

ผลของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลต่อการเกิดผลึกและความทนแรงกระทำ
ของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

นางสาว อาจารย์ อัสวดีลภฤทธิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF SORBITOL-MODIFIED MONTMORILLONITE ON CRYSTALLIZATION AND
IMPACT STRENGTH OF POLYPROPYLENE NANOCOMPOSITES

Miss Ajaree Ussawadilokrit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science
and Textile Technology Department of Materials Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลต่อการเกิดผลึกและความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต
โดย	นางสาว อาจารย์ อัสวดีลภฤทธิ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. สุจาริณี คชวัฒน์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. สุจาริณี คชวัฒน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ชัยวัฒน์ นรگانต์กร)

5072572923: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : IMPACT STRENGTH / CRYSTALLIZATION / POLYPROPYLENE

NANOCOMPOSITES .

AJAREE USSAWADILOKRIT : EFFECTS OF SORBITOL-MODIFIED
MONTMORILLONITE ON CRYSTALLIZATION AND IMPACT STRENGTH
OF POLYPROPYLENE NANOCOMPOSITES. ADVISOR : ASSOC. PROF.
SAOWAROJ CHUAYJULJIT, CO-ADVISOR : SUJARINEE KOCHAWATTANA,
Ph.D., 62 pp.

The objective of this research is to investigate the effects of sorbitol-modified montmorillonite (MMT) on crystallization behaviors and impact strength of polypropylene (PP) nanocomposites. The modification process included mixing of montmorillonite and sorbitol with the weight ratio of montmorillonite : sorbitol = 1:2 using a high speed mixer. Results from X-ray diffraction indicated that sorbitol were intercalated in between montmorillonite layers along 001 direction. Modified montmorillonite powders at the amounts of 1, 3, 5 and 7 part were mixed with hundred of PP means of melt blending on a two-roll mill and pressed into specimens.

XRD patterns indicated that PP chains could intercalate into the gallery of modified-MMT to form the exfoliated PP nanocomposites. The crystal phase obtained from this process was Alpha. Compared to pure PP, higher amounts and smaller size of spherulites were observed in the nanocomposites. The specimens of PP/modified-MMT nanocomposite with the PP concentration of 1 phr gained the highest impact strength of 3.4, 3.2 and 2.7 kJ/mm² when tested at room temperature, 0°C and -30°C, respectively.

Department : Material Science

Student's Signature

Field of Study : Applied polymer science and textile technology
Advisor's Signature.....

and textile technology

Academic Year 2008

Co-Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้นเป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่สำหรับทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับความช่วยเหลือ และแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคล และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร. สุจาริณี ศษวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหา และแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
3. ดร. ชัยวัฒน์ นรگانต์กร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
4. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษา และงานวิจัย
5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับทำวิทยานิพนธ์
6. คุณสมพงษ์ ชุตติกุลสวัสดิ์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านสารเคมี อุปกรณ์ และเครื่องแก้วที่ใช้ในการทดลอง
7. คุณสมคิด ทองศิลา ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในการขึ้นรูปชิ้นงาน
8. คุณมานพ ติระรัตนสมพจน์ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
9. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์มอดั่มอริลโลไนต์
10. บริษัท เอชเอ็มซี โพลีเมอร์ จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ผงพลาสติกพอลิโพรพิลีน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ และพี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือ และความปรารถนาดีแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP).....	3
2.1.1 โครงสร้างผลึกของพอลิโพรพิลีน.....	5
2.1.1.1 ผลึกแอลฟา.....	6
2.1.1.2 ผลึกบีตา.....	7
2.1.1.3 ผลึกแกมมา.....	8
2.1.1.4 ผลึกสเมกติก.....	8
2.1.2 การเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน.....	10
2.1.3 การใช้งานของพอลิโพรพิลีน.....	12
2.2 แร่ดิน (clay)	13
2.2.1 กลุ่มเกาลินไนต์ (Kaolinite group).....	14
2.2.2 กลุ่มแวลิลไลต์ (Illite group)	15
2.2.3 กลุ่มแวลเวอริมิควไลต์ (vermiculite)	16
2.2.4 กลุ่มแวลสเมคไทต์ (Smectite group)	16
2.2.4.1 มอนต์มอริลไลไนต์ (Montmorillonite).....	18
2.2.4.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดิน.....	22
2.2.4.1.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ (Cation Exchange Capacity : CEC).....	23

	หน้า
2.3 ซอร์บิทอล (sorbitol)	23
2.4 นาโนคอมพอสิต (Nanocomposites)	25
2.4.1 ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต	27
2.4.2 ผลิตรกัณฑ์สำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต.....	27
2.4.3 แนวโน้มการพัฒนานาโนเคลย์ และพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต.....	28
3. การทดลอง.....	30
3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และ เครื่องมือ.....	30
3.1.1 สารเคมี.....	30
3.1.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือ.....	31
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน	32
3.2.1 การดัดแปร มอนต์มอริลโลไนต์ ด้วยซอร์บิทอล.....	32
3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของ MMT และ sorbitol-modified MMT ด้วยเทคนิค XRD.....	33
3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของซอร์บิทอล, MMT และ sorbitol-modified MMT ด้วยเทคนิค FT-IR.....	34
3.2.4 การเตรียมพอลิไพร์ฟิไลนนาโนคอมพอสิต.....	34
3.2.5 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของพอลิไพร์ฟิไลนนาโนคอมพอสิตด้วย เทคนิค XRD	35
3.2.6 ตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิไพร์ฟิไลนนาโนคอมพอสิต ด้วยเทคนิค DSC.....	35
3.2.7 ตรวจสอบลักษณะผลึกของพอลิไพร์ฟิไลนด้วยเทคนิค polarized microscopy (PM).....	36
3.2.8 การตรวจสอบสัญญาณวิทยาของพอลิไพร์ฟิไลนนาโนคอมพอสิตด้วย เทคนิค SEM.....	37
3.2.9 ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่อง Charpy impact tester	37
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	38
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของซอร์บิทอล, มอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ ดัดแปรด้วยเทคนิค FT-IR.....	38

4.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์, มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร และพอลิไพร์ฟิไลนนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค XRD.....	39
4.3 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน และปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นของ พอลิไพร์ฟิไลน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ด้วย เทคนิค DSC.....	42
4.4 การตรวจสอบลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นของพอลิไพร์ฟิไลน, พอลิไพร์ฟิไลน/ มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิต และพอลิไพร์ฟิไลน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค polarized microscopy.....	44
4.5 การตรวจสอบการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ ดัดแปรในพอลิไพร์ฟิไลนนาโนคอมพอสิต ด้วยเทคนิค SEM.....	49
4.6 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิไพร์ฟิไลน และ พอลิไพร์ฟิไลนนาโนคอมพอสิต	52
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	55
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก.....	59
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	63

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน.....	10
ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมี และ สมบัติทางกายภาพของซอร์บิทอล.....	25
ตารางที่ 3.1 สมบัติทั่วไปของพอลิโพรพิลีน.....	30
ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกแบบแอลฟาของ PP และของ PP โนนานโนคอมพอสิต	42
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของ PP และ PP nanocomposites	43
ตารางที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิ 25°C, 0°C และ (-30)°C ของ PP และ PP nanocomposites	53

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาของกระบวนการเกิดพอลิโพรพิลีน.....	3
รูปที่ 2.2 ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน.....	3
รูปที่ 2.3 โครงสร้างการเรียงตัวแบบซินดิโอแทกติก.....	4
รูปที่ 2.4 โครงสร้างการเรียงตัวแบบอะแทกติก.....	4
รูปที่ 2.5 3/1 helix ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน.....	5
รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก (monoclinic)	6
รูปที่ 2.7 ยูนิตเซลล์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (a) โมโนคลินิก (α -form) (b) เฮกซะโกนัล (β -form) (c) ออร์โธโรมบิก (γ -form)	7
รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal)	7
รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก(orthorhombic).....	8
รูปที่ 2.10 WAXS-pattern ของโครงสร้างผลึกของพอลิโพรพิลีน.....	9
รูปที่ 2.11 ไมโครกราฟของสเฟียร์ลูไลท์ของพอลิโพรพิลีน ที่เติมสารก่อผลึก.....	10
รูปที่ 2.12 สเฟียร์ลูไลท์ของ (a) พอลิโพรพิลีน (b) พอลิโพรพิลีน/5เปอร์เซ็นต์ ซิลิกา นาโนคอมพอสิต.....	11
รูปที่ 2.13 ชั้นของซิลิกาเตตระฮีดรัล (silica tetrahedral).....	13
รูปที่ 2.14 ชั้นของอะลูมินาออกตะฮีดรัล (alumina-octahedral).....	13
รูปที่ 2.15 แบบจำลองโครงสร้างของเคาลินไนต์ (1 : 1).....	14
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของอิลไลต์ (2 : 1).....	15
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของแรสเมคไทต์.....	17
รูปที่ 2.18 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	19
รูปที่ 2.19 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน.....	19
รูปที่ 2.20 ปฏิกริยาแลกเปลี่ยนประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดินกับ ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไอออน.....	20
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์.....	21
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของซอร์บิทอล.....	24
รูปที่ 2.23 การเติมไฮโดรเจนของกลูโคสได้เป็นซอร์บิทอล.....	24
รูปที่ 2.24 การเติมไฮโดรเจนของฟรักโทส ได้ซอร์บิทอลและแมนนิทอล.....	24

