การพัฒนาเทคนิคการผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้พอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอเป็นสารช่วยผสม

นายธุวชิต ปรีชาเวทยากุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF BLENDING TECHNIQUE OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) / CASSAVA STARCH USING POLYETHYLENEGLYCOLATED BISPHENOL A AS COMPATIBILIZER

Mr. Tuwachit Prechawettayarkul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

500496

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเทคนิคการผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอเป็นสารช่วยผสม
โดย	นายธุวชิต ปรีชาเวทยากุล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกูลกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกูลกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงดาว อาจองค์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.มัณฑนา โอภาประกาสิต)

ธุวชิต ปรีชาเวทยากุล : การพัฒนาเทคนิคการผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับแป้งมันสำปะหลังโดยใช้พอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอเป็นสารช่วยผสม. (DEVELOPMENT OF BLENDING TECHNIQUE OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) / CASSAVA STARCH USING POLYETHYLENEGLYCOLATED BISPHENOL A AS COMPATIBILIZER) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.กาวี ศรีกูลกิจ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ.อรอุษา สรวารี, 106 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเทคนิคการผสมพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตกับแป้งมันสำปะหลังโดยผสมขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด ผสมเข้ากันได้โดยใช้ พอลิเอทิลีนไกลโคเลต-บิสฟีนอลเอ เป็นสารช่วยผสม ซึ่งโครงสร้างของพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอมีส่วนที่เป็นไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิกทำให้พอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดเข้ากันได้ กรรมวิธีผสมเริ่มจากดัดแปรพื้นผิวของผงเพตให้มีสมบัติไฮโดรฟิลิกโดยการอบผนึกกับพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส แล้วจึงเคลือบผงเพตที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวแล้วด้วยเจลแป้งมันสำปะหลัง ทิ้งให้แห้งจนได้ฟิล์มแป้งห่อหุ้มผิวเพต อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเพตและแป้งมันสำปะหลังที่ใช้คือ 90 : 10, 80 : 20 และ 70 : 30 จากนั้นนำเพตที่ถูกเคลือบด้วยแป้งแล้วไปผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาวิเคราะห์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด, ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโทรสโกปี, ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี, เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์, เทอร์โมกราวิเมทริกอนาไลซิส และกล้องจุลทรรศน์ออปติคอล เพื่อศึกษาผลของสารพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอ ที่มีต่อความเข้ากันได้ของเพตและแป้งมันสำปะหลัง โดยภาพของพอลิเมอร์ผสมที่ย้อมด้วยสีย้อมที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ออปติคอลแสดงให้เห็นว่าในเมทริกซ์ของเพตมีกลุ่มของแป้งกระจายตัวอยู่ทั่ว ซึ่งขนาดของกลุ่มแป้งและการกระจายตัวของแป้งขึ้นกับปริมาณสารช่วยผสมที่ใช้ ผลจาก XRD พบว่ามีพีกของผลึกในพอลิเมอร์ผสมมีความเป็นระเบียบมาขึ้น แสดงให้เห็นว่าส่วนของแป้งที่กระจายตัวอยู่ในเพตแสดงหน้าที่เป็นตัวก่อผลึกให้กับเมทริกซ์ของเพตได้ จากผล DSC อุณหภูมิการหลอมของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ คือ 250.2 - 255.6 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมของเพตบริสุทธิ์ แสดงให้เห็นว่าพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอมีบทบาทสำคัญในการทำให้เพตและแป้งมันสำปะหลังมีความเข้ากันได้ทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน

ภาควิชาวัสดุศาสตร์
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4872588423 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY
KEY WORD: PET/STARCH BLEND/POLYETHYLENEGLYCOLATED BISPHENOL A COMPATIBILIZER

TUWACHIT PRECHAWETTAYARKUL : DEVELOPMENT OF BLENDING TECHNIQUE OF POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE) / CASSAVA STARCH USING POLYETHYLENEGLYCOLATED BISPHENOL A AS COMPATIBILIZER. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. KAWEE SRIKULKIT, THESIS COADVISOR: ASST. PROF. ONUSA SARAVARI, 106 pp.

