

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติ
ของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกับแป้งเทอร์โมพลาสติก

นางสาวเพียงฤทัย บุญประสิทธิ์ วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ

คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

(ผศ. ดร. เดิมศักดิ์ ศรีศิริรินทร์)

.....

(รศ. ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์)

.....

(ดร. นนทรี นิมิตศิริวัฒน์)

.....

(ดร. นันทน์ ถาวรังกูร)

.....

(ดร. นรินทร์ กาบบัวทอง)

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

กรรมการ

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิไควทีลีนซัคซิเนตกับแป้งเทอร์โมพลาสติก
หน่วยกิต	15
ผู้เขียน	นางสาวเพียงฤทัย บุญประสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ ดร.นนทรี นิมิตศิริวัฒน์
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
สายวิชา	เทคโนโลยีวัสดุ
คณะ	พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ
พ.ศ.	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการเตรียมวัสดุเชิงประกอบนาโนจากพอลิไควทีลีนซัคซิเนต (PBS) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (TPS) โดยใช้สารนาโนเคลย์ชนิด Cloisite30B และ CloisiteNa โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสัดส่วนผสม ชนิดของสารนาโนเคลย์และวิธีการผสมที่มีต่อโครงสร้าง สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและสมบัติด้านการขวางกั้นแก๊สและไอน้ำของวัสดุเชิงประกอบ โดย TPS จะถูกเตรียมด้วยการเติมกลีเซอรอลปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนักผสมกับแป้งปกติอบแห้งในเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส จากนั้นเตรียมพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS โดยทำการผสม TPS เข้ากับ PBS ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส โดยสัดส่วนผสม TPS ที่ศึกษาเท่ากับ 25 50 และ 75 โดยน้ำหนัก และผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ชนิด PBS-g-MA ในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และใช้สารนาโนเคลย์ชนิด Cloisite30B และ CloisiteNa เท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ถูกนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเทคนิคการอัดขึ้นรูป จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิค XRD ทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DMTA และ TGA และทดสอบสมบัติการขวางกั้นแก๊สและไอน้ำด้วยการทดสอบ WVTR และ OTR จากผลการทดสอบพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนของ TPS ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก และใช้สารนาโนเคลย์ชนิด Cloisite30B จะมีค่ามอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น ในขณะที่การผสมนาโนเคลย์ชนิด CloisiteNa ลงในพอลิเมอร์ผสมสัดส่วนดังกล่าวส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการผสมนาโนเคลย์ Cloisite30B ส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติการขวางกั้นไอน้ำดีที่สุด ในขณะที่การใช้สารนาโนเคลย์ 2 ชนิดร่วมกันทำให้วัสดุเชิงประกอบ

(อัตราส่วน TPS ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก) มีค่ามอดูลัสและค่าความเสถียรภาพทางความร้อนอยู่ในช่วงระหว่างค่าที่ได้จากการใช้สารนาโนเคลย์แยกกัน อย่างไรก็ตามการใช้สารนาโนเคลย์ 2 ชนิดร่วมกันโดยที่มีการเตรียมวัสดุเชิงประกอบ (อัตราส่วน PBS ร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก) ผ่านมาตรฐานแบบซและพอลิเมอร์คอมปาวด์แต่ละเฟสจะให้ค่ามอดูลัสที่ต่ำกว่าทุกระบบข้างต้น

คำสำคัญ : วัสดุเชิงประกอบนาโน/พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต/แป้งเทอร์โมพลาสติก/สารเสริมสภาพเข้ากันได้

Thesis Title	A Study on Structure-Property Relationship Nanocomposite Based on Poly(butylene succinate)-Thermoplastic Starch Blends
Thesis Credits	15
Candidate	Miss Piangruetai Boonprasith
Thesis Advisors	Assoc. Prof. Dr.Jatuphorn Wootthikanokkhan Dr. Nonsee Nimitsiriwat
Program	Master of Engineering
Field of Study	Materials Technology
Division	Materials Technology
Faculty	School of Energy, Environment and Materials
B.E.	2555

