ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249895

รายงานการวิจัย เรื่อง

การประยุกต์ใช้ผลึกโลหะออกไซด์ขนาดนาโนเมตรเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์

(Application of Nanocrystalline Metal Oxides to Improve Properties of Polymers)

คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ วัชรวิชานันท์

รองศาสตราจารย์ ดร.มล.ศุภกนก ทองใหญ่

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปี พ.ศ. 2551-2552

ปีที่เสร็จ พ.ศ. 2553

ว.ว.2548 42

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249895

รายงานการวิจัย เรื่อง

การประยุกต์ใช้ผลึกโลหะออกไซด์ขนาดนาโนเมตรเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์

(Application of Nanocrystalline Metal Oxides to Improve Properties of Polymers)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ วัชรวิชานันท์

รองศาสตราจารย์ ดร.มล.ศุภกนก ทองใหญ่

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปี พ.ศ. 2551-2552

ปีที่เสร็จ พ.ศ. 2553

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร งบประมาณแผ่นดินปี 2551 และงบประมาณแผ่นดินปี 2552 และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในการอนุเคราะห์สถานที่ทำการวิจัย อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง และศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านคาตาไลซิสและวิศวกรรมปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือในการทดลอง

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร แบบ สว.ว 5

แบบฟอร์มบทคัดย่อ

ภาษาไทย

ส่วนที่ 1

ชื่อโครงการ การประยุกต์ใช้ผลึกโลหะออกไซด์ขนาดนาโนเมตรเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์
ชื่อผู้วิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ วัชรวิชานันท์
รองศาสตราจารย์ ดร.มล.สุภกนก ทองใหญ่
หน่วยงานที่สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยศิลปากร
แหล่งทุนอุดหนุนการวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีที่เสร็จ 2553

ส่วนที่ 2 บทคัดย่อ

249895

ส่วนที่หนึ่งศึกษาผลของขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาค 47.5 และ 130 นาโนเมตรที่มีต่อสมบัติทางกลและรูปแบบโครงสร้างของพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงและไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนคอมโพสิต นาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ต่างๆ เตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ผลการทดลองพบว่า การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในเนื้อพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นตามปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ความต้านทานแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูงและไทเทเนียมไดออกไซด์ 130 นาโนเมตร มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.0% โดยน้ำหนัก จากนั้นค่าจะลดลงเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ ความต้านทานแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ 130 นาโนเมตร มีค่าสูงกว่านาโนคอมโพสิตที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ 47.5 นาโนเมตร มอดูลัสของยังของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและไทเทเนียมไดออกไซด์ 47.5 นาโนเมตร เพิ่มขึ้นตามปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ความต้านทานแรงดึงของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและไทเทเนียมไดออกไซด์ทั้งสองขนาดอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ส่วนที่สองตรวจสอบสมบัติทางกลและรูปแบบโครงสร้างของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรไพลีนและไทเทเนียมไดออกไซด์ และนาโนคอมโพสิตนี้เตรียมด้วยเทคนิคการหลอมผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ผลการทดลองพบว่า ความต้านทานแรงดึงของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรไพลีนและไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 42.3 นาโนเมตร และ 130 นาโนเมตร มีค่าลดลงตามปริมาณไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น และความเค้น ณ จุดขาดของนาโนคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากเติมไทเทเนียมไดออกไซด์ ผลของขนาดอนุภาคแสดงให้เห็นว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 130 นาโนเมตร สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของพอลิโพรไพลีนมากกว่าไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 42.3 นาโนเมตร ไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 130 นาโนเมตรใช้เติมในพอลิโพรไพลีนโดยใช้สภาวะการผสมสองแบบที่แตกต่างกัน นาโนคอมโพสิตของพอลิโพรไพลีนซึ่งเตรียมจากการผสมที่ความเร็วของสกรู 50 รอบต่อนาทีและจำนวนรอบของการผสม 2 รอบพบว่า มีค่า ความต้านทานแรงดึง ความเค้น ณ จุดขาดและมอดูลัสของยังสูงกว่าการผสมที่ความเร็วของสกรู 50 รอบต่อนาทีและจำนวนรอบของการผสม 1 รอบ การเตรียมตัวอย่างที่ความเร็วของสกรู 50 รอบ