รูปที่ 2.25	การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	26
รูปที่ 3.1	เครื่องปั่นผสมชนิดความเร็วสูง (high speed mixer).....	32
รูปที่ 3.2	เครื่อง XRD ของ Bruker รุ่น AXS Model D8 Discover.....	33
รูปที่ 3.3	เครื่อง FT-IR ของ Thermo scientific Nicolet รุ่น 6700 FT-IR.....	34
รูปที่ 3.4	เครื่อง DSC ของ Perkin Elmer รุ่น DSC 7.....	36
รูปที่ 3.5	เครื่อง Polarized microscopy (PM) รุ่น Olympus BH2.....	36
รูปที่ 3.6	เครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM-5410LV.....	37
รูปที่ 3.7	เครื่อง Charpy Impact Tester รุ่น Izod-charpy Codice 10.17020.....	37
รูปที่ 4.1	แสดง FT-IR สเปกตรัมของ (a) ซอร์บิทอล (b) sorbitol-modified MMT และ (c) MMT.....	38
รูปที่ 4.2	XRD pattern ของ (a) MMT และ (b) sorbitol-modified MMT.....	39
รูปที่ 4.3	XRD pattern ของนาโนคอมพอสิต (a) 100 PP/1 modified-MMT (b) 100 PP/3 modified-MMT (c) 100 PP/5 modified-MMT และ (d) 100 PP/7 modified-MMT.....	40
รูปที่ 4.4	XRD pattern ของนาโนคอมพอสิต (a) 100 PP/1 MMT (b) 100 PP/3 MMT (c) 100 PP/5 MMT และ (d) 100 PP/7	40
รูปที่ 4.5	XRD pattern ของ (a) PP และ (b) PP/1 modified-MMT nanocomposite.....	41
รูปที่ 4.6	อุณหภูมิการก่อกวน (T _c) ของ PP ใน (a) PP และ (b) 100 PP/ 1 modified-MMT, (c) 100 PP/3 modified-MMT, (d) 100 PP/5 modified-MMT และ (e) 100 PP/7 modified-MMT nanocomposites.....	42
รูปที่ 4.7	อุณหภูมิการก่อกวน (T _c) ของ PP ใน (a) PP และ (b) 100 PP/1 MMT, (c) 100 PP/3 MMT, (d) 100 PP/5 MMT และ (e) 100 PP/7 MMT Nanocomposites.....	43
รูปที่ 4.8	ลักษณะสเปกตรัมของ PP บริสุทธิ์.....	44
รูปที่ 4.9	ลักษณะสเปกตรัมของ 100 PP/1 modified-MMT nanocomposite	45
รูปที่ 4.10	ลักษณะสเปกตรัมของ 100 PP/3 modified-MMT nanocomposite	45
รูปที่ 4.11	ลักษณะสเปกตรัมของ 100 PP/5 modified-MMT nanocomposite.....	46
รูปที่ 4.12	ลักษณะสเปกตรัมของ 100 PP/7 modified-MMT nanocomposite.....	46
รูปที่ 4.13	ลักษณะสเปกตรัมของ 100 PP/1 MMT nanocomposite.....	47

รูปที่ 4.14	ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ100 PP/3 MMT nanocomposite.....	47
รูปที่ 4.15	ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ100 PP/5 MMT nanocomposite.....	48
รูปที่ 4.16	ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ100 PP/7 MMT nanocomposite.....	48
รูปที่ 4.17	ภาพ SEM ของ PP บริสุทธิ์.....	49
รูปที่ 4.18	ภาพ SEM ของ 100 PP/1 modified-MMT nanocomposite.....	49
รูปที่ 4.19	ภาพ SEM ของ100 PP/1 MMT nanocomposite.....	50
รูปที่ 4.20	ภาพ SEM ของ100 PP/3 modified-MMT nanocomposite.....	50
รูปที่ 4.21	ภาพ SEM ของ100 PP/3 MMT nanocomposite.....	50
รูปที่ 4.22	ภาพ SEM ของ100 PP/5 modified-MMT nanocomposite.....	51
รูปที่ 4.23	ภาพ SEM ของ100 PP/5 MMT nanocomposite.....	51
รูปที่ 4.24	ภาพ SEM ของ100 PP/7 modified-MMT nanocomposite.....	51
รูปที่ 4.25	ภาพ SEM ของ100 PP/7 MMT nanocomposite.....	52
รูปที่ 4.26	ความทนแรงกระแทกที่ 25°C, 0°C และ -30°C ของ PP และ PP nanocomposites	53

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการพัฒนาและปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์พลาสติก โดยการใช้สารเสริมแรงอนินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรในปริมาณต่ำ (น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งสมบัติที่ได้รับการปรับปรุงได้แก่ ความแข็งแรง เสถียรภาพทางความร้อน ความทนทานสารเคมี สมบัติการสกัดกั้น และความต้านทานการติดไฟ เป็นต้น ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะเหนือกว่าวัสดุคอมพอสิตดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยไม่มีผลทำให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สารอนินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) ทั้งนี้เนื่องจากมีอยู่ในธรรมชาติเป็นจำนวนมาก ราคาถูก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (700-800 ตารางเมตรต่อกรัม) และมี aspect ratio สูง (10-10000) อย่างไรก็ตาม การที่มอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงไม่สามารถเข้ารวมตัวกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ได้ดี ซึ่งส่งผลทำให้การปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ไม่เป็นไปตามต้องการ ดังนั้น การวิจัยเกี่ยวกับวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตจึงมุ่งไปที่การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารอินทรีย์เพื่อให้เหมาะกับการใช้งาน ซึ่งการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ด้วยสารอินทรีย์อย่างเหมาะสมจะช่วยทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เข้ารวมตัวกับพอลิเมอร์ได้มากขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยซอร์บิทอล (sorbitol) โดยใช้เครื่องปั่นความเร็วสูง (high speed mixer) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (green process) เพราะไม่มีการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ นอกจากนี้ ยังไม่มีน้ำเสียจำนวนมากจากการล้างมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรอีกด้วย

พอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) เป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทหนึ่งที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในสินค้าอุตสาหกรรม และผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคบริโภค เนื่องจากเป็นพลาสติกที่มีราคาถูก มีความทนทานสารเคมีดีเยี่ยม มีความหนาแน่นต่ำ มีความทนแรงดึง และอุณหภูมิหลอมเหลวค่อนข้างสูง อีกทั้งยังเป็นพลาสติกที่สามารถรีไซเคิลได้ อย่างไรก็ตาม ข้อเสียที่สำคัญของพอลิโพรพิลีน คือ มีความทนแรงกระแทกต่ำโดยเฉพาะเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากผลึกของพอลิโพรพิลีนมีขนาดใหญ่ จึงมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะค่อนข้างแข็งเปราะ และไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

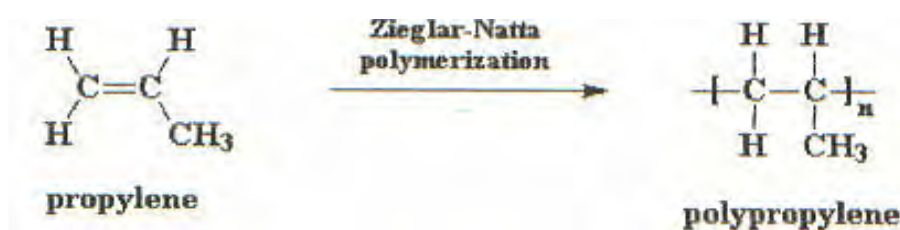
จากงานวิจัยของวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่ผ่านมา พบว่า มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรแล้วนอกจากทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพแล้ว ยังสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ได้ด้วย ซึ่งมีผลทำให้พอลิเมอร์มีปริมาณผลึกเพิ่มขึ้น และผลึกมีขนาดเล็กลง โดยเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) และอัตราการเกิดผลึก (crystallization rate) ของพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลทำให้มีรอบเวลา (cycle time) ในกระบวนการผลิตสั้นลง มีฐานฐานวิทยาที่สม่ำเสมอ เพิ่มความโปร่งใส และยังสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ให้ดียิ่งขึ้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของการใช้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยซอร์บิทอล โดยกระบวนการดัดแปรแบบหลอมเหลวต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน และความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต จากการตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) พฤติกรรมการเกิดผลึกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิทรี (Differential scanning calorimetry, DSC) ฐานฐานวิทยาของผลึกด้วยเทคนิค พอลาไรซ์ไมโครสโกปี (polarized microscopy) การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิค สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโกปี (Scanning electron microscopy, SEM) และทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์

บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

2.1 พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

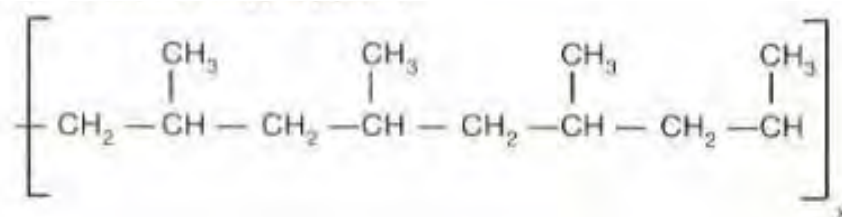
พอลิโพรพิลีนเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทหนึ่งที่ได้เตรียมได้จากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบรวมตัว (addition polymerization) ของโพรพิลีนมอนอเมอร์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาของกระบวนการเกิดพอลิโพรพิลีน [1]

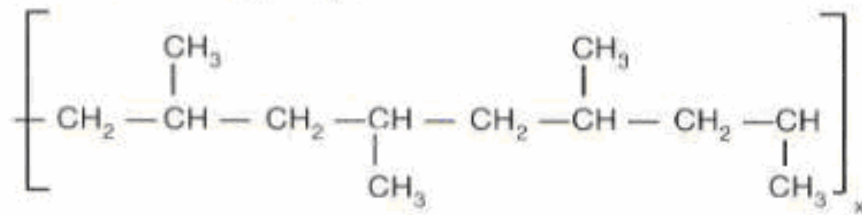
พอลิโพรพิลีนที่ได้มีลักษณะต่างๆ กัน ซึ่งสามารถแบ่งตามการจัดเรียงตัวได้ 3 ประเภท [2]
ดังนี้

1. ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene) โดยหมู่เมทิล (methyl) ที่เกาะอยู่กับสายโซ่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันตลอดทั้งสายโซ่ ทำให้การจัดเรียงตัวแบบนี้มีความเป็นระเบียบมากที่สุด พอลิโพรพิลีนชนิดนี้จึงมีความเป็นผลึก (crystallinity) ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



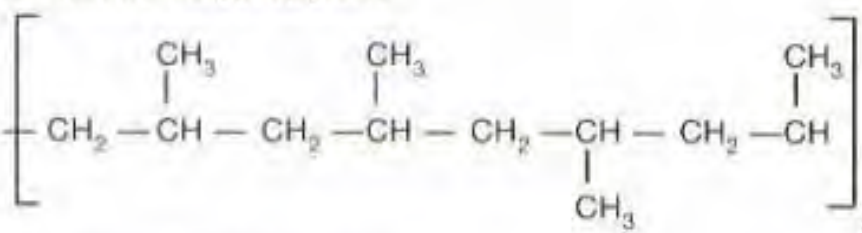
รูปที่ 2.2 ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน [2]

2. ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (Syndiotactic polypropylene) โดยหมู่เมทิลที่เกาะอยู่กับสายโซ่จะสลับกันอยู่คนละข้างของสายโซ่พอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน [2]

3. อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (Atactic polypropylene) โดยหมู่เมทิล (methyl) ที่เกาะอยู่กับสายโซ่จะไม่เฉพาะเจาะจงอยู่ข้างใดข้างหนึ่ง หรือสลับกันทั้งสาย แต่อยู่แบบสุ่มไปตามสายโซ่ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจากการวางตัวของหมู่เมทิลนี้ จะทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีความไม่เป็นระเบียบ และมีความเป็นผลึกน้อย หรือมีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) มากกว่า จึงมีลักษณะคล้ายยางที่ไม่แข็งแรงและไม่เหมาะกับการใช้งาน



รูปที่ 2.4 อะแทกติกพอลิโพรพิลีน [2]

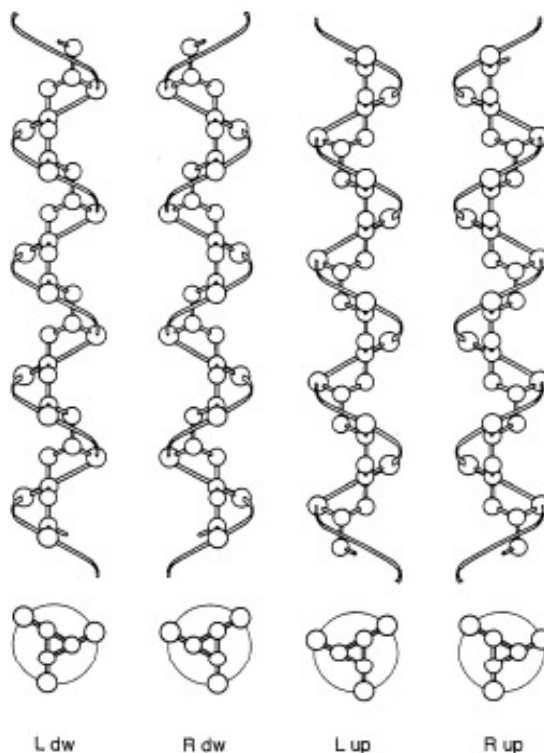
พอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่น 0.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) มีสมบัติที่ดี ได้แก่ มีความทนทานสารเคมีดีเยี่ยม มีความทนแรงดึงสูง มีความทนความร้อนสูง มีจุดหลอมเหลวสูง มีความทนไขมัน และน้ำมันได้ดี เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ข้อเสียที่สำคัญของพอลิโพรพิลีน คือ มีความเปราะที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากผลึกของพอลิโพรพิลีนมีขนาดใหญ่ จึงมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะค่อนข้างแข็งเปราะ และไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ [1-3]

Lehmann และคณะ [4] ได้ทำการปรับปรุงความเหนียวของพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต โดยการผสมพอลิโพรพิลีนกับนาโนซิลิกาที่กราฟต์ด้วยพอลิเอทิลอะคริเลต [poly(ethyl acrylate), PEA] และยางเอทิลีน-โพรพิลีน-ไดอีน (Ethylene-Propylene-Diene Rubber, EPDM) พบว่าการเติมนาโนซิลิกากราฟต์ด้วย PEA นั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น หากแต่การใส่ยาง EPDM ร่วมกับนาโนซิลิกาจะช่วยเสริมให้ความทนแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ยังคงความทนแรงดึงของผลิตภัณฑ์ไว้ได้

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยของ Zhang และคณะ [5] ที่ได้ศึกษาความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนที่เติมด้วยท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) ซึ่งมีความยาว 1-2 ไมโครเมตร และ 5-15 ไมโครเมตร ในปริมาณ 1 phr พบว่าท่อนาโนคาร์บอนที่มียาวมากกว่าจะมีประสิทธิภาพในการเพิ่มความทนแรงกระแทกมากกว่าท่อนาโนคาร์บอนสั้นๆ รวมทั้งการเกิด สเฟียรูไลต์ขนาดเล็กลงจากการเหนี่ยวนำของท่อนาโนคาร์บอน จะมีผลต่อการปรับปรุงความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนด้วย

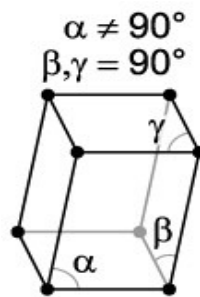
2.1.1 โครงสร้างผลึกของพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semicrystalline) ที่สายโซ่มีความเป็นระเบียบสูง โดยเฉพาะสายโซ่ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ซึ่งมีลักษณะเป็น trans/gauche/trans/gauche (TGTG) conformation ของสายโซ่แบบ 3/1 helix [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และหมู่เมทิลทำให้เกิดการหมุนรอบแกนโมเลกุล (backbone) ได้ 2 แบบ คือ เกลียวขวา (right-handed helices) และ เกลียวซ้าย (left-handed helices) ซึ่งทำให้โครงสร้างผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่เกิดขึ้นมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล 4 แบบ [1-3, 7] คือ

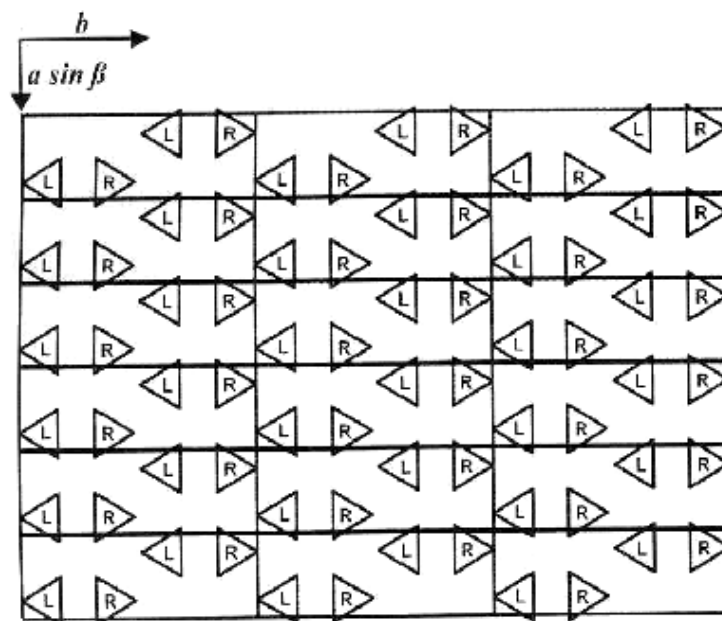


รูปที่ 2.5 แสดง 3/1 helix ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน [1]

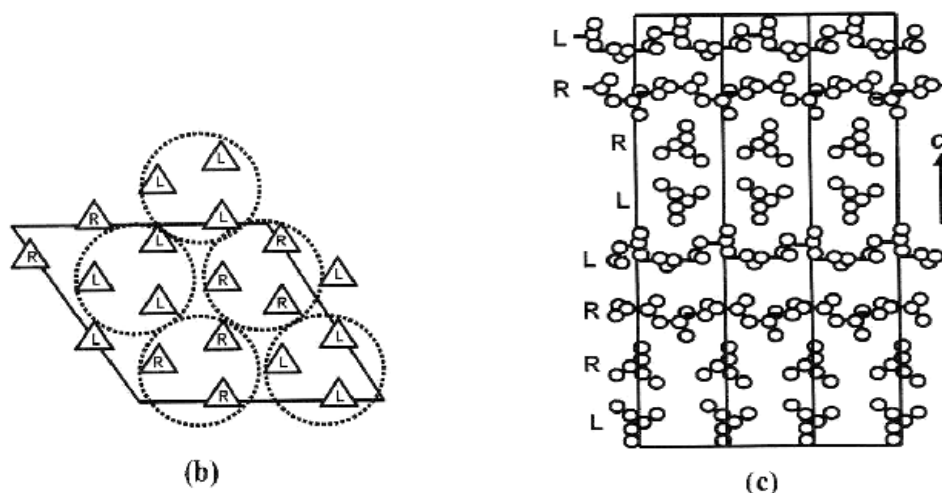
2.1.1.1 **ผลึกแอลฟา (α -form)** ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Natta และคณะ ในปีค.ศ. 1954 เป็นผลึกที่เกิดมากที่สุดจากการเกิดผลึกแบบหลอมเหลวหรือแบบสารละลาย โดยผลึกมีเสถียรภาพมากที่สุด และมีโครงสร้างแบบมอนอคลินิก (monoclinic) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งมีความหนาของยูนิตเซลล์เป็น $20.8 \times 6.6 \times 6.5$ อังสตรอม (\AA) และพับไปมาซ้อนกันเป็นชั้น lamellae ที่มีความหนา 50-200 อังสตรอม (\AA) [6], มีความหนาแน่นของผลึกเท่ากับ 0.936 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) และมีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกสมดุล (equilibrium melting point, T_m) ประมาณ 208 ± 8 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) โดยมีการจัดเรียงสายโซ่พอลิเมอร์ซ้ำ, ขวา อย่างเป็นระเบียบและต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.7(a)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกแบบมอนอคลินิก (monoclinic) [6]

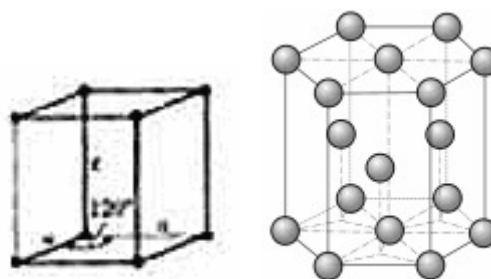


(a)



รูปที่ 2.7 ยูนิทเซลล์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (a) มอนอคลิก (α-form)
(b) เฮกซะโกนัล (β-form) และ (c) ออร์โธโรมบิก (γ-form) [3]

