

ผลของสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของ
ฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต

EFFECTS OF COMPATIBILIZERS AND ORGANOCLAYS ON PROPERTIES
OF POLYPROPYLENE NANOCOMPOSITE FILMS

ภัทรพร สงวนสิทธิ์
PATRAPON SANGUANSAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-SC-M-014-068

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของ
ฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต

EFFECTS OF COMPATIBILIZERS AND ORGANOCCLAYS ON PROPERTIES
OF POLYPROPYLENE NANOCOMPOSITE FILMS



ภัทรพร สวงนสตัย

PATRAPON SANGUANSAT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **76680**
วัน,เดือน,ปี..... - 6 S.ค. 2550

b. 11848637
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-SC-M-014-068

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

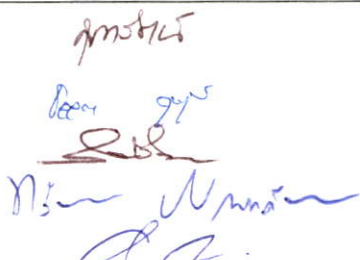
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิพรอพิลีน
นาโนคอมโพสิต
Effects of Compatibilizers and Organoclays on Properties of Polypropylene
Nanocomposite Films

ชื่อนักศึกษา นางสาวภัทรพร สงวนศักดิ์
รหัสประจำตัว 48067901
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์	
ดร.สมบัติ ชนะวันต์	
รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย	
รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 26 กันยายน 2550 เวลา 09.30 น. เป็นต้นไป
สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 301

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๒๖.....เดือน.....๓๑๙๕๐.....พ.ศ.....๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต
นักศึกษา	นางสาว ภัทรพร สงวนศักดิ์
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 จากการศึกษา
ตามปัจจัยข้างต้นทำให้สามารถพัฒนาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน และสมบัติ
เชิงกลได้ใกล้เคียงกับฟิล์ม 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 แจ่มจักษ์ ที่กรุณาอบรมสั่งสอนให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อเสนอแนะและความดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณ รศ.ดร.ทวิชัย อมรศักดิ์ชัย ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและความรู้ที่เป็นประโยชน์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งการอนุเคราะห์ห่อกระดาษและเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม

ขอขอบคุณ คุณพรชัย แสงรุ่งศรี บริษัท SCG Chemicals จำกัด ที่คอยชี้แนะแนวทางในการศึกษางานวิจัย รวมทั้งการอนุเคราะห์เม็ดพอลิพรอพิลีนและออร์กาโนเคลย์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และ ดร.สมบัติ ชนะวันต์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อนุวัตร แจ่มจักษ์ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่กรุณาอนุเคราะห์การทดสอบสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ขอขอบคุณบริษัท Solvay Chemical จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์สารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

ขอขอบคุณบริษัท Crompton จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์สารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิก

ขอขอบคุณบริษัท Mettler-Toledo จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์การทดสอบ DSC

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ คุณสุใจ และเจ้าหน้าที่ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้อง ชาวพอลิเมอร์และปิโตรเคมีทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ การชี้แนะและกำลังใจและบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ ที่นี้ ที่มีส่วนช่วยเหลือและให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ “ครอบครัวสงวนสัตย์” ทุกท่านที่คอยเป็นกำลังใจและแรงบันดาลใจ ผลักดันให้ก้าวเดินไปข้างหน้า ขอขอบคุณคุณพ่อสำหรับแรงสนับสนุนในทุกๆ ด้านและทำให้ดูรู้สึกรักภูมิใจในตนเอง ขอขอบคุณพี่นิกสำหรับความรักและความเอาใจใส่ ขอขอบคุณพี่เคนสำหรับการดูแลเป็นอย่างดีเสมอมา

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 ข้อดีของแรคตินมอนต์มอริลโลไนต์.....	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 การทดสอบค่าครรชนีการไหล.....	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 ผลการศึกษาค่าครรชนีการไหล.....	44

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์.....	45
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	46
4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	48
4.2.6 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา.....	50
4.2.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล.....	52
4.3 ผลการศึกษาชนิดของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	56
4.3.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT.....	56
4.3.2 ผลการศึกษาค่าครรชนิกการไหล.....	57
4.3.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์.....	58
4.3.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	59
4.3.5 ผลการศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	60
4.3.6 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา.....	62
4.3.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล.....	65
4.4 ผลการศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	67
4.4.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT.....	67
4.4.2 ผลการศึกษาค่าครรชนิกการไหล.....	68
4.4.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์.....	69
4.4.4 ผลการศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	70
4.4.5 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา.....	72
4.4.6 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	74
4.4.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล.....	75
4.5 ผลการศึกษาอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT.....	78
4.5.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	78
4.5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน.....	80
4.5.3 ผลการศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน.....	81
4.5.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล.....	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 ที่อนุภาคซิลิเกตมีค่า 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 สมบัติของสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกเอซิก 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 กระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นกรณีศึกษาอัตราส่วนการคั่ง.....	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 ค่าครรชนีการไหล (230 ^o 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 ของอนุภาคซิลิกาในฟิล์ม 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 ค่าครรชนิกการไหล ($230^{\circ}\text{C} / 2.16 \text{ kg}$) 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 ของอนุภาคซิลิกาในฟิล์ม 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 ค่าครรชนิกการไหล ($230^{\circ}\text{C} / 2.16 \text{ kg}$) ของ PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	69
4.15 Tortuosity factor (τ) และค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาในฟิล์ม 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) วัสดุยึดติด.....2
2.1	โครงสร้างของพอลิพรอพิลีน.....9
2.2	โครงสร้างการจัดเรียงตัวของพอลิพรอพิลีนแบบต่างๆ.....9
2.3	ตัวอย่างการใช้งานของพอลิพรอพิลีน (a) อุปกรณ์เครื่องใช้และ (b) เส้นใย.....10
2.4	กระบวนการผลิตพอลิพรอพิลีน.....10
2.5	โครงสร้างผลึกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์11
2.6	(ซ้าย) แสดงเคลย์ที่มีชั้นซิลิเกตและประจุบวก (ขวา) แสดงออร์กาโนเคลย์ที่ ประจุเดิมถูกแทนที่ด้วยประจุบวกของสารอินทรีย์.....12
2.7	ตัวอย่างแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์.....13
2.8	โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตที่มีเคลย์เป็นส่วนเสริมแรง a) วัสดุคอมโพสิตที่มีเคลย์กระจายแบบแยกวัฏภาค (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	โครงสร้างของอนุภาคซิลิเกตที่กระจายอนุภาคอยู่ในพลาสติกนาโนคอมโพสิต เพื่อสกัดกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซ (Tortuous path)23
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในรูปอัตราส่วนของ P_s/P_p และสัดส่วน โดยปริมาตรของซิลิเกต (ϕ_s).....24
3.1	ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด (a) ทิศทาง TD และ (b) ทิศทาง MD.....34
4.1	XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A และ PP/m-MMT ที่เติม สารช่วยผสมเกรด Priex [®] 20093 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite [®] 20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 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) ฟิล์ม PP (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ (c) ฟิล์ม 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 ชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM) ของ (a) ฟิล์ม PP (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ (c) ฟิล์ม 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 ค่ามอดูลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6.....	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร 95-HY6 และ P95-20A6.....	55
4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ 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 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6.....	66
4.21 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ 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 ภาพตัดขวางในทิศทางตามแนวเครื่องจักร โดยการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ 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 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9.....	77
4.29 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ 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)

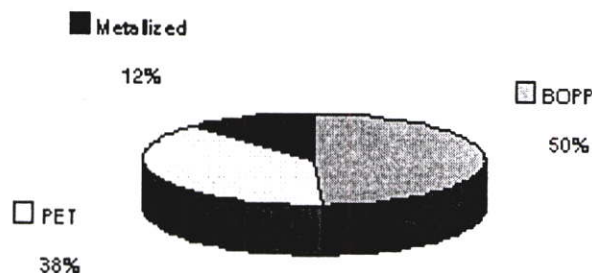
รูปที่	หน้า
4.35 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	86
4.36 ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ ม จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP.....	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมแผ่นฟิล์มในประเทศไทยมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ดังจะเห็นได้จากผลผลิตมีการเติบโตทุกปี นอกจากนี้ความต้องการแผ่นฟิล์มของอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ในตลาดโลกก็เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน จากกำลังการผลิตแผ่นฟิล์มชนิดต่างๆ รวม 74,275 ตัน/ปี [1] ซึ่งมีสายการผลิตแผ่นฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุล 2 ทิศทาง (Biaxially Oriented Polypropylene : BOPP) ประมาณ 36,500 ตัน/ปี สายการผลิตแผ่นฟิล์มพอลิเอสเตอร์ (Polyester : PET) ประมาณ 28,500 ตัน/ปี และสายการผลิตแผ่นฟิล์มเคลือบ โลหะ (Metalized film) ประมาณ 9,275 ตัน/ปี ดังแสดงในรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าสายการผลิตแผ่นฟิล์ม BOPP มีส่วนแบ่งทางการตลาดมากถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนกึ่งสำเร็จรูปโดยผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นซองบรรจุอาหาร ขนมอบเคี้ยว ซองบรรจุสิ่งของต่างๆ เช่น เสื้อผ้า แชมพู กระดาษห่อของขวัญ วัสดุเคลือบผิวไม้และเฟอร์นิเจอร์ และฉนวนกันความร้อน เป็นต้น ทั้งนี้การที่แผ่นฟิล์ม BOPP มีความต้องการในตลาดสูง เนื่องจากเป็นฟิล์มที่มีสมบัติหลากหลายกล่าวคือมีความแข็งแรงใน 2 ทิศทางจึงมีความต้านทานต่อแรงดึงและมอดุลัสสูง ทนต่อการฉีกขาด มีความใส และสามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซได้เป็นอย่างดี ในภาวะอุตสาหกรรมแผ่นฟิล์มเติบโตอย่างต่อเนื่องได้ทำการขยายสายการผลิตแผ่นฟิล์ม BOPP เพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการของตลาดเรื่อยๆ แต่อย่างไรก็ดีการผลิตแผ่นฟิล์ม BOPP มีข้อจำกัดในด้านต้นทุนการผลิต กล่าวคือเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตแผ่นฟิล์มชนิดนี้มีราคาสูงมาก ส่งผลให้แผ่นฟิล์ม BOPP มีราคาสูงตามไปด้วย



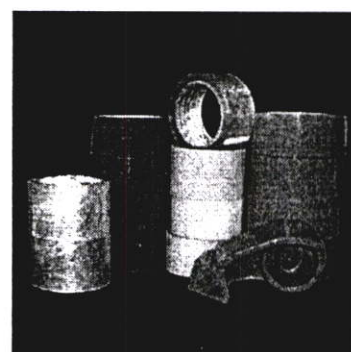
รูปที่ 1.1 กำลังการผลิตแผ่นฟิล์มชนิดต่างๆ [1]

นอกจากนี้ฟิล์มพอลิพรอพิลีน (Polypropylene : PP) ก็มีการใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ เช่นเดียวกันเนื่องจากมีความแข็งแรงและคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง มีความใสและสามารถขึ้นรูปขึ้นงานได้หลากหลายวิธี ประกอบกับเครื่องจักรที่ใช้ในการขึ้นรูปมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและราคาถูก แต่อย่างไรก็ดีฟิล์ม PP ยังคงมีสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซและสมบัติเชิงกลด้อยกว่าฟิล์ม BOPP

ในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมาวงการวิชาการและอุตสาหกรรมนานาชาติรวมทั้งประเทศไทยต่างให้ความสนใจเกี่ยวกับนวัตกรรมวัสดุประเภทนาโนคอมโพสิต (Nanocomposites) เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติบางประการให้มีสมบัติเด่นกว่าวัสดุพลาสติกเสริมแรงทั่วไป เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซและความเสถียรทางความร้อน โดยใช้ส่วนเสริมแรงที่มีขนาดเล็กในช่วงนาโนเมตร (10^{-9} เมตร) จากการคำนวณตามทฤษฎี Tortuosity [30] พบว่าการเติมออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ปริมาณ 9 % โดยน้ำหนัก โดยที่อนุภาคซิลิเกตมีค่าสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) เท่ากับ 100 หรือการเติมออร์กาโนเคลย์ ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก ลงในฟิล์ม PP/m-MMT และอนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio เท่ากับ 250 จะสามารถลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์มนาโนคอมโพสิตได้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ซึ่งพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเตรียมขึ้นงานในรูปฟิล์มนาโนคอมโพสิต เพื่อลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (Polypropylene nanocomposites : PP/m-MMT) โดยศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT เช่น ชนิดออร์กาโนเคลย์ ชนิดสารช่วยผสม ปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมและอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) เพื่อปรับปรุงสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลให้ใกล้เคียงกับแผ่นฟิล์ม BOPP เนื่องจากการขึ้นรูปฟิล์ม PP/m-MMT สามารถใช้เครื่องจักรชนิดเดียวกับการขึ้นรูปฟิล์ม PP ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและราคาถูก จึงสามารถขยายฐานการผลิตได้อย่างรวดเร็วและสามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้



(a)



(b)

รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการใช้งานของฟิล์ม BOPP (a) บรรจุภัณฑ์ชนิดอ่อนกึ่งสำเร็จรูปและ (b) วัสดุยึดติด [40,43]

นอกจากนี้การเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคของพอลิพรอพิลีน เมตริกซ์และพื้นผิวของอนุภาคเคลย์เป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผสม เนื่องจากสมบัติทางเคมีของเคลย์มีความเป็นขั้วจึงไม่สามารถผสมเข้ากับพอลิพรอพิลีนที่ไม่มีความเป็นขั้วได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเติมสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafted Maleic Anhydride : PP-g-MA) หรือพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิก (Polypropylene grafted Acrylic Acid : PP-g-AA) และเติมออร์กาโนเคลย์เกรดการค้าประเภทอะลูมิเนียม-ซิลิเกต ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นบางเรียงตัวเป็นชั้น ความกว้างหรือยาวของแผ่นออร์กาโนเคลย์มีขนาดประมาณ 1 ไมครอนและหนา 1 นาโนเมตร ทำให้อนุภาคมีค่า Aspect ratio สูงประมาณ 1,000 [2] ซึ่งการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของอนุภาคเคลย์และการเติมสารช่วยผสมจะเป็นการเพิ่มความแข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และอนุภาคเคลย์ นำไปสู่การปรับปรุงสมบัติหรือสร้างพลาสติกชนิดใหม่ที่มีสมบัติโดดเด่นด้านกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการทนความร้อน ความคงรูป และสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซต่างๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มประโยชน์การใช้งานฟิล์ม PP/m-MMT ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคทั่วไปให้มีสมบัติใกล้เคียงและสามารถใช้ทดแทนฟิล์ม BOPP

1.2 วัตถุประสงค์โครงการวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT ให้มีสมบัติใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP โดยเฉพาะสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกล
2. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT เช่น ชนิดออร์กาโนเคลย์ ชนิดสารช่วยผสม ปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมและอัตราส่วนการดึงเป็นต้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการเตรียม PP/m-MMT ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 และ 3:1 เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT
2. ทำการศึกษาผลของออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY หรือ Cloisite[®] 20A ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT
3. ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA (เกรด Priex[®] 20093 และ Priex[®] 20095) หรือสารช่วยผสมชนิด PP-g-AA (เกรด Polybond[®] 1001 และ Polybond[®] 1002) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

4. ทำการศึกษาผลของปริมาณออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 3, 6 และ 9 % โดยน้ำหนัก ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT
5. ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนการดิ่งเท่ากับ 19, 25 และ 42 ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT
6. ทำการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น (Flat film)
7. ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของฟิล์ม PP/m-MMT เช่น สมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจน สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยา

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP
2. สามารถนำผลการศึกษาที่ได้มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เป็นการเพิ่มประโยชน์การใช้งานฟิล์ม PP/m-MMT เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์อื่นๆ ให้มีสมบัติและประโยชน์การใช้งานตามความต้องการ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่าน ให้ความสนใจในการศึกษาค้นคว้างานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตอย่างกว้างขวาง โดยตัวอย่างงานวิจัยมีดังนี้

Lertwimolnun W. และ Vergnes B. [3] ได้ทำการศึกษาพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (Polypropylene nanocomposites : PP/m-MMT) โดยใช้พอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafted Maleic Anhydride : PP-g-MA) เป็นสารช่วยผสม เพื่อพัฒนาความสามารถในการกระจายตัวของเคลย์ (Clay) โดยศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารช่วยผสมและสภาวะของกระบวนการผลิต พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารช่วยผสมจะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของเคลย์ (D-spacing) เพิ่มขึ้น และการใช้เวลาในการผสมนานขึ้นจะเป็นการพัฒนาการแตกตัวของเคลย์อย่างอิสระ (Exfoliation) ของเคลย์ จากการทดลองยังพบว่าการใช้อัตราเร็วของสกรู (Screw speed) เท่ากับ 150 rpm เวลาในการผสม 20 นาที และอุณหภูมิในการผสมเท่ากับ 180°C จะทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีการพัฒนาสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพในการกระจายตัวของเคลย์ที่ดีที่สุด ดังนั้นการเพิ่มแรงเฉือน เวลาในการผสมและการลดอุณหภูมิในการผสมจะนำไปสู่การแตกตัวออกจากกันอย่างอิสระของเคลย์

Nam P.H. และคณะ [4] ศึกษา PP/m-MMT โดยใช้ PP-g-MA เป็นสารช่วยผสม โดยผ่านกระบวนการหลอมเหลว (Melt casting) พบว่าการที่สายโซ่ของพอลิเมอร์สามารถแทรกสอด (Intercalation) เข้าไปในพื้นที่ระหว่างชั้นผลึกซิลิเกตจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น เมื่อเทียบกับพอลิพรอพิลีนที่ไม่มีการเติมเคลย์ แต่ในอีกทางหนึ่งเมื่อทำการเพิ่มปริมาณเคลย์ขึ้นเรื่อยๆ ตำแหน่งการแทรกสอดจะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งการเพิ่มขึ้นของตำแหน่งการแทรกสอดจะนำไปสู่การจำกัดการแตกออกจากกันอย่างอิสระของชั้นซิลิเกต นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดของสายโซ่ของสารช่วยผสมและสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) ของอนุภาคเคลย์ที่กระจายตัวอยู่

Yuan Q. และ Misra R.D.K. [5] ศึกษาสมบัติเชิงกลของ PP/m-MMT เปรียบเทียบกับพอลิพรอพิลีนภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่าการเติมเคลย์ 4 % โดยน้ำหนัก จะทำให้ PP/m-MMT มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิพรอพิลีนที่ไม่มีการเติมเคลย์ และจากการศึกษาพบว่าเคลย์ที่กระจายอนุภาคอยู่ในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์จะสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ได้ ดังจะเห็นได้จากเวลาที่อุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c, onset}$) ของ PP/m-MMT มีค่าสูงขึ้น และผลึกสเฟียรูไลต์ (Spherulite) มีขนาดลดลง ซึ่งน่าจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของ PP/m-MMT มีค่าลดลงตามไป

ด้วย แต่จากผลการทดลองแสดงว่าสมบัติเชิงกลของ PP/m-MMT ขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์เสริมแรง (Reinforcing effect) ของเคลือบมากกว่าผลของขนาดผลึก นอกจากนี้ยังพบว่าเคลือบกระจายตัวในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ได้ดีกว่าในพอลิเอทิลีน (Polyethylene) เมตริกซ์ โดยตรวจสอบจากเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) แสดงว่าสายโซ่พอลิพรอพิลีนสามารถเคลื่อนที่ไปจัดเรียงโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบในระหว่างการเกิดผลึกได้ดีกว่า

Modesti M. และคณะ [6] ศึกษาสภาวะการเตรียม PP/m-MMT ที่มี PP-g-MA เป็นสารช่วยผสมต่อการเพิ่มระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกต ซึ่งนำไปสู่การแตกตัวออกจากกันอย่างอิสระของเคลือบและการพัฒนาสมบัติเชิงกล โดยศึกษาถึงผลของอัตราเร็วสกรูระหว่าง 250 และ 350 rpm อุณหภูมิในการผสมระหว่าง 170°C และ 200°C และผลของสารช่วยผสม พบว่าการใช้อัตราเร็วของสกรูเท่ากับ 350 rpm อุณหภูมิในการผสมเท่ากับ 170°C และการใช้สารช่วยผสมจะมีการพัฒนาสมบัติเชิงกลจากการแตกตัวออกจากกันอย่างอิสระของเคลือบ ซึ่งการใช้อุณหภูมิในการผสมต่ำและอัตราเร็วของสกรูสูงจะส่งผลให้แรงเฉือนสูงขึ้น นอกจากนี้การพัฒนาความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างพอลิพรอพิลีนและเคลือบจากการเติมสารช่วยผสมส่งผลต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลด้วย โดย PP/m-MMT ที่ไม่ได้เติมสารช่วยผสมจะมีสมบัติเชิงกลในระดับที่ต่ำกว่า

Zhou Y. และคณะ [7] ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีน พอลิพรอพิลีนทาวคัมมาโนคอมโพสิต (Polypropylene-talc nanocomposites) ที่มีทาวคัม (Talc) ผสมอยู่ 40 % โดยน้ำหนัก และ PP/m-MMT ที่มีเคลือบผสมอยู่ 5 % โดยน้ำหนักพบว่า การเติมทาวคัมและเคลือบในคอมโพสิตจะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_d onset) แต่ไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) นอกจากนี้การเติมทาวคัม 40 % โดยน้ำหนัก จะทำให้พอลิพรอพิลีนทาวคัมมาโนคอมโพสิตมีค่ามอดูลัส (Modulus) สูงขึ้น แต่มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ลดลง ส่วนการเติมเคลือบ 5 % โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ PP/m-MMT มีค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้น

Wang S. และคณะ [8] ศึกษาถึงผลของเคลือบและออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ที่มีต่อสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล และสมบัติการโปร่งแสงของพอลิบิวทาไดอินเคลย์นาโนคอมโพสิต (Cis-1,4-Polybutadiene/clay nanocomposites) พบว่าเคลือบมีประสิทธิภาพการกระจายตัวในเมตริกซ์ต่ำ จึงส่งผลให้พอลิบิวทาไดอินเคลย์นาโนคอมโพสิตมีสมบัติเชิงกลลดลงและมีความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมออร์กาโนเคลย์ที่มีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดี จึงมีการพัฒนาสมบัติเชิงกลและสมบัติการโปร่งแสงที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่ากรณีเติมออร์กาโนเคลย์มากกว่า 5 phr จะทำให้ความขุ่นเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากออร์กาโนเคลย์เกิดการรวมตัวกัน (Aggregation)

Filho F.G.R. และคณะ [9] ศึกษาถึงผลของเคลือบและออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสัณฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติการโปร่งแสงของพอลิพรอพิลีนเบนโทไนต์นาโนคอมโพสิต (Polypropylene/bentonite nanocomposites) พบว่าการใช้ออร์กาโนเคลย์ที่มีประสิทธิภาพการกระจาย

ตัวในเมตริกซ์ที่ดี ทำให้พอลิพรอพิลีนเบนโทไนด์นาโนคอมโพสิตมีการพัฒนาความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) ได้ดีกว่า และยังส่งผลให้ขนาดของผลึกสเฟียรูไลต์ลดลง ชิ้นงานจึงมีความโปร่งแสงเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติมเคลย์ที่มีประสิทธิภาพการกระจายตัวในเมตริกซ์ต่ำและมีผลึกสเฟียรูไลต์ขนาดใหญ่ทำให้ชิ้นงานมีความขุ่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าออร์กาโนเคลย์ที่กระจายอนุภาคอย่างมีประสิทธิภาพในเมตริกซ์ มีแนวโน้มที่จะสามารถลดการซึมผ่านของก๊าซได้เป็นอย่างดี

Garcia-Lopez D. และคณะ [10] ศึกษาผลของสารช่วยผสมจำพวกพอลิพรอพิลีนกราฟต์ไดเอทิลมาเลเอต (Polypropylene grafted diethyl maleate : PP-g-DEM) และ PP-g-MA รวมทั้งผลของออร์กาโนเคลย์ชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เกรด Nanomer I30.TC และเบนโทไนด์ (Bentonite) ซึ่งผ่านการดัดแปรด้วย Octadecylammonium ions ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ PP/m-MMT พบว่าการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA จะทำให้ชั้นผลึกซึลิกเกตขยายตัวกว้างออกหรือแยกห่างจากกันมากขึ้นไปอีกจนถึงขั้นแตกตัวออกจากกันอย่างอิสระ แต่สารช่วยผสมชนิด PP-g-DEM จะมีผลทำให้ชั้นผลึกซึลิกเกตขยายตัวกว้างออกเท่านั้นเนื่องจากหมู่ฟังก์ชันมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) ที่กราฟต์อยู่กับสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA มีความเป็นขั้วสูงกว่าหมู่ฟังก์ชันไดเอทิลมาเลอิก (DEM) ที่กราฟต์อยู่กับสารช่วยผสมชนิด PP-g-DEM จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับส่วนที่มีขั้วของออร์กาโนเคลย์ได้ดีกว่า จากนั้นสายโซ่พอลิพรอพิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่กราฟต์อยู่กับสารช่วยผสมจะแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของผลึกซึลิกเกต ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นผลึกซึลิกเกตเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการศึกษาค้นคว้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) นอกจากนี้การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ เกรด Nanomer I30.TC จะทำให้ PP/m-MMT มีสมบัติเชิงกลดีกว่าการเติมเบนโทไนด์ จะเห็นได้ว่าความสามารถในการยึดติดระหว่างวัฏภาค (Interfaces) ขึ้นอยู่กับสมบัติของสารช่วยผสมและการดัดแปรเคลย์ควบคู่กันไป

Wang Y. และคณะ [11] ศึกษาผลของสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ PP/m-MMT พบว่าการเตรียมคอมโพสิตโดยใช้อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมต่อออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 3 ต่อ 1 จะทำให้ออร์กาโนเคลย์มีประสิทธิภาพการกระจายตัวในระดับที่เหมาะสม และการเติมสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและมีหมู่ฟังก์ชันมาเลอิกแอนไฮไดรด์ปริมาณมาก จะทำให้ออร์กาโนเคลย์มีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดี แต่ในทางกลับกันการเติมสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของ PP/m-MMT ลดลง

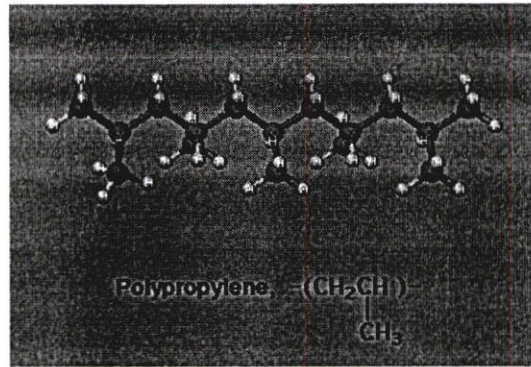
Sangrungsri P. [12] ศึกษาผลของสารช่วยผสมจำพวกพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิก (Polypropylene grafted Acrylic Acid : PP-g-AA) และ PP-g-MA รวมทั้งผลของออร์กาโนเคลย์ที่มี

ต่อสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/m-MMT พบว่าการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-AA และการเติมออร์กาโนเคลย์ 6 % โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมต่อเคลย์เท่ากับ 2.5 ต่อ 1 จะสามารถพัฒนาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/m-MMT ได้ใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสองทิศทาง (Biaxially Oriented Polypropylene : BOPP)

Nakajima H. และคณะ [13] ศึกษาประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์โดยการเลือกใช้พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันในการเจือจาง PP/m-MMT มาสเตอร์แบทช์ (Master batch) ที่มีความเข้มข้นของออร์กาโนเคลย์ 15 % โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้ PP/m-MMT ที่มีความเข้มข้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 5 % โดยน้ำหนัก จากการศึกษาสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลพบว่า การเจือจางมาสเตอร์แบทช์ด้วยพอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ออร์กาโนเคลย์จะมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถยืนยันผลการศึกษาด้วยเทคนิค TEM และสมบัติการไหล (Rheological properties) นอกจากนี้การใช้พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นเมตริกซ์จะทำให้ค่ามอดูลัสสูงขึ้น

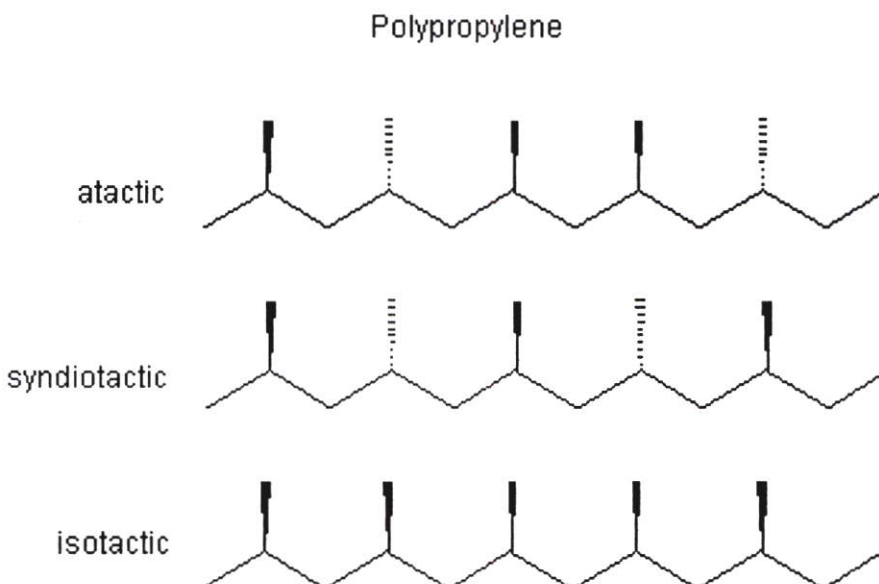
2.2 พอลิพรอพิลีน [14]

พอลิพรอพิลีน (Polypropylene : PP) เป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกสูง มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) ประมาณ 165°C มีความหนาแน่น 0.905 g/cm^3 ซึ่งถือได้ว่าเป็นพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา และเนื่องจากมีความเป็นผลึกสูงนี้เองจึงเป็นสาเหตุทำให้พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ค่ามอดูลัส ค่าความแข็งแรงดึง และความเหนียว (Toughness) สูง การที่มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกสูงกว่าพอลิเอทิลีน (Polyethylene : PE) ทำให้พอลิพรอพิลีนเหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า วัตถุที่ทำจากพอลิพรอพิลีนยังคงรักษารูปร่างไว้ได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 140°C พอลิพรอพิลีนไม่สามารถละลายในตัวทำละลายใดๆ ทั้งสิ้น ณ อุณหภูมิห้อง แต่จะละลายได้ในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนและคลอรีเนเตดไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80°C นอกจากนี้พอลิพรอพิลีนสามารถทนต่อกรดและเบสได้เป็นอย่างดี และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ชนิดนี้มีเสถียรภาพทางความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์น้อยกว่าพอลิเอทิลีน ดังนั้นก่อนนำพอลิพรอพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมสารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant) และสารเพิ่มเสถียรภาพแสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet stabilizer)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของพอลิพรอพิลีน [15]

พอลิพรอพิลีนสามารถเตรียมโดยวิธีพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) หรือแบบอไอออนิก (Ionic) การพอลิเมอไรซ์พอลิพรอพิลีนโดยวิธีการข้างต้นจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเท่านั้น กล่าวคือได้โครงสร้างโมเลกุลแบบซินดิโอแทกติก (Syndiotactic) และอะแทกติก (Atactic) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ต่อมาเกิดการค้นพบตัวเร่งซีเกลอร์แนตตา (Ziegler-Natta) ในปี ค.ศ. 1953 และในปี ค.ศ. 1954 แนตตาประสบความสำเร็จในการเตรียมพอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีโครงสร้างแบบไอโซแทกติก (Isotactic) และด้วยตัวเร่งซีเกลอร์แนตตานี้เอง อุตสาหกรรมจึงเริ่มผลิตพอลิพรอพิลีนเชิงการค้าในปี ค.ศ. 1957 ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาพอลิพรอพิลีนจึงกลายเป็นพลาสติกที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง

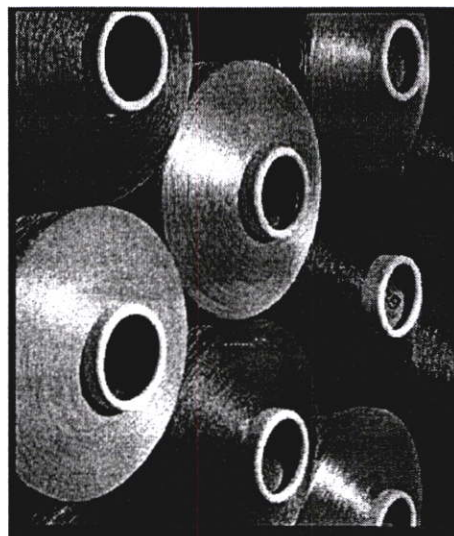


รูปที่ 2.2 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของพอลิพรอพิลีนแบบต่างๆ [16]

ประมาณกึ่งหนึ่งของพอลิพรอพิลีนที่ผลิตขึ้น นำไปใช้เป็นส่วนประกอบและชิ้นส่วนของรถยนต์ และอุปกรณ์เครื่องใช้ภายในบ้าน ส่วนที่เหลือมีการใช้งานในรูปของเส้นใย (เชือก) และฟิล์ม

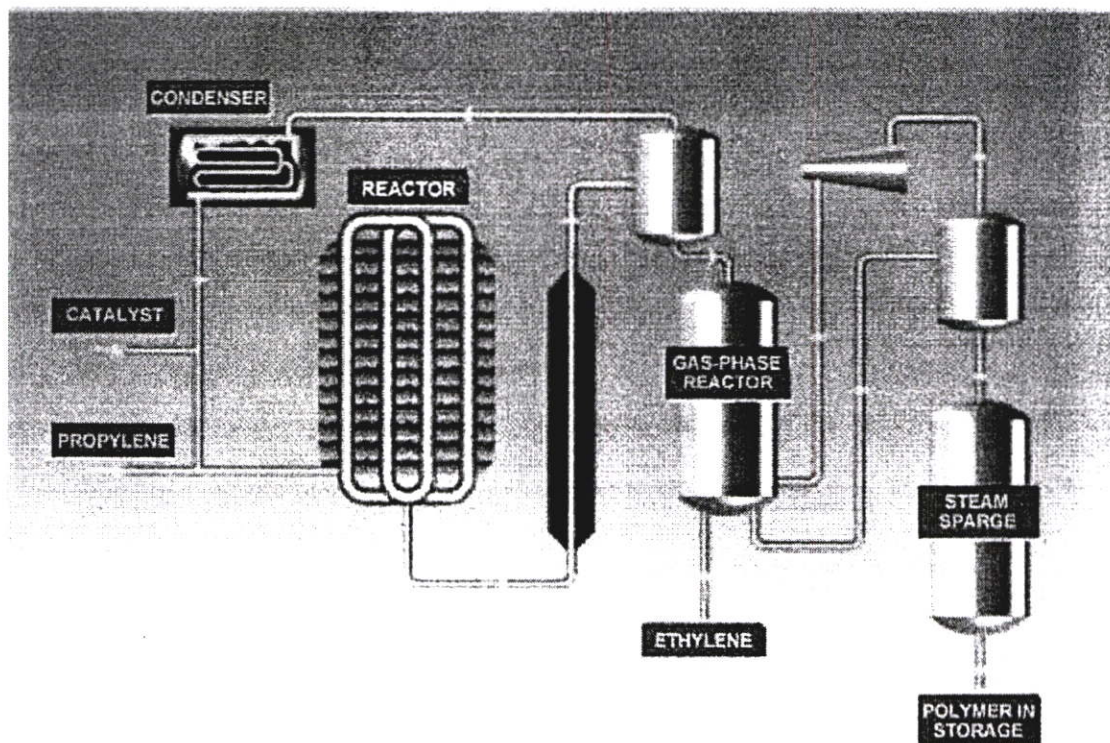


(a)



(b)

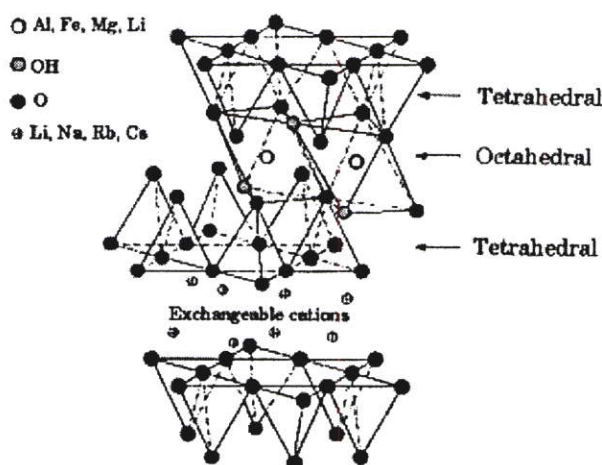
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการใช้งานของพอลิพรอพิลีน (a) อุปกรณ์เครื่องใช้และ (b) เส้นใย [17]



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตพอลิพรอพิลีน [18]

2.3 เคลย์ (Clay) [19]

เคลย์ในภาษาไทยแปลว่า ดินขาว ดินเหนียว หรือดินโคลน ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด ซึ่งแร่ดินที่นำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์และนาโนคอมโพสิตเป็นแร่ที่มีจุดเด่น คือมีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ทำให้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขั้วหรือประจุ (Polarity) เรียกว่ากลุ่ม Smectite clay และเคลย์ที่ได้รับการพัฒนามากที่สุดในกลุ่มนี้ก็คือแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) มีสูตรโครงสร้างเคมีทั่วไป $\text{Na}_{0.2} \text{Ca}_{0.1} \text{Al}_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 (\text{H}_2\text{O})_{10}$ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเบนโทไนต์หรือเบนโทน (Bentonite หรือ Benton) ซึ่งอยู่ในตระกูล Phyllosilicate มีต้นกำเนิดจากฝุ่นภูเขาไฟ แหล่งที่พบมากอยู่ในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น ฝรั่งเศส แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีลักษณะโครงสร้างชั้นผลึกที่เรียกว่า 2:1 ประกอบด้วยชั้นออกซิเจนออกเตดรัล (Octahedral) ที่ถูกประกอบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิเกตเตตระฮีดรัล (Tetrahedral) ความหนาแน่นของชั้นผลึก 2:1 ประมาณ 0.7-1.0 nm ในขณะที่ความยาวด้านข้างเป็นไมครอน มีประจุลัพท์เป็นลบ มักจะมีประจุบวกของแมกนีเซียม อลูมิเนียม โซเดียม หรือแคลเซียม และอื่นๆ เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึกเพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ (ไม่มีประจุ) ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ [20]

เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วทำให้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ชอบน้ำ (โดยทั่วไปพบว่าความหนาของชั้นผลึกสามารถขยายได้ถึง 1.2 nm เมื่อมีความชื้น) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มาก จึงเป็นที่รู้จักดีและนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ เครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดซับต่างๆ ได้ดี นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืดหรือใช้เป็นสารคอลลอยด์ (ในภาคปฏิภูลของสัตว์เลี้ยง เช่น แมว) รวมถึงในงานบำบัด

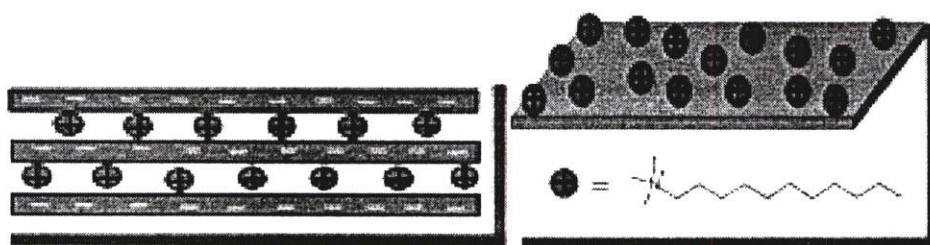
น้ำเสีย ปัจจุบันสามารถสังเคราะห์แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ขึ้นมาได้โดยเลียนแบบโครงสร้างในธรรมชาติ ทำให้สามารถเปลี่ยนชนิดประจุได้ เช่น ประจุบวก

2.3.1 ข้อดีของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ [2]

1. สามารถใช้แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เพียงเล็กน้อยในอัตราส่วนเพียง 2-10 % โดยน้ำหนัก เพื่อปรับปรุงสมบัติพอลิเมอร์
2. รักษาความโปร่งแสงของพลาสติก
3. ผสมร่วมกับพอลิเมอร์ได้ง่าย ทั้งในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ (Polymerization) หรือเตรียมคอมพาวด์ (Compounding)
4. ปลดลภัยต่อการใช้งาน
5. สามารถผสมร่วมกับสารเติมแต่งอื่น ๆ
6. ราคาไม่แพง

2.4 นาโนเคลย์หรือออร์กาโนเคลย์ (Nanoclay หรือ Organoclay) [19]

เมื่อเคลย์มีความเป็นขั้วหรือชอบน้ำ ถูกเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์ แทนโดยการแทนที่ประจุต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ด้วยประจุของสารอินทรีย์ จะได้เคลย์ที่เรียกว่าเคลย์ชนิดดัดแปร (Modified clay) หรือออร์กาโนฟิลิกเคลย์ (Organophilic clay) หรือเรียกสั้นๆ ว่าออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือมีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกต แต่ขอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ จึงเกิดการขยายตัวของระยะห่างระหว่างชั้นผลึก ส่งผลให้ชั้นผลึกห่างกัน เกากันอย่างหลวมๆ ประมาณว่าเป็นอนุภาคนาโนเมตรของซิลิเกต (เพราะชั้นซิลิเกตแต่ละแผ่นมีความหนาประมาณ 1 nm) ที่มีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาสูงมากในสองมิติ



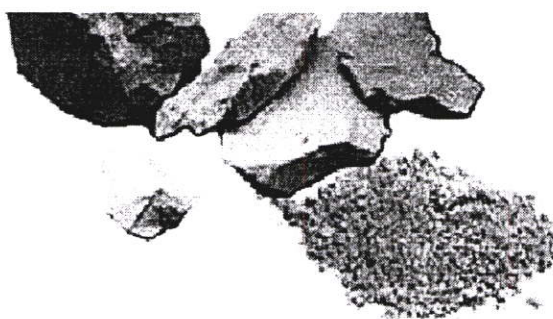
รูปที่ 2.6 (ซ้าย) แสดงเคลย์ที่มีชั้นซิลิเกตและประจุบวก (ขวา) แสดงออร์กาโนเคลย์ที่ประจุเดิมถูกแทนที่ด้วยประจุบวกของสารอินทรีย์ [19]

หลักการนี้จึงเป็นกลไกสำคัญในการเตรียมอนุภาคนาโนเมตรจากธรรมชาติ จึงเรียกว่านาโนเคลย์ ซึ่งมีประโยชน์มากในงานบำบัดน้ำเสีย ที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โลหะหนัก สีข้อมผ้า เป็นต้น

2.5 พอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Polymer Nanocomposites) [21]

คอมโพสิต (Composite) คือวัสดุที่เกิดจากวัสดุสองชนิดขึ้นไป และมีโครงสร้างในแบบต่างๆ โดยที่เนื้อของคอมโพสิตจะประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน ไม่กลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน มีสมบัติร่วมของวัสดุที่นำมาอยู่ร่วมกันและไม่สามารถหาได้จากวัสดุเพียงชนิดเดียว โดยวัสดุหนึ่งจะทำหน้าที่เสริมแรง (Reinforcement) ได้แก่ วัสดุพวกเส้นใย (Fibers) สั้นหรือยาว องค์ประกอบอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญคือเมทริกซ์ (Matrix) เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำหน้าที่ยึดส่วนเสริมแรงไว้ด้วยกัน และทำหน้าที่ปกป้อง รับแรงและถ่ายเทแรงที่ได้รับไปยังเส้นใยหรือส่วนเสริมแรง วัสดุที่ใช้เป็นเมทริกซ์ที่สำคัญได้แก่ พอลิเมอร์ เซรามิก และโลหะ

นาโนคอมโพสิต (Nanocomposite) คือวัสดุประกอบที่เกิดจากวัสดุสองชนิดขึ้นไปโดยมีวัสดุที่เป็นองค์ประกอบอย่างน้อยหนึ่งชนิด ที่เป็นของแข็งขนาดเล็กมากในช่วงนาโนเมตร (10^9 เมตร) ปกติแล้วนาโนคอมโพสิตมีส่วนเสริมแรงขนาดเล็กในช่วง 1-20 nm อาจอยู่ในสถานะที่เป็นได้ทั้งอสัณฐาน (Amorphous) กึ่งผลึก (Semi-crystalline) หรือเป็นผลึก (Crystalline) ก็ได้



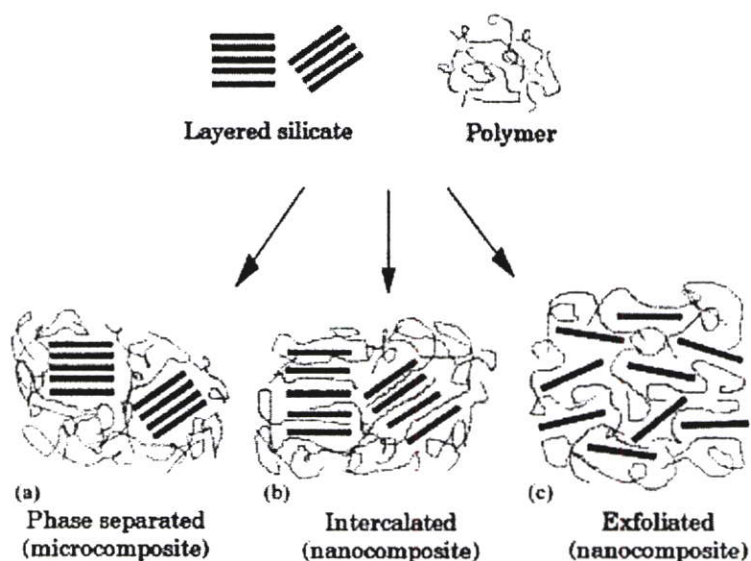
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างเรซินมอนคัมอริลโลไนต์ [22]

วัสดุนาโนคอมโพสิตได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อลดข้อด้อยของวัสดุคอมโพสิตทั่วไป ที่มักจะเปราะ ขุ่น และมีสมบัติขึ้นอยู่กับการกระจายรวมทั้งการเรียงตัวของส่วนเสริมแรง วัสดุนาโนคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นมานั้น มีสมบัติที่ดีว่าเป็นสมบัติเด่นของวัสดุคอมโพสิตเหนือกว่าวัสดุพลาสติกเสริมแรงทั่วไปคือ

1. มีความแข็งแรง (Strength) และความแข็งแกร่ง (Stiffness) เทียบเท่ากับวัสดุพลาสติกเสริมแรงที่มีส่วนเสริมแรงมากกว่า 30 % โดยน้ำหนักโดยไม่เสียความเหนียวไป

2. เหมาะในงานอุณหภูมิสูง เช่น ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ เนื่องจากวัสดุนาโนคอมโพสิตมีอุณหภูมิการอ่อนตัวภายใต้น้ำหนัก (Heat Deflection Temperature) สูง เช่น พอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิตมีอุณหภูมิการอ่อนตัวภายใต้น้ำหนักสูงขึ้น 50°C เมื่อเทียบกับพอลิพรอพิลีน
3. มีการหดตัวในแม่พิมพ์ต่ำ เนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็กขวางการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์กระจายอยู่ในเนื้อพลาสติก จึงเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นส่วนที่ต้องการความแม่นยำสูง
4. มีสมบัติการป้องกันการซึมผ่าน (Barrier) ของความชื้น ก๊าซและไอระเหยต่าง ๆ เนื่องจากโครงสร้างภายในขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่าน
5. แสดงสมบัติการหน่วงไฟ โดยมีสมมุติฐานว่าเกิดการก่อตัวของพลาสติกไหม้ (Char formation) รอบ ๆ อนุภาคตัวเสริมแรง ซึ่งพลาสติกไหม้เป็นฉนวนความร้อนและ/หรืออนุภาคขนาดเล็กที่กระจายอยู่ จะขวางการซึมผ่านของไอระเหยที่ติดไฟง่าย ที่ได้จาก การสลายตัวภายในวัสดุเมื่อถูกเผาไหม้ ทำให้การเผาไหม้ไม่ลุกลาม [23]

เนื่องจากวัสดุนาโนคอมโพสิตมีอนุภาคขนาดเล็กถึงระดับนาโนกระจายอยู่ในเนื้อพลาสติก วัสดุนี้จึงต่างจากวัสดุคอมโพสิตทั่วไปคือ ยังคงสมบัติของพลาสติกเดิมไว้ เช่น มีผิวเรียบ น้ำหนักเบา และสามารถนำกลับไปขึ้นรูปใหม่ได้ ในการที่จะแยกชั้นซิลิเกตเพื่อให้ได้อนุภาคระดับนาโนเมตรนั้น นาโนเคลย์จะต้องสามารถเข้ากันได้ดีกับสารอินทรีย์ ดังนั้นเมื่อเติมสารอินทรีย์อื่นๆ ที่มีขนาดเล็กลงไป สารอินทรีย์จะสามารถแทรกสอดเข้าไปในพื้นที่ระหว่างชั้นผลึกซิลิเกตได้ง่าย ทำให้ชั้นผลึกซิลิเกตขยายตัวกว้างออก (Intercalation) หรือแยกห่างจากกันมากขึ้นไปอีก จนถึงชั้นแตกตัวออกจากกันโดยอิสระ (Exfoliation) วิธีการหนึ่งในการพัฒนานาโนเคลย์ไปใช้งานโดยอาศัยสมบัติความชอบสารอินทรีย์ คือการเตรียมเป็นคอมโพสิตกับสารอินทรีย์อื่นๆ ที่สำคัญก็คือพอลิเมอร์ วิธีการนี้ได้พัฒนาสำเร็จสู่การค้าเป็นครั้งแรกโดย Toyota Central R&D laboratory โดยใช้ Caprolactam (Nylon-clay nanocomposite) เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เมื่อนำมาผสมกับออร์กาโนเคลย์ที่สามารถเข้ากันได้ดี ส่งผลให้ชั้นซิลิเกตขยายออกห่างจากกันเรียกว่า นาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์-เคลย์ (Polymer-Clay Nanocomposites : PNC) หรือนิยมเรียกให้ชัดเจนเป็นนาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์-ชั้นซิลิเกต (Polymer-layered silicate nanocomposites) เพราะมีอนุภาคนาโนเมตรผสมทั่วไปในเนื้อพอลิเมอร์ นาโนคอมโพสิตประเภทนี้ยังคงมีโครงสร้างของชั้นซิลิเกตที่เรียงซ้อนอย่างหลวมๆ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นกว้างขึ้นแต่มีระเบียบเรียกว่า นาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposites) เมื่อผ่านเทคนิคการเตรียมที่ดีจะสามารถทำให้ชั้นซิลิเกตแตกกระจายออกจากกันเป็นชั้นเดี่ยวๆ กระจายอย่างอิสระในเนื้อพอลิเมอร์ได้ จึงเรียกว่าเป็นพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตชนิดแตกกระจาย (Exfoliated nanocomposites) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 [19]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของวัสดุคอมโพสิตที่มีเคลย์เป็นส่วนเสริมแรง [20]

- วัสดุคอมโพสิตที่มีเคลย์กระจายแบบแยกวัฏภาค (Phase separated microcomposite)
- นาโนคอมโพสิตชนิดแทรกสอด (Intercalated nanocomposite)
- นาโนคอมโพสิตชนิดแตกกระจาย (Exfoliated nanocomposite)

ลักษณะโครงสร้างของเคลย์แบบคัดแปรนั้น มีลักษณะเป็นสารตัวเติมขนาดเล็กที่มีสมบัติเป็นแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic nanofillers) คือจะมีค่าความแข็งแรงดึงและความเหนียวสูงกว่าสารตัวเติมโดยทั่วไป

2.5.1 ประโยชน์ของนาโนคอมโพสิต

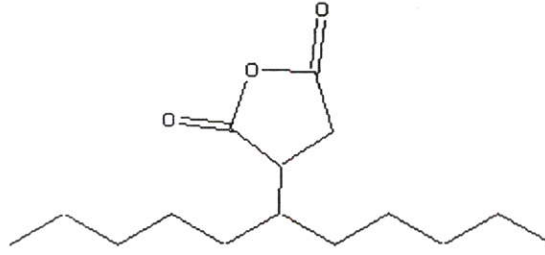
1. ได้วัสดุประกอบที่มีค่า Aspect ratio มากกว่า 100
2. เพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) และความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) เนื่องจากความแข็งของชั้นซิลิเกต
3. เพิ่มความเสถียรทางด้านรูปร่าง (Dimensional stability) ที่อุณหภูมิสูงขึ้น
4. ทำให้มีการปรับปรุงความมันเงา (Surface gloss) ดีขึ้น
5. ทำให้มีความสามารถในการยึดติดพื้นผิวที่ดี
6. เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ของอีลาสโตเมอร์ (Elastomer)
7. ปรับปรุงสมบัติความหน่วงต่อการติดไฟ (Flame retardant) ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี

8. ลดการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวเนื่องจากโครงสร้างผลึกที่หนาแน่นและมีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาสูงทั้งสองมิติ จึงขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวได้
9. ปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) และสมบัติทางแสง (Optical properties)
10. ลดการหดตัว (Shrinkage) เนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็กขวางการจัดเรียงโมเลกุลของพอลิเมอร์
11. มีความใสเพราะอนุภาคขนาดนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงยูวีและคลื่นแสงที่มองเห็นได้จึงไม่ทำให้แสงแตกกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส [19]

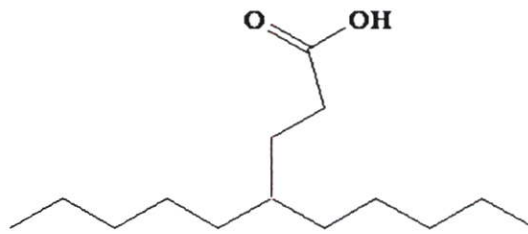
2.6 สารช่วยผสม (Compatibilizers) [24]

การเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างพลาสติกและอนุภาคนาโนเป็นปัจจัยที่สำคัญ เนื่องจากสมบัติทางเคมีของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มีความเป็นขั้ว จึงมักจะไม่สามารถผสมเข้ากับพลาสติกทั่วไปซึ่งมีความเป็นขั้วน้อยมากหรือไม่มีความเป็นขั้วเลย เช่น กรณีของพอลิโพลีเอทิลีน สิ่งที่เกิดขึ้นระหว่างการผสมพลาสติกและแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ คืออนุภาคของแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์มักจะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนและไม่สามารถกระจายในพลาสติกอย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของอนุภาคแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ หรือการใช้สารช่วยผสมเพื่อเพิ่มการยึดติดระหว่างวัฏภาคของพลาสติกและพื้นผิวอนุภาคจึงเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการผสม

การปรับปรุงการยึดเกาะระหว่างสารตัวเติมกับเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว เช่น พอลิเอทิลีนหรือพอลิพรอพิลีนสามารถทำได้ โดยการเติมสารช่วยผสมจำพวกพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafted Maleic Anhydride : PP-g-MA) สังเคราะห์ได้จากการนำมาเลอิกแอนไฮไดรด์ไปกราฟต์บนสายโซ่พอลิพรอพิลีน โดยการทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) บนสายโซ่พอลิพรอพิลีน โครงสร้างของ PP-g-MA แสดงดังรูปที่ 2.9 และพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิก (Polypropylene grafted Acrylic Acid : PP-g-AA) โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้ PP-g-MA และ PP-g-AA ยังใช้เป็นสารช่วยผสมในการทำพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend หรือ Polyblend หรือ Polymer alloy) ระหว่างพอลิโพลีเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนหรือพอลิเมอร์ที่มีขั้วชนิดอื่น ๆ ด้วย



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์

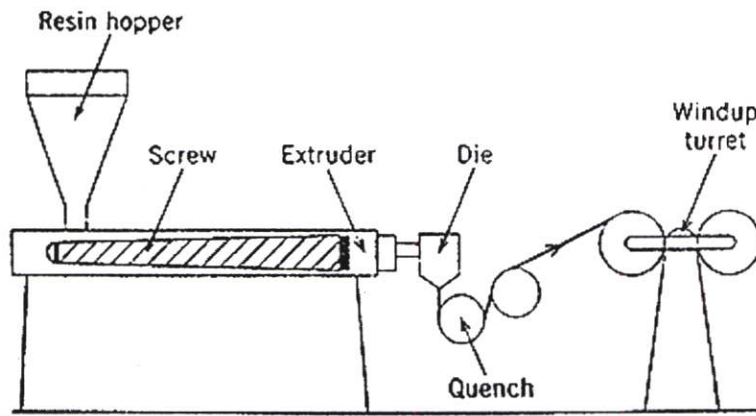


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกเอซิก

2.7 เครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น [25,26]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยวิธีการอัดรีด (Extrusion) ผ่านหัวคายแบบแผ่น (Slit die) ในสภาวะหลอมเหลว (Melt casting) โดยหลักการพื้นฐานของกระบวนการคือนำเม็ดพลาสติกใส่ลงในช่องรับสารซึ่งมีสกรูที่กำลังหมุนอยู่ การเคลื่อนที่ของสกรูจะดันพลาสติกให้ไหลไปข้างหน้า โดยสกรูที่ใช้งานในเครื่องอัดรีดแบ่งออกเป็น 3 ช่วงตามความยาวแต่ละช่วงมีความยาวประมาณ 1 ใน 3 ของความยาวสกรู ช่วง Compression เป็นช่วงแรกของสกรูที่อยู่ใกล้ที่สุดกับช่องรับสาร เมื่อพลาสติกผ่านเข้ามาในช่วงนี้จะได้รับความร้อน และการหมุนของสกรูจะอัดให้พลาสติกแน่นขึ้น อากาศที่ตกค้างอยู่จะถูกกระบายออก ช่วงที่สองคือช่วง Transition ช่วงนี้เม็ดพลาสติกแข็งจะถูกเปลี่ยนสถานะเป็นพลาสติกหลอม และช่วงสุดท้ายของสกรูคือช่วง Metering ช่วงนี้พลาสติกจะหลอมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น หลังจากนั้นพลาสติกหลอมจะเคลื่อนผ่านหัวคายแบบแผ่น (Slit die) ที่มีลักษณะแคบแต่ยาว ซึ่งเป็นตัวกำหนดรูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้ หลังจากทีพลาสติกหลอมอัดผ่านหัวแม่แบบแล้วก็จะผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็น (Pulling roll) ซึ่งโดยปกติจะมีความเร็วมากกว่าความเร็วของพลาสติกหลอมที่ผ่านออกมาจากหัวแม่แบบ ซึ่งทำให้เกิดการยึดดึงของแผ่นฟิล์มทำให้มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น ช่วยลดความขุ่นและเพิ่มความเงาของฟิล์ม ดังนั้นฟิล์มที่ผลิตจากกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นจึงมีความใส

นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้โดยการควบคุมความเร็วของลูกกลิ้งหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น [25]

ส่วนสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ใช้ปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม เช่น สารเพิ่มความเสถียร สี สามารถใส่พร้อม กับเม็ดพลาสติกในช่องรับสาร หรือจะทำการผสมกับเม็ดพลาสติกมาก่อนก็ได้

ตัวแปรที่มีอิทธิพลอย่างมากในการผลิตฟิล์มแบบแผ่นคืออัตราส่วนการดึง (Draw ratio) ซึ่งจัดเป็นการวัดการดึงยืด (Stretching) [26]

เมื่อ	t_0	=	ความหนาในตอนเริ่มต้นของแผ่นพลาสติก
	t_a	=	ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม
	A_0	=	พื้นที่ผิวในตอนเริ่มต้น
	A	=	พื้นที่ผิวของฟิล์ม (A) ซึ่งมากกว่าพื้นที่ผิวในตอนเริ่มต้น (A_0)
	V	=	ปริมาตรของพลาสติก

จะได้ว่า

$$V = t_0 A_0 = \int t dA = t_a A \quad (2.1)$$

และอัตราส่วนการดึงโดยพื้นที่ผิว (Areal draw ratio) ; R_a

$$R_a = A / A_0 \quad (2.2)$$

และอัตราส่วนการดึงโดยความหนา (Thickness draw ratio) ; R_t

$$R_t = t_0 / t_a \quad (2.3)$$

2.8 फिल्मพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสองทิศทาง [25]

หลักการพื้นฐานของการผลิตฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสองทิศทาง (Biaxially Oriented Polypropylene : BOPP) คือการให้แรงดึงยืดแก่ฟิล์มที่อุณหภูมิที่สามารถทำให้ฟิล์มเกิดการอ่อนตัวซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของฟิล์มนั้น โมเลกุลของฟิล์มจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ให้แรงดึง จากนั้นจึงทำให้ฟิล์มเย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อกดสมบัติทางกายภาพของฟิล์มที่เกิดขึ้นขณะที่โมเลกุลจัดเรียงตัว โดยก่อนที่จะมีการจัดเรียงตัวใหม่โมเลกุลของฟิล์มจะอยู่กันอย่างอิสระ กระจายกัน ไม่มีทิศทางที่แน่นอน แต่เมื่อมีการดึงยืดฟิล์มส่วนที่เป็นออสัญฐานจะยืดออกและจัดเรียงตัวในทิศทางของแรงดึงที่ให้ เมื่อฟิล์มถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วโมเลกุลจะถูกจำกัดการเคลื่อนไหวทำให้โมเลกุลคงลักษณะและทิศทางการเรียงตัวนั้นไว้ ซึ่งปริมาณการจัดเรียงตัวของฟิล์มขึ้นกับอุณหภูมิการดึง ปริมาณการดึง อัตราการดึง และการทำให้เย็นลง (Quenching)

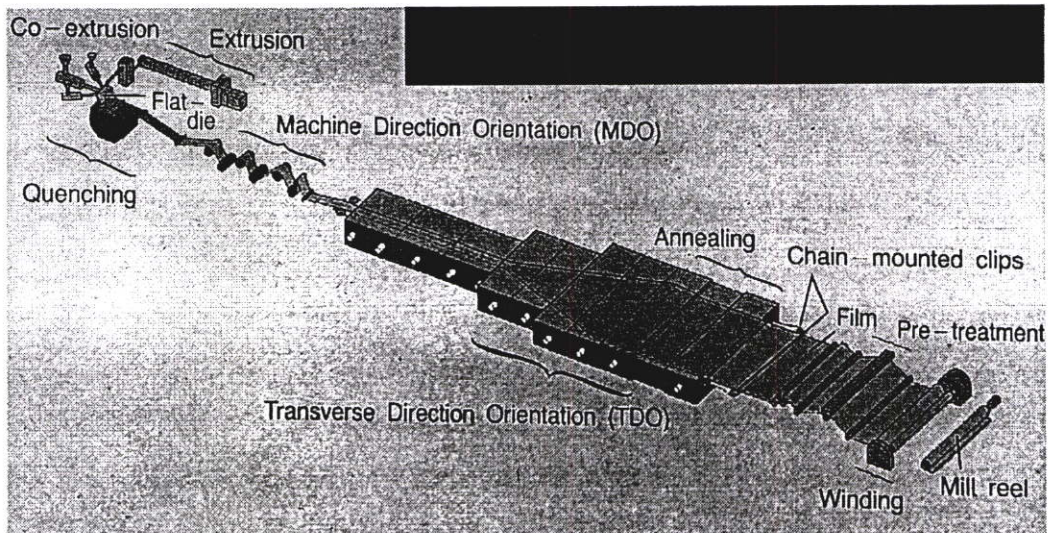
2.8.1 กระบวนการจัดเรียงโมเลกุล

การทำให้โมเลกุลของฟิล์มมีการจัดเรียงตัวนั้นทำได้ 2 วิธี คือ

1. Tentering process ใช้ผลผลิตผลิตภัณฑ์พวก "Heat-set" ได้มากมาย ตัวอย่างที่พบมากคือใช้ผลิตแผ่นฟิล์ม BOPP กระบวนการ Heat setting คือการให้ความร้อน (Reheat) แก่ฟิล์มอีกครั้งในสถานะที่บังคับไม่ให้ฟิล์มเกิดการหดได้อีก ยิ่งไปกว่านั้นการจัดเรียงตัวของโมเลกุลทำให้เกิดลักษณะที่สำคัญคือมีสมบัติทางแสงดีขึ้น ทนทานต่อการดึงยืดสูงขึ้นและมีความแข็งแรงสูงขึ้น ในปัจจุบันการผลิตฟิล์มโดยใช้ Tenter-frame จะทำให้ฟิล์มมีระดับการหดตัวต่ำ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านกลไกและเทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการผลิตโดยใช้ Tenter-frame แผ่นฟิล์มที่แบนบางจะถูกผลิต และทำให้เย็นลงโดยลูกกลิ้ง (Chill roll) ที่มักจะถูกจุ่มอยู่ในอ่างน้ำ จากนั้นแผ่นฟิล์มจะถูกดึงในทิศทางของเครื่องจักรโดยหน่วยดึง (Machine-Direction Orientation unit : MDO unit) ซึ่งมีการให้ความร้อนและดึงในอัตราส่วนการดึงที่ต้องการ ขณะที่ออกจาก MDO unit แผ่นฟิล์มจะถูกส่งไปยังหน่วยดึงในทิศทางขวาง (Transverse-Direction Orientation unit : TDO unit) ซึ่งจะมีการให้

ความร้อนอีกครั้งและดึงยืด โดยทั่วไปแผ่นฟิล์ม BOPP จะถูกดึงยืด 700-800 % ทั้งสองทิศทาง หลังจากที่ฟิล์มออกจาก TDO unit แล้วถูกส่งไปม้วนบนลูกกลิ้งขนาดใหญ่ เพื่อทำการบ่ม (Aging) ทำให้เกิดผลึกเป็นครั้งที่สอง เพื่อให้แน่ใจว่าฟิล์มมีความเรียบและพันม้วนอย่างสม่ำเสมอบนลูกกลิ้ง ในบางการผลิตอาจมีเครื่องมือสำหรับทำ Heat setting หรือทำการอบร้อนหลังจากนั้นก็ได้อีก

2. Bubble process หรือ Tubular process ทำการผลิตโดยเป่าฟิล์มลงบน External mandrel หรือหล่อบน Internal mandrel โดยใช้ น้ำหล่อเย็น หลังจากฟิล์มเย็นแล้วฟิล์มที่ได้จะถูกทำให้ร้อนอีกครั้งและใช้ลมเป่าให้เป็นลูกโป่ง ซึ่งในขั้นตอนการเป่านี้เองทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลทั้ง 2 ทิศทาง โดยทั่วไปในแผ่นฟิล์ม BOPP จะมีการดึงยืด 700-800 % และสำหรับฟิล์มชนิดอื่นจะมีการจัดเรียงตัว 200-1000 % ในทั้งสองทิศทาง หลังจากโมเลกุลมีการจัดเรียงตัวแล้วฟิล์มจะถูกทำให้เย็นโดยวงแหวนที่มีลมเป่า แล้วฟิล์มที่ได้จะถูกผ่าและฉีกเป็นทางยาวแยกออกจากกัน จากนั้นแต่ละครึ่งของท่อฟิล์มจะถูกม้วนบนลูกกลิ้งสำหรับทำการบ่มและ Converting นอกจากนี้ในการผลิตมักมีการทำ Corona treatment เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับฟิล์มที่จะมีการพิมพ์ต่อไป



รูปที่ 2.12 กระบวนการผลิตฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสองทิศทาง [27]

2.8.2 ลักษณะของฟิล์ม BOPP [28]

แผ่นฟิล์ม BOPP ผลิตจากเม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีนมีลักษณะที่สำคัญคือ

1. ไสคล้ายแก้ว
2. เหนียวและยืดหยุ่นสูง ทนต่อการฉีกขาด
3. ป้องกันมิให้ก๊าซออกซิเจนหรือคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ อากาศ และความชื้นผ่านเข้าสู่อาหาร

2.8.3 การนำไปใช้งานของฟิล์ม BOPP [29]

1. ใช้ในงานพิมพ์ซอง เพื่อใช้บรรจุสินค้าอุปโภคและบริโภค ทำให้เกิดสีสันและทำให้สินค้าที่บรรจุอยู่ภายในมีคุณค่ามากขึ้น ช่วยในการถนอมผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ให้มีอายุยาวขึ้น
2. ใช้ผลิตเป็นเทปกาวย
3. ใช้เคลือบกระดาษหรือลายไม้
4. ทำเป็นซองบรรจุของใช้ เช่น เสื้อผ้า ถุงเท้า ซ่อดอก ไม้ ฯลฯ
5. ทำเป็นกระดาษห่อของขวัญ
6. ใช้ผลิตธนบัตร

2.9 สมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพลาสติกนาโนคอมโพสิต [2,30,37]

การสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซในพลาสติกนาโนคอมโพสิต นิยมนำไปใช้ประยุกต์ในงานอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยเฉพาะการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

2.9.1 คำจำกัดความของสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

1. อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Gas Transmission Rate : OTR) คือปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่ผ่านพื้นที่ผิวของฟิล์มพลาสติกต่อหน่วยเวลาภายใต้สภาวะการทดสอบ
2. การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeance : OP) คืออัตราส่วนของอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่อความดันของก๊าซออกซิเจนที่แตกต่างกันของฟิล์มทั้งสองด้าน
3. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : OP) คือการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่อความหนาของฟิล์ม

2.9.2 การคำนวณสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

1. การคำนวณอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน :

$$\text{OTR} = \left[\frac{(E_e - E_o) \times Q}{A \times R_L} \right] \quad (2.4)$$

เมื่อ E_e คือ ระดับความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่คงที่ (Steady-state voltage)

E_o คือ ระดับความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าที่ศูนย์ (Zero voltage)

Q คือ ค่าคงที่การตรวจสอบ (Calibration constant)

A คือ พื้นที่ของชิ้นงาน (Specimen area)

R_L คือ ค่าของภาวะการต้านทาน (Load resistance)

2. การคำนวณการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน :

$$\text{OP} = \text{OTR} / P \quad (2.5)$$

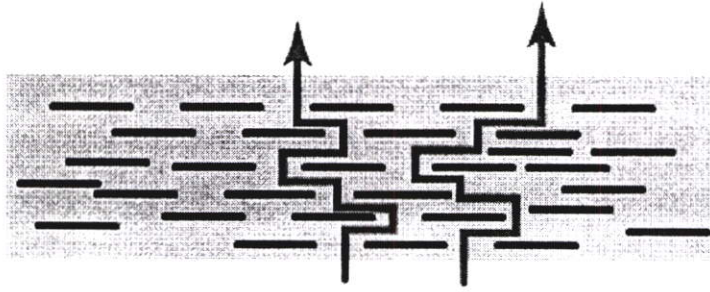
เมื่อ P คือ ความดันของก๊าซออกซิเจนหรืออัตราส่วนโดยโมลของก๊าซออกซิเจนจากความดันรวม โดยความดันของก๊าซออกซิเจนในด้านที่เป็นก๊าซนำพาให้พิจารณาเป็นศูนย์

3. การคำนวณสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน :

$$\text{OP} = \text{OP} \times t \quad (2.6)$$

เมื่อ t คือ ความหนาเฉลี่ยของชิ้นงาน

สมบัติที่เป็นประโยชน์ยิ่งของพลาสติกนาโนคอมโพสิตต่ออุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ คือ ความสามารถในการสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำ จากโครงสร้างของเคลือบที่การกระจายอนุภาคเป็นแผ่นบาง ซึ่งทำให้เกิดเส้นทางคดเคี้ยวสำหรับการผ่านเข้าออกของก๊าซต่างๆ หรือที่เรียกว่า “Tortuous path” ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของอนุภาคซิลิเกตที่กระจายอนุภาคอยู่ในพลาสติกนาโนคอมโพสิตเพื่อสกัดกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซ (Tortuous path) [31]

การศึกษาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซในพลาสติกนาโนคอมโพสิต โดยมีพื้นฐานมาจากทฤษฎี Tortuosity กล่าวคือเส้นทางการผ่านของก๊าซต้องเป็นไปตามชั้นซิลิเกตที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกั้นขวางอยู่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Tortuosity factor (τ) คือสัดส่วนระหว่างระยะทางจริงของเส้นทางการผ่านเข้าออกของก๊าซ (d') กับระยะทางที่ใกล้ที่สุดของเส้นทางการผ่านเข้าออกของก๊าซที่ไม่มีชั้นซิลิเกตกระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกั้นขวางอยู่ (d) หรือสามารถอธิบายในเทอมของความยาว (L), ความกว้าง (W) และสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของซิลิเกต (ϕ_s) แสดงดังสมการที่ 2.7

$$\tau = \frac{d'}{d} = 1 + \left[\frac{L}{2W} \phi_s \right] \quad (2.7)$$

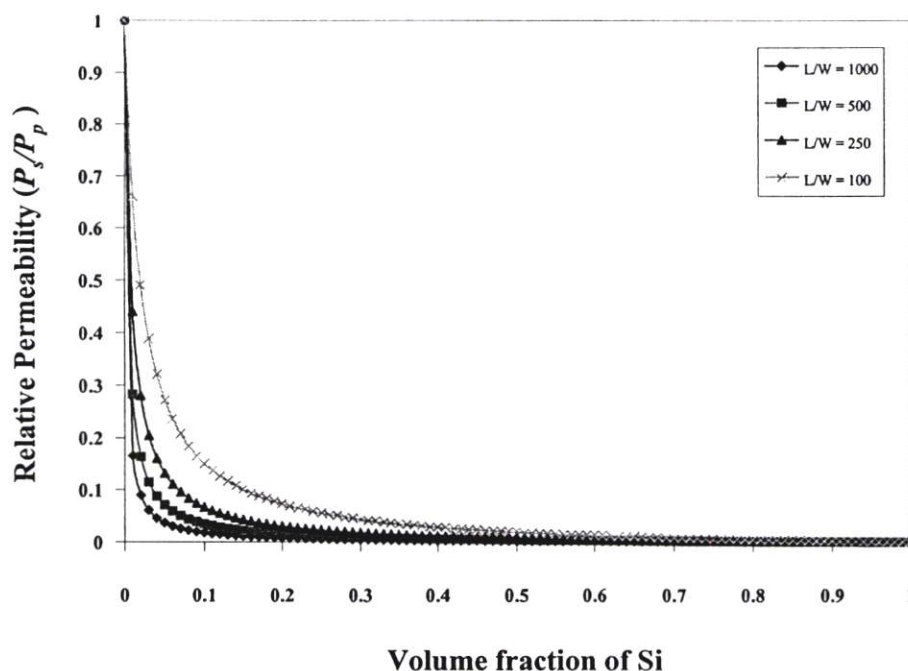
ในการศึกษานี้กำหนดให้แผ่นอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ของนาโนเคลย์มีความยาวประมาณ 100-1000 nm และความกว้าง 1 nm ผลของการเกิดเส้นทางคดเคี้ยวสำหรับการผ่านเข้าออกของก๊าซต่างๆ สามารถอธิบายดังสมการที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์การซึมผ่านของก๊าซในรูปอัตราส่วนของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิต ต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์ (P_s / P_p)

$$\frac{P_s}{P_p} = \frac{(1 - \phi_s)}{\tau} \quad (2.8)$$

เมื่อ P_s คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิต

P_p คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

จากการคำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในสมการที่ 2.7 และ 2.8 นำไปสู่การคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ในรูปอัตราส่วนของความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิต ต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์ (P_s / P_p) และสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของซิลิเกต (Silicate) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในรูปอัตราส่วนของ P_s / P_p และ สัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิเกต (ϕ)

จากการคำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในสมการที่ 2.7 และ 2.8 สามารถทำนายปริมาณออร์กาโนเคลย์หรือสัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิเกต ที่เหมาะสมต่อการลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลงได้ตามเป้าหมาย โดยที่อนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio ต่างๆ ซึ่งจากการทดลองทราบความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพอลิเมอร์บริสุทธิ์หรือพอลิพรอพิลีน (P_p) มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : OP) เท่ากับ 117 cc.mm/m².day และให้ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม BOPP ซึ่งมีค่า OP เท่ากับ 48 cc.mm/m².day แทนความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิต (P_s) เนื่องจากการลดความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP เป็นจุดประสงค์ในการทดลองนี้ ดังนั้น P_s / P_p จึงมีค่าเท่ากับ 0.41 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งสัมพันธ์กับรูปที่ 2.14 กล่าวคือการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 9 % โดยน้ำหนัก ลงในฟิล์ม

PP/m-MMT ออร์กาโนเคลย์ที่กระจายอนุภาคอย่างมีประสิทธิภาพและอนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio เท่ากับ 100 หรือการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก ลงในฟิล์ม PP/m-MMT และอนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio เท่ากับ 250 หากจัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงในรูปที่ 2.13 คาดว่าน่าจะจะสามารถลดการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนลงได้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP

ตารางที่ 2.1 ปริมาณออร์กาโนเคลย์ (Cloisite® 20A) ที่เหมาะสมต่อการลดการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ที่อนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio ต่างๆ ตาม ทฤษฎี Tortuosity

Aspect ratio ^a	P_s/P_p ^b	ϕ_s ^c	ออร์กาโนเคลย์ (% โดยน้ำหนัก)
100	$48 / 117 = 0.41$	0.03	9.00
250	$48 / 117 = 0.41$	0.01	3.00
500	$48 / 117 = 0.41$	0.006	2.00
1000	$48 / 117 = 0.41$	0.003	1.00

หมายเหตุ ^a คือ สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคซิลิเกต

^b คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิตต่อ
ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

^c คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิเกต

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการดำเนินงาน

1. พอลิพรอพิลีน (Polypropylene : PP) เกรด El-Pro[®] P400S สำหรับผลิตเส้นใยหรือฟิล์มแผ่นบาง จากบริษัท SCG Chemicals จำกัด สมบัติบางประการของพอลิพรอพิลีน เกรด El-Pro P400S แสดงดังตารางที่ 3.1
2. พอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafted Maleic Anhydride : PP-g-MA) เกรด Priex[®] 20093 และ Priex[®] 20095 จากบริษัท Solvay Chemical จำกัด สมบัติบางประการของ Priex[®] 20093 และ Priex[®] 20095 แสดงดังตารางที่ 3.2
3. พอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิก (Polypropylene grafted Acrylic Acid : PP-g-AA) เกรด Polybond[®] 1001 และ Polybond[®] 1002 จากบริษัท Crompton จำกัด สมบัติบางประการของ Polybond[®] 1001 และ Polybond[®] 1002 แสดงดังตารางที่ 3.3
4. ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) เกรด Cloisite[®] 20A และ Claytone[®] HY จากบริษัท Southern Clay Products จำกัด สมบัติบางประการของ Cloisite[®] 20A และ Claytone[®] HY แสดงดังตารางที่ 3.4
5. สารเพิ่มเสถียรภาพ (Stabilizer) เกรด Polyad Preblend[®] TPE 01G จากบริษัท SCG Chemicals จำกัด
6. พอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin)
7. โคบอลต์แนฟทีเนต (Cobalt naphthenate) เป็นสารกระตุ้นตัวเร่ง (Accelerator)
8. เมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ (Methyl ethyl ketone peroxide) เป็นสารทำให้แข็งตัว (Hardener)

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิพรอพิลีนเกรด El-Pro[®] P400S¹

สมบัติ	หน่วย	มาตรฐานทดสอบ	El-Pro P400S
ครรชนีการไหล	g/10 min	ASTM D 1238	3.5
ความหนาแน่น	g/cm ³	ASTM D 1505	0.91
ความแข็งแรงดึง	kg/cm ²	ASTM D 638	350
เปอร์เซ็นต์การขีด ฉลุ จุดขาด	%	ASTM D 638	500
ความแข็งกด, Shore D	-	ASTM D 785	100
ความแข็งแรงกระแทก	kg-cm/cm	ASTM D 256	4
มอดุลัสการโค้งงอ	kg/cm ²	ASTM D 790	16,000
อุณหภูมิการอ่อนตัวภายใต้น้ำหนัก	°C	ASTM D 648	110

หมายเหตุ ¹ คือ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.2 สมบัติของสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์เกรด Priex[®] 20093 และ Priex[®] 20095¹

สมบัติ	หน่วย	มาตรฐานทดสอบ	Priex [®] 20093	Priex [®] 20095
ปริมาณกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์	% โดยน้ำหนัก	-	0.26	0.45-0.50
น้ำหนักโมเลกุล	g/mol	-	70,000	n/a
Intrinsic viscosity	l/g	MAPCH-02041-ISO1828	0.07-0.08	0.065-0.070
อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก	°C	ISO 11357	160-165	158-165
อุณหภูมิเริ่มตกผลึก	°C	ISO 11357	112	114

หมายเหตุ ¹ คือ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติของสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิกเกรด
Polybond[®] 1001 และ Polybond[®] 1002¹

สมบัติ	หน่วย	มาตรฐานทดสอบ	Polybond [®] 1001	Polybond [®] 1002
ปริมาณกราฟต์อะคริลิกแอซิก	% โดยน้ำหนัก	-	6	6
ครรชนีการไหล (230°C / 2.16 kg)	g/10 min	ASTM D 1238	40	20
ความหนาแน่น	g/cc	ASTM D 792	0.91	0.91
อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (DSC)	°C	-	160-170	160-170

หมายเหตุ ¹ คือ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.4 สมบัติของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A และ Claytone[®] HY¹

สมบัติ	หน่วย	Claytone [®] HY	Cloisite [®] 20A
สารอินทรีย์ที่ใช้ดัดแปร	-	n/a	2M2HT ²
ความเข้มข้นของสารดัดแปร	Meq/100g clay	n/a	95
ความชื้น	%	2	< 2
สี	-	ครีม	ขาว
ความหนาแน่น	g /cc	1.6	1.77
Dry sieve size	%-450 M	98	n/a
Weight loss on ignition	%	43	38
Loose bulk density	lbs/ft ³	18	7.35
ระยะห่างระหว่างชั้น	Å	70 , 35 ³	24.2

หมายเหตุ ¹ คือ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

² คือ 2M2HT : Dimethyl, dehydrogenated tallow, quaternary ammonium

³ คือ ผลจากการตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงาน

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) : Brabender รุ่น PL2000
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) : Bosco Engineering รุ่น Bosco A600
3. เครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น (Flat film) : Randcastle รุ่น RC 0625
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) : JEOL Co. Ltd. รุ่น JSM-5410
5. เครื่องทดสอบเนกประสงค์ (Universal testing machine) : LLOYD Instrument Co. Ltd. รุ่น LLOYD LR 5K
6. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer) : Bruker AG รุ่น D 8 Advance
7. เครื่องทดสอบสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen permeability analyzer) : Illinois Instrument รุ่น 8500
8. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อน (Differential Scanning Calorimeter, DSC) : Mettler-Toledo รุ่น DSC 822° และ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) : Perkin Elmer รุ่น Pyris 1
9. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) : Brabender รุ่น PL2000
10. เครื่องวัดความหนาของฟิล์ม (Digimatic micrometer) : Mitutoyo รุ่น MDC-25PJ
11. เครื่องทดสอบครรชนีการไหล (Melt Flow Rate Tester) : Ceast รุ่น 6841

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ในฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (PP/m-MMT)

เตรียม PP/m-MMT ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมต่อออร์กาโนเคลย์ 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 และ 3:1 โดยเติมสารช่วยผสมเกรด Priex[®] 20093, Priex[®] 20095, Polybond[®] 1001 หรือ Polybond[®] 1002 เติมออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก และเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ 0.25 % โดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีน ทำการผสม PP/m-MMT ด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่ความเร็วรอบ (Rotational speed) 120 rpm อุณหภูมิ 180 °C เป็นเวลา 20 นาที แล้วนำไปกดเป็นเม็ดเล็กด้วยเครื่องบดพลาสติก

ตารางที่ 3.5 สูตรผสม PP/m-MMT ที่ใช้ในงานวิจัย

สูตร	PP (% โดยน้ำหนัก)	สารช่วยผสม (% โดยน้ำหนัก)				ออร์กาโนเคลย์ (% โดยน้ำหนัก)	
		Priex [®] 20093	Priex [®] 20095	Polybond [®] 1001	Polybond [®] 1002	Cloisite [®] 20A	Claytone [®] HY
P95-HY6	82		12				6
P93-20A6	82	12				6	
P95-20A6	82		12			6	
P01-20A6	82			12		6	
P02-20A6	82				12	6	
P95-20A3	91		6			3	
P95-20A9	73		18			9	