Abstract

This research work has concerned a preparation of nanocomposites based on blends of poly(butylene succinate) (PBS) and thermoplastic cassava starch (TPS). Two different types of nanoclay namely sodium montmorillonite (CloisiteNa) and the organo-modified MMT (Cloisite30B) were used. The aim of this research is to study the effects of blend ratios, types of nanoclay and blending processes on microstructure, mechanical, thermal properties and barrier properties of composite materials. TPS was firstly prepared by mixing the dried starch with glycerol (30 wt%) in an internal mixer. Then, TPS was blended with PBS (by using a two-rolls mill) 5 wt% of compatibilizer (PBS-g-MA) and 5%wt nanoclay. The blend was fabricated into sheets by using a compression moulding technique. Intercalation and exfoliation structures of the nanocomposites were investigated by using an X-ray diffraction (XRD) technique. Mechanical properties of the materials were determined by a tensile test, whereas their thermal properties were examined by dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) and thermal gravimetric (TGA) techniques. Barrier properties of the nanocomposites were also determined by using oxygen transmission rate (OTR) and water vapor transmission rate (WVTR) tests. From the results, it was found that, by adding of Cloisite30B, tensile modulus of PBS/TPS (25/75) composite significantly increased. Thermal stability of the material was also increased when the CloisiteNa was used. Moreover, barrier properties of the PBS/TPS blends were also improved after adding the Cloisite30B nanoclay.

Furthermore, by using combination of both nanoclay (5 wt%), it was found that tensile modulus and thermal stability of the nanocomposites were compromised. However, tensile modulus of the nanocomposite containing mixed clays prepared via masterbatch were inferior as compared to those of which prepared via the normal mixing scheme.

Keywords: Nanocomposite/Poly (butylene succinate)/Thermoplastic starch/Compatibilizer

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี โดยได้รับการสนับสนุนด้านความรู้ คำสอน คำแนะนำต่างๆ และแนวทางในการแก้ไขปัญหาระหว่างการดำเนินงานวิจัย รวมถึงประสบการณ์ใหม่ๆในการทำงานจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. ดร.จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ และ ดร.นนทรี นิมิตศิริวัฒน์ รวมถึงอาจารย์ และคณะทำงานทุกท่านในสายวิชาเทคโนโลยีวัสดุที่ให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ ผศ. ดร.เต็มศักดิ์ ศรีศิริรินทร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ดร.นันทน์ ถาวรังกูร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และ ดร.นรินทร์ กาบบัวทอง สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่ได้สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ ให้ข้อเสนอแนะและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร. ณรงค์ชัย โอเจริญ และเจ้าหน้าที่โรงประลองภาควิศวกรรมวัสดุและโลหะการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) และสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพจน์ปรีชา เกษมวานานิมิต คุณนัตตลา วงศ์ดี๊ คุณชนพงษ์ เชื้อคุณ นักศึกษาปริญญาโท คุณชนะ ประพทวิชวงศ์ นักศึกษาปริญญาเอก สำหรับความช่วยเหลือในการทำวิจัย และรุ่นพี่ เพื่อนรุ่นน้อง ในสายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้านเทคนิค ตลอดจนคำแนะนำ คำลั้งใจและการแก้ปัญหาต่างๆ ระหว่างการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณแหล่งทุนมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ที่ได้ให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณกลุ่มวิจัย PENTEC และ กลุ่มวิจัย P-PROF มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความสนับสนุนด้านเทคโนโลยี อุปกรณ์และสถานที่ในการปฏิบัติงาน และขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวของข้าพเจ้าทุกท่านที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในการเรียนและความช่วยเหลือเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๖
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๗
กิตติกรรมประกาศ	๘
สารบัญ	๙
รายการตาราง	๑๐
รายการรูป	๑๑
รายการสัญลักษณ์	๑๓
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของการเตรียม TPS ผสมกับพอลิเมอร์	4
1.2.2 งานวิจัยที่มีการศึกษาเกี่ยวกับ โครงสร้างและสมบัติของวัสดุเชิงประกอบนาโนจาก PBS/TPS	5
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	9
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
2. ทฤษฎี	12
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	12
2.2 แป้ง	14
2.2.1 แป้งมันสำปะหลัง	17
2.2.1 แป้งเทอร์โมพลาสติก	18
2.3. สารเสริมสภาพพลาสติก	19
2.4 สารประกอบเปอร์ออกไซด์	20
2.5 พอลิเมอร์ผสม	22

