

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของ ฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต
นักศึกษา	นางสาว ภัทรพร สวงนิตย์
รหัสประจำตัว	48067901
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุล 2 ทิศทาง (Biaxially Oriented Polypropylene : BOPP) มีการใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อย่างแพร่หลาย แต่มีข้อจำกัดในด้านการผลิตเนื่องจากเครื่องขึ้นรูปมีราคาแพง ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอการเตรียมฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (Polypropylene nanocomposites : PP/m-MMT) เพื่อศึกษาผลของสารช่วยผสมจำพวกพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafted Maleic Anhydride : PP-g-MA) และพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิก (Polypropylene grafted Acrylic Acid : PP-g-AA) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณหมู่ฟังก์ชันแตกต่างกัน รวมถึงผลของออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) เกรด Cloisite[®] 20A และ Claytone[®] HY ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT เพื่อพัฒนาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT ได้แก่ อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ ชนิดออร์กาโนเคลย์ ชนิดสารช่วยผสม ปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสม และอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) การเตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตดำเนินการด้วยเทคนิคการผสมแบบหลอมเหลวด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) และขึ้นรูปด้วยเทคนิคการผลิตฟิล์มแบบแผ่น (Flat film) จากนั้นทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม PP/m-MMT ที่เตรียมได้ เช่น สมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสถานะวิทยา จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1 และการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA เกรด Priex[®] 20095 ที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และมีโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน MA ที่มีปริมาณมาก รวมทั้งการเติมออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A จะส่งผลให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีการพัฒนาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าการลดปริมาณออร์กาโนเคลย์และการเพิ่มอัตราส่วนการดึง จะทำให้สมบัติการด้านการซึม

ผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/m-MMT มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากการศึกษาตามปัจจัยข้างต้นทำให้สามารถพัฒนาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และสมบัติเชิงกลได้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ที่มีการใช้ในงานฟิล์มบรรจุภัณฑ์อย่างแพร่หลาย

Thesis Title	Effects of Compatibilizers and Organoclays on Properties of Polypropylene Nanocomposite Films
Student	Miss Patrapon Sanguansat
Student ID.	48067901
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud
Thesis co-Advisor	Assoc.Prof.Dr. Taweechai Amornsakchai

ABSTRACT

In the present time, Biaxially Oriented Polypropylene (BOPP) films are widely used in packaging industries. Producing BOPP films is limited because of expensive machine investment. This research work was focused on studying effects of compatibilizers (polypropylene grafted maleic anhydride : (PP-g-MA) and polypropylene grafted acrylic acid : (PP-g-AA)), which had different molecular weights and percent grafted functional groups, and commercial organoclays (Cloisite[®] 20A and Claytone[®] HY) on properties of novel polypropylene nanocomposites (PP/m-MMT) films for development of barrier properties and mechanical properties to be comparable to those of BOPP films. Factors affecting PP/m-MMT films were investigated including optimum ratio between compatibilizer and organoclay, types of organoclay, types of the compatibilizers, % organoclay loadings and draw ratios. Nanocomposite materials were prepared by melt blending technique. The materials were first mixed by a twin screw extruder and shaped into samples by flat films technique. The samples were then characterized for barrier properties, mechanical properties, thermal properties and morphological properties. It was found that the optimum ratio between compatibilizer and organoclay in this work was at 2 to 1. Optimum barrier properties and mechanical properties of the PP/m-MMT films were improved by adding the PP-g-MA Priex[®] 20095 compatibilizer, which had low molecular weight and high percent grafted functional groups, and Cloisite[®] 20A organoclay. Furthermore, barrier properties and mechanical properties of the PP/m-MMT films were increased as the % organoclay loading decreased as well as the draw ratios increased. In this study, adding organoclay can enhance barrier properties and mechanical properties close to those of BOPP film. Nanocomposites film might be a promising material to be used in commercial film packaging.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่กรุณาอบรมสั่งสอนให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและความดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ทวิชัย อมรศักดิ์ชัย ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและความรู้ที่เป็นประโยชน์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งการอนุเคราะห์ห่อออร์กาโนเคลย์และเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม

ขอขอบคุณ คุณพรชัย แสงรุ่งศรี บริษัท SCG Chemicals จำกัด ที่คอยชี้แนะแนวทางในการศึกษางานวิจัย รวมทั้งการอนุเคราะห์เม็ดพอลิพรอพิลีนและออร์กาโนเคลย์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ดร.สมบัติ ธนวันต์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อนุวัตร แจ่มชัด ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาอนุเคราะห์การทดสอบสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ขอขอบคุณบริษัท Solvay Chemical จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์สารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

ขอขอบคุณบริษัท Crompton จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์สารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิก

ขอขอบคุณบริษัท Mettler-Toledo จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์การทดสอบ DSC

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ คุณสุคใจ และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้อง ชาวพอลิเมอร์และปิโตรเคมีทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ การชี้แนะและกำลังใจและบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือและให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ “ครอบครัวสงวนสัตย์” ทุกท่านที่คอยเป็นกำลังใจและแรงบันดาลใจ ปลุกดันให้ก้าวเดินไปข้างหน้า ขอขอบคุณคุณพ่อสำหรับแรงสนับสนุนในทุกๆ ด้านและทำให้ลูกรู้สึกภูมิใจในตนเอง ขอขอบคุณพี่นิกสำหรับความรักและความเอาใจใส่ ขอขอบคุณพี่แคนสำหรับการดูแลเป็นอย่างดีเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดาและบุคคลอันเป็นที่เคารพรัก ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ภัทรพร สงวนสัตย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญรูป.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์โครงงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.2 พอลิพรอพิลีน.....	8
2.3 เคลย์ (Clay).....	11
2.3.1 ข้อดีของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์.....	12
2.4 นาโนเคลย์หรือออร์กาโนเคลย์ (Nanoclay หรือ Organoclay).....	12
2.5 พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Polymer Nanocomposites).....	13
2.5.1 ประโยชน์ของนาโนคอมโพสิต.....	15
2.6 สารช่วยผสม (Compatibilizers).....	16
2.7 เครื่องจักรสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น.....	17
2.8 ฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสองทิศทาง.....	19
2.8.1 กระบวนการจัดเรียงโมเลกุล.....	19
2.8.2 ลักษณะของฟิล์ม BOPP.....	21
2.8.3 การนำไปใช้งานของฟิล์ม BOPP.....	21
2.9 สมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพลาสติกนาโนคอมโพสิต.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9.1 คำจำกัดความของสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	21
2.9.2 การคำนวณสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	22
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	29
3.3.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ ในฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (PP/m-MMT).....	29
3.3.2 การศึกษาชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	31
3.3.3 การศึกษาชนิดของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	32
3.3.4 การศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	32
3.3.5 การศึกษาอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	33
3.3.6 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	33
3.3.6.1 การตรวจสอบลักษณะของแผ่นฟิล์ม.....	33
3.3.6.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	33
3.3.6.3 การศึกษาระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ของออร์กาโนเคลย์.....	34
3.3.6.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	34
3.3.6.5 การศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	35
3.3.6.6 การศึกษาสัณฐานวิทยา.....	35
3.3.6.7 การทดสอบค่าดัชนีการไหล.....	36
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	37
4.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ ในพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (PP/m-MMT)	38
4.2 ผลการศึกษาชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	43
4.2.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT.....	43
4.2.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล.....	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์.....	45
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	46
4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	48
4.2.6 ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยา.....	50
4.2.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล.....	52
4.3 ผลการศึกษานิคของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	56
4.3.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT.....	56
4.3.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล.....	57
4.3.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์.....	58
4.3.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	59
4.3.5 ผลการศึกษสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	60
4.3.6 ผลการศึกษพื้นฐานวิทยา.....	62
4.3.7 ผลการศึกษสมบัติเชิงกล.....	65
4.4 ผลการศึกษปริมาตรออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	67
4.4.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT.....	67
4.4.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล.....	68
4.4.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์.....	69
4.4.4 ผลการศึกษสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	70
4.4.5 ผลการศึกษพื้นฐานวิทยา.....	72
4.4.6 ผลการศึกษสมบัติทางความร้อน.....	74
4.4.7 ผลการศึกษสมบัติเชิงกล.....	75
4.5 ผลการศึกษอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	78
4.5.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP	78
4.5.2 ผลการศึกษสมบัติทางความร้อน.....	80
4.5.3 ผลการศึกษสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	81
4.5.4 ผลการศึกษสมบัติเชิงกล.....	84