3.3.2 การศึกษาชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

เตรียม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ตามตารางที่ 3.5 โดยเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ 0.25 % โดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีน และเลือกใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ตามข้อ 3.3.1 ทำการผสม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ตามสภาวะแสดงดังตารางที่ 3.6 โดยนำ PP/m-MMT ที่เตรียมได้ผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ 2 รอบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม เนื่องจากสกรูของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) บริเวณ Drive end เท่ากับ 10.61 และบริเวณ Output end เท่ากับ 16.75 นำไปบดเป็นเม็ดเล็กด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น (Flat film) โดยใช้หัวคายแบบแผ่น (Slit die) กว้าง 15.5 cm หนา 10 μm ตามสภาวะแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.6 สภาวะที่ใช้ในการผสม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

สภาวะ	ค่า
อัตราเร็วสกรู	120 rpm
อัตราการป้อน (Feed rate)	1 kg/hr
อุณหภูมิบริเวณ 1 (Feed zone)	160°C
อุณหภูมิบริเวณ 2	170°C
อุณหภูมิบริเวณ 3	180°C
อุณหภูมิบริเวณ 4 (Die zone)	180°C

ตารางที่ 3.7 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น

สภาวะ	ค่า
อัตราเร็วสกรู	7 rpm
ความเร็วลูกกลิ้งหล่อเย็น (Puller speed)	4 rpm
อุณหภูมิบริเวณ 1 (Feed zone)	145°C
อุณหภูมิบริเวณ 2	165°C
อุณหภูมิบริเวณ 3	185°C
อุณหภูมิบริเวณ 4 (Die zone)	185°C

3.3.3 การศึกษาชนิดของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

เตรียม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 ตามตารางที่ 3.5 โดยเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ 0.25 % โดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีน เลือกใช้อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ และชนิดออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมตามข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ทำการผสม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนอนคู่ตามสภาวะแสดงดังตารางที่ 3.6 นำไปบดเป็นเม็ดเล็กด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นตามสภาวะแสดงดังตารางที่ 3.7

3.3.4 การศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

เตรียม PP/m-MMT ตามตารางที่ 3.5 สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 ที่มีปริมาณออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 3, 6 และ 9 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเติมสารเพิ่มเสถียรภาพ 0.25 % โดยน้ำหนักของพอลิพรอพิลีน เลือกใช้อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ชนิดออร์กาโนเคลย์และชนิดสารช่วยผสมที่เหมาะสมตามข้อ 3.3.1-3.3.3 ทำการผสม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนอนคู่ตามสภาวะแสดงดังตารางที่ 3.6 นำไปบดเป็นเม็ดเล็กด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นตามสภาวะแสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นกรณีศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์

สภาวะ	ออร์กาโนเคลย์ 3 % โดยน้ำหนัก	ออร์กาโนเคลย์ 6 % โดยน้ำหนัก	ออร์กาโนเคลย์ 9 % โดยน้ำหนัก
อัตราเร็วสกรู	7 rpm	7 rpm	7 rpm
ความเร็วลูกกลิ้งหล่อเย็น	4 rpm	4 rpm	4 rpm
อุณหภูมิบริเวณ 1 (Feed zone)	145°C	145°C	145°C
อุณหภูมิบริเวณ 2	165°C	165°C	165°C
อุณหภูมิบริเวณ 3	185°C	185°C	185°C
อุณหภูมิบริเวณ 4 (Die zone)	185°C	185°C	165°C

3.3.5 การศึกษาอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

เตรียม PP/m-MMT โดยเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ ชนิดออร์กาโนเคลย์ ชนิดสารช่วยผสมและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่เหมาะสมตามข้อ 3.3.1-3.3.4 ทำการผสม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนอุณหภูมิตามสภาวะแสดงดังตารางที่ 3.6 นำไปบดเป็นเม็ดเล็กด้วยเครื่องบดพลาสติก จากนั้นนำไปขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นตามสภาวะแสดงดังตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 สภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์ม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่นกรณีศึกษาอัตราส่วนการดึง

สภาวะ	อัตราส่วนการดึง	อัตราส่วนการดึง	อัตราส่วนการดึง
	42	25	19
อัตราเร็วสกรู	7 rpm	11 rpm	15 rpm
ความเร็วลูกกลิ้งหล่อเย็น	4 rpm	4 rpm	4 rpm
อุณหภูมิบริเวณ 1 (Feed zone)	145°C	145°C	145°C
อุณหภูมิบริเวณ 2	165°C	165°C	165°C
อุณหภูมิบริเวณ 3	185°C	185°C	185°C
อุณหภูมิบริเวณ 4 (Die zone)	185°C	185°C	185°C

3.3.6 การตรวจสอบสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

3.3.6.1 การตรวจสอบลักษณะของแผ่นฟิล์ม

ตรวจสอบลักษณะของแผ่นฟิล์มโดยสังเกตสี ความขุ่นและวัดความหนาของแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องไมโครมิเตอร์

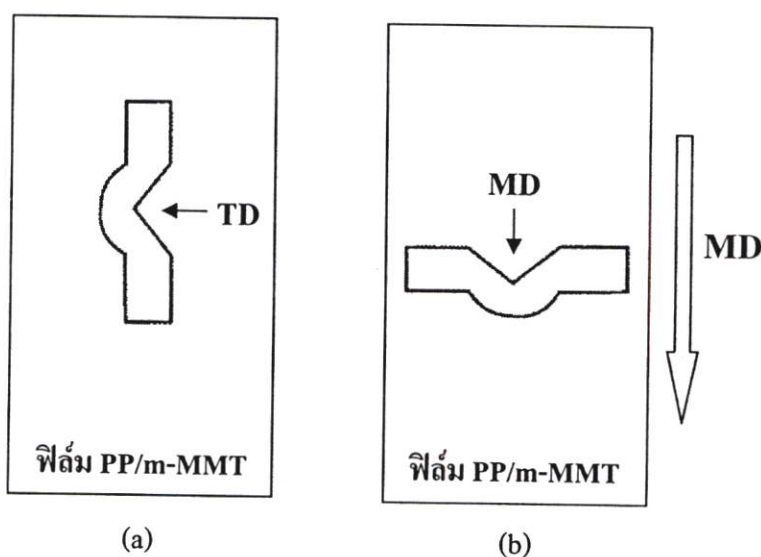
3.3.6.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

1. สมบัติความแข็งแรงดึง

โดยตัดฟิล์มตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยกำหนดให้ชิ้นงานมีความยาว 100 mm กว้าง 10 mm ตามมาตรฐาน ASTM D 882 [32] ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ใช้ Load cell 100 N ความเร็วในการดึง (Cross head speed) 500 mm/min ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) 50 mm ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดคราก (% Elongation at yield) ของชิ้นงานตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction : MD) และตามขวางเครื่องจักร (Transverse Direction : TD)

2. สมบัติความแข็งแรงฉีกขาด

นำฟิล์มตัวอย่างมาตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกแบบ Die C ตามมาตรฐาน ASTM D 624 [33] ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ ใช้ Load cell 100 N ความเร็วในการดึง 50 mm/min ทดสอบตามแนว MD และแนว TD โดยพิจารณาทิศทางของชิ้นงานตามการฉีกขาดตรงบริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงาน กล่าวคือฟิล์มที่ตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกตามแนว MD เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานเป็นแนวเส้นตรงในทิศทาง MD ฟิล์มจะเกิดการฉีกขาดตรงบริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงานตามทิศทาง TD จะพิจารณาเป็นค่าความแข็งแรงฉีกขาดในทิศทาง TD ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการเตรียมชิ้นงานทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด (a) ทิศทาง TD และ (b) ทิศทาง MD

3.3.6.3 การศึกษาระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) ของออร์กาโนเคลย์

นำฟิล์มตัวอย่างขนาด 30 mm x 30 mm มาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นออร์กาโนเคลย์จากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law โดยใช้ Step size 0.02° Step time 8 s Slit แบบ V_3 และเริ่มที่ 2θ เท่ากับ 1-10 องศา

3.3.6.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

1. เทคนิค Differential Scanning Calorimetry, DSC

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก (T_{c_onset}) ด้วยเครื่อง DSC โดยชั่งน้ำหนักสาร

ประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) เท่ากับ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 200°C ตามมาตรฐาน ASTM E 794 [35]

2. เทคนิค Thermogravimetric Analysis, TGA

นำฟิล์มตัวอย่างมาศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัว ($T_{d\text{ onset}}$) ด้วยเครื่อง TGA โดยชั่งน้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 500°C ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน และทำการศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์โดยชั่งน้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 50°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 800°C ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจนตามมาตรฐาน ASTM E 1131 [36]

3.3.6.5 การศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนด้วยเครื่อง Oxygen permeability analyzer โดยวางฟิล์มรูปแปดเหลี่ยมด้านเท่าที่มีความยาวด้านละ 50 mm ซึ่งตัดด้วย Cutting template ตรงกลางระหว่างเซลล์ ปลอกก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจน โดยก๊าซไนโตรเจนจะเป็นตัวนำก๊าซออกซิเจนที่สามารถผ่านแผ่นฟิล์มไปยังด้านที่มีออกซิเจนต่ำกว่า เครื่องจะทำการบันทึกและอ่านค่าปริมาตรก๊าซออกซิเจนที่ผ่านออกจากผิวฟิล์มด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ของฟิล์มภายใต้สภาวะคงที่ รายงานผลเป็นอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Gas Transmission Rate : OTR) มีหน่วยเป็น $\text{cc}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ และค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : *OP*) มีหน่วยเป็น $\text{mm}\cdot\text{cc}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ ตามมาตรฐาน ASTM D 3985 [37]

3.3.6.6 การศึกษาสัณฐานวิทยา

เตรียมตัวอย่างโดยผสมพอลิเอสเทอร์เรซินชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated polyester resin) และโคบอลต์แนฟทีเนต 0.2 % โดยน้ำหนัก ลงในบีกเกอร์แล้วคนให้เข้ากัน จากนั้นเติมเมทิลเอทิลคีโตนเปอร์ออกไซด์ 1 % โดยน้ำหนัก ผสมให้เข้ากัน เทเรซินที่ผสมแล้วลงบนแผ่นใส วางฟิล์มลงบนบริเวณที่เทเรซินลงไป จากนั้นเทเรซินทับลงบนแผ่นฟิล์มอีกครั้ง ทิ้งไว้ให้แข็ง ลอกชิ้นงานออกจากแผ่นใส นำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) เป็นเวลา 30 นาที แล้วหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ลอกแผ่นฟิล์มตัวอย่างที่ติดกับเรซินออก จากนั้นนำพื้นผิวบริเวณรอยแยกของแผ่นฟิล์มมาเคลือบทอง เพื่อศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัวและประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.3.6.7 การทดสอบค่าดัชนีการไหล

ดัชนีการไหล (Melt Flow Index : MFI หรือ Melt Flow Rate : MFR) เป็นค่าที่สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมการไหล โดยกดพลาสติกหลอมเหลวให้ไหลผ่านหัวดายที่อุณหภูมิ 230°C น้ำหนักกด 2.16 kg รายงานผลเป็นน้ำหนักต่อหน่วยเวลาคือ g/10 min ตามมาตรฐาน ASTM D 1238 [38]

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองได้ทำการเติมออร์กาโนเคลย์และสารช่วยผสม (Compatibilizer) ลงในพอลิพรอพิลีน (Polypropylene : PP) เพื่อเตรียมเป็นฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (Polypropylene nanocomposites : PP/m-MMT) หลายสูตร ดังนั้นในการนำเสนอจึงใช้อักษรย่อเพื่อแสดงแทนฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสองทิศทาง (Biaxially Oriented Polypropylene : BOPP) ฟิล์ม PP ชนิดของสารช่วยผสม ชนิดของออร์กาโนเคลย์และฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 อักษรย่อแทนสูตรต่างๆ

ลำดับ	สูตร	อักษรย่อ
1	BOPP	BOPP
2	Polypropylene	PP
3	Priex [®] 20093	P93
4	Priex [®] 20095	P95
5	Polybond [®] 1001	P01
6	Polybond [®] 1002	P02
7	Cloisite [®] 20A	20A
8	Claytone [®] HY	HY
9	PP / P93 / 20A 82 / 12 / 6	P93-20A6
10	PP / P95 / 20A 82 / 12 / 6	P95-20A6
11	PP / P01 / 20A 82 / 12 / 6	P01-20A6
12	PP / P02 / 20A 82 / 12 / 6	P02-20A6
13	PP / P95 / HY 82 / 12 / 6	P95-HY6

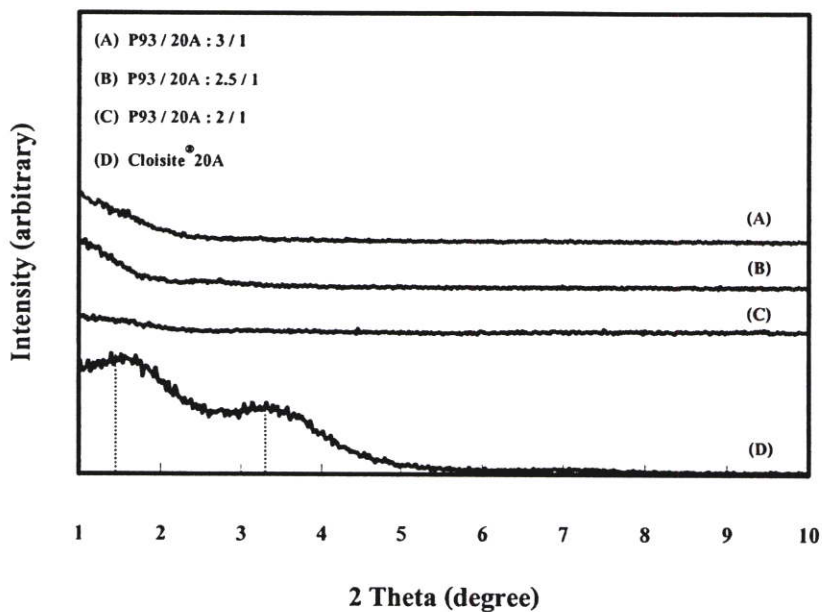
ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ลำดับ	สูตร	อักษรย่อ
14	PP / P95 / 20A 91 / 6 / 3 (Dr = 42)	P95-20A3 หรือ P95-20A3-D42
15	PP / P95 / 20A 73 / 18 / 9	P95-20A9
16	PP / P95 / 20A 91 / 6 / 3 (Dr = 25)	P95-20A3-D25
17	PP / P95 / 20A 91 / 6 / 3 (Dr = 19)	P95-20A3-D19

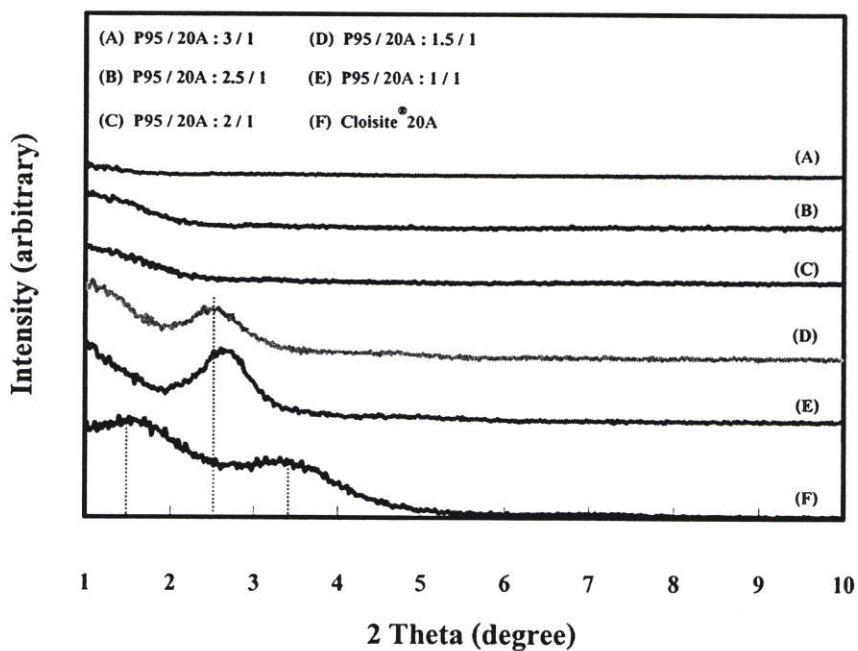
4.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ในพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (PP/m-MMT)

การเตรียม PP/m-MMT โดยเติมออร์กาโนเคลย์เป็นส่วนเสริมแรง มักจะพบปัญหาบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค (Interfaces) ของพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และออร์กาโนเคลย์ หรือออร์กาโนเคลย์อาจเข้ามาเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนในระหว่างกระบวนการผสม ดังนั้นการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างวัฏภาคของพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และออร์กาโนเคลย์จึงเป็นปัจจัยสำคัญ โดยการเติมสารช่วยผสมใน PP/m-MMT จะส่งผลให้ออร์กาโนเคลย์กระจายตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพิ่มความแข็งแรงยึดเกาะระหว่างวัฏภาคของออร์กาโนเคลย์และพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ ซึ่งเป็นการปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

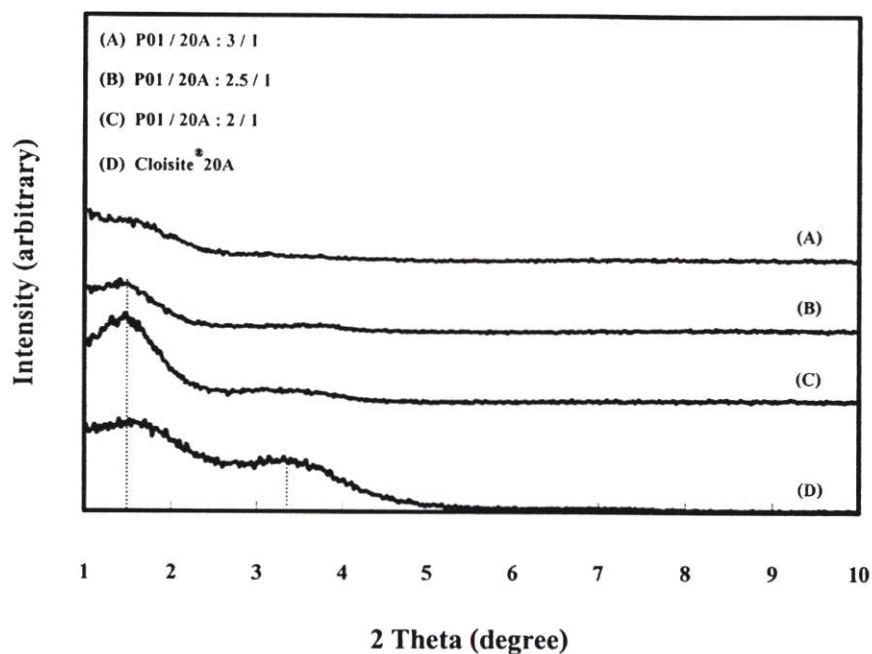
ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสม ชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafted Maleic Anhydride : PP-g-MA) หรือพอลิพรอพิลีนกราฟต์อะคริลิกแอซิก (Polypropylene grafted Acrylic Acid : PP-g-AA) ที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่ง (Branching) เป็นหมู่ฟังก์ชันมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic Anhydride : MA) หรืออะคริลิกแอซิก (Acrylic Acid : AA) ตามลำดับ ซึ่งมีความเป็นขั้ว (Polarity) สูง จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups : -OH) ที่โครงสร้างออร์กาโนเคลย์ [10] และสารช่วยผสมทั้ง 2 ชนิดนี้ยังมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงสามารถแทรกสอดเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่าย เป็นผลทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้น อนุภาคซิลิเกตจึงมีค่าสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) สูงขึ้น นอกจากนี้สายโซ่พอลิพรอพิลีนที่กราฟต์อยู่กับสารช่วยผสมยังสามารถเกี่ยวพัน (Entanglement) กับสายโซ่พอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงบริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค



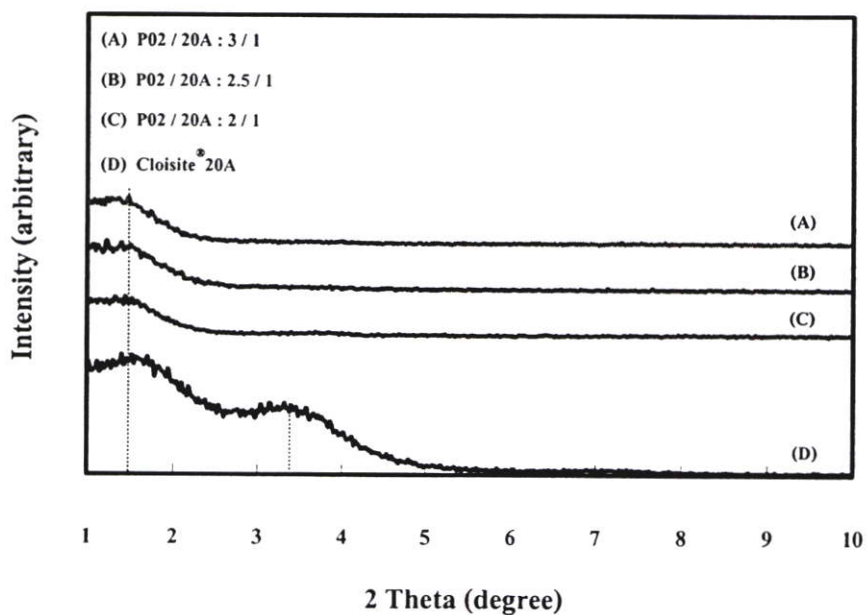
รูปที่ 4.1 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite® 20A และ PP/m-MMT ที่เติมสารช่วยผสมเกรด Priex® 20093 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite® 20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1



รูปที่ 4.2 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite® 20A และ PP/m-MMT ที่เติมสารช่วยผสมเกรด Priex® 20095 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite® 20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 และ 3:1



รูปที่ 4.3 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A และ PP/m-MMT ที่เติมสารช่วยผสมเกรด Polybond[®] 1001 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1



รูปที่ 4.4 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A และ PP/m-MMT ที่เติมสารช่วยผสมเกรด Polybond[®] 1002 และออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1

ตารางที่ 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

สูตร	อัตราส่วน	2θ (องศา)	ระยะห่างระหว่างชั้น (nm)
Cloisite 20A	-	1.5	5.8
	-	3.3	2.7
P93 : 20A	2 : 1	-	-
	2.5 : 1	-	-
	3 : 1	-	-
P95 : 20A	1 : 1	2.6	3.4
	1.5 : 1	2.5	3.6
	2 : 1	-	-
	2.5 : 1	-	-
	3 : 1	-	-
P01 : 20A	2 : 1	1.5	6.1
	2.5 : 1	1.4	6.3
	3 : 1	-	-
P02 : 20A	2 : 1	1.4	6.1
	2.5 : 1	1.2	7.2
	3 : 1	1.3	6.9

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 1.5 และ 3.3 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 5.8 และ 2.7 nm ตามลำดับ แต่เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ใน PP/m-MMT โดยเติมสารช่วยผสมเกรด Priex[®] 20093, Priex[®] 20095, Polybond[®] 1001 และ Polybond[®] 1002 ที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1 พบว่าการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA จะทำให้ออร์กาโนเคลย์มีระยะห่างระหว่างชั้นมากกว่าการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-

AA ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.1-4.4 และตารางที่ 4.2 ใน XRD patterns ของ PP/m-MMT ที่เติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA ที่อัตราส่วน 2:1, 2.5:1 และ 3:1 พบว่าไม่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ อาจเนื่องมาจากหมู่ฟังก์ชัน MA มีสมบัติความเป็นขั้ว (Dipole moment) สูงกว่าหมู่ฟังก์ชัน AA [39] โดยหมู่ฟังก์ชัน MA มีค่า Dipole moment เท่ากับ 3.93 Debye และหมู่ฟังก์ชัน AA มีค่า Dipole moment เท่ากับ 1.46 Debye ดังนั้นสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน MA จึงเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ได้แข็งแรงกว่า [10] นอกจากนี้จากการศึกษาค่าครรชนิกการไหล (MFI) ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าสารช่วยผสมชนิด PP-g-AA จึงสามารถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่ายกว่า [11] เป็นผลทำให้ออร์กาโนเคลย์มีประสิทธิภาพการกระจายตัวที่ดี

จากรูปที่ 4.2 แสดง XRD patterns กรณีศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ใน PP/m-MMT ที่มีการเติมสารช่วยผสมเกรด Priex[®] 20095 และเติมออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:1, 1.5:1, 2:1, 2.5:1 และ 3:1 พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 1:1, 1.5:1 ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 2.6 และ 2.5 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 3.4 และ 3.6 nm ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยการเติมสารช่วยผสมในปริมาณที่น้อยเกินไป จะทำให้ประสิทธิภาพการเกิดอันตรกิริยาและการแทรกตัวของสายโซ่พอลิพรอพิลีนเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ลดลง ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ลดลงตามไปด้วย เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1, 2.5:1 และ 3:1 จะทำให้ประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้น [11] แต่จากการทดลองสามารถสังเกตได้ว่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เพิ่มขึ้นไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังจะเห็นได้จาก XRD patterns พบว่าไม่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ ที่ทุกอัตราส่วน นอกจากนี้การเติมอัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์สูงจะเป็นการเพิ่มปริมาณสารช่วยผสม โดยสารช่วยผสมในปริมาณที่มากเกินไปอาจรวมตัวเกิดเป็นวัสดุใหม่ หรือเกิดเป็นลักษณะของพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) ได้ และการเติมสารช่วยผสมในปริมาณมากยังมีผลทำให้สมบัติเชิงกลของ PP/m-MMT มีแนวโน้มลดลง [11] ประกอบกับเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตเนื่องจากสารช่วยผสมมีราคาค่อนข้างแพง

จากการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ใน PP/m-MMT โดยศึกษาในสารช่วยผสมทั้ง 4 เกรด พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1 เพื่อคงประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ โดยจากการทดลองจะเห็นได้ว่าการเติมอัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ต่ำกว่า 2:1 จะทำให้ประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ลดลง แต่หากเติมอัตรา

ส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์สูงกว่า 2:1 สารช่วยผสมอาจรวมตัวเกิดเป็นวัฏภาคใหม่หรือเกิดเป็นลักษณะของพอลิเมอร์ผสม รวมทั้งอาจส่งผลเสียอื่นๆ ตามมาดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

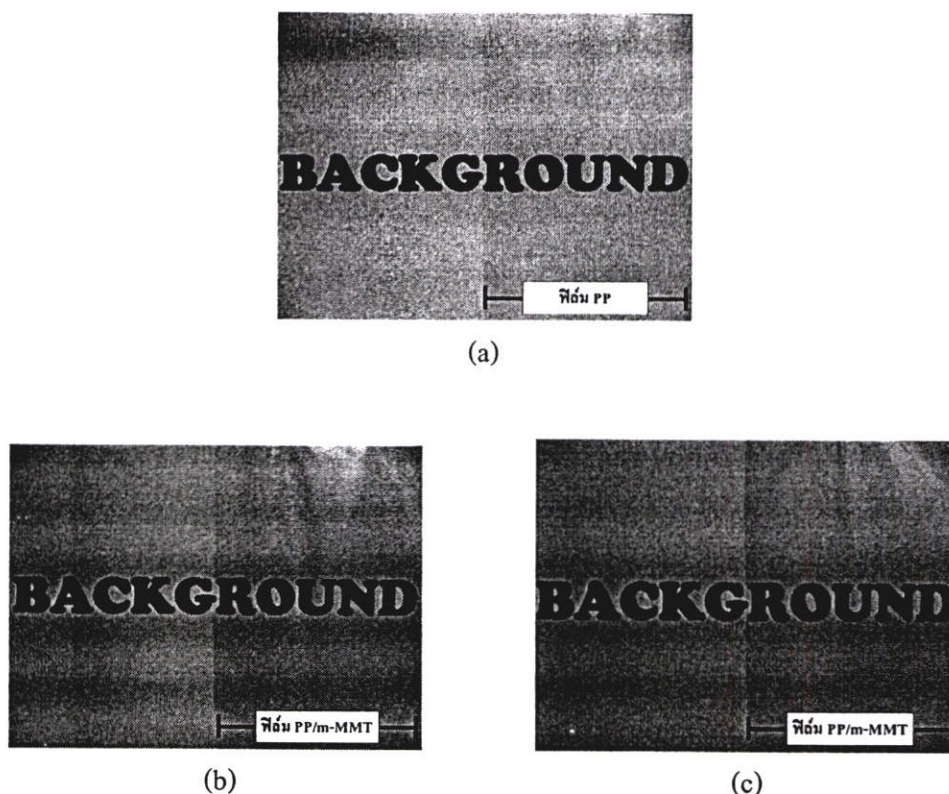
4.2 ผลการศึกษาชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

4.2.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT

จากการสังเกตลักษณะของสี ความขุ่นและวัดความหนาของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT จะมีความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP เนื่องจากออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A เป็นอนุภาคที่มีสีขาวเมื่อเติมลงในฟิล์ม PP/m-MMT จึงทำให้ฟิล์มมีความขุ่นเพิ่มขึ้นและยังพบจุดเล็กๆ ปรากฏบนแผ่นฟิล์ม PP/m-MMT ลักษณะคล้ายเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye [12] ซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมโยง (Crosslink) กันเองของสารช่วยผสม และถือว่าเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน อาจส่งผลต่อสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซ ออกซิเจนและสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 มีเจดสีเหลืองและความขุ่นใกล้เคียงกันเนื่องจากการเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณที่เท่ากัน ความหนาของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.3 และตัวอย่างของฟิล์มแต่ละสูตรแสดงดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

สูตร	ความหนาเฉลี่ย (μm)
PP	23 ± 3
P95-HY6	26 ± 3
P95-20A6	30 ± 6



รูปที่ 4.5 ตัวอย่าง (a) ฟิล์ม PP (b) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ (c) ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 (ด้านซ้ายของรูปแสดงพื้นหลังส่วนด้านขวาของรูปแสดงฟิล์ม PP/m-MMT)

4.2.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล

ผลการทดสอบค่าดัชนีการไหล (MFI) ของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า PP/m-MMT มีค่า MFI ต่ำกว่า PP หรืออาจกล่าวได้ว่า PP/m-MMT มีความหนืดมากกว่า PP ทั้งนี้เนื่องมาจากออร์กาโนเคลย์ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งไปขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ช้าลง [42] ดังนั้นเมื่อทำการเติมออร์กาโนเคลย์ใน PP/m-MMT ค่า MFI จึงมีค่าลดลงหรืออาจกล่าวได้ว่ามีความหนืดสูงขึ้นนั่นเอง ปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งที่พบปกติเมื่อทำการเติมสารตัวเติมอนุภาคของแข็งลงในพอลิเมอร์

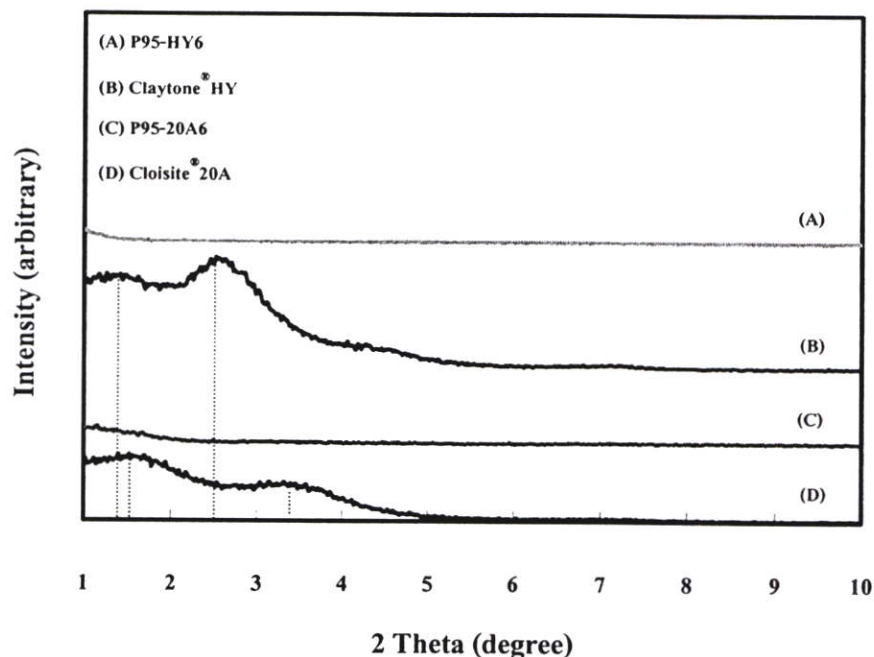
การศึกษาผลของชนิดออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อความหนืดใน PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY และ Cloisite[®] 20A ตามลำดับ พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 2 สูตร มีค่า MFI ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.4 ค่าครรชนีการไหล ($230^{\circ}\text{C} / 2.16 \text{ kg}$) ของ PP และ PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

สูตร	MFI (g/10 min)
PP	8 ± 0.5
P95-HY6	5 ± 0.5
P95-20A6	5 ± 0.4

4.2.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY ปรากฏพีก 2 θ ที่ตำแหน่ง 1.3 และ 2.5 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 6.6 และ 3.5 nm ตามลำดับ ส่วนออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ปรากฏพีก 2 θ ที่ตำแหน่ง 1.5 และ 3.3 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 5.8 และ 2.7 nm ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY และ Cloisite[®] 20A ตามลำดับ พบว่าไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2 θ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 การที่พีก XRD ของออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY และ Cloisite[®] 20A หายไป แสดงว่าออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 เกรดมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดีเนื่องจากออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY เป็นออร์กาโนเคลย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมสีเพื่อปรับความหนืดจึงมีสารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่มาก และเป็นออร์กาโนเคลย์ที่ผ่านการคัดแปรพื้นผิวด้วยสารอินทรีย์มาแล้ว ดังนั้นจึงมีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกตแต่ขอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ จึงเกิดการขยายตัวของระยะห่างระหว่างชั้นออร์กาโนเคลย์ [19] ทำให้ออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY มีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์สูง ส่วนออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A เป็นออร์กาโนเคลย์ที่ได้รับการคัดแปรพื้นผิวด้วยสารอินทรีย์ Dimethyl, dehydrogenated tallow, quaternary ammonium : 2M2HT จึงมีระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์สูงเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากผลการศึกษาค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 เกรด ข้างต้น ดังนั้นเมื่อนำออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY และ Cloisite[®] 20A มาทำการเตรียมเป็นฟิล์ม PP/m-MMT สายโซ่พอลิพรอพิลีนจึงสามารถแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่าย ส่งผลให้ออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 เกรดมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดี



รูปที่ 4.6 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY และ Cloisite[®] 20A และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_{c \text{ onset}}$) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และภาคผนวก ก พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์ม PP อาจเนื่องมาจากการขึ้นรูปฟิล์ม ตัวอย่างด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น โดยการดึงฟิล์ม PP/m-MMT ผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็น (Pulling roll) จะทำให้อนุภาคซิลิเกตมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) [45] ซึ่งอาจนำไปให้สายโซ่พอลิเมอร์จัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวเครื่องจักรตามไปด้วย ส่งผลให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์ม PP ที่ไม่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึกของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าใกล้เคียงกัน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ด้วยเทคนิค DSC พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 2 สูตร มีค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึกใกล้เคียงกัน แสดงว่าชนิดของออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละความเป็นผลึก ความหนาของชั้นผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

สูตร	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก T_m ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก $T_{c \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
PP	33	162	122
P95-HY6	43	162	124
P95-20A6	46	163	125

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนและอุณหภูมิเริ่มสลายตัว ($T_{d \text{ onset}}$) ในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และภาคผนวก ก พบว่าปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนในฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการผสมเมื่อเทเม็ดพอลิพรอพิลีนที่ผสมออร์กาโนเคลย์ สารช่วยผสม และสารทำให้เกิดเสถียรภาพลงในช่องรับสาร (Hopper) ของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ เม็ดพอลิพรอพิลีนและออร์กาโนเคลย์จะเคลื่อนที่ตามแรงขับของสกรูและเกิดการผสม แต่อนุภาคบางส่วนของออร์กาโนเคลย์จะติดค้างอยู่ในร่องสกรู เนื่องจากออร์กาโนเคลย์มีความหนาแน่นมากกว่าเม็ดพอลิพรอพิลีน นอกจากนี้ออร์กาโนเคลย์มีลักษณะเป็นผงจึงเกิดการฟุ้งกระจายในขั้นตอนการผสมได้ง่าย ส่งผลให้ปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่พบในฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าน้อยกว่าที่กำหนด

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

สูตร	ปริมาณออร์กาโนเคลย์ ที่กำหนด (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณออร์กาโนเคลย์ ที่แน่นอน (% โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว $T_{d \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
PP	-	-	333
P95-HY6	6	5.72	388
P95-20A6	6	5.81	381

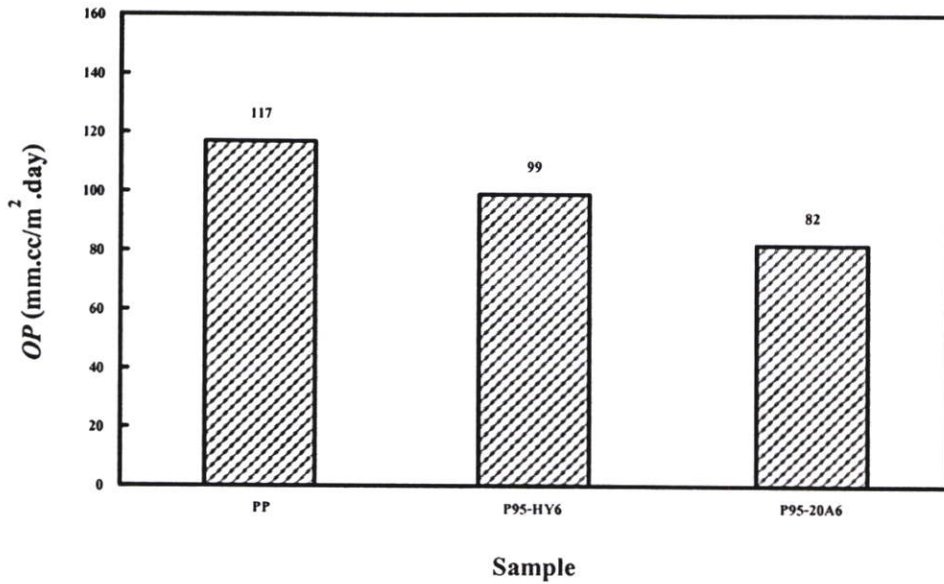
จากการศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัวของฟิล์ม PP/m-MMT พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PP การพัฒนาความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) เป็นผลเนื่องมาจากการที่ชั้น

ของซิติลิตแตกตัวออกจากกันเป็นแผ่นบาง และจัดเรียงตัวขวางในลักษณะของ Tortuous path ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของสารที่เกิดการเสียดสภาพต้องผ่านไปตามชั้นของอนุภาคซิติลิตที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกันขวางอยู่ [11] เป็นผลทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP และการศึกษาอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 พบว่าชนิดของออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มสลายตัวดังแสดงในตารางที่ 4.6

4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

การศึกษาศักยภาพการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT กรณีที่ความหนาของฟิล์มเท่ากัน โดยพิจารณาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : OP) ในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีค่า OP ลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP ที่ไม่ได้เติมออร์กาโนเคลย์ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ด้วย 2 เหตุผลหลักคือจากทฤษฎี Tortuosity กล่าวว่อนุภาคซิติลิตที่กระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางอยู่ในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ จะจัดเรียงตัวขวางกันเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงในรูปที่ 2.13 อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลงเมื่อผสมออร์กาโนเคลย์คือการที่ฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์ม PP ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.4 เนื่องจากโครงสร้างผลึกเป็นโครงสร้างสายโซ่ที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือมีการเรียงชิดติดกัน ทำให้สามารถลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลงได้ จากเหตุผลข้างต้นเป็นผลทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์ม PP

จากผลการทดลองพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าหรือมีค่า OP ต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เป็นผลเนื่องมาจากประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ เพื่อขวางกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 2 สูตรแตกต่างกัน ซึ่งจากผลการศึกษาค่า OP ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ นำไปสู่การศึกษาค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิติลิตโดยการคำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในภาคผนวก ฉ ทำให้ทราบว่าอนุภาคซิติลิตในฟิล์มสูตร P95-20A6 มีค่า Aspect ratio สูงกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6 แสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งสามารถยืนยันผลการคำนวณค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิติลิตได้จากผลการศึกษาศณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยอนุภาคซิติลิตที่มีค่า Aspect ratio สูง จะเป็นการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนไปตามชั้นของอนุภาคซิติลิตที่จัดเรียงตัวขวางกันเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เป็นผลทำให้ฟิล์มสูตร P95-20A6 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6



รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร 95-HY6 และ P95-20A6

ตารางที่ 4.7 Tortuosity factor (τ) และค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

สูตร	P_s/P_p^a	ออร์กาโนเคลย์ (% โดยน้ำหนัก)	ϕ_s^b	Tortuosity factor	Aspect ratio ^c
P95-HY6	99 / 117 = 0.85	5.72	0.02	1.16	16
P95-20A6	82 / 117 = 0.70	5.81	0.02	1.40	40

หมายเหตุ ^a คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิตต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

