรย	24
3.2.2.2	การวิเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรยด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)	25
3.2.3	การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด	25
3.2.4	การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอโรทาเลต	26
3.2.5	การตรวจสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอโรทาเลตที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้	26
3.2.5.1	สมบัติทางกล	26
3.2.5.2	สมบัติทางความร้อน	27
3.2.5.3	สมบัติทางสัณฐานวิทยา	27
บทที่ 4	ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง	29
4.1	การตรวจสอบพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรย	29
4.1.1	การวิเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรย	29
4.1.2	ปริมาณการกราฟ	29

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

4.2	ผลของสัดส่วนการผสมต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด.....	31
4.2.1	สมบัติทางกล	31
4.2.2	สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	35
4.2.3	สมบัติทางความร้อน	35
4.3	ผลของปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด.....	43
4.3.1	สมบัติทางกล.....	44
4.3.2	สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	48
4.3.3	สมบัติทางความร้อน	48
4.4	ผลของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเรพทาเรตต่อสมบัติของพอลิ- เมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับพอลิแล็กติกแอซิด.....	53
4.4.1	สมบัติทางกล	53
4.4.2	สมบัติทางสัณฐานวิทยา.....	57
4.4.3	สมบัติทางความร้อน	59
บทที่ 5	สรุปผลการทดลอง	64
	บรรณานุกรม	66
	ประวัติผู้วิจัย	72

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	สมบัติทางกลของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ34
4.2	ลักษณะทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ.....38
4.3	อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ.....43
4.4	สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ.....47
4.5	ลักษณะทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด ที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ49
4.6	อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ53
4. 7	สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบีวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบีวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

- 4.8 ลักษณะทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ 61
- 4.9 อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ 63



สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
4.1	FTIR สเปกตรัมของมาเลอิกแอนไฮดริค พอลิแลกติกแอซิดและพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดริคที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอ-บิวทิเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซน และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮดริค.....30
4.2	อนุพันธ์อันดับสองของ FTIR สเปกตรัมของมาเลอิกแอนไฮดริค พอลิแลกติกแอซิดและพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดริคที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอ-บิวทิเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซน และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮดริค30
4.3	รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการเกิดปฏิกิริยาของมาเลอิกแอนไฮดริคบนพอลิแลกติกแอซิด.....31
4.4	ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาเรซ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเรซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาเรซต่างๆ32
4.5	มอดูลัสแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาเรซ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเรซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาเรซต่างๆ33
4.6	ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาเรซ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเรซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาเรซต่างๆ33
4.7	ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาเรซ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเรซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาเรซต่างๆ.....34

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวการแตกหักใน สภาวะที่แช่แข็งที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของ (a) PLA (b) TPS/PLA (10/90) (c) TPS/PLA (20/80) (d) TPS/PLA (30/70) (e) TPS/PLA (20/80) (f) TPS/PLA (50/50) 36
4.9	กราฟ DSC ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด (การให้ความร้อนครั้งที่ 2) 38
4.10	กราฟ TGA ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และแป้งมันสำปะหลัง..... 41
4.11	กราฟ DTG ของ พอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และแป้งมันสำปะหลัง..... 41
4.12	กราฟ TGA ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ.....41
4.13	กราฟ DTG ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ 42
4.14	ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความ เข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติก แอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ 45
4.15	มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โม- พลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้า กันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิด กราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ..... 46
4.16	ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์- โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้า กันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิด กราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ..... 46

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17	ความต้านทานแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ47
4.18	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่มีการแตกหักในสภาวะที่แช่แข็งที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของ (a) TPS/PLA (10/90) (b) TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/3) (c) TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5) (d) TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/7).....50
4.19	กราฟ DSC ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ (การให้ความร้อนครั้งที่ 2).....50
4.20	กราฟ TGA พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ52
4.21	กราฟ DTG ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ52
4.22	ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซ พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปรต-โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ54

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.23	มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โม-พลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปเรต-โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปเรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ 55
4.24	ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โม-พลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปเรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปเรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ 55
4.25	ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปเรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปเรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ 56
4.26	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักในสถานะที่แช่แข็ง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ซ้าย) และ 2000 เท่า (ขวา) ของ (a) TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5phr) (b) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (9/81/5phr/10) (c) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (8/72/5phr/20) (d) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (7/63/5phr/30) 58
4.27	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักในสถานะแรงดึง ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของ (a) TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5phr) (b) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (9/81/5phr/10) (c) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (8/72/5phr/20) (d) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (7/63/5phr/30) 59
4.28	กราฟ DSC ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปเรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปเรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ (การให้ความร้อนครั้งที่ 2) 60

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.29	กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โม-พลาสติกสตาโรลกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรต-โคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ62
4.30	กราฟ DTG ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอ-เรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ63



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันนี้ มีการนำพอลิเมอร์มาใช้งานในชีวิตประจำวันในด้านต่างๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ การแพทย์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เมื่อพิจารณาในด้านบรรจุภัณฑ์ มีแนวโน้มในการเพิ่มปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากพอลิเมอร์มากขึ้นเรื่อยๆ พอลิเมอร์ที่ใช้งานอยู่ทั่วไปนั้นผลิตมาจากสารตั้งต้นที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและต้องใช้เวลาในการย่อยสลายตามธรรมชาติ ปัญหาที่ตามมาคือปริมาณขยะที่มาจากพอลิเมอร์ที่เพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ดังนั้นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (biodegradable polymers) จึงได้รับความสนใจมากขึ้น พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งตามวัตถุดิบได้ 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (petroleum based biodegradable polymers) และพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (bio based biodegradable polymers) ซึ่งกำลังเป็นที่นิยม ซึ่งพอลิเมอร์เหล่านี้มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพที่มีการใช้งานมากในปัจจุบันคือ พอลิแลกติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) พอลิแลกติกแอซิดจัดอยู่ในกลุ่มพอลิเอสเทอร์ซึ่งได้จากการดแลกติก (lactic acid) ที่ได้จากผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันสำปะหลัง เป็นต้น โดยทำการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลและหมักด้วยจุลินทรีย์เกิดเป็นกรดแลกติก แล้วนำมาผ่านกระบวนการทางเคมีได้แลกไทด์ (lactide) ที่มีโครงสร้างเป็นวงแหวน จากนั้นผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) เพื่อเปลี่ยนเป็นพอลิแลกติกแอซิด สมบัติของพอลิแลกติกแอซิดใกล้เคียงกับพอลิเมอร์บางประเภทที่นิยมใช้ในทางการค้า สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความปลอดภัยกับการใช้งานที่ต้องสัมผัสอาหาร และได้รับความนิยมอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหารและยา แต่ราคาที่สูงและความเปราะบางของพอลิแลกติกแอซิดเป็นข้อจำกัดในการนำพอลิแลกติกแอซิดมาใช้งาน แนวทางหนึ่งในการลดปัญหาทางด้านราคาของพอลิแลกติกแอซิดคือการเติมแป้ง (starch) เข้าไป ซึ่งแป้งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่เกิดตามธรรมชาติได้จากพืชชนิดต่างๆ เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าว มันฝรั่ง มันสำปะหลัง เป็นต้น แป้งมีราคาถูกและสามารถผลิตขึ้นมาใหม่ได้ ซึ่งแป้งที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือแป้งมันสำปะหลัง มันสำปะหลังเป็นพืชที่ปลูกง่าย ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ เป็นพืชที่ได้รับการปลูกอย่างกว้างขวางและสามารถหาได้ง่ายในเขตพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา [วัฒนะ วัฒนานนท์, 2540] อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญในประเทศไทย เนื่องจากมันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจหลักของอุตสาหกรรมที่ตอบสนองนโยบายการพัฒนาพืชเศรษฐกิจของไทย โรงงานที่ผลิตแป้งมันมีมากกว่า 50 โรงงาน [โสภิตา บุญอเนกทรัพย์, สุชาติไชยสวัสดิ์, สุวิทย์ เตีย, และ จิระพันธุ์ เนื่องจากนิล, 1996] แต่อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิหลอม (melting

temperature) ของแป้งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเสื่อมสภาพ (degradation temperature) [Yang, Yu, and Ma, 2006] ทำให้แป้งไม่ไหลในระหว่างการผลิตกับพอลิเมอร์ จึงต้องมีการเปลี่ยนแป้งให้อยู่ในรูปของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch, TPS) ซึ่งได้จากการพลาสติกไซเซชัน (plasticization) ของแป้งโดยใช้พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ภายใต้อุณหภูมิร้อน พอลิออล (polyols) เช่น กลีเซอรอล (glycerol) ซอร์บิทอล (sorbital) ฟอร์มาไมด์ (formamide) ยูเรีย (urea) น้ำ เป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีการใช้กันทั่วไปในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กลีเซอรอลจัดเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่มีการใช้กันมาก เนื่องจากมีราคาถูกและจุดเดือดสูง [Kaseem, Hamad, and Deri, 2012] แต่พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติทางกลที่ไม่ดี การปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดสามารถทำได้โดยการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (addition of compatibilizer) การดัดแปรพอลิแลกติกแอซิด (PLA modification) และการดัดแปรเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS modification)

นอกจากนี้ การปรับปรุงความเหนียวให้กับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสามารถทำได้โดยการผสมพอลิเมอร์ยืดหยุ่น (flexible polymers) อีกชนิดหนึ่งเข้าไปซึ่งเป็นแนวทางในการได้พอลิเมอร์ผสมที่มีประสิทธิภาพที่ดี พอลิบิวทีลีน อะดิเพตโคเทเรพทาเรต (polybutylene adipate-co-terephthalate, PBAT) ซึ่งอยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเช่นเดียวกัน แต่มีระยะการดึงยืดและความเหนียวที่ดีกว่าพอลิแลกติกแอซิด ดังนั้นพอลิบิวทีลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเรตจึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์
- เพื่อเตรียมพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (poly(lactic acid) grafted maleic anhydride, PLA-g-MA) ซึ่งใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
- เพื่อศึกษาผลของปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
- เพื่อศึกษาผลของปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางสัณฐานวิทยาของการผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
- เพื่อศึกษาผลของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเรตต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางสัณฐานวิทยาของการผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
- การเตรียมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์

- การศึกษาผลของปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช
- การศึกษาผลของปริมาณสารเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด
- การศึกษาผลของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเพตโคเทอเรพทาเรตต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- นำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์
- เป็นการพัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุของประเทศอย่างต่อเนื่อง
- เป็นการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ให้สามารถเริ่มการวิจัยและพัฒนาได้ และดำเนินการวิจัยต่อไปได้อย่างต่อเนื่องในระยะยาว
- ก่อให้เกิดนโยบายและมาตรการที่จูงใจและเอื้อต่อการลงทุนของอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- ก่อให้เกิดนโยบายและมาตรการสนับสนุนการเร่งรัด พัฒนาต่อยอด และสร้างเทคโนโลยีการผลิตพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- เกิดอุตสาหกรรมใหม่และธุรกิจนวัตกรรมด้านพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- เกิดการสร้างมูลค่าใหม่ (value creation) และสร้างมูลค่าเพิ่ม (value-added) เพื่อก่อให้เกิดเสถียรภาพด้านราคาแก่พืชผลทางการเกษตรที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรม

2.1 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

แป้ง (starch) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีราคาถูกได้มาจากพืช และมีการย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิหลอม (melting temperature) ของแป้งใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเสื่อมสลาย (degradation temperature) ทำให้แป้งไม่ไหลในระหว่างการขึ้นรูป ดังนั้นต้องมีการเปลี่ยนแป้งไปเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch, TPS) โดยการเติมพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) เข้าไปเพื่อทำลายอันตรกิริยาของโมเลกุลแป้งภายใต้ความร้อนและแรงเฉือน กระบวนการนี้รู้จักกันในชื่อเจลาติไนเซชัน (gelatinization) พลาสติกไซเซอร์ที่มีการใช้ทั่วไปในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เช่น น้ำ กลีเซอรอล (glycerol) ไกลคอล (glycol) ซอร์บิทอล (sorbital) ยูเรีย (urea) ฟอรัมาไมด์ (formamide)

Rodriguez-Gonzalez, Ramsay, and Favis (2004) ศึกษาสมบัติการไหล และสมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ปริมาณของกลีเซอรอลที่ใช้คือ 29 33 36 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวสาลีโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่หมุนในทิศทางเดียวกัน (corotating twin screw extruder) ความหนืดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลงประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มจาก 36 เป็น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าได้ว่าเฟสของกลีเซอรอลอยู่ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โมดูลัสสูญเสีย (loss modulus) และโมดูลัสสะสม (storage modulus) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ลดลงเมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบการลดลงอย่างมากของค่าโมดูลัสทั้งสอง เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 29 เป็น 33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature) ลดลงเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 29 เป็น 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความเสถียรต่อความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แต่ไม่เสถียรที่อุณหภูมิมากกว่า 180 องศาเซลเซียส

Huang, Yu, and Ma (2005) เปรียบเทียบผลของกลีเซอรอลและเอทานอลาไมด์ (ethanolomide) ต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แป้งข้าวโพดถูกนำไปผสมกับพลาสติกไซเซอร์โดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง (high speed mixer) ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นของผสมถูกผสมลงในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 110 115 120 และ 125 องศาเซลเซียส ค่าโมดูลัส พลังงานในการแตกหัก และการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากเอทานอลาไมด์มีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากกลีเซอรอล เอทานอลาไมด์สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับแป้งในระหว่างการผสมเป็นผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีสมบัติทางกลที่ดี อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากเอทานอลาไมด์มีค่าต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากกลีเซอรอล อย่างไรก็ตาม การดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากเอทานอลาไมด์มีค่าต่ำกว่าเทอร์โม

พลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากกลีเซอรอล เนื่องจากเอทานอลไม่มีความชอบน้ำน้อยกว่ากลีเซอรอล ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มความต้านทานน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

Ma, Yu and Ma., (2005) ใช้ยูเรีย (urea) และฟอร์มามายด์ (formamide) เป็นพลาสติกไซเซอร์ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช อัตราส่วนของยูเรียต่อฟอร์มามายด์ที่ใช้คือ 1 ต่อ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้คือ 25 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แบ่งข้าวสาลีและพลาสติกไซเซอร์ถูกผสมโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูงที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้น ของผสมถูกผสมต่อในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่ความเร็ว 20 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้คือ 120 130 130 และ 120 องศาเซลเซียส เมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์ พบว่าความแข็งแรงดึง มอดูลัส และพลังงานในการแตกหักของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลง แต่ค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างพลาสติกไซเซอร์กับแป้ง ทำให้โมเลกุลแป้งเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ความเหนียวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์ เนื่องจากการลดลงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแป้งที่เกิดจากพลาสติกไซเซอร์ จากผลของการดูดซับน้ำพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีปริมาณพลาสติกไซเซอร์ต่ำมีความต้านทานต่อน้ำดี

Da Roz, Carvalho, Gandini, and Curvelo (2006) ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนและการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชถูกเตรียมจากแป้งข้าวโพดกับพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วย เอทิลีน ไกลคอล (ethylene glycol) โพรพิลีน ไกลคอล (propylene glycol) 1,4-บิวเทนไดออล (1,4-butanediol) ไดเอทิลีนออกไซด์ ไกลคอล (diethyleneoxide glycol) และซอร์บิทอล (sorbitol) ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้เท่ากับ 15 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการผสมแป้งข้าวโพดกับพลาสติกไซเซอร์ในเครื่องผสมภายใน (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที มอดูลัสแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากเอทิลีนไกลคอลและโพรพิลีนไกลคอลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ ยกเว้นที่ปริมาณเอทิลีนไกลคอลสูงกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากความเป็นผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม มอดูลัสแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจาก 1,4 บิวเทนไดออล ไดเอทิลีนออกไซด์ ไกลคอล และซอร์บิทอลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของพลาสติกไซเซอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการพลาสติกไซเซชัน (plasticization) กราฟแทนเดลต้าของทุกตัวอย่างแสดง 2 ช่วงของการเปลี่ยนแปลง ซึ่งพบระหว่าง -75 ถึง -40 องศาเซลเซียส และระหว่าง 70 ถึง 150 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่ช่วงอุณหภูมิสูงบ่งถึงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ในขณะที่อุณหภูมิต่ำแสดงถึงเฟสของพลาสติกไซเซอร์ มอดูลัสสะสมของทุกตัวอย่างหลังจากอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแสดงลักษณะพฤติกรรมของพอลิเมอร์กึ่งผลึก จุดสมดุลของการดูดซับน้ำของตัวอย่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชทุกตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์

Teixeira, Da Roz, Carvalho, and Curvelo (2007) ทำการเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากการผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับกลีเซอรอล น้ำตาล และน้ำ อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อน้ำตาลต่อน้ำ คือ 30 ต่อ 2 ต่อ 18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่สัดส่วนของน้ำตาลต่อน้ำ คือ 25 ต่อ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ถูกเตรียมโดยเครื่องผสมภายใน ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที ความเร็วรอบที่ใช้คือ 60 นาที ทำการศึกษาสมบัติทางกลและความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ เมื่อใส่น้ำตาลลงไป 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในระบบที่มีแป้งกับกลีเซอรอลพบการลดลงของโมดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ เนื่องจากการมีปริมาณผลึกที่ต่ำของเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ ในกรณีที่ไม่มีกลีเซอรอลในเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ส่งผลให้ตัวอย่างมีความแข็งมากขึ้นทำให้โมดูลัสสะสมสูง การเติมน้ำตาลในปริมาณเล็กน้อย (2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) รวมกับกลีเซอรอล ลดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ การใช้น้ำตาลผสมกับน้ำเป็นพลาสติกไฮเซอรอลในกรณีที่ไม่มีกลีเซอรอลส่งผลต่อการลดลงอย่างมากของการดูดซับน้ำ (ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์) ของเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ เนื่องจากประสิทธิภาพที่ต่ำของน้ำตาลเมื่อเป็นพลาสติกไฮเซอรอล

Wang and Huang (2007) เตรียมเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์โดยใช้เอทานอลาไมด์และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซอรอล ปริมาณพลาสติกไฮเซอรอลที่ใช้คือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แป้งข้าวโพดและพลาสติกไฮเซอรอลถูกผสมในเครื่องผสมความเร็วสูง ที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้น ของผสมถูกผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ที่ความเร็วรอบ 20 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้คือ 110 115 120 และ 125 องศาเซลเซียส สมบัติทางกลของเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ที่เตรียมจากเอทานอลาไมด์มีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ที่เตรียมจากกลีเซอรอล เนื่องจากโมเลกุลที่เล็กของเอทานอลาไมด์สามารถแทรกเข้าไปในโมเลกุลของแป้งและสร้างพันธะไฮโดรเจนกับแป้งที่แข็งแรงกว่าเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ที่เตรียมจากกลีเซอรอล ผลจาก Differential scanning calorimeter (DSC) แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ที่เตรียมจากเอทานอลาไมด์ต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ที่เตรียมจากกลีเซอรอล เนื่องจากเอทานอลาไมด์สร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งซึ่งทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแป้งสลายตัวลงและทำให้โมเลกุลของแป้งเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น

Zhang, Yu, Wu, and Ma (2008) ใช้อะลิฟาติก เอไมด์ไดโอดอล (aliphatic amidediol) และกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเซอรอลสำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ ปริมาณพลาสติกไฮเซอรอลที่ใช้คือ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างกลีเซอรอลต่ออะลิฟาติกเอไมด์ไดโอดอลคือ 20 ต่อ 10 และ 15 ต่อ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พลาสติกไฮเซอรอลและแป้งข้าวโพดถูกผสมโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง จากนั้นเก็บของผสมไว้ข้ามคืน ของผสมถูกผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว อุณหภูมิที่ใช้คือ 145 150 และ 150 องศาเซลเซียส ผลจาก Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) ยืนยันว่าอะลิฟาติกเอไมด์ไดโอดอลกับกลีเซอรอลสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงและเสถียรกับโมเลกุลของแป้ง เมื่อเพิ่มปริมาณอะลิฟาติกเอไมด์ไดโอดอล อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์เพิ่มขึ้น พันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงถูกสร้างขึ้นระหว่างพลาสติกไฮเซอรอลกับแป้งเป็นผลให้ความสามารถในการเคลื่อน

ที่ของสายโซ่แป้งลดลงและเพิ่มอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ความแข็งแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของอะลิฟาติกเอไมด์ไดออก

Sreekumar, Gopalakrishnan, Leblanc, and Saiter (2010) ศึกษาผลของของปริมาณกลีเซอรอลต่อพฤติกรรมความหนืดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้คือ 20 23 25 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แป้งข้าวสาลีและกลีเซอรอลถูกผสมโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูงที่ความเร็วรอบ 750 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที ต่อจากนั้น ของผสมถูกผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที กราฟแดมปีง (damping curve) แสดงพีค 2 พีค พีคที่อุณหภูมิต่ำแสดงถึงเฟสของกลีเซอรอลและพีคที่อุณหภูมิสูงเป็นเฟสของแป้ง ที่ช่วงอุณหภูมิสูง โมดูลัสสูญเสียและโมดูลัสสะสมของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลงตามปริมาณกลีเซอรอล เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

Ahmad, Anuar, and Yusof (2011) ศึกษาผลกระทบของปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนและโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช แป้งสาคุ (sago starch) และกลีเซอรอลถูกผสมในเครื่องกวน หลังจากนั้นของผสมถูกผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ อุณหภูมิที่ใช้คือ 130 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เทอร์โมพลาสติกถูกฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ อุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดคือ 110 115 120 125 และ 150 องศาเซลเซียส ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้คือ 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมโดยใช้กลีเซอรอล 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำเพราะผลของพลาสติกไซเซชันที่ไม่เพียงพอ ความแข็งแรงดึงมีค่าสูงสุดที่ปริมาณกลีเซอรอล 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมโดยใช้กลีเซอรอล 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นพื้นผิวหยาบเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งบริสุทธิ์ เนื่องจากเม็ดแป้งรวมเป็นเฟสเดียว (homogeneous phase) ทำให้เกิดพื้นที่ว่างในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมโดยใช้กลีเซอรอล 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีพื้นผิวที่ราบเรียบ เมื่อเพิ่มปริมาณพลาสติกไซเซอร์พบว่าความหนืดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลง การเกิดพลาสติกไซเซชันของแป้งเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการลดลงของแรงเฉือนในกระบวนการขึ้นรูป

Sreekumar, Leblance, and Saiter (2013) ศึกษาผลของกลีเซอรอลต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้คือ 20 23 25 30 และ 35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แป้งข้าวสาลีถูกผสมกับกลีเซอรอลโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง ที่ความเร็วรอบ 750 รอบต่อนาที เป็นเวลามากกว่า 3 นาที ของผสมถูกอัดรีดโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการผสมที่ใช้คือ 60 รอบต่อนาที ตัวอย่างถูกขึ้นรูปเป็นแผ่นโดยเครื่องกดอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และความดันที่ใช้คือ 10 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์

เซนติเมตร ระยะยืด ณ จุดขาดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอล ในขณะที่ความแข็งแรงดึง โมดูลัส และความแข็งแรงลดลง ซึ่งอธิบายได้ว่ากลีเซอรอลเปลี่ยนแปลงภาวะของแป้งจากของแข็งไปสู่สภาวะยืดหยุ่น ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ขรุขระที่ปริมาณของกลีเซอรอลที่ต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณของกลีเซอรอล พื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความราบเรียบ เมื่อปริมาณของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นทำให้ค่าดัชนีการไหล (melt flow index, MFI) เพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของพลาสติกไซเซชันปรับปรุงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแป้งเป็นผลให้มีการลดลงของความหนืด เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น กลีเซอรอลส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเสถียรต่อความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

2.2 พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด

ในปัจจุบันนี้ มีการนำพอลิแลกติกแอซิดมาใช้งานในด้านต่างๆ มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของพอลิแลกติกแอซิดคือราคาสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกที่ใช้งานทั่วไป การผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดเป็นแนวทางหนึ่งในการลดราคาและคงความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิแลกติกแอซิด

Martin and Averous (2001) ศึกษาสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด ปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ใช้คือ 10 25 40 และ 75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดถูกผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ช่วงอุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 120 ถึง 180 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีบางส่วนที่เข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด นอกจากนี้ จุดหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดมีค่าต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ จากผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้สองเหตุผล คือการลดลงของอุณหภูมิหลอมพบเมื่อพอลิเมอร์ทั้งสองเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ออสันฐาน และอุณหภูมิหลอมลดลง เนื่องจากผลของการพลาสติกไซเซชันของกลีเซอรอล

Wang, Yu, and Ma (2008) ศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด กลีเซอรอลและฟอร์มาไมด์ถูกใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ อัตราส่วนของฟอร์มาไมด์ต่อกลีเซอรอลที่ใช้คือ 0 ต่อ 40 10 ต่อ 30 20 ต่อ 20 และ 30 ต่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างแป้งข้าวโพดกับพลาสติกไซเซอร์ คือ 100 ต่อ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พลาสติกไซเซอร์ถูกนำมาผสมกันก่อน ต่อจากนั้นนำไปผสมกับแป้งโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้น พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดถูกเตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่ความเร็วรอบ 10

รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้คือ 130 140 150 และ 130 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เนื่องจากแรงยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด เมื่อเพิ่มปริมาณของพอร์มาไมด์ ความแข็งแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้น เพราะความสามารถในการไหลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้น เมื่อกลีเซอรอลถูกแทนที่ด้วยพอร์มาไมด์ อุณหภูมิการสูญเสียน้ำหนักที่ 5 เปอร์เซ็นต์ (temperature at 5% weight loss, $T_{5\%}$) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลงเนื่องจากจุดเดือดที่ต่ำของพอร์มาไมด์หลังจากผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิด อุณหภูมิการเสื่อมสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากกลีเซอรอลในพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากกลีเซอรอล อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการเสื่อมสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมจากพอร์มาไมด์ในพอลิเมอร์ผสมสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชบริสุทธิ์ที่เตรียมจากพอร์มาไมด์ เนื่องจากความเข้ากันได้ดีระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอร์มาไมด์ เนื่องจากพอร์มาไมด์มีขนาดเล็กและความเป็นขี้ผึ้งสามารถแทรกเข้าไปในสายโซ่ของแป้งและทำลายการเกี่ยวพันในสายโซ่ของแป้ง

Wang, Yu, Chang, and Ma (2008) ศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกดรายสตาร์ช (thermoplastic dry starch) กับพอลิแล็กติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชถูกเตรียมจากแป้งข้าวโพด พอร์มาไมด์ กลีเซอรอล และน้ำ ปริมาณน้ำใช้คงที่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่อัตราส่วนของพอร์มาไมด์ต่อกลีเซอรอลที่ใช้คือ 0 ต่อ 30 10 ต่อ 20 15 ต่อ 15 20 ต่อ 10 และ 30 ต่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในกรณีเทอร์โมพลาสติกดรายสตาร์ชที่เตรียมมาจากแป้งข้าวโพด ใช้พอร์มาไมด์ และกลีเซอรอล ไม่เติมน้ำ อัตราส่วนของพอร์มาไมด์ต่อกลีเซอรอลที่ใช้คือ 0 ต่อ 40 10 ต่อ 30 20 ต่อ 20 30 ต่อ 10 และ 40 ต่อ 0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนแป้งข้าวโพดต่อพลาสติกไซเซอร์คือ 100 ต่อ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชหรือเทอร์โมพลาสติกดรายสตาร์ชที่ใช้คือ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำการผสม พลาสติกไซเซอร์ก่อน จากนั้นนำไปผสมเข้ากับแป้งข้าวโพดโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง ที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที ต่อจากนั้น ของผสมถูกผสมกับพอลิแล็กติกแอซิดก่อนโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง หลังจากนั้น ของผสมถูกเติมลงในเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้คือ 130 140 150 และ 130 องศาเซลเซียส เมื่อกลีเซอรอลถูกแทนที่ด้วยพอร์มาไมด์ ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกดรายสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าใกล้เคียงกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ ในขณะที่ค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการสูญเสียน้ำหนักที่ 5 เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่าง ($T_{5\%}$) และความหนืดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกดรายสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โม

พลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของฟอร์มาไมด์ เนื่องจากฟอร์มาไมด์มีจุดเดือดที่ต่ำ

Cai, Liu, Wang, Yao, Li, and Xiong (2011) ศึกษาจลศาสตร์การเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดโดยใช้เครื่อง DSC การวิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎี Avrami แสดงให้เห็นถึงอัตราการเติบโตของผลึก อัตราการเกิดผลึก และพลังงานกระตุ้น (activation energy, ΔE_a) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดที่ได้รับอิทธิพลจากการเติมเทอร์โมพลาสติกสตาบิล ค่าคงที่ของการตกผลึก (crystallization kinetic content, K) เพิ่มขึ้นเมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลลงในพอลิแลกติกแอซิด ซึ่งบอกได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำในการเกิดผลึก (nucleating agent) และเร่งอัตราการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม พลังงานกระตุ้นของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดมีค่าต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ แสดงว่าการเติมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลในพอลิแลกติกแอซิดเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกและปรับปรุงความสามารถในการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในระหว่างการเกิดผลึก

Teixeira, Curvelo, Correa, Marconcini, Glenn, and Mattoso (2012) ศึกษาสมบัติแรงดึงและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด แป้งมันสำปะหลังและกากมันสำปะหลังถูกใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิล กลีเซอรอลและน้ำถูกใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ อัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอลต่อน้ำที่ใช้คือ 50 ต่อ 30 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดถูกเตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่หมุนในทิศทางเดียวกัน อุณหภูมิที่ใช้อุณหภูมิระหว่าง 140 ถึง 160 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแลกติกแอซิด ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดลดลงประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และ 51 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นจาก 2.6 เปอร์เซ็นต์ไปถึง 14.5 เปอร์เซ็นต์ เพราะเทอร์โมพลาสติกสตาบิลมีค่าระยะยืด ณ จุดขาดสูง (33.1 เปอร์เซ็นต์) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการตกผลึกของพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกสตาบิล เนื่องจากผลของการเหนี่ยวนำการเกิดผลึกเทอร์โมพลาสติกในการตกผลึกของพอลิแลกติกแอซิด

Li, Xiong, Fei, Cai, Xiong, Tan, and Yu (2013) ศึกษาการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดโดยใช้เครื่อง DSC พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดถูกเตรียมโดยเครื่องกวนผสม (stirring kneader) ที่อุณหภูมิจาก 175 ถึง 180 องศาเซลเซียส ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ใช้คือ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เอนทัลปีของการเกิดผลึก (crystallization enthalpy, ΔH_c) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด เมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาบิลเพิ่มขึ้น เอน

ทาลปีของการเกิดผลึกลดลง จากผลการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ชนิดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิแล็กติกแอซิดและส่งผลต่อการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดในกระบวนการเกิดผลึกในระหว่างกระบวนการการผลึก เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำการเกิดผลึกส่งผลให้มีการปรับปรุงการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดและจำกัดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิแล็กติกแอซิด

2.3 การปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิด

ปัญหาหลักของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดคือการมีแรงยึดติดที่ไม่ดีระหว่างแบ่งที่มีความชอบน้ำและพอลิแล็กติกแอซิดที่มีความไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติทางกลไม่ดี ความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดสามารถปรับปรุงได้โดยการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (addition of compatibilizer) การดัดแปรพอลิแล็กติกแอซิด (PLA modification) และการดัดแปรเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ (TPS modification)

2.3.1 การเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้

ความไม่เข้ากันระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดเป็นผลมาจากความแตกต่างของการมีขั้วและความชอบน้ำของแต่ละเฟส ส่งผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดไม่ดี การใส่สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เข้าไปสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม

Li and Huneault (2008) ศึกษาการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิด ปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ที่ใช้คือ 10 15 20 และ 42 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (poly(lactic acid) grafted with maleic anhydride, PLA-g-MA) ถูกใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ ปริมาณที่ใช้คือ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดถูกเตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่หมุนตามกัน แบ่งและพลาสติกไซเซอร์ถูกใส่ลงในส่วนป้อนตอนต้นของเครื่องอัดรีด พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกผสมแบบแห้งก่อนป้อนเข้าเครื่องอัดรีด จากนั้นพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกเติมลงในส่วนกลางของเครื่องอัดรีด อุณหภูมิต่ำสุดในการอัดรีดที่ใช้คือ 180 องศาเซลเซียส เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำการเกิดผลึกส่งผลให้อัตราการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้น อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์เพิ่มขึ้น เมื่อพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ถูกเติมเข้าไป อัตราการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของการผสม ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาที่มีความละเอียด เฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์มีขนาดลดลงเมื่อเติมพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ การลดลงของขนาดของเฟสกระจายเป็นผลมาจากความเข้ากันได้ เนื่องจากการลดของความตึง

อินเทอร์เฟส (interfacial tension) ซึ่งเกิดขึ้นจากการเติมพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราย การลดขนาดของอนุภาคเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ส่งผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งอาจเพิ่มอัตราการเกิดผลึก

Phetwarotai, Potiyaraj, and Aht-Ong (2010) ศึกษาผลของปริมาณเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนต (methylenediphenyl diisocyanate, MDI) และชนิดของแป้งต่อสมบัติแรงดึง สมบัติทางความร้อนและโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแลกติกแอซิด แป้งข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังถูกใช้ในการศึกษา ปริมาณน้ำและกลีเซอรอลที่ใช้คือ 10 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง จากนั้นผสมต่อในเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill) ความเร็วรอบของลูกกลิ้งเท่ากับ 10 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จนกระทั่งเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน เมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนตถูกใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และปริมาณที่ใช้คือ 0.62 1.25 2.50 5.00 และ 10.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์และพอลิแลกติกแอซิด (40 ต่อ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ถูกผสมโดยใช้เครื่องผสมภายใน ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที ความเร็วรอบที่ใช้คือ 90 รอบต่อนาที การเติมเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนตเพิ่มสมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแลกติกแอซิด ฟิล์มของพอลิเมอร์ผสมที่เติมเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนต 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแสดงสมบัติแรงดึงที่สูงที่สุด ที่ปริมาณเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนต 2.50 5.00 และ 10.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบจุดบกพร่องในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมซึ่งเป็นผลให้สมบัติแรงดึงต่ำลง เนื่องจากเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนตสามารถทำปฏิกิริยากับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ส่งผลให้มีการรวมตัวกันของส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ซึ่งเป็นผลให้เกิดจุดบกพร่องและจุดแตกหักของฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม สมบัติแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดมีค่าสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดมีช่องว่างระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแลกติกแอซิดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลัง ชนิดแป้งที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเพิ่มปริมาณของเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนต อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดลดลงในขณะที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์เพิ่มขึ้น การเคลื่อนของอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสามารถอธิบายได้ว่าแรงยึดติดระหว่างสองส่วนถูกปรับปรุงเมื่อเติมเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนต ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมแสดงช่องว่างที่เล็กลงระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแลกติกแอซิดเมื่อเติมเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนตเข้าไป แสดงให้เห็นว่าส่วนของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ถูกเวท (wet) ได้ดีด้วยส่วนของพอลิแลกติกแอซิด

Yu, Petinakis, Dean, Lin, and Yuan (2011) ศึกษาผลของเมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตซึ่งเป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด อัตราส่วนของแป้งข้าวโพดและน้ำที่ใช้คือ 75 ต่อ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ในการผสมที่ความเร็วรอบเท่ากับ 120 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 10 โชนจากส่วนป้อนถึงหัวอัดรีดที่ใช้คือ 70 90 120 150 170 160 140 120 115 และ 110 องศาเซลเซียส เทอร์โมพลาสติกสตาบิลผสมกับพอลิแลกติกแอซิดในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้คือ 180 องศาเซลเซียส เมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตถูกเติมในขั้นตอนที่แตกต่างกันเพื่อควบคุมการกระจายตัว สำหรับขั้นตอนแบบที่หนึ่ง เมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตถูกผสมในส่วนของแป้ง สำหรับขั้นตอนแบบที่สอง เมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตถูกผสมในส่วนของพอลิแลกติกแอซิด ปริมาณเมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตที่ใช้คือ 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การเติมเมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตลงไปช่วยเพิ่มค่ามอดูลัส ความแข็งแรงดึง และความทนทานต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเพิ่มปริมาณเมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนต สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการสร้างบล็อกโคพอลิเมอร์ (block copolymer) ระหว่างหมู่ไอโซไซยาเนต (isocyanate) ในเมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตและหมู่ไฮดรอกซิลที่มีในแป้งกับพอลิแลกติกแอซิด กรณีที่เมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตกระจายตัวในส่วนของพอลิแลกติกแอซิด มอดูลัส ความแข็งแรงดึง และความทนทานต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่ไอโซไซยาเนตในเมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตกราฟกับพอลิเอสเทอร์และทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในแป้งสร้างเป็นแป้งสตาบิล-พอลิเอสเทอร์ บล็อกโคพอลิเมอร์ (starch-polyester block copolymer) สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่เติมเมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตเข้าไปในส่วนของแป้งสตาบิลมีค่าต่ำกว่ากรณีที่เติมลงในพอลิแลกติกแอซิด เพราะเมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตที่กระจายตัวในแป้งรบกวนแป้งส่งผลให้เกิดการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของหมู่เอสเทอร์ (ester group) ในพอลิแลกติกแอซิดผ่านการเกาะติดน้ำ (water bound) ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิล อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลเนื่องจากการแยกเฟส อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมในกรณีเมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตกระจายตัวในพอลิแลกติกแอซิดลดลงเนื่องจากผลของแป้งในการเหนี่ยวนำการเกิดผลึก อุณหภูมิการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่เมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตกระจายตัวในแป้งสตาบิลไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเติมเมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนต แต่ในขณะที่อุณหภูมิการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่เมทิลีนไดฟีนีล ไดไอโซไซยาเนตกระจายตัวอยู่ในพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้นประมาณ 5 องศาเซลเซียส เนื่องจากการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวสัมผัสของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด

Ferrarezi, Taipina, Silva, and Goncalves (2013) ใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (poly(ethylene glycol), PEG) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด ศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

ของพอลิเมอร์ผสม แป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลถูกผสมโดยเครื่องผสมแบบสกรูคู่ขนาดเล็ก (twin-screw micro-compounder) อุณหภูมิที่ใช้คือ 150 องศาเซลเซียส และความเร็วในการผสมครั้งที่ 50 รอบต่อนาที พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดถูกเตรียมโดยเครื่องผสมแบบสกรูคู่ขนาดเล็ก ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ปริมาณพอลิเอททิลีนไกลคอลที่ใช้คือ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดแสดงให้เห็นว่าอนุภาคเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีขนาดใหญ่และมีการยึดติดไม่ดีระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพอลิเอททิลีนไกลคอล ในขณะที่ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากพอลิเอททิลีนไกลคอลทำหน้าที่เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีประสิทธิภาพของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดโดยสร้างแรงยึดติดทางเคมีระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิแลกติกแอซิดที่ทำหน้าที่เป็นสะพานทางกายภาพ (physical bridge) การเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพอลิเอททิลีนไกลคอล เนื่องจากผลจากการพลาสติกไซเซชันและเพิ่มแรงยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด

Karagoz and Ozkoc (2013) ใช้ฟีนีลีนไดไอโซไซยาเนต (phenylene diisocyanate, PDI) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยซิตริกแอซิด (citric acid) กับพอลิแลกติกแอซิด สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมถูกศึกษา แป้งข้าวโพด กลีเซอรอล และซิตริกแอซิด ถูกผสมโดยเครื่องผสมแบบสกรูคู่ขนาดเล็กที่หมุนในทิศทางเดียวกัน อุณหภูมิที่ใช้คือ 150 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ปริมาณซิตริกแอซิดที่ใช้คือ 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยซิตริกแอซิดและพอลิแลกติกแอซิดถูกผสมโดยเครื่องผสมแบบสกรูคู่ขนาดเล็กที่หมุนในทิศทางเดียวกัน ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบของสกรูที่ใช้คือ 100 รอบต่อนาที ฟีนีลีนไดไอโซไซนาเนตถูกใส่ในพอลิเมอร์ผสมที่ปริมาณเท่ากับ 0.5 1.0 และ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดลองจากเครื่อง FTIR แสดงให้เห็นว่าซิตริกแอซิดทำปฏิกิริยากับแป้งและฟีนีลีนไดไอโซไซนาเนตและทำปฏิกิริยากับทั้งแป้งและพอลิแลกติกแอซิดผ่านหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดยืนยันได้ว่าการรวมกันของซิตริกแอซิดและฟีนีลีนไดไอโซไซนาเนตเพิ่มการกระจายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในพอลิแลกติกแอซิด ความทนทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยซิตริกแอซิดกับพอลิแลกติกแอซิดถูกปรับปรุงโดยการเติมฟีนีลีนไดไอโซไซนาเนตซึ่งบอกได้จากการลดขนาดอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เป็นที่รู้กันว่าการลดลงของขนาดอนุภาคเฟสกระจายส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณของซิตริกแอซิดส่งผลให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น การเติมฟีนีลีนไดไอโซไซนาเนตช่วยปรับปรุงค่าความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ปรับปรุงพื้นผิวโดยซิตริกแอซิดกับพอลิแลกติกแอซิด ซึ่งสามารถ

อธิบายได้ถึงการเพิ่มแรงยึดติดระหว่างสองเฟส เป็นผลให้ขัดขวางการก่อตัวของรอยแตกหัก เมื่อเพิ่มปริมาณฟีนีลีนไดไฮดรอกซีไซยาเนต ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมค่อยๆ เพิ่มขึ้น โมดูลัสยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ถูกดัดแปรพื้นผิวโดยซิติคแอซิดกับพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้น เมื่อเติมฟีนีลีนไดไฮดรอกซีไซยาเนต เนื่องจากการสร้างปฏิกิริยาระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด อย่างไรก็ตาม โมดูลัสยืดหยุ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณของฟีนีลีนไดไฮดรอกซีไซยาเนต การเปลี่ยนแปลงของค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการยึดติด เนื่องจากโมดูลัสยืดหยุ่นถูกวัดในช่วงระยะยืดต่ำๆ ที่การยึดติดไม่มีบทบาท แต่โมดูลัสขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของระบบ การเปลี่ยนแปลงของค่ามอดูลัสบ่งชี้ได้น้ำหนักโมเลกุลของระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (co-polymerization) ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อซิติคแอซิดและฟีนีลีนไดไฮดรอกซีไซยาเนตถูกเติม อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมลดลง เมื่อปริมาณของฟีนีลีนไดไฮดรอกซีไซยาเนตเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากพันธะยูรีเทนในการสร้างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกราฟพอลิแลกติกแอซิดโคพอลิเมอร์ (TPS-g-PLA copolymer) และสร้างแรงยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด อุณหภูมิการตกผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของฟีนีลีนไดไฮดรอกซีไซยาเนต เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดเมื่อเติมฟีนีลีนไดไฮดรอกซีไซยาเนต อุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเติมทั้งฟีนีลีนไดไฮดรอกซีไซยาเนตและซิติคแอซิด เมื่อเติมซิติคแอซิดลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มการยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด

Ping, Kejian, Mingyin, and Meijuan (2013) ศึกษาผลของพอลิเอทิลีนไกลคอลซึ่งเป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิดที่เปลี่ยนแปลงปริมาณของพอลิเอทิลีนไกลคอลถูกผสมแบบแห้งในเครื่องผสมความเร็วสูง ที่ความเร็ว 3200 รอบต่อนาที ต่อจากนั้นพอลิเมอร์ผสมถูกเตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ความเร็วรอบ 330 รอบต่อนาที อุณหภูมิจากส่วนป้อนถึงหัวอัดรีดคือ 160 165 165 170 และ 170 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิดที่ใช้คือ 20 ต่อ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณของพอลิเอทิลีนไกลคอลที่ใช้คือ 1 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเติมพอลิเอทิลีนไกลคอล อุณหภูมิตกผลึกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเอทิลีนไกลคอล เนื่องจากเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนย้ายของสายโซ่เมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนไกลคอลเพิ่มขึ้น ระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดสองจุดของอุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดแคบลงเมื่อเพิ่มปริมาณเอทิลีนไกลคอลมากถึง 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเพิ่มการยึดติดของพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม ระยะห่างระหว่าง

จุดสูงสุดสองจุดของอุณหภูมิหลอมกว้างขึ้นเมื่อปริมาณพอลิเอททิลีนไกลคอลมากกว่า 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการรวมตัวกันของพอลิเอททิลีนไกลคอล ดัชนีการไหล (melt flow index, MFI) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพอลิเอททิลีนไกลคอล เพราะเพิ่มความสามารถในการเกิดพลาสติกไซเซชันและความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงต่อการดัดโค้ง (flexural strength) และความทนทานต่อแรงกระแทกพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิเอททิลีนไกลคอลมากถึง 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและพอลิแลกติกแอซิด อย่างไรก็ตามสมบัติทางกลลดลงเมื่อปริมาณพอลิเอททิลีนไกลคอลมากกว่า 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ปริมาณพอลิเอททิลีนไกลคอลสูง ส่วนเกินของพอลิเอททิลีนไกลคอลแทรกเข้าไปข้างในอนุภาคเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและทำลายพันธะไฮโดรเจนเป็นผลให้แรงระหว่างโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลลดลง

2.3.2 การดัดแปรพอลิแลกติกแอซิด

ปัจจุบัน แนวทางในการดัดแปรอินเทอร์เฟซ (interfacial modification) เป็นการดัดแปรพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยการกราฟตัวทำปฏิกิริยา (reactive agent) ลงบนพอลิเมอร์เมทริกซ์

Huneault and Li (2007) ศึกษาสมบัติทางกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาบิลเตรียมจากแป้งสาลี กลีเซอรอล และน้ำ ปริมาณของกลีเซอรอลแตกต่างกันไปจาก 30 ถึง 39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาบิลแตกต่างกันไปจาก 27 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมถูกเตรียมโดยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่หมุนในทิศทางเดียวกัน ครึ่งส่วนแรกของสกรูถูกใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิล อุณหภูมิที่ใช้คงที่ที่ 130 องศาเซลเซียส ต่อจากนั้น น้ำถูกกำจัดออกจากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลโดยช่องระบายสูญญากาศก่อนที่จะถึงส่วนกลางของสกรู พอลิแลกติกแอซิดถูกเติมลงในส่วนกลางของสกรูโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวเป็นตัวป้อนไปสู่เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส การดัดแปรพื้นผิวโดยการกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride, MA) ลงบนพอลิแลกติกแอซิด และต่อจากนั้นพอลิแลกติกแอซิดที่มีการดัดแปรพื้นผิวทำปฏิกิริยากับเทอร์โมพลาสติกสตาบิล ส่วนครึ่งแรกของเครื่องอัดรีดอุณหภูมิคงที่ที่ 100 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเริ่มต้นของปฏิกิริยาก่อนที่มาเลอิกแอนไฮไดรด์จะหลอมและผสมกันอย่างสมบูรณ์ในของผสม ส่วนถัดมาอุณหภูมิคงที่ที่ 180 องศาเซลเซียส เพื่อทำปฏิกิริยามาเลชัน (maleation reaction) พอลิแลกติกที่ถูกดัดแปรพื้นผิวถูกทำให้เป็นเม็ดและใช้แทนพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด ปริมาณของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ใช้คงที่ที่ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอ-บิวทิเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5-di-(tert-butylperoxide)-hexane, L101) ที่ใช้คือ 0.10 0.25 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โมดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาบิล อย่างไรก็ตาม

การตัดแปรพื้นผิวไม่ส่งผลต่อมอดูลัสแรงดึง เนื่องจากมอดูลัสถูกวัดช่วงระยะยืดต่ำๆ ก่อนการเกิดการทำลายพันธะอินเทอร์เฟซ (interfacial debonding) การตัดแปรพื้นผิวส่งผลต่อการเพิ่มสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์กับพอลิแลกติกแอซิดที่ตัดแปรพื้นผิวมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์กับพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์กับพอลิแลกติกแอซิดที่ตัดแปรพื้นผิวมีการปรับปรุงความเหนียวอย่างชัดเจน เนื่องจากการยืดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์กับพอลิแลกติกแอซิด ระยะยืด ณ จุดขาดสูงๆ พบในกรณีที่เทอร์โมพลาสติกสตาซซ์มีปริมาณของกลีเซอรอล 36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์กับพอลิแลกติกแอซิดที่ตัดแปรพื้นผิวมีโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาที่ละเอียดแสดงให้เห็นว่าการยืดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์และพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้น

2.3.3 การตัดแปรเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์

การใช้ประยุกต์ใช้งานของเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ในพอลิเมอร์ผสมของพอลิแลกติกแอซิดจำเป็นต้องมีความสมดุลระหว่างราคาและสมบัติ ในการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์กับพอลิแลกติกแอซิด สามารถทำได้โดยการตัดแปรโครงสร้างทางเคมีของแป้งโดยการแทนที่บางส่วนของหมู่ไฮดรอกซิลในแป้งด้วยหมู่ที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic group) เช่น หมู่อีเทอร์และหมู่เอสเทอร์