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ใน พอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (PP/m-MMT).....	88
5.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิพรอพิลีนเปรียบเทียบกับฟิล์ม PP/m-MMT.....	88
5.3 การศึกษาชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	89
5.4 การศึกษาปริมาณสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	89
5.5 การศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	89
5.6 การศึกษาอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	89
5.7 การศึกษาสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP	90
5.8 ข้อเสนอแนะ.....	90
เอกสารอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	95
ภาคผนวก ข การคำนวณหาปริมาณออร์กาโนเคลย์.....	111
ภาคผนวก ค การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	112
ภาคผนวก ง การทดสอบสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	114
ภาคผนวก จ การคำนวณอัตราส่วนการดึง (Draw ratio).....	116
ภาคผนวก ฉ การคำนวณค่าสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) ของอนุภาคซิลิกา.....	117
ประวัติผู้เขียน.....	119

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณออร์กาโนเคลย์ (Cloisite [®] 20A) ที่เหมาะสมต่อการลดการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจนให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ที่อนุภาคซิลิกเกตมีค่า Aspect ratio ต่างๆ ตามทฤษฎี Tortuosity.....	25
3.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีนเกรด El-Pro [®] P400S.....	27
3.2 สมบัติของสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ เกรด Priex [®] 20093 และ Priex [®] 20095	27
3.3 สมบัติของสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิก เกรด Polybond [®] 1001 และ Polybond [®] 1002	28
3.4 สมบัติของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A และ Claytone [®] HY	28
3.5 สูตรผสม PP/m-MMT ที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.6 สภาวะที่ใช้ในการผสม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	31
3.7 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับ กระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น.....	31
3.8 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับ กระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นกรณีศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์.....	32
3.9 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับ กระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นกรณีศึกษาอัตราส่วนการดึง.....	33
4.1 อักษรย่อแทนสูตรต่างๆ.....	37
4.2 ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A และ ออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT ที่เติมสารช่วยผสมเกรด Priex [®] 20093, Priex [®] 20095, Polybond [®] 1001 และ Polybond [®] 1002 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 และ 3:1.....	41
4.3 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	43
4.4 ค่าความร้อนการไหล (230°C /2.16 kg) ของ PP และPP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	45

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	47
4.6 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	47
4.7 Tortuosity factor (τ) และค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาเกิดในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	49
4.8 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	56
4.9 ค่าดัชนีการไหล ($230^{\circ}\text{C} / 2.16 \text{ kg}$) ของสารช่วยผสมสูตร P93, P95, P01 และ P02 และ PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	58
4.10 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	59
4.11 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	60
4.12 Tortuosity factor (τ) และค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาเกิดในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	62
4.13 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	68
4.14 ค่าดัชนีการไหล ($230^{\circ}\text{C} / 2.16 \text{ kg}$) ของ PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	69
4.15 Tortuosity factor (τ) และค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาเกิดในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	71
4.16 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	75
4.17 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	75
4.18 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.19 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	80
4.20 ปริมาณออร์กาโนเคลย์ (Cloisite® 20A) ที่เหมาะสมต่อการลดการซึมผ่านของ ก๊าซออกซิเจนให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ที่อนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio ต่างๆ ตามทฤษฎี Tortuosity.....	83