^b คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิเกต

^c คือ สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคซิลิเกต

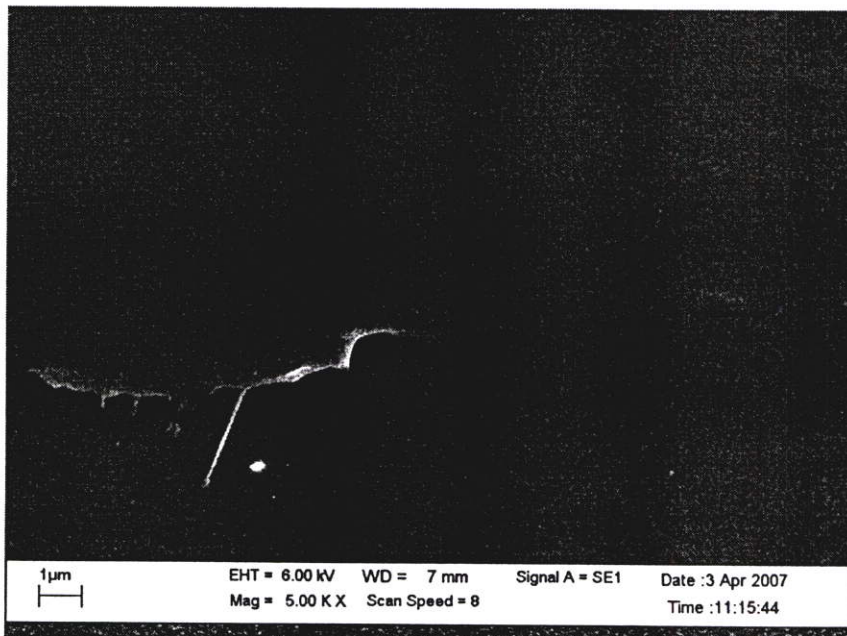
การที่ออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 มีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตต่ำกว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 อาจเป็นผลเนื่องมาจากรูปร่างหรือขนาดที่แท้จริงของอนุภาคซิลิเกตในออร์กาโนเคลย์ทั้ง 2 เกรดแตกต่างกัน โดยอนุภาคซิลิเกตในออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY อาจมีขนาดด้านข้างเล็กกว่าจึงมีค่า Aspect ratio ต่ำกว่าอนุภาคซิลิเกตในออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ดังนั้นถึงแม้ว่าออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 2 สูตร จะมีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่เท่ากัน เมื่อ

นำมาเตรียมเป็นฟิล์ม PP/m-MMT ออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY จึงมีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตต่ำกว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A

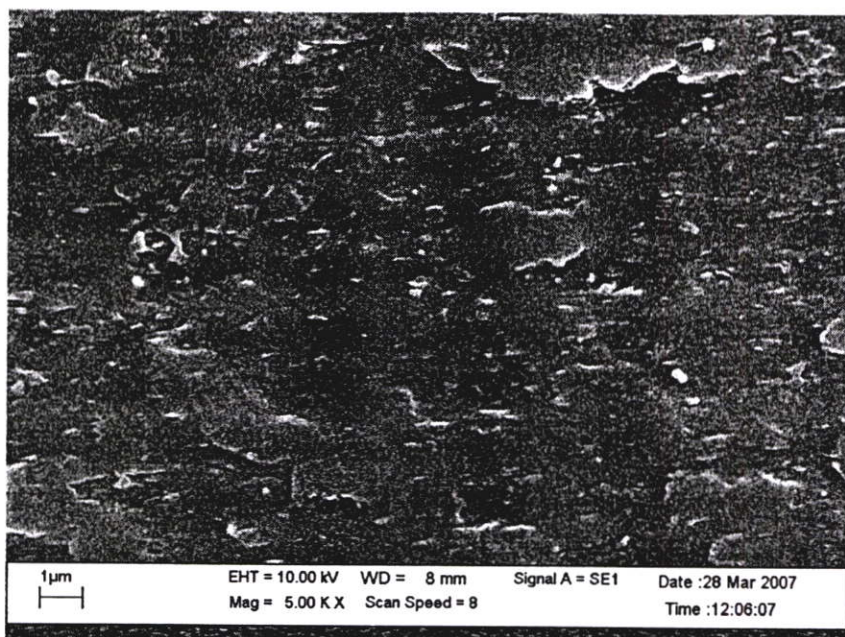
นอกจากนี้การทำนายตามทฤษฎี Tortuosity จากผลการทดลองอาจคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเนื่องจากพบเม็ดเจลที่มีลักษณะคล้าย Fish eye ซึ่งถือเป็นจุดบกพร่องบนฟิล์ม PP/m-MMT [12] ดังนั้นค่า *OP* ที่ได้อาจคลาดเคลื่อนและส่งผลต่อการทำนายตามทฤษฎี Tortuosity

4.2.6 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

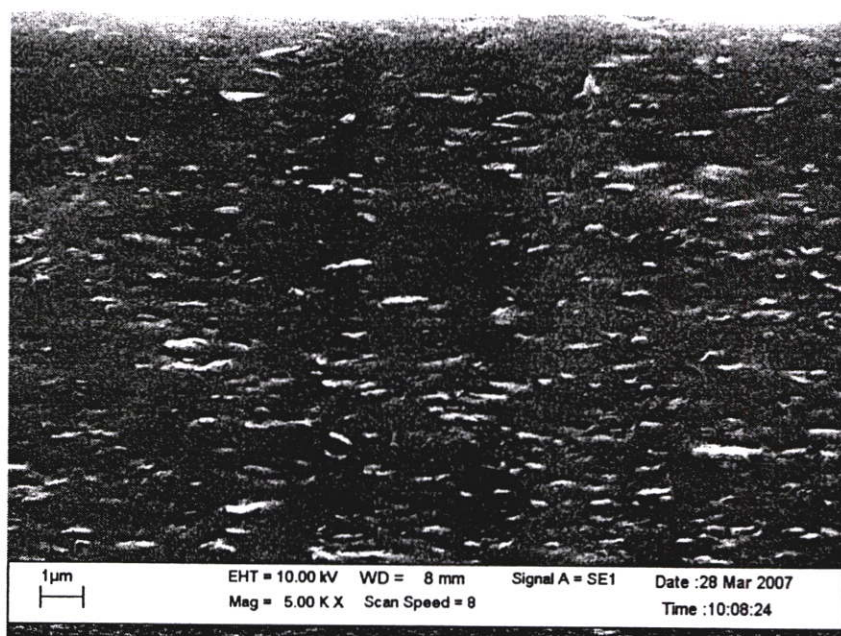
จากการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว และประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 โดยเทคนิค SEM ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) จากแรงขับของเครื่องขึ้นรูปฟิล์ม และกระจายอนุภาคอย่างสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY ในฟิล์มสูตร P95-HY6 ที่มีการจัดเรียงตัวตามแนวเครื่องจักรเพียงบางส่วนและมีการกระจายอนุภาคอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกัน แต่จากรูปจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY มีความยาวด้านข้างของอนุภาคซิลิเกตน้อยกว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในหัวข้อที่ 4.2.5



(a)



(b)

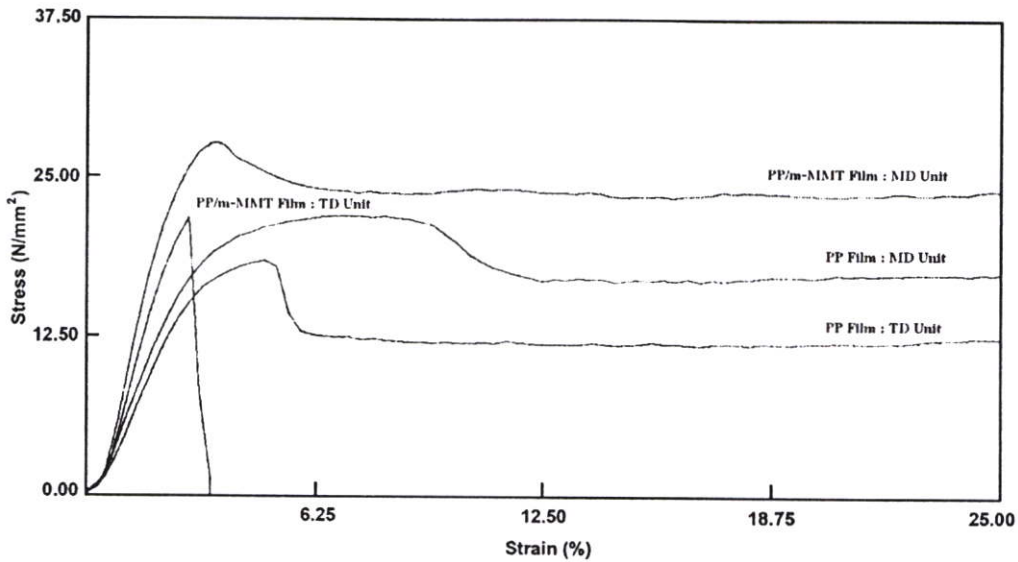


(c)

รูปที่ 4.8 ภาพตัดขวาง (Cross section) ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) โดยการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ (a) ฟीलล์ม PP (b) ฟीलล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ (c) ฟीलล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.2.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction : MD) และแนวขวางเครื่องจักร (Transverse Direction : TD) แสดงดังรูปที่ 4.9 สามารถนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมสมบัติเชิงกลโดยรวมของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT ได้ โดยฟิล์ม PP ในทิศทาง MD และ TD รวมทั้งฟิล์ม PP/m-MMT ในทิศทาง MD จะมีพฤติกรรมการเสียสภาพในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือเมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำจะเกิดการยืดออก ในช่วงแรกกราฟจะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ชิ้นงานจะสามารถกลับคืนมาอยู่ในสภาพเดิมได้ เมื่อยืดการให้แรงกระทำ แต่เมื่อให้แรงกระทำต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดคราก (Yield point) ชิ้นงานจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ช่วงนี้ค่าความเค้นของกราฟจะลดลง เป็นการบ่งบอกถึงการเสียรูปร่างในลักษณะการเกิดคอคอด (Necking) และหากชิ้นงานยังคงได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง ค่าความเค้นจะเริ่มคงที่ จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน จากกราฟแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงมากระทำต่อวัสดุและมีความแข็งแรงมากกว่าฟิล์ม PP เนื่องจากมีค่ามอดุลัส (Modulus) และค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) หรือค่าความเค้น ณ จุดคราก (Stress at yield) สูงกว่า ดังที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้น ซึ่งนำไปสู่ความเข้าใจเกี่ยวกับประเภทของพลาสติก ดังนั้นฟิล์ม PP จึงเป็นพลาสติกที่มีลักษณะนิ่มและเหนียวเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP/m-MMT ที่ผ่านการเติมออร์กาโนเคลย์แล้วทำให้ได้ฟิล์มที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยฟิล์ม PP/m-MMT ในทิศทาง MD จะแสดงลักษณะของพลาสติกเป็นแบบแข็งและเหนียว นอกจากนี้หากพิจารณารูปร่างกราฟของฟิล์ม PP/m-MMT ในทิศทาง TD จะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงกระทำแก่ชิ้นงาน ชิ้นงานจะเกิดการยืดออกเพียงเล็กน้อยและเมื่อให้แรงกระทำอย่างต่อเนื่อง ชิ้นงานจะเกิดการเสียสภาพโดยไม่มีการยืดออก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงถึงลักษณะของฟิล์มเป็นแบบแข็งเปราะ แสดงว่าการเติมออร์กาโนเคลย์ทำให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic property) มากขึ้น กล่าวคือสมบัติเชิงกลในทิศทาง MD และ TD แตกต่างกันอย่างมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคซิลิกาที่มีค่า Aspect ratio สูง เมื่อผสมในพอลิเมอร์หลอมเหลว จะทำให้มีความหนืดสูงขึ้น และเมื่อถูกดึงยืดขณะขึ้นรูปทำให้อนุภาคซิลิกาเกิดการจัดเรียงตัวในแนวแรง (MD) มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการเสริมแรง (Reinforcing effect) ตามแนวแรง แต่ทำให้ฟิล์มเปราะขาดง่ายในแนวตั้งฉากกับแรง (TD) นอกจากนี้การที่ฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT ในทิศทาง MD มีความแข็งแรงสูงกว่าทิศทาง TD เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการขึ้นรูปฟิล์มโดยเทคนิคการผลิตฟิล์มแผ่น (Flat film) ที่มีการดึงยืดฟิล์มในขั้นตอนการม้วนเก็บตามทิศทาง MD จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์มีการจัดเรียงตัวในทิศทาง MD มากกว่าทิศทาง TD โดยเมื่อให้แรงดึงในแนว MD แผ่นฟิล์มจึงสามารถทนต่อแรงดึงและยึดตัวตามแรงดึงได้มากขึ้น



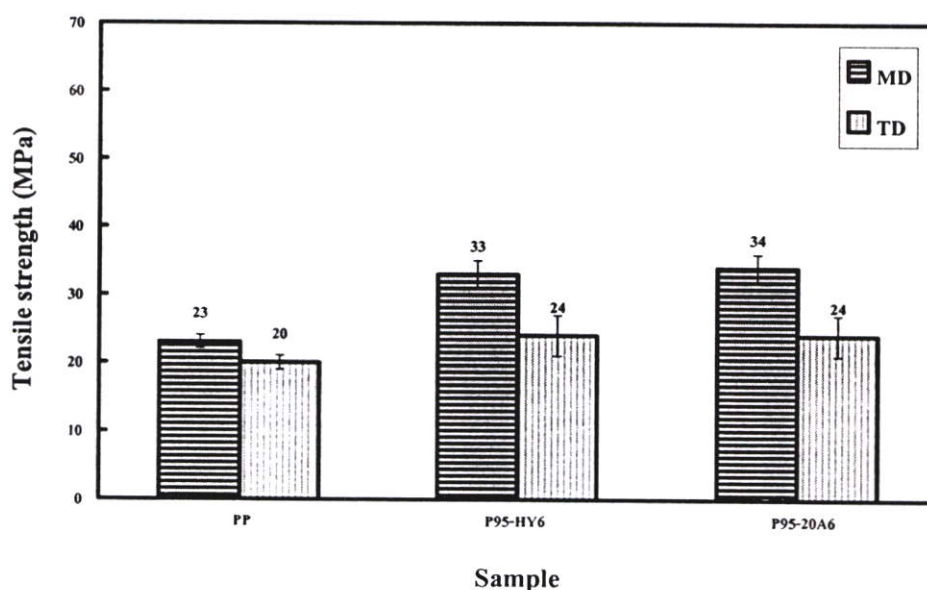
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 ในทิศทาง MD และ TD

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์มีการพัฒนาสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ดังแสดงในรูปที่ 4.10-4.12 ตามลำดับ ทั้งนี้การพัฒนาค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงฉีกขาด สามารถอธิบายได้จากปรากฏการณ์เสริมแรง (Reinforcing effect) ของออร์กาโนเคลย์ โดยการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA ที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่มังกานีส MA ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่มิโธโรซิลที่โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ และมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่าย ส่งผลให้ชั้นของออร์กาโนเคลย์แยกห่างออกจากกันจนกระทั่งอนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio สูงขึ้น ซึ่งนำไปสู่การกระจายตัวที่ดี [11] นอกจากนี้การที่สารช่วยผสมมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนจึงสามารถเกี่ยวพันหรือเข้ากันได้ดีกับพอลิพรอพิลีนเมทริกซ์ การที่ออร์กาโนเคลย์สามารถยึดติดได้ดีกับพอลิพรอพิลีนเมทริกซ์ทำให้มีการยึดติดระหว่างวัฏภาค (Interfaces) ดีขึ้น วัสดุเสริมแรงที่ดี จึงสามารถถ่ายเทแรงที่ได้รับให้กับออร์กาโนเคลย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง เป็นผลให้วัสดุมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนกรณีค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP/m-MMT มีการพัฒนาสมบัติขึ้นมาจากฟิล์ม PP สามารถอธิบายได้จากกฎของผสม (Rule of mixtures) กล่าวคือ สมบัติของวัสดุจะเท่ากับผลรวมของสมบัติแต่ละองค์ประกอบย่อย ในสัดส่วนขององค์ประกอบนั้น ดังนั้นการเติมออร์กาโนเคลย์ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีค่ามอดุลัสสูงลงในฟิล์ม PP/m-MMT จะส่งผลให้ค่ามอดุลัสของระบบโดยรวมสูงขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีค่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์ม

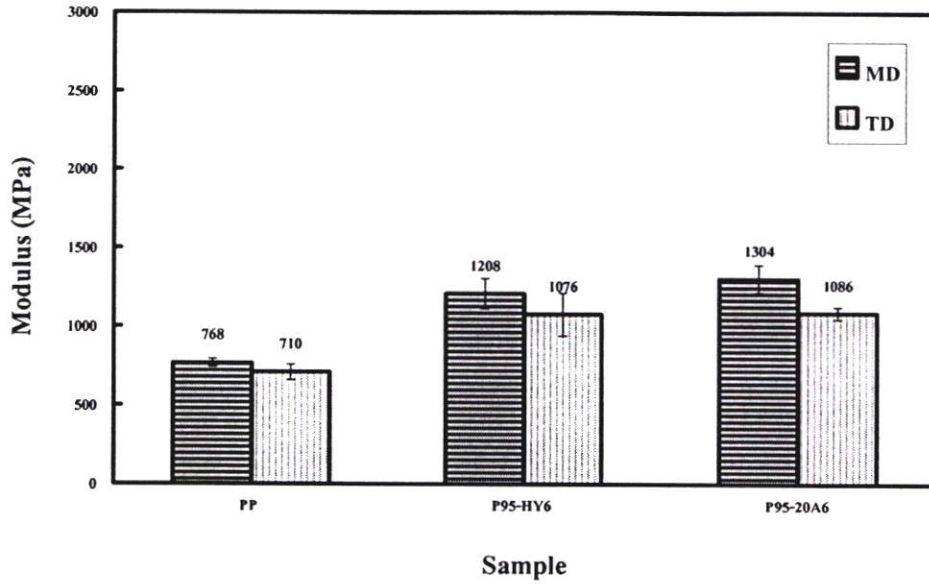
PP แต่อย่างไรก็ดีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดคราก (% Elongation at yield) ของฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับฟิล์ม PP แสดงดังรูปที่ 4.13 อาจเนื่องมาจากการเติมออร์กาโนเคลย์จะเป็นการเพิ่มความเค้นสะสม (Stress concentration) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาค ส่งผลให้แรงที่กระทำบริเวณรอบๆ อนุภาคซิลิเกตมีค่าสูงขึ้นเป็นผลทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากต่ำกว่าฟิล์ม PP

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 มีค่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่ามอดุลัสเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกต [4] ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.2.5 โดยฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 มีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6 โดยเมื่อให้แรงดึงแก่ฟิล์ม ผลึกของฟิล์มและสายโซ่พอลิพรอพิลีนจะรับแรงและถ่ายโอนแรงที่ได้รับไปยังออร์กาโนเคลย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง ดังนั้นฟิล์มสูตร P95-20A6 จึงมีค่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-HY6

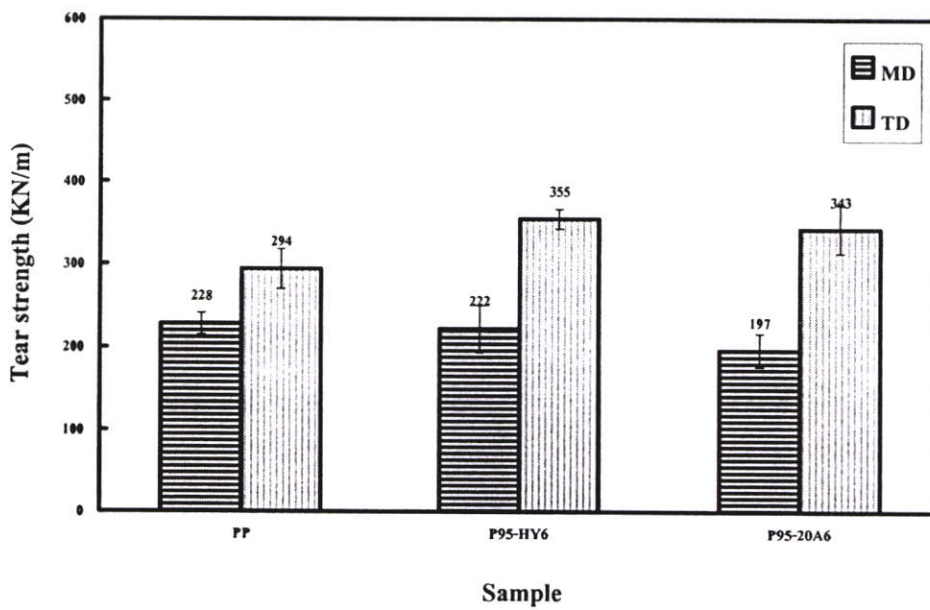
นอกจากนี้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลยังพบว่าค่าความแข็งแรงดึง ค่าความแข็งแรงฉีกขาดและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.10, 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



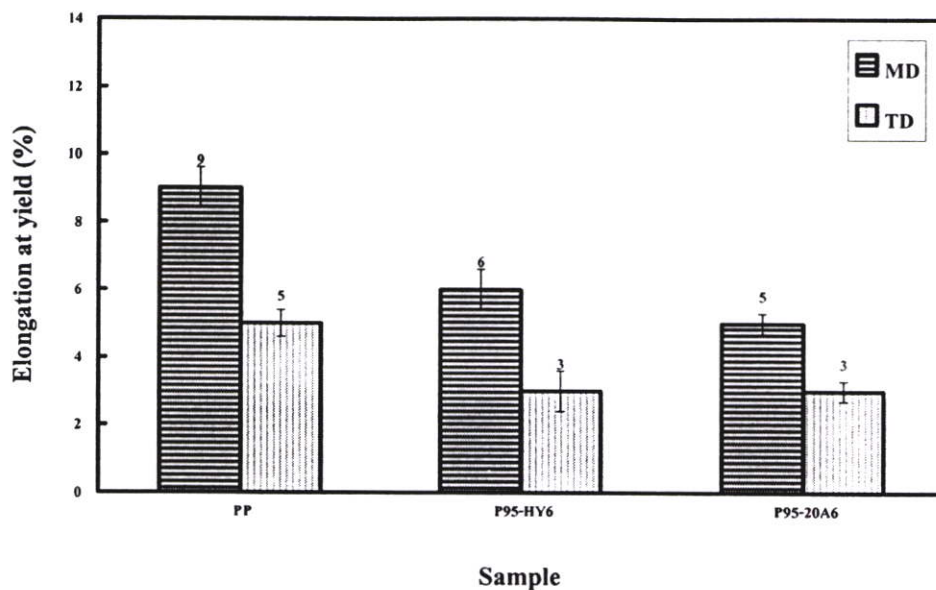
รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6



รูปที่ 4.11 ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6



รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6



รูปที่ 4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 และ P95-20A6

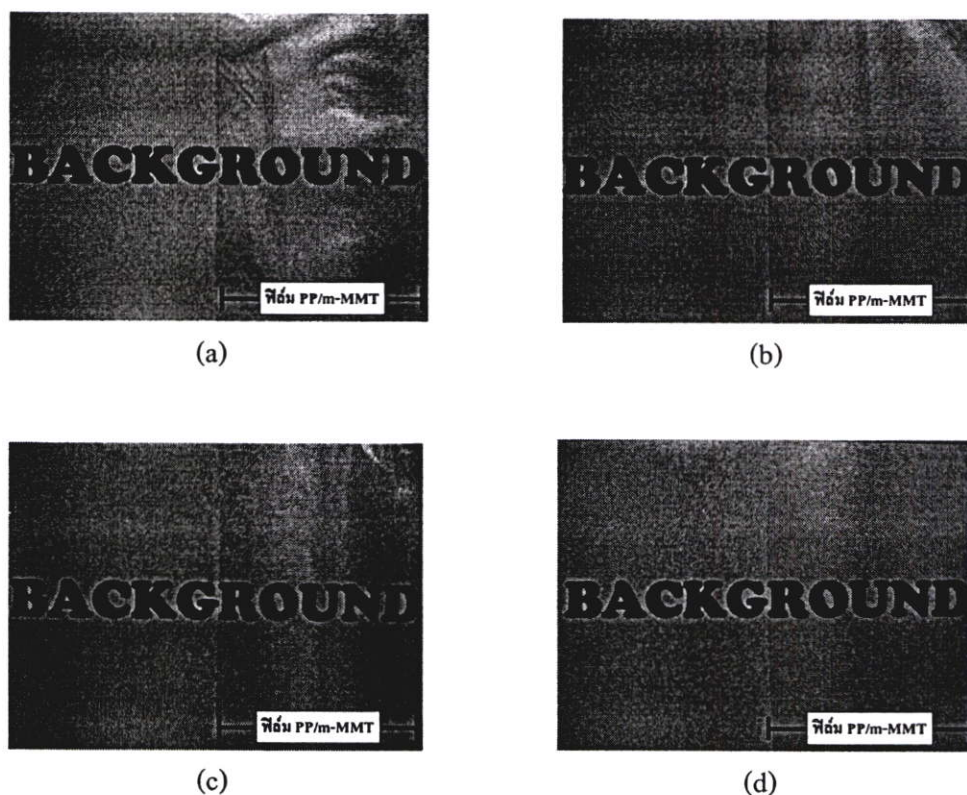
4.3 ผลการศึกษาชนิดของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

4.3.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT

จากการสังเกตลักษณะของสี ความขุ่น และวัดความหนาของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 4 สูตรมีเจดสีเหลืองและความขุ่นใกล้เคียงกัน เนื่องจากการเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณที่เท่ากัน ความหนาของฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.8 และตัวอย่างของฟิล์มแต่ละสูตรแสดงดังรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.8 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

สูตร	ความหนาเฉลี่ย (μm)
P93-20A6	29 ± 7
P95-20A6	30 ± 6
P01-20A6	33 ± 7
P02-20A6	29 ± 5



รูปที่ 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 (ด้านซ้ายของรูปแสดงพื้นหลัง ส่วนด้านขวาของรูปแสดงฟิล์ม PP/m-MMT)

4.3.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล

จากการศึกษาค่า MFI ของสารช่วยผสมสูตร P93 (Priex[®] 20093), P95 (Priex[®] 20095), P01 (Polybond[®] 1001) และ P02 (Polybond[®] 1002) แสดงผลในตารางที่ 4.9 พบว่ามีค่า MFI ต่างกันค่อนข้างมาก โดยสูตร P95 มีค่า MFI สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร P93, P01 และ P02 ซึ่งมีค่า MFI ลดลงตามลำดับ คาดว่าเนื่องจากสารช่วยผสมเกรด Priex[®] 20095 มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับสารช่วยผสมเกรด Priex[®] 20093, Polybond[®] 1001 และ Polybond[®] 1002 ซึ่งมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นสารช่วยผสมสูตร P95 จึงมีความหนืดต่ำที่สุด และสารช่วยผสมสูตร P02 จึงมีความหนืดสูงที่สุด

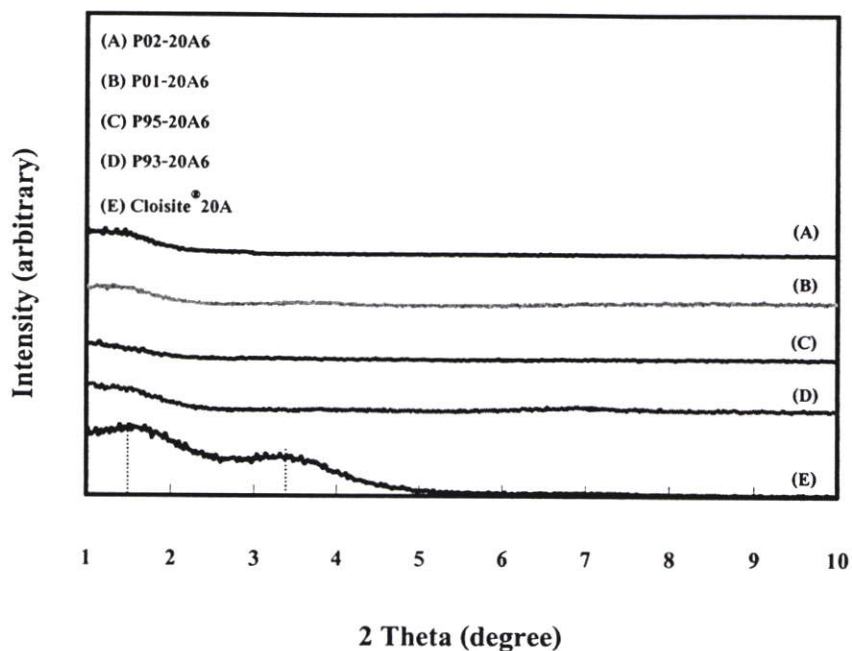
เมื่อพิจารณาค่า MFI ของ PP/m-MMT ที่ผสมออร์กาโนเคลย์และสารช่วยผสมปริมาณเท่ากัน แต่เติมสารช่วยผสมต่างชนิดกันใน PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 จะเห็นได้ว่า PP/m-MMT ทั้ง 4 สูตรมีค่า MFI ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.9 ค่าครรชนิกการไหล ($230^{\circ}\text{C} / 2.16 \text{ kg}$) ของสารช่วยผสมสูตร P93, P95, P01 และ P02 และ PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

สูตร	MFI (g /10 min)
P93	154 ± 11
P95	231 ± 13
P01	38 ± 4
P02	20 ± 3
P93-20A6	5 ± 0.2
P95-20A6	5 ± 0.4
P01-20A6	5 ± 0.4
P02-20A6	5 ± 0.3

4.3.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ปรากฏพีค 2 θ ที่ตำแหน่ง 1.5 และ 3.3 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 5.8 และ 2.7 nm ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 ที่มีการเติมสารช่วยผสมเกรด Priex[®] 20093, Priex[®] 20095, Polybond[®] 1001 และ Polybond[®] 1002 ตามลำดับ พบว่าไม่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2 θ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 การที่พีค XRD ของออร์กาโนเคลย์หายไป เมื่อทำการเติมสารช่วยผสมเนื่องจากสารช่วยผสมมีโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน MA และ AA ซึ่งมีสมบัติความเป็นขั้วสูงจึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ได้ [10] รวมทั้งสารช่วยผสมมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงสามารถแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่าย [11] ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมสารช่วยผสมทั้ง 4 เกรดเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่ประสิทธิภาพการกระจายตัวที่ดีของออร์กาโนเคลย์



รูปที่ 4.15 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

4.3.4 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลว ผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าชนิดของสารช่วยผสมไม่มีผลต่อค่าร้อยละความเป็นผลึกและความหนาของชั้นผลึก

ตารางที่ 4.10 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

สูตร	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก T_m ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก $T_{c \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
P93-20A6	44	164	127
P95-20A6	46	163	125
P01-20A6	40	162	131
P02-20A6	42	165	132

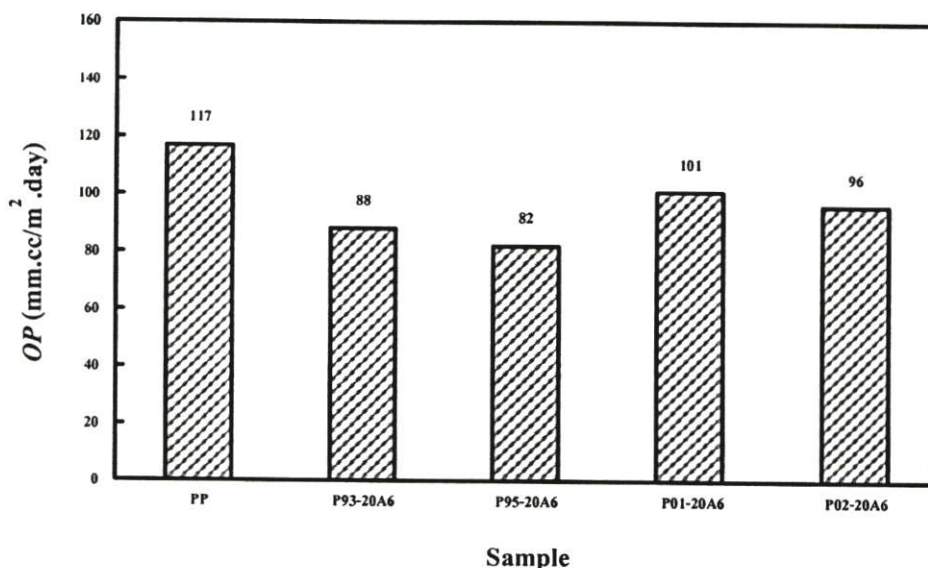
นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนและอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าชนิดของสารช่วยผสมไม่มีผลต่ออุณหภูมิเริ่มสลายตัว

ตารางที่ 4.11 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

สูตร	ปริมาณออร์กาโนเคลย์ ที่กำหนด (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณออร์กาโนเคลย์ ที่แน่นอน (% โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว $T_{d \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
P93-20A6	6	5.85	385
P95-20A6	6	5.81	381
P01-20A6	6	5.89	381
P02-20A6	6	5.46	384

4.3.5 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

จากการทดลองพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีที่สุดหรือมีค่า OP ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตร P93-20A6, P02-20A6 และ P01-20A6 ที่มีค่า OP เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 เป็นผลเนื่องมาจากประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ เพื่อขวางกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 4 สูตรแตกต่างกัน ซึ่งจากผลการศึกษาค่า OP ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ นำไปสู่การศึกษาค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตโดยการคำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในภาคผนวก จ ทำให้ทราบว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P95-20A6 มีค่า Aspect ratio สูงกว่าฟิล์มสูตร P93-20A6, P02-20A6 และ P01-20A6 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.12 ซึ่งสามารถยืนยันชั้นผลการคำนวณค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตได้จากผลการศึกษาด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยอนุภาคซิลิเกตที่มีค่า Aspect ratio สูง จะเป็นการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนไปตามชั้นของอนุภาคซิลิเกต ที่จัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เป็นผลทำให้ฟิล์มสูตร P95-20A6 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์มสูตร P93-20A6, P02-20A6 และ P01-20A6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

พิจารณาผลของสารช่วยผสมต่อค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาเกิดในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 4 สูตร พบว่าการที่อนุภาคซิลิกาเกิดในฟิล์มสูตร P95-20A6 มีค่า Aspect ratio สูง เนื่องจากสมบัติของสารช่วยผสมโดยของสารช่วยผสมเกรด Priex[®] 20095 มีโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันเป็น MA ซึ่งมีความเป็นขั้วสูงกว่าสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันเป็น AA โดยพิจารณาจากค่า Dipole moment [39] จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ได้แข็งแรงกว่า [10] ประกอบกับสารช่วยผสมเกรด Priex[®] 20095 เป็นสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จึงสามารถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่าย ซึ่งนำไปสู่การกระจายตัวที่ดีของออร์กาโนเคลย์ [11] ส่งผลให้ชั้นของออร์กาโนเคลย์แยกห่างออกจากกันได้ง่ายกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสูตร P93-20A6 ที่มีการเติมสารช่วยผสมเกรด Priex[®] 20093 ซึ่งโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน MA เหมือนกันแต่มีปริมาณน้อยกว่า และมีโครงสร้างหลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า จึงเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์มสูตร P93-20A6 ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตร P95-20A6 ดังนั้นอนุภาคซิลิกาเกิดในฟิล์มสูตร P93-20A6 จึงมีค่า Aspect ratio ต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 นอกจากนี้ฟิล์มสูตร P01-20A6 และ P02-20A6 ที่มีการเติมสารช่วยผสมเกรด Polybond[®] 1001 และ Polybond[®] 1002 ตามลำดับ โดยสารช่วยผสมทั้ง 2 เกรดนี้มีหมู่ฟังก์ชันเป็น AA ในปริมาณที่เท่ากัน แต่สารช่วยผสมเกรด Polybond[®] 1001 มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าสารช่วยผสมเกรด Polybond[®] 1002 จึง

น่าจะสามารรถแทรกตัวเข้าไปในระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ได้ง่ายกว่า ซึ่งน่าจะนำไปสู่การกระจายตัวที่ดีของออร์กาโนเคลย์ [11] และมีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตสูงกว่า แต่จากผลการทดลองกลับพบว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P02-20A6 มีค่า Aspect ratio สูงกว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P01-20A6 อาจเนื่องมาจากปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนในฟิล์มสูตร P01-20A6 มีปริมาณมากกว่าฟิล์มสูตร P02-20A6 โดยเมื่อพิจารณาในพื้นที่ที่เท่ากัน ฟิล์มที่มีปริมาณออร์กาโนเคลย์มากกว่า ชั้นของออร์กาโนเคลย์จะแยกห่างออกจากกันได้น้อยกว่า ส่งผลให้การแตกตัวออกจากกันของออร์กาโนเคลย์ลดลง [4]

ตารางที่ 4.12 Tortuosity factor (T) และค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

สูตร	P_s/P_p ^a	ออร์กาโนเคลย์ (% โดยน้ำหนัก)	ϕ_s ^b	Tortuosity factor	Aspect ratio ^c
P93-20A6	88 / 117 = 0.75	5.85	0.02	1.31	31
P95-20A6	82 / 117 = 0.70	5.81	0.02	1.40	40
P01-20A6	101 / 117 = 0.86	5.89	0.02	1.14	14
P02-20A6	96 / 117 = 0.82	5.46	0.02	1.20	20

หมายเหตุ ^a คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิตต่อ
ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

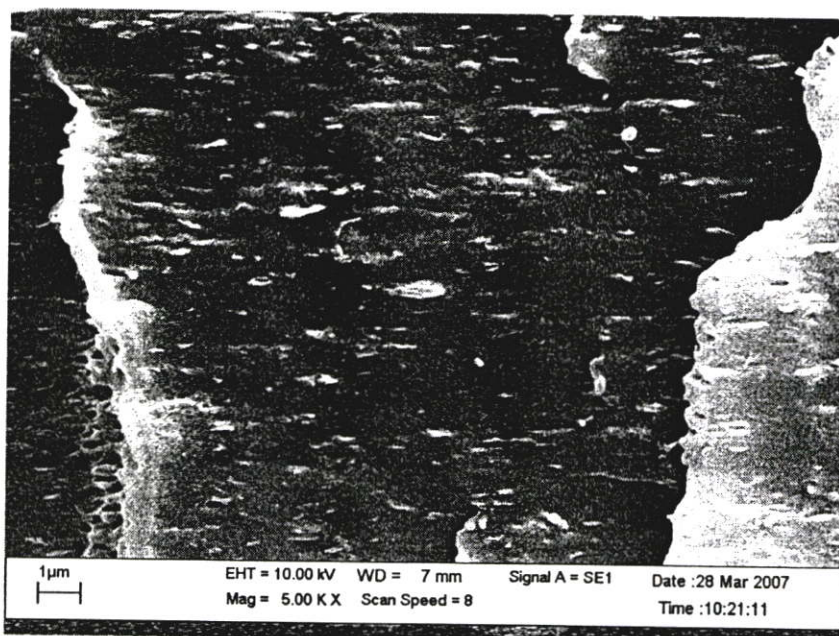
^b คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิเกต

^c คือ สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคซิลิเกต

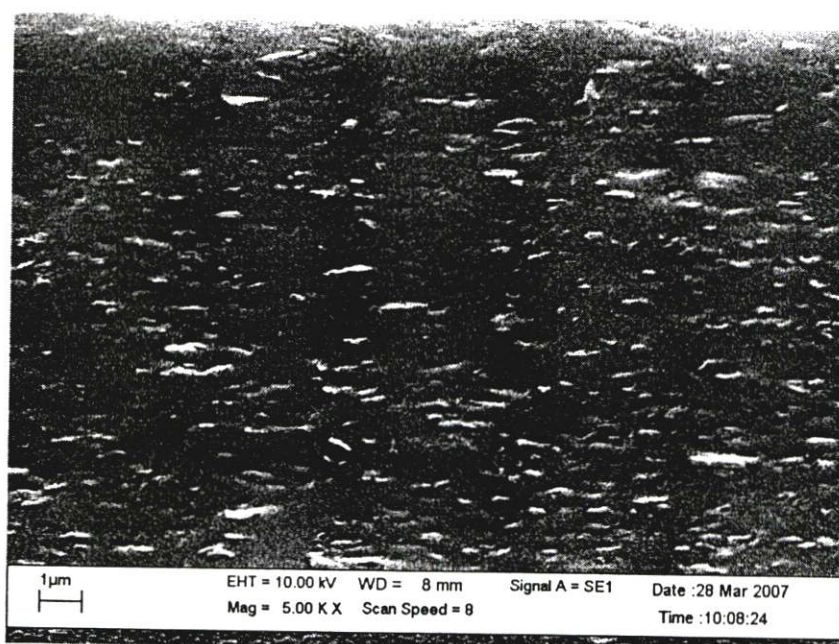
4.3.6 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

จากการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว และประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 โดยเทคนิค SEM ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 มีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (MD) ตามแรงขับของเครื่องขึ้นรูปฟิล์ม และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์เมื่อเทียบกับฟิล์มสูตร P93-20A6 และ P02-20A6 ที่ออร์กาโนเคลย์บางส่วนมีการจัดเรียงตัวในทิศทาง MD และกระจายตัวได้ดีพอควร แต่ยังคงมีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนอยู่บ้างเล็กน้อย ส่วนฟิล์มสูตร P01-20A6 สามารถสังเกตการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของออร์กาโนเคลย์ได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลเนื่องจากสมบัติของสารช่วยผสมเกรดต่างๆ ที่เติมลงในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 4 สูตร โดยสารช่วยผสมที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีความเป็นขั้วสูง และมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า จะทำให้

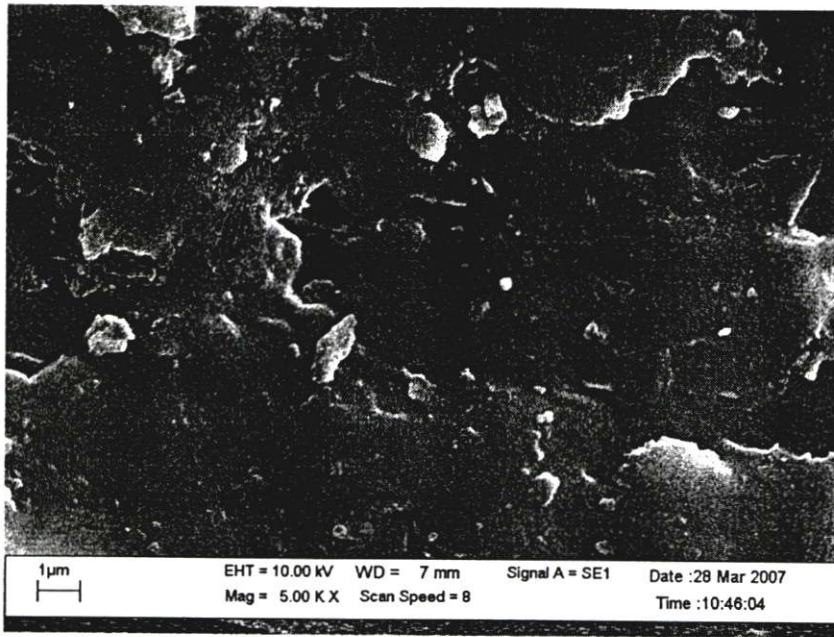
ออร์กาโนเคลย์เกิดการแตกตัวออกจากกัน หรือกระจายอนุภาคอย่างสม่ำเสมอในพอลิพรอพิลีน เมตริกซ์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในหัวข้อที่ 4.3.5