Shin, Jo, Kang, Lee, and Kim (2007) ศึกษาสมบัติการไหลและโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ที่มีการตัดแปรทางเคมี (chemically modified plasticized starch, CMPS) กับพอลิแลกติกแอซิด แป้งข้าวโพดถูกตัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดร (maleic anhydride, MA) และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ มาเลอิกแอนไฮไดรถูกบดให้เป็นผงเล็กๆ และนำผสมกับแป้งโดยใช้เครื่องปั่นผสม เป็นเวลา 15 นาที ของผสมถูกผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่หมุนในทิศทางเดียวกัน กลีเซอรอลถูกผสมกับ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอ-บิวทิเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซน (2,5-dimethy-2,5-di-(tert-butylperoxide)-hexane, L101) และถูกปั๊มเข้าสู่เครื่องอัดรีดโดยใช้ปั๊มสุญญากาศของเหลว ความเร็วรอบที่ใช้คือ 150 รอบต่อนาที อัตราส่วนแป้งสตาซซ์ต่อกลีเซอรอลคือ 8 ต่อ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรคือ 2 ส่วนในร้อยส่วนของน้ำหนักทั้งหมดของแป้งสตาซซ์กับกลีเซอรอล และปริมาณ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอ-บิวทิเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซน คือ 0.2 ส่วนในร้อยส่วนของน้ำหนักทั้งหมดของแป้งกับกลีเซอรอล พอลิแลกติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ที่มีการตัดแปรทางเคมีถูกผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดสกรูคู่ที่หมุนในทิศทางเดียวกัน ช่วงอุณหภูมิที่ใช้คือ 65 ถึง 195 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิหัวอัดรีดเท่ากับ 185 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ที่มีการตัดแปรทางเคมีคือ 10 20 30 40 50 60 70 และ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบอนุภาคทรงกลมของเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ในพอลิแลกติกแอซิดที่เทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ที่มีการตัดแปรทางเคมีต่ำ เมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ที่มีการตัดแปรทางเคมี อนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาซซ์ที่มีการตัดแปรทางเคมีมีการ

ยึดและเกิดเป็นโครงสร้างต่อเนื่อง (co-continuous) พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่มีการปรับปรุงทางเคมีกับพอลิแลกติกแอซิดแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) ที่มีค่า power law index ประมาณ 0.95 ของไหลแบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic fluid) ถูกพบเมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่มีการดัดแปรทางเคมี และค่า power law index มีค่าประมาณ 0.65 ถึง 0.11

Zhang, Ran, Zhuang, Yao, and Dong (2009) เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์ (thermoplastic acetylated starch, ATPS) อะซิทีเลชัน (acetylation) เป็นการดัดแปรทางเคมีที่มีประสิทธิภาพเพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำ (hydrophobicity) ความเสถียรต่อความร้อน และสมบัติทางกลของแป้ง อะซิทีเลตสตาเร็กซ์และกลีเซอรอลถูกผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงจนกระทั่งวัสดุเป็นเนื้อเดียวกัน ของผสมถูกขึ้นรูปกับเครื่องผสมภายใน ที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 นาที พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดถูกผสมโดยใช้เครื่องผสมภายในเป็นเวลา 8 นาที ความเร็วรอบของแกนหมุนที่ใช้คือ 50 รอบต่อนาที ปริมาณของเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์ที่ใช้คือ 10 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิด กระบวนการเกิดคราก (yield process) และเกิดคอคอดที่เสถียรปรากฏขึ้นบนกราฟความเค้นและความเครียด (stress-strain curve) พบการเปลี่ยนจากการแตกหักแบบเปราะของพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ไปเป็นการแตกหักแบบเหนียวสำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิด เมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์ ระยะยืด ณ จุดขาดและความต้านทานต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์และพอลิแลกติกแอซิด อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดค่อยๆ ลดลงเมื่อปริมาณของเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากมีความเข้ากันได้บางส่วนระหว่างเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิด อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิดลดลงประมาณ 15 องศาเซลเซียส แสดงถึงการเพิ่มความสามารถในการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด การเติมเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์ลดอุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิด อุณหภูมิการเสื่อมสภาพของเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพอลิแลกติกแอซิดเข้าไป อธิบายได้ว่าพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มความเสถียรต่อความร้อนของเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์ ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกอะซิทีเลตสตาเร็กซ์

Wootthikanokkhan, Wongta, Sombatsompop, Kositchaiyong, Wong-On, Isarankura na Ayutthaya, and Kaabbuathong (2012) ศึกษาผลกระทบของการดัดแปรทางเคมีและ

เวลาในการผสมต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการไหล และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชถูกดัดแปรเป็นมาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (maleated thermoplastic starch, MTPS) มาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้จากการผสมแป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และมาเลอิกแอนไฮไดรย ปริมาณมาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชคือ 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมระหว่างมาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดถูกเตรียมโดยใช้เครื่องผสมภายในที่ความเร็วรอบเท่ากับ 40 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้คือ 190 องศาเซลเซียส เวลาในการผสม 12 นาที ความแข็งแรงดึงและมอดูลัสของพอลิเมอร์ผสมระหว่างมาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการผสม ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาดและความเหนียวแรงดึงลดลง ความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเวลาในการผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเกิดการตัดสายโซ่พอลิเมอร์ในระหว่างการผลิต อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสมระหว่างมาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิแล็กติกแอซิดบริสุทธิ์ เนื่องจากการมีโมเลกุลของพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ถูกสร้างขึ้นจากการทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน (trans-esterification) ระหว่างมาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิแล็กติกแอซิดระหว่างการผลิต ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่ามาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดไม่เข้ากัน ขนาดอนุภาคของมาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่แตกต่างกันกระจายอยู่ในพอลิแล็กติกแอซิดเมทริกซ์ จากโครงสร้างทางสัณฐานวิทยานี้สัมพันธ์กับการลดลงของสมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม การแยกเฟสระหว่างมาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิแล็กติกแอซิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาในการผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมกับเวลาในการผสมมีอิทธิพลมาจากการตัดสายโซ่ นอกจากนี้ระยะยืด ณ จุดขาดและความเหนียวแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างมาลิเอตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด

Shin, Jang, and Kim (2011) ศึกษาสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมี (chemical modified thermoplastic starch, CMPS) กับพอลิแล็กติกแอซิด ผลการทดลองจาก FTIR ใช้ในการยืนยันการทำปฏิกิริยาระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีและพอลิแล็กติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีถูกเตรียมจากแป้งข้าวโพด มาเลอิกแอนไฮไดรย และกลีเซอรอล ถูกเตรียมเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ที่อุณหภูมิ 65 ถึง 155 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีที่ใช้คือ 10 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลการทดลองจาก FTIR พบว่ามีการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีและพอลิแล็กติกแอซิด พบพอลิแล็กติกแอซิดกราฟแป้งสตาร์ชที่อินเทอร์เฟสผ่านปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน (trans-esterification reaction) ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีและพอลิแล็กติกแอซิด ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

ส่องกราดแสดงขนาดอนุภาคเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีเพิ่มถึง 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่จำนวนอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมี นอกจากนี้ เมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีเพิ่มถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีเพิ่มขึ้นและมีการรวมตัวกันของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมี ซึ่งให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนเฟส (phase inversion) ค่าความแข็งแรงดึงและระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมี ในขณะที่ค่ามอดูลัสไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญความสามารถในการย่อยสลายของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมี พบจุดหลอมของพอลิเมอร์ผสมจุดเดียวเมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีน้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในทางตรงกันข้าม พบจุดหลอมสองจุดเมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากจลนศาสตร์การเกิดผลึก (crystallization kinetics) ของพอลิแล็กติกแอซิดช้าลงและการหลอมบางส่วนตามมาด้วยการเกิดผลึกอีกครั้ง (recrystallization) ของโมเลกุลในระหว่างการทดสอบด้วยเครื่อง DSC นอกจากนี้ ปริมาณผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมี เนื่องจากผลการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมี อย่างไรก็ตาม ที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง เพราะเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีไม่มีประสิทธิภาพต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกบนพอลิแล็กติกแอซิด

2.4 การปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด

ความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดยังคงไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานบางประเภท พอลิเมอร์ผสมยังมีความเปราะ ความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดสามารถปรับปรุงได้โดยการผสมพอลิเมอร์ยืดหยุ่นเข้าไป

Sarazin, Li, Orts, and Favis (2008) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแล็กติกแอซิด และพอลิคาโปแลกโตน (polycaprolactone, PCL) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชถูกเตรียมจากแป้งสาลี กลีเซอรอล และน้ำ TPS36 เตรียมจากแป้งสาลี กลีเซอรอล และน้ำที่อัตราส่วน 48.3 ต่อ 28.1 ต่อ 23.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ TPS24 เตรียมจากแป้งสาลี กลีเซอรอล และน้ำที่อัตราส่วน 48.5 ต่อ 15.65 ต่อ 35.85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระบบการอัดรีดเป็นการรวมกันของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดียวกับเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่หมุนในทิศทางเดียวกัน แป้งกลีเซอรอล และน้ำถูกป้อนเข้าสู่ส่วนแรกของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 150 รอบต่อนาที ในขณะที่พอลิแล็กติกแอซิดถูกป้อนเข้าสู่เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว หลังจากเกิดเกลาคีโนเซชันของ

แบ่งตามมาด้วยการกำจัดสารระเหยออก เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ผสมเข้ากับพอลิแล็กติกแอซิดที่หลอมแล้วบนเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ อุณหภูมิในส่วนของพอลิแล็กติกแอซิดมีค่า 150 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิคาโปแลกโตนคือ 50 ต่อ 40 ต่อ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมพบอนุภาคนาโนขนาดเล็กของพอลิคาโปแลกโตนที่กระจายตัวอยู่ในพอลิแล็กติกแอซิดเมทริกซ์ การเติม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิคาโปแลกโตนในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดส่งผลให้เพิ่มระยะยืด ณ จุดขาดอย่างชัดเจนและความต้านทานต่อแรงกระแทก แต่มอดูลัสยืดหยุ่นและความแข็งแรงดิ่งลดลง เนื่องจากพฤติกรรมความยืดหยุ่นของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์และพอลิคาโปแลกโตน

Ren, Fu, Ren, and Yuan (2009) เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ พอลิแล็กติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทเรพทาเรต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) มาเลือกแอนไฮดรายดิวท์เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมและปริมาณที่ใช้คงที่ที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์เตรียมจากแป้งข้าวโพดและกลีเซอรอลโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูงที่ 2280 รอบต่อนาที อัตราส่วนของแป้งสตาบิลิซเซอร์ต่อกลีเซอรอลคือ 80:20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการผสมคงที่ที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทเรพทาเรตถูกเตรียมโดยเครื่องผสมแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 155 ถึง 175 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 80 รอบต่อนาที ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์คงที่ที่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทเรพทาเรตคือ 10 20 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปตโคเทเรพทาเรต ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นแต่ความแข็งแรงดิ่ง ความต้านทานแรงโค้งงอ (flexural strength) และมอดูลัสโค้งงอ (flexural modulus) ลดลง พอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้แสดงสมบัติแรงดิ่งและสมบัติแรงโค้งงอสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างส่วนประกอบของพอลิเมอร์ผสม

Li and Huneault (2011) ใช้อีพ็อกซี-อะคริลิก-สไตรีนโคพอลิเมอร์ (epoxy-acrylic-styrene copolymer) เป็นเชนเอ็กซ์เทนเดอร์ (chain extender) เพื่อเพิ่มความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิด พอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราย (PLA-g-MA) ถูกใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ในพอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแล็กติกแอซิดถูกเตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่หมุนในทิศทางเดียวกัน ซอบิทอล กลีเซอรอล และน้ำถูกใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์สำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ ช่วงครึ่งแรกของเครื่องอัดรีดถูกใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส แป้งสาลีและซอบิทอลถูกป้อนในลักษณะของผงแห้ง ต่อจากนั้นกลีเซอรอลและน้ำถูกใส่ในแป้งผ่านช่องฉีดพลาสติกไซเซอร์ อัตราส่วนของน้ำต่อกลีเซอรอลใช้คงที่ที่ 0.1:1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หลังจากนั้น น้ำถูกแยกออกโดยช่องระบายในเครื่อง

อัดรีดเพื่อให้ได้เทอร์โมพลาสติกสตาโรล ปริมาณพลาสติกไซเซอร์คงที่ที่ 36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกสตาโรลและพอลิแลกติกแอซิดถูกผสมในส่วนที่สองของเครื่องอัดรีดที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาโรลคงที่ที่ 27 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิแลกติกแอซิด ถูกแทนที่ด้วยพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราต ปริมาณของอีพ็อกซี-อะคริลิก-สไตรีนโคพอลิเมอร์ต่างๆ คือ 0.5 1.0 2.0 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราต และอีพ็อกซี-อะคริลิก-สไตรีนโคพอลิเมอร์ถูกผสมแบบแห้งกับพอลิแลกติกแอซิดก่อนเข้าเครื่องอัดรีด ศึกษาสมบัติแรงดึงและสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสม การเติมอีพ็อกซี-อะคริลิก-สไตรีนโคพอลิเมอร์ และพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราตลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับ พอลิแลกติกแอซิดเพิ่มค่าระยะยืด ณ จุดขาดอย่างชัดเจน ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถของวัสดุในการเสียรูป ผ่านกลไกการเกิดคอขวดหลังจากจุดคราก (necking mechanism after yield point) การเติมอีพ็อกซี-อะคริลิก-สไตรีนโคพอลิเมอร์ลดเอนทาลปีการหลอม เมื่อเติม 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอีพ็อกซี-อะคริลิก-สไตรีนโคพอลิเมอร์ลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแลกติกแอซิด ทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์เพิ่มขึ้นและการเคลื่อนที่ของสายโซ่เป็นไปได้ยากมากขึ้น การปรับปรุงแรงยึดติดควบคุมคู่ไปกับการเติมเซนส์เตอร์ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเหนียวของพอลิเมอร์ผสม เนื่องมาจากการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลและการเกี่ยวพันสายโซ่ (chain entanglement) ของพอลิแลกติกแอซิดตรงพื้นผิว ซึ่งปรับปรุงการส่งผ่านความเค้นระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาโรล

Shi, Chen, Gao, Jiao, Xu, and Guo (2011) ศึกษาสมบัติทางกล ความร้อน และฐานานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแลกติกแอซิด และไกลซิติก เมทาคริเลตกราฟพอลิเอทิลีน ออกเทน (glycidyl methacrylate grafted poly(ethylene octane), GPOE) ไกลซิติก เมทาคริเลตกราฟพอลิเอทิลีน ออกเทนทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์ยึดหยุ่นที่ปรับปรุงความเข้ากันได้และความเหนียวของพอลิเมอร์ผสม เทอร์โมพลาสติกสตาโรลถูกเตรียมจากแป้งข้าวโพดและกลีเซอรอล 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบเท่ากับ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ใช้คือ 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปริมาณไกลซิติก เมทาคริเลตกราฟพอลิเอทิลีน ออกเทนที่ใช้คือ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พอลิเมอร์ผสมถูกผสมโดยใช้เครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เมื่อเติมไกลซิติก เมทาคริเลตกราฟพอลิเอทิลีน ออกเทน ระยะยืด ณ จุดขาดและความทนต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ความแข็งแรงดิ่งลดลง เนื่องจากผลของความยืดหยุ่นโดยธรรมชาติของไกลซิติก เมทาคริเลตกราฟพอลิเอทิลีน ออกเทน เมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาโรล ความแข็งแรงดิ่งของพอลิเมอร์ผสมลดลง ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเติม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล อย่างไรก็ตาม

ตาม ที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์สูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลง เนื่องจากการแยกเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์และพอลิแลกติกแอซิด การเติมไกลซิโด เมททาคริเลตกราฟพอลิเอททีลีน ออกเทนลดอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสมทั้งหมด ซึ่งบ่งบอกว่าหมู่อีพอกซี (epoxy group) ของไกลซิโด เมททาคริเลตกราฟพอลิเอททีลีน ออกเทนสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่คาบอซิลหรือไฮดรอกซิลของพอลิแลกติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ซึ่งเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างส่วนประกอบของพอลิเมอร์ ไกลซิโด เมททาคริเลตกราฟพอลิเอททีลีน ออกเทนลดขนาดอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ และปรับปรุงความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ พอลิแลกติกแอซิด และไกลซิโด เมททาคริเลตกราฟพอลิเอททีลีน ออกเทนมีการดูดซับน้ำมากกว่าและใช้เวลานานกว่าในการถึงจุดสมดุลเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแลกติกแอซิด

Yokesahachart and Yoksan (2011) ใช้โมเลกุลแอมฟิฟิลิก (amphiphilic molecules) เช่น ทวิน 60 (tween 60) ลินโนเลอิก แอซิด (linoleic acid) และโปรตีนจากข้าวโพด (tein) เป็นสารเติมแต่งสำหรับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแลกติกแอซิด การเติมโมเลกุลแอมฟิฟิลิกมีผลให้ปรับปรุงการพลาสติกไซเซชันและความสามารถในการขึ้นรูป เพิ่มความสามารถในการยืดตัว (extensibility) เพิ่มความสามารถในการเกิดผลึก และลดความแข็งของวัสดุ แป้งมันสำปะหลังและแป้งถั่วเขียว (mung bean) ถูกผสมในเครื่องผสมแบบกวน (ribbon mixer) ที่อัตราส่วน 70 ต่อ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของกลีเซอรอลและน้ำคือ 3 ต่อ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของผสมของแป้งและพลาสติกไซเซอร์ถูกเติมลงในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ อุณหภูมิถูกตั้งอยู่ในช่วง 70 ถึง 120 องศาเซลเซียส ปริมาณแอมฟิฟิลิกที่ 1.55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ถูกผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ที่สภาวะเดียวกันสำหรับเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ เทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์และพอลิแลกติกแอซิดถูกผสมในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิในช่วง 130 ถึง 160 องศาเซลเซียส ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ต่างๆ ที่ใช้คือ 30 50 และ 70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การเติมแอมฟิฟิลิกมีผลต่อการปรับปรุงการพลาสติกไซเซชัน ความสามารถในการขึ้นรูป และความสามารถในการยืดตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์ แต่ลดความแข็ง นอกจากนี้ การเติมแอมฟิฟิลิกช่วยปรับปรุงความสามารถในการยืดตัว ความสามารถในการไหล และความสามารถในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิซเซอร์กับพอลิแลกติกแอซิด ทวิน 60 และลินโนเลอิก แอซิดเพิ่มความสามารถในการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมมากกว่าโปรตีนจากข้าวโพด ในขณะที่โปรตีนจากข้าวโพดส่งผลต่อความแข็งแรงของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ ทวิน 60 และลินโนเลอิก แอซิดช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ผสมมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับโปรตีนจากข้าวโพด

บทที่ 3

วัสดุและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ

พอลิแลกติกแอซิด (poly(lactic acid), PLA) เกรด 4043D จากบริษัท Natural Works LLC จำกัด พอลิบิวทีลีน อะดิเปเรต โคเทอเรพทาเรต (poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT) เกรด Ecoflex FBX 7011 จากบริษัท BASF จำกัด มาเลอิกแอนไฮไดรยมอนอเมอร์ (maleic anhydride monomer, MA monomer) และ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอ-บิวทิเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5-di-(tert-butylperoxide)-hexane, L101) จากบริษัท Sigma-Aldrich จำกัด แป้งมันสำปะหลังจากบริษัท Bangkok Interfood จำกัด กลีเซอรอล (Glycerol) จากบริษัท Carbo Erba Reagenti จำกัด

3.2 การทดลอง

3.2.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชถูกเตรียมโดยใช้เครื่องผสมภายใน (Hakke Rheomix, 3000P) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้มาจากแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 70 ต่อ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แป้งมันสำปะหลังถูกอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อุณหภูมิในการผสมคงที่ที่ 120 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบที่ 60 รอบต่อนาที เวลาในการผสมคือ 10 นาที ชิ้นงานทดสอบถูกเตรียมโดยเครื่องกดอัด (Labtech, LP20-B) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และความดัน 100 เมกะปาสคาล

3.2.2 การเตรียมและการวิเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรย

พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรยถูกเตรียมโดยใช้เครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ความเร็วรอบที่ 50 รอบต่อนาที ก่อนการผสมพอลิแลกติกแอซิดถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรยและ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอ-บิวทิเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซนที่ใช้คือ 5.0 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ (Teamsinsungvon, (2011))

3.2.2.1 การวิเคราะห์ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรย

มาเลอิกแอนไฮไดรยบนพอลิแลกติกแอซิดถูกวิเคราะห์โดยการไตเตรทหมู่แอซิด (titration of acid groups) ที่มาจากหมู่ฟังก์ชันของแอนไฮไดรย (anhydride function) โดยใช้ฟีนอล์ฟทาเลอิน (phenolphthalein) เป็นตัวบ่งชี้ (indicator) ตัวอย่างถูกละลายในคลอโรฟอร์ม (chloroform) และตกตะกอนโดยเมทานอล (methanol) เพื่อกำจัดมาเลอิกแอนไฮไดรยและตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ที่เหลือ หลังจากนั้น พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรยถูกชั่งน้ำหนักที่แน่นอนและละลายอย่างสมบูรณ์ในสารละลายผสมของคลอโรฟอร์มกับเมทานอล (80 ต่อ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ต่อจากนั้น ตัวอย่างถูกไตเตรทกับสารละลายโพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide solution, KOH) ที่

ความเข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร จำนวนแอซิด (acid number) และปริมาตรการกราฟ (graft content, %G) ถูกคำนวณโดยสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.2) ตามลำดับ พอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ที่ไม่มีมาเลอิกแอนไฮดรายถูกไตเตรทภายใต้สภาวะเดียวกันเพื่อให้ได้ค่าเบส (blank value) (Wu, (2003))

$$\text{Acid number (mgKOH/g)} = \frac{V_{\text{KOH}}(\text{ml}) \times N_{\text{KOH}}(\text{M})}{\text{sample (g)}} \times 56.1 \quad (3.1)$$

$$\%G = \frac{(\text{Acid number} - M_0)}{2 \times 561} \times 98.06 \quad (3.2)$$

เมื่อ M คือโมลาลิตี (โมลต่อลิตร mol/L) V คือปริมาตร (มิลลิลิตร (ml)) และ M_0 คือค่ามาตรฐานของการไตเตรท (blank titration value) ของพอลิแลกติกแอซิด 98.06 คือน้ำหนักโมเลกุลของมาเลอิกแอนไฮดราย

3.2.2.2 การวิเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FTIR)

อินฟราเรดสเปกตรัม (infrared spectrum) ของพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายถูกศึกษาโดยเครื่อง FTIR รูปแบบ Attenuated total reflectance (ATR) สเปกตรัมที่ใช้บันทึกอยู่ในเลขคลื่นช่วง 4000 ถึง 600 cm^{-1} ที่ความละเอียด 4 cm^{-1} และจำนวนของการสแกนคือ 32

3.2.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด

พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดถูกเตรียมโดยใช้เครื่องผสมภายใน ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาบิลคือ 10 20 30 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกสตาบิลและพอลิแลกติกแอซิดถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก่อนการผสม อุณหภูมิผสมเท่ากับ 170 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบที่ 60 รอบต่อนาที เวลาในการผสม 10 นาที ชิ้นงานทดสอบถูกขึ้นรูปโดยเครื่องกดอัดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และความดัน 100 เมกะปาสคาล นอกจากนี้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดที่ให้สมบัติทางกลสูงสุดถูกเลือกเพื่อไปศึกษาผลของปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด

ในกรณีของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงการเข้ากันได้ พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายถูกใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้และปริมาณที่ใช้คือ 3 5 และ 7 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม เทอร์โมพลาสติกสตาบิลและพอลิแลกติกแอซิดถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก่อนการผสม พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ถูกผสมโดยเครื่องผสมภายใน อุณหภูมิในการผสมคือ 170 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบที่ 60 รอบต่อนาที เวลาในการผสมเท่ากับ

10 นาที ขึ้นงานทดสอบถูกขึ้นรูปโดยเครื่องกดอัดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และความดัน 100 เมกะปาสคาล นอกเหนือจากนี้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ให้สมบัติทางกลสูงสุดถูกเลือกเพื่อศึกษาผลของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้

3.2.4 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต

พอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตถูกเติมลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ที่ 10 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ก่อนการผสม เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด พอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ต่อจากนั้น พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต ถูกเตรียมโดยใช้เครื่องผสมภายในที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบที่ 60 รอบต่อนาที เวลาในการผสม 10 นาที ขึ้นงานทดสอบถูกขึ้นรูปโดยเครื่องกดอัดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และความดันเท่ากับ 10 เมกะปาสคาล

3.2.5 การตรวจสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้

3.2.5.1 สมบัติทางกล

สมบัติแรงดึงของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ถูกศึกษาตามมาตรฐาน ASTM D638 โดยใช้เครื่อง Universal testing machine (Instron 5565) ที่เซลล์วัดแรง (load cell) เท่ากับ 5 กิโลนิวตัน และความเร็วในการดึงเท่ากับ 5 มิลลิเมตรต่อนาที

การทดสอบแรงกระแทกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ถูกศึกษาตามมาตรฐาน ASTM D265 โดยใช้เครื่อง Impact testing machine (Atlas, BPI) โดยใช้ค้อน (pendulum) 2.7 จูล

3.2.5.2 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด และพอลิবিที่ลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ ถูกศึกษาโดยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC, NETZSCH, DSC 204F1)) ตัวอย่างถูกให้ความร้อนจาก 25 องศาเซลเซียส ถึง 200 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงค้างอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 5 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเพื่อลบความทรงจำทางความร้อนของตัวอย่าง หลังจากนั้น ตัวอย่างถูกหล่อเย็นจนมาถึง -50 องศาเซลเซียส ที่อัตราการหล่อเย็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นให้ความร้อนอีกครั้งไปที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที (เป็นการให้ความร้อนครั้งที่ 2) ปริมาณผลึก (degree of crystallinity, χ_c) ของพอลิแลกติกแอซิด ถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ (3.3)

$$\chi_c = \frac{\Delta H_m}{w_f \times \Delta H_m^0} \times 100\% \quad (3.3)$$

เมื่อ ΔH_m เป็นเอนทาลปีของการหลอม (enthalpy of fusion) ในระหว่างการให้ความร้อน ΔH_m^0 คือ เอนทาลปีของพอลิแลกติกแอซิดที่มีปริมาณผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ (93.7 จูล/กรัม) (Garlotta, (2001)) และ w_f คือสัดส่วนโดยน้ำหนักของส่วนพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด และพอลิবিที่ลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ ถูกวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA, Perkin Elmer, SDT 2960) การสลายตัวทางความร้อนถูกศึกษาภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้อยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 มิลลิกรัม ตัวอย่างถูกให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องถึง 600 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.2.5.3 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

