

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



248099



การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับสมบัติของพอลิเมอร์ผสม
พอลิแอลคิลแอซิดกับแบงเทอร์โมพลาสติกมาตีเอต

นายณัฐดา วงศ์ดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ
ศูนย์ปฏิบัติงานเชิงนวัตกรรมและวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2554

600253316

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับสมบัติของพอลิเมอร์ผสม
พอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเทอร์โมพลาสติกมาลีน

นายณัฐลา วงศ์ตะ วศ.บ. (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2554



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร. สุวบุญ จิรชาญชัย)

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร. นรินทร์ กาบบัวทอง)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับสมบัติของพอลิเมอร์ผสม พอลิแลคติกแอซิดกับแป้งเทอร์โมพลาสติกมาลิต
หน่วยกิต	15
ผู้เขียน	นายนัตตลา วงศ์ตะ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ ศ. ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
สายวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2554

248099

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการเตรียมและศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งเทอร์โมพลาสติกมาลิต (MTPS) กับ PLA คอมปาวด์ โดยวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของสัดส่วน MTPS อุณหภูมิ เวลาในการผสมและปริมาณหมู่แทนที่ใน MTPS ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม โดย MTPS จะถูกคัดแปลงด้วยการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์และกลีเซอรอลที่ปริมาณ 1.0 – 10.0 ส่วนในร้อยส่วนโดยน้ำหนัก และร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส จากนั้นนำ MTPS ที่ได้ 2 ชนิด ซึ่งมีปริมาณหมู่แทนที่ต่างกัน ไปผสมกับ PLA คอมปาวด์ โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสม MTPS ในช่วงร้อยละ 20 – 40 โดยน้ำหนัก เวลาในการผสม 7, 12 นาที อุณหภูมิในการผสม 170, 190 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติทางกล สัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติการไหล ด้วยการทดสอบการทนแรงดึง SEM, DMTA และ MFI ตามลำดับ จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อปริมาณ หมู่แทนที่ใน MTPS อุณหภูมิและเวลาในการผสมมากขึ้น พอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น โดยสังเกตจากภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอน อย่างไรก็ตาม สัดส่วนผสม MTPS อุณหภูมิและเวลาที่เพิ่มขึ้น กลับส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมแย่งลง ซึ่งผลที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับค่าความหนืดที่มีแนวโน้มต่ำลงของพอลิเมอร์ผสม

คำสำคัญ: พอลิแลคติกแอซิด/ แป้งเทอร์โมพลาสติกมาลิต/ พอลิเมอร์ผสม/ ทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน

Thesis Title	A Study on Structure - Property Relationship of Poly (lactic acid) and Maleated Thermoplastic Starch Blends
Thesis Credits	15
Candidate	Mr. Nattula Wongta
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Dr. Jatuphorn Wootthikanokkhan Prof. Dr. Narongrit Sombatsompop
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Technology
Department	Materials Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2554

248099

Abstract

This research has concerned a study on properties of maleated thermoplastic starch (MTPS) / poly(lactic acid) blends. The aim of this research is to investigate the effects of blending ratio, blending temperature, blending time and type of MTPS (DS value) on properties of the polymer blends. MTPS was prepared by blending the starch (75 %wt) with glycerol (25 %wt) and maleic anhydride (1.0 – 10.0 pph), using an Internal mixer at 130 °C. After that, two different and type of MTPS were blended with PLA compound under various blending ratio (20 – 40 %wt), blending temperature (170, 190 °C), blending time (7, 12 minute). Mechanical, morphological, thermal and rheological properties of blends were determined by tensile test, SEM, DMTA and MFI, respectively. From the results, it was found that as the DS value, the blending temperature and time increased, the blends became more homogeneous. This was supported by SEM images of the various samples. However, tensile properties of the blends also decreased with the blending ratio, temperature and time. The above changes were related to decrease in viscosity of the blends which was confirmed by MFI test results.