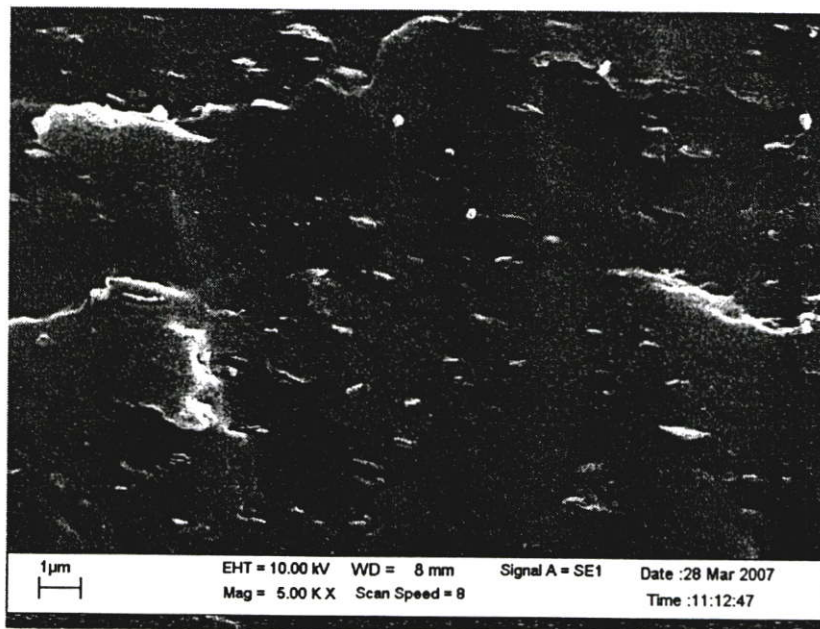
(a)



(b)



(c)



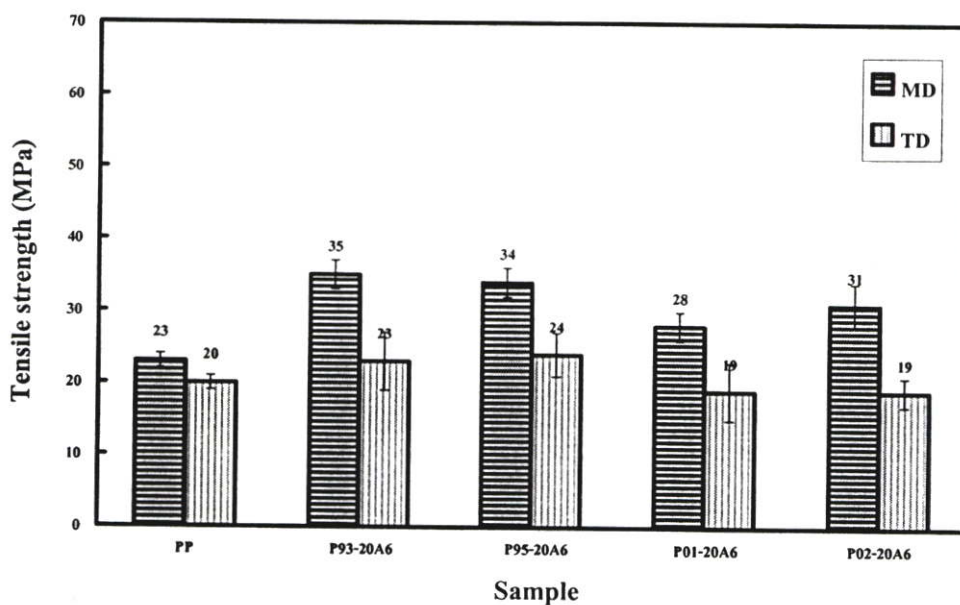
(d)

รูปที่ 4.17 ภาพตัดขวางในทิศทางตามแนวเครื่องจักร โดยการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (a) फिल्म PP/m-MMT สูตร P93-20A6 (b) फिल्म PP/m-MMT สูตร P95-20A6 (c) फिल्म PP/m-MMT สูตร P01-20A6 และ (d) फिल्म PP/m-MMT สูตร P02-20A6 ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

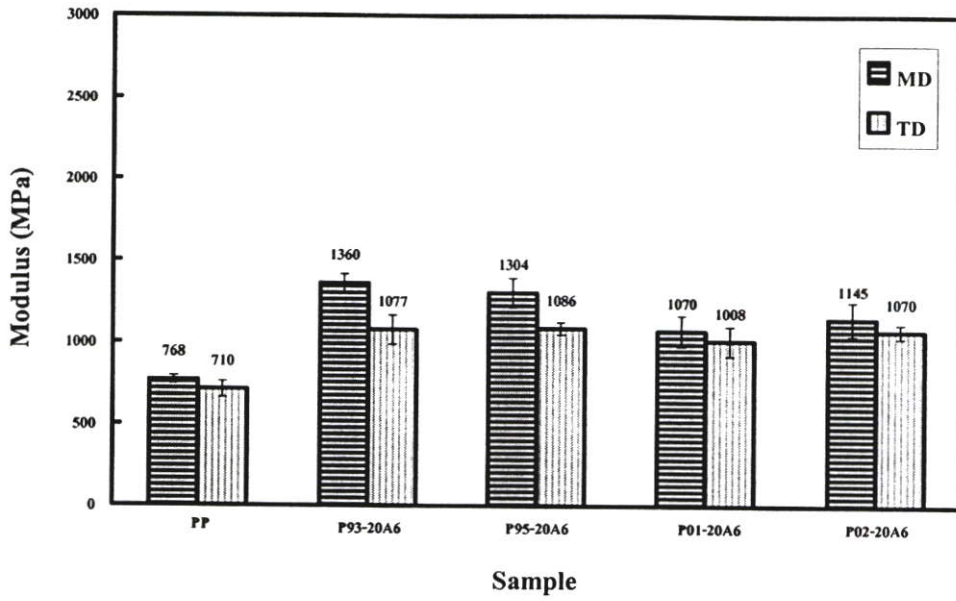
4.3.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลใน PP/m-MMT เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดของสายโซ่หลักของสารช่วยผสมและค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ [4] โดยเมื่อให้แรงดึงแก่ฟิล์ม ผลึกของฟิล์มและสายโซ่พอลิพรอพิลีนจะรับแรงและถ่ายโอนแรงที่ได้รับไปยังออร์กาโนเคลย์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.5 ทำให้ทราบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6 และ P95-20A6 ที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA จะมีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตสูงกว่าฟิล์มสูตร P01-20A6 และ P02-20A6 ที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-AA ดังนั้นฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-MA จึงมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสสูงกว่าฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมสารช่วยผสมชนิด PP-g-AA ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ

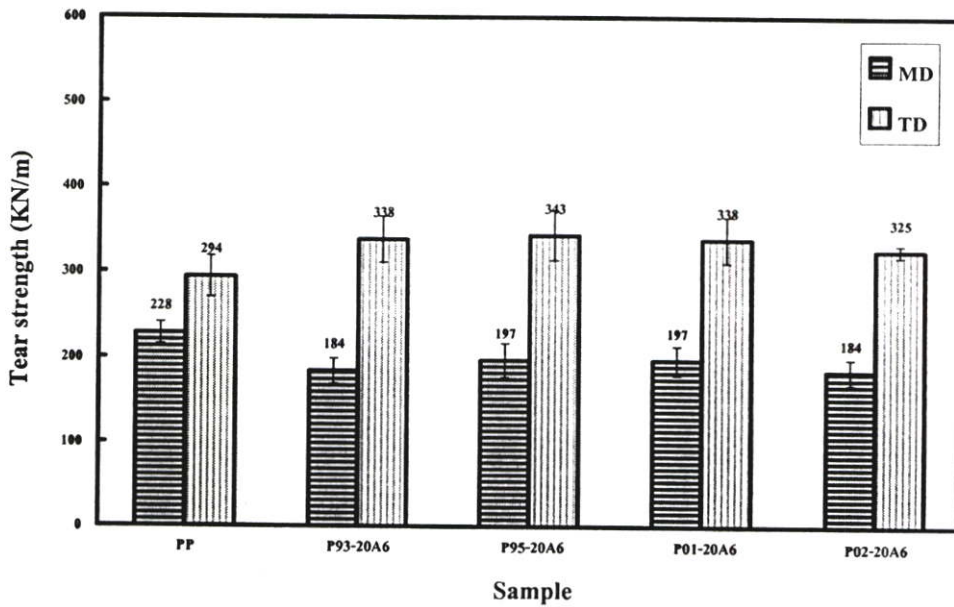
นอกจากนี้จากการทดสอบสมบัติเชิงกลยังพบว่าค่าความแข็งแรงฉีกขาด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ



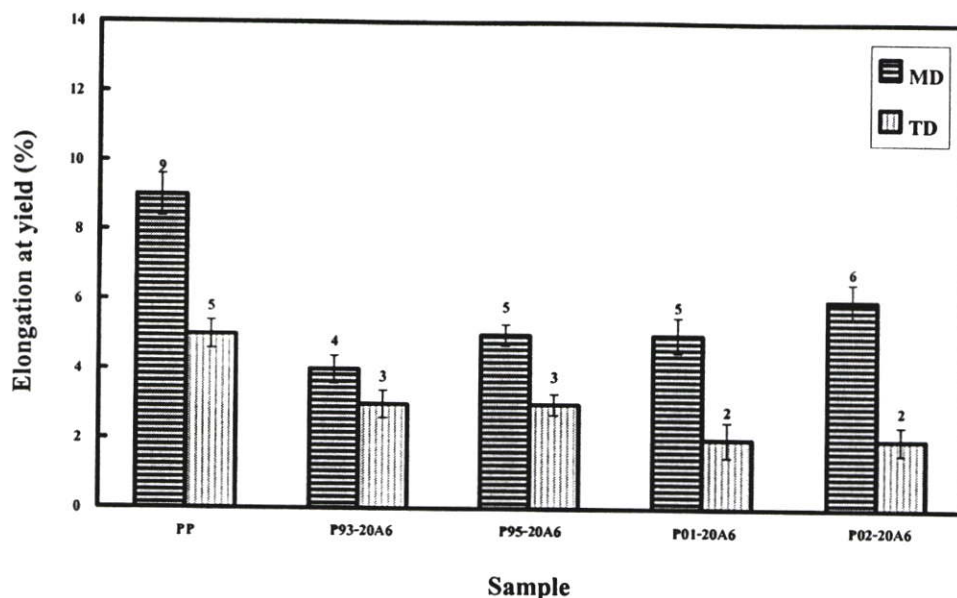
รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6



รูปที่ 4.19 ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6



รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

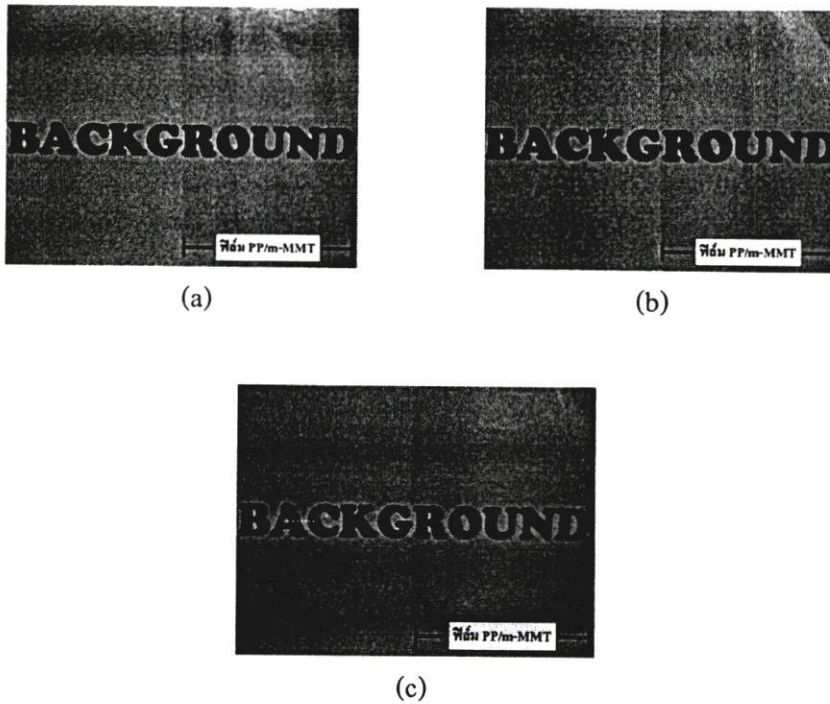


รูปที่ 4.21 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6

4.4 ผลการศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

4.4.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT

จากการสังเกตลักษณะของสี ความขุ่น และวัดความหนาของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A9 ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 9 % โดยน้ำหนัก จะมีความขุ่นมากกว่าและเจดสีเหลืองเข้มกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A3 ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 6 และ 3 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยการเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีความขุ่นและเจดสีเหลืองเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบจุดเล็กๆ ปรากฏบนแผ่นฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร ลักษณะคล้ายเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye [12] ซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมโยงกันเองของสารช่วยผสมและถือว่าเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน โดยจากการทดลองข้างต้นในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT เท่ากับ 2:1 ดังนั้นการเติมออร์กาโนเคลย์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ปริมาณการเติมสารช่วยผสมจะถูกปรับเปลี่ยนให้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมในฟิล์ม PP/m-MMT ปริมาณการเกิดเม็ดเจลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกล ตัวอย่างของฟิล์ม PP/m-MMT แสดงดังรูปที่ 4.22 และความหนาของฟิล์มแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.13



รูปที่ 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 (ด้านซ้ายของรูปแสดงพื้นหลังส่วนด้านขวาของรูปแสดงฟิล์ม PP/m-MMT)

ตารางที่ 4.13 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

สูตร	ความหนาเฉลี่ย (μm)
P95-20A3	24 ± 6
P95-20A6	30 ± 6
P95-20A9	35 ± 9

4.4.2 ผลการศึกษาค่าดัชนีการไหล

การศึกษาผลของปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อความหนืดใน PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 ซึ่งมีปริมาณออร์กาโนเคลย์ 3, 6 และ 9 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 4.14 พบว่าค่า MFI มีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ เนื่องจากออร์กาโนเคลย์เป็นอนุภาคของแข็งจะไปขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้น้อยลง [42] ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ค่า MFI ของ PP/m-MMT จึงมีค่าลดลงหรือมีความหนืดสูงขึ้นนั่นเอง ปรากฏการณ์นี้เป็นสิ่งที่พบปกติเมื่อทำการเติมสารตัวเติมอนุภาคของแข็งลงในพอลิเมอร์

ตารางที่ 4.14 ค่าครรชนีการไหล (230°C /2.16 kg) ของ PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

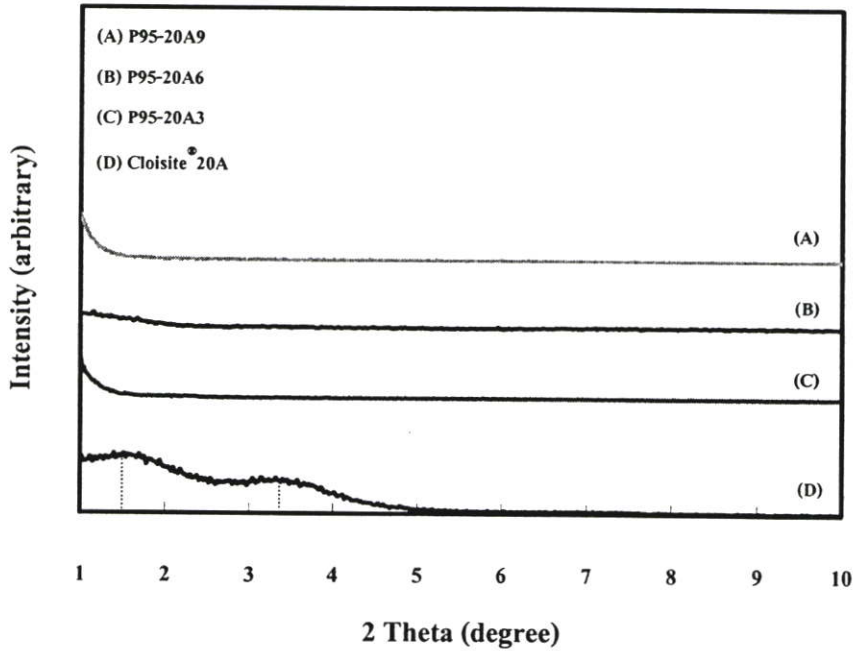
สูตร	MFI (g /10 min)
P95-20A3	7 ± 0.3
P95-20A6	5 ± 0.4
P95-20A9	4 ± 0.2

จากผลการทดลองสังเกตได้ว่ามี 2 ปรากฏการณ์ที่มีผลต่อความหนืดของ PP/m-MMT คือ ผลของสมบัติสารช่วยผสมและผลของปริมาณออร์กาโนเคลย์ โดยในการทดลองนี้ได้คงอัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมต่อออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ใน PP/m-MMT ทำให้ปริมาณการเติมสารช่วยผสมเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจะมีปริมาณของพอลิพรอพิลีนลดลง ซึ่งจากผลการศึกษาค่า MFI ข้างต้น พบว่าสารช่วยผสมมีค่า MFI สูงกว่าหรือมีความหนืดน้อยกว่าพอลิพรอพิลีน ซึ่งการเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมจะทำให้ความหนืดของ PP/m-MMT ลดลง ส่งผลให้ค่า MFI สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลตรงข้ามกับการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ทำให้ความหนืดของ PP/m-MMT มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า MFI ลดลง จาก 2 ปรากฏการณ์ข้างต้นเป็นปรากฏการณ์ที่หักล้างกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณออร์กาโนเคลย์มีผลต่อความหนืดเด่นชัดกว่าผลของสมบัติสารช่วยผสม ดังจะเห็นได้จาก PP/m-MMT สูตร P93-20A6, P95-20A6, P01-20A6 และ P02-20A6 มีค่า MFI ใกล้เคียงกัน ทั้งๆ ที่สารช่วยผสมเกรด Priex[®] 20093, Priex[®] 20095, Polybond[®] 1001 และ Polybond[®] 1002 มีค่า MFI แตกต่างกันอย่างมากระหว่างมาก ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.3.2 และจาก PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 เมื่อทำการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ค่า MFI มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

4.4.3 ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์

จากการตรวจสอบค่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A ปรากฏพีก 2 θ ที่ตำแหน่ง 1.5 และ 3.3 องศา ซึ่งจากการคำนวณตามสมการ Bragg's Law พบว่ามีค่าระยะห่างระหว่างชั้นออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 5.8 และ 2.7 nm ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 ที่มีปริมาณออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 3, 6 และ 9 % โดยน้ำหนักตามลำดับ พบว่าไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2 θ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 แสดงว่าออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร มีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดี เนื่องจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2:1 ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มหรือลดปริมาณออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT ปริมาณการเติมสารช่วยผสมจะถูก

ปรับเปลี่ยนตามไปด้วย เพื่อคงประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ

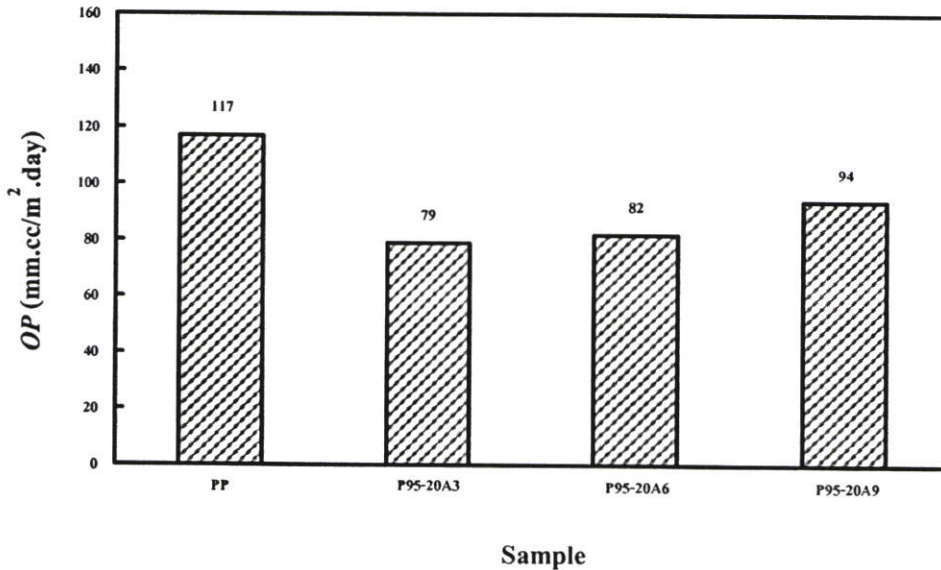


รูปที่ 4.23 XRD patterns ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

4.4.4 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

จากการทดลองพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีที่สุดหรือมีค่า OP ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ที่มีค่า OP เพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 เป็นผลเนื่องมาจากประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ เพื่อขวางกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตรแตกต่างกัน ซึ่งจากผลการศึกษาค่า OP ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ นำไปสู่การศึกษาค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตโดยการคำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในภาคผนวก ฉ ทำให้ทราบว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P95-20A3 มีค่า Aspect ratio สูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.15 ซึ่งสามารถยืนยันผลการคำนวณค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตได้จากผลการศึกษาฐานวิทยาศาสตร์ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.25 โดยอนุภาคซิลิเกตที่มีค่า Aspect ratio สูง จะเป็นการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนไปตามชั้นของอนุภาคซิลิเกตที่จัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงใน

รูปที่ 2.13 เป็นผลทำให้ฟิล์มสูตร P95-20A3 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

ตารางที่ 4.15 Tortuosity factor (τ) และค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

สูตร	P_s/P_s^a	ออร์กาโนเคลย์ (% โดยน้ำหนัก)	ϕ_s^b	Tortuosity factor	Aspect ratio ^c
P95-20A3	$79 / 117 = 0.68$	2.72	0.01	1.46	92
P95-20A6	$82 / 117 = 0.70$	5.81	0.02	1.40	40
P95-20A9	$94 / 117 = 0.80$	8.61	0.03	1.22	15

หมายเหตุ ^a คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิตต่อ
ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

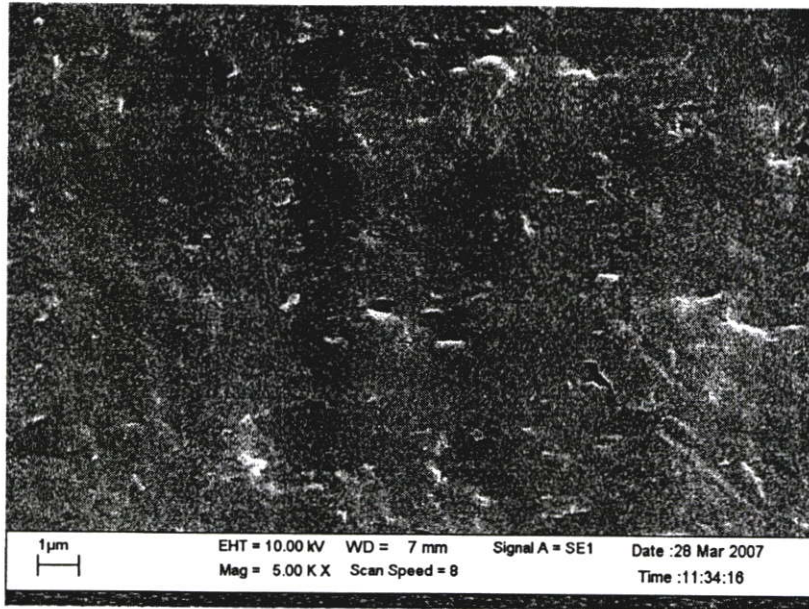
^b คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิเกต

^c คือ สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคซิลิเกต

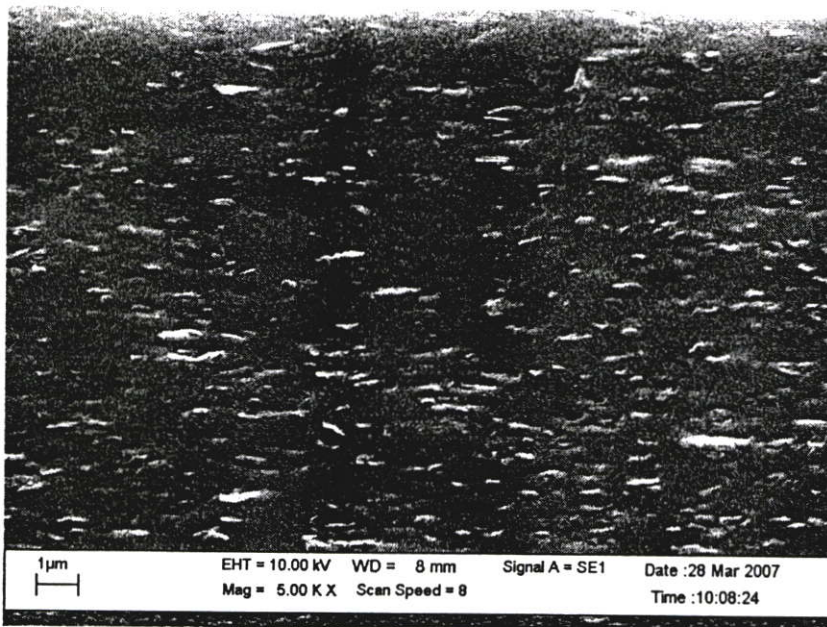
จากตารางที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 ซึ่งมีปริมาณออร์กาโนเคลย์ 3, 6 และ 9 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เพื่อศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ต่อค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกต พบว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก จะมีค่า Aspect ratio สูงกว่าการเติมออร์กาโนเคลย์ปริมาณ 6 และ 9 % โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ขึ้นเรื่อยๆ ตำแหน่งการแทรกสอดของสายโซ่พอลิพรอพิลีนจะเพิ่มขึ้นตามชั้นของออร์กาโนเคลย์จะถูกทำให้แยกห่างออกจากกัน แต่เมื่อพิจารณาในพื้นที่ที่เท่ากัน ฟิล์มที่มีปริมาณออร์กาโนเคลย์มากกว่า ชั้นของออร์กาโนเคลย์จะแยกห่างออกจากกันได้น้อยกว่า ส่งผลให้การแตกตัวออกจากกันอย่างอิสระของออร์กาโนเคลย์ลดลง [4] เป็นผลทำให้อนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P95-20A9 มีค่า Aspect ratio ต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A3 ตามลำดับ

4.4.5 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

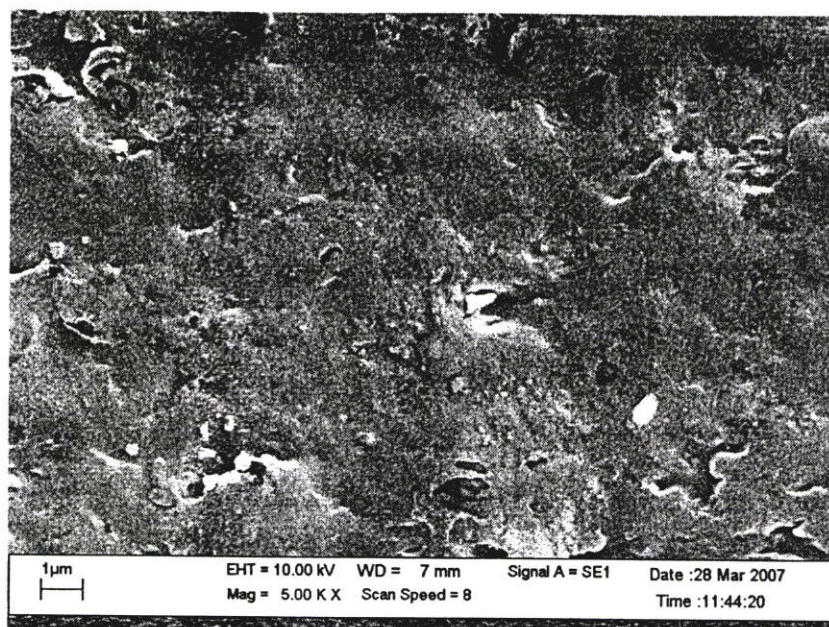
จากการศึกษาลักษณะการจัดเรียงตัว และประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 โดยเทคนิค SEM ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 มีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดี โดยไม่พบการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของออร์กาโนเคลย์และน่าจะมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวเครื่องจักร เมื่อเปรียบเทียบกับออร์กาโนเคลย์ในฟิล์มสูตร P95-20A6 ที่ยังคงมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ และมีการจัดเรียงตัวในทิศทางตามแนวเครื่องจักร แต่จะเห็นได้ว่าสามารถสังเกตขนาดของอนุภาคออร์กาโนเคลย์ได้ชัดเจนขึ้น หรือในอีกทางหนึ่งอาจกล่าวได้ว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P95-20A6 มีค่า Aspect ratio ต่ำกว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์มสูตร P95-20A3 และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์เป็น 9 % โดยน้ำหนัก ในฟิล์มสูตร P95-20A9 พบแนวโน้มการเข้ามาเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนเพิ่มมากขึ้น ออร์กาโนเคลย์มีประสิทธิภาพในการกระจายตัวลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสมบัติความมีขั้วของออร์กาโนเคลย์แม้จะผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยสารอินทรีย์แล้ว แต่ยังคงมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ที่บริเวณขอบนอกของแผ่นซิลิเกต [19] ทำให้สามารถรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ง่ายเมื่อมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ประกอบกับการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ ในพื้นที่ที่จำกัดเท่าเดิม ฟิล์มที่มีปริมาณออร์กาโนเคลย์มากกว่า ชั้นของออร์กาโนเคลย์จะแยกห่างออกจากกันได้น้อยลง ส่งผลให้ออร์กาโนเคลย์แตกตัวออกจากกันได้ลดลง [4] ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตดังที่ได้อธิบายมาแล้วในหัวข้อที่ 4.4.4



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.25 ภาพตัดขวางในทิศทางตามแนวเครื่องจักร โดยการหักชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (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

4.4.6 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก แสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร มีค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิเริ่มตกผลึกใกล้เคียงกันแสดงว่าการเติมออร์กาโนเคลย์ ปริมาณ 3-9 % โดยน้ำหนัก ไม่มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าร้อยละความเป็นผลึก ความหนาของชั้นผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA เพื่อศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนและอุณหภูมิเริ่มสลายตัวในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 แสดงดังตารางที่ 4.17 พบว่าอุณหภูมิเริ่มสลายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทำการลดปริมาณออร์กาโนเคลย์เป็นผลเนื่องมาจากฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 มีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกตสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำดับ การที่อนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio สูง และจัดเรียงตัวขวางกันเส้นทางการเคลื่อนที่ของสารที่เกิดการเสียดสภาพในลักษณะของ Tortuous path เป็นผลทำให้ฟิล์มสูตร P95-20A3 มีอุณหภูมิเริ่มสลายตัวสูงขึ้น

ตารางที่ 4.16 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

สูตร	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก T_m ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก $T_{c \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
P95-20A3	48	163	126
P95-20A6	46	163	125
P95-20A9	45	164	125

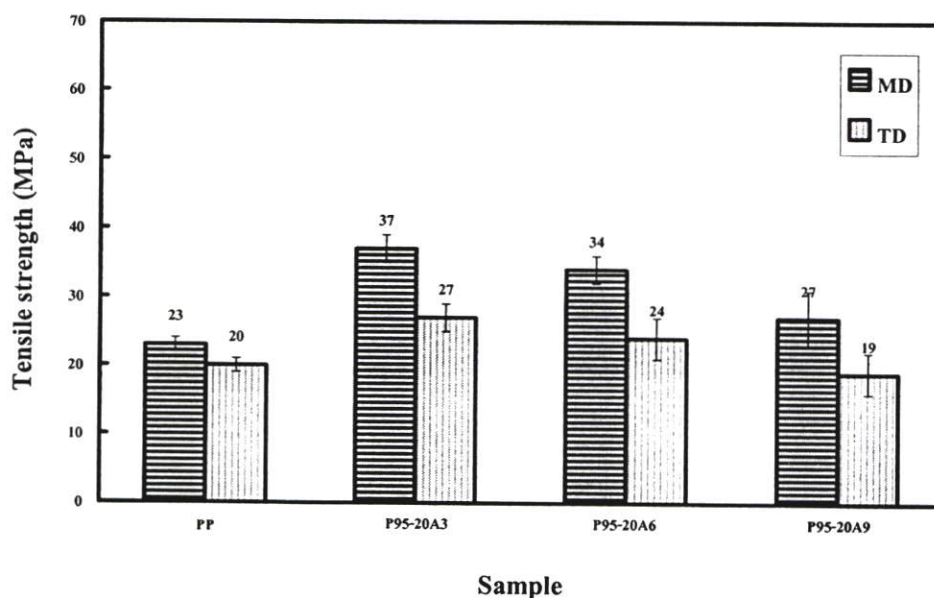
ตารางที่ 4.17 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวและปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

สูตร	ปริมาณออร์กาโนเคลย์ ที่กำหนด (% โดยน้ำหนัก)	ปริมาณออร์กาโนเคลย์ ที่แน่นอน (% โดยน้ำหนัก)	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว $T_{d \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
P95-20A3	3	2.72	391
P95-20A6	6	5.81	381
P95-20A9	9	8.61	369

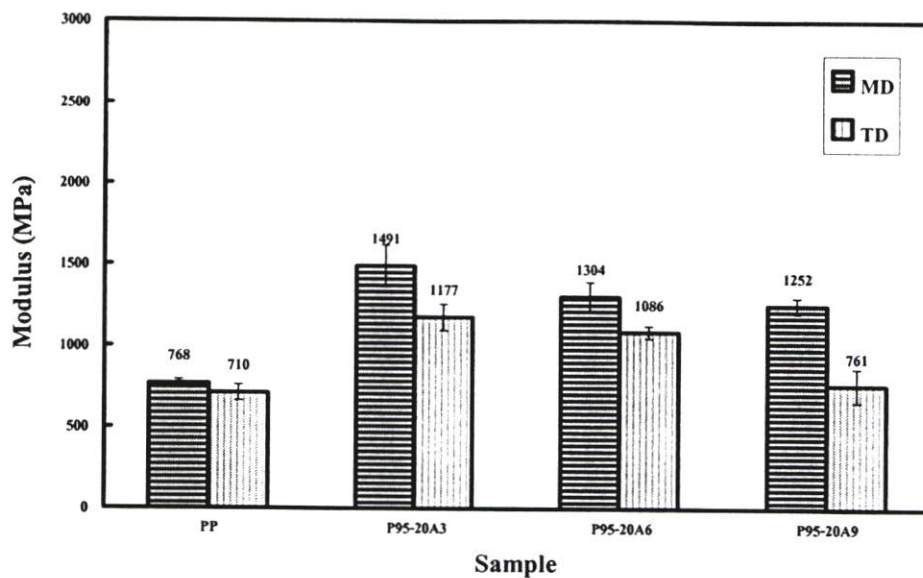
4.4.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

เป็นที่ทราบกันดีว่าสมบัติของวัสดุคอมโพสิต โดยเฉพาะการเสริมแรงขึ้นอย่างมากกับปริมาณของส่วนเสริมแรง โดยเมื่อเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ จะทำให้ PP/m-MMT มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงดึง มอดูลัส ฯลฯ [41] อาจกล่าวได้ว่าออร์กาโนเคลย์ทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรงให้กับวัสดุคอมโพสิต แต่จากผลการทดลองกลับพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลง โดยฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 มีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.26-4.28 โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลใน PP/m-MMT เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดของสายโซ่หลักของสารช่วยผสมและค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาที่กระจายตัวอยู่ในเมตริกซ์ [4] ซึ่งการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.4 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 มีค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำดับ โดยเมื่อให้แรงดึงแก่ฟิล์ม ผลึกของฟิล์มและสายโซ่พอลิพรอพิลีนจะรับแรงและถ่ายโอนแรงที่ได้รับไปยังออร์

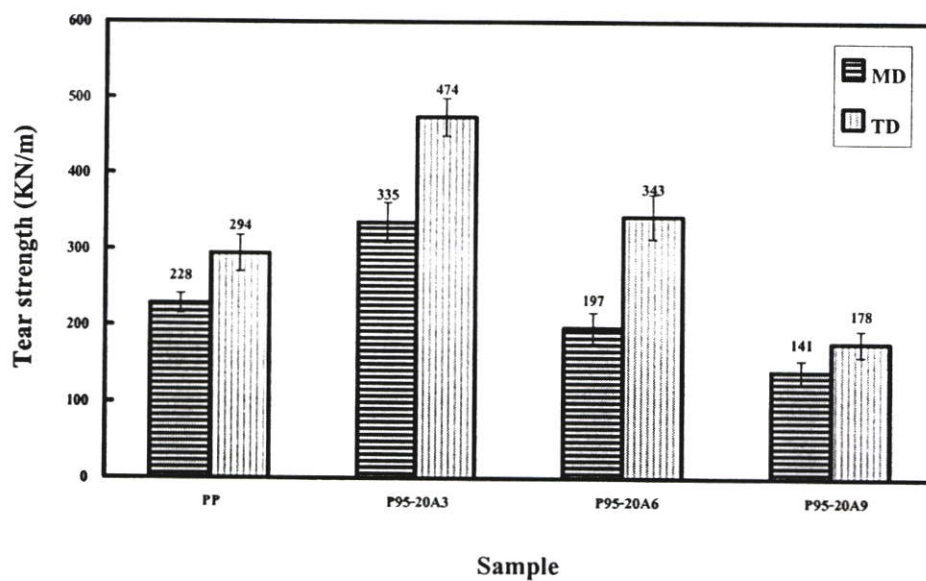
กาโนเคลย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง ดังนั้นฟิล์มสูตร P95-20A3 จึงมีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A6 และ P95-20A9 ตามลำดับ นอกจากนี้การที่ค่าความแข็งแรงฉีกขาดในฟิล์ม PP/m-MMT มีแนวโน้มลดลง เมื่อทำการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ สามารถอธิบายเสริมได้ในอีกทางหนึ่งกล่าวคือในการทดลองได้ทำการตัดชิ้นงานเป็นรูปปีกนกซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นสะสม (Stress concentration) ที่บริเวณมุมรอยเว้าของชิ้นงาน เมื่อให้แรงดึงแก่ชิ้นงานจึงเกิดการฉีกขาดได้ง่ายตรงบริเวณรอยเว้านี้ [42] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์ลงในฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มอนุภาคของแข็งให้แก่ชิ้นงาน ซึ่งเป็นการเพิ่มจุดสะสมความเค้นบนชิ้นงาน ส่งผลให้ความแข็งแรงฉีกขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเติมออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT เพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฉง จุดครากของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.29



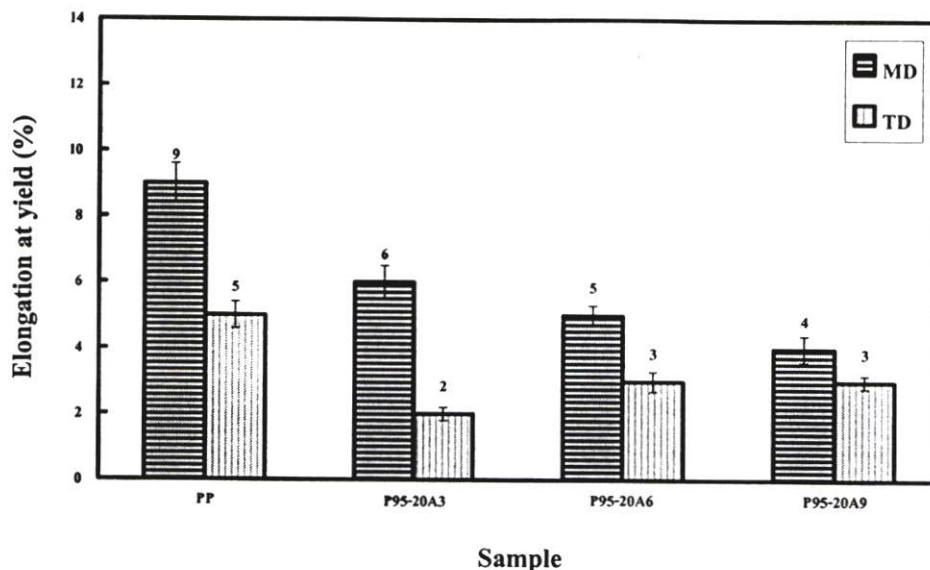
รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9



รูปที่ 4.27 ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9



รูปที่ 4.28 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

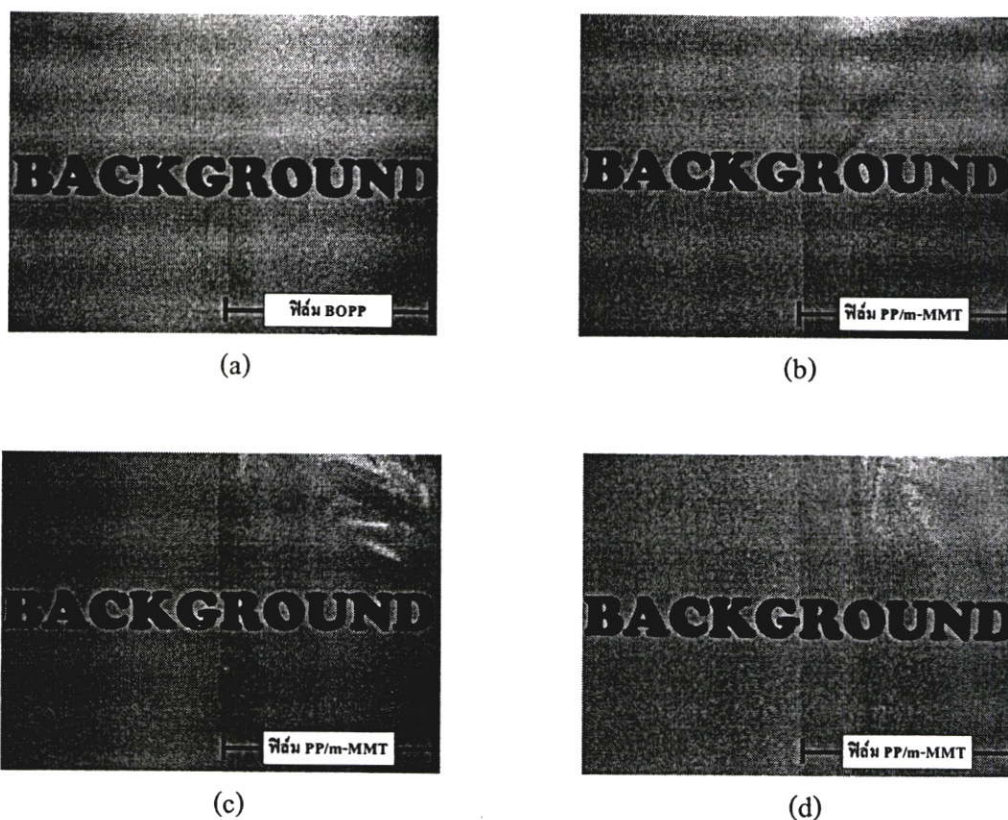


รูปที่ 4.29 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3, P95-20A6 และ P95-20A9