2.1.1.2 **ผลึกบีตา (β-form)** ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Keith และคณะ ในปี ค.ศ.1959-1960 ซึ่งมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ต่างไปจากรูปผลึกแอลฟา โดยผลึกบีตาเป็นผลึกที่ค่อนข้างเสถียร มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งสังเกตพบบางครั้งในระหว่างการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนที่หลอมเหลว หรือในพอลิโพรพิลีนที่ได้เติมสารก่อผลึก (nucleating agent) บางชนิด เช่น *N,N'*-dicyclohexyl naphthalene-2,6-dicarboxamide, pimelic และ calcium stearate โดยผลึกบีตามีความหนาแน่นเท่ากับ 0.921 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) และมีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกสมดุ (T_m) ประมาณ 164 ± 12 องศาเซลเซียส (°C) โดยภายในแต่ละยูนิทเซลล์มีการจัดเรียงสายโซ่พอลิโพรพิลีนหรือวงแหวนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7(b) การเกิดผลึกบีตานี้จะมีสมบัติ elastic modulus และ yield strength ต่ำกว่า แต่มีความทนแรงกระทำ และ breaking strain สูงกว่าผลึกแอลฟา [6]



รูปที่ 2.8 โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal) [6]

การคำนวณอัตราส่วนของปริมาณผลึกปีตาต่อผลึกแอลฟา (K_β) [2, 8] สามารถทำได้โดยการทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค Wide-Angle X-Ray Diffraction (WAXD) แล้วนำมาคำนวณตามสมการ

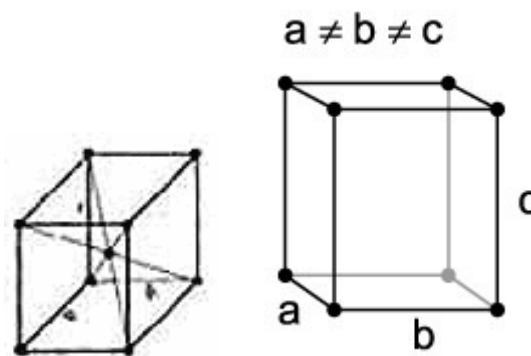
$$K_\beta = H_\beta / [H_\beta + (H_{\alpha_1} + H_{\alpha_2} + H_{\alpha_3})]$$

เมื่อ H_β คือ ความสูงของ β diffraction peak ที่มุม $2\theta = 16.1^\circ$

$H_{\alpha_1}, H_{\alpha_2}, H_{\alpha_3}$ คือ ความสูงของ α diffraction peak ที่มุม $2\theta = 14.1, 16.9$ และ 18.8° ตามลำดับ

ถ้าค่า K เท่ากับ 0 แสดงว่าเป็นผลึกแอลฟาทั้งหมด แต่ถ้าค่า K เท่ากับ 1 แสดงว่าเป็นผลึกปีตาทั้งหมด

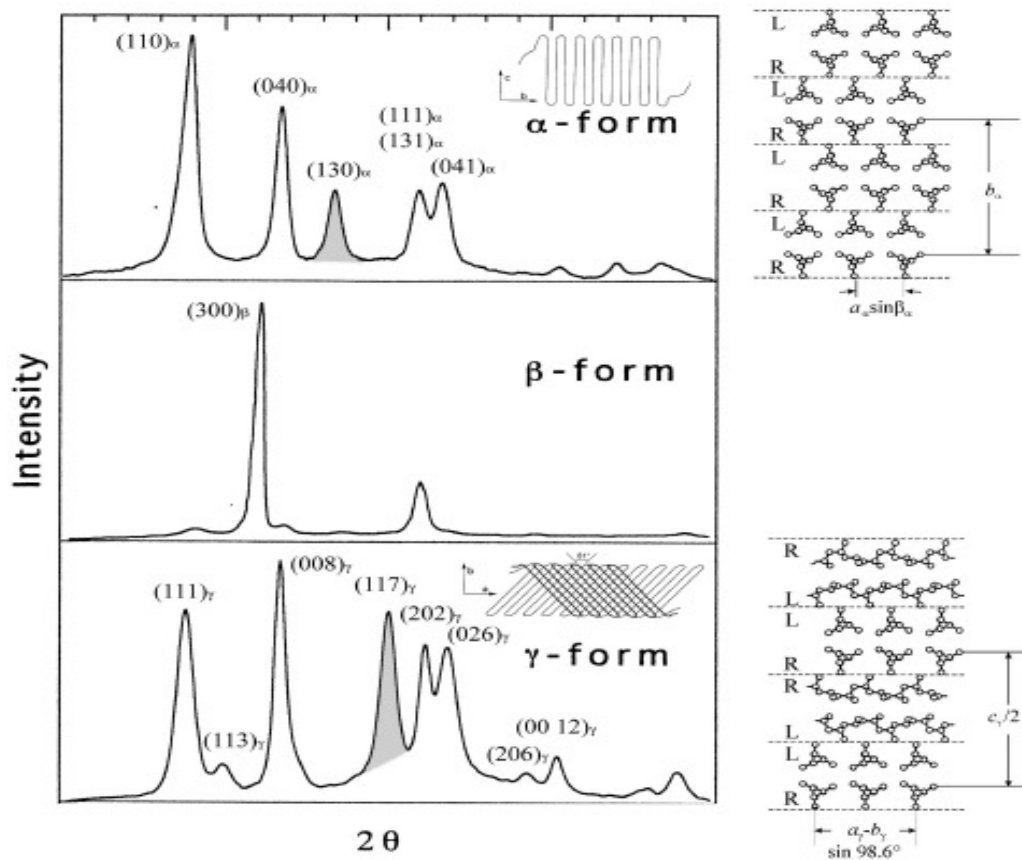
2.1.1.3 ผลึกแกมมา (γ -form) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Addink และ Beintema ในปี ค.ศ.1961 มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก(orthorhombic) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยมีขนาดใกล้เคียงกับผลึกแบบแอลฟา ซึ่งจะเกิดเมื่อใช้ความดันสูง หรือเกิดผลึกในพอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ($\bar{M}_n \sim 6000$) ที่ความดันบรรยากาศ มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.954 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกสมดุค (T_m°) ประมาณ 187°C ภายในยูนิตเซลล์ของผลึกแกมมาจะมีลักษณะคล้ายกับผลึกแอลฟาที่ถูกเขยื้อนไปในแกน a ดังแสดงในรูปที่ 2.7(c)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) [6]

2.1.1.4 ผลึกสเมกติก (Smectic form) ถูกค้นพบโดย Natta และคณะ โดยการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในน้ำแข็ง โดยผลึกนี้เกิดอยู่ระหว่างการเป็นอสัณฐาน (amorphous form) และเป็นผลึก (crystalline form) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบ 3/1 helices

สเฟียรูไลต์ของผลึกทั้ง 3 จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกันดังแสดง
ในรูปที่ 2.10 ซึ่งพีคที่สำคัญของผลึกแต่ละชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.10 WAXS-pattern ของโครงสร้างผลึกของพอลิโพรพิลีน [1]

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน [3]

Crystalline form	Chain conformation	Unit cells (Length: Å)	Major WAXD (Peaks: Å)
α -form (monoclinic)	3/1 helix (TG ⁺ or TG ⁻)	Monoclinic (a = 6.65, b = 20.96, c = 6.50, $\beta = 99.3^\circ$)	6.62 (110) 5.19 (040) 4.77 (130) 4.19 (111)
β -form (hexagonal)	3/1 helix (TG ⁺ or TG ⁻)	Hexagonal (a = 12.74, c = 6.35)	5.53 (200) 4.17 (201)

γ -form (orthorhombic)	3/1 helix (TG ⁺ or TG ⁻)	Orthorhombic (a = 8.54, b = 9.93, c = 42.41)	6.37 (111) 5.29 (008) 4.42 (117) 4.19 (202)
Mesomorph (Smectic)	3/1 helix (TG ⁺ or TG ⁻)	-	5.99 4.19

2.1.2 การเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน

พอลิโพรพิลีนสามารถเกิดผลึกได้ด้วยตัวเอง หรือมีการเติมสารก่อผลึก (nucleating agent) เพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนทั้งทางด้านสมบัติทางแสง สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อน โดยสารก่อผลึกที่เติมลงไปจะต้องมีลักษณะดังนี้ [8, 9]

- สามารถลดพลังงานเสรีระหว่างพื้นผิว กล่าวคือ ดูดซับ พอลิเมอร์ไว้บนพื้นผิวได้ที่จุดหลอมเหลวหรือต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์
- ไม่ละลายในพอลิเมอร์ที่จุดหลอมเหลวหรือต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์
- ควรหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์โดยไม่เกิดการแตกสลาย
- ไม่ระเหย มีความเสถียร และไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เช่น พอลิเมอร์ ออกซิเจน ความชื้น และสารเติมแต่งต่างๆ
- ควรมีโครงสร้างผลึกคล้ายพอลิเมอร์

รูปที่ 2.11 แสดงไมโครกราฟของสเฟียร์ลูไลต์ของพอลิโพรพิลีนที่เติมสารก่อผลึก (sodium 2,2-methylenebis (4,6-di-tert-butylphenyl) phosphate)

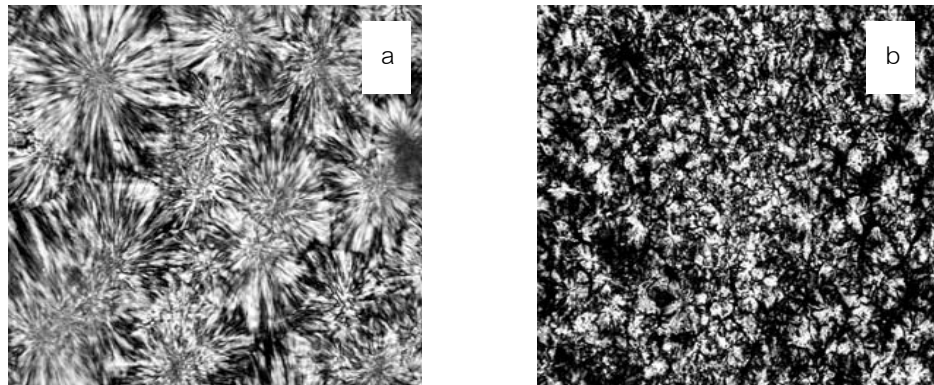


รูปที่ 2.11 ไมโครกราฟของสเฟียร์ลูไลต์ของพอลิโพรพิลีนที่เติมสารก่อผลึก [10]

ข้อดีของการเติมสารก่อผลึกในพอลิโพรพิลีน [8-10]