Polyethylene terephthalate / starch blend was prepared by melt blending using twin screw extruder. The miscibility of two different polymers was achieved by the use of hydrophilic / hydrophobic compatibilizer, polyethylene glycolated bisphenol A. At first, the compatibilizer was coated onto PET powder and heat treated at 160°C to render PET surface hydrophilic. Then, the obtained hydrophilic PET powder was mixed with gelatinized starch solution. After allowing the mixture to freely dry in open air, the starch coated PET powder was achieved. The varying PET to starch ratios from 90 : 10, 80 : 20 and 70 : 30 were prepared in this study. After that, the starch coated PET powder was melt blended using twin screw extruder. The obtained blend was characterized by SEM, FT-IR, DSC, XRD, TGA and optical microscope in order to elucidate the effect of compatibilizer on starch and PET miscibility. From microscope images of disperse dyed blend samples, PET exhibited continuous matrix in which starch disperse phases with various sizes depending on compatibilizer contents were found scattering randomly throughout. From XRD results, new crystalline peaks were observed in case of the blend, indicating that the disperse phase exhibited the nucleating effect on PET matrix. The melting temperature of the polymer blend obtained from DSC was 255.6-250.2°C which was lower than those of virgin PET as a result of effect of polyethylene glycolated bisphenol A. Therefore, the role of polyethylene glycolated bisphenol A as a compatibilizer was the key to overcome the incompatabity between PET and starch, leading to the homogenous blend.

Department : Materials Science Student's signature Tuwachit Precha.
Field of study: Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's signature Srikulkit
Academic year : 2007 Co-advisor's signature Onusa Saravari

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้น เป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านเครื่องมือ วัตถุดิบ และสถานที่สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับความช่วยเหลือ และการแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกูลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหา และแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหา และแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. รศ.เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและแนวคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. รองศาสตราจารย์ ดร. ดวงดาว อาจองค์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

5. อาจารย์ ดร.มัณฑนา โอภาประกาสิต กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

6. บริษัทไทยพอลิเอสเทอร์ จำกัด ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

7. บริษัทแม็กซ์ดีวิลอบเมนท์ จำกัด ให้ความอนุเคราะห์สารพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอ

8. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า จนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฎ

บทที่

1 บทนำ..... 1

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 3

2.1 พอลิเอสเทอร์ (Polyester) 3

2.2 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate) 4

2.2.1 สมบัติของเพต 5

2.2.2 การนำไปใช้งาน..... 5

2.3 การรีไซเคิลเพต (PET Recycling) 6

2.4 แป้ง (Starch) 6

2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง..... 7

2.4.1.1 อะไมโลส (Amylose)..... 8

2.4.1.2 อะไมโลเพกติน (Amylopectin) 9

2.4.2 การนำแป้งมาทำเป็นเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch หรือ TPS)..... 10

2.4.3 สมบัติของแป้ง..... 11

2.4.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย..... 11

2.4.3.2 การเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization)..... 11