	หน้า
2.5.1 สารเสริมสภาพเข้ากันได้	24
2.6 เลเซอร์ซีลิเกตเคลย์	26
2.7 โครงสร้างพอลิเมอร์เลเซอร์ซีลิเกต	30
2.7.1 โครงสร้างแบบตั้งเดิม	30
2.7.2 โครงสร้างแบบอินเตอร์คัลเลต	30
2.7.3 โครงสร้างแบบเอกโฟลิเอต	30
2.8 สมบัติด้านการขวางกั้นแก๊สและไอน้ำของ PLS	36
3. การดำเนินงานวิจัย	38
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	38
3.2 การเตรียมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ชนิด PBS-g-MA	40
3.3 การหาปริมาณหมู่แทนที่ MA บนสายโซ่ PBS ของ PBS-g-MA	40
3.4 การเตรียมแป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS)	41
3.5 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS	41
3.6 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS ที่เติมนาโนเคลย์ 1 ชนิด	42
3.7 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PBS/TPS ที่ใช้สารนาโนเคลย์ 2 ชนิดร่วมกัน	43
3.7.1 การผสมแบบปกติ	43
3.7.2 การผสมผ่านการเตรียมนาโนเคลย์คอมปาวด์	44
3.8 การขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์และทดสอบ	45
3.9 การวิเคราะห์และทดสอบ	46
3.9.1 สมบัติเชิงกล	46
3.9.2 โครงสร้างทางเคมี	47
3.9.3 สมบัติทางความร้อน	48
3.9.4 โครงสร้างสัณฐานวิทยา	48
3.9.5 โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ	49
3.9.6 สมบัติการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของวัสดุเชิงประกอบ	50
4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	52

	หน้า	
4.1	ผลของการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี	52
4.2	ผลการเตรียม TPS	53
4.3	สมบัติของพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS	54
4.3.1	ผลของสัดส่วน TPS	54
4.3.2	สมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม	58
4.4	สมบัติของวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS	59
4.4.1	ผลของสัดส่วน TPS และชนิดของเคลย์	59
4.4.2	สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบนาโน	63
4.4.3	สมบัติต้านทานการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของวัสดุเชิงประกอบ	64
4.4.4	ผลของการใช้สารนาโนเคลย์ผสมต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบ	66
4.4.5	สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบนาโนเคลย์ร่วมกัน 2 ชนิด	69
4.4.6	สมบัติต้านทานการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สออกซิเจนของการเติมนาโนเคลย์ 2 ชนิด	70
5.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	72
5.1	สรุปผลการทดลอง	72
5.2	ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง		75
ภาคผนวก		
ก.	DMTA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS ที่ไม่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้	84
ข.	กราฟ XRD ของวัสดุเชิงประกอบ PBS/TPS ที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน ชนิดของนาโนเคลย์และวิธีการผสมต่าง ๆ กัน	86
ค.	TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบ PBS/TPS ที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน	89
ง.	น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ทดสอบด้วยเทคนิค GPC	91
ประวัติผู้วิจัย		94