- ลดขนาดสเฟียรูไลต์ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.12
- เพิ่มความใสให้แก่พอลิเมอร์
- เพิ่มปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น
- เพิ่มสมบัติเชิงกล (ความทนแรงกระแทก ความทนแรงดึง และความแข็งแรง)
- เพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึกให้สูงขึ้น ทำให้สามารถนำชิ้นงานออกจากแม่แบบได้เร็วขึ้น จึงช่วยลดระยะเวลาในกระบวนการผลิตลงด้วย

สารก่อผลึกที่มักนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติของพอลิโพรพิลีนได้แก่ carboxylic acid salts, benzyl sorbitols, salt of organic phosphates และ colorant pigments เป็นต้น



รูปที่ 2.12 สเฟียรูไลต์ของ (a) พอลิโพรพิลีน (b) พอลิโพรพิลีน/5%ซีลีกันานาโนคอมพอสิต [27]

ประสิทธิภาพการเกิดผลึกของพอลิเมอร์ (efficiency of nucleation, E) [8] สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E = \frac{T_{\text{cnuc}} - T_{\text{cpure}}}{T_{\text{cmax}} - T_{\text{cpure}}} \times 100 \%$$

เมื่อ T_{cnuc} = อุณหภูมิการเกิดผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเมื่อเติมสารก่อผลึก

T_{cpure} = อุณหภูมิการเกิดผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์

T_{cmax} = อุณหภูมิการเกิดผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนแบบ self-nucleation ซึ่งมีค่าประมาณ 138.5°C

Romankiewicz และคณะ [8] ได้ศึกษาลักษณะโครงสร้างของผลึกแอลฟา และผลึกบีตาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน โดยใช้ 1,3:2,4-bis(3,4-dimethylbenzylideno) sorbitol (DMDBS) และ *N,N'*-dicyclohexyl-2,6-naphthalenedicarboxy amide (NJ) เป็นสารก่อผลึกพบว่า DMDBS ทำให้เกิดผลึกแอลฟา (α -nucleator) ซึ่งมีประสิทธิภาพการเกิดผลึก 73 เปอร์เซ็นต์ และ NJ ทำให้เกิดผลึกบีตา (β -nucleator) มีประสิทธิภาพการเกิดผลึก 56 เปอร์เซ็นต์ และพบว่า สารก่อผลึกทั้งสองช่วยเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึก เพิ่มปริมาณผลึก ลดขนาดผลึก และลดครึ่งเวลาการเกิดผลึก (crystallization half time) ที่เกิดกับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน และการเกิดผลึกแอลฟาจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางแสง (ความใส) ได้ดีกว่าผลึกบีตา

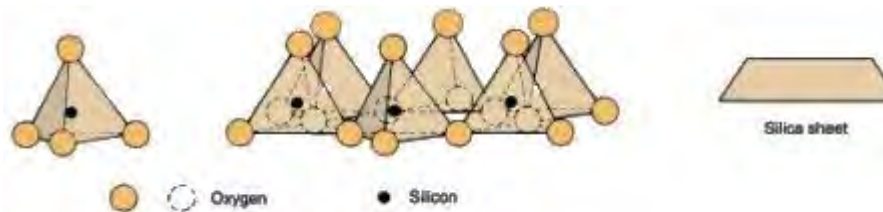
Deshamane และคณะ [11] ศึกษาผลของเคลือบต่อความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต โดยการดัดแปรมอนอเมอร์ลิลโลไนต์ด้วยไดเมทิลไดอัลซิลแอมโมเนียม พบว่า ขนาดของสเฟียรูไลต์และระดับการเกิดผลึกมีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกลเป็นอย่างมาก ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเมื่อสเฟียรูไลต์มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ความเค้นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อสเฟียรูไลต์มีขนาดใหญ่กว่าประมาณ 10 ไมโครเมตร จะทำให้เกิดช่องว่างที่บริเวณขอบของสเฟียรูไลต์ (spherulite boundaries) ที่เกิดจากการหดตัวของสเฟียรูไลต์ขณะเย็นตัว มีผลทำให้ความเค้นมีค่าลดลง และในงานวิจัยนี้ การเสริมแรงพอลิโพรพิลีนด้วยนาโนเคลือบปริมาณ 4 phr มีผลทำให้ความทนแรงกระแทกในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 70 องศาเซลเซียสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีอันตรกิริยาระหว่างพอลิโพรพิลีนและเคลือบที่แข็งแรง และเคลือบแสดงผลของการเป็นสารก่อผลึกได้ดี ซึ่งส่งผลต่อทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล รวมทั้งอุณหภูมิการเกิดผลึก อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน และขนาดของสเฟียรูไลต์

2.1.3 การใช้งานของพอลิโพรพิลีน [12]

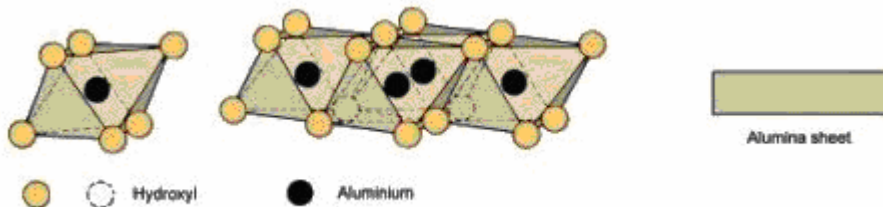
- งานฉีดแบบ (injection molding) ใช้ทำกล่องเบตเตอรี, ถังน้ำมันในรถยนต์, กันชนรถยนต์, ลังใส่ขวด, กระจาดต้นไม้, ของเด็กเล่น, ด้ามแปรงสีฟัน, ฝาจุกพลาสติก, เฟอรินเจอร์, เครื่องใช้ทางการแพทย์ เช่น ครอบกั๊กสายตาที่ใช้ครั้งเดียวทิ้ง เป็นต้น
- งานเป่าฟิล์ม (blown film) ใช้ทำฟิล์มใส, ถุงร้อน, ถุงเย็น, พลาสติกหุ้มของบุหรี, ซองใส่เสื้อยืด ฟิล์มห่ออาหารที่ไม่ต้องการให้ออกซิเจนซึมผ่าน
- งานเป่าแบบ (blown molding) ใช้ทำผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เช่น ขวด, ถัง หรือภาชนะที่ต้องการความทนทานสูง
- งานสิ่งทอ (textile) ใช้ทำเส้นใยกระสอบสาน, เชือกฟาง, แห, อวน และผ้าใบปกป้องพืชสวน เป็นต้น

2.2 แร่ดิน (clay) [13-16]

แร่ดินประกอบด้วยแร่ธาตุหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด โดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบจำพวกไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrous aluminous silicate) มีสมบัติ plasticity เมื่อผสมกับน้ำ และเมื่อนำไปอบแห้งจะเปราะ โดย plasticity ของแร่ดินขึ้นกับธรรมชาติ และความละเอียดของแร่ดิน ถ้าละเอียดมากจะมี plasticity สูง ซึ่งแร่ดินที่นำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์ และนาโนคอมพอสิต เป็นแร่ที่มีจุดเด่น คือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่น (sheet silicate) เรียงซ้อนกันจัดอยู่ในพวกฟิลาซิลิเกต (phyllosilicate) ประกอบด้วยชั้นของซิลิกาเตตระฮีดรัล (silica-tetrahedral) และอะลูมินาออกตะฮีดรัล (alumina-octahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ และในระหว่างชั้นรอยต่อของชุด (interlayer) อาจมีไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม



รูปที่ 2.13 ชั้นของซิลิกาเตตระฮีดรัล (silica tetrahedral) (ที่มา : Mitchell, 1993)



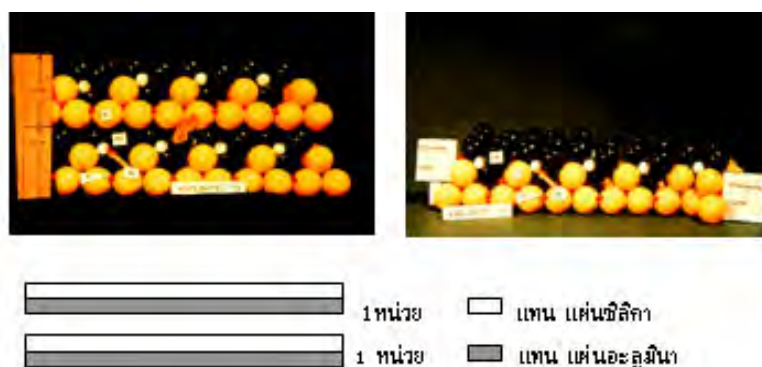
รูปที่ 2.14 ชั้นของอะลูมินาออกตะฮีดรัล (alumina-octahedral) (ที่มา : Mitchell, 1993)

หรือโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ ทำให้มีความยืดหยุ่น และมีความเป็นขี้ผึ้งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม โดยแร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีกหลายแบบขึ้นอยู่กับปริมาณ ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ชนิดโครงสร้างผลึก หรืออัญรูป เป็นต้น กลุ่มแร่ดินที่สำคัญ ได้แก่ อิลไลต์ (illite), เกาลินไนต์ (kaolinite), สเมคไทต์ (smectite) และเวอร์มิคิวไลต์ (vermiculite) ยกเว้นแอตตาปุลไกต์ (attapulgite) หรือรู้จักในนาม ปาลีเกอร์สไกต์ (palygorskite) มีโครงสร้างต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ (chain silicate) แร่ดินในธรรมชาติสามารถแบ่งแยกตามโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

2.2.1 กลุ่มเกาลินไนต์ (Kaolinite group)

สูตรเคมีทั่วไป คือ $2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 1:1 ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรอล 1 ชั้น จับยึดกับแผ่นอะลูมินาออกตะฮีดรอล 1 ชั้น และวางซ้อนกันขึ้นไปตามแนวแกน c และแต่ละแผ่นของอะลูมินาออกตะฮีดรอล และซิลิกาเตตระฮีดรอลจับยึดต่อเนื่องไปตามแนวนอนที่เรียกว่าแกน a และ b เกาลินไนต์มีรูปผลึกแบบไตรคลินิก (triclinic) แร่ในกลุ่มนี้ได้แก่ เกาลินไนต์ (kaolinite), ดิกไกด์ (dickite), นาโคริต (nacrite), แฮลลอยไซต์ (halloysite) และแอลโลเฟน (allophane) โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้คือ