249895

ต่อนาทีและจำนวนรอบของการผสม 2 รอบมีการกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 130 นาโนเมตร ค่อนข้างดีและลดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 130 นาโนเมตร ในเนื้อพอลิโพรไพลีน

ส่วนที่สามศึกษาผลของสารเสริมสภาพเข้ากันได้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์ที่มีต่อสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อนและรูปแบบโครงสร้างของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาด 47.5 นาโนเมตร นาโนคอมโพสิตที่มีและไม่มีการใช้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์เตรียมด้วยเทคนิคการหลอมผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ผลการทดลองพบว่า มอดูลัสของยังของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและไทเทเนียมไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น การเติมพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์ไม่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงและความเค้น ณ จุดขาดของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและไทเทเนียมไดออกไซด์ อุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและไทเทเนียมไดออกไซด์ก่อนและหลังการเติมพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์เพิ่มขึ้นตามปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มากขึ้น การกระจายตัวของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ในเนื้อพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีพอลิเอทิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์ค่อนข้างดีและเกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์เล็กน้อย ส่วนที่สี่ตรวจสอบผลของสารเสริมสภาพเข้ากันได้พอลิโพรไพลีน กราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์ที่มีต่อสมบัติทางกลพอลิโพรไพลีนและซิงค์ออกไซด์นาโนคอมโพสิต โดยที่นาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรไพลีนและซิงค์ออกไซด์เตรียมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่ความเข้มข้นของพอลิโพรไพลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์ที่เท่ากับ 1.0, 3.0 และ 5.0%โดยน้ำหนัก และ ความเข้มข้นของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0% โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่า ความต้านทานแรงกระแทกของนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิโพรไพลีนและซิงค์ออกไซด์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณการผสมซิงค์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น มอดูลัสของยังของพอลิโพรไพลีนและซิงค์ออกไซด์นาโนคอมโพสิตลดลงหลังจากการเติมพอลิโพรไพลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์ ค่าของความต้านทานแรงดึงและความเค้น ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการผสมซิงค์ออกไซด์และพอลิโพรไพลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮดรายด์ในปริมาณมากขึ้น

คำสำคัญ : พอลิเมอร์, ผลึกขนาดนาโน, โลหะออกไซด์, สมบัติทางกล, สมบัติทางความร้อน, รูปแบบโครงสร้าง

ภาษาอังกฤษ

ส่วนที่ 1

Research Title Application of Nanocrystalline Metal Oxides to Improve Properties of Polymers

Researcher Assistant Professor Dr.Sirirat Wacharawichanant

Associate Professor Dr.ML.Supakanok Thongyai

Office Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology

Silpakorn University

Research Grants Research and Development Institute, Silpakorn University

Year 2010

ส่วนที่ 2 Abstract

249895

The first parts studied the effect of particle sizes (47.5 and 130 nm) of titanium dioxide (TiO_2) on mechanical and morphological properties of high density polyethylene (HDPE)/titanium dioxide (TiO_2) nanocomposites. The nanocomposites of HDPE/TiO_2 with varying concentration of TiO_2 were prepared by melt mixing technique in a twin

249895

screw extruder. The results found that the agglomeration of TiO_2 particles in the polymer matrix increased with increasing TiO_2 content. The impact strength of HDPE/TiO_2 130 nm nanocomposites increased up to a TiO_2 130 nm content of 1.0 wt% and then dropped slightly with increasing TiO_2 content. The impact strength of HDPE and TiO_2 130 nm nanocomposites was higher than that of HDPE and TiO_2 47.5 nm nanocomposites. Young's modulus of HDPE and TiO_2 47.5 nm nanocomposites increased with increasing TiO_2 content. The HDPE/TiO_2 nanocomposites both two particle sizes showed small increased in tensile strength with increasing TiO_2 content. The second parts investigated the mechanical and morphological properties of polypropylene (PP)/TiO_2 nanocomposites. These nanocomposites were prepared by melt mixing technique in a twin screw extruder. The results found that the tensile strength of PP nanocomposites after adding TiO_2 42.3 nm and TiO_2 130 nm decreased with increasing TiO_2 content and stress at break increased after adding TiO_2. The effect of particle sizes showed that TiO_2 130 nm improved mechanical properties of PP more than TiO_2 42.3 nm. TiO_2 130 nm was added to PP using two different mixing conditions. PP composites were prepared at screw speed 50 rpm and 2 cycles of mixing showed higher the tensile strength, stress at break and Young's modulus than at screw speed 50 rpm and 1 cycle of mixing. The dispersion of TiO_2 130 nm particles was relatively good when operated at 50 rpm and 2 cycles of mixing and decreased the aggregates of TiO_2 130 nm particles in PP matrix.