Keywords : Poly(lactic acid)/ Maleated thermoplastic starch/ Polymer blends/ Transesterification

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความรู้ คำแนะนำ คำชี้แนะในจุดบกพร่องต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาระหว่างการดำเนินงานวิจัย รวมถึงการได้รับประสบการณ์ใหม่ๆในการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ และ ศ. ดร. ณรงค์ฤทธิ์สมบัติสมภพ รวมถึงคณาจารย์และผู้ร่วมทำงานวิจัยทุกท่านในสายวิชาเทคโนโลยีวัสดุที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ ศ. ดร. สุวบุญ จิรชาญชัย วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ดร.นรินทร์ กาบบัวทอง สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่ได้สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ข้อแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบคุณอภิสิทธิ์ โหมิตชัยยงค์ และคุณพจน์ปรีชา เกษมวนานิมิต นักวิจัยและนักศึกษาปริญญาโทคณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ที่ให้ทุนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยและให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์ในการปฏิบัติงาน ขอขอบคุณกลุ่มวิจัย PENTEC และ P-PROF มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนสถานที่ในการปฏิบัติงาน และขอขอบคุณ เพื่อนๆและพี่ๆทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกายและแรงใจ ในการทำงาน สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในการเรียนและให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูป	ฉ
รายการสัญลักษณ์	๗
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	8
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
2. ทฤษฎี	
2.1 พลาสติกชีวภาพ	10
2.2 พอลิแลคติกแอซิด	11
2.3 แป้ง	14
2.3.1 แป้งเทอร์โมพลาสติก	16
2.3.2 แป้งคัดแปลง	16
2.3.2.1 ประเภทของการคัดแปลงแป้ง	16
2.3.2.1.1 อีเทอร์ฟิเคชัน	17
2.3.2.1.2 เอสเทอร์ฟิเคชัน	19
2.3.2.1.3 ปฏิกริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล	19
2.3.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณหมู่แทนที่ของแป้งคัดแปลง	20
2.4 ปฏิกริยาการแลกเปลี่ยนของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ผสม	21

	หน้า	
2.5	กระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ	23
2.5.1	การย่อยสลายทางชีวภาพ	23
2.5.2	การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน	24
2.5.3	การย่อยสลายด้วยแสง	24
2.5.4	การย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	25
2.6	สารประกอบเปอร์ออกไซด์	25
2.7	สารเสริมสภาพพลาสติก	27
2.7.1	ชนิดของสารเสริมสภาพพลาสติก	28
2.7.1.1	สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดโมโนเมอร์	28
2.7.1.2	สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดโพลีเมอร์	29
2.8	สารเสริมสภาพเข้ากันได้	30
2.8.1	กลไกการเสริมสภาพเข้ากันได้	30
2.9	การวิเคราะห์ราคาของพลาสติกชนิดต่างๆที่ใช้ทำฟิล์มบรรจุภัณฑ์	31
3. การดำเนินงานวิจัย		
3.1	วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	33
3.2	การเตรียม PLA คอมปาวด์	34
3.3	การเตรียม MTPS	36
3.4	การเตรียมพอลิเมอร์ผสม	37
3.5	วิเคราะห์และทดสอบ	39
3.5.1	สมบัติเชิงกล	39
3.5.2	โครงสร้างเคมี	41
3.5.3	ทดสอบหาปริมาณหมู่แทนที่ของ MTPS	42
3.5.4	การไตเตรตพอลิเมอร์ผสม	43
3.5.5	สมบัติทางความร้อน	44
3.5.6	โครงสร้างสัณฐานวิทยา	44
3.5.7	สมบัติการไหล	45

	หน้า
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	
4.1 โครงสร้างสมบัติของ TPS และ MTPS	46
4.1.1 สัณฐานวิทยาของ TPS และ MTPS	46
4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของ MTPS	47
4.1.3 ปริมาณหมู่แทนที่ใน MTPS	49
4.1.4 สมบัติทางความร้อนของ MTPS	50
4.1.5 การตรวจสอบการเกิดเจลในแป็งัดแปลง	51
4.2 โครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์ผสม	53
4.2.1 ผลของสัดส่วนผสม	53
4.2.2 ผลของอุณหภูมิในการผสม	58
4.2.3 ผลของเวลาในการผสม	62
4.2.4 ผลของชนิดหรือปริมาณหมู่แทนที่ใน MTPS	64
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	66
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	
ก. การทำ Curve Fitting และการคำนวณความสัมพันธ์ในเชิงสัดส่วนพื้นที่ใต้พีค ของสเปกตรัม FTIR ของ TPS และ MTPS	74
ข. DMTA, DSC เทอร์โมแกรมและภาพถ่ายการละลายของ TPS และ MTPS	79
ค. กราฟความเค้นแรงดึงกับความเครียดยืดดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS	82
ง. การวิเคราะห์ราคาของ MTPS และราคาพอลิเมอร์ผสม	85
ประวัตินักวิจัย	89

