ฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ดัดแปร

นางสาววรรษา ทิพย์สุวรรณกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CO-EXTRUSION FILMS FROM POLY(LACTIC ACID)/POLY(BUTYLENE SUCCINATE) BLENDS REINFORCED WITH MODIFIED ORGANOCLAY

Miss Wansa Thipsuwannakul

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

550721

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันจากพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กทิกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ดัดแปร
โดย	นางสาววรรษา ทิพย์สุวรรณกุล
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกูลกิจ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิรีรัตน์ จารุจินดา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.สุภโชค ตันพิชัย)

วรรษา ทิพย์สุวรรณกุล : ฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันจากพอลิเมอร์ผสมพอลิแล็กทิกแอซิด/พอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ดัดแปร. (CO-EXTRUSION FILMS FROM POLY(LACTIC ACID)/POLY(BUTYLENE SUCCINATE) BLENDS REINFORCED WITH MODIFIED ORGANOCLAY อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, 139 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิแล็กทิกแอซิดด้วยการเตรียมเป็นฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดกับพอลิบิวทิลีนซักซิเนต รวมทั้งปรับปรุงสมบัติของฟิล์มที่ได้ด้วยการเติมออร์แกโนเคลย์ โดยเริ่มจากนำพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตมาผสมแบบหลอมเหลวในเครื่องอัดรีดสกรูคู่ด้วยอัตราส่วนของพอลิบิวทิลีนซักซิเนตร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยน้ำหนัก แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดฟิล์ม ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเติมพอลิบิวทิลีนซักซิเนตทำให้ความทนแรงดึงและมอดุลัสดึงลดลง แต่สามารถเพิ่มความยืดสูงสุด ณ จุดขาดได้ นอกจากนี้ยังได้เตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมซึ่งมีการเติมออร์แกโนเคลย์ที่ปริมาณ 0.5 1 และ 3 phr พบว่าฟิล์มที่ใช้ออร์แกโนเคลย์ที่ปริมาณ 0.5 และ 1 phr มีสมบัติเชิงกลไม่ว่าจะเป็นความทนแรงดึง มอดุลัสดึง ความยืดสูงสุด ณ จุดขาด รวมทั้งความทนแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้น แต่กลับลดลงที่ 3 phr เมื่อทดลองนำออร์แกโนเคลย์มาดัดแปรด้วยไกลซิดอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลนแล้วนำมาใช้ในฟิล์มพอลิเมอร์ผสมในปริมาณ 1 phr พบว่าแม้สมบัติเชิงกลของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมจะสูงกว่าฟิล์มพอลิแล็กทิกแอซิด แต่กลับด้อยกว่าฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ออร์แกโนเคลย์ที่ไม่ได้ดัดแปร จึงเลือกใช้พอลิเมอร์ผสมที่เติมออร์แกโนเคลย์ที่ปริมาณ 0.5 และ 1 phr มาขึ้นรูปเป็นฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันกับพอลิแล็กทิกแอซิด พบว่าฟิล์มโคเอ็กทรูชันมีความทนแรงดึง มอดุลัสดึง และความทนแรงฉีกขาดสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเมอร์ผสมชั้นเดียว ในขณะที่ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดลดลงเล็กน้อย ส่วนเสถียรภาพทางความร้อนของฟิล์มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต วรรษา ทิพย์สุวรรณกุล

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2555

#5472091723: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS :POLY(LACTIC ACID) / POLY(BUTYLENE SUCCINATE)/ COEXTRUSION FILMS / POLYMER BLENDING/ ORGANOCLAY

WANSA THIPSUWANNAKUL CO-EXTRUSION FILMS FROM POLY(LACTIC ACID)/POLY(BUTYLENE SUCCINATE) BLENDS REINFORCED WITH MODIFIED ORGANOCLAY. ADVISOR: ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., 139 pp.

This research focused on improving properties of poly(lactic acid) (PLA) by preparing as co-extrusion films with PLA/poly(butylene succinate) (PBS) blends. In addition, organoclay was also incorporated in order to improve properties of the films. PLA and PBS were initially melt-mixed in a twin-screw extruder at the ratios of PBS of 0, 25, 50, 75 and 100 %wt. The blends were processed into films by a chill-roll cast extruder. The results indicated that when the amount of PBS in the blends increased, the tensile strength and modulus decreased but the elongation at break increased. Furthermore, the blend films with 0.5 1 and 3 phr of organoclay were also prepared. At the amount of 0.5 and 1 phr, the mechanical properties including tensile strength, modulus, elongation at break and tear strength improved but decreased again at the amount of 3 phr. The organoclay was also modified by glycidoxypropylmethoxy silane (GPS) and then used as an additive in the blend films at 1 phr. It was found that although the mechanical properties were higher than PLA film but lower than the blend films with organoclay. PLA/PBS blends with organoclay at 0.5 and 1 phr were then processed into co-extrusion films along with PLA. The tensile strength, modulus and tear strength of the co-extrusion films were higher than those of single-layer films, while the elongation at break slightly decreased. The thermal stability of films was almost unchanged.