4.5 ผลการศึกษาอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

4.5.1 ผลการสังเกตลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

จากการสังเกตลักษณะของสี ความขุ่น และวัดความหนาของฟิล์ม BOPP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT จะมีความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์ม BOPP เนื่องจากออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite® 20A เป็นอนุภาคที่มีสีขาว เมื่อเติมลงในฟิล์ม PP/m-MMT จึงทำให้ฟิล์มมีความขุ่นเพิ่มขึ้น และพบจุดเล็กๆ ปรากฏบนแผ่นฟิล์ม PP/m-MMT ลักษณะคล้ายเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye [12] ซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมโยงกันเองของสารช่วยผสมและถือว่าเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน อาจส่งผลต่อสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D19 มีความหนามากกว่าและมีสีเหลืองเข้มกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 เนื่องจากฟิล์มสูตร P95-20A3-D19 มีอัตราส่วนการดึงต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 ตามลำดับ ดังแสดงในภาคผนวก จ หรืออาจกล่าวได้ว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D19 ได้รับการดึงยึดผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็นน้อยกว่า เป็นผลทำให้ฟิล์มสูตร P95-20A3-D19 มีความหนาที่มากกว่า จึงสามารถสังเกตสีเหลืองได้ชัดเจนกว่า ดังนั้นฟิล์มแต่ละสูตรจึงมีความหนาไม่เท่ากัน แสดงดังตารางที่ 4.18



รูปที่ 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 (ด้านซ้ายของรูปแสดงพื้นหลังส่วนด้านขวาของรูปแสดงฟิล์ม PP/m-MMT)

ตารางที่ 4.18 ความหนาเฉลี่ยของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

สูตร	ความหนาเฉลี่ย (μm)
BOPP	20 ± 1
P95-20A3-D19	53 ± 7
P95-20A3-D25	40 ± 5
P95-20A3-D42	24 ± 6

4.5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP ด้วยเทคนิค DSC เพื่อศึกษาค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก แสดงดังตารางที่ 4.19 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนการคั่งในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ โดยฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 มีอัตราส่วนการคั่งสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ ดังแสดงในภาคผนวก จ โดยฟิล์มที่มีอัตราส่วนการคั่งสูงจะได้รับการคั่งซึบผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็นมากกว่า ทำให้ได้ฟิล์มที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลมากกว่าฟิล์มสูตรอื่น และยังมีผลทำให้ได้ฟิล์มที่มีความบางมากกว่าฟิล์มสูตรอื่นอีกด้วย ดังนั้นฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 จึงมีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึกในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตรมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าอัตราส่วนการคั่งไม่มีผลต่อความหนาของชั้นผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึก

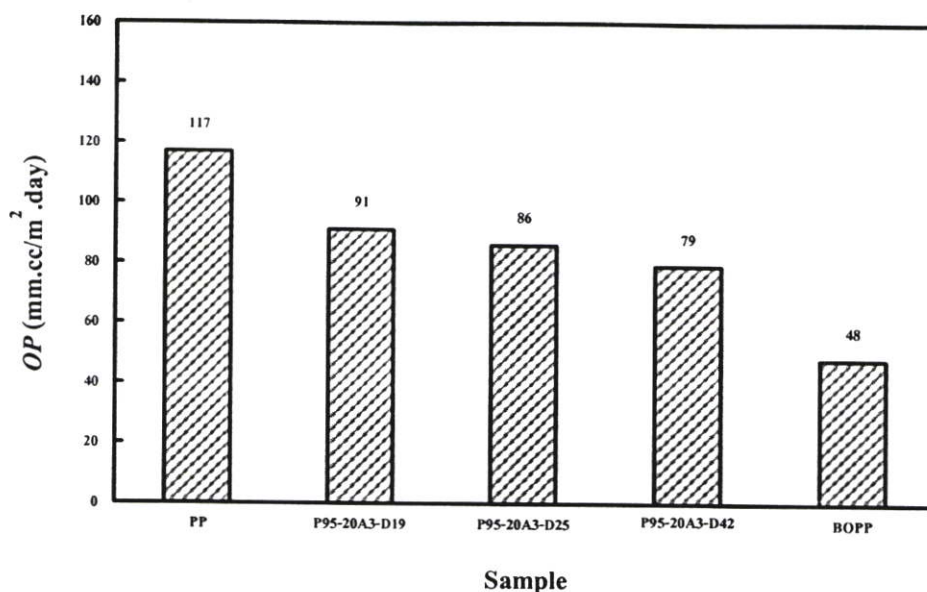
เมื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP ด้วยเทคนิค DSC พบว่าฟิล์ม BOPP มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์ม PP/m-MMT เนื่องจากฟิล์ม BOPP ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการให้แรงคั่งซึบแก่ฟิล์มในทิศทาง MD และ TD ทำให้ได้ฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทั้ง 2 ทิศทาง ส่งผลให้ค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงขึ้นไปด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PP/m-MMT ที่ในการทดลองนี้ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น และคั่งพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็น ทำให้ฟิล์มมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทิศทาง MD เท่านั้น จึงมีค่าร้อยละความเป็นผลึกน้อยกว่าฟิล์ม BOPP นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึกของฟิล์ม BOPP และฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.19 สมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

สูตร	ร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity)	อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก T_m ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิเริ่มตกผลึก $T_{c \text{ onset}}$ ($^{\circ}\text{C}$)
P95-20A3-D19	34	164	127
P95-20A3-D25	35	163	127
P95-20A3-D42	48	163	126
BOPP	51	168	122

4.5.3 ผลการศึกษาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ผลการทดสอบสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน กรณีที่ความหนาของฟิล์มเท่ากัน โดยพิจารณาเป็นค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : *OP*) ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP แสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีที่สุดหรือมีค่า *OP* ต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ โดยหากพิจารณาถึงค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาที่เกิดขึ้นในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ เพื่อจัดเรียงตัวขวางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนตาม Tortuous path ดังแสดงในรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร มีการเติมออร์กาโนเคลย์และสารช่วยผสมชนิดเดียวกันและปริมาณเท่ากัน ดังนั้นอนุภาคซิลิกาเกิดในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร จึงน่าจะมีค่า Aspect ratio ใกล้เคียงกันด้วย และเมื่อพิจารณากลไกการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT พบว่าสามารถเกิดขึ้นได้หลายทางกล่าวคือก๊าซออกซิเจนสามารถซึมผ่านวัฏภาคอสัณฐานของฟิล์ม PP/m-MMT นอกจากนี้ก๊าซออกซิเจนอาจจะซึมผ่านช่องว่างระหว่างวัฏภาคของพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye ได้ เนื่องจากในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกดึงผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็น เม็ดเจลที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มซึ่งเป็นของแข็งจะไม่ยืดตัวตามแรงดึง ส่งผลให้เกิดช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และเม็ดเจล ซึ่งอาจเป็นตำแหน่งการแทรกผ่านของก๊าซออกซิเจน จากผลการทดลองสังเกตได้ว่ามี 2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT คือผลของค่าร้อยละความเป็นผลึกและผลของการเกิดเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye จากการศึกษาในหัวข้อที่ 4.5.2 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ การที่ฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าหรือมีส่วนที่เป็นวัฏภาคอสัณฐานอยู่น้อยกว่า ก๊าซออกซิเจนจึงซึมผ่านได้ลดลง ซึ่งเป็นผลตรงข้ามกับการเกิดเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye โดยฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 มีอัตราส่วนการดึงสูงที่สุดหรืออาจกล่าวได้ว่าฟิล์มได้รับการดึงยืดมากกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ จึงอาจเกิดช่องว่างที่บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคของพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์และเม็ดเจลมากกว่า และอาจเป็นตำแหน่งการแทรกผ่านของก๊าซออกซิเจน จาก 2 ปัจจัยข้างต้นเป็นปรากฏการณ์ที่หักล้างกัน ซึ่งจากการทดลองพบว่า ค่าร้อยละความเป็นผลึกมีผลต่อสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนเด่นชัดกว่าผลของการเกิดเม็ดเจล ดังจะเห็นได้จากฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีที่สุดหรือมีค่า *OP* ต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ



รูปที่ 4.31 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

เมื่อพิจารณาค่า OP ของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP พบว่าฟิล์ม BOPP สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าหรือมีค่า OP ต่ำกว่าฟิล์ม PP/m-MMT จากการคำนวณตามทฤษฎี Tortuosity ในสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะเห็นได้ว่าการเติมออร์กาโนเคลย์ ปริมาณ 3 % โดยน้ำหนัก จะสามารถลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT ให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ได้หากอนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio เท่ากับ 250 ดังแสดงในตารางที่ 4.20 แต่จากผลการทดลองพบว่าอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 มีค่า Aspect ratio เท่ากับ 92 ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ทำให้ประสิทธิภาพในการสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลดลง รวมทั้งฟิล์ม BOPP มีค่าร้อยละความเป็นผลึกสูงกว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.5.2 โดยโครงสร้างผลึกนี้เป็นโครงสร้างสายโซ่ที่เรียงตัวอย่างเป็นระเบียบหรือมีการเรียงชิดติดกัน จึงทำให้สามารถลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลงได้ ประกอบกับไม่พบเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye จึงไม่มีช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างภูมิภาค ซึ่งอาจเป็นตำแหน่งการแทรกผ่านของก๊าซออกซิเจน จากเหตุผลข้างต้นส่งผลให้ฟิล์ม BOPP สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์ม PP/m-MMT

ตารางที่ 4.20 ปริมาณออร์กาโนเคลย์ (Cloisite® 20A) ที่เหมาะสมต่อการลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ที่อนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio ต่างๆ ตามทฤษฎี Tortuosity

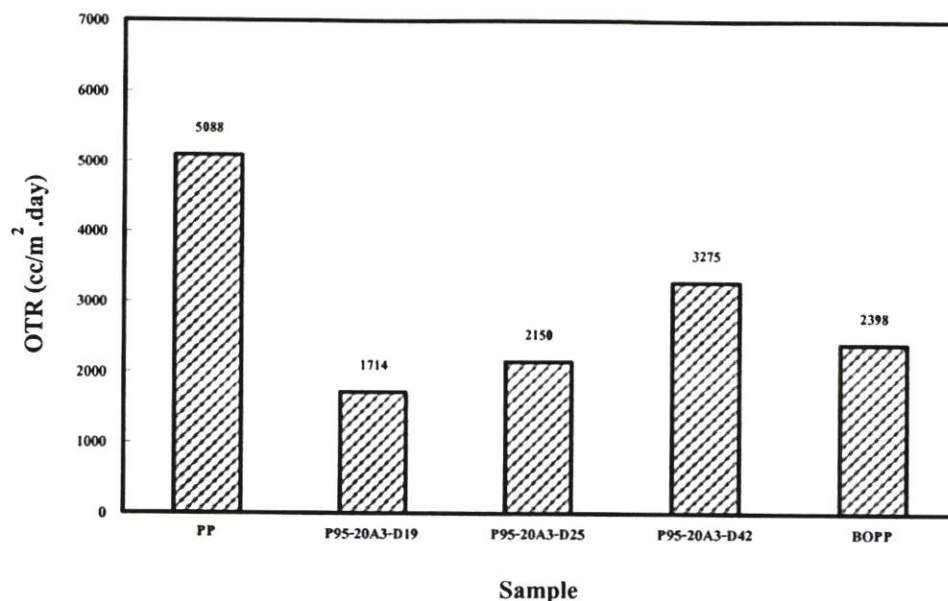
Aspect ratio ^a	P_s / P_p ^b	ϕ_s ^c	ออร์กาโนเคลย์ (% โดยน้ำหนัก)
100	48 / 117 = 0.41	0.03	9.00
250	48 / 117 = 0.41	0.01	3.00
500	48 / 117 = 0.41	0.006	2.00
1000	48 / 117 = 0.41	0.003	1.00

หมายเหตุ ^a คือ สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาของอนุภาคซิลิเกต

^b คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซิลิเกตนาโนคอมโพสิตต่อความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์

^c คือ สัดส่วน โดยปริมาตรของซิลิเกต

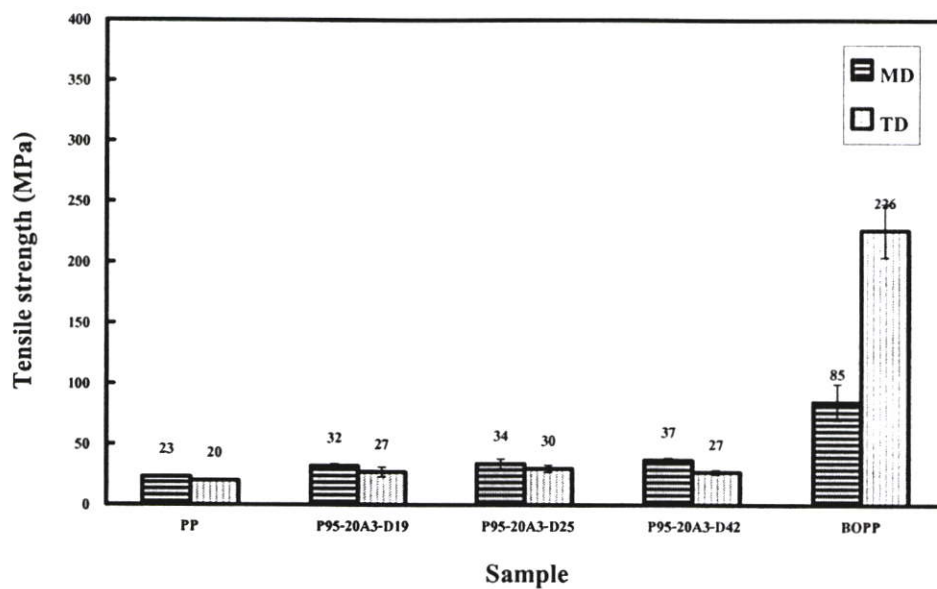
นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP/m-MMT กรณีที่ความหนาของฟิล์มแตกต่างกัน โดยพิจารณาเป็นอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Gas Transmission Rate : OTR) ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP แสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าหรือมีค่า OTR ต่ำกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 ตามลำดับ เนื่องจากฟิล์มสูตร P95-20A3-D19 มีความหนามากกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 ตามลำดับ โดยจากทฤษฎี Tortuosity พบว่าการเพิ่มความหนาของฟิล์ม PP/m-MMT จะเป็นการเพิ่มระยะทางสำหรับการเคลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนไปตามชั้นของอนุภาคซิลิเกต ที่จัดเรียงตัววางกั้นเส้นทางการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ดังนั้นการเพิ่มความหนาของฟิล์มจะมีผลทำให้ค่า OTR มีแนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาค่า OTR ของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19 และ P95-20A3-D25 สามารถสกัดกั้นการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าหรือมีค่า OTR ต่ำกว่าฟิล์ม BOPP เนื่องจากฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 2 สูตร มีความหนามากกว่าฟิล์ม BOPP ประมาณ 2-3 เท่า ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจากทฤษฎี Tortuosity การเพิ่มความหนาของฟิล์ม PP/m-MMT จะเป็นการเพิ่มระยะทางสำหรับการเคลื่อนที่ของก๊าซออกซิเจนไปตามชั้นของอนุภาคซิลิเกตเป็นผลให้ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 สามารถลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าฟิล์ม BOPP



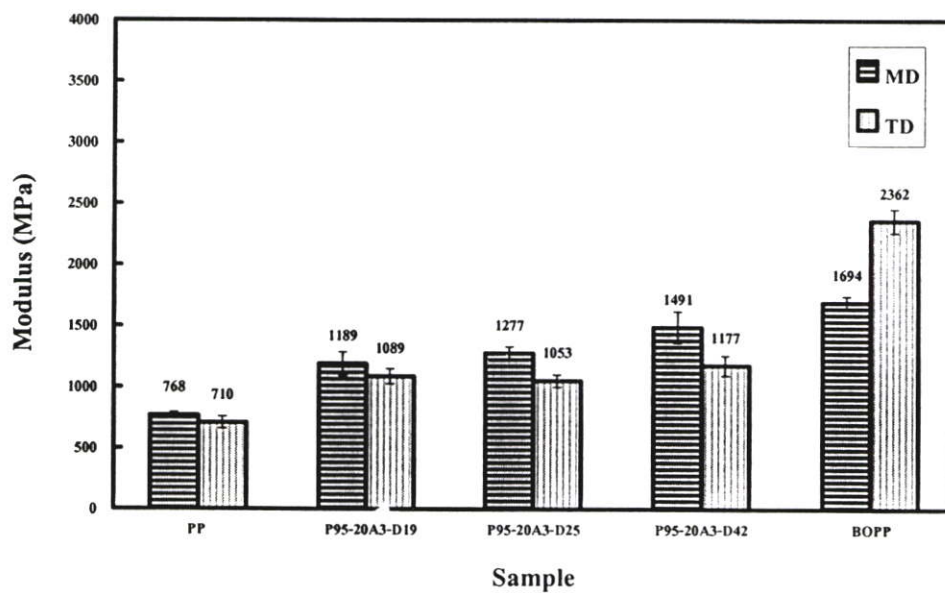
รูปที่ 4.32 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนในฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

4.5.4 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

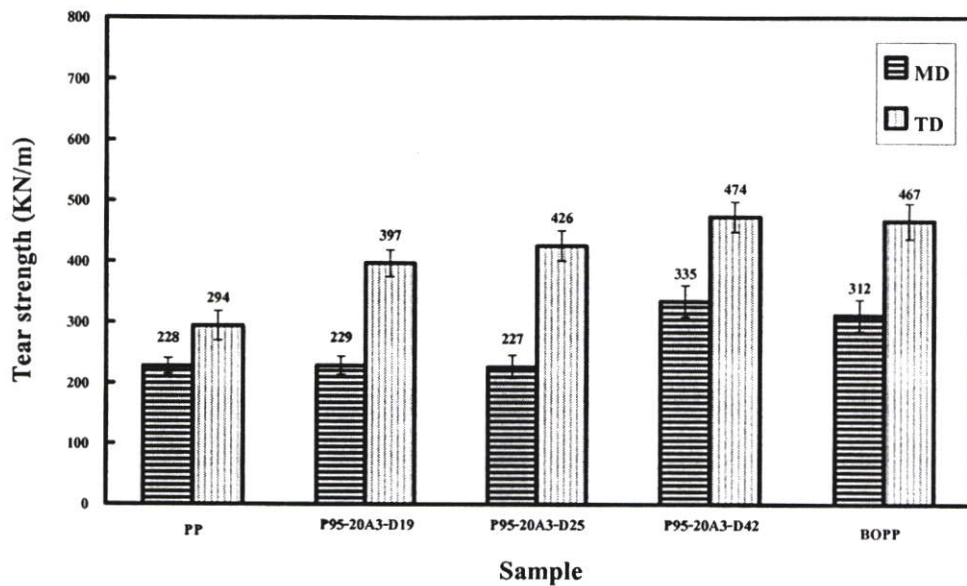
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 มีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.33-4.35 จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลใน PP/m-MMT เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระดับการแทรกสอดของสายโซ่หลักของสารช่วยผสมและค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ [4] รวมถึงการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละความเป็นผลึกด้วย โดยหากพิจารณาถึงผลของค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิกาที่มีต่อสมบัติการเสริมแรงจะเห็นได้ว่าฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร มีการเติมออร์กาโนเคลย์ และสารช่วยผสมชนิดเดียวกันและปริมาณเท่ากัน ดังนั้นอนุภาคซิลิกาในฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร จึงน่าจะมีค่า Aspect ratio ใกล้เคียงกัน และจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.5.2 พบว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D42 ได้รับการดึงยึดผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็นที่มากกว่า เป็นผลทำให้ได้รับการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มากกว่าฟิล์มสูตร P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D19 ตามลำดับ โดยเมื่อให้แรงดึงแก่ฟิล์ม ผลึกของฟิล์มและสายโซ่พอลิเมอร์จะรับแรงและถ่ายโอนแรงที่ได้รับไปยังออร์กาโนเคลย์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นส่วนเสริมแรง ดังนั้นในการทดลองนี้การเพิ่มขึ้นของสมบัติเชิงกลน่าจะเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดครากของฟิล์ม PP/m-MMT ทั้ง 3 สูตร มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.36



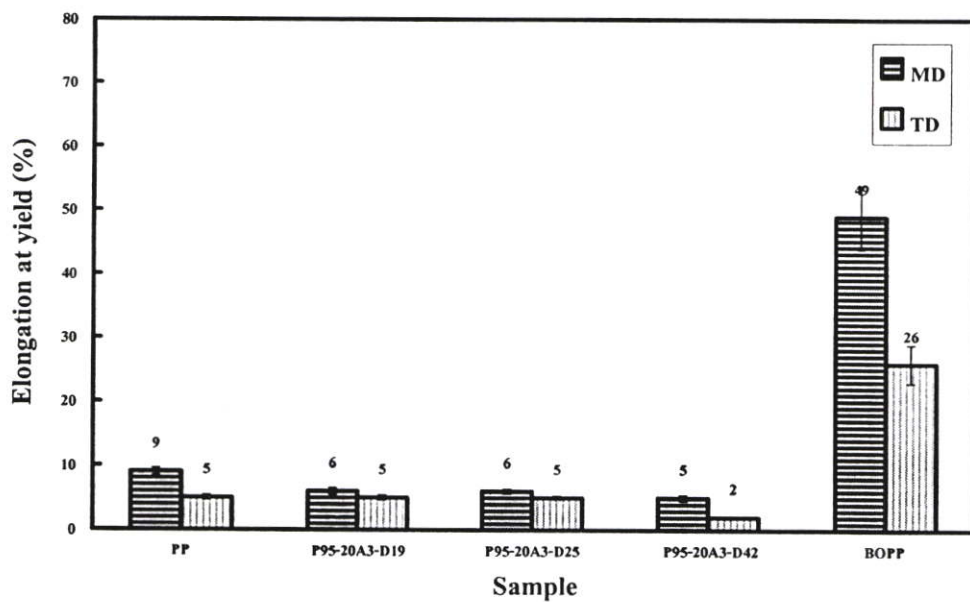
รูปที่ 4.33 ค่าความแข็งแรงดึงของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP



รูปที่ 4.34 ค่ามอดุลัสของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP



รูปที่ 4.35 ค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP



รูปที่ 4.36 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19, P95-20A3-D25 และ P95-20A3-D42 เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP พบว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส ค่าความแข็งแรงฉีกขาดและค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากต่ำกว่าฟิล์ม BOPP ดังแสดงในรูปที่ 4.33-4.36 ตามลำดับ เนื่องจากฟิล์ม BOPP ผ่านการขึ้นรูปด้วยเทคนิคการให้แรงดึงยึดแก่ฟิล์มในทิศทาง MD และ TD ทำให้ได้ฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทั้ง 2 ทิศทาง เป็นผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม PP/m-MMT ที่ผ่านการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น ส่งผลให้ฟิล์มมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทิศทาง MD เท่านั้น และยังพบปัญหาในกรณีการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์ในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ หรืออาจกล่าวได้ว่าอนุภาคซิลิเกตมีค่า Aspect ratio น้อยกว่า 1000 ทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของออร์กาโนเคลย์ลดลง ประกอบกับการเติมสารช่วยผสม ที่มีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ รวมทั้งการเกิดเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye ซึ่งถือเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานบนแผ่นฟิล์ม PP/m-MMT [12] จากเหตุผลข้างต้นล้วนส่งผลให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีความแข็งแรงลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม BOPP แต่อย่างไรก็ดีในการทดลองนี้พบว่าสามารถพัฒนาค่าความแข็งแรงฉีกขาดของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 ได้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ดังแสดงในรูปที่ 4.35 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทดลองข้างต้นได้พัฒนาสมบัติการเสริมแรง และค่าร้อยละความเป็นผลึกของฟิล์ม PP/m-MMT ให้สามารถรับแรงได้มากขึ้นเป็นผลให้ฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D42 มีความแข็งแรงฉีกขาดใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาความเป็นไปได้ ในการเตรียมฟิล์มพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (PP/m-MMT) โดยการเติมสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ เพื่อพัฒนาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกล ให้ใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิพรอพิลีนที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุล 2 ทิศทาง (Biaxially Oriented Polypropylene: BOPP) ซึ่งเป็นการเพิ่มประโยชน์การใช้งานฟิล์ม PP/m-MMT เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์อื่นๆ ให้มีสมบัติและประโยชน์การใช้งานตามความต้องการจากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 การศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ในพอลิพรอพิลีนนาโนคอมโพสิต (PP/m-MMT)

อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์ในการทดลองนี้เท่ากับ 2:1 โดยเมื่อทำการลดอัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 1.5:1 และ 1:1 จะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ในพอลิพรอพิลีนเมตริกซ์ลดลง แต่เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างสารช่วยผสมและออร์กาโนเคลย์เท่ากับ 2.5:1 และ 3:1 จะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างชั้นของออร์กาโนเคลย์ไม่แตกต่างกัน

5.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มพอลิพรอพิลีนเปรียบเทียบกับฟิล์ม PP/m-MMT

ฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีการเติมออร์กาโนเคลย์จะมีค่าครรชนีการไหล (MFI) ต่ำกว่าฟิล์มพอลิพรอพิลีน (Polypropylene : PP) และเมื่อทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าร้อยละความเป็นผลึก (% Crystallinity) และอุณหภูมิเริ่มสลายตัว ($T_{d \text{ onset}}$) สูงกว่าฟิล์ม PP ส่วนอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) และอุณหภูมิเริ่มตกผลึก ($T_c \text{ onset}$) ของฟิล์ม PP และฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าใกล้เคียงกัน จากการศึกษาพบว่าสามารถพัฒนาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดูลัส (Modulus) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) โดยการเตรียมเป็นฟิล์ม PP/m-MMT แต่อย่างไรก็ดีสมบัติบางประการมีแนวโน้มลดลง เช่น ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดคราก (% Elongation at yield) จากผลการศึกษาพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าฟิล์ม PP เท่ากับ 61 และ 35 % ในทิศทาง MD และ TD ตามลำดับ และมีค่ามอดูลัสสูงกว่าฟิล์ม PP เท่ากับ 94 และ 66 % ในทิศทาง MD และ TD ตามลำดับ

5.3 การศึกษาชนิดของออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

การเติมออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite[®] 20A จะมีประสิทธิภาพการกระจายตัวในฟิล์ม PP/m-MMT ดีกว่าการเติมออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาค่ามอดูลัส และสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Oxygen Permeability Coefficient : *OP*) มีค่าลดลง ส่วนค่าความแข็งแรงฉีกขาด และค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากของฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่า ชนิดของออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลต่อค่า MFI และสมบัติทางความร้อนของฟิล์ม PP/m-MMT

5.4 การศึกษาชนิดของสารช่วยผสมที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

การเติมสารช่วยผสมชนิดพอลิพรอพิลีนกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Polypropylene grafted Maleic Anhydride : PP-g-MA) เกรด Priex[®] 20095 ที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่ง (Branching) เป็นหมู่ฟังก์ชันมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic Anhydride : MA) ซึ่งมีความเป็นขั้วสูงและมีโครงสร้างสายโซ่หลักเป็นสายโซ่พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะทำให้ออร์กาโนเคลย์มีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดีและทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีการพัฒนาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลที่เหมาะสม เมื่อทำการศึกษาศสมบัติทางความร้อนพบว่า ชนิดของสารช่วยผสมไม่มีผลต่อค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิเริ่มสลายตัว นอกจากนี้ยังพบว่าชนิดของสารช่วยผสมไม่มีผลต่อค่า MFI

5.5 การศึกษาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

การลดปริมาณออร์กาโนเคลย์ในฟิล์ม PP/m-MMT จะทำให้ออร์กาโนเคลย์มีประสิทธิภาพในการกระจายตัวที่ดี ซึ่งส่งผลต่อการพัฒนาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกล เมื่อทำการศึกษาศสมบัติทางความร้อนพบว่าปริมาณออร์กาโนเคลย์ไม่มีผลต่อค่าร้อยละความเป็นผลึก อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิเริ่มตกผลึกของฟิล์ม PP/m-MMT แต่การเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์จะทำให้อุณหภูมิเริ่มสลายตัวมีแนวโน้มลดลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณออร์กาโนเคลย์จะทำให้ค่า MFI ของ PP/m-MMT มีค่าลดลง

5.6 การศึกษาอัตราส่วนการดึง (Draw ratio) ที่มีต่อสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT

ฟิล์ม PP/m-MMT ที่มีอัตราส่วนการดึงสูงจะมีค่าร้อยละความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการพัฒนาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัส และค่าความแข็งแรงฉีกขาด ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดครากของฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อทำการศึกษาศสมบัติทางความร้อนพบว่า อัตราส่วนการดึงไม่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว

ผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึกของฟิล์ม PP/m-MMT นอกจากนี้การเพิ่มความหนาให้แก่ฟิล์ม PP/m-MMT จะสามารถลดการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนลงได้

5.7 การศึกษาสมบัติของฟิล์ม PP/m-MMT เปรียบเทียบกับฟิล์ม BOPP

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าร้อยละความเป็นผลึกต่ำกว่าฟิล์ม BOPP แต่มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกและอุณหภูมิเริ่มตกผลึกใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT ยังคงมีสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลต่ำกว่าฟิล์ม BOPP แต่อย่างไรก็ดีจากการทดลองพบว่าสามารถพัฒนาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์ม PP/m-MMT ให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ได้โดยการเพิ่มความหนาให้กับฟิล์ม PP/m-MMT และสามารถพัฒนาค่าความแข็งแรงลักษณะของฟิล์ม PP/m-MMT ให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม BOPP ได้โดยการลดปริมาณออร์กาโนเคลย์และเพิ่มอัตราส่วนการดึง จากผลการศึกษาพบว่าฟิล์ม PP/m-MMT มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่าฟิล์ม BOPP เท่ากับ 56 % และ 88 % ในทิศทาง MD และ TD ตามลำดับ และมีค่ามอดูลัสต่ำกว่าฟิล์ม BOPP เท่ากับ 12 และ 50 % ในทิศทาง MD และ TD ตามลำดับ

5.8 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยได้ทำการขึ้นรูปฟิล์ม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มแบบแผ่น (Flat film) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine Direction : MD) เท่านั้น ดังนั้นถ้าเปลี่ยนเทคนิคการขึ้นรูปฟิล์มเป็นเครื่องอัดรีดสำหรับกระบวนการผลิตฟิล์มเป่า (Blown film) จะทำให้ฟิล์ม PP/m-MMT มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทิศทางตามแนวเครื่องจักรและตามขวางเครื่องจักร (Transverse Direction : TD) น่าจะส่งผลให้มีการพัฒนาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกลได้เป็นอย่างดี
2. ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาประสิทธิภาพการกระจายตัวของออร์กาโนเคลย์โดยผสม PP/m-MMT ผ่านเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin screw extruder) 2 รอบ โดยหากทำการผสม PP/m-MMT ด้วยเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่โดยที่สกรูมีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) สูงกว่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการพัฒนาระบบการผสมเพื่อนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่า Aspect ratio ของอนุภาคซิลิเกต ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนและสมบัติเชิงกล
3. ในขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มอาจมีการใช้ตะแกรงกรองหน้าเครื่องอัดรีด (Screen pack) เพื่อลดปริมาณเม็ดเจลที่เรียกว่า Fish eye บนแผ่นฟิล์ม PP/m-MMT

เอกสารอ้างอิง

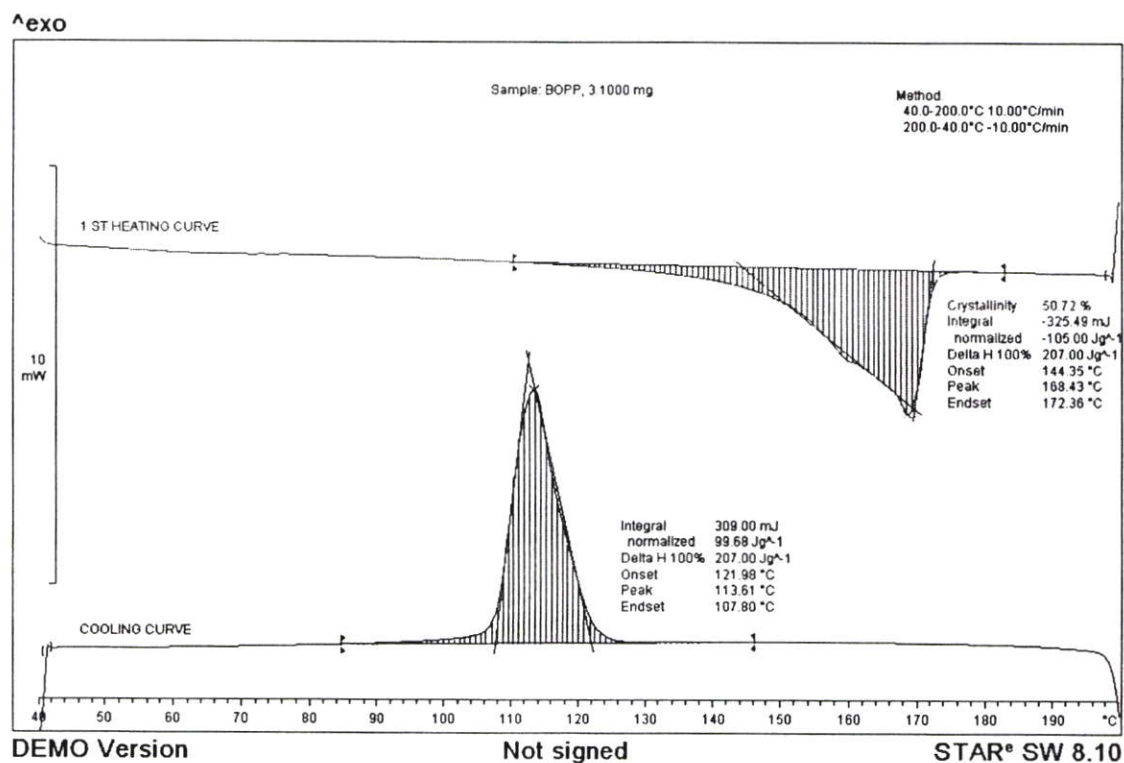
- [1] วิเคราะห์รายหุ้น. “ธุรกิจแผ่นฟิล์มกำลังเติบโตดี.” [Online]. Available : <http://www.kelive.kimeng.co.th/kelive/userview/DetailPage>. 2006.
- [2] วรณัฒน์ ฉินศิริกุล และ นภคด เกิดคอนแฝก. เทคโนโลยีก้าวหน้าบนานาสาระในโลกพลาสติก. กลุ่มวิศวกรรมพลาสติก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2547.
- [3] Lertwimolnun W. and Vergnes B. “Influence of compatibilizer and processing condition on the dispersion of nanoclay in a polypropylene matrix.” **Polymer**. vol.46, 2005. pp. 3462-3471.
- [4] Nam P.H., Maiti P., Okamoto M., Kotaka T., Hasegawa N. and Usuki A. “A hierarchical structure and properties of intercalated polypropylene/clay nanocomposites.” **Polymer**. vol.42, 2001. pp. 9633-9640.
- [5] Yuan Q. and Misra R.D.K. “Impact fracture behavior of clay-reinforced polypropylene nanocomposites.” **Polymer**. vol.47, 2006. pp. 4421-4433.
- [6] Modesti M., Lorenzetti A., Bom D. and Besco S. “Effect of processing condition on morphology and mechanical properties of compatibilized polypropylene nanocomposites.” **Polymer**. vol.46, 2005. pp. 10237-10245.
- [7] Zhou Y., Rangari V., Mahfuz H., Jeelani S. and Mallick P.K. “Experimental study on thermal and mechanical behavior of polypropylene, talc/polypropylene and polypropylene/clay nanocomposites.” **Materials Science and Engineering**. vol.402, 2005. pp. 109-117.
- [8] Wang S., Zhang Y., Ren W., Zhang Y. and Lin H. “Morphology, mechanical and optical of transparent BR/clay nanocomposites.” **Polymer Testing**. vol.24, 2005. pp. 766-774.
- [9] Filho F.G.R., Melo T.J.A., Rabello M.S. and Silva S.M.L. “Thermal stability of nanocomposites based on polypropylene and bentonite.” **Polymer Degradation and Stability**. vol.89, 2005. pp. 383-392.
- [10] Garcia-Lopez D., Picazo O., Merino J.C. and Pastor J.M. “Polypropylene-clay nanocomposites: effect of compatibilizing agent on clay dispersion.” **European Polymer Journal**. vol.39, 2003. pp. 945-950.
- [11] Wang Y., Chen F.B., Li Y.C. and Wu K.C. “Melt processing of polypropylene/clay nanocomposites modified with maleated polypropylene compatibilizers.” **Composites : Part B**. vol.35, 2004. pp. 111-124.

- [12] Sangrungsri P. **“Development of polypropylene nanocomposites for flexible packaging in order to replace a conventional barrier material.”** M.Sc. Thesis of University of Massachusetts Lowell. 2006.
- [13] Nakajima H., Xu L., Krishnamoorti R. and Manias E. **“Mechanical and Rheological Behavior of Polypropylene/Montmorillonite Nanocomposites Prepared Through ‘Master Batch’ Approaches.”** Petrochemicals Research Laboratory, Sumitomo Chemical Co., Ltd., JAPAN.
- [14] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. **เคมีโพลิเมอร์พื้นฐาน.** กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. 2527.
- [15] Industrial Chemical Synthesis. **“Polypropylene.”** [Online]. Available : <http://www.elmhurst.edu/.../chm110/outlines/topic5.html/>. 2004.
- [16] Academic Information. **“Polymerization.”** [Online]. Available : http://www.python.rice.edu/~arh/Courses/chem495_03.htm/. 2003.
- [17] Swicofill. **“Essegomma Polypropylene PP shade card.”** [Online]. Available : <http://www.swicofill.com/essegommashadecards.html/>. 2006.
- [18] Swicofill. **“Natural Fibres Synthetic Fibres.”** [Online]. Available : <http://www.swicofill.com/pp.html/>. 2006.
- [19] รัตนวรรณ มกรพันธุ์. **นาโนเคลย์ / นาโนคอมพอสิต.** วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.
- [20] Michael A. and Philippe D. “Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials.” **Materials Science and Engineering.** vol.28, 2000. pp. 1-63.
- [21] MTEC,NSTDA. **“ข่าว&สาระน่ารู้.”** [Online]. Available : http://www.mtec.or.th/th/news/q_a/qa42.html/. 2005.
- [22] Dainichi. **“Montmorillonite.”** [Online]. Available : <http://www.calearthminerals.com/Calcium Montmorillonite.com/>. 2005.
- [23] อศิรา เพื่องฟูชาติ. **เทคโนโลยีก้าวนานาสาระในโลกพลาสติก.** กลุ่มวิศวกรรมพลาสติก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2547.
- [24] อรอุษา สรวารี. **สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์แห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546.