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กำลังการผลิตแผ่นฟิล์มชนิดต่างๆ.....	1
1.2 ตัวอย่างการใช้งานของฟิล์ม BOPP (a) บรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนกึ่งสำเร็จรูป และ (b) วัสดุยัดติด.....	2
2.1 โครงสร้างของพอลิพรอพิลีน.....	9
2.2 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของพอลิพรอพิลีนแบบต่างๆ.....	9
2.3 ตัวอย่างการใช้งานของพอลิพรอพิลีน (a) อุปกรณ์เครื่องใช้และ (b) เส้นใย.....	10
2.4 กระบวนการผลิตพอลิพรอพิลีน.....	10
2.5 โครงสร้างผลึกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์	11
2.6 (ซ้าย) แสดงเซลล์ที่มีชั้นซลิเกตและประจุบวก (ขวา) แสดงออร์กาโนเซลล์ที่ ประจุเดิมถูกแทนที่ด้วยประจุบวกของสารอินทรีย์.....	12
2.7 ตัวอย่างแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์.....	13
2.8 โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตที่มีเซลล์เป็นส่วนเสริมแรง a) วัสดุคอมโพสิตที่มีเซลล์กระจายแบบแยกวัฏภาค (Phase separated microcomposite) b) นาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposite) c) นาโนคอมโพสิตชนิดแตกกระจาย (Exfoliated nanocomposite).....	15
2.9 โครงสร้างของสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	17
2.10 โครงสร้างของสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิก.....	17
2.11 เครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น.....	18
2.12 กระบวนการผลิตฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสองทิศทาง.....	20
2.13 โครงสร้างของอนุภาคซลิเกตที่กระจายอนุภาคอยู่ในพลาสติกนาโนคอมโพสิต เพื่อสกัดกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซ (Tortuous path)	23
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในรูปอัตราส่วนของ P_s / P_p และสัดส่วนโดยปริมาตรของซลิเกต (ϕ_s).....	24
3.1 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงลักษณะ (a) ทิศทาง TD และ (b) ทิศทาง MD.....	34
4.1 XRD patterns ของออร์กาโนเซลล์เกรด Cloisite [®] 20A และ PP/m-MMT ที่เติม สารช่วยผสมเกรด Priex [®] 20093 และออร์กาโนเซลล์เกรด Cloisite [®] 20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเซลล์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1.....	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A และ PP/m-MMT ที่เติม สารช่วยผสมเกรด Priex [®] 20095 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 และ 3:1.....	39
4.3 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A และ PP/m-MMT ที่เติม สารช่วยผสมเกรด Polybond [®] 1001 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1.....	40
4.4 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A และ PP/m-MMT ที่เติม สารช่วยผสมเกรด Polybond [®] 1002 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1.....	40
4.5 ตัวอย่าง (a) फिल्म PP (b) फिल्म PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ (c) फिल्म PP/m-MMT สูตร P95-20A6 (ด้านซ้ายของรูปแสดงพื้นหลังส่วนด้านขวาของรูปแสดง ฟิล์ม PP/m-MMT).....	44
4.6 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone [®] HY และ Cloisite [®] 20A และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	46
4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	49
4.8 ภาพตัดขวาง (Cross section) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) โดยการหัก ฉีกงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM) ของ (a) फिल्म PP (b) फिल्म PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ (c) फिल्म PP/m-MMT สูตร P95-20A6 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	51
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 ในทิศทาง MD และ TD.....	53
4.10 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	54
4.11 ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ค่าความแข็งแรงนิกษาคของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร 95-HY6 และ P95-20A6.....	55
4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	56
4.14 ตัวอย่าง (a) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6 (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P01-20A6 และ (d) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P02-20A6.....	57
4.15 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite® 20A และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	59
4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6	61
4.17 ภาพตัดขวางในทิศทางตามแนวเครื่องจักร โดยการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (a) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6 (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P01-20A6 และ (d) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P02-20A6 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	64
4.18 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	65
4.19 ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	66
4.20 ค่าความแข็งแรงนิกษาคของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	66
4.21 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ผน จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	67
4.22 ตัวอย่าง (a) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 และ (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A9	68
4.23 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite® 20A และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และ ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	71
4.25 ภาพตัดขวางในทิศทางตามแนวเครื่องจักรโดยการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (a) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 และ (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A9 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	74
4.26 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	76
4.27 ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	77
4.28 ค่าความแข็งแรงนิกษาคของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	77
4.29 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	78
4.30 ตัวอย่าง (a) ฟิล์ม BOPP และ (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19 (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D25 และ (d) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42.....	79
4.31 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	82
4.32 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	84
4.33 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	85
4.34 ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	86
4.36 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	86