- ไม่มีการแทนที่ของธาตุภายในโครงสร้างหรือมีน้อยมาก ซึ่งเป็นผลทำให้มีประจุถาวรต่ำ (low permanent charge)
- ผลึกแต่ละหน่วย (crystal unit) ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างชั้น (inter-layer) มีผลทำให้แร่ดินเหนียวซิลิเกตมีการบวมตัวและหดตัว (swelling and shrinking) น้อยมาก
- ขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับแร่ดินเหนียวชนิดอื่น เนื่องจากว่ามีหน่วยที่ยึดซ้อนกันค่อนข้างมาก ทำให้แร่ดินเหนียวกลุ่มนี้มีขนาด 0.1-5.0 ไมครอน แต่ส่วนใหญ่มีขนาด 0.2- 2.0 ไมครอน เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่จึงทำให้มีพื้นที่ผิวภายนอก (external surface) น้อย และพื้นที่ผิวภายใน (internal surface) มีน้อยมากหรือไม่มีเลย
- มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity : CEC) ต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยและมีประจุลบในผลึกน้อยมาก CEC มีค่า 3–15 มิลลิลิสมมูลย์ (Milliequivalent, meq)/100 กรัม



รูปที่ 2.15 แบบจำลองโครงสร้างของเกาลินไนต์ (1 : 1) (ที่มา :The University of Minnesona, 2000)

2.2.2 กลุ่มแร่อิลไลต์ (Illite group)

มีสูตรเคมีทั่วไปดังนี้ คือ $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ เป็นแร่ดินเหนียวที่พบมากในหินตะกอน และในสภาพที่มีการตกตะกอนต่างๆ มีลักษณะโดยทั่วไปคล้ายกับแร่มัสโคไวต์ แร่นี้บางที่เรียกว่า ไมกา (mica) และจะคงสภาพอยู่ได้ดี ถ้ามีความเข้มข้นของซิลิกอนและอะลูมิเนียมปานกลางถึงสูง ในสภาพแวดล้อมที่เกิด แต่ถ้ามีพวกไฮโดรเนียมไอออนปานกลางถึงสูงจะทำให้เสียเสถียรภาพ และเปลี่ยนเป็นเวอร์มิคิวไลต์ โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

- ประมาณ 15–25 เปอร์เซ็นต์ ของ Si^{+4} ในชั้นเตตระฮีดรัลจะถูกแทนที่ด้วย Al^{+3} จึงทำให้เกิดประจุลบที่ถาวร (permanent negative charge) ปริมาณมากในชั้นเตตระฮีดรัล
- ประจุลบที่เกิดในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกตจะถูกทำให้สมดุลด้วย K^+ ที่มีขนาดพอเหมาะ กับช่องว่างนั้น
- มีแรงดึงดูดสูงสุดตามกฎของ Coulomb ที่เกิดขึ้นระหว่างประจุลบในชั้นเตตระฮีดรัล และ K^+ ที่อยู่ใกล้กัน
- เป็นพวกที่ไม่สามารถขยายตัวได้ เนื่องจาก K^+ เปรียบเสมือนสลักทำหน้าที่ยึดหน่วยผลึก แต่ละหน่วยไว้ด้วยกันค่อนข้างแน่น ซึ่งมีผลทำให้ไม่สามารถยึดเข้าหรือออกได้
- K^+ ไม่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ (unexchangeable) หรือเป็นพวกที่ถูกตรึงไว้ให้อยู่กับที่เท่านั้น (K-fixation)
- มีการบวมตัวและหดตัว พื้นที่ผิวภายในและภายนอก และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกค่อนข้างต่ำ แต่มากกว่าแร่ดินเหนียวกาโอลินไนท์ [CEC ประมาณ 15–40 มิลลิวาลูม (meq)/100 กรัม]



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของอิลไลต์ (2 : 1) (ที่มา :The University of Minnesona, 2000)

2.2.3 กลุ่มแร่เวอร์มิคิวไลต์ (vermiculite)

มีสูตรเคมี คือ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot XH_2O$ เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มไมกา ซึ่งเกิดขึ้นคลุมรูปร่างของแร่ฟลโกไฟต์ และไบโอไทต์ และมักมีการแทนที่ซิลิกอนด้วยอะลูมิเนียม ประจุที่ขาดไปทำให้เกิดการแทนที่ Mg ด้วย Fe^{3+} และไอออนที่ถูกดูดซับได้ เวอร์มิคิวไลต์แสดงลักษณะหลายอย่างคล้ายมอนต์มอริลโลไนต์ เช่น การแลกเปลี่ยนไอออนบวก และช่องว่างระหว่างชั้น ซึ่งแปรผันไปตามปริมาณของน้ำที่เป็นองค์ประกอบและชนิดของไอออนบวกที่ถูกดูดซับไว้

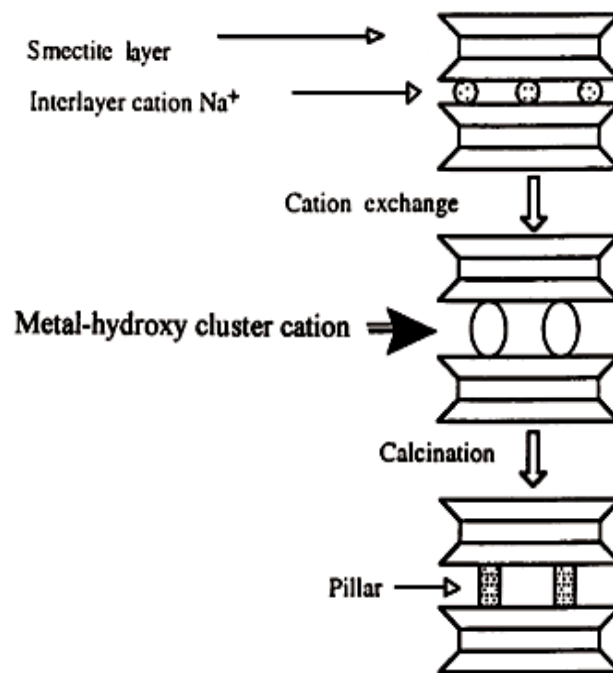
ลักษณะพิเศษเฉพาะตัวของเวอร์มิคิวไลต์ คือ สามารถขยายตัวขนานกับแกน c เพิ่มขึ้นได้ถึง 30 เท่า ของปริมาณเดิม เมื่อทำให้น้ำร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงช่วงอุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส ผลจากการขยายตัวนี้ทำให้นำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน พบมากในการสลายตัวของฟลโกไฟต์ และไบโอไทต์ และพบในดินบางชนิดโดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

- ประจุลบที่เกิดขึ้นในชั้นเตตระฮีดรัลบางส่วนถูกทำให้สมดุลด้วยประจุบวกซึ่งเกิดขึ้นในชั้นออกตะฮีดรัล อันเนื่องมาจากมี Al^{+3} และ Fe^{+3} มากเกินไป
- ประจุลบสุทธิ (net negative charges) ถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนบวกของ Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกต โดย Mg^{+2} และ Ca^{+2} จะมีน้ำล้อมรอบอยู่ด้วยจึงมีขนาดใหญ่กว่า K^+ ซึ่งมีขนาดใหญ่ไม่พอเหมาะกับช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกตที่ซ้อนกันอยู่
- Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกตนี้จะเป็นประจุบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้
- เนื่องจากประจุลบสุทธิมีค่อนข้างสูง ซึ่งมีผลทำให้แรงดึงดูดที่ยึดระหว่างหน่วยของผลึกกับไอออนบวกของ Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกตมีพอประมาณ ทำให้มีการขยายและหดตัวได้ไม่เต็มที่แล้วแต่ปริมาณของความชื้น
- มีพื้นที่ผิวภายนอกและภายในตลอดจน CEC ค่อนข้างสูง (100-150 meq/100 g)

2.2.3 กลุ่มแร่สเมคไทต์ (Smectite group)

มีสูตรเคมี คือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ โดย M คือ แคตไอออน (cation) ที่มีส่วนประกอบที่สำคัญของหินชั้น (sedimentary rock) และทราย (soils) เป็นกลุ่มของแร่ดินที่สามารถแสดงการขยายตัว (expandability) เมื่อใส่น้ำหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้าง และมีสมบัติแลกเปลี่ยนไอออนบวก แร่ในกลุ่มนี้ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) บีเดลไลต์ (beidellite) และนอนโทรไนต์ (nontronite) แร่พวกนี้มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 2:1 สามารถใช้ในอุตสาหกรรมอิฐ (brick) เซรามิก (ceramic) และใช้ทำโคลนเจาะ (drilling mud) มีลักษณะแปรผัน

ไปได้มาก เพราะองค์ประกอบแปรผันได้ โดยเฉพาะน้ำ แม้แต่ค่าดัชนีหักเหของแสงยังเปลี่ยนแปลงได้ในพิสัย 1.50-1.64 แร่กลุ่มนี้มีการแทนที่ของอะตอมมาก องค์ประกอบของแร่แปรผันออกไปจากสูตรเคมี มีการแทนที่อะลูมิเนียมโดยแมกนีเซียม และแทนที่ซิลิกอนโดยอะลูมิเนียม ซึ่งทำให้เกิดประจุลบบนชั้นโครงสร้าง ทำให้สามารถดูดซับไอออนบวก เช่น Ca^{2+} , Na^+ และ H_3O^+ ไว้ระหว่างชั้นในโครงสร้างได้ ทำให้แร่ชนิดนี้สามารถพองตัวเมื่อถูกน้ำและแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ ปกติมอนต์มอริลโลไนต์จะเป็นแร่ที่มีอะลูมิเนียมสูง และมีแร่ที่อยู่ในกลุ่มนี้ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่มีองค์ประกอบแตกต่างกันไปบ้าง คือ นอนโทรไนต์ ซึ่งมีสีเหลืองแกมเขียว มีเหล็กมาก เพราะมีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยเหล็ก ซาโฟไนต์มีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยแมกนีเซียม ซอโคไนต์มีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยสังกะสี และบีเดลไลต์มีการแทนที่ซิลิกอนด้วยอะลูมิเนียม ถ้าถูกน้ำแล้วจะลื่นมือเหมือนสบู่ และทำให้เกิดลักษณะเหมือนวุ้นเมื่อแช่น้ำ