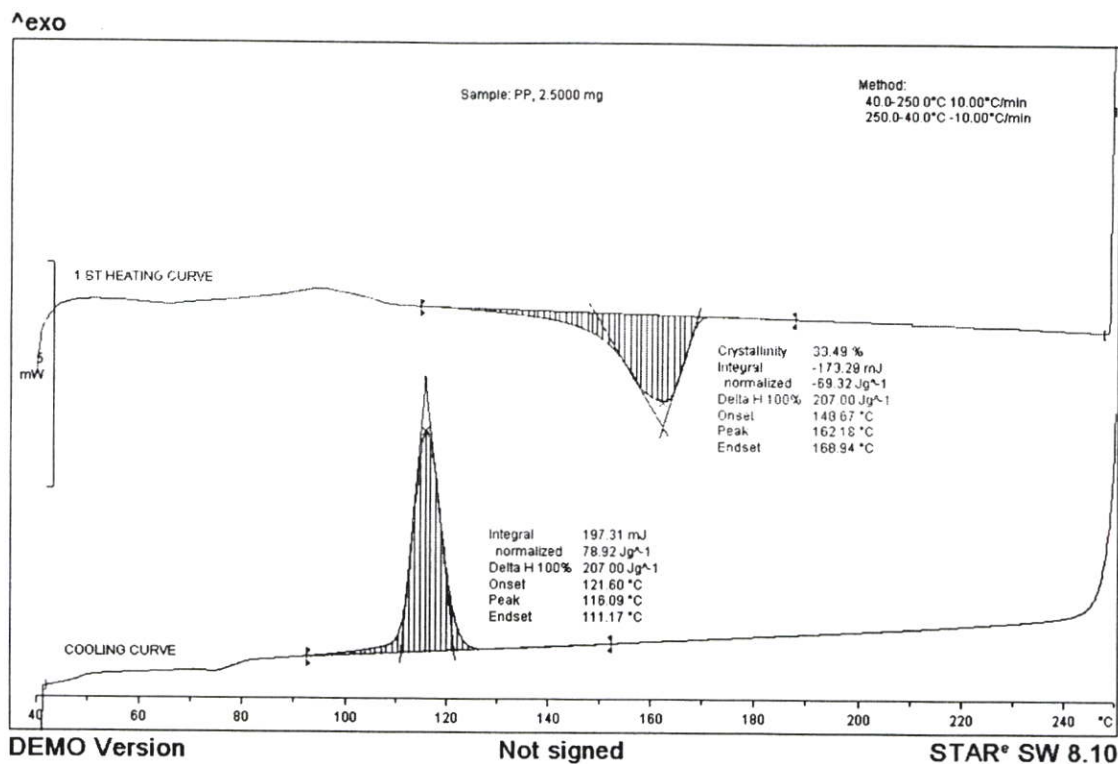
- [25] จรรยา ตรีมงคล, กรวัณธ์ รัตนะรัต, มัลลิกา พงษ์ชวณะกุล, และ พิชญ์ สุภผล. **ฟิล์มหด.**
กรุงเทพมหานคร : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน). 2546.
- [26] สมศักดิ์ วรรณมงคลชัย. **เทคโนโลยีพอลิเมอร์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โครงการตำรา
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
- [27] Basell Polyolefin. **“BOPP.”** [Online]. Available : <http://www.basell.com/portal/site/basell/>.
2004.
- [28] National Food Institute. **“Food Innovation.”** [Online]. Available :
<http://www.nfi.or.th/stat/file/Inno-Biaxially49-3-2.pdf>. 2549.
- [29] บริษัท กิมเอ็ง (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน). **“การนำไปใช้งานของแผ่นฟิล์ม BOPP.”**
[Online]. Available : http://capital.sec.or.th/webapp/corp_fin/datafile/. 2006.
- [30] Bharadwaj R.K. “Modeling the Barrier Properties of Polymer-Layered Silicate
Nanocomposites.” **Macromolecules.** vol.34, 2001. pp. 9189-9192.
- [31] Special Chem. **“gas & vapor barrier.”** [Online]. Available :
<http://www.specialchem4polymers.com/tc/aluminum-pigment.html/>. 2006.
- [32] ASTM D 882 Committee on standard “Standard Test Method for Tensile Properties of Thin
Plastic Sheeting.”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [33] ASTM D 624 Committee on standard “Standard Test Method for Tear Strength of
Conventional Vulcanized and Thermoplastic Elastomers.” Philadelphia :
American Society for Testing and Material., 1992.
- [34] ASTM D 1709 Committee on standard “Standard Test Method for Impact Resistance of
Plastic Film by the Free-Falling Dart Method.” Philadelphia : American Society
for Testing and Material., 1992.
- [35] ASTM E 794 Committee on standard “Standard Test Method for Melting and
Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.”, Philadelphia : American
Society for Testing and Material., 1992.
- [36] ASTM E 1131 Committee on standard “Standard Test Method for Compositional Analysis
by Thermogravimetry.”, Philadelphia : American Society for Testing and
Material., 1992.
- [37] ASTM D 3985-95794 Committee on standard “Standard Test Method for Oxygen Gas
Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric
Sensor.”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.

- [38] ASTM D 1238 Committee on standard “Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer.”, Philadelphia : American Society for Testing and Material., 1992.
- [39] Carl L.Y. **Chemical properties handbook**. New York : McGraw-Hill Handbook. 1999.
- [40] Pro Pack Group. “**Biaxially Oriented Polypropylene (BOPP).**” [Online]. Available : <http://www.shrinkfilm.com/materials/bopp.html/>. 2007.
- [41] อธิพิพล แจ่มชัด , ธีรพัฒน์ อุณหโชค , พงนิษฐ์ ศรธรรมลี และ วรธรรม อุ๋นจิตติชัย. “การศึกษาไม้เทียมพอลิเมอร์คอมโพสิตจากเส้นใยผักตบชวาและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ใช้พอลิเอทิลีนกราฟต์มาตีอิกแอนไฮดรไรด์เป็นสารช่วยผสม.” ในการประชุม การป่าไม้ ประจำปี 2545 ด้านวัสดุทดแทน. 2545.
- [42] กัญญาวีร์ สุวรรณชัย. “การใช้ซีไอโอดีเอเพื่อปรับปรุงการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์มอัดรีดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในงานบรรจุภัณฑ์ผักสด.” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [43] Germes online. “**BOPP tape.**” [Online]. Available : http://www.germes-online.com/.../123166/bopp_tape.html/. 2007.
- [44] Pro Pack Group. “**Biaxially Oriented Polypropylene (BOPP).**” [Online]. Available : <http://www.shrinkfilm.com/materials/bopp.html/>. 2007.
- [45] Amin M. and Mehrdad K. “The effect of composition and draw-down ratio on morphology and oxygen permeability of polypropylene nanocomposite blown films.” **European Polymer Journal**. vol.43, 2007. pp. 3757-3765.

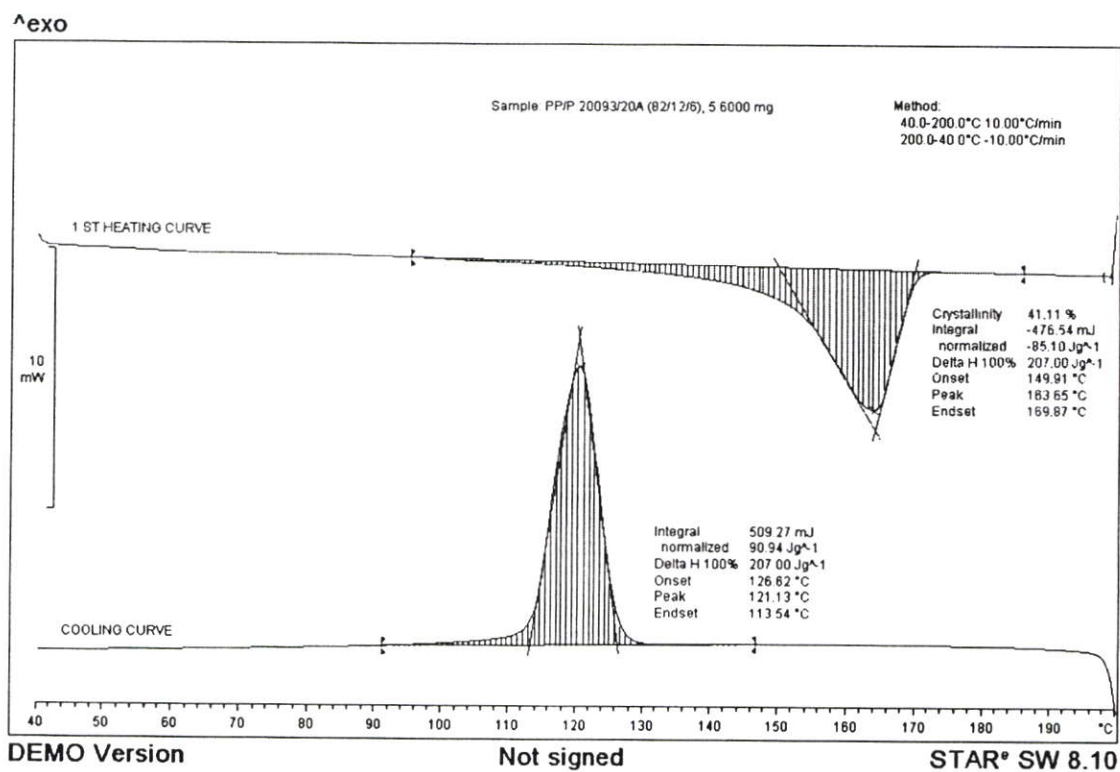
ภาคผนวก ก
การทดสอบสมบัติทางความร้อน



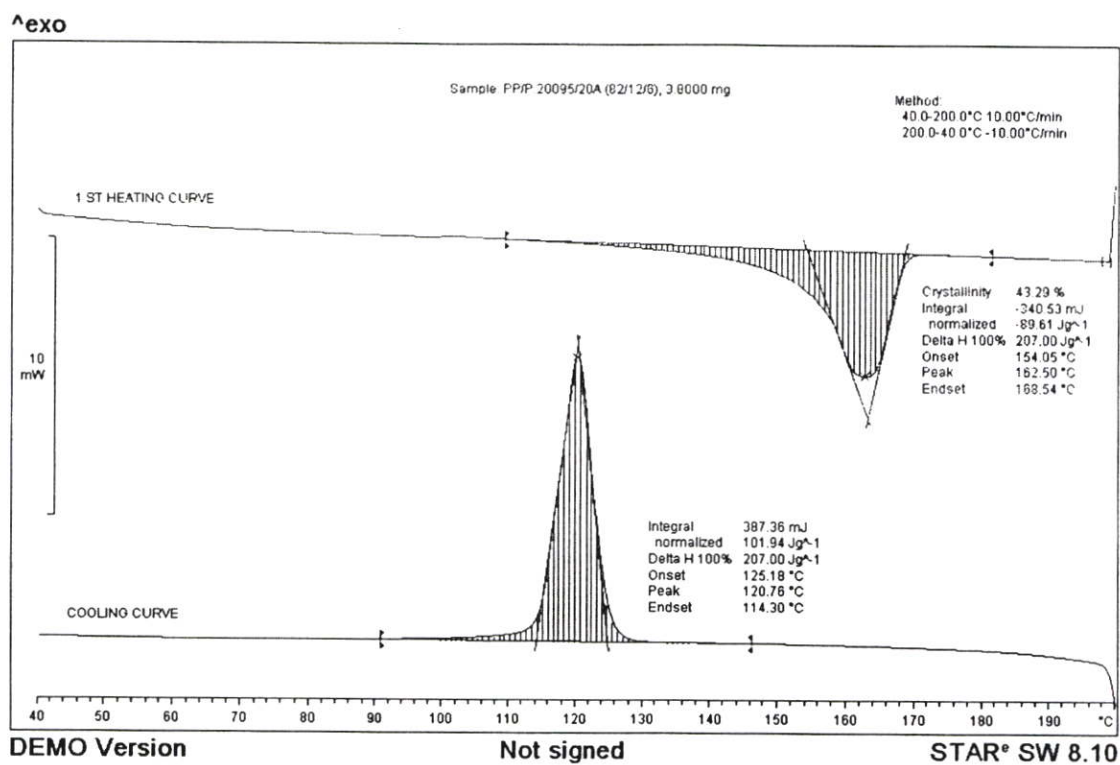
รูปที่ ก-1 DSC thermogram ของฟิล์ม BOPP



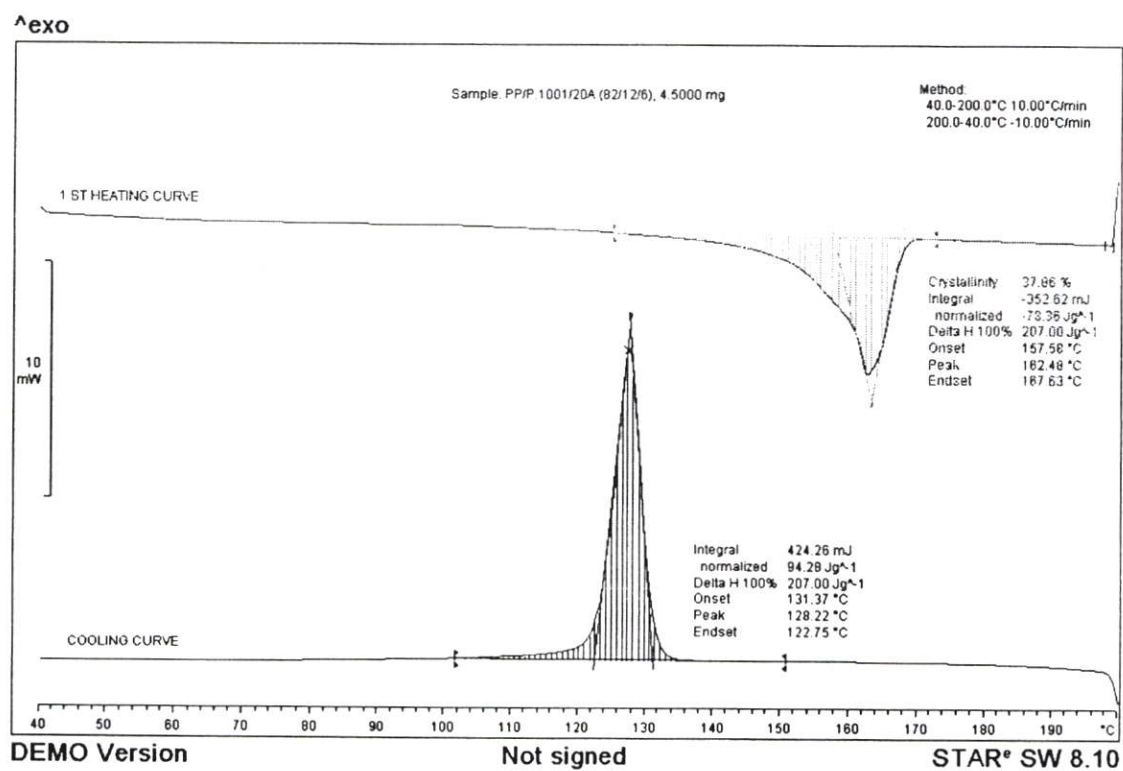
รูปที่ ก-2 DSC thermogram ของฟิล์ม PP



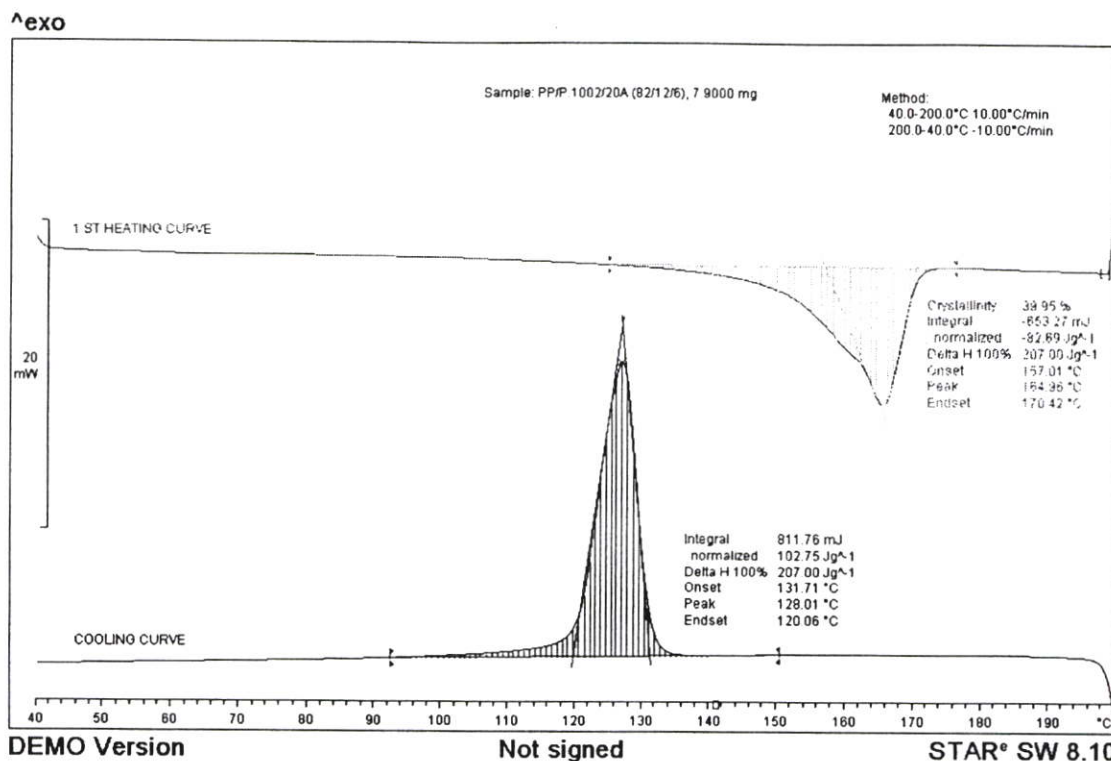
รูปที่ ก-3 DSC thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6



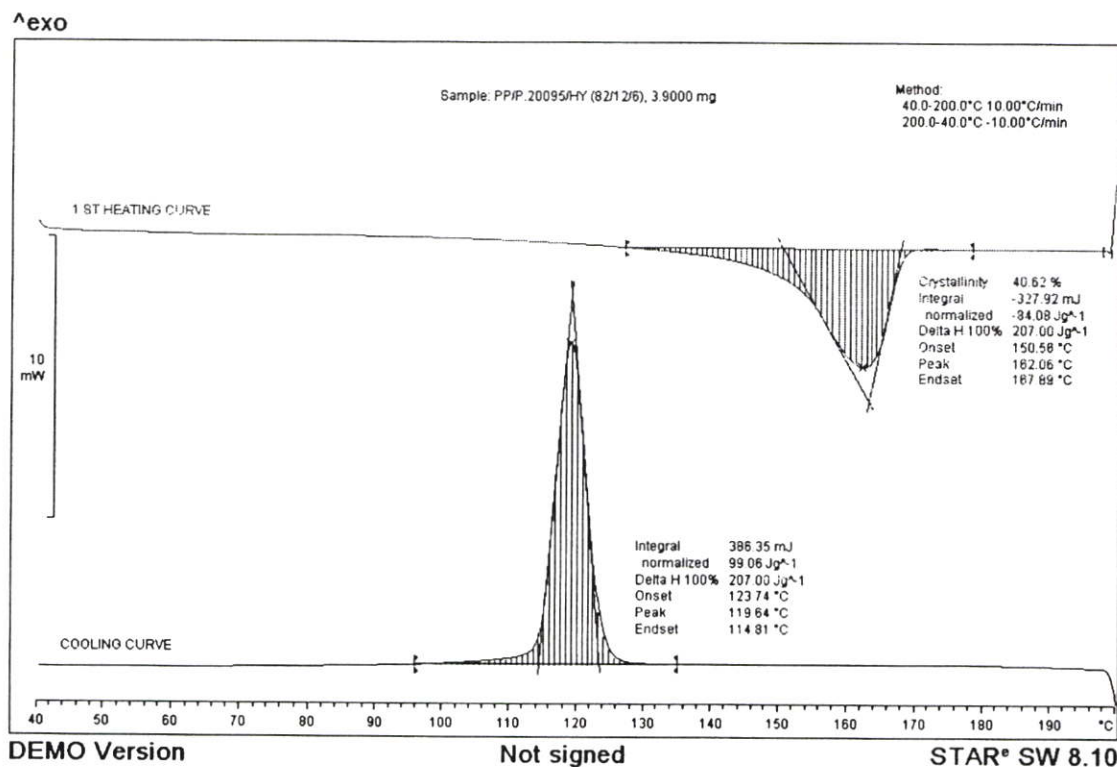
รูปที่ ก-4 DSC thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6



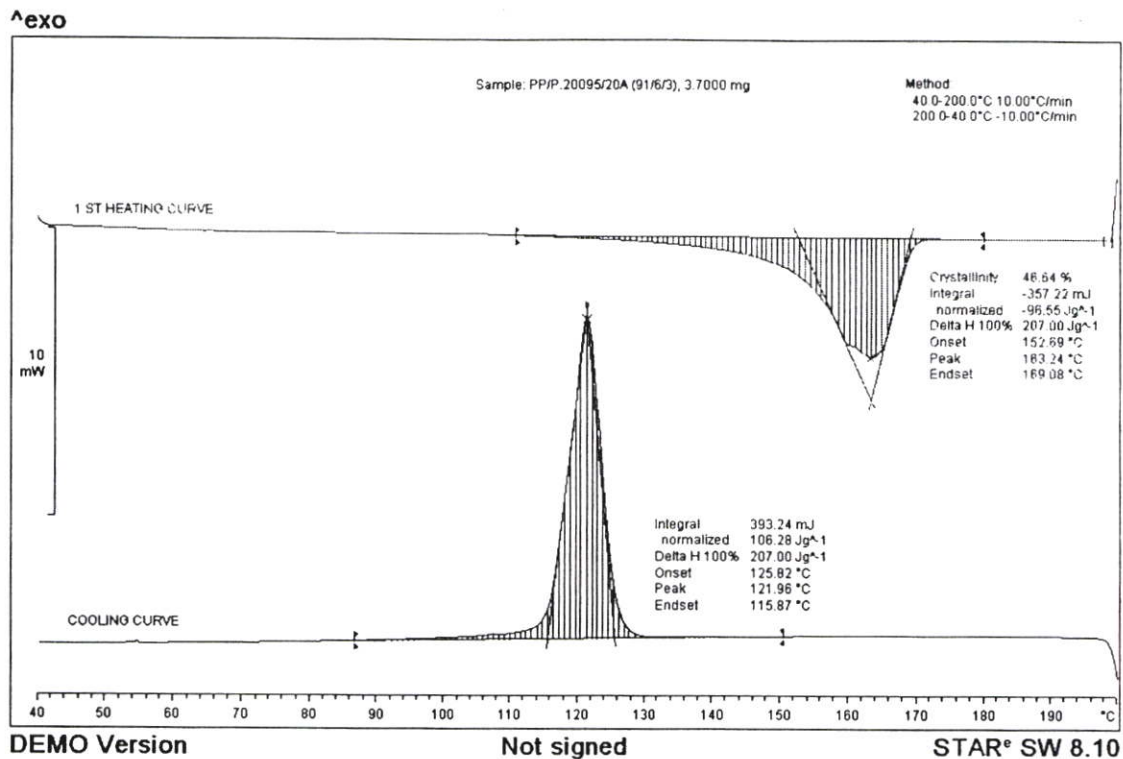
รูปที่ ก-5 DSC thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P01-20A6



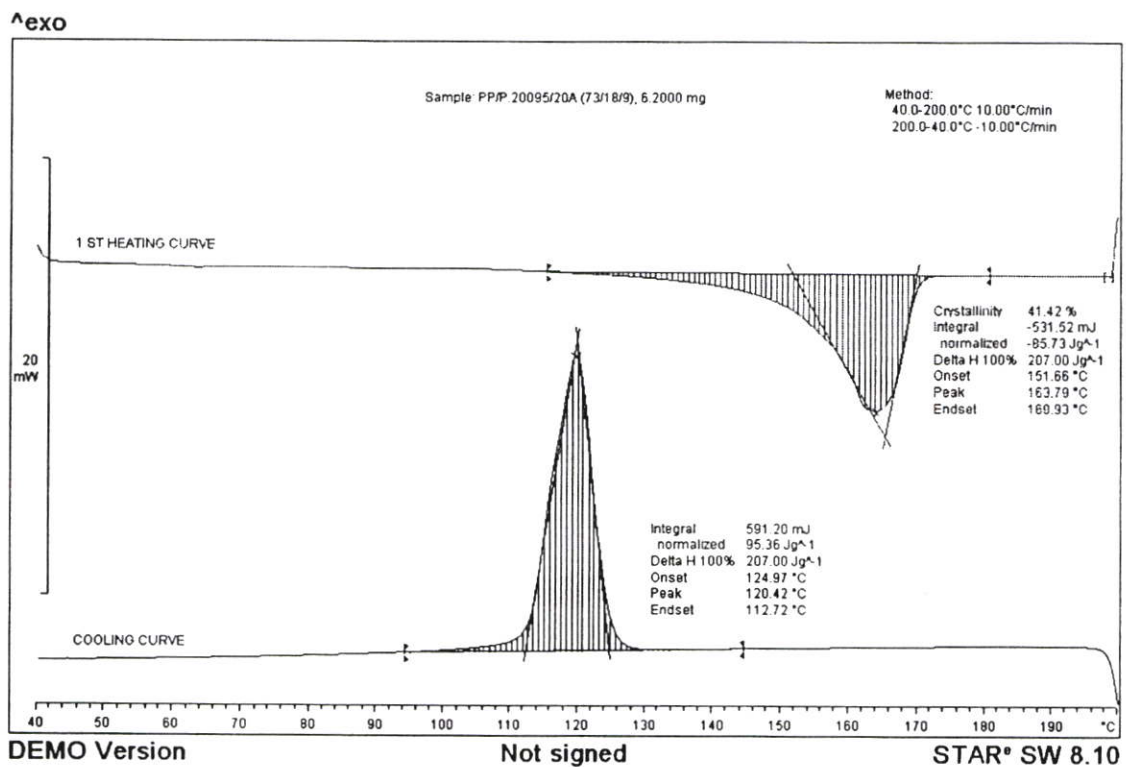
รูปที่ ก-6 DSC thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P02-20A6



รูปที่ ก-7 DSC thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6

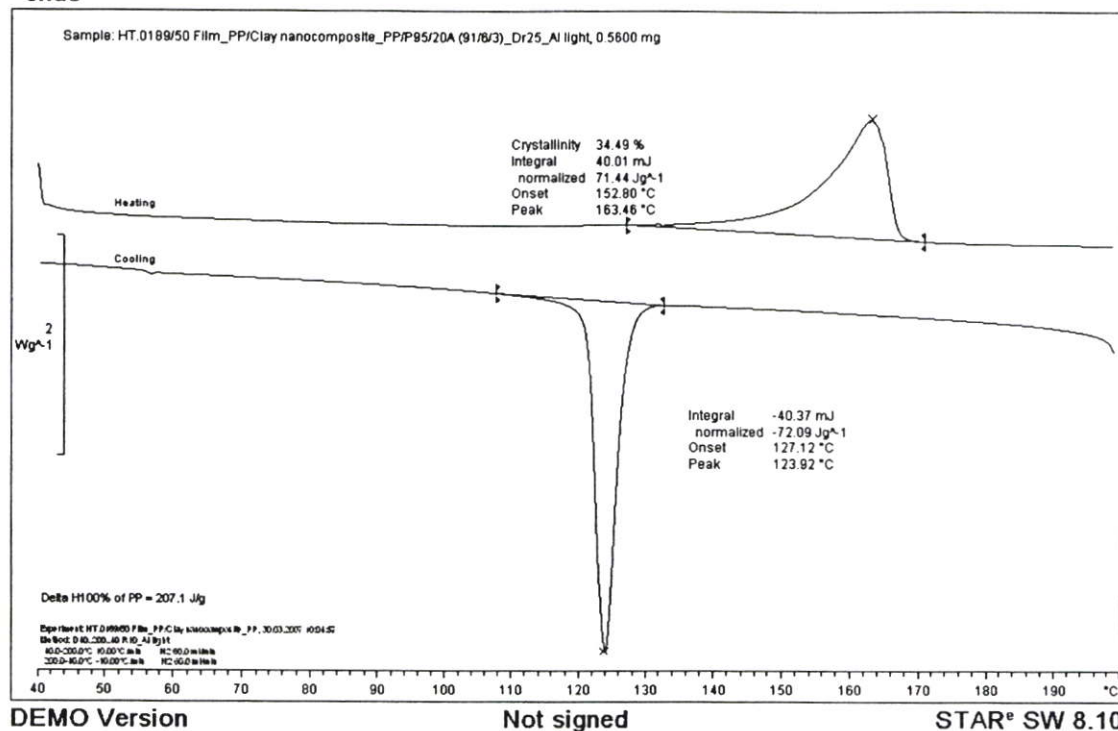


รูปที่ ก-8 DSC thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 หรือ P95-20A3-D42



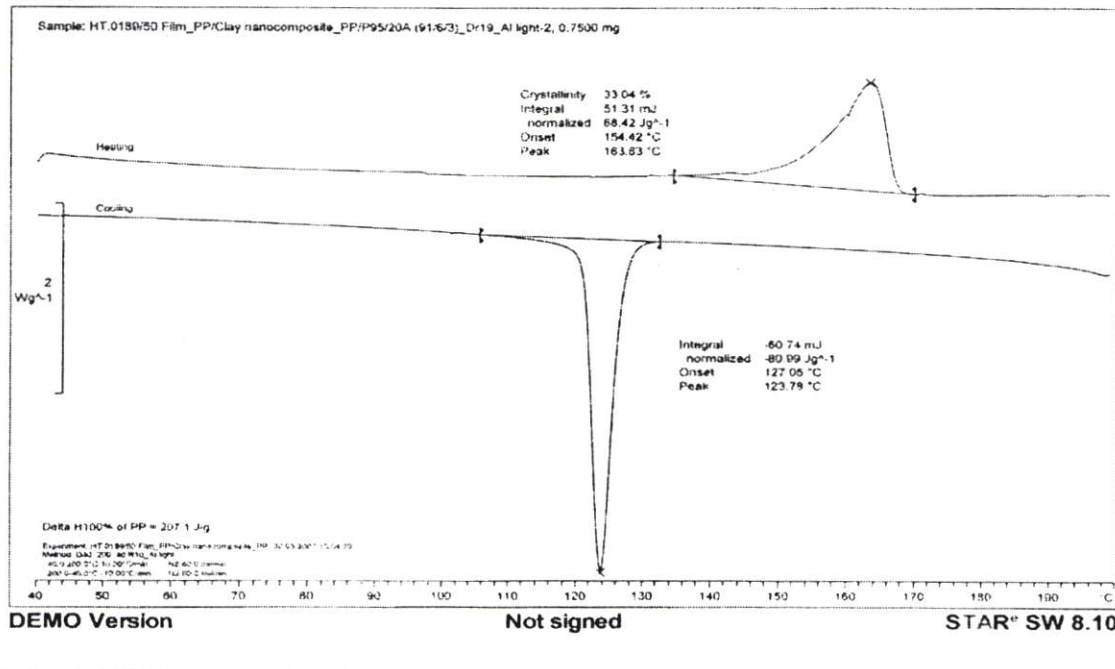
รูปที่ ก-9 DSC thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A9

^endo

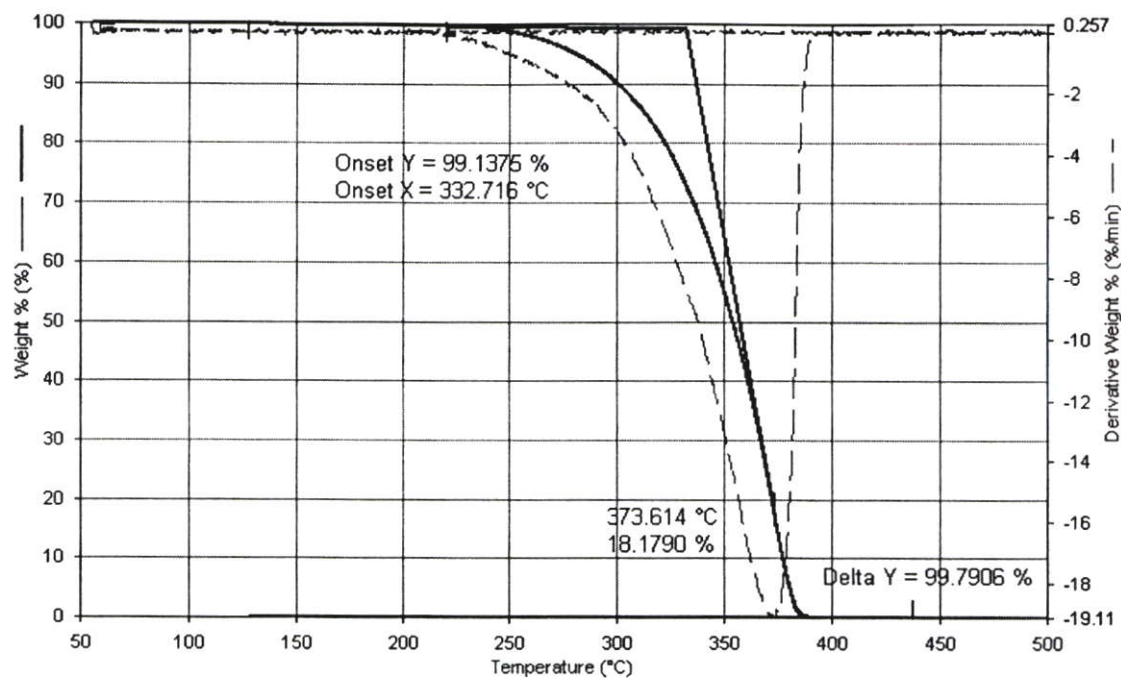


รูปที่ ก-10 DSC thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D25

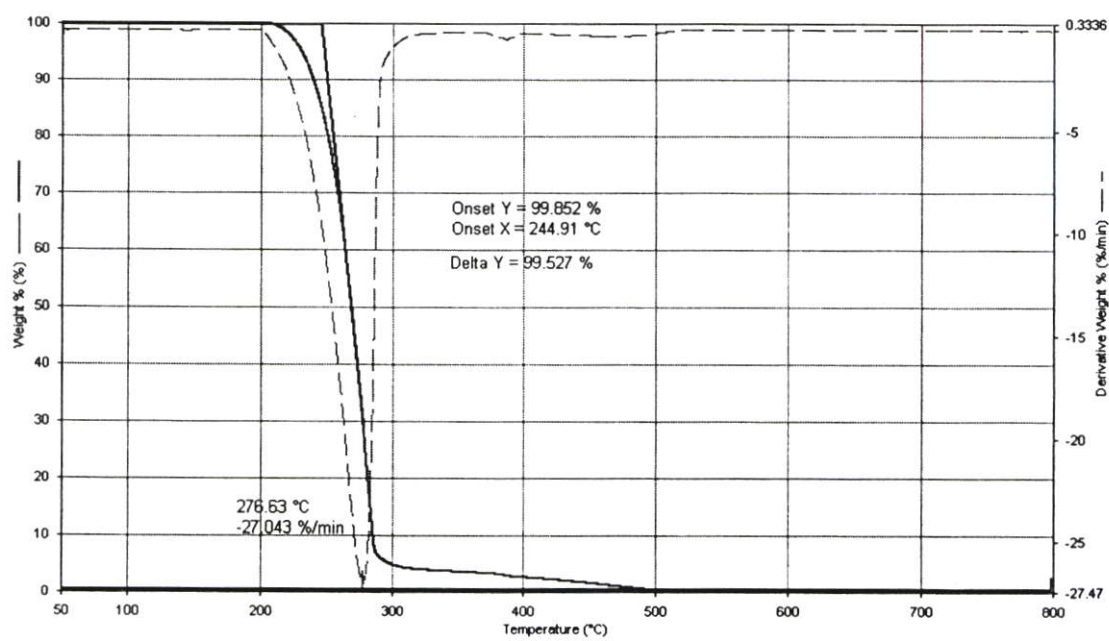
^endo



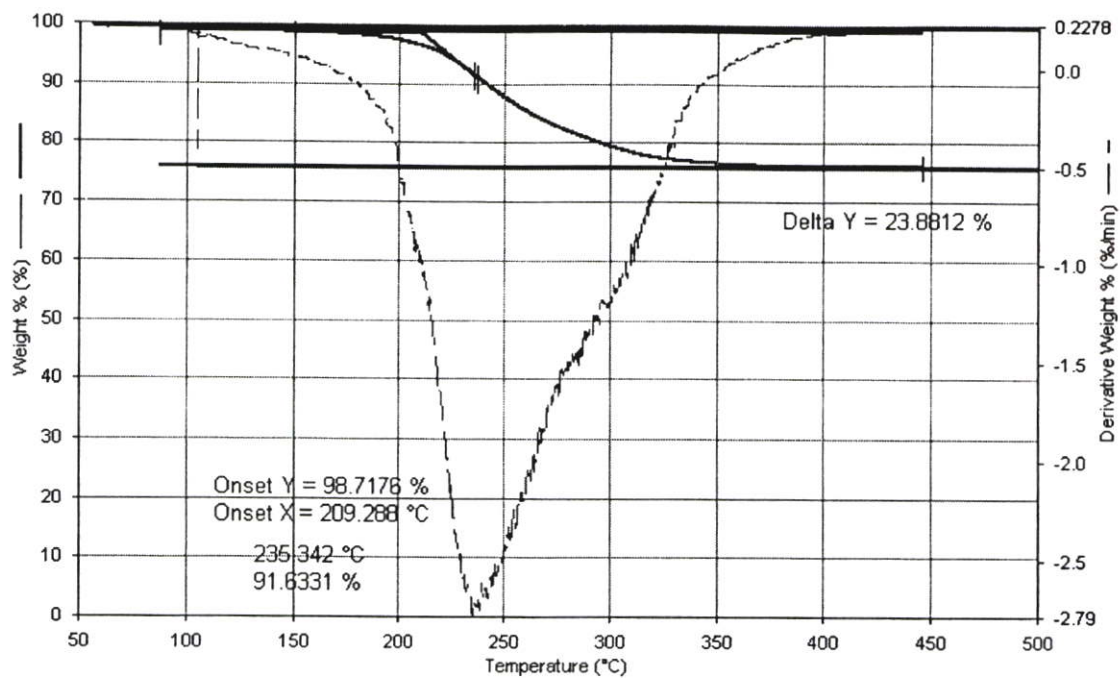
รูปที่ ก-11 DSC thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3-D19



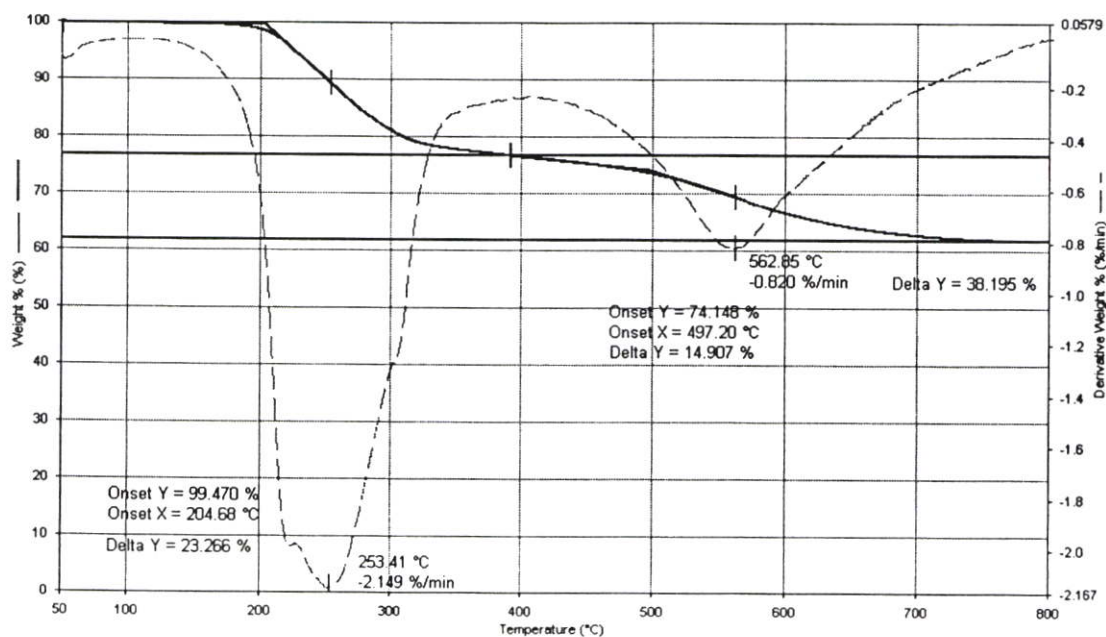
รูปที่ ก-12 TGA thermogram ของฟิล์ม PP ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน



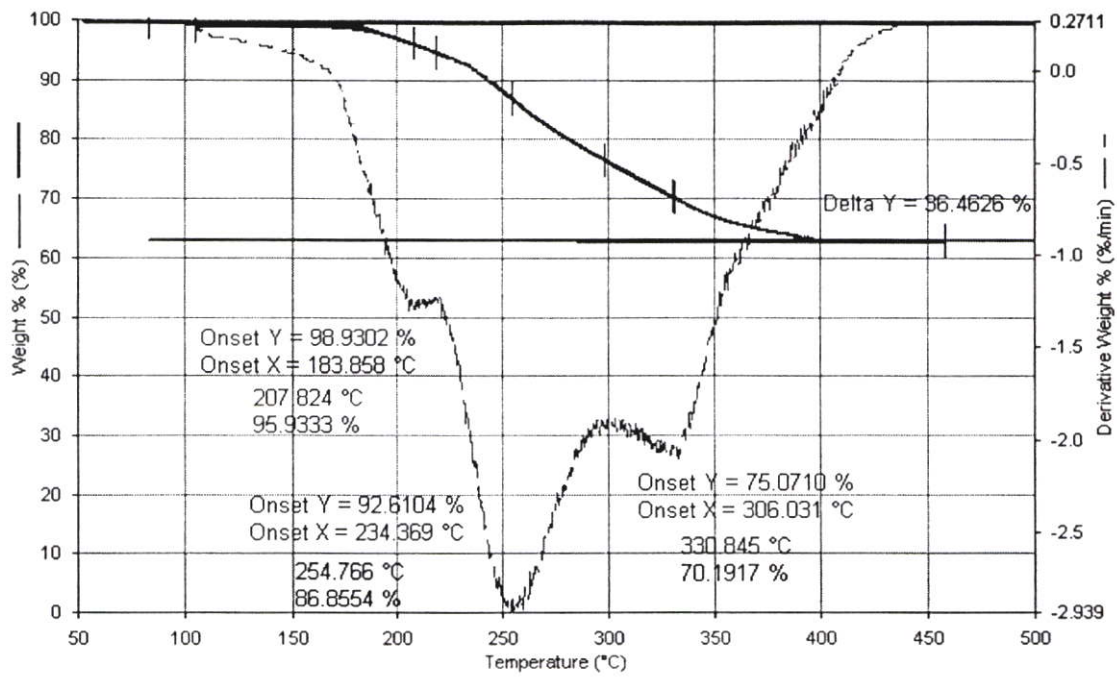
รูปที่ ก-13 TGA thermogram ของฟิล์ม PP ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



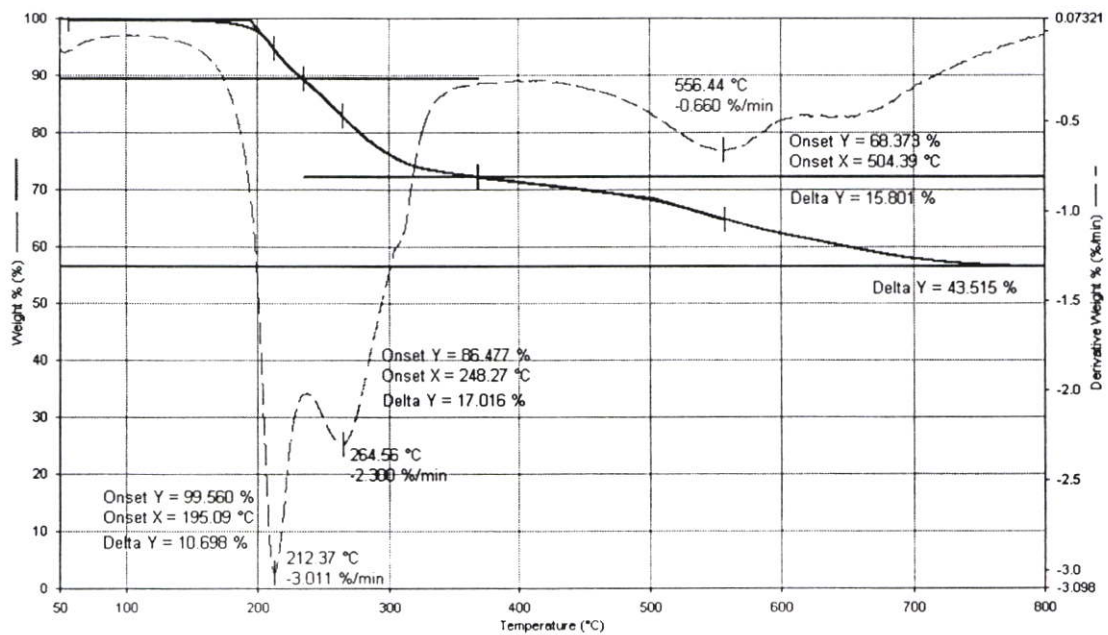
รูปที่ ก-14 TGA thermogram ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite® 20A ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน



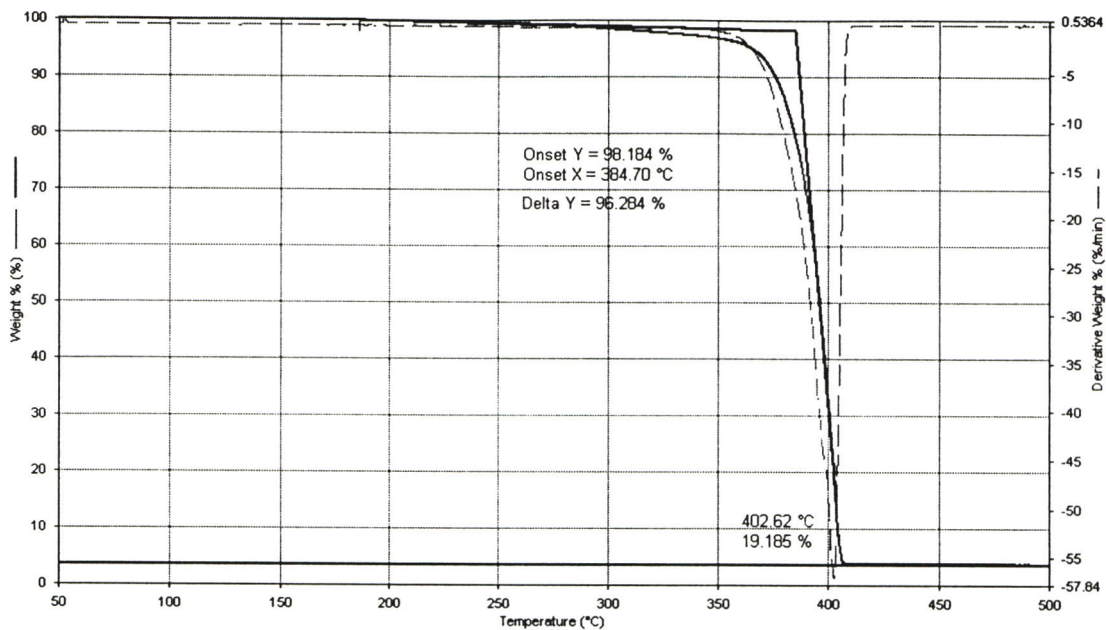
รูปที่ ก-15 TGA thermogram ของออร์กาโนเคลย์เกรด Cloisite® 20A ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



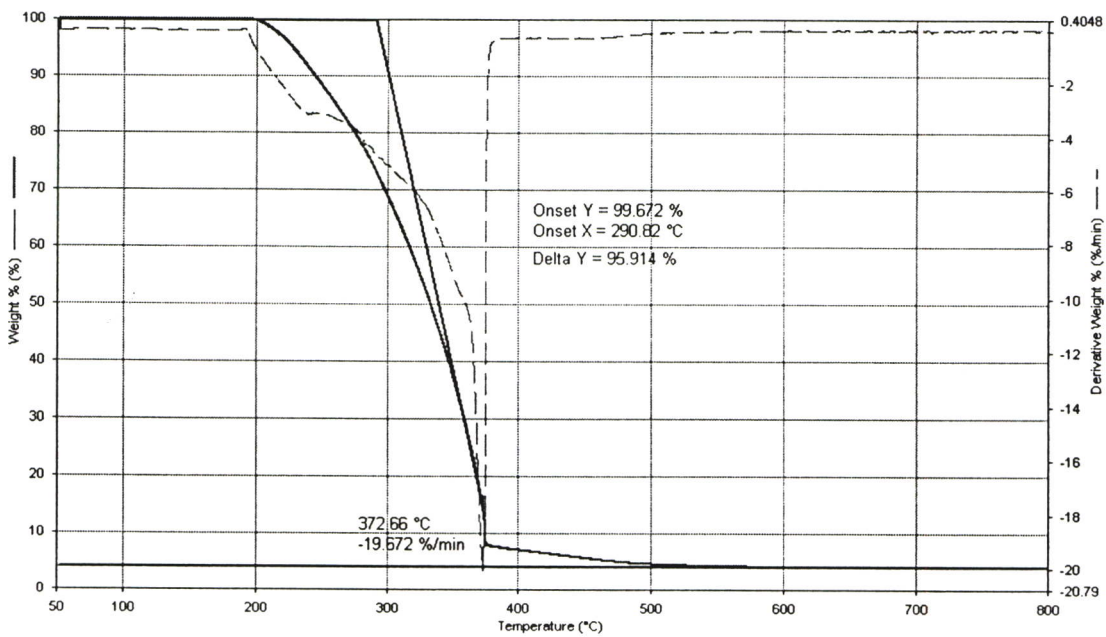
รูปที่ ก-16 TGA thermogram ของออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน



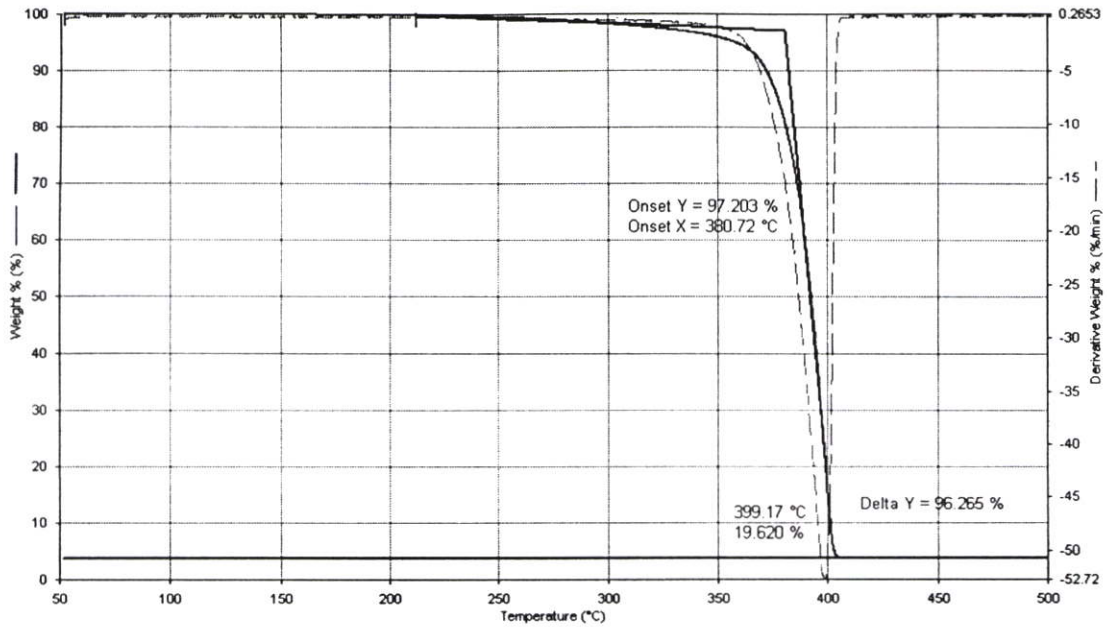
รูปที่ ก-16 TGA thermogram ของออร์กาโนเคลย์เกรด Claytone[®] HY ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



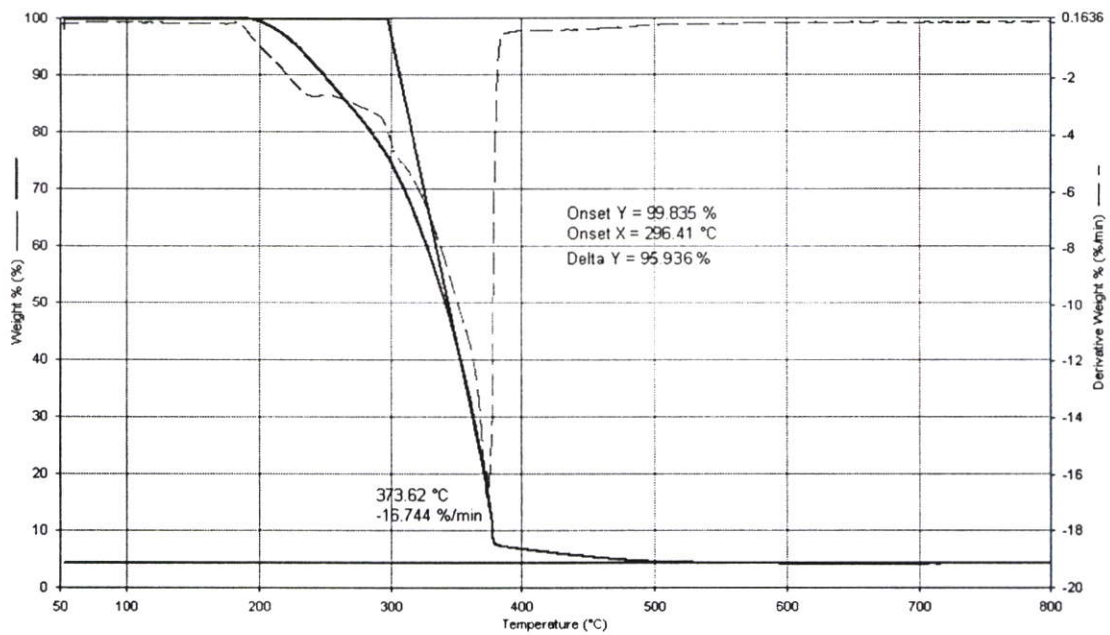
รูปที่ ก-17 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน



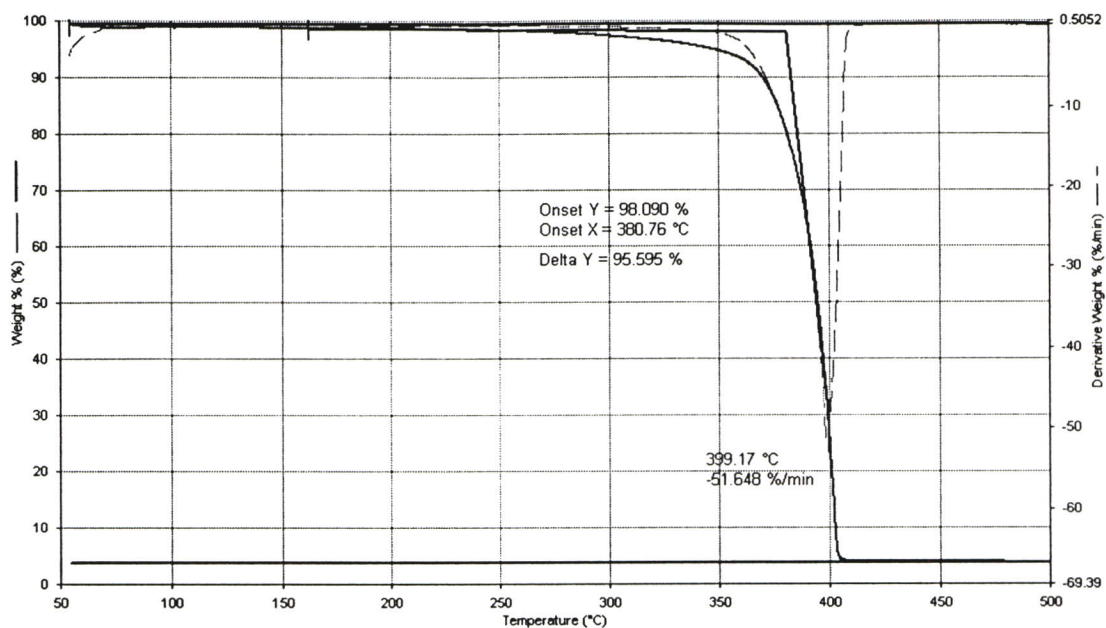
รูปที่ ก-18 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



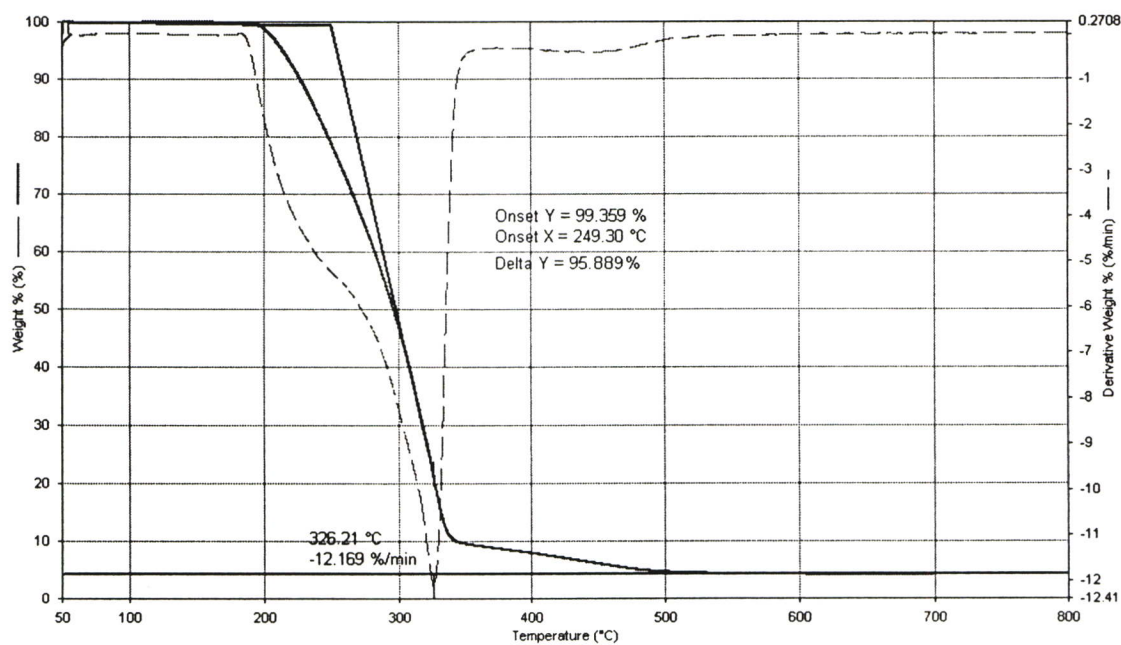
รูปที่ ก-19 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน



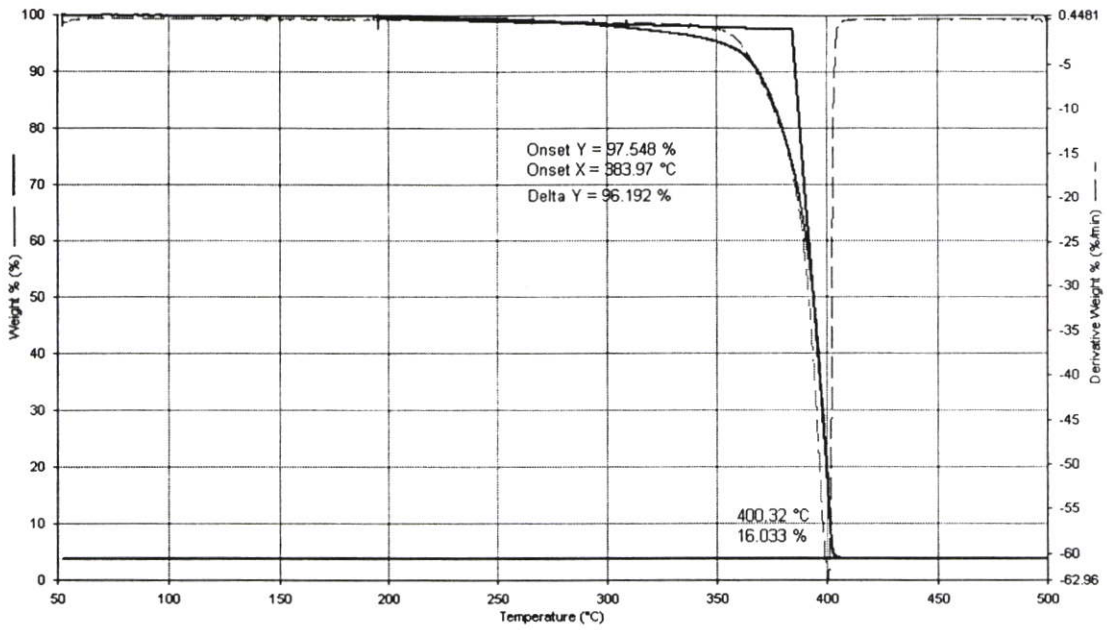
รูปที่ ก-20 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A6 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



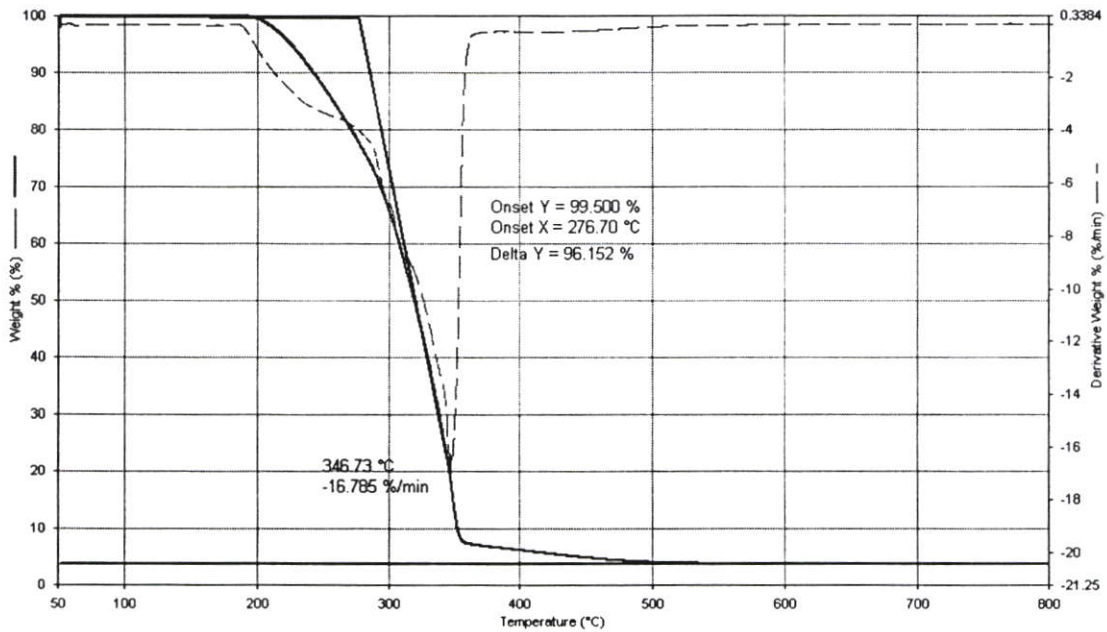
รูปที่ ก-21 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P01-20A6 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน



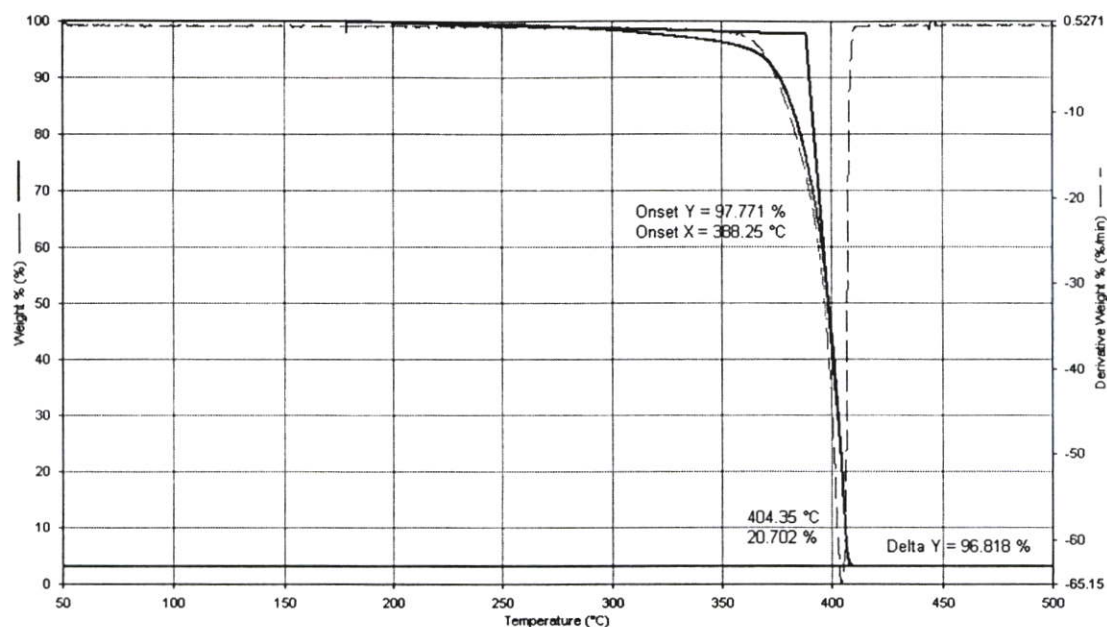
รูปที่ ก-22 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P01-20A6 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



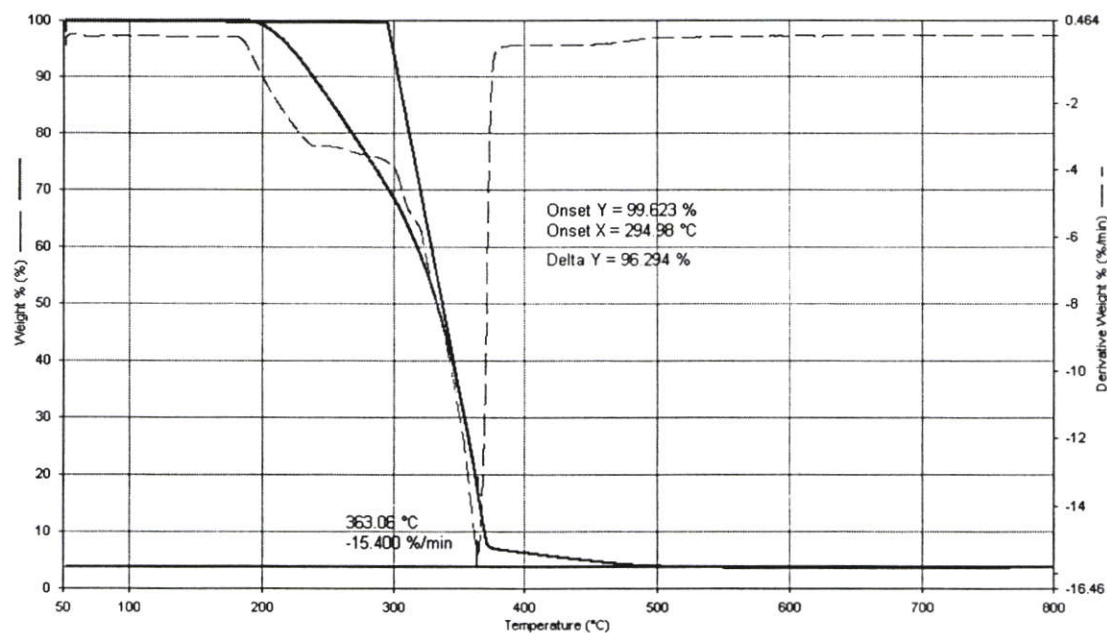
รูปที่ ก-23 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P02-20A6 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน



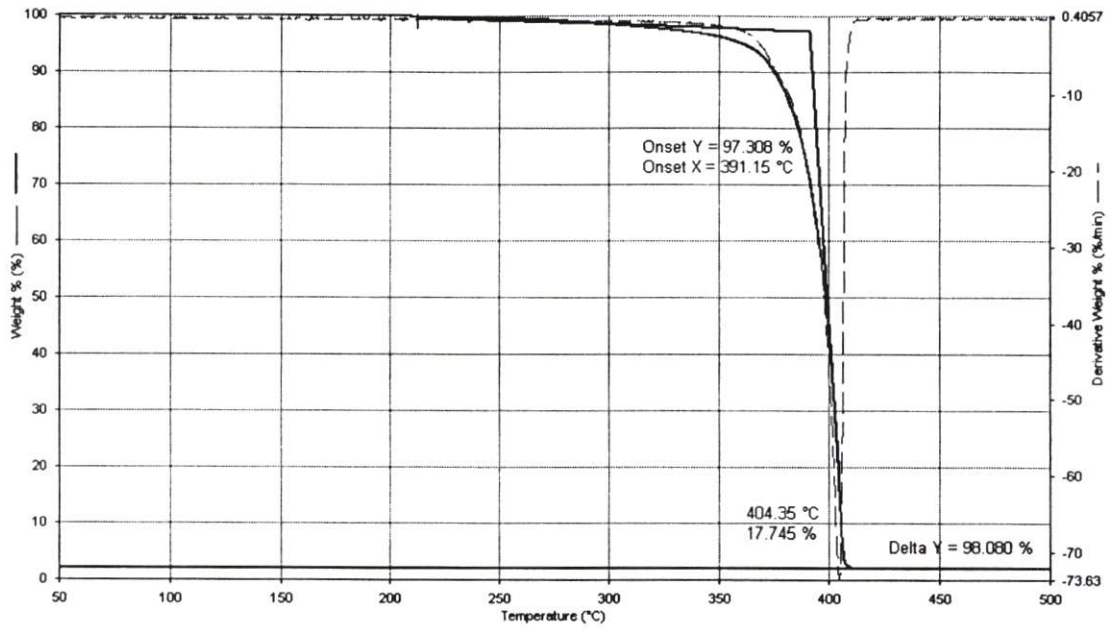
รูปที่ ก-24 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P02-20A6 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



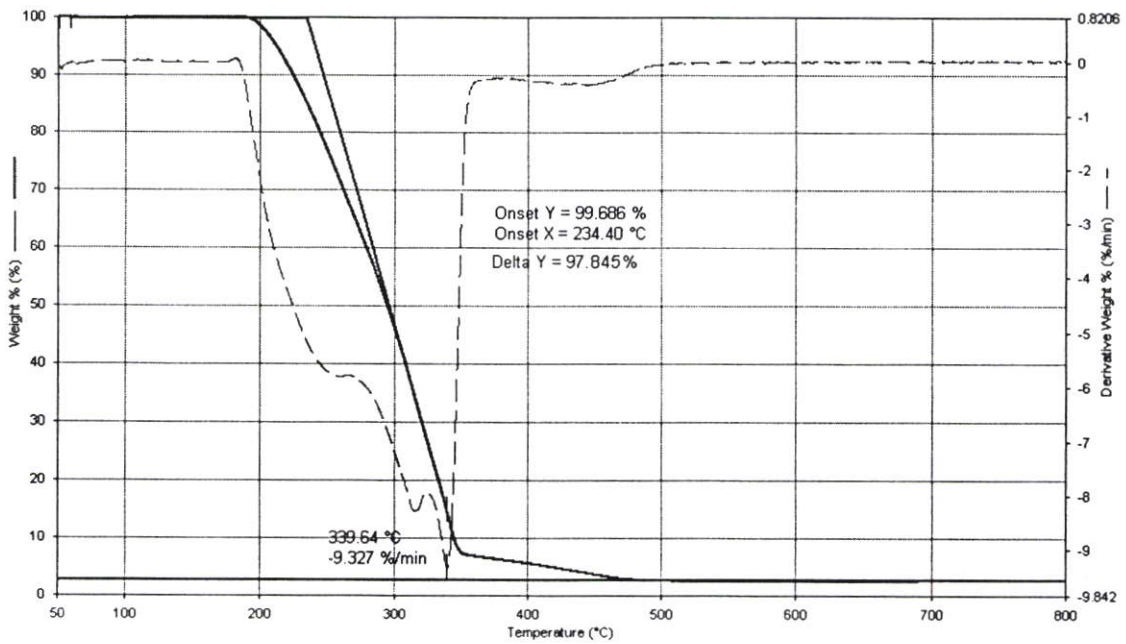
รูปที่ ก-25 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน



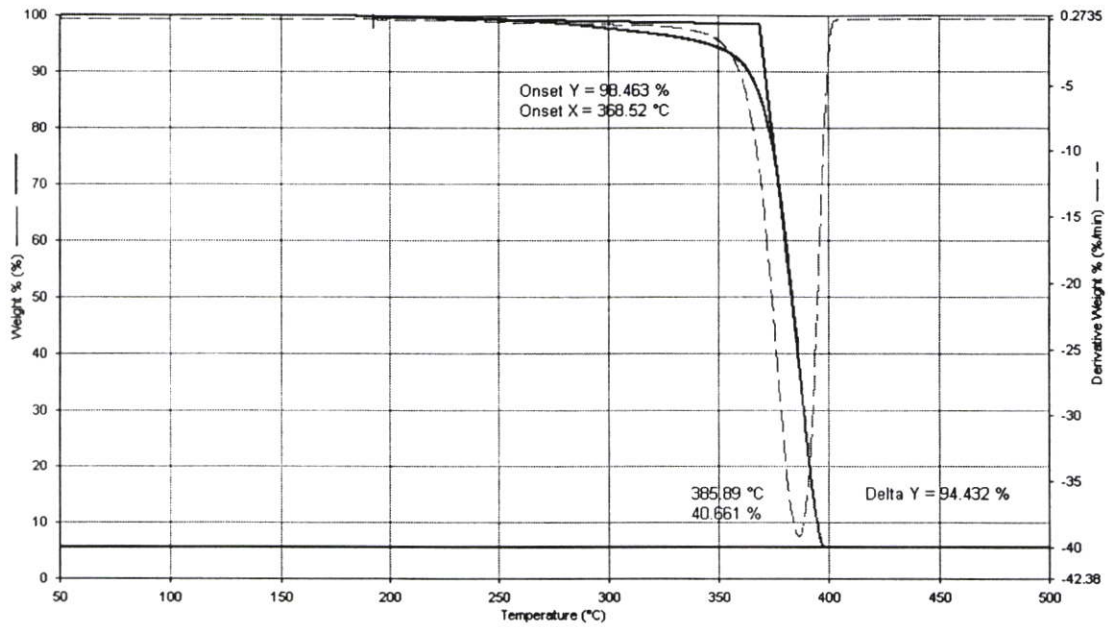
รูปที่ ก-26 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-HY6 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



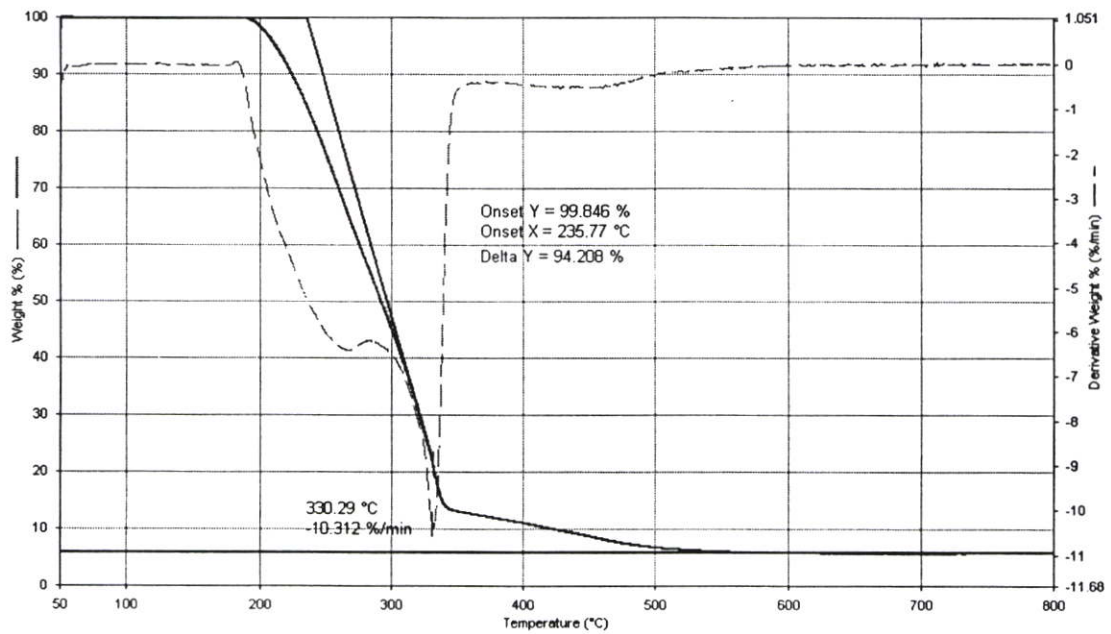
รูปที่ ก-27 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 หรือ P95-20A3-D42
ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน



รูปที่ ก-28 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A3 หรือ P95-20A3-D42
ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน



รูปที่ ก-29 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A9 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน



รูปที่ ก-30 TGA thermogram ของฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P95-20A9 ภายใต้สภาวะบรรยากาศของออกซิเจน

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาปริมาณออร์กาโนเคลย์

การคำนวณหาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนโดยวิธีศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA

$$\text{ปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอน} = \frac{[(\text{ปริมาณสารที่เหลือในฟิล์ม PP/m-MMT} - \text{ปริมาณสารที่เหลือในฟิล์ม PP}) \times 100] / \text{ปริมาณออร์กาโนเคลย์บริสุทธิ์ (Cloisite}^{\text{®}} \text{ 20A) ที่เหลือ}}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอนโดยวิธีศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง TGA ในฟิล์ม PP/m-MMT สูตร P93-20A6

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณออร์กาโนเคลย์ที่แน่นอน} &= [(4.086 - 0.473) \times 100] / 61.805 \\ &= 5.85 \text{ wt\%} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค
การทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ข-1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดคราก (% Elongation at yield) และค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength)

สูตร	ทิศทางการทดสอบ	ความแข็งแรงดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดคราก (%)	มอดุลัส (MPa)	ความแข็งแรงฉีกขาด (KN/m)
BOPP	MD	85 ± 15 ^a	49 ± 5	1694 ± 52	312 ± 26
	TD	226 ± 22	26 ± 3	2362 ± 98	467 ± 29
PP	MD	23 ± 1	9 ± 0.6	768 ± 26	228 ± 13
	TD	20 ± 1	5 ± 0.4	710 ± 49	294 ± 24
P93-20A6	MD	35 ± 2	4 ± 0.4	1360 ± 55	184 ± 15
	TD	23 ± 4	3 ± 0.4	1077 ± 90	338 ± 27
P95-20A6	MD	34 ± 2	5 ± 0.3	1304 ± 89	197 ± 20
	TD	24 ± 3	3 ± 0.3	1086 ± 38	343 ± 29
P01-20A6	MD	28 ± 2	5 ± 0.5	1070 ± 94	197 ± 17
	TD	19 ± 4	2 ± 0.5	1008 ± 90	338 ± 27
P02-20A6	MD	31 ± 3	6 ± 0.5	1145 ± 103	184 ± 15
	TD	19 ± 2	2 ± 0.4	1070 ± 43	325 ± 7
P95-HY6	MD	33 ± 2	6 ± 0.6	1208 ± 96	222 ± 28
	TD	24 ± 3	3 ± 0.6	1076 ± 136	355 ± 12
P95-20A3 หรือ P95-20A3-D42	MD	37 ± 2	6 ± 0.5	1491 ± 129	335 ± 26
	TD	27 ± 2	2 ± 0.2	1177 ± 81	474 ± 25
P95-20A9	MD	27 ± 4	4 ± 0.4	1252 ± 48	141 ± 15
	TD	19 ± 3	3 ± 0.2	761 ± 104	178 ± 17

a = ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ ข-2 (ต่อ)

สูตร	ทิศทาง การทดสอบ	ความแข็งแรง ดึง (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การยืด ณ จุดคราก (%)	มอดุลัส (MPa)	ความแข็งแรง ฉีกขาด (KN/m)
P95-20A3-D25	MD	34 ± 4^a	6 ± 0.4	1277 ± 54	277 ± 19
	TD	30 ± 3	5 ± 0.3	1053 ± 50	426 ± 25
P95-20A3-D19	MD	32 ± 2	6 ± 0.5	1189 ± 97	229 ± 15
	TD	27 ± 4	5 ± 0.4	1089 ± 59	397 ± 22

a = ค่าเฉลี่ย \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ภาคผนวก ง

การทดสอบสมบัติการต้านการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน

ตารางที่ ง-1 อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OTR) และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (OP)

สูตร	ความหนาของแผ่นฟิล์ม (mm)	อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (cc/m ² .day)	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (mm.cc/m ² .day)
BOPP	0.020	2368	47
	0.020	2428	49
เฉลี่ย	0.020	2398	48
PP	0.022	5060	111
	0.024	5115	123
เฉลี่ย	0.023	5088	117
P93-20A6	0.028	3214	90
	0.030	2833	85
เฉลี่ย	0.029	3023	88
P95-20A6	0.032	2728	87
	0.028	2757	77
เฉลี่ย	0.030	2743	82
P01-20A6	0.031	2990	93
	0.035	3124	109
เฉลี่ย	0.033	3057	101
P02-20A6	0.028	3250	91
	0.030	3376	101
เฉลี่ย	0.029	3313	96
P95-HY6	0.024	3710	89
	0.028	3887	109
เฉลี่ย	0.026	3799	99

ตารางที่ ง-2 (ต่อ)

สูตร	ความหนาของ แผ่นฟิล์ม (mm)	อัตราการซึมผ่าน ของก๊าซออกซิเจน (cc/m ² .day)	สัมประสิทธิ์การซึม ผ่านของก๊าซ ออกซิเจน (mm.cc/m ² .day)
P95-20A3 หรือ	0.023	3235	74
P95-20A3-D42	0.025	3315	83
เฉลี่ย	0.024	3275	79
P95-20A9	0.036	2615	94
	0.034	2743	93
เฉลี่ย	0.035	2679	94
P95-20A3-D25	0.038	2188	83
	0.042	2112	89
เฉลี่ย	0.040	2150	86
P95-20A3-D19	0.052	1735	90
	0.054	1693	91
เฉลี่ย	0.053	1714	91

ภาคผนวก จ

การคำนวณอัตราส่วนการดึง (Draw ratio)

การคำนวณหาอัตราส่วนการดึง

เมื่อ t_0 คือ ความหนาในตอนเริ่มต้นของฟิล์มพลาสติก

t_a คือ ความหนาเฉลี่ยของฟิล์มพลาสติก

ดังนั้น

อัตราส่วนอัตราส่วนการดึง โดยความหนา (Thickness draw ratio) ; R_t

$$R_a = t_0 / t_a$$

ตารางที่ จ-1 อัตราส่วนการดึง

สูตร	ความหนาเริ่มต้น (mm)	ความหนาเฉลี่ย (mm)	อัตราส่วนการดึง
P95-20A3-D42	1	0.024	42
P95-20A3-D25	1	0.040	25
P95-20A3-D19	1	0.053	19

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณค่าสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) ของอนุภาคซีลีเกต

ฉ-1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Tortuosity factor (τ)

$$\frac{P_s}{P_p} = \frac{(1 - \phi_s)}{\tau}$$

เมื่อ	τ	คือ Tortuosity factor
	P_s	คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์ซีลีเกต นาโนคอมโพสิต
	P_p	คือ ความสามารถในการซึมผ่านของก๊าซในพอลิเมอร์บริสุทธิ์
	Φ	คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของออร์กาโนเคลย์
	ϕ_s	คือ สัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของซีลีเกต มีค่าเท่ากับ $\Phi \times \%$ ของซีลีเกต

ตารางที่ ฉ-1 ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Tortuosity factor (τ)

สูตร	P_s / P_p	ออร์กาโนเคลย์ (wt%)	Φ	ϕ_s	Tortuosity factor
P93-20A6	$88 / 117 = 0.75$	5.85	0.03	0.02	1.31
P95-20A6	$82 / 117 = 0.70$	5.81	0.03	0.02	1.40
P01-20A6	$101 / 117 = 0.86$	5.89	0.03	0.02	1.14
P02-20A6	$96 / 117 = 0.82$	5.46	0.03	0.02	1.20
P95-HY6	$99 / 117 = 0.85$	5.72	0.03	0.02	1.16
P95-20A3	$79 / 117 = 0.68$	2.72	0.01	0.01	1.46
P95-20A9	$94 / 117 = 0.80$	8.61	0.05	0.03	1.22

ฉ-2 ตัวอย่างการคำนวณหาสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ

$$\tau = \frac{d'}{d} = 1 + \left[\frac{L}{2W} \phi_s \right]$$

เมื่อ	τ	คือ Tortuosity factor
	d'	คือ ระยะทางจริงของเส้นทางสำหรับการผ่านเข้าออกของก๊าซ
	d	คือ ระยะทางที่ใกล้ที่สุดของเส้นทางสำหรับการผ่านเข้าออกของก๊าซที่ไม่มีชั้นซิลิเกตกระจายอนุภาคเป็นแผ่นบางกั้นขวางอยู่
	L	คือ ความยาวของอนุภาคซิลิเกต
	W	คือ ความกว้างของอนุภาคซิลิเกต
	ϕ_s	คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของซิลิเกต

ตารางที่ ฉ-2 ตัวอย่างการคำนวณหาสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) ของอนุภาคซิลิเกตในฟิล์ม PP/m-MMT สูตรต่างๆ

สูตร	Tortuosity factor	ϕ_s	Aspect ratio
P93-20A6	1.31	0.02	31
P95-20A6	1.40	0.02	40
P01-20A6	1.14	0.02	14
P02-20A6	1.20	0.02	20
P95-HY6	1.16	0.02	16
P95-20A3	1.46	0.01	92
P95-20A9	1.22	0.03	15

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นางสาวภัทรพร สงวนศักดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	18 เมษายน 2526
ที่อยู่	7/1 หมู่ 5 ต.ท่าทอง อ.เมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2544	วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2544	ผลของชนิดตัวทำละลายต่อสมบัติทางแสงและพฤติกรรมการเข้ามาเกาะ กันของคอนจูเกตพอลิเมอร์ (Influences of Solvent Quality on Optical Properties and Aggregation Behaviors of Conjugated Polymer)