สัณฐานวิทยาของพื้นผิวที่แตกหักในสภาวะที่แช่แข็ง (freeze-fractured surface) และพื้นผิวที่แตกหักในสภาวะแรงดึง (tensile fractured surface) ของพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด และพอลิবিที่ลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ ถูก

วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM, JEOL, JSM-6010LV) แรงดันไฟฟ้าที่ใช้คือ 10 กิโลโวลต์ ชิ้นงานทดสอบถูกสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) ที่ความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อสกัดเอาเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไดออกไซด์ออกจากพอลิแลกติกแอซิด หลังจากนั้นตัวอย่างถูกเคลือบด้วยทองคำก่อนการวิเคราะห์



บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การตรวจสอบพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรย

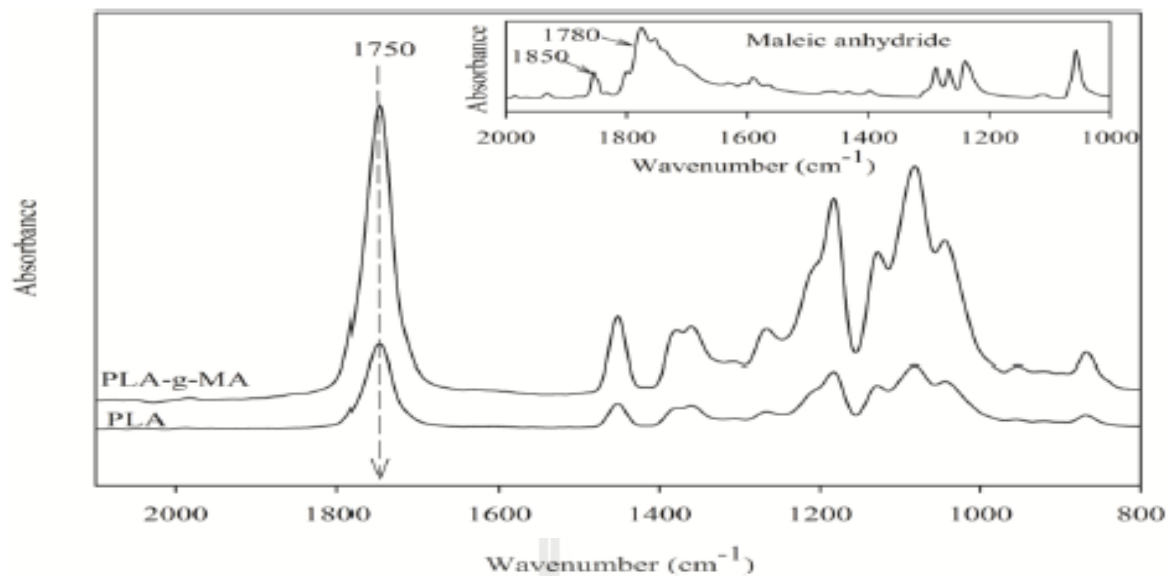
4.1.1 การวิเคราะห์พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรย

พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอซิดได้จากการกราฟแบบหลอม (melt grafting) โดยใช้เครื่องผสมภายใน เครื่อง FTIR ถูกใช้ในการยืนยันการเกิดปฏิกิริยาการกราฟของพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรย FTIR สเปกตรา (FTIR spectra) ของมาเลอิกแอนไฮไดรย พอลิแลกติกแอซิดและพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรยแสดงในรูปที่ 4.1 ซัคซินิก แอนไฮไดรย (succinic anhydride) แสดงการดูดกลืนที่เด่นชัดที่เลขคลื่นใกล้ 1780 cm^{-1} และที่ไม่เด่นชัดที่เลขคลื่น 1850 cm^{-1} เนื่องจากการยึดแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) (John, Tang, Yang, and Bhattacharya, (1997); Mani, Bhattacharya, and Tang, (1999)) การดูดกลืนที่เลขคลื่น 1780 cm^{-1} ไม่เด่นชัดและอาจซ้อนทับกับหมู่คาร์บอนิลของพอลิแลกติกแอซิดที่มีการดูดกลืนที่เด่นชัดดังแสดงในรูปที่ 4.1 ดังนั้นอนุพันธ์อันดับสองของ FTIR สเปกตรา (second derivative of FTIR spectra) ถูกใช้เพื่อปรับปรุงความละเอียด (resolution) ของพีคที่ซ้อนกัน

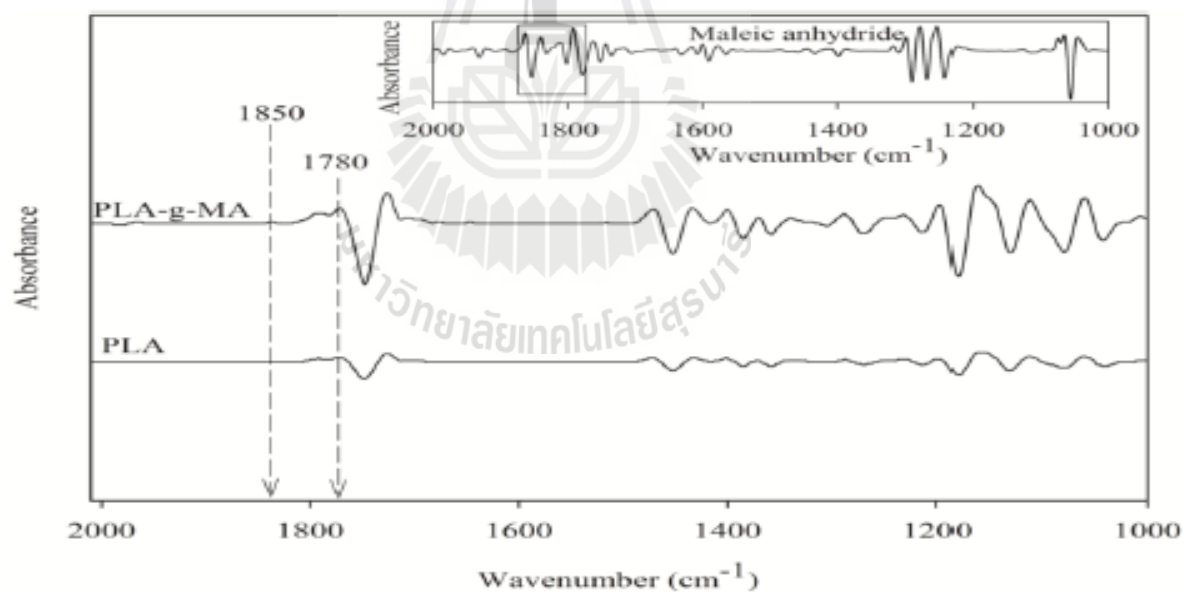
อนุพันธ์อันดับสองของ FTIR สเปกตราของมาเลอิกแอนไฮไดรย พอลิแลกติกแอซิด และพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรยแสดงอยู่ในรูปที่ 4.2 สเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรยแสดงการดูดกลืนที่ 1780 cm^{-1} ที่เป็นการยึดแบบสมมาตรของหมู่คาร์บอนิลของการดูดกลืนของหมู่ไซคลิก แอนไฮไดรย (cyclic anhydride) (Tserki, Matzinos, and Panayiotou, (2006)) นอกจากนี้ พบการดูดกลืนที่ 1850 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคเล็กในสเปกตรัมของพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรย ซึ่งเป็นการยึดแบบไม่สมมาตรของหมู่คาร์บอนิลของหมู่ไซคลิก แอนไฮไดรย จากผลของ FTIR ยืนยันว่ามาเลอิกแอนไฮไดรยถูกกราฟบนพอลิแลกติกแอซิด

4.1.2 ปริมาณการกราฟ

ปริมาณกราฟ (graft content) ของมาเลอิกแอนไฮไดรยบนพอลิแลกติกแอซิดถูกศึกษาโดยการไตเตรทหมู่กรด (acid group) ที่มาจากหมู่ฟังก์ชันแอนไฮไดรย (anhydride function) โดยใช้ฟีนอล์ฟทาเลอิน (phenolphthalein) เป็นตัวบ่งชี้ (indicator) ปริมาณกราฟของพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรยที่มาจาก 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอ-บิวทิเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซน (2,5-dimethyl-2,5-di-(tert-butylperoxide)-hexane (L101)) และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดรยมีค่าเท่ากับ 0.86 เปอร์เซ็นต์ พอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรยถูกใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในการศึกษา

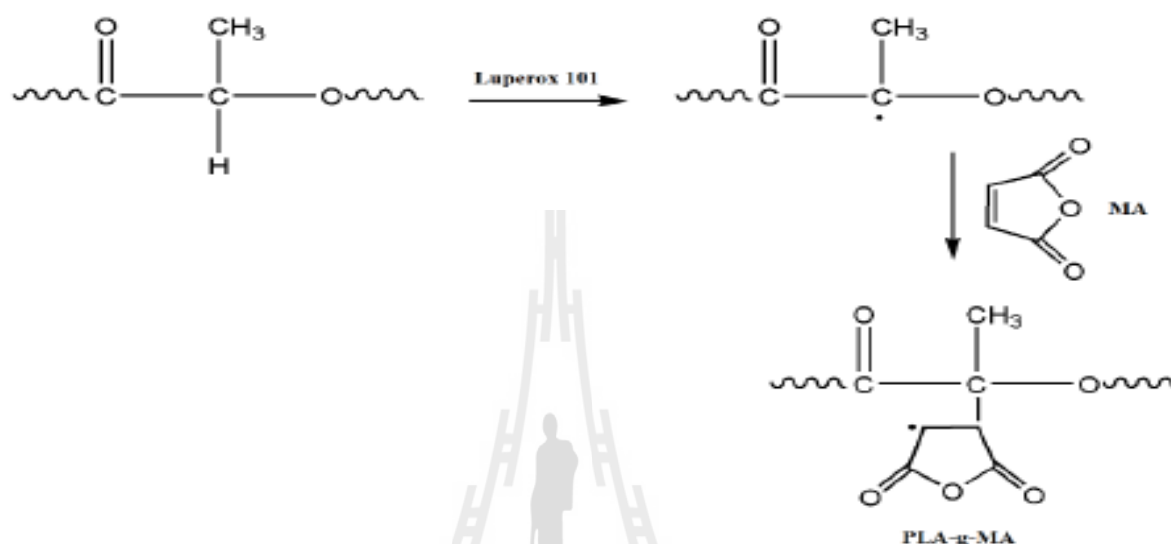


รูปที่ 4.1 FTIR สเปกตรัมของมาเลอิกแอนไฮไดร่า พอลิแลกติกแอซิด และพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดร่าที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอ-บิวทิเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซน และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดร่า



รูปที่ 4.2 อนุพันธ์อันดับสองของ FTIR สเปกตรัมของมาเลอิกแอนไฮไดร่า พอลิแลกติกแอซิด และพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดร่าที่ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ 2,5-ไดเมทิล-2,5-ได-(เทอ-บิวทิเปอร์ออกไซด์)-เฮกเซน และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมาเลอิกแอนไฮไดร่า

จากผลที่ได้จาก FTIR กลไกของปฏิกิริยาการกราฟที่เสนอแนะแสดงในรูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาเริ่มจากการแตกตัวของเปอร์ออกไซด์ ตามมาด้วยการตั้งไฮโดรเจนของแอลฟา-คาร์บอนอะตอม (α -carbon atom) ของหมู่คาร์บอนิลได้อนุมูลอิสระของพอลิเอสเทอร์ (polyester macroradical) หลังจากนั้น โมเลกุลเดี่ยวของมาเลอิกแอนไฮไดรยาจะกราฟบนอนุมูลอิสระของพอลิเอสเทอร์ (Mani, Bhattacharya, and Tang, (1999))



รูปที่ 4.3 รูปแบบการเกิดปฏิกิริยาการกราฟสำหรับการเกิดปฏิกิริยาของมาเลอิกแอนไฮไดรบนพอลิแลกติกแอซิด (Mani, Bhattacharya, และ Tang, (1999))

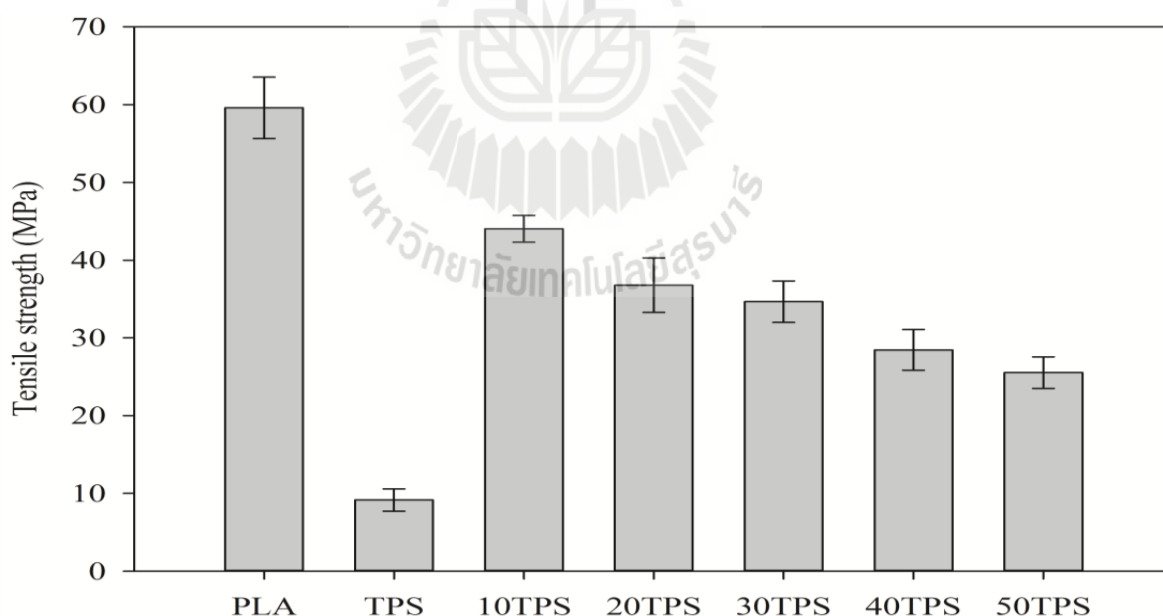
4.2 ผลของสัดส่วนการผสมต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ชกับพอลิแลกติกแอซิด

4.2.1 สมบัติทางกล

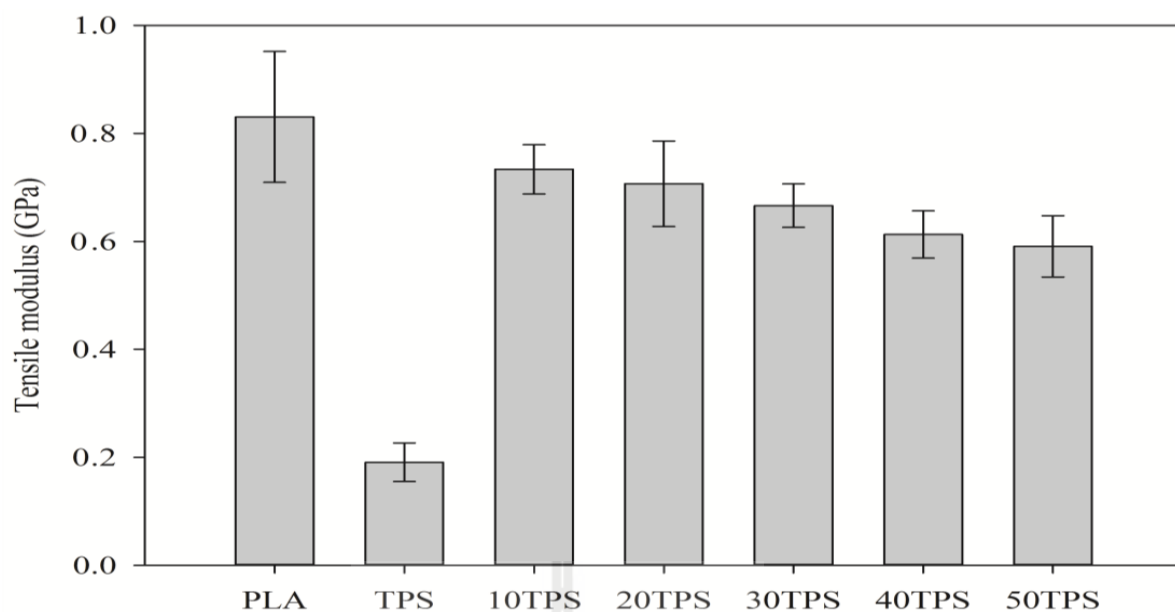
สมบัติทางกลของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตา์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตา์ชต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1 ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) โมดูลัสแรงดึง (tensile modulus) และระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตา์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ชกับพอลิแลกติกแอซิดแสดงในรูปที่ 4.4 รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ พอลิแลกติกแอซิดแสดงค่าโมดูลัสแรงดึงและความต้านทานต่อแรงดึงที่สูง แต่ระยะยืด ณ จุดขาดที่ต่ำ ความต้านทานต่อแรงดึงและโมดูลัสแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเติม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตา์ช เพราะเทอร์โมพลาสติกสตา์ชมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและโมดูลัสแรงดึงที่ต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมเทอร์โมพลาสติกสตา์ชนำไปสู่พฤติกรรมแบบเหนียว (ductile behavior) (Leadprathom, Suttiruwongwong,

Threepopnatkul, and Seadan, (2010); Ferrarezi, Taipina, Silva, and Goncalves, (2013)) เมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ สมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง เนื่องจากการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซและพอลิแลกติกแอซิด (Schwach, Six, and Averous, (2008); Wootthikanokkhan et al., (2012); Wang, Yu, Chang, and Ma, (2008); Leadprathom, Suttirungwong, Threepopnatkul, and Seadan, (2010))

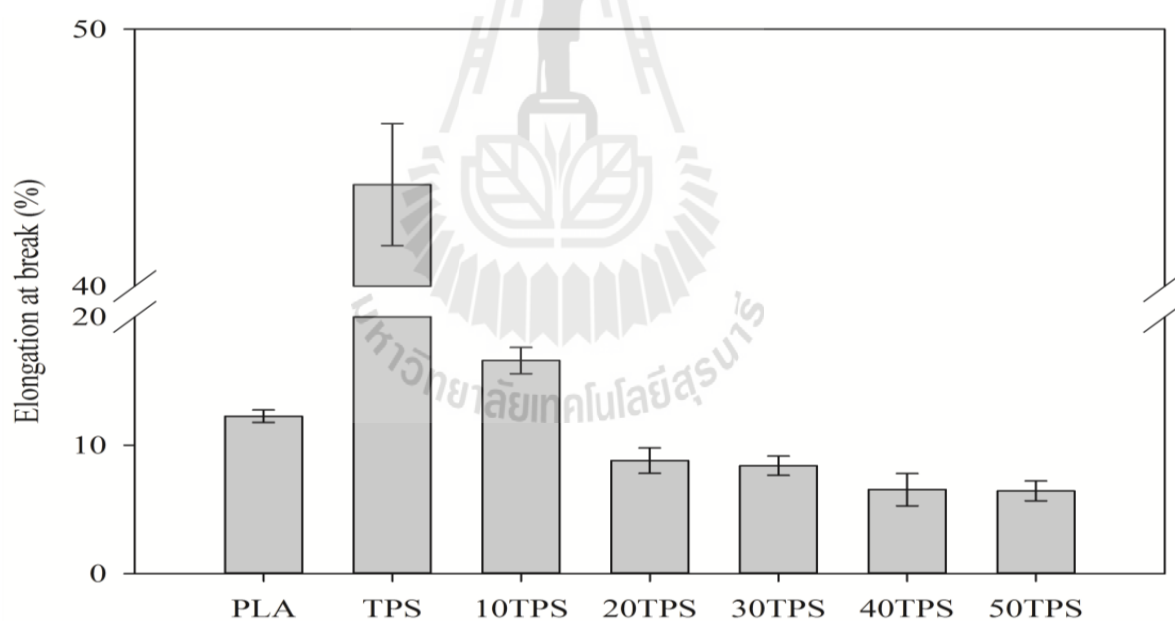
ความต้านทานต่อแรงกระทำของพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซกับพอลิแลกติกแอซิดแสดงในรูปที่ 4.7 เทอร์โมพลาสติกสตา์ซไม่แตกหักภายใต้สภาวะที่ทดสอบ ความต้านทานแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเติม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซและพอลิแลกติกแอซิด (Martin and Averous, (2001)) นอกจากนี้ ความต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซกับพอลิแลกติกแอซิดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ เนื่องจากการรวมตัวกันของอนุภาคเทอร์โมพลาสติกสตา์ซในพอลิเมอร์ผสมดังแสดงในรูปที่ 4.8 (b-f) อนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซสามารถทำหน้าที่เป็นจุดศูนย์รวมความเครียด (stress concentrator) เป็นผลให้ความต้านทานต่อแรงกระทำลดลง Sarazin, Orts, and Favis, (2008) พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซกับพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ



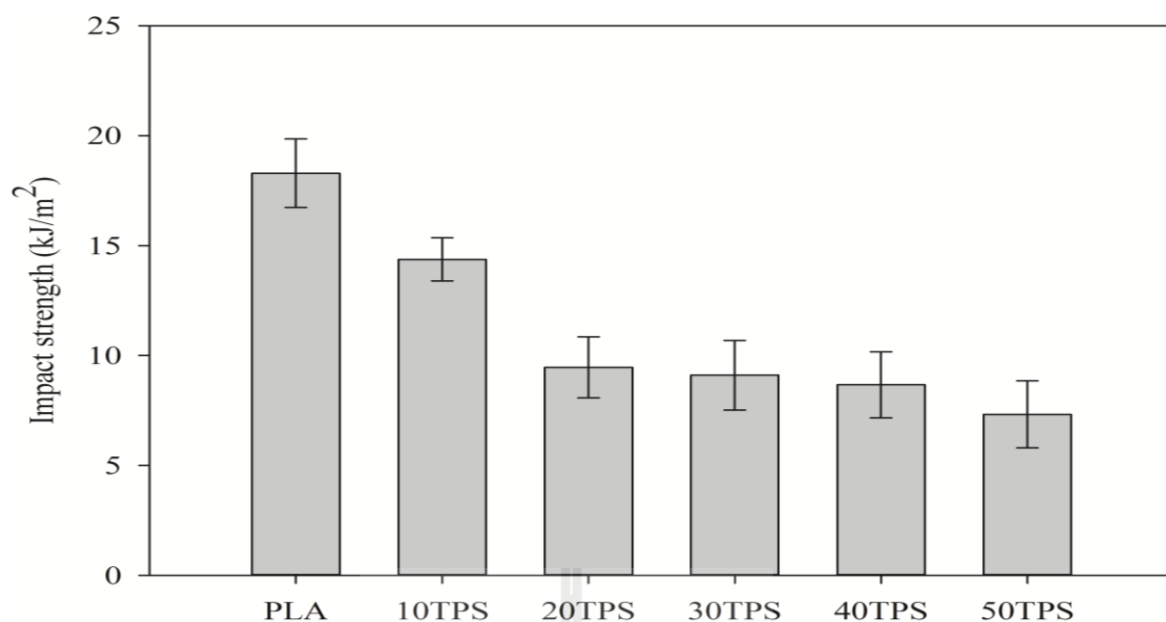
รูปที่ 4.4 ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตา์ซต่างๆ



รูปที่ 4.5 มอดูลัสแรงดึงของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ



รูปที่ 4.6 ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ



รูปที่ 4.7 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์กับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ต่างๆ

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกลของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์กับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตา์ซ์ต่างๆ