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	15
2.2 สมบัติของทางกายภาพ ทางเคมีของสารประกอบเปอร์ออกไซด์	26
2.3 ราคาของพลาสติกชนิดต่างๆที่ใช้ทำฟิล์มบรรจุภัณฑ์	32
3.1 รายการวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	33
3.2 รายการอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	33
3.3 สภาวะในการผสมระหว่าง PLA คอมปาวด์ กับ MTPS เพื่อศึกษาผลของปริมาณแป้ง	39
3.4 สภาวะในการผสมระหว่าง PLA คอมปาวด์ กับ MTPS เพื่อศึกษาผลของเวลา อุณหภูมิในการผสมและชนิดของแป้ง	39
4.1 ปริมาณหมู่แทนที่ในวัสดุทดสอบชนิดต่างๆ	49
4.2 สมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 ที่อุณหภูมิการผสม 190 องศาเซลเซียส เวลาผสม 12 นาที (สัดส่วนผสมต่างๆ)	54
4.3 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 อุณหภูมิในการผสม 190 องศาเซลเซียส เวลาในการผสม 12 นาที ที่สัดส่วนผสมแตกต่างกัน	54
4.4 ปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตเพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 เวลาในการผสม 12 นาที อุณหภูมิในการผสม 190 องศาเซลเซียส (ที่สัดส่วนผสมต่างๆ)	58
4.5 สมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) เวลาในการผสม 12 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ	59
4.6 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) เวลาผสม 12 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ	59
4.7 ปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตเพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วน 70/30) เวลาผสม 12 นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ	61
4.8 สมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) อุณหภูมิในการผสม 170 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการผสมต่างๆ	62
4.9 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) อุณหภูมิในการผสม 170 องศาเซลเซียส ที่เวลาผสมต่างๆ	62

ตาราง (ต่อ)

หน้า

- 4.10 ปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตเพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิ-
เคชันของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วน 70/30) อุณหภูมิผสม 170 องศา
เซลเซียส ที่เวลาต่างๆ 63
- 4.11 สมบัติด้านการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/TPS, PLA/MTPS-1.0
และ PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) อุณหภูมิผสม 170 องศาเซลเซียส
เวลาผสม 7 นาที 64
- 4.12 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA คอมปาวด์กับ TPS ชนิดต่างๆ
(สัดส่วนผสม 70/30) 65
- 4.13 ปริมาณกรดที่ใช้ในการไตเตรตเพื่อหาปริมาณการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิ-
เคชันของพอลิเมอร์ผสมชนิดต่างๆ (สัดส่วน 70/30) อุณหภูมิผสม 170 องศา
เซลเซียส ที่เวลา 7 นาที 65