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของแร่สเมคไทต์ (ที่มา : Moore และ Reynolds, 1997)

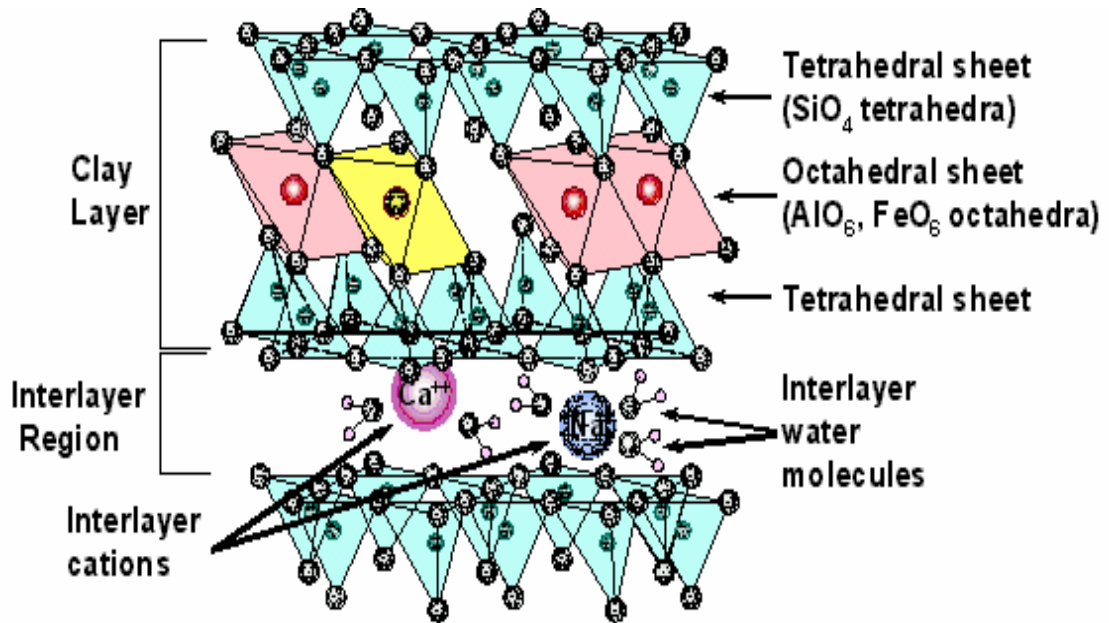
การดุลประจุ (charge balance) เกิดขึ้นจากการแทนที่ของไอออนในชั้นออกตะฮีดรอน (Al หรือ Mg) และชั้นเตตระฮีดรัล โดยส่วนมากใช้ Ca หรือ Na เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ ผลรวมระหว่างความหนาของชั้นดิน และพื้นที่บริเวณระหว่างชั้นของดินแต่ละชุดจะมีความกว้างของช่องว่างเท่าๆ กัน ซึ่งคำนวณจากระนาบ 001 โดยดูได้จากเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction) ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (d -spacing) ของ silica-alumina-silica 1 ชุดของดิน

ไฮเดียม-มอนต์มอริลโลไนต์จะมีค่าตั้งแต่ 9.6-20 อังสตรอม สำหรับดินที่กระจายตัวในน้ำ ตำแหน่งที่มีประจุบวกหรือโมเลกุลของน้ำอยู่จะเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

- ประจุลบเกิดขึ้นน้อยมากในชั้นเตตระฮีดรัล ส่วนใหญ่เกิดในชั้นออกตะฮีดรัล (บางส่วนของ Al^{+3} ถูกแทนที่ด้วย Mg^{+2})
- ประจุลบที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีปริมาณน้อยกว่าในเวอร์มิคิลไลต์ และอิลไลต์
- ประจุลบที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นซิลิเกตจะถูกทำให้สมดุลด้วย Mg^{+2} และ Ca^{+2} ซึ่งมีน้ำล้อมรอบในช่องคล้ายคลึงกับเวอร์มิคิลไลต์
- แรงแดึงดูระหว่างผลึกแต่ละหน่วยกับ Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกตจะค่อนข้างอ่อน จึงทำให้มีการยืดและหดตัวของดินเหนียวเกิดขึ้น โดยการยืด และหดตัวจะขึ้นกับปริมาณความชื้นที่ได้รับ
- ไอออนบวกของ Mg^{+2} และ Ca^{+2} ในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกตเป็นพวกที่สามารถแลกเปลี่ยนได้
- เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก (0.01–1.0 ไมครอน) มีการสลายตัวหรือแตกหักเป็นอนุภาคขนาดเล็กได้ง่าย จึงทำให้มีพื้นที่ผิวทั้งภายในและภายนอกสูง และมี CEC ค่อนข้างสูง ประมาณ 80–100 มิลลิสมมูลย์ (meq)/100 กรัม

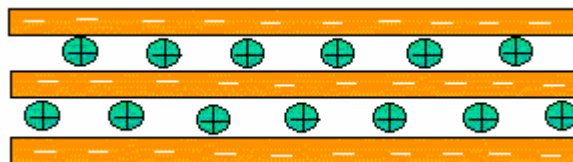
2.2.4.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [13-17]

มอนต์มอริลโลไนต์ อยู่ในตระกูลฟิลโลซิลิเกต (phyllosilicate) มีต้นกำเนิดจากฝุ่นภูเขาไฟแหล่งที่พบมากอยู่ในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น ฝรั่งเศส สหราชอาณาจักร เป็นแร่ดินเหนียวที่สำคัญนำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์ และนาโนคอมพอสิตเนื่องจากมีโครงสร้างผลึกแฝเป็นแผ่น หรือชั้นเรียงซ้อนกัน มีลักษณะโครงสร้างชั้นผลึกที่เรียกว่า 2:1 ประกอบด้วยชั้นของอะลูมินาออกตะฮีดรัล ที่ถูกประกบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิกาเตตระฮีดรัล ชั้นผลึกเหล่านี้มีความยืดหยุ่น และมีความเป็นขั้วหรือประจุ โดยแต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 0.7-1.0 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (700-800 ตารางเมตรต่อกรัม) [18] และมีความยาวมากกว่าความหนา 200 เท่า ระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็ก เรียกว่าแกลเลอรี (gallery) (รูปที่ 2.18)



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [14]

ในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกตจะมีประจุลัพท์เป็นลบจึงมักจะมีประจุบวกของโซเดียม ไอออน แมกนีเซียมไอออน อะลูมิเนียมไอออน หรือแคลเซียมไอออน เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึกเพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ (ไม่มีประจุ) และจะทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดแน่น (รูปที่ 2.19)

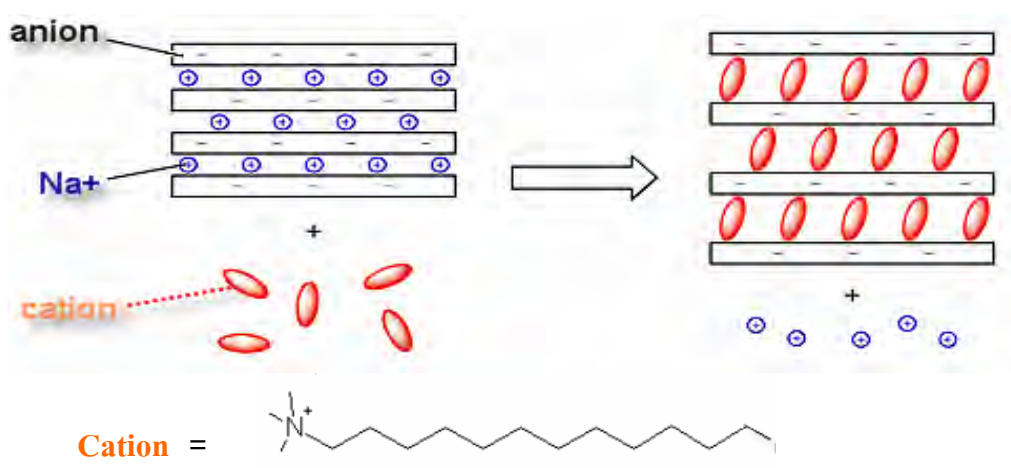


รูปที่ 2.19 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน [15]

เนื่องจากสมบัติของความมีขั้วจึงทำให้มอนต์มอริลโลไนต์ชอบน้ำ (ความหนาของชั้นผลึกขยายถึง 1.2 นาโนเมตร เมื่อมีความชื้น) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มาก และถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ เครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดพิษต่างๆ ได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดกลิ่น รวมถึงในงานบำบัดน้ำเสีย แต่การชอบน้ำของมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ผสมและเกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์ได้ยากจึงจำเป็นต้องดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบสารอินทรีย์แทนโดยการแทนที่ประจุต่างๆด้วยประจุของสารอินทรีย์ เพื่อให้เข้ารวมเป็นเนื้อเดียวกับ

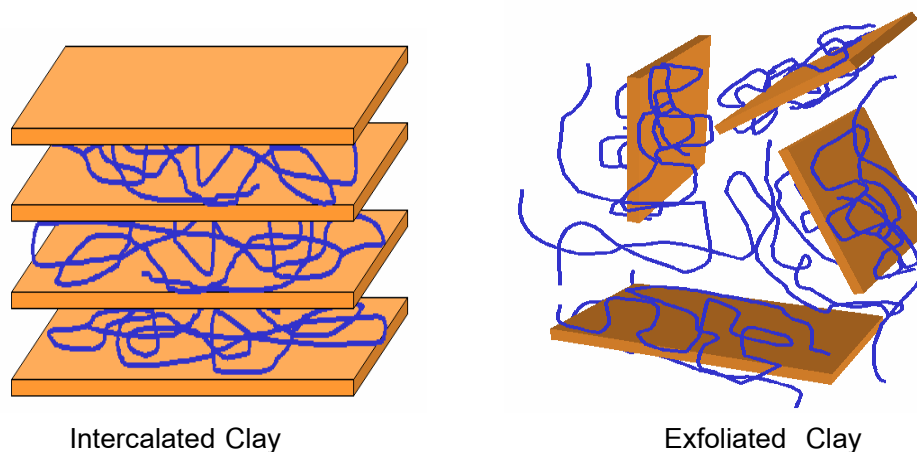
พอลิเมอร์ได้ดีขึ้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์ช่วยเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ ทำให้สมบัติบางอย่างของพอลิเมอร์ดีขึ้น เช่น ความทนแรงดึง (tensile strength) ความทนการดัดโค้ง (flexural strength) และความต้านทานความร้อน (heat resistance) เป็นต้น ซึ่งได้มีการเปิดเผยครั้งแรกโดยทีมงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการบริษัท ผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ในประเทศญี่ปุ่น คือ บริษัทโตโยต้า โดยนำมอนต์มอริลโลไนต์มาเสริมแรงให้กับไนลอน 6 เพื่อผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ [25]