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติของพอลิวิวิทิลีนซัคซิเนต	15
2.2 องค์ประกอบและสมบัติของแป้งมันสำปะหลัง	19
2.3 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของสารประกอบเปอร์ออกไซด์ชนิดต่างๆ	23
2.4 สูตร โมเลกุลและค่าการแลกเปลี่ยนไอออนของ 2:1 phyllosilicates	28
2.5 ชนิดสมบัติของและ โครงสร้างของนาโนเคลย์	30
2.6 อัตราการซึมผ่านไอน้ำและแก๊สของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ	37
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	38
3.2 รายการอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	39
4.1 แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำของ PBS TPS และวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS ที่เติมนาโนเคลย์ 1 ชนิดที่อัตราส่วน 75/25 และ 25/75 ร้อยละโดยน้ำหนัก	64
4.2 แสดงอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนและไอน้ำของ PBS TPS และวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS ที่เติมนาโนเคลย์ 2 ชนิดที่อัตราส่วน 75/25 ร้อยละโดยน้ำหนัก	70
5.1 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ดีที่สุดกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆทางการค้า	74

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
1.1	กระบวนการได้มาซึ่งสารเคมีจากชีวมวล	1
1.2	ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของวัสดุเชิงประกอบนาโน	6
1.3	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำของวัสดุเชิงประกอบนาโนระหว่าง TPS กับนาโนเคลย์ชนิดต่างๆ	6
1.4	โครงสร้างการกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์เมทริกซ์	8
1.5	แสดงการกระจายตัวของสารนาโนเคลย์ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมเคลย์ในพอลิเมอร์ผสม	9
2.1	พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแหล่งวัตถุดิบต่างๆ	14
2.2	กระบวนการผลิตพอลิบิวทิลีนซักซิเนต	14
2.3	โครงสร้างทางเคมีของพอลิบิวทิลีนซักซิเนต	15
2.4	โครงสร้างของอะไมโลส (ก) และอะไมโลเพคติน(ข)	16
2.5	การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน	18
2.6	ลักษณะการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ทั้งกรณีที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพพลาสติก (ก)และใส่สารเสริมสภาพพลาสติก (ข)	20
2.7	สารประกอบเปอร์ออกไซด์ชนิดไดควิมิลเปอร์ออกไซด์	22
2.8	เฟสไดอะแกรมของพอลิเมอร์ผสม	24
2.9	โครงสร้างของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ที่อยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ (ก) พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก (ข) พอลิเมอร์ร่วมแบบกราฟท์	26
2.10	โครงสร้างของ 2:1 phyllosilicates	28
2.11	โครงสร้างเคลย์ที่มีหมู่อัลคิลแอมโมเนียมแคทไอออนจัดเรียงตัวต่างๆกัน	29
2.12	ความเป็นขั้วของสารนาโนเคลย์แต่ละชนิด	30
2.13	ภาพของชนิดนาโนคอมโพสิตแบบ intercalation และ exfoliation	31
2.14	ภาพของโครงสร้างที่คดเคี้ยวของ PLS (Tortuosity)	32
2.15	การเตรียม PLS ด้วยวิธีใช้สารละลาย	33