2.5 แป้งมันสำปะหลัง 12

2.5.1 คุณภาพของแป้งมันสำปะหลัง..... 12

บทที่ หน้า

2.6 แนวทางในการศึกษาพลาสติกที่สามารถสลายตัวได้ในทางชีวภาพ..... 13
2.6.1 การปรับปรุงสารพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ (Modified Natural Polymer)..... 13
2.6.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีสมบัติสามารถย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ..... 13
2.6.3 การเติมสารเติมแต่งเพื่อให้พลาสติกมีความสามารถในการย่อยสลายได้ในทางชีวภาพ..... 13
2.7 สารเติม สารเสริมแรงและความสามารถในการเข้ากันได้..... 14
2.7.1 ลักษณะทั่วไปของสารเติมและสารเสริมแรง..... 14
2.7.2 สารปรับสภาพพลาสติก..... 15
2.7.3 ความสามารถในการเข้ากันได้ (Compatibility)..... 17
2.7.3.1 องค์ประกอบของความสามารถในการเข้ากันได้..... 17
2.7.3.2 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Miscibility and Compatibility)..... 18
2.8 การขึ้นรูปพลาสติกโดยวิธี Extrusion..... 20
2.8.1 ส่วนต่างๆในเครื่อง Extruder..... 21
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 22
3 วิธีการทดลอง..... 26
3.1 สารเคมีและวัตถุดิบ..... 26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... 27
3.3 อุปกรณ์วิเคราะห์..... 27
3.4 ขอบเขตการทดลอง..... 28
3.5 การเตรียมวัตถุดิบ และการเตรียมพอลิเมอร์ผสม..... 29
3.5.1 การบดพอลิเอสเทอร์ชิป..... 29
3.5.2 การเคลือบผิวผงเพชที่ได้ด้วยสารพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิส-ฟีนอลเอ..... 29

บทที่ หน้า

3.5.3 การเคลือบฟิล์มแป้งลงบนผงเพตที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วย พอลิ-เอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอ..... 30
3.5.4 การผสมเพตและแป้งให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องอัดรีด แบบสกรูคู่..... 31
3.6 การวิเคราะห์..... 33
3.6.1 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 33
3.6.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลซิส (TGA)..... 34
3.6.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี (DSC)..... 35
3.6.4 การวิเคราะห์และตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR)..... 35
3.6.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค XRD... 37
3.6.6 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของภาคตัดขวางพอลิเมอร์ผสม เพต/แป้งมันสำปะหลัง ด้วย Optical Microscope..... 38
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 40
4.1 การเตรียมวัตถุดิบ..... 40
4.1.1 การเตรียมผงเพต..... 40
4.1.2 การดัดแปรผิวเพตด้วยสารพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอ..... 40
4.1.3 การเคลือบผิวเพตด้วยฟิล์มแป้งมันสำปะหลัง..... 43
4.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างเพตและแป้งด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่... 44
4.2.1 สัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เพต/แป้งมันสำปะหลัง ก่อนและหลังขึ้นรูปจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ด้วยเทคนิค SEM..... 47
4.3 การวิเคราะห์พอลิเมอร์ผสม..... 49
4.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนนาไลซิส (TGA)..... 49

บทที่ หน้า

4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี (DSC)..... 53
4.3.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ผสมด้วยเทคนิค FT-IR..... 55
4.3.4 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของของพอลิเมอร์ผสม เพต/แป้งมันสำปะหลัง ด้วยเทคนิค XRD..... 58
4.3.5 การย้อมสีพอลิเมอร์ผสมและการวิเคราะห์ด้วย Optical Microscope..... 60
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 64
5.1 สรุปผลการทดลอง..... 64
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 65

รายการอ้างอิง..... 66
ภาคผนวก..... 69
ภาคผนวก ก..... 70
ภาคผนวก ข..... 73
ภาคผนวก ค..... 82
ภาคผนวก ง..... 87
ภาคผนวก จ..... 93
ภาคผนวก ช..... 97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 106

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างกรดที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์.....	3
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเอสเทอร์.....	4
ตารางที่ 3.1	ตารางแสดงรายละเอียดของสารเคมีและวัตถุดิบ.....	26
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนของสารต่างๆที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม.....	30
ตารางที่ 4.1	ตารางแสดงภาพผงเพตที่เคลือบผิวด้วยฟิล์มแป้ง.....	43
ตารางที่ 4.2	แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ผสม.....	45
ตารางที่ 4.3	ตารางแสดงรูปและลักษณะของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่.....	46
ตารางที่ 4.4	ตารางแสดงร้อยละของแป้งที่คำนวณได้จากเทอร์โมแกรม.....	49
ตารางที่ 4.5	แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอม (T_m) ที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล - สแกนนิงแคลอริเมทรี (DSC).....	54
ตารางที่ 4.6	อุณหภูมิหลอม (T_m) ที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี (DSC).....	55
ตารางที่ 4.7	ตำแหน่งของพีกสำคัญต่างๆ ที่พบในสเปกตรัมของ เพต บริสุทธิ์, แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสม เพต/แป้งมันสำปะหลัง/สารช่วยผสม..	57