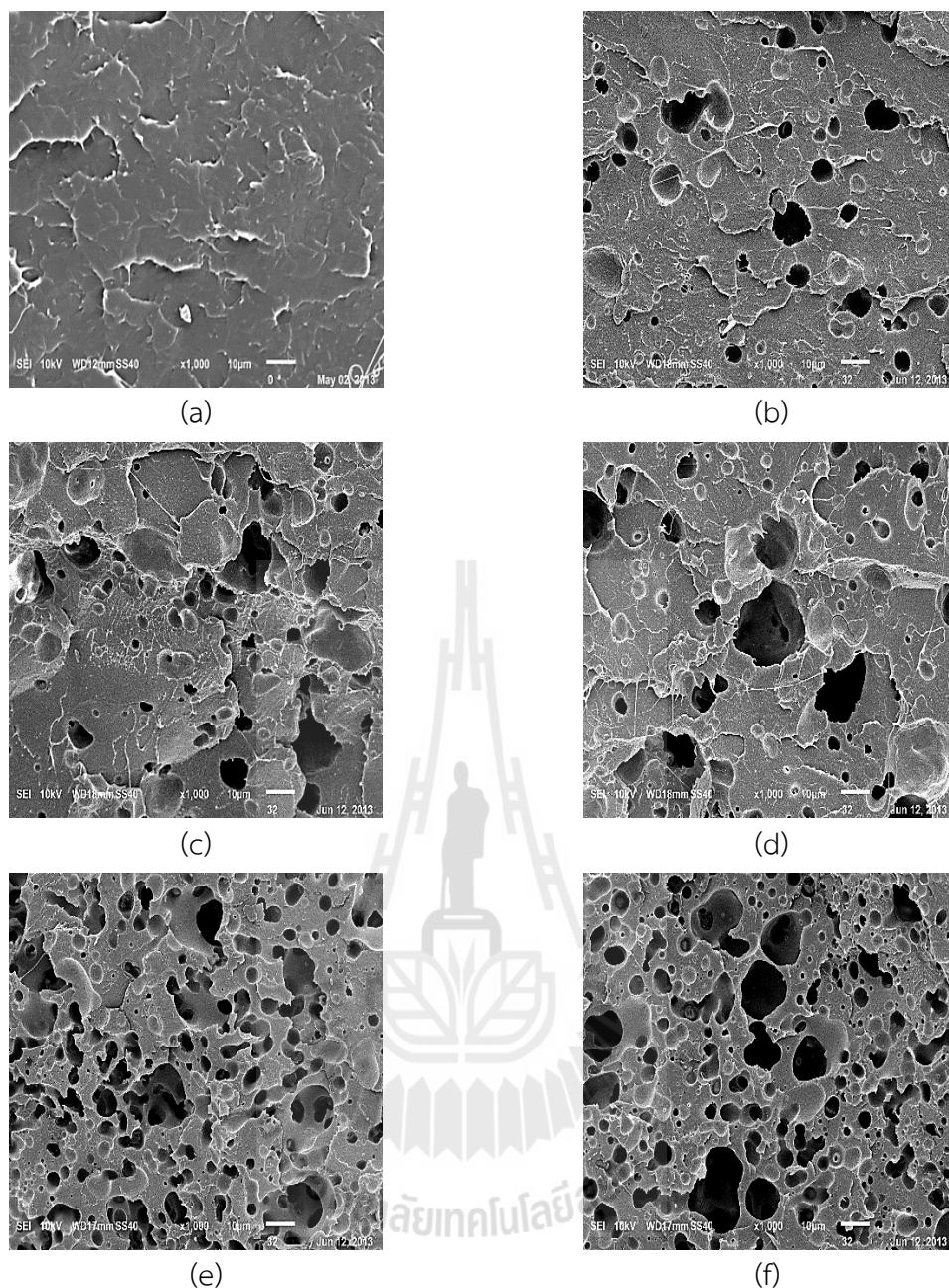
Composition (%wt)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Impact strength (J/m ²)
PLA	59.59±3.95	0.83±0.12	12.25±0.48	18.29±1.56
TPS	9.15±1.43	0.19±0.04	43.95±2.37	ไม่แตกหัก
TPS/PLA (10/90)	44.03±1.72	0.73±0.05	16.59±1.02	14.37±0.98
TPS/PLA (20/80)	36.79±3.51	0.71±0.08	8.80±0.99	9.45±1.39
TPS/PLA (30/70)	34.66±2.67	0.67±0.04	8.40±0.75	9.10±1.58
TPS/PLA (40/60)	28.45±2.61	0.61±0.04	6.54±1.26	8.67±1.50
TPS/PLA (50/50)	25.53±2.03	0.59±0.06	6.44±0.77	7.32±1.52

4.2.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM micrographs) ของพื้นผิวที่แตกหัก (freeze-fractured surface) ของพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.8 พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดถูกสกัดโดยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร เพื่อสกัดเอาเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ในพอลิแลกติกแอซิดเมทริกซ์ออก พบพื้นผิวที่แตกหักแบบเรียบบนพื้นผิวของพอลิแลกติกแอซิดที่แสดงในรูปที่ 4.8 (a) จากรูปที่ 4.8 (b)-(f) พบเฟสของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ในพอลิแลกติกแอซิด แสดงว่าพอลิแลกติกแอซิดและเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ไม่เข้ากัน ความไม่เข้ากันระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิแลกติกแอซิดส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติทางกลที่ไม่ดี เมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการรวมตัวกันของอนุภาคเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ Wootthikanokkhan et al., (2012) รายงานว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ การแยกเฟสระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิแลกติกแอซิดเด่นชัดมากขึ้น ผลของสมบัติทางสัณฐานวิทยาสอดคล้องกับสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม

4.2.3 สมบัติทางความร้อน

กราฟ DSC ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดแสดงในรูปที่ 4.9 ในการศึกษาใช้กราฟการให้ความร้อนครั้งที่สองของตัวอย่างเพื่อลบความจำทางความร้อนก่อนหน้านี้ สมบัติทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงบนกราฟของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ เนื่องจากสัญญาณทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ไม่เด่นชัดเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ (Yu, Petinakis, Dean, Liu, and Yuan, (2011)) นอกจากนี้ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีพฤติกรรมเป็นอสัณฐาน (amorphous) ไม่มีผลึกและจุดหลอม (Yu and Christie, (2001)) อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (cold crystallization temperature, T_{cc}) และอุณหภูมิหลอมสองจุด (double melting temperature, T_{m1} , T_{m2}) ของพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ถูกพบที่ 54.3 99.5 144.9 และ 154.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิหลอมสองจุดของพอลิแลกติกแอซิดบ่งบอกว่าผลึกที่เล็กและไม่สมบูรณ์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์ไปเป็นผลึกที่เสถียรมากกว่าผ่านกลไกการหลอมและเกิดผลึกอีกครั้ง (melt-recrystallization mechanism) (Yasuniwa, Tsubakihara, Sugimoto, and Nakafuku, (2004))

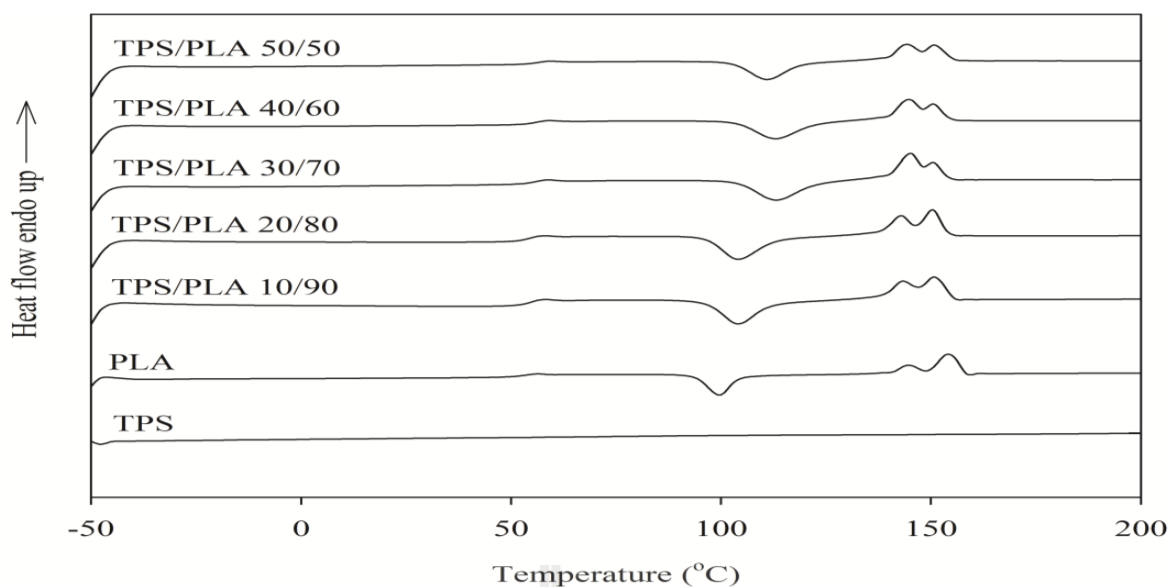


รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวการแตกหักในสถานะที่แช่แข็งที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของ (a) PLA (b) TPS/PLA (10/90) (c) TPS/PLA (20/80) (d) TPS/PLA (30/70) (e) TPS/PLA (20/80) (f) TPS/PLA (50/50)

เมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในพอลิแลกติกแอซิด อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับพอลิแลกติกแอซิดลดลง เนื่องจากมีบางส่วนที่เข้ากันได้ระหว่างองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม (Martin and Averous, (2001); Shi et al., 2010) นอกจากนี้ อุณหภูมิการตกผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์กับพอลิแลกติกแอซิดมีค่าต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ เนื่องจากผลการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไรเซอร์ (Li et al., (2011))

ความร้อนของการตกผลึก (heat of crystallinity, ΔH_c) และความร้อนของการหลอม (heat of fusion, ΔH_m) และปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับพอลิแลกติกแอซิดสูงกว่าพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชทำหน้าที่เป็นตัว เหนี่ยวนำการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด (Park, Im, Kim, and Kim (2000); Li et al., (2013); Ke and Sun, (2003); Xiong et al., (2013)) Shin, Jang, and Kim, (2011) พบว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิแลกติกแอซิดกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรเคมี (chemical modified plasticized starch, CMPS) มีปริมาณผลึกสูง เนื่องจากอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการดัดแปรทางเคมีทำ หน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำในการเกิดผลึกทำให้เพิ่มการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด

อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริ มานเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช Yu, Petinakis, Dean, Liu, and Yuan, (2011) พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดไม่ มีเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชไม่ส่งผลต่อ อุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการตกผลึกลดลงเมื่อ ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้น ความร้อนของการเกิดผลึกและความร้อนของการหลอมของพอลิ แลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพิ่มขึ้น ปริมาณผลึกของพอลิแลกติก แอซิดในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เนื่องจากการเหนี่ยวนำให้เกิด ผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Park and Im, (2000); Li and Huneault, (2011); Oza, Thompson, Hrymak, and Liu, (2012)) เมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ขนาดอนุภาคของเทอร์โมพลาสติก สตาร์ชมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากการรวมตัวกันของอนุภาคเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช อนุภาคขนาดใหญ่ของ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ อนุภาคเล็ก (Shin, Jang, and Kim, (2011)) Park, Im, Kim, and Kim (2000) พบการลดลงของ ประสิทธิภาพการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เนื่องจากขนาดอนุภาคของเทอร์โม พลาสติกสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.9 กราฟ DSC ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด (การให้ความร้อนครั้งที่ 2)

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ

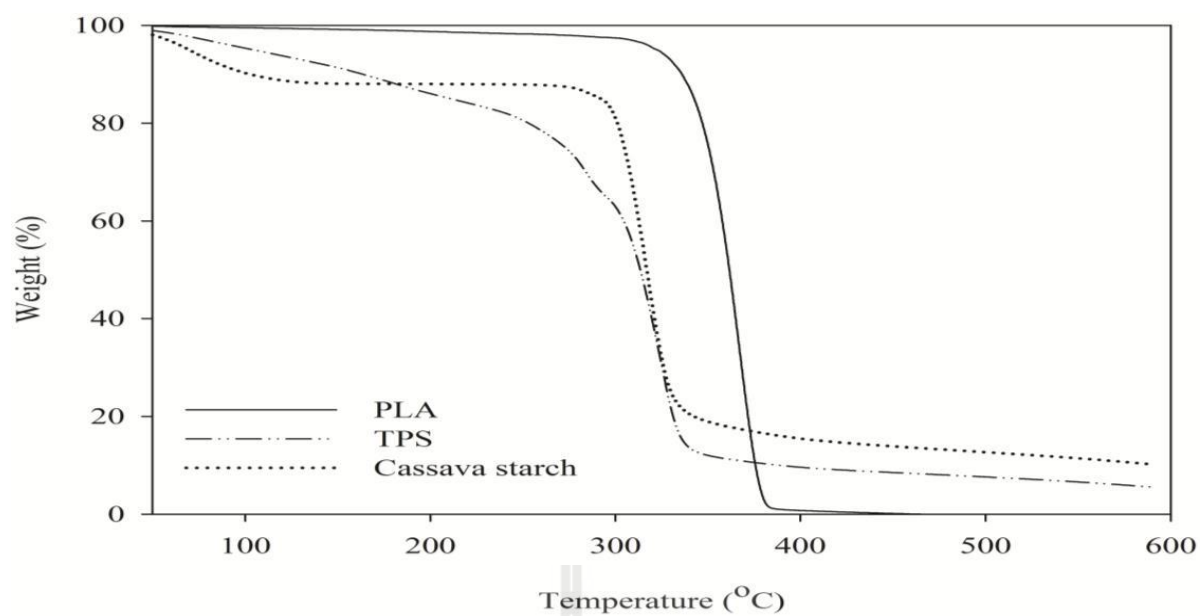
Composition (%wt)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔH_m (J/g)	χ_c (%)
PLA	54.3	99.5	144.9	154.6	35.33	32.91	35.12
TPS/PLA (10/90)	50.7	93.1	139.5	150.4	37.38	40.16	47.62
TPS/PLA (20/80)	50.2	92.3	138.7	148.9	34.52	38.61	51.50
TPS/PLA (30/70)	50.5	91.0	137.7	147.7	31.18	35.17	53.62
TPS/PLA (40/60)	51.0	91.3	137.5	147.5	27.71	30.36	54.00
TPS/PLA (50/50)	50.3	90.8	137.2	146.9	22.48	25.70	54.85

กราฟ thermogravimetric analysis (TGA) และกราฟ differential thermogravimetric analysis (DTG) ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และแป้งมันสำปะหลังแสดงในรูปที่ 4.10 และรูป 4.11 ตามลำดับ พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีการเสื่อมสลายทางความร้อนสองช่วง ช่วงแรกต่ำกว่า 150 องศาเซลเซียส เป็นการระเหยของน้ำ ช่วงที่สองเริ่มที่ 250 องศา

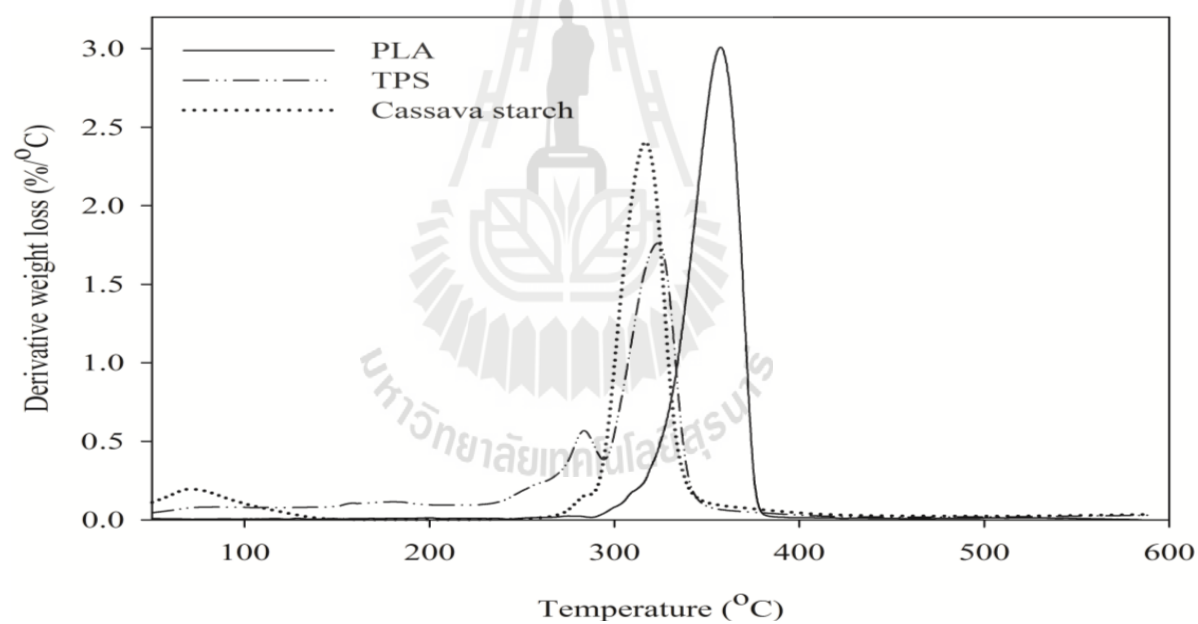
เซลเซียส และสิ้นสุดที่ 350 องศาเซลเซียส บอกถึงการเสื่อมสลายขององค์ประกอบในแป้ง ช่วงเริ่มต้นของการสูญเสียน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากโครงสร้างเส้นตรงของอะไมโลส (amylose) ช่วงสุดท้ายของการสูญเสียน้ำหนักของแป้งเนื่องจากโครงสร้างร่างแห (cross-link structure) ของอะไมโลเพกติน (amylopectin) (Mano, Koniarova, and Reis, (2003)) อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 5% weight loss, T_5) อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ (thermal decomposition temperature at 50% weight loss, T_{50}) และอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อน (thermal decomposition temperature, T_d) ของแป้งมันสำปะหลังคือ 123.77 309.69 และ 313.69 องศาเซลเซียส ตามลำดับ กราฟ TGA ของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แสดงสามช่วงของการสลายตัวทางความร้อน ช่วงแรกต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส บอกถึงการระเหยของความชื้นและกลีเซอรอล ช่วงที่สองพบจาก 250 ถึง 300 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสลายตัวของโครงสร้างเส้นตรงของอะไมโลส (Mano Koniarova, and Reis, (2003); Yunos and Rahman, (2011)) ช่วงที่สามจาก 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส บอกถึงโครงสร้างร่างแหของอะไมโลเพกติน กราฟ TGA ของพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์แสดงหนึ่งช่วงของการเสื่อมสลายทางความร้อนของสายโซ่พอลิแลกติกแอซิดที่ 363.92 องศาเซลเซียส

กราฟ TGA และกราฟ DTG ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดแสดงในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 ตามลำดับ พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดแสดงสองช่วงของการเสื่อมสลายทางความร้อน ช่วงแรกต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส เป็นการระเหยของความชื้นและกลีเซอรอล ช่วงที่สองระหว่าง 250 ถึง 380 องศาเซลเซียส เป็นการซ้อนทับกันของการเสื่อมสลายทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์และพอลิแลกติกแอซิด (Gao, Hu, Su, Zhang, and Tang, (2011)) อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนของแป้งมันสำปะหลัง เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ พอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดแสดงในตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์พบที่ 133.91 311.37 และ 317.79 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์แสดงอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสภาพทางความร้อนสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์มีความเสถียรทางความร้อนที่ดีกว่าแป้งมันสำปะหลัง อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดคือ 321.14 361.94 และ 363.92 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพอลิแลกติกแอซิดมีความเสถียรทางความร้อนมากกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์

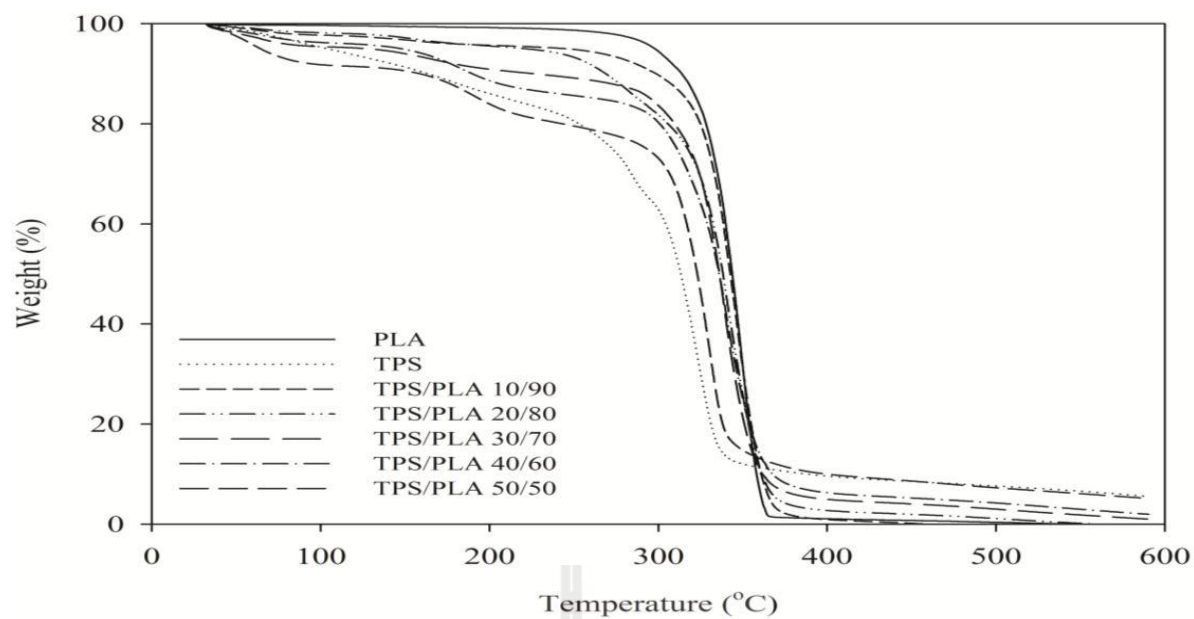
เทอร์โมพลาสติกสตาบิลแสดงอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิดบริสุทธิ์ Wang, Yu, and Ma, (2008), Schwach, Six, and Averous, (2008) พบผลการทดลองที่คล้ายคลึงกัน เป็นที่รู้กันว่าการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิดเกิดขึ้นโดยการตัดสายโซ่แบบสุ่มหรือแบบเฉพาะ เพราะเป็นหน่วยซ้ำของโครงสร้างอะลิฟาติก เอสเทอร์ (aliphatic ester structure) ที่ง่ายต่อการเสื่อมสลาย (McNeill and Leiper, (1985)) ดังนั้น การลดลงของอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดอาจเป็นเพราะผลิตภัณฑ์จากการเกิดการเสื่อมสลายไพโรไลติก (pyrolytic decomposition) ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ประกอบด้วยคาร์บอน มอนอกไซด์ (carbon monoxide) น้ำ สารระเหยของสารประกอบอินทรีย์ (volatile organic compound) และสารประกอบคาร์บอนที่เหลือ (carbonaceous residue) ที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสลายทางความร้อนของสายโซ่พอลิแลกติกแอซิด (Vasques, Domenech, Severgnini, Belmonte, Soldi, Barreto, and Soldi, (2007); Ferrarezi, Taipina, Silva, and Goncalves, (2013); Petinakis Petinakis, Liu, Yu, Way, Sangwan, Dean, Bateman, Edward, (2010)) พบว่าโมเลกุลมีขนาดเล็กๆ เช่น คาร์บอน มอนอกไซด์ (CO) คาร์บอน ไดออกไซด์ (CO₂) น้ำ มีเทน (CH₄) เอทิลีน (C₂H₄) และโมโนแซคคาไรด์ (CH₂O) ถูกผลิตขึ้นเมื่อแบ่งสลายตัวโมเลกุลเหล่านี้สามารถทำลายสายโซ่พอลิแลกติกแอซิดทำให้อุณหภูมิการเสื่อมสลายของพอลิแลกติกแอซิดลดลง การเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาบิลส่งผลให้อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดลดลง เพราะปริมาณผลิตภัณฑ์จากการเกิดการเสื่อมสลายไพโรไลติกของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลเพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์นี้เร่งการเสื่อมสลายของพอลิแลกติกแอซิด (Petinakis et al., (2010))



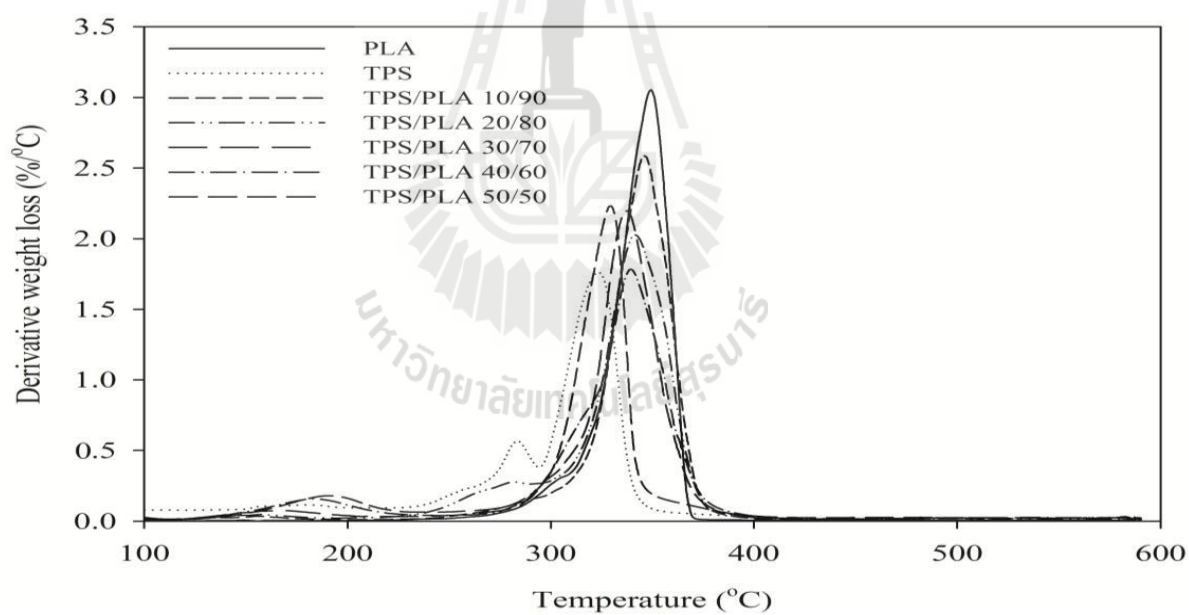
รูปที่ 4.10 กราฟ TGA ของพอลิแล็กติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.11 กราฟ DTG ของ พอลิแล็กติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.12 กราฟ TGA ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ



รูปที่ 4.13 กราฟ DTG ของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ

ตารางที่ 4.13 อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิแลกติกแอซิด เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่างๆ

Composition (%wt)	T ₅ (°C)	T ₅₀ (°C)	T _d (°C)
แป้งมันสำปะหลัง	123.77	309.69	313.69
TPS	133.91	311.37	317.79
PLA	321.14	361.94	363.92
TPS/PLA (10/90)	246.06	340.54	341.46
TPS/PLA (20/80)	221.95	338.29	340.19
TPS/PLA (30/70)	128.16	336.18	337.71
TPS/PLA (40/60)	125.72	332.88	334.06
TPS/PLA (50/50)	120.16	321.25	322.44

จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแสดงค่าสมบัติแรงดึงและสมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกสูงที่สุด ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมนี้ถูกเลือกเพื่อศึกษาผลของปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด

4.3 ผลของปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด

ในการศึกษาผลของปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (poly(lactic acid) grafted maleic anhydride, PLA-g-MA) ต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักถูกใช้ในการศึกษา เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมนี้แสดงสมบัติทางกลที่สูงที่สุด

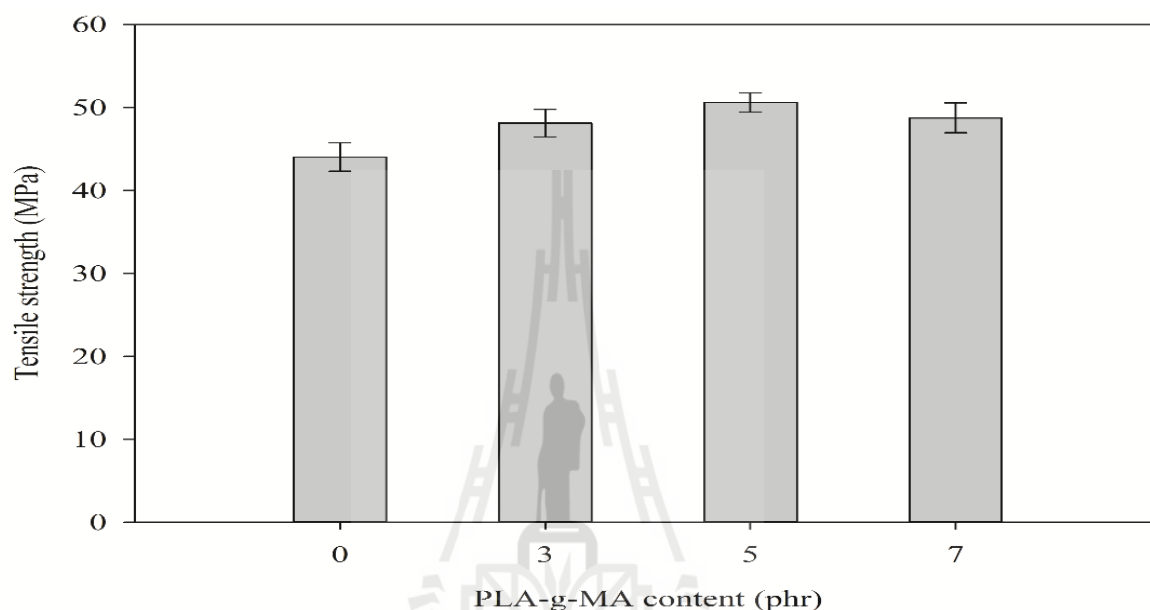
4.3.1 สมบัติทางกล

สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์รายต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.4

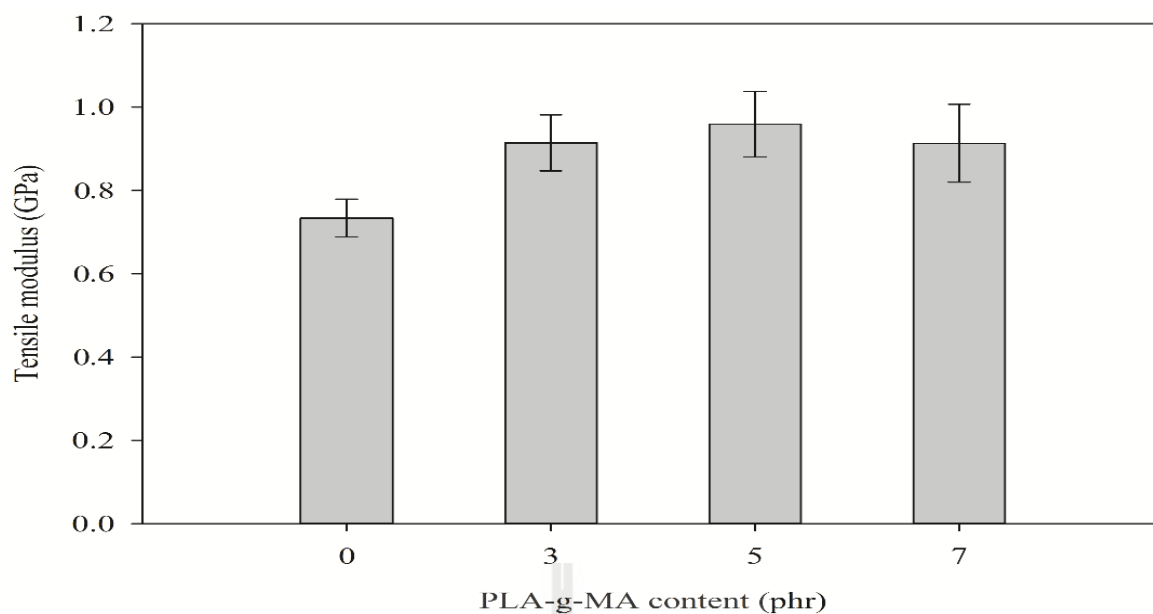
ความต้านทานต่อแรงดึง มอดูลัสแรงดึง และระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิด เนื่องจากการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและพอลิแล็กติกแอซิด ดังแสดงในรูปที่ 4.14 รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ หมู่แอนไฮไดรด์ (anhydride group) ของพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ของแบงก์โคพอลิเมอร์ (graft copolymer) ซึ่งทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวสำหรับพอลิเมอร์ผสม (Huneault and Li, (2007)) ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติแรงดึง Wang and Huang, (2007), Schwach, Six, and Averous, (2008), Wootthikanokkhan et al., (2012) รายงานว่าสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ สมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้นถึง 5 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเติมพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงไป 7 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม สมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง อาจเป็นเพราะโมเลกุลแอนไฮไดรด์ที่มากเกินไปทำให้เกิดการตัดสายโซ่ของโมเลกุลพอลิแล็กติกแอซิดในระหว่างการผลิตผ่านกลไกการไฮโดรไลซิส (hydrolysis mechanism) (Tsuji, (2002); Wootthikanokkhan et al., (2012)) ส่งผลในการลดลงของสมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม Phetwarotai, Potiyaraj, and Aht-Ong (2010) พบว่าสมบัติแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนต (methylenediphenyl diisocyanate, MDI) มากกว่า 1.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพราะเมทิลีนไดฟีนิล ไดไอโซไซยาเนตสามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกสตาบิล เกิดการรวมกลุ่มกันของโมเลกุลเทอร์โมพลาสติกสตาบิลทำให้เกิดจุดบกพร่องและรอยแตกในฟิล์มของพอลิเมอร์ผสม

ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.17 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นถึง 5 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดอาจเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับวัสดุ (Huneault and Li, (2007)) อย่างไรก็ตาม ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเติมพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ลงไป 7 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากการอิมพัลส์ของพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์บนพื้นผิว

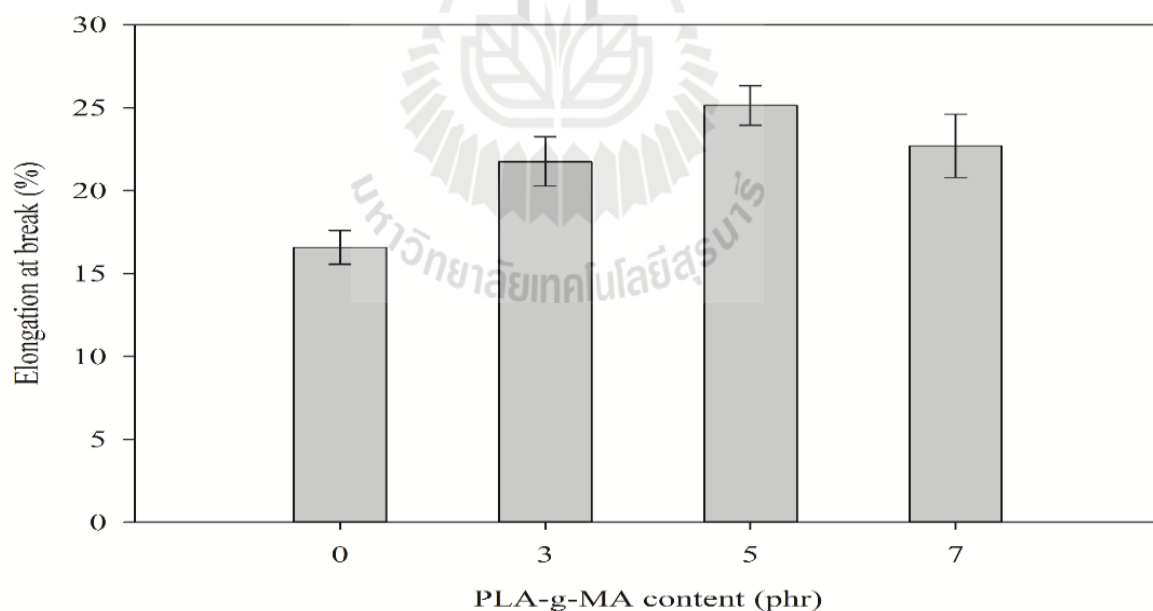
ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซกับพอลิแล็กติกแอซิด (Sailaja, Reddy, and Chanda, (2001)) Ping, Kejian, Mingyin, and Meijuan, (2013) พบว่าความต้านทานต่อแรงกระทำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซกับพอลิแล็กติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพอลิเอททีลีน ไกลคอล (poly(ethylene glycol) (PEG)) ลงไป 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเอททีลีน ไกลคอล เพราะปริมาณพอลิเอททีลีน ไกลคอลที่มากเกินไปทำให้ยากต่อการเกาะกลุ่มและลดความสามารถในการกระจายตัวของพอลิเอททีลีน ไกลคอล



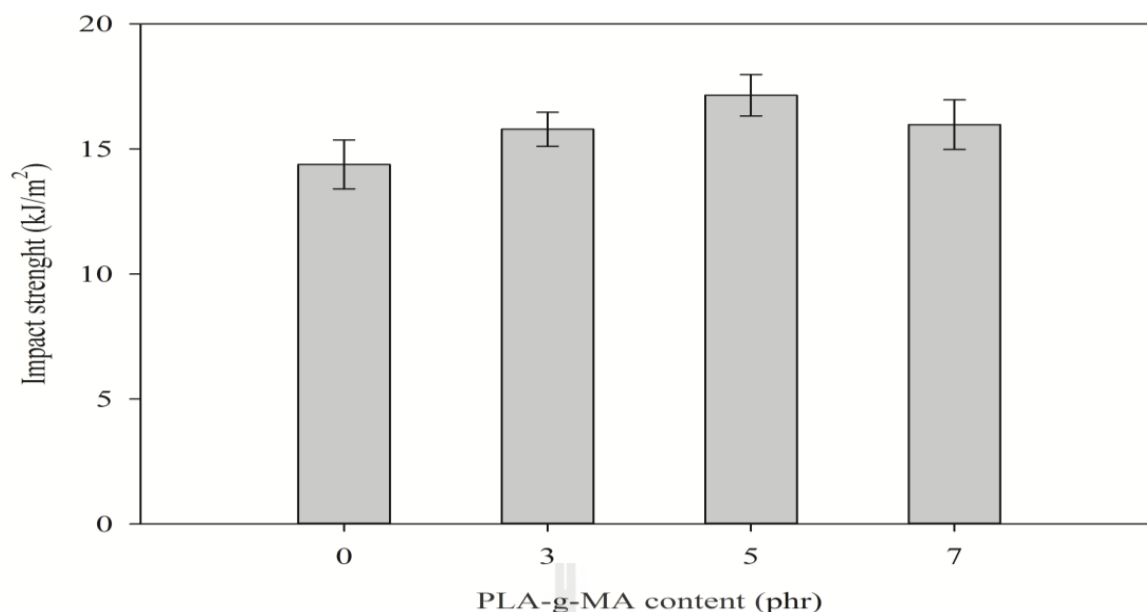
รูปที่ 4.14 ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตา์ซกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ



รูปที่ 4.15 มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรต์ต่างๆ



รูปที่ 4.16 ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรต์ต่างๆ



รูปที่ 4.17 ความต้านทานแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรต์ต่างๆ

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซกับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาอ์ซกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรต์ต่างๆ

Composition (%wt)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Impact strength (J/m ²)
TPS/PLA (10/90)	44.03±1.72	0.73±0.05	16.59±1.02	14.37±0.98
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/3)	48.12±1.66	0.91±0.06	21.75±1.49	15.79±0.68
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5)	50.60±1.13	0.95±0.07	25.14±1.19	17.15±0.83
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/7)	48.75±1.80	0.91±0.09	22.70±1.90	15.97±0.99

4.3.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวแตกหักของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดแสดงในรูปที่ 4.18 เทอร์โมพลาสติกสตาบิลถูกสกัดออกด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตร ในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด พบรูขนาดใหญ่ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลในพอลิแลกติกแอซิดเมทริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.18(a) จากรูปที่ 4.18(b)-(d) ขนาดอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดมีขนาดเล็กกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ ซึ่งบ่งบอกว่าการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและพอลิแลกติกแอซิดนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม Wootthikanokkhan et al., (2012) เสนอว่าสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ลดการรวมตัวกันและแรงตึงผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดเป็นผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายถึง 5 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายอย่างต่อเนื่องถึง 7 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม ไม่พบการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญของขนาดอนุภาคเทอร์โมพลาสติกสตาบิล

4.3.3 สมบัติทางความร้อน

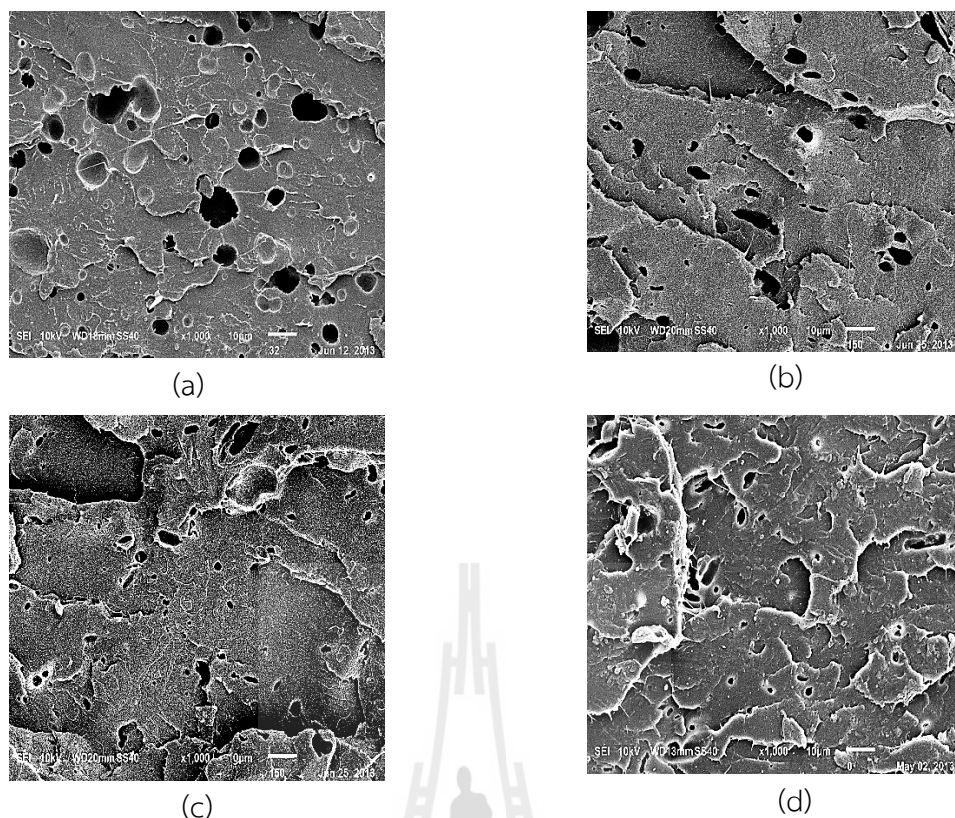
กราฟ DSC ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด แสดงอยู่ในรูปที่ 4.19 และข้อมูล DSC แสดงในตารางที่ 4.5 พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดแสดงค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_{cc}) อุณหภูมิหลอมทั้งสองจุด (T_{m1} , T_{m2}) ที่ 50.7 93.1 139.5 และ 150.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราย 3 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสมมีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด เนื่องจากการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด (Karagoz และ Ozkoc, (2013); Ferrarezi, Taipina, Silva, และ Goncalves, (2013)) อุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดลดลงประมาณ 1 องศาเซลเซียส เมื่อเติมพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายลงไป 3 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและพอลิแลกติกแอซิด (Karagoz และ Ozkoc, (2013)) ผลที่คล้ายกันนี้ถูกพบโดย Ping, Kejian, Mingyin, and Meijuan,

(2013) อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเติมพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรไรลงไป 3 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งอธิบายถึงการเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิแลกติกแอซิด (Ferrarezi, Taipina, Silva, and Goncalves, (2013)) ความร้อนของการเกิดผลึก (ΔH_c) ความร้อนของการหลอม (ΔH_m) และปริมาณผลึก (χ_c) เพิ่มขึ้นเมื่อเติมพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรไร เนื่องจากผลของตัวเหนี่ยวนำการเกิดผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ขนาดอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ที่เล็กสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำการเกิดผลึกที่ดีของพอลิเมอร์ผสม (Shin, Jang, and Kim, (2011))

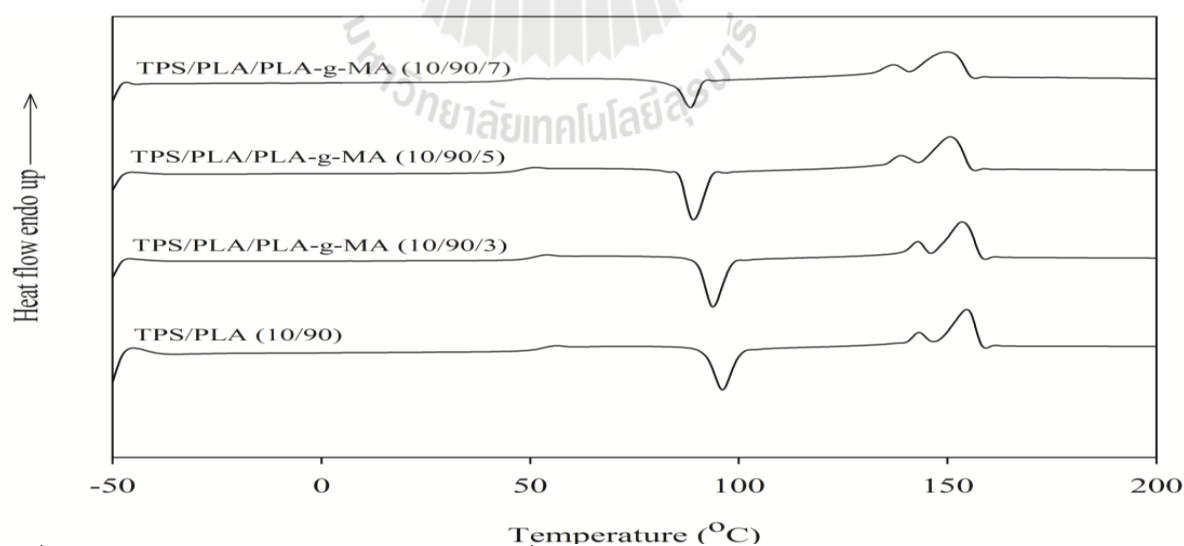
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรไรเพิ่มขึ้นถึง 5 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากการปรับปรุงการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิแลกติกแอซิด ความร้อนของการเกิดผลึก ความร้อนของการหลอม และปริมาณผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรไร เนื่องจากอนุภาคของเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ขนาดเล็กๆ อาจทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำการเกิดผลึกที่มีประสิทธิภาพ (Shin, Jang, และ Kim, (2011)) Li and Huneault, (2008) อธิบายว่าการลดขนาดอนุภาคของเฟสกระจายตัวอยนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัส ดังนั้นเพิ่มการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด

ตารางที่ 4.5 ลักษณะทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรไรต่างๆ

Composition (%wt)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔH_m (J/g)	χ_c (%)
TPS/PLA (10/90)	50.7	93.1	139.5	150.4	37.38	40.16	47.62
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/3)	49.6	91.4	138.0	149.0	40.63	44.26	55.09
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5)	46.3	86.9	135.7	147.1	41.49	46.55	57.71
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/7)	45.0	85.1	136.9	147.7	42.11	47.89	59.25

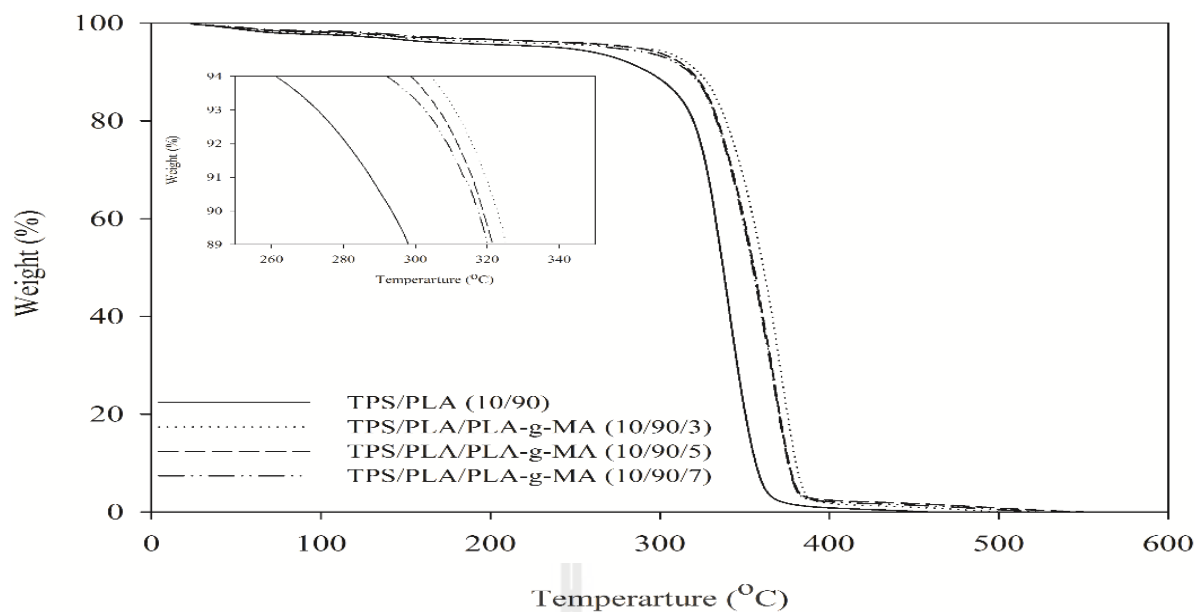


รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่มีการแตกหักในสถานะที่แช่แข็งที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของ (a) TPS/PLA (10/90) (b) TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/3) (c) TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5) (d) TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/7)

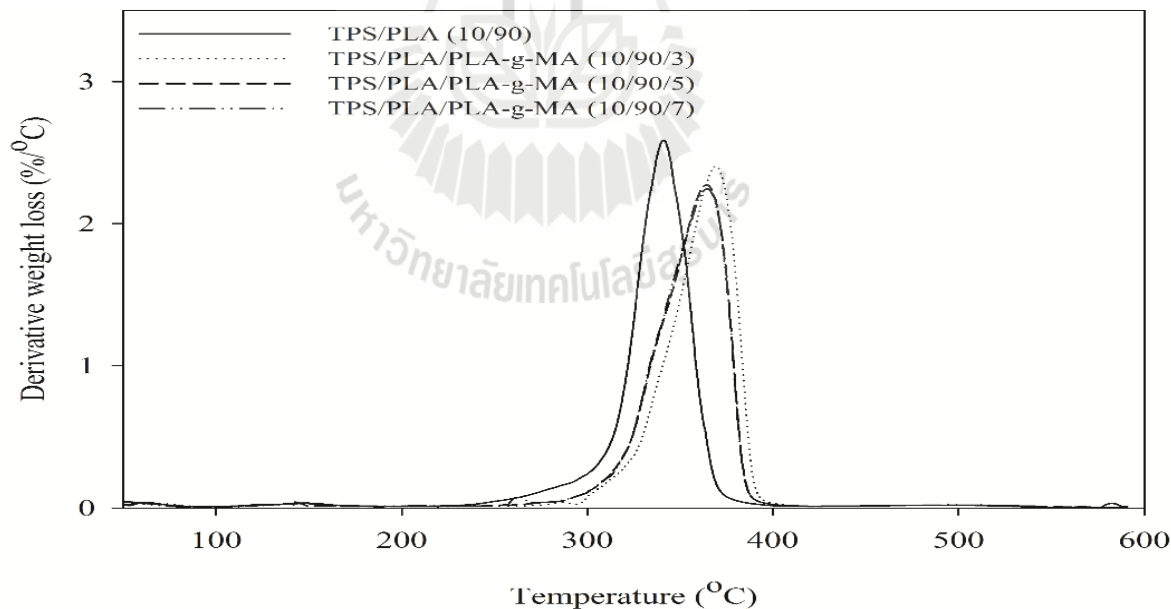


รูปที่ 4.19 กราฟ DSC ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์ต่างๆ (การให้ความร้อนครั้งที่ 2)