The third parts studied the effect of polyethylene-grafted maleic anhydride (PE-g-MA) compatibilizer on mechanical, thermal and morphological properties of nanocomposites of HDPE and TiO_2 47.5 nm. The nanocomposites with and without PE-g-MA were prepared by melt mixing technique in a twin screw extruder. The results found that Young's Modulus of HDPE/TiO_2 nanocomposites increased with increasing TiO_2 content. The addition of PE-g-MA had no significant effect on the tensile strength and stress at break of HDPE/TiO_2 nanocomposites. The decomposition temperatures of HDPE/TiO_2 nanocomposites before and after adding PE-g-MA increased with increasing TiO_2 content. The dispersion of TiO_2 particles in HDPE matrix with PE-g-MA was relatively good, only a few aggregates exited. The forth parts investigated the effect of PP-g-MA compatibilizer on mechanical properties of PP/zinc oxide (ZnO) nanocomposites. PP/ZnO nanocomposites were prepared by twin screw extruder with various concentrations of PP-g-MA (1.0, 3.0 and 5.0 wt%) and ZnO (0.5, 1.0, 2.0 and 4.0 wt%). The results found that the impact strength of PP/ZnO nanocomposites did not change evidently with increasing ZnO content. Young's modulus of PP/ZnO nanocomposites decreased after adding PP-g-MA. The values of tensile strength and stress at break increased with increasing ZnO and PP-g-MA contents.

Key words : Polymer, Nanocrystalline, Metal Oxide, Mechanical Properties, Thermal Properties, Morphology

สารบัญเรื่อง

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ข

บทคัดย่อ ..... ค

สารบัญเรื่อง ..... ฉ

สารบัญรูป ..... ฌ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.4 ขอบเขตการวิจัย 2

1.5 คำสำคัญ (Keyword) 2

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 การใช้ผลึกโลหะออกไซด์ขนาดนาโนเมตรในพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต 3

2.2 การใช้สารเสริมสภาพเข้ากันได้ในพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต 4

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 5

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 5

3.1.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) 5

3.1.2 พอลิเอทธิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) 5

3.1.3 Polypropylene-graft-maleic anhydride (PP-g-MA) 5

3.1.4 Polyethylene-graft-maleic anhydride (PE-g-MA) 5

3.1.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) 5

3.1.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) 6

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 6

3.2.1 เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) 6

3.2.2 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding machine) 6

3.2.3 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) 6

3.2.4 เครื่อง Pendulum impact tester 7

3.2.5 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) 7

3.2.6 เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) 7

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

3.3 วิธีการเตรียมตัวอย่าง..... 7

3.3.1 การเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2..... 7

3.3.2 การเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ ZnO เพื่อศึกษาผลของสภาวะการผสม..... 8

3.3.3 การเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO2 ขนาดอนุภาค 47.5 nm โดยมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA..... 8

3.3.4 การเตรียมนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ ZnO ขนาดอนุภาค 71 nm โดยมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PP-g-MA..... 9

3.4 การทดสอบ..... 9

3.4.1 การทดสอบแรงดึง..... 9

3.4.2 การทดสอบแรงกระแทก..... 9

3.4.3 การศึกษารูปแบบโครงสร้าง (Morphology)..... 9

3.4.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อน..... 9

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์..... 10

4.1 การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2..... 10

4.1.1 สมบัติทางกล..... 10

4.1.2 รูปแบบโครงสร้าง (Morphology)..... 13

4.1.3 สมบัติทางความร้อน..... 14

4.2 การศึกษาผลของสภาวะการผสมที่มีต่อสมบัติของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต..... 16

4.2.1 ผลของขนาดอนุภาคของ TiO_2..... 16

4.2.2 ผลของความเร็วของสกรู..... 20

4.2.3 ผลของจำนวนรอบของการผสม..... 22

4.3 การศึกษาผลของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO2 ขนาดอนุภาค 47.5 nm..... 25