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
1.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยามาลีเอชันของ TPS	2
1.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของ PLA กับ MTPS	2
1.3 กลไกการปรับปรุงการเข้ากันได้ระหว่างแป้งกับ PLA โดยใช้มาเลอิกแอนไฮไดรด์	3
1.4 ผลของปริมาณ TPS และผลของการใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่มีต่อค่าการยึดตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับ PLA	4
1.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งกับ PLA ₇₀ PCL ₃₀ และแป้งกับ PLA ₇₀ PCL ₃₀ -g-PAA/ Starch	5
1.6 ลักษณะของเม็ดแป้ง ก) แป้งปกติ ข) แป้งดัดแปลง (Starch phthalate)	7
1.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์	7
2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน	10
2.2 โครงสร้างทางเคมีของ ก) TPS ข) PLA	11
2.3 กระบวนการสังเคราะห์ PLA	12
2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PLA ในรูปแบบต่างๆ	13
2.5 โครงสร้างอะไมโลส	14
2.6 โครงสร้างอะไมโลเพคติน	15
2.7 หน่วยซ้ำแอนไฮโดรกลูโคสในโมเลกุลแป้งที่มีการแทนที่บริเวณหมู่ไฮดรอกซี 3 ตำแหน่ง	20
2.8 หน่วยซ้ำแอนไฮโดรกลูโคสในโมเลกุลแป้งที่มีการแทนที่บริเวณหมู่ไฮดรอกซี 1 ตำแหน่ง	21
2.9 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีเมื่อเกิดปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนสายโซ่พอลิเมอร์	22
2.10 สูตรโครงสร้างของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ ก) 2,5-dimethyl-2,5-di-(tert-butylperoxy)hexane ข) 1,1-(tert-butylperoxy)-3,3,5-trimethylcyclohexanehexane	26
2.11 โครงสร้างของพอลิเมอร์ทั้งในกรณีที่ใส่และไม่ใส่สารเสริมสภาพพลาสติก	28
2.12 โครงสร้างของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ก) พอลิเมอร์ร่วมแบบกลุ่ม ข) พอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟ	30
3.1 เตรียม PLA คอมปาวด์	35
3.2 ช่วงอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ตั้งแต่บริเวณ feed zone ถึง die zone ในการผสม PLA คอมปาวด์	36

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป (ต่อ)	หน้า
3.3 การเตรียม MTPS	37
3.4 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PLA คอมปาวด์กับ MTPS	38
3.5 เครื่องอัดขึ้นรูปรีออน	40
3.6 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscop	42
3.7 เครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer	44
3.8 เครื่อง Scanning Electron Microscope	45
3.9 เครื่องวัดค่าดัชนีการไหล	45
4.1 สันฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ก) แป้งปกติ ข) TPS	46
4.2 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ของ TPS ที่ตัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณต่างๆ ก) 0 pph ข) 1.0 pph ค) 2.5 pph ง) 5.0 pph จ) 10.0 pph	47
4.3 สเปกตรัม ATR-FTIR ของ MA, TPS และ MTPS ที่ตัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 2.5 pph (MTPS-2.5) และ 10.0 pph (MTPS-10.0)	48
4.4 สเปกตรัม FTIR (Transmission mode) ของ MA, TPS และ MTPS ที่ตัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 2.5 pph (MTPS-2.5) และ 10.0 pph (MTPS-10.0) โดยแป้งดังกล่าวถูกเก็บไว้นาน 8 เดือน	49
4.5 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T _g) ของ TPS และ MTPS ที่ผ่านการตัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 1.0 pph (MTPS-1.0) และ 2.5 pph (MTPS-2.5) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DMTA	50
4.6 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T _g) ของ MTPS ที่ตัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณ 2.5 pph (MTPS-2.5) และ 10.0 pph (MTPS-10.0) ที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค DSC	51
4.7 ภาพถ่ายสารละลาย MTPS-1.0 ในตัวทำละลาย DMSO เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง ก) ก่อนละลาย ข) หลังละลาย	52
4.8 โครงสร้างของ ก) MTPS-2.5 ข) MTPS-10.0	53
4.9 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เวลา 12 นาที ที่ปริมาณ MTPS-2.5 ต่างๆ ก) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ข) ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ค) ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก	55