Department : Materials Science Student's Signature วรรษา ทิพย์สุวรรณกุล

Field of Study : Applied Polymer Science and Textile Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสผู้วิจัยในการทำวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งการให้ความรู้ ให้คำปรึกษา และการให้แนะนำ ตลอดจนถึงการเอาใจใส่ดูแลและเสียสละเวลาในการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษาผู้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเลียมและวัสดุ ที่อุดหนุนทุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี ที่สละเวลามาเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.กาวี ศรีกูลกิจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิรีรัตน์ จารุจินดา และอาจารย์ ดร.สุภโชค ตันพิชัย ที่สละเวลามาเป็นกรรมสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในระหว่างการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคน ที่คอยให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือในการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ตลอดมา จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฌ

สารบัญรูป..... ญ

บทที่

1 บทนำ..... 1

2 วารสารปริทรรศน์..... 3

2.1 พอลิแล็กทิกแอซิด..... 3

2.2 พอลิบิวทิลีนซักซิเนต..... 7

2.3 แร่ดิน..... 9

2.4 ฟิล์มพลาสติก..... 16

2.5 ฟิล์มหลายชั้น..... 18

2.6 กระบวนการขึ้นรูป..... 20

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 31

3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 35

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานและแผนการดำเนินการทดลอง..... 35

3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 35

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 36

3.4 ขั้นตอนการทดลอง..... 37

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	53
4.1 สมบัติของพอลิเมอร์ผสม	53
4.1.1 สมบัติทางความร้อน	53
4.1.2 ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต	58
4.2 สมบัติของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชัน	60
4.2.1 สมบัติด้านแรงดึง	60
4.2.2 สมบัติความต้านทานแรงฉีกขาด	67
4.3 สัณฐานวิทยาของฟิล์ม	70
4.4 อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซออกซิเจน	73
5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	78
รายการอ้างอิง	82
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก	87
ภาคผนวก ข	95
ภาคผนวก ค	100
ภาคผนวก ง	103
ภาคผนวก จ	122
ภาคผนวก ฉ	141
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	142

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการผสมขึ้นรูปพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต..... 38

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนการผสมขึ้นรูปพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่ใช้ออร์แกโนเคลย์เป็นตัวเติมเสริมแรง..... 39

ตารางที่ 3.3 ภาวะอุณหภูมิในการผสมขึ้นรูปพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่ใช้ออร์แกโนเคลย์เป็นสารเสริมแรง..... 40

ตารางที่ 3.4 ส่วนประกอบของฟิล์ม..... 42

ตารางที่ 3.5 ภาวะอุณหภูมิในการขึ้นรูปฟิล์มชั้นเดียวด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม..... 44

ตารางที่ 3.6 ภาวะอุณหภูมิในการขึ้นรูปฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่ประกบด้วยชั้นของ PLA ด้วยเครื่องรีดหล่อฟิล์ม..... 45

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต..... 56

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์ดัดแปรในปริมาณ 1 phr..... 58

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิแล็กทิกแอซิด..... 4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีไอโซเมอร์ต่างๆ ของพอลิแล็กไทด์..... 5
รูปที่ 2.3 สลายตัวของพอลิแล็กทิกแอซิดแบบไฮโดรไลซิส..... 7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างพอลิบิวทิลีนซักซิเนต..... 7
รูปที่ 2.5 กระบวนสังเคราะห์พอลิบิวทิลีนซักซิเนต..... 8
รูปที่ 2.6 กระบวนการ 1,4 บิวเทนไดออลจากกระบวนการหมัก..... 8
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์..... 10
รูปที่ 2.8 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับแคตไอออนที่อยู่ระหว่างชั้นดิน..... 11
รูปที่ 2.9 การปรับปรุงสภาพพื้นผิวของดินเหนียว..... 12
รูปที่ 2.10 การแลกเปลี่ยนประจุแคตไอออนที่อยู่ในดินกับแคตไอออนอื่นๆ..... 13
รูปที่ 2.11 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์คอมโพสิต..... 15
รูปที่ 2.12 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single screw extruder) 22
รูปที่ 2.13 โซนการทำงานของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว..... 24
รูปที่ 2.14 ลักษณะการหมุนของสกรูในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ 26
รูปที่ 2.15 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder)..... 27
รูปที่ 2.16 แผนภาพเครื่องรีดหล่อฟิล์ม (chill roll casting)..... 30
รูปที่ 2.17 โครงสร้างสารที่ใช้ดัดแปรออร์แกโนเคลย์..... 32
รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) ของ Labtech engineering company รุ่น LTE-26-44..... 38
รูปที่ 3.2 เครื่องตัดเม็ดพลาสติก (pelletizer cutting machine) ของ Labtech engineering company รุ่น LZ-120/vs..... 41
รูปที่ 3.3 เครื่องรีดหล่อฟิล์ม (chill roll casting) ของ Labtech engineering company รุ่น LCR-300HDCO-EX 43