4.3.1 สมบัติทางกล..... 25

4.3.2 รูปแบบโครงสร้าง (Morphology)..... 28

4.3.3 สมบัติทางความร้อน..... 28

4.4 การศึกษาผลของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PP-g-MA ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ ZnO ขนาดอนุภาค 71 nm..... 29

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

4.4.1 สมบัติทางกล 29

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 32

5.1 การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 32

5.2 การศึกษาผลของสภาวะการผสมที่มีต่อสมบัติของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต 32

5.3 การศึกษาผลของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO2 ขนาดอนุภาค 47.5 nm 33

5.4 การศึกษาผลของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PP-g-MA ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ ZnO ขนาดอนุภาค 71 nm 33

5.5 สรุปผลรวมจากการศึกษาในแต่ละระบบของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต 33

5.6 ข้อเสนอแนะ 34

บทที่ 6 ผลผลิต (Output) 35

6.1 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ 35

6.2 ผลงานวิจัยที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ 35

บรรณานุกรม 37

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย 41

ประวัติที่ปรึกษาโครงการวิจัย 48

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 4.1 Tensile strength ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 11

รูปที่ 4.2 Young's modulus ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 11

รูปที่ 4.3 Stress at break ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 12

รูปที่ 4.4 Impact strength ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 13

รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของ HDPE บริสุทธิ์..... 13

รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 ขนาด 47.5 nm และ 130 nm ภายในชิ้นงานพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต..... 15

รูปที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 16

รูปที่ 4.8 Tensile strength ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 17

รูปที่ 4.9 Stress at break ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 18

รูปที่ 4.10 Young's modulus ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 18

รูปที่ 4.11 Impact strength ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 19

รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก. PP หลังจากผสม TiO_2 42.3 nm 0.5% โดยน้ำหนัก, ข. PP หลังจากผสม TiO_2 130 nm 0.5% โดยน้ำหนัก, ค. PP หลังจากผสม TiO_2 42.3 nm 1.0% โดยน้ำหนัก, ง. PP หลังจากผสม TiO_2 130 nm 1.0% โดยน้ำหนัก, จ. PP หลังจากผสม TiO_2 42.3 nm 3.0% โดยน้ำหนัก และ ฉ. PP หลังจากผสม TiO_2 130 nm 3.0% โดยน้ำหนัก..... 20

รูปที่ 4.13 Tensile strength ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่ความเร็วของสกรู 50 และ 100 รอบต่อนาที..... 21

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.14 Stress at break ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่ความเร็วของสกรู 50 และ 100 รอบต่อนาที..... 22

รูปที่ 4.15 Young's modulus ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่ความเร็วของสกรู 50 และ 100 รอบต่อนาที 22

รูปที่ 4.16 Tensile strength ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสม 1 และ 2 รอบ..... 23

รูปที่ 4.17 Stress at break ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสม 1 และ 2 รอบ..... 24

รูปที่ 4.18 Young's modulus ของ PP/TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสม 1 และ 2 รอบ..... 24

รูปที่ 4.19 ภาพ SEM ของ PP หลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสมต่างๆ ก. TiO_2 0.5% โดยน้ำหนัก ที่จำนวนรอบของการผสม 1 รอบ และ ข. TiO_2 0.5% โดยน้ำหนัก ที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบ..... 25

รูปที่ 4.20 Tensile strength ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA..... 26

รูปที่ 4.21 Stress at break ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA..... 26

รูปที่ 4.22 Young's modulus ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA..... 27

รูปที่ 4.23 Impact strength ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA..... 27

รูปที่ 4.24 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ก่อนและหลังการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ก. HDPE/TiO_2 ข. PE-g-MA 1.0%โดยน้ำหนัก และ ค. PE-g-MA 3.0%โดยน้ำหนัก..... 28

รูปที่ 4.25 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA..... 29

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.26 Tensile strength ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม ZnO และ PP-g-MA ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 30

รูปที่ 4.27 Stress at break ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม ZnO และ PP-g-MA ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 30

รูปที่ 4.28 Young's modulus ของ ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม ZnO และ PP-g-MA ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 31

รูปที่ 4.29 Impact strength ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม ZnO และ PP-g-MA ที่ความเข้มข้นต่างๆ..... 31