รูป (ต่อ)	หน้า
4.10 DMTA เทอร์โมแกรมของ PLA คอมปาวด์และพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 อุณหภูมิในการผสม 190 องศาเซลเซียส โดยปรับเปลี่ยนสัดส่วนผสมของ แป้งคัดแปลงที่ร้อยละ 0, 20, 30, 40 โดยน้ำหนัก	56
4.11 โครงสร้างผลิตภัณฑ์จากการผสมและทำปฏิกิริยาระหว่าง PLA กับ MTPS ก) กรณีที่เกิดปฏิกิริยาการกราฟน้อย ข) กรณีที่เกิดปฏิกิริยาการกราฟมากขึ้น	57
4.12 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) เวลาผสม 12 นาที อุณหภูมิผสมต่างๆ ก) 170 องศาเซลเซียส ข) 190 องศาเซลเซียส	60
4.13 DMTA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) โดย ใช้อุณหภูมิในการผสม 170 และ 190 องศาเซลเซียส	61
4.14 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) อุณหภูมิผสม 170 องศาเซลเซียส โดยศึกษาผลของเวลา ในการผสมที่ ก) 7 นาที ข) 12 นาที	63
4.15 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม ก) PLA/TPS, ข) PLA/MTPS-1.0 และ ค) PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนผสม 70/30) อุณหภูมิผสม 170 องศาเซลเซียส เวลาในการผสม 7 นาที	65
ก.1 สเปกตรัม FTIR ของ TPS บริเวณตำแหน่ง O-H Stretch และ Alkyl C-H Stretch	76
ก.2 สเปกตรัม FTIR ของ MTPS-2.5 บริเวณตำแหน่ง O-H Stretch และ Alkyl C-H Stretch	77
ก.3 สเปกตรัม FTIR ของ MTPS-10.0 บริเวณตำแหน่ง O-H Stretch และ Alkyl C-H Stretch	78
ข.1 DMTA เทอร์โมแกรมของ TPS และ MTPS ที่ผ่านการคัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ปริมาณ 1.0 pph (MTPS-1.0) และ 2.5 pph (MTPS-2.5)	80
ข.2 DSC เทอร์โมแกรมของ TPS และ MTPS ที่คัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ปริมาณ 2.5 pph (MTPS-2.5) และ 10.0 pph (MTPS-10.0)	80
ข.3 ภาพถ่ายสารละลาย TPS และ MTPS ชนิดต่างๆ ในตัวทำละลาย DMSO เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง	81
ค.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงกับความเครียดคืบคืดของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส เวลา 12 นาที สัดส่วนการผสม MTPS ร้อยละ 20 - 40 โดยน้ำหนัก	83

รูป (ต่อ)	หน้า
ค.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงกับความเครียดคืบดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนการผสม 70/30) ที่เวลา 12 นาที โดยศึกษาผลของอุณหภูมิในการผสมที่ 170 และ 190 องศาเซลเซียส	83
ค.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงดึงกับความเครียดคืบดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5 (สัดส่วนการผสม 70/30) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส โดยศึกษาผลของเวลาในการผสมที่ 7 และ 12 นาที	84
ค.4 ความเค้นแรงดึงกับความเครียดคืบดึงของพอลิเมอร์ผสม PLA/MTPS-2.5, PLA/MTPS-1.0 และ PLA/TPS (สัดส่วน 70/30)	84

รายการสัญลักษณ์

CMPS	=	แป้งที่ผ่านการดัดแปลงทางเคมี
DS	=	ปริมาณหมู่แทนที่
EVOH	=	เอธิลีนไวนิลแอลกอฮอล์
LDPE	=	พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
MAH	=	มาเลอิกแอนไฮไดรด์
MTPS	=	แป้งเทอร์โมพลาสติกมาลิต
MTPS-1.0	=	แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ถูกดัดแปลงด้วยการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 1.0 pph
MTPS-2.5	=	แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ถูกดัดแปลงด้วยการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 2.5 pph
MTPS-5.0	=	แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ถูกดัดแปลงด้วยการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 5.0 pph
MTPS-10.0	=	แป้งเทอร์โมพลาสติกที่ถูกดัดแปลงด้วยการเติมมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 10.0 pph
PA	=	พอลิเอไมด์
PAA	=	พอลิอะคริลิกแอซิด
PBAT	=	พอลิบิวทีลีนอะดิเปตเทเรฟทาเลต
PCL	=	พอลิคาโปแลคโตน
PE	=	พอลิเอทิลีน
PLA	=	พอลิแลคติกแอซิด
PLA/MTPS-1.0	=	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดคอมพาวด์กับแป้งเทอร์โมพลาสติกมาลิตที่ถูกดัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 1.0 pph
PLA/MTPS-2.5	=	พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดคอมพาวด์กับแป้งเทอร์โมพลาสติกมาลิตที่ถูกดัดแปลงด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 2.5 pph
PVC	=	พอลิไวนิลคลอไรด์
Tg	=	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
Tm	=	อุณหภูมิหลอมผลึก
TPAS	=	แป้งเทอร์โมพลาสติกอะเซทิลเลต
TPS	=	แป้งเทอร์โมพลาสติก