หน้า

รูปที่ 3.4 เครื่องเทอร์โมกราวิเมทริก (thermogravimetric analysis, TGA) ของ Mettler Toledo รุ่น TGA/SDTA851^e 46

รูปที่ 3.5 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงแคลอริเมทรี (differential scanning calorimetry, DSC) ของ Netzsch รุ่น 204 F1..... 47

รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบดรรชนีการหลอมไหล (melt flow index) ของ A dynisco company..... 48

รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ของ LLOYD รุ่น LR100K..... 49

รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ของ LLOYD รุ่น LF plus..... 50

รูปที่ 3.9 เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของ MOCON รุ่น PERMATRAN-W ® 3/33... 50

รูปที่ 3.10 เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของ SYSTECH Illinois รุ่น 8000..... 51

รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ Jeol รุ่น JSM 6480..... 52

รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัวด้วยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต..... 53

รูปที่ 4.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัวด้วยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์ 0.5 phr 54

รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการสลายตัวด้วยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์ 1 phr 54

หน้า

รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต..... 55
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตที่มีการเติมออร์แกโนเคลย์ดัดแปรในปริมาณ 1 phr..... 57
รูปที่ 4.6 ดรรชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์..... 59
รูปที่ 4.7 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่อัตราส่วนต่างๆ..... 60
รูปที่ 4.8 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่อัตราส่วนต่างๆ..... 61
รูปที่ 4.9 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่อัตราส่วนต่างๆ..... 61
รูปที่ 4.10 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์และออร์แกโนเคลย์ดัดแปรในปริมาณ 1 phr..... 63
รูปที่ 4.11 มอดุลัสดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์และออร์แกโนเคลย์ดัดแปรที่ปริมาณ 1 phr 64
รูปที่ 4.12 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์และออร์แกโนเคลย์ดัดแปรที่ปริมาณ 1 phr..... 64
รูปที่ 4.13 ความทนแรงดึงของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่อัตราส่วนต่างๆ..... 65
รูปที่ 4.14 มอดุลัสดึงของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่อัตราส่วนต่างๆ..... 66
รูปที่ 4.15 ความยืดสูงสุด ณ จุดขาดของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่อัตราส่วนต่างๆ..... 66

หน้า

รูปที่ 4.16 ฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ที่อัตราส่วนต่างๆ..... 68
รูปที่ 4.17 ความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมเสริมแรงระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตด้วยออร์แกโนเคลย์ที่ดัดแปรและไม่ได้ดัดแปร..... 69
รูปที่ 4.18 ค่าความต้านทานแรงฉีกขาดของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันที่อัตราส่วนต่างๆ..... 70
รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตในอัตราส่วน (a) 75/25 (b) 50/50 และ (c) 25/75..... 71
รูปที่ 4.20 สัณฐานวิทยาของพื้นที่หน้าตัดของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนตในอัตราส่วน (a) 75/25 (b) 50/50 และ (c) 25/75 ตามลำดับโดยมีการเติมออร์แกโนเคลย์ที่ไม่ได้ดัดแปรในปริมาณ 1 phr..... 72
รูปที่ 4.21 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต..... 73
รูปที่ 4.22 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิแล็กทิกแอซิดและพอลิบิวทิลีนซักซิเนต..... 74
รูปที่ 4.23 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชัน..... 75
รูปที่ 4.24 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชัน..... 76
รูปที่ 4.25 อัตราการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มโคเอ็กทรูชันเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ปริมาณ 0.5 phr..... 77
รูปที่ 4.26 อัตราการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนของฟิล์มโคเอ็กซ์ทรูชันเสริมแรงด้วยออร์แกโนเคลย์ปริมาณ 0.5 phr..... 77