สารบัญภาพ

รูปประกอบ		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของเพต	4
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของแป้งและเซลลูโลส	8
รูปที่ 2.3	โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส	9
รูปที่ 2.4	โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพกติน	10
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสและอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสม (A) แบบที่ 1 (B) แบบที่ 2	19
รูปที่ 2.6	แสดงเครื่องอัดรีด (extruder) แบบสกรู	20
รูปที่ 2.7	แสดงส่วนต่างๆ ภายในเครื่อง Single screw extruder	21
รูปที่ 3.1	แผนภูมิขั้นตอนการทดลอง	28
รูปที่ 3.2	เครื่องบดละเอียด ผู้ผลิต FRITSCH รุ่น T15, Markt Einersheim, Germany (ภาควิชาวัสดุศาสตร์)	29
รูปที่ 3.3	การผสมเพตและแป้งด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (ภาควิชาวัสดุศาสตร์)	31
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ และการเตรียมพอลิเมอร์ผสม	32
รูปที่ 3.5	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-5800LV (ศูนย์-เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาฯ)	33
รูปที่ 3.6	เครื่อง TGA ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA 851^e (ภาควิชาวัสดุ-ศาสตร์)	34
รูปที่ 3.7	เครื่องดิฟเฟอร์เรนเชียลสแกนนิงแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter, DSC) รุ่น NETZSCH DAC-204 F1 (ศูนย์เครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาฯ)	35
รูปที่ 3.8	แสดงไดอะแกรมหลักการทำงานของเทคนิค ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี	36
รูปที่ 3.9	เครื่อง FT-IR Spectrometer ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One (ศูนย์-เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาฯ)	36
รูปที่ 3.10	X-ray Diffraction (XRD) รุ่น Bruker AXS Model D8 DISCOVER (ศูนย์-เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาฯ)	37

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบและลักษณะของแผ่นที่ยึดตัวอย่าง (sample holder)..... 38

รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์ออปติคอล (Optical Microscope) ของบริษัท OLYMPLUS รุ่น ex-31 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์)..... 39

รูปที่ 4.1 แสดง (A) เม็ดเพตและ (B) เพตที่ผ่านการบดด้วยเครื่องพัลวาไรเซอร์..... 40

รูปที่ 4.2 การดัดแปรผิวเพตด้วยสารพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอ..... 41

รูปที่ 4.3 เพตที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยสารช่วยผสม สัดส่วนโดยน้ำหนักของสารช่วยผสม (A) เพตบริสุทธิ์ (B) 10, (C) 20 และ (D) 30 g/100 g PET ตามลำดับ.. 42

รูปที่ 4.4 แสดงการทดสอบสมบัติของผิวเพตโดยที่ (A) ก่อนปรับสภาพผิวและ (B) หลังปรับสภาพผิว..... 42

รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 10 g/100 g PET และสัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง, 90 : 10 โดยที่ (A) ก่อนผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (B) หลังผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่..... 47

รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 10 g/100 g PET และสัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง, 80 : 20 โดยที่ (A) ก่อนผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (B) หลังผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่..... 48

รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม ที่มีปริมาณสารช่วยผสม 10 g/100 g PET และสัดส่วน เพต : แป้งมันสำปะหลัง, 70 : 30 โดยที่ (A) ก่อนผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (B) หลังผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่..... 48

รูปที่ 4.8 เทอร์โมแกรมของ (A) แป้งมันสำปะหลัง (B) เพต (C) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (D) 80 : 20, (E) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 10 g/100 g PET..... 50

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 4.9 เทอร์โมแกรมของ (A) แป้งมันสำปะหลัง (B) เพต (C) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (D) 80 : 20, (E) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 20 g/100 g PET..... 50

รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมของ (A) แป้งมันสำปะหลัง (B) เพต (C) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (D) 80 : 20, (E) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 30 g/100 g PET..... 51

รูปที่ 4.11 กราฟเสถียรภาพทางความร้อนของ (A) เพต และ เพต/พอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอ โดยมีปริมาณพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอที่ (B) 10 (C) 20 (D) 30 g/100 g PET..... 51

รูปที่ 4.12 กราฟเสถียรภาพทางความร้อนของ (A) แป้งมันสำปะหลัง (B) เพต และพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราส่วนเพต : แป้งมันสำปะหลัง 70 : 30 โดยที่ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น (C) 10, (D) 20 และ (E) 30 g/100 g PET..... 52

รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC ของ (A) เพตบริสุทธิ์ และ เพต/พอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอ โดยมีปริมาณพอลิเอทิลีนไกลโคเลตบิสฟีนอลเอที่ (B) 10 (C) 20 (D) 30 g/100 g PET..... 53

รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรม DSC ของ (A) พอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10, (B) 80 : 20, (C) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสม 10 g/100 g PET 54

รูปที่ 4.15 FT-IR สเปกตรัมของ เพตบริสุทธิ์, แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสม เพต/แป้งมันสำปะหลัง โดยที่ (A) แป้งมันสำปะหลัง, (B) เพตบริสุทธิ์, (C) พอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10, (D) 80 : 20, (E) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 10 g/100 g PET..... 56

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 4.16 FT-IR สเปกตรัมของ เพต บริสุทธิ์, แป้งมันสำปะหลัง และพอลิเมอร์ผสม เพต/แป้งมันสำปะหลัง โดยที่ (A) แป้งมันสำปะหลัง, (B) เพตบริสุทธิ์, (C) พอลิเมอร์ผสมอัตราส่วน เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10, (D) 80 : 20, (E) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 20 g/100 g PET 57

รูปที่ 4.17 FT-IR สเปกตรัมในช่วง 4000-2400 cm^{-1} ของ (A) เพต และพอลิเมอร์ผสมที่มีส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 10 และ 20 g/100 g PET ที่อัตราส่วน เพต:แป้งมันสำปะหลัง คือ (B) 90:10, (C) 80:20 และ (D) 70:30 57

รูปที่ 4.18 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ (A) เพต เปรียบเทียบกับ (B) เพต หลังผ่านเข้าเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ 59

รูปที่ 4.19 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ (A) เพต (B) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (C) 80 : 20, (D) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 10 g/100 g PET 59

รูปที่ 4.20 XRD ดิฟแฟรกโทแกรมของ (A) เพต (B) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (C) 80 : 20, (D) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 20 g/100 g PET 60

รูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยา กำลังขยายของเลนส์วัตถุที่ 4 เท่า ของ (A) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (B) 80 : 20, (C) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 10 g/100 g PET 61

รูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยา กำลังขยายของเลนส์วัตถุที่ 10 เท่า ของผสม (A) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (B) 80 : 20, (C) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 10 g/100 g PET 61

รูปประกอบ หน้า

รูปที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยา กำลังขยายของเลนส์วัตถุที่ 4 เท่า ของ (A) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (B) 80 : 20, (C) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 20 g/100 g PET 61

รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยา กำลังขยายของเลนส์วัตถุที่ 10 เท่า ของผสม (A) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (B) 80 : 20, (C) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 20 g/100 g PET 62

รูปที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยา กำลังขยายของเลนส์วัตถุที่ 4 เท่า ของ (A) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (B) 80 : 20, (C) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 30 g/100 g PET 62

รูปที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบสัณฐานวิทยา กำลังขยายของเลนส์วัตถุที่ 10 เท่า ของผสม (A) พอลิเมอร์ผสม เพต 90 : แป้งมันสำปะหลัง 10 (B) 80 : 20, (C) 70 : 30 โดยในทุกสูตรของพอลิเมอร์ผสม ส่วนของผงเพตได้ผ่านการดัดแปรด้วยสารช่วยผสมความเข้มข้น 30 g/100 g PET 62