วิธีง่ายที่สุดในการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ คือ ทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุด้วยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก เช่น ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) หรือฟอสโฟเนียม (phos-phonium) จะสามารถเข้าแทนที่ cation ที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน ทำให้ได้มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ที่เรียกว่า โมดิฟายด์ เคลย์ (modified clay) หรือออร์กาโนฟิลิกเคลย์ (organophilic clay) หรือเรียกสั้นๆ ว่า ออร์กาโนเคลย์ (organoclay) [16] (รูปที่ 2.20)



รูปที่ 2.20 ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน
กับควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไอออน [15]

ลักษณะเด่นของออร์กาโนเคลย์ คือ มีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกต แต่ขอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังมีความเป็นขั้วเหลืออยู่ เกิดการขยายตัวของช่องว่างระหว่างชั้นผลึก ทำให้ชั้นผลึกอยู่ห่างกัน และเกาะกันอย่างหลวมๆ โดยเรียกออร์กาโนเคลย์ที่มีโครงสร้างแบบนี้ว่า อินเตอร์คาเลต เคลย์ (intercalated clay) ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของออร์กาโนเคลย์ [15]

แต่ถ้าชั้นของดินเกิดการบวมตัวมากจนทำให้เกิดการแยกชั้นของดินออกจากกันอย่างชัดเจน จะเรียกว่า เอกซ์โฟลียเอต เคลย์ (exfoliated clay) ซึ่งทำให้ได้อนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆโดยจะก่อให้เกิดการเสริมแรงระดับโมเลกุล ดังนั้น จึงเรียกว่สตุเชิงประกอบประเภทนี้ว่า นาโนคอมพอสิต (nanocomposite)

Ma และคณะ[19] ได้ทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยซอร์บิทอลโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ซึ่งจัดเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะไม่มีการใช้สารละลายอินทรีย์ นอกจากนี้ ยังไม่มีน้ำเสียที่ได้จากการล้างมอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรอีกด้วย โดยซอร์บิทอลได้เข้าไปอยู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกตของมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตเพิ่มมากขึ้น ทำให้พอลิเมอร์สามารถแทรกสอดเข้าไปได้ง่าย

Sarkar และคณะ [20] ได้เตรียมพอลิโพรพิลีน/เคลย์ นาโนคอมพอสิตจากดินเบนโทไนต์ ด้วยกระบวนการผสมแบบสารละลาย พบว่า สมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีค่าสูงสุดเมื่อเติมเคลย์ไปเพียง 5 phr โดยค่าความทนแรงดึงของคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ 14 เปอร์เซ็นต์ และความทนแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเติมเคลย์มากกว่า 5 phr พบว่า สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการเกาะกลุ่มของเคลย์ทำให้แรงยึดระหว่างเมทริกซ์กับเคลย์ลดลง

2.2.4.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมการแลกเปลี่ยนไอออนบวกในดิน [13]

การแลกเปลี่ยนระหว่างแคตไอออนที่ดูดยึดอยู่ที่ผิวอนุภาคดินเหนียวและแคตไอออนที่อยู่ภายนอกนั้นเกิดได้ง่าย และยากแตกต่างกันออกไป ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. **ชนิดของแคตไอออนดูดซับและแคตไอออนแทนที่:** แคตไอออนต่างชนิดกัน จะดูดซับอยู่ที่ผิวอนุภาคดินเหนียวและถูกไล่ออกจากดินเหนียวโดยแคตไอออนอื่นๆ ได้ยากและง่ายแตกต่างกันออกไป บางชนิดดูดยึดอยู่ที่ผิวดินเหนียวได้เพียงหลวมๆ และถูกแทนที่ได้ง่าย บางชนิดดูดยึดอยู่ที่ผิวดินเหนียวค่อนข้างเหนียวแน่นและถูกแทนที่ได้ยาก ได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับอำนาจในการไล่ที่ และความเหนียวแน่นในการดูดยึดของแคตไอออน (cation) ที่ผิวดินเหนียวนั้น พบว่า แคตไอออนต่างๆ มีอำนาจการเข้าแทนที่ (replacing power) แตกต่างลดหลั่นกันลงไป ดังนี้ คือ $Li^+ < Na^+ < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < NH_4^+ < Al^{3+} (H^+)$ นั่นคือ Na^+ สามารถไล่ที่ Li^+ ได้ง่ายกว่าที่ Li^+ จะไล่ที่ Na^+ หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่ง คือ Na^+ จะดูดยึดอยู่ที่ผิวดินเหนียว ได้แน่นกว่า Li^+ แต่เหนียวแน่นน้อยกว่า K^+, Ca^{2+} ฯลฯ ตามลำดับ

2. **ความเข้มข้นของแคตไอออนแทนที่:** โดยปกติถ้าปริมาณแคตไอออนแทนที่มีมาก จะทำให้การไล่ที่แคตไอออนที่ผิวดินเหนียวง่ายขึ้น ถึงแม้ว่า Na^+ มีอำนาจการไล่ที่ Ca^{2+} น้อยกว่าที่ Ca^{2+} ไล่ที่ Na^+ แต่ถ้ามี Na^+ จำนวนมากก็สามารถไล่ที่ Ca^{2+} ออกไปให้หมดจากผิวของดินได้

3. **ปริมาณการอิมมัตว์:** ปริมาณของการอิมมัตว์ของแคตไอออนบางชนิดที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวมีอิทธิพลต่อความยากง่ายที่แคตไอออนนั้นจะถูกไล่ที่ออกไปเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่นแคลเซียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable calcium) ที่ผิวของดินเหนียวยิ่งเหลือน้อยเท่าใดความยากที่จะไล่ที่ Ca^{2+} ออกไปจากผิวดินเหนียวให้หมดก็ยิ่งยากขึ้นเท่านั้น แต่ในทางตรงกันข้ามโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable sodium) ยิ่งเหลือน้อยอยู่บนผิวดินเหนียวเท่าใดก็ยิ่งง่ายต่อการที่จะถูกไล่ที่ออกไปมากขึ้นเท่านั้น ส่วนแคตไอออนบางชนิด เช่น K^+ และ Mg^{2+} นั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับการ degree of saturation

4. **แคตไอออนอื่นที่อยู่ร่วมด้วยบนผิวของดินเหนียว:** แคตไอออนอื่นๆ ที่ดูดยึดอยู่บนผิวดินเหนียวร่วมกับแคตไอออนที่ต้องการจะไล่ที่นั้น มีบทบาทสำคัญเช่นกัน เช่น โพแทสเซียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K^+) ถูกไล่ที่ออกมาได้ง่ายขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกับ อะลูมิเนียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Al^{3+}) หรือ H^+ แต่จะถูกไล่ที่ได้ยากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกับ แคลเซียมแลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Ca^{2+})

2.2.4.1.2 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ(Cation Exchange Capacity:CEC)[16-17]

CEC คือ ปริมาณมากที่สุดของประจุที่สามารถเข้าไปแทนที่ได้ มีหน่วยเป็น มิลลิสมมูลย์ต่อกรัม หรือ 100 กรัม (meq/g หรือ meq/100 g) CEC ของดินขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

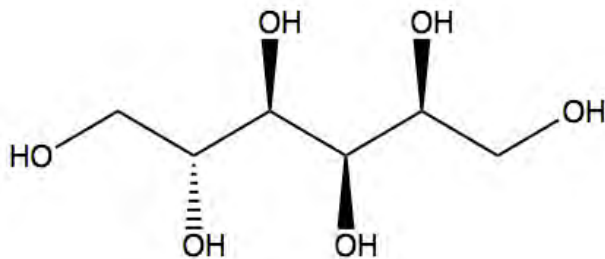
1. **ชนิดของคอลลอยด์ดิน** : ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของคอลลอยด์ดินที่ต่างชนิดกันจะแตกต่างกันเป็นอย่างมาก เช่น ฮิวมัส, มอนต์มอริลโลไนต์, อิลไลต์, เกาลินไนต์ และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอะลูมิเนียม โดยเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกันตามลำดับดังนี้ 200, 100, 30, 8 และ 4 มิลลิสมมูลย์ (meq)/100 กรัม ดังนั้นดินที่มีฮิวมัสมากหรือมีพวกมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบอยู่มากจะทำให้ CEC ของดินสูงชันกว่าดินอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีปริมาณดินเหนียวทั้งหมดเท่ากัน แต่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเกาลินไนต์ และไฮดรอกไซด์ของ Fe และ Al

2. **ปริมาณของดินเหนียวที่มีอยู่ในดิน** : ดินที่มีเปอร์เซ็นต์ ดินเหนียวสูงย่อมมีค่า CEC สูงกว่าดินที่มีเปอร์เซ็นต์ดินเหนียวน้อยกว่า ดังนั้น จึงสามารถใช้ความสังเกตจากเนื้อดินเป็นหลักเกณฑ์ได้คร่าวๆ ว่าดินไหนมี CEC มากน้อยกว่ากัน ถ้าดินมีเนื้อละเอียดโอกาสที่จะมีค่า CEC สูงกว่าดินที่มีเนื้อหยาบกว่าจะมีมาก ดังนั้น จึงสามารถประเมิน CEC ของดินโดยคร่าวๆ จากปริมาณดินเหนียว นั่นคือ ทุกหนึ่งเปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวจะให้ CEC แก่ดินประมาณ 0.5 มิลลิสมมูลย์ (meq)/100 g เช่น ถ้าดินมีดินเหนียว 30 เปอร์เซ็นต์ CEC ของดินนั้นจะประมาณ 15 มิลลิสมมูลย์ (meq)/100 g

3. **ปริมาณของอินทรีย์วัตถุในดิน** : เนื่องจากฮิวมัสมี CEC สูงมาก ดังนั้น ดินที่มีเปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุสูงจะมี CEC สูงด้วย