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า	
2.16	ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวงที่ระหว่างชั้นของนาโนเคลย์	34
2.17	การเตรียม PLS ด้วยวิธีการหลอมผสม	35
2.18	ความหนืดของวัสดุเชิงประกอบที่มีการนาโนเติมเคลย์เปรียบเทียบกับที่ไม่เติม	35
2.19	การกระจายตัวของนาโนเคลย์ในแบบต่างๆ	37
3.1	การทดลองการรีฟลักซ์หาปริมาณการแทนที่ของ MA	41
3.2	การเตรียมพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS	42
3.3	เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง	42
3.4	การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PBS/TPS	43
3.5	การเตรียมวัสดุเชิงประกอบ PBS/TPS ที่เติมนาโนเคลย์ 2 ชนิด	43
3.6	การเตรียมวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS โดยเตรียมผ่าน PBS นาโนเคลย์คอมปาวด์	45
3.7	เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน	46
3.8	การหาค่าความเหนียวจากการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียด	47
3.9	เครื่อง Universal Testing Machine	48
3.10	เครื่อง Scanning Electron Microscope	49
3.11	เครื่องวัดค่าน้ำหนักโมเลกุลที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	51
4.1	สเปกตรัม ¹ H NMR ของ PBS-g-MA	52
4.2	ลักษณะของ TPS ที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด	53
4.3	สัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ TPS	53
4.4	ค่าการทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS	55
4.5	ค่าการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS	55
4.6	ค่าความเหนียวของพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS	56
4.7	ค่ามอดูลัสของพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS	56
4.8	ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS (ปราศจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้) ณ สัดส่วนผสมต่างๆ (ก) 75/25 (ข) 50/50 (ค) 25/75 ร้อยละโดยน้ำหนัก	57
4.9	อันตรกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากการเติม PBS-g-MA ในพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS	58

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.10 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS (ที่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ณ สัดส่วนผสมต่างๆ (ก) 75/25 (ข) 50/50 (ค) 25/75 ร้อยละ โดยน้ำหนัก	59
4.11 เทอร์โมแกรม DMTA ของพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS ที่เติมสารเสริมสภาพเข้ากันได้	60
4.12 ค่าการทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบนาโนที่ผสมสารนาโนเคลย์ชนิดต่างๆ	61
4.13 ค่าการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบนาโนที่ผสมสารนาโนเคลย์ชนิดต่างๆ	61
4.14 ค่าความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบนาโนที่ผสมสารนาโนเคลย์ชนิดต่างๆ	62
4.15 ค่ามอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบนาโนที่ผสมสารนาโนเคลย์ชนิดต่างๆ	62
4.16 กราฟ XRD ของวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS	63
4.17 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS อัตราส่วน 25/75	64
4.18 ค่าการทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบนาโนที่เติมเคลย์ 2 ชนิดร่วมกัน	67
4.19 ค่าการยืดตัวของวัสดุเชิงประกอบนาโนที่เติมเคลย์ 2 ชนิดร่วมกัน	67
4.20 ค่าความเหนียวของวัสดุเชิงประกอบนาโนที่เติมเคลย์ 2 ชนิดร่วมกัน	68
4.21 ค่ามอดูลัสของวัสดุเชิงประกอบนาโนที่เติมเคลย์ 2 ชนิดร่วมกัน	68
4.22 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS อัตราส่วน 75/25	69
4.23 กราฟ XRD ของวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS อัตราส่วน 75/25 ที่ผสมนาโนเคลย์ 2 ชนิดร่วมกัน	71
ก.1 DMTA เทอร์โมแกรมของพอลิเมอร์ผสม PBS/TPS ที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ปราศจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้	85
ข.1 กราฟ XRD ของวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS อัตราส่วน 75/25	87
ข.2 กราฟ XRD ของวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS อัตราส่วน 50/50	87
ข.3 กราฟ XRD ของวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS อัตราส่วน 25/75	88
ค.1 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบนาโน PBS/TPS อัตราส่วน 50/50	90
ง.1 น้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์ PBS จากถุงด้วยเทคนิค GPC	92
ง.2 น้ำหนักโมเลกุลพอลิเมอร์ PBS เมื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยเทคนิค GPC	93

รายการสัญลักษณ์

PBS	=	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต
PBS-g-MA	=	พอลิบิวทิลีนซัคซิเนตกราฟมาเลอิกแอนไฮไดรด์
Tg	=	อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว
TPS	=	แป้งเทอร์โมพลาสติก
OTR	=	อัตราการซึมผ่านแก๊สของออกซิเจน
WVTR	=	อัตราการซึมผ่านของไอน้ำ
PLS	=	พอลิเมอร์ไลเยอร์ซีลิเกต