กราฟ TGA และกราฟ DTG ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดถูกนำเสนอในรูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 ตามลำดับ พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดแสดงสองช่วงของน้ำหนักที่สูญเสีย ช่วงแรกบอกลถึงการสลายตัวของความชื้นและกลีเซอรอล ช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและพอลิแลกติกแอซิดที่ซ้อนทับกัน ผลที่คล้ายกันนี้ถูกพบโดย Gao, Hu, Su, Zhang, and Tang, (2011) and Victor, Brostow, Chonkaew, and Lopez, (2009) อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดถูกนำเสนอในตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดคือ 246.06 340.54 และ 341.46 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราส 3 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสมถูกเติมลงไปในพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดคือ 284.70 361.13 และ 364.11 องศาเซลเซียส ตามลำดับ บอกได้ว่าความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราส เนื่องจากการปรับปรุงแรงยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิด (Wang, Yu, and Ma, (2008); Shi et al., (2011)) อุณหภูมิการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแลกติกแอซิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราส Victor, Brostow, Chonkaew, and Lopez, (2009) รายงานว่าพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราสมีผลกระทบต่อความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลกติกแอซิดกับแป้งสตาบิล



รูปที่ 4.20 กราฟ TGA พอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลือกแอนไฮดรายต่างๆ



รูปที่ 4.21 กราฟ DTG ของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลือกแอนไฮดรายต่างๆ

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่างๆ

Composition (%wt)	T ₅ (°C)	T ₅₀ (°C)	T _d (°C)
TPS/PLA (10/90)	246.06	340.54	341.46
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/3)	284.70	355.13	364.11
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5)	284.83	356.28	364.15
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/7)	284.88	356.30	364.20

พอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณของพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราย 5 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสมแสดงสมบัติแรงดึงและแรงกระแทกที่สูงที่สุด ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมนี้ถูกเลือกเพื่อศึกษาผลของพอลิบิวทิลีนอะดิเปอเตอเทอราเรตต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปอเตอเทอราเรต

4.4 ผลของปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปอเตอเทอราเรตต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิด

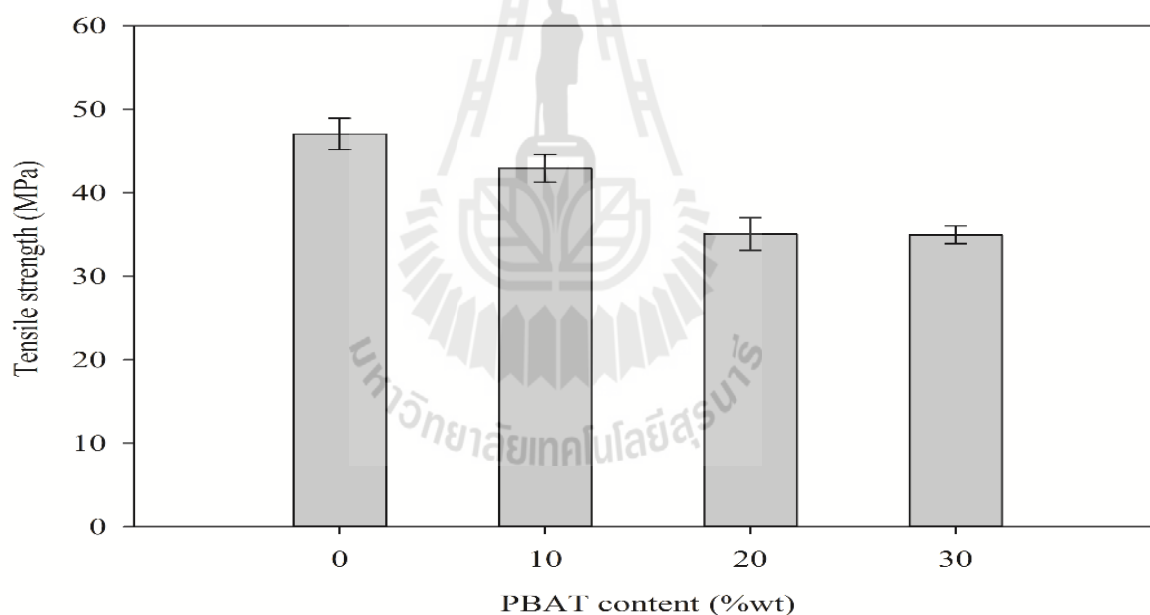
ในการศึกษาผลของปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปอเตอเทอราเรตต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราย (10/90/5) ถูกเลือก เนื่องจากให้สมบัติทางกลดีที่สุด

4.4.1 สมบัติทางกล

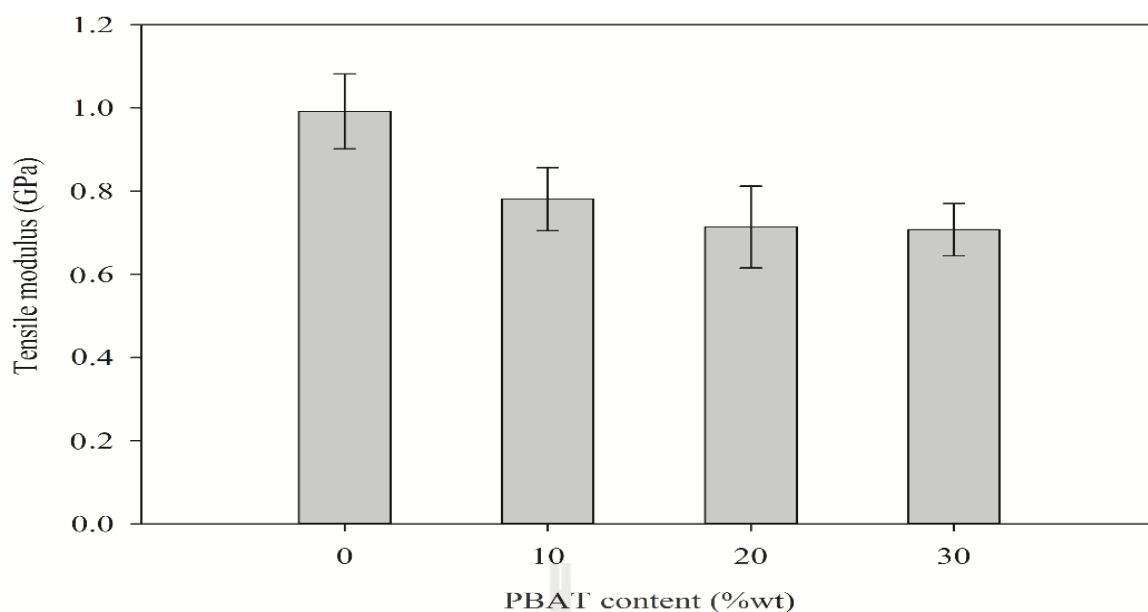
สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเปอเตอเทอราเรต ที่ปริมาณพอลิบิวทิลีนอะดิเปอเตอเทอราเรตต่างๆถูกแสดงในตารางที่ 4.7 ความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับพอลิแล็กติกแอซิดลดลงอย่างต่อเนื่อง

เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 4.22 รูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 ตามลำดับ เนื่องมาจากความยืดหยุ่นของพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต (Ren, Fu, Ren, and Yuan, (2009)) Phetwarotai and Aht-Ong, (2011) พบว่าการเติมพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตช่วยเพิ่มระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเรชกับพอลิแลกติกแอซิด แต่ลดความต้านทานต่อแรงดึง เพราะพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตมีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่าพอลิแลกติกแอซิด เป็นผลให้ปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเรชกับพอลิแลกติกแอซิด

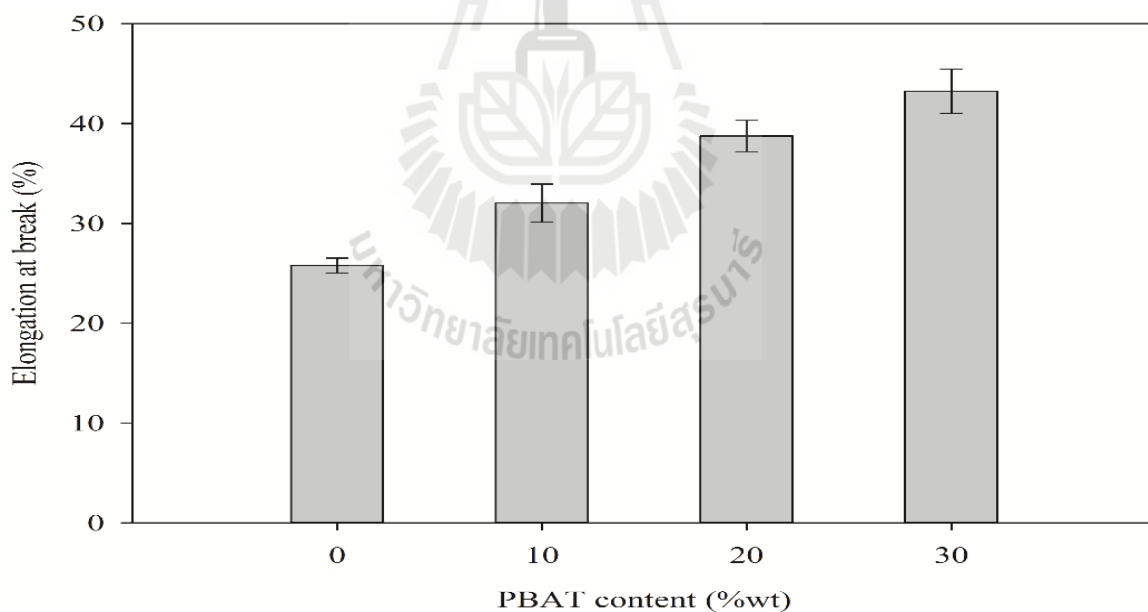
ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเรชกับพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตแสดงในรูปที่ 4.25 อนุภาคพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตอาจทำหน้าที่เป็นจุดศูนย์รวมความเครียด (stress concentration) และตำแหน่งเหล่านี้สามารถเป็นจุดเริ่มของรอยร้าว (craze) และแถบรอยเฉือน (shear band) (Lin, Guo, Chan, Ma, and Wang, (2012); Zhao, Liu, Wu, and Ren, (2010)) ส่งผลให้มีการปรับปรุงความเหนียวของพอลิเมอร์ผสม



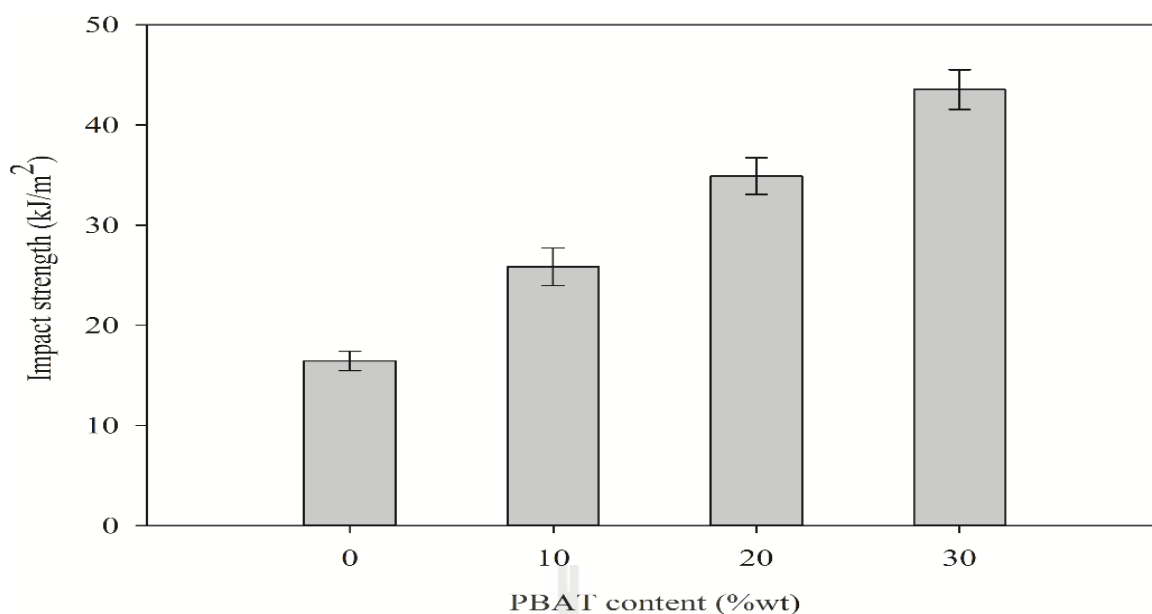
รูปที่ 4.22 ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเรชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาเรช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ



รูปที่ 4.23 มอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเรอเรพทาเรตต่างๆ



รูปที่ 4.24 ระยะยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเรอเรพทาเรตต่างๆ



รูปที่ 4.25 ความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ

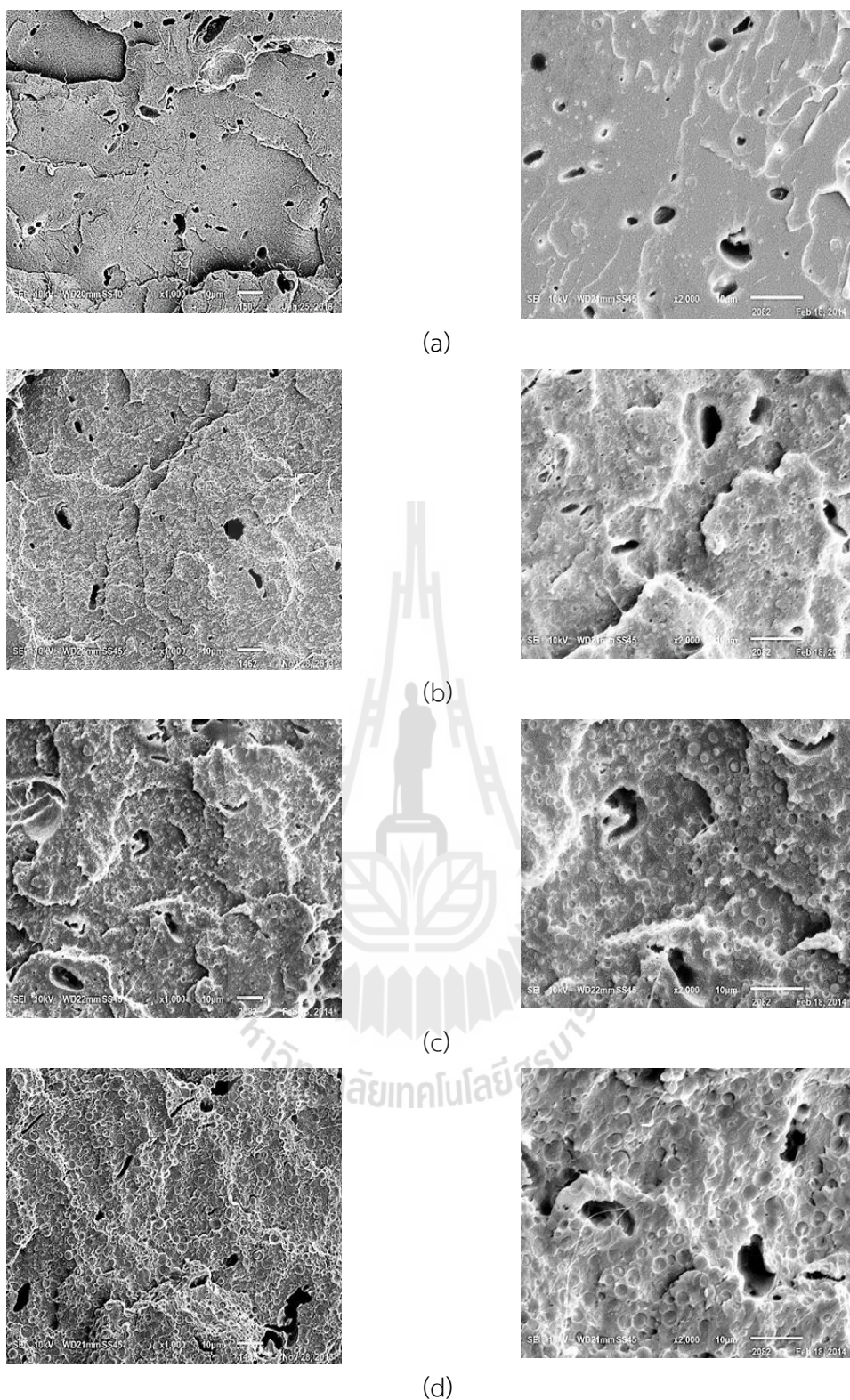
ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ

Composition (%wt)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Impact strength (kJ/m ²)
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5phr*)	50.60±1.13	0.95±0.07	25.14±1.19	17.15±0.83
TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (9/81/5phr/10)	42.94±1.66	0.78±0.04	31.17±2.59	25.85±1.87
TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (8/72/5phr/20)	35.06±1.97	0.71±0.09	39.49±2.31	34.91±1.82
TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (7/63/5phr/30)	34.95±1.07	0.70±0.06	43.24±2.19	43.54±1.98

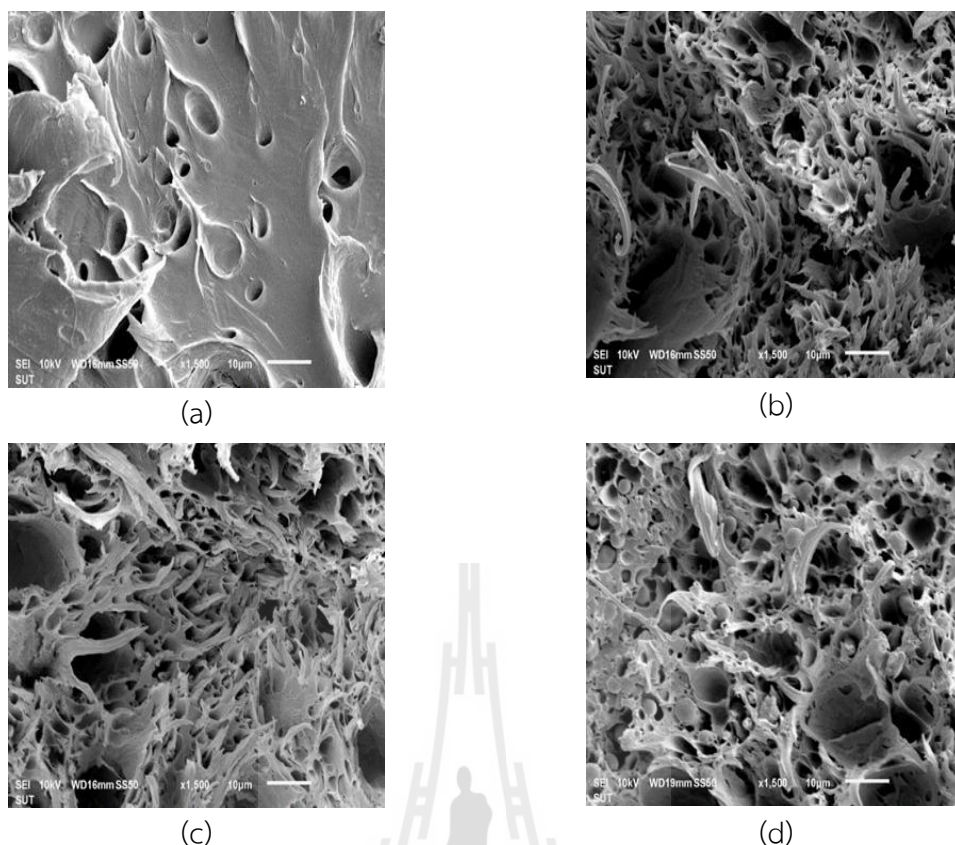
หมายเหตุ * phr = ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม

4.4.2 สมบัติทางสัณฐานวิทยา

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.26 อนุภาคเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกระจายตัวได้ดีในพอลิแลกติกแอซิดเมทริกซ์ที่เติมพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลอีนไฮดรอลิซแสดงอยู่ในรูปที่ 4.26(a) จากรูปที่ 4.26(b) อนุภาคขนาดเล็กของพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตถูกพบในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต บอกได้ว่าพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตมีความไม่เข้ากัน ขนาดอนุภาคของพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตดังแสดงในรูปที่ 4.26(b)-(d) เนื่องจากการรวมตัวกันของอนุภาคพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต (Kim and Michler, (1998); Kumar, Mohanty, Nayak, and Rahail Parvaiz, (2010)) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักในสภาวะแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 4.27 จากรูปที่ 4.27(b)-(d) พบการยืดตัวของเมทริกซ์บางส่วนในระหว่างการทดสอบแรงดึง แสดงว่าเป็นการเสียรูปแบบเหนียว (ductile deformation)



รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักในสถานะที่แช่แข็งที่กำลังขยาย 1000 เท่า (ซ้าย) และ 2000 เท่า (ขวา) ของ (a) TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5phr) (b) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (9/81/5phr/10) (c) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (8/725phr/20) (d) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (7/63/5phr/30)

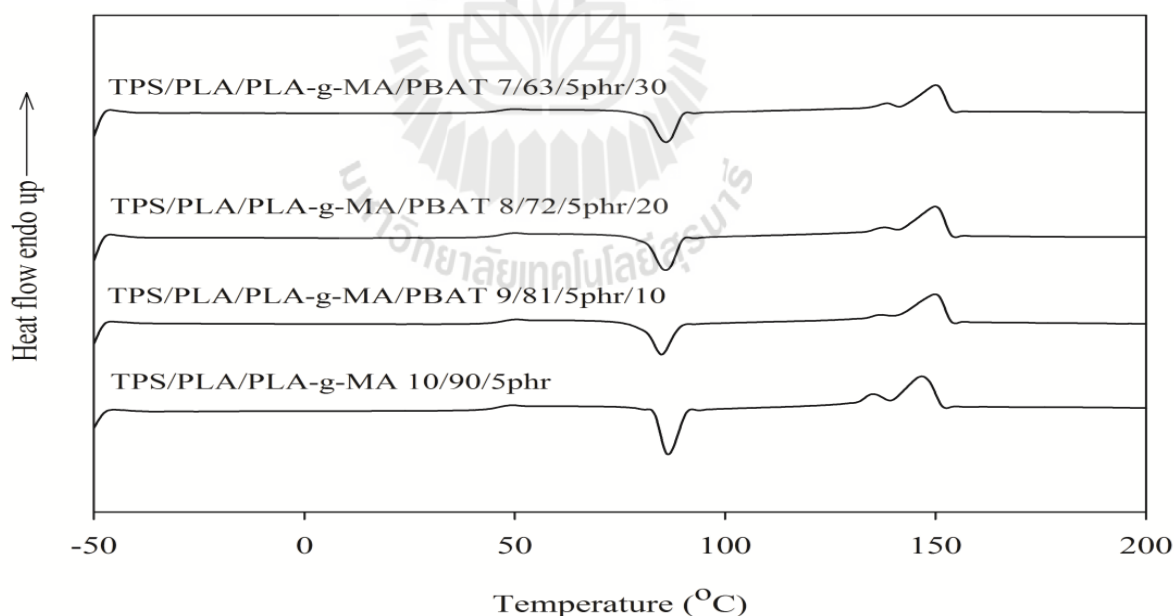


รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวที่แตกหักในสภาวะแรงดึงที่กำลังขยาย 1000 เท่า ของ (a) TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5phr) (b) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (9/81/5phr/10) (c) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (8/72/5phr/20) (d) TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (7/63/5phr/30)

4.4.3 สมบัติทางความร้อน

กราฟ DSC ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตแสดงในรูปที่ 4.28 และข้อมูล DSC แสดงในตารางที่ 4.8 อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดลดลงเมื่อเติมพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งบอกได้ว่าพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตมีความเข้ากันได้บางส่วน (Jiang, Wolcott, and Zhang, (2006)) การเติมพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ลดอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด เนื่องจากพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตปรับปรุงความสามารถในการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิด (Zhao, Liu, Wu, and Ren, (2010)) อุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อ 10

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตถูกเติมเข้าไป ความร้อนของการเกิดผลึกและความร้อนของการหลอมเหลวของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตมีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด อย่างไรก็ตาม ปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดเพิ่มขึ้นเมื่อเติม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต ซึ่งสามารถบอกได้ว่าพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำการเกิดผลึกในพอลิเมอร์ผสม (Dong, Zou, Yan, Ma, and Chen, (2013)) เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิการเกิดผลึก และอุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิดไม่มีการเปลี่ยนแปลง พบการลดลงของความร้อนของการเกิดผลึกและความร้อนของการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิด และพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตเมื่อปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตแสดงผลกระทบอย่างไม่มีนัยสำคัญต่อปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต



รูปที่ 4.28 กราฟ DSC ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลกติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ (การให้ความร้อนครั้งที่ 2)

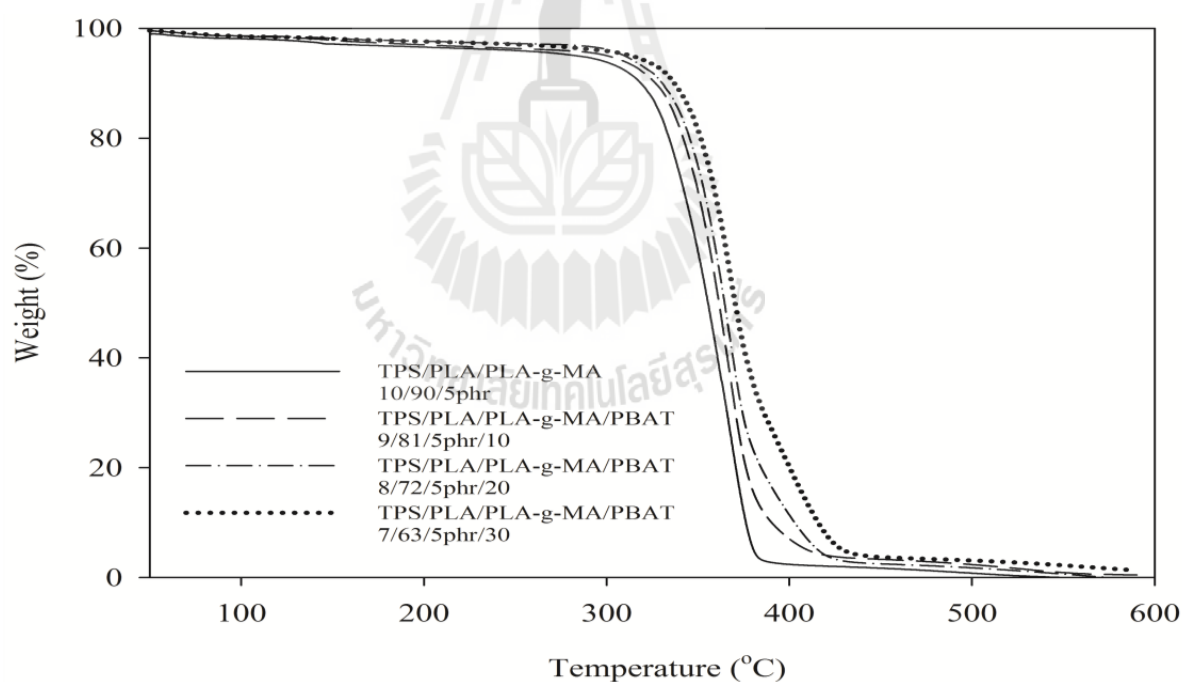
ตารางที่ 4.8 ลักษณะทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ

Composition (%wt)	T_g (°C)	T_{cc} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)	ΔH_c (J/g)	ΔH_m (J/g)	χ_c (%)
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5phr*)	46.3	86.9	135.7	147.1	41.49	46.55	57.71
TPS/PLA/PLA-g-MA/ PBAT (9/81/5phr/10)	45.1	84.1	135.6	147.0	39.51	43.51	59.97
TPS/PLA/PLA-g-MA/ PBAT (8/72/5phr/20)	44.8	84.4	135.9	147.1	36.18	39.28	60.88
TPS/PLA/PLA-g-MA/ PBAT (7/63/5phr/30)	44.2	84.9	135.0	147.2	30.80	34.22	60.57

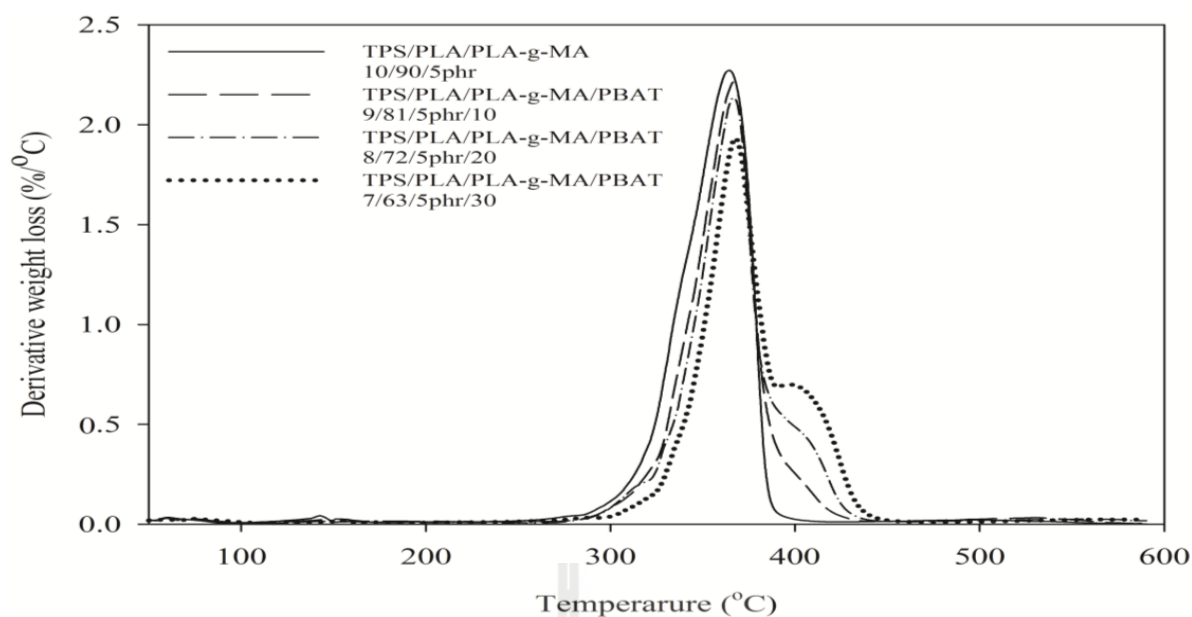
หมายเหตุ *phr = ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์ผสม

กราฟ TGA และกราฟ DTG ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต ที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.29 และรูปที่ 4.30 ตามลำดับ พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตแสดงหนึ่งช่วงของการหายไปของน้ำหนักและอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตคือ 363.92 องศาเซลเซียส และ 410.87 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตแสดงสองช่วงของการหายไปของน้ำหนัก ช่วงแรกอธิบายถึงการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแล็กติกแอซิด ช่วงที่สองระบุถึงการสลายตัวของพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแล็กติกแอซิด (T_{d1}) และของพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรต (T_{d2}) ในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรลกับพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาโรล พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตแสดงในตารางที่ 4.9 อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50

เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดคือ 284.83 356.28 และ 364.15 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนที่น้ำหนักหายไป 50 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด แสดงให้เห็นว่าการเติมพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตปรับปรุงความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ผสม (Phetwarotai and Aht-Ong, (2011); Kumar, Mohanty, Nayak, and Rahail Parvaiz, (2010)) อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตในพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตบริสุทธิ์ ทั้งนี้เพราะพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตมีอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิแล็กติกแอซิด



รูปที่ 4.29 กราฟ TGA ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแล็กติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ



รูปที่ 4.30 กราฟ DTG ของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ

ตารางที่ 4.9 อุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแลคติกแอซิด และพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตที่ปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปรตโคเทอเรพทาเรตต่างๆ

Composition (%wt)	T ₅ (°C)	T ₅₀ (°C)	T _{d1} (°C)	T _{d2} (°C)
TPS/PLA/PLA-g-MA (10/90/5phr*)	284.83	356.28	364.15	-
TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (9/81/5phr/10)	290.83	359.33	367.54	403.83
TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (8/72/5phr/20)	300.10	360.73	366.94	403.31
TPS/PLA/PLA-g-MA/PBAT (7/63/5phr/30)	302.84	361.42	366.93	402.96

หมายเหตุ *phr = ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ผลของปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดถูกศึกษา เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเตรียมจากแป้งมันสำปะหลังและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 70 ต่อ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเติม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัสแรงดึง และความต้านทานต่อแรงกระแทกของพอลิแล็กติกแอซิดลดลง ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากพฤติกรรมความยืดหยุ่นของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สมบัติแรงดึงและแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดถูกทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เนื่องจากการยึดติดที่ไม่ดีระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิแล็กติกแอซิด พอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดที่ปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแสดงสมบัติแรงดึงและแรงกระแทกสูงที่สุด เมื่อเติม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในพอลิแล็กติกแอซิด อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมของพอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมลดลง แสดงให้เห็นว่ามีบางส่วนที่เข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ส่วนประกอบของพอลิเมอร์ผสม ในขณะที่อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมลดลง แต่ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมของพอลิแล็กติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่อุณหภูมิการเกิดผลึกลดลง ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เพราะผลิตภัณฑ์ที่มาจากการเล่นสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีผลต่อการเสื่อมสลายของพอลิแล็กติกแอซิด ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน

ผลของปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับพอลิแล็กติกแอซิดถูกศึกษา การเติมพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายเพิ่มสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิแล็กติกแอซิด สมบัติทางกลที่สูงสุดของพอลิเมอร์ผสมได้มาเมื่อเติมพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดราย 5 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟมาเลอิกแอนไฮดรายถึง 7 ส่วนในร้อยละของพอลิเมอร์ผสม สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ลดลง เพราะโมเลกุลแอนไฮดรายที่มากเกินไปตัดสายโซ่ของโมเลกุลพอลิแล็กติกแอซิด เป็นผลให้สมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมลดลง อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมของพอลิแล็กติกแอซิดลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิแล็กติกแอซิดกราฟ

มาเลิกแอนไฮดราย เนื่องจากปรับปรุงการยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและพอลิแลกติกแอซิด อุณหภูมิการเกิดผลึกลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลิกแอนไฮดราย เนื่องจากการเพิ่มการเคลื่อนที่ของสายโซ่ของพอลิแลกติกแอซิด ปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลิกแอนไฮดรายเพิ่มขึ้น ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ เนื่องจากการปรับปรุงการยึดติดระหว่างเทอร์โมพลาสติกสตาบิลและพอลิแลกติกแอซิด ปริมาณพอลิแลกติกแอซิดกราฟมาเลิกแอนไฮดรายไม่มีผลต่อความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ผสม ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ละเอียดเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้

ผลของปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรตต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่มีการปรับปรุงความเข้ากันได้ถูกศึกษา ความต้านทานต่อแรงดึงและมอดูลัสแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรต ในขณะที่ระยะยืด ณ จุดขาดและความต้านทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของความยืดหยุ่นของพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรต อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมลดลงเมื่อเติมพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรตลงไปที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากความเข้ากันได้บางส่วนระหว่างพอลิแลกติกแอซิดและพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรต การเติมพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรตลดอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม อย่างไรก็ตาม การเติม 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรตไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสม แต่ปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดในพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เพราะพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรตทำหน้าที่เป็นตัวเหนี่ยวนำการเกิดผลึก เมื่อปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรตเพิ่มขึ้น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิหลอม อุณหภูมิการเกิดผลึก และปริมาณผลึกของพอลิแลกติกแอซิดไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความเสถียรต่อความร้อนของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรต ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะการแตกหักแบบเหนียวของพอลิเมอร์ผสมที่ปรับปรุงความเหนียวกับพอลิบิวทีลีนอะดิเปอเตอเทอเรพทาเรต

บรรณานุกรม

- โสภิตา บุญอเนกทรัพย์, สุชาดา ไชยสวัสดิ์, สุวิทย์ เตีย, และจิระพันธุ์ เนื่องจากนิล. (1996), การสกัดแป้งจากหัวมันสำปะหลัง, สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ, โครงการวิจัยสาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย.
- วัฒน์ วัฒนานนท์. (2540), การพัฒนามันสำปะหลัง:บทความ, กรมวิชาการเกษตร
- Ahmad, Z., Anuar, H., and Yusof, Y. (2011). The study of biodegradable thermoplastic sago starch. **Key Eng. Mater.** 471-472: 397-402.
- Cai, J., Liu, M., Wang, L., Yao, K., Li, S., and Xiong, H. (2011). Isothermal crystallization kinetics of thermoplastic starch/poly(lactic acid) composites. **Carbohydr. Polym.** 86: 941-947.
- Da Roz, A. L., Carvalho, A. J. F., Gandini, A., and Curvelo, A. A. S. (2006). The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing. **Carbohydr. Polym.** 63: 417-424.
- Dong, W., Zou, B., Yan, Y., Ma, P., and Chen, M. (2013). Effect of chain-extenders on the properties and hydrolytic degradation behavior of the poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends. **Int. J. Mol. Sci.** 14: 20189-20203.
- Ferrarezi, M. M. F., Taipina, M. D. O., Silva, L. C. E. D., Goncalves, M. D. C. (2013). Poly(ethylene glycol) as a compatibilizer for poly(lactic acid)/thermoplastic starch blends. **J. Polym. Environ.** 21: 151-159.
- Gao, H., Hu, S., Su, F., Zhang, J., Tang, G. (2011). Mechanical, thermal, and biodegradability properties of PLA/modified starch blends. **Polym. Compos.** 32: 2093-2100.
- Garlotta, D. (2001). A literature review of poly(lactic acid). **J. Polym. Environ.** 9: 63-84.
- Huang, M., Yu, J., and Ma, X. (2005). Ethanolamine as a novel plasticizer for thermoplastic starch. **Polym. Degrad. Stab.** 90: 501-507.
- Huneault, A., and Li, H. (2007). Morphology and properties of compatibilized polylactide/thermoplastic starch blends. **Polymer.** 48: 270-280.
- Jiang, L., Wolcott, M. P., and Zhang, J. (2006). Study of biodegradable polylactide/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends. **Biomacromolecules.** 7: 199-207.

- John, J., Tang, J., Yang, Z., Bhattacharya, M. (1997). Synthesis and characterization of anhydride-functional polycaprolactone. **J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.** 35: 1139-1148.
- Karagoz, S. and Ozkoc, G. (2013). Effects of a diisocyanate compatibilizer on the properties of citric acid modified thermoplastic starch/poly(lactic acid) blends. **Polym. Eng. Sci.** 53: 2183-2193.
- Kaseem, M., Hamad, K., and Deri, F. (2012). Thermoplastic starch blends: A review of recent works. **Polym. Sci.** 54: 165-176.
- Ke, T., Sun, X. (2003). Thermal and mechanical properties of poly(lactic acid) and starch blends with various plasticizer. **Trans. Asae.** 44: 945-953.
- Kim, G.-M. and Michler, G. H. (1998). Micromechanical deformation processes in toughened and particle filled semicrystalline polymers. Part 2: Model representation for micromechanical deformation processes. **Polymer.** 39: 5699-5703.
- Kumar, M., Mohanty, S., Nayak, S. K., 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: 8406-8415.
- Leadprathom, J., Suttiruengwong, S., Threepopnatkul, P., and Seadan, M. (2010). Compatibilized polylactic acid/thermoplastic starch by reactive blend. **JOM.** 20: 87-90.
- Li, H., and Huneault, M.A. (2008). Crystallization of PLA/thermoplastic starch blends. **Int. Polym. Proc.** 5: 412-418.
- Li, H., and Huneault, M. A. (2011). Effect of chain extension on the properties of PLA/TPS blends. **J. Appl. Polym. Sci.** 122: 134-141.
- Li, S., Xiong, Z., Fei, P., Cai, J., Xiong, H., Tan, J., and Yu, Y. (2013). Parameter characterizing the kinetics of the nonisothermal crystallization of thermoplastic starch/poly(lactic acid) composites as determined by differential scanning calorimetry. **J. Appl. Polym. Sci.** 129: 3566-3573.
- 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.** 36: 604-608.

- Ma, X. F., Yu, J. G., and Ma, Y. B. (2005). Urea and formamide as a mixed plasticizer for thermoplastic wheat flour. **Carbohydr. Polym.** 60: 111-116.
- Mani, R., Bhattacharya, M., and Tang, J. (1999). Functionalization of polyesters with maleic anhydride by reactive extrusion. **J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.** 37: 1693-1702.
- Mano, J. F., Koniarova, D., and Reis, R. L. (2003). Thermal properties of thermoplastic starch/synthetic polymer blends with potential biomedical applicability. **J. Mater. Sci. - Mater. Med.** 14: 127-135.
- Martin, O., and Averous, L. (2001). Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems. **Polymer.** 42: 6209-6219.
- McNeill, I. C. and Leiper, H. A. (1985). Degradation studies of some polyester and polycarbonates-1. Polylactide: General features of the degradation under programmed heating conditions. **Polym. Degrad. Stab.** 11: 267-285.
- Nashed, G., Rutgers, R. P. G. and Sopade, P. A. (2003). The plasticisation effect of glycerol and water on the gelatinisation of wheat starch. **Starch-Starke.** 55: 131-137.
- Park, J. W., Im, S. S., Kim, S. H., and Kim, Y. H., (2000). Biodegradable polymer blends of poly(l-lactic acid) and gelatinized starch. **Polym. Eng. Sci.** 40: 2539-2550.
- Petinakis, E., Liu, X. X, Yu, L., Way, C., Sangwan, P., Dean, K., Bateman, S., Edward, G., (2010). Biodegradation and thermal decomposition of poly(lactic acid)-based material reinforced by hydrophilic fillers. **Polym. Degrad. Stab.** 95: 1704-1707.
- Phetwarotai, W., Potiyaraj, P. and Aht-Ong, D. (2010). Properties of compatibilized polylactide blend films with gelatinized corn and topical starches. **J. Appl. Polym. Sci.** 116: 2305-2311.
- Phetwarotai, W. and Aht-Ong, D. (2011). Reactive compatibilization of polylactide, thermoplastic starch and poly(butylene adipate-co-terephthalate) biodegradable ternary blend films. **Mater. Sci. Forum.** 695: 178-181.
- Ping, X., Kejian, W., Mingyin, J., Meijuan, Y. (2013). Biodegradation and mechanical property of polylactic acid/thermoplastic starch blends with poly(ethylene glycol). **J. Wuhan Univ. Technol.** 28: 157-162.
- Oza, H., Thompson, M. R., Hrymak, A. N., Liu, Q. (2012). Influence of di-functional versus multi-functional chain extenders on the foamability of a potato starch-based biopolymer. **Starch-Starke.** 64: 944-954.

- Ren, J., Fu, H., Ren, T., and Yuan, W. (2009). Preparation, characterization and properties of binary and ternary blends with thermoplastic starch, poly (lactic acid), and poly(butylene adipate-co-terephthalate). **Carbohydr. Polym.** 77: 576-582.
- Rodriguez-Gonzalez, F. J., Ramsay, B.A, and Favis, B. D. (2004). Rheological and thermal properties of thermoplastic starch with high glycerol content. **Carbohydr. Polym.** 58: 139-147.
- Sailaja, R. R. N., 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: 1352-1359.
- Sarazin, P., Li, G., Orts, W. J., and Favis, B. D. (2008). Binary and ternary blends of polylactide, polycaprolactone and thermoplastic starch. **Polymer.** 49: 599-609.
- Schwach, E., Six, J., and Averous, L. (2008). Biodegradable blends based on starch and poly(lactic acid): Comparison of different strategies and estimate of compatibilization. **J. Polym. Environ.** 16: 286-297.
- Shi, Q., Chen, C., Gao, L., Jiao, L., Xu, H., and Guo, W. (2011). Physical and degradation properties of binary or ternary blends composed of poly (lactic acid), thermoplastic starch and GMA grafted POE. **Polym. Degrad. Stab.** 96: 175-182.
- Shin, B. Y., Jang, S. H., and Kim, B. S. (2011). Thermal, morphological, and mechanical properties of biobased and biodegradable blends of poly(lactic acid) and chemically modified thermoplastic starch. **Polym. Eng. Sci.** 51: 826-834.
- Shin, B. Y., Jo, G. S., Kang, K. T., Lee, T. L., and Kim, B. S. (2007). Morphology and rheology on the blends of PLA/CMPS. **Macromol. Res.** 15: 291-301.
- Sreekumar, P. A., Gopalakrishnan, P., Leblanc, N., and Saiter, J. M. (2010). Effect of glycerol and short sisal fibers on the viscoelastic behavior of wheat flour based thermoplastic. **Composites: Part A.** 41: 991-996.
- Sreekumar, P. A., Leblanc, N., and Saiter, J. M. (2013). Effect of glycerol on the properties of 100% biodegradable thermoplastic based on wheat flour. **J. Polym. Environ.** 21: 388-394.
- Teamsinsungvon, A. (2011). **Physical properties of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends and their composites.** M. Eng. thesis, Suranaree University of Technology. Thailand.

- Teixeira, E. M., Da Roz, A. L., Carvalho, A. J. F., and Curvelo, A. A. S. (2007). The effect of glycerol/sugar/water and sugar/water mixtures on the plasticization of thermoplastic cassava starch. **Carbohydr. Polym.** 69: 619-624.
- Teixeira, E. M., Curvelo, A. A. S., Corrêa, A. C., Marconcini, J. M., Glenn, G. M., Mattoso, L. H. C. (2012). Properties of thermoplastic starch from cassava bagasse and cassava starch and their blends with poly(lactic acid). **Ind. Corp. Prod.** 37: 61-68.
- Tsuji, H. (2002). Autocatalytic hydrolysis of amorphous-made polylactides: effect of L-lactic content, tacticity, and enantiomeric polymer blending. **Polymer.** 43: 1789-1796.
- Vasques, C. T., Domenech, S. C., Severgnini, V. L.S., Belmonte, L. A. O., Soldi, M. S., Barreto, P. L. M, and Soldi, V. (2007). Effect of thermal treatment on the stability and structure of maize starch cast films. **Starch-Starke.** 59: 161-170.
- Victor, H. O., Brostow, W., Chonkaew, W., and Lopez, B. L. (2009). Preparation and characterization of poly(lactic acid)-g-maleic anhydride + starch blends. **Macromol. Symp.** 277: 69-80.
- Wang, H.-Y. and Huang M.-F. (2007). Preparation, characterization and performances of biodegradable thermoplastic starch. **Polym. Adv. Technol.** 18: 910-915.
- Wang, N., Yu, J., and Ma, X. (2008). Preparation and characterization of compatible thermoplastic dry starch/poly(lactic acid). **Polym. Compos.** 29: 551-559.
- Wang, N., Yu, J., Chang, P. R., and Ma, X. (2008). Influence of formamide and water on properties of thermoplastic starch/poly(lactic acid) blends. **Carbohydr. Polym.** 71: 109-118.
- Wootthikanokkhan, J., Wongta, N., Sombatsompop, N., Kositchaiyong, A., Wong-On, J., Isarankura na Ayuthaya, S., Kaabbuathong, N. (2012). Effect of blending conditions on mechanical, thermal, and rheological properties of plasticized poly(lactic acid)/maleated thermoplastic starch blends. **J. Appl. Polym. Sci.** 124: 1012-1019.
- Wootthikanokkhan, J., Kasemwananimit, P., Sombatsompop, N., Kositchaiyong, A., Isarankura na Ayutthaya, S., and Kaabuathong, 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: E389-E396.
- Wu, C. S. (2003). Physical properties and biodegradability of maleated polycaprolactone/starch composites. **Polym. Degrad. Stab.** 80(1): 127-134.

- Xiong, Z., Li, C., Ma, S., Feng, J., Yang, Y., Zhang, R., and Zhu, J. (2013). The properties of poly(lactic acid)/starch blends with a functionalized plant oil: Tung oil anhydride. **Carbohydr. Polym.** 95: 77-84.
- Yasuniwa, M., Tsubakihara, S., Sugimoto, Y., Nakafuku, C. (2004). Thermal analysis of the double-melting behavior of poly(l-lactic acid). **J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.** 42: 25-32.
- Yokesahachart, C. and Yoksan, R. (2011). Effect of amphiphilic molecules on characteristics and tensile properties of thermoplastic starch and its blends with poly(lactic acid). **Carbohydr. Polym.** 83: 22-31.
- Yu, L., and Christie, G., (2001). Measurement of starch thermal transitions using differential scanning calorimetry. **Carbohydr. Polym.** 52: 101-110.
- Yu, L., Petinakis, E., Dean, K., Liu, H., and Yuan, Q. (2011). Enhancing compatibilizer function by controlled distribution in hydrophobic polylactic acid/hydrophilic starch blends. **J. Appl. Polym. Sci.** 119: 2189-2195.
- Zhang, K., Ran, X., Zhuang, Y., Yao, B., and Dong, L. (2009). Blends of poly(lactic acid) with thermoplastic starch acetylated starch. **Chem. Res. Chinese U.** 25: 748-753.
- Zhang, J. S., Yu, J. G., Wu, Y., and Ma, X. F. (2008). Synthesis of aliphatic amidediol and used as a novel mixed plasticizer for thermoplastic starch. **Chin. Chem. Lett.** 19: 395-398.
- Zhao, P., Liu, W., Wu, Q., and Ren, J. (2010). Preparation, mechanical, and thermal properties of biodegradable polyester/poly(lactic acid) blends. **J. Nanomater.** 2010. doi: 10.1155/2010/287082.

ประวัติผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

นางสาว กษมา จารุกำจร ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000 การศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง มหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (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 45 บทความ และ รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ 15 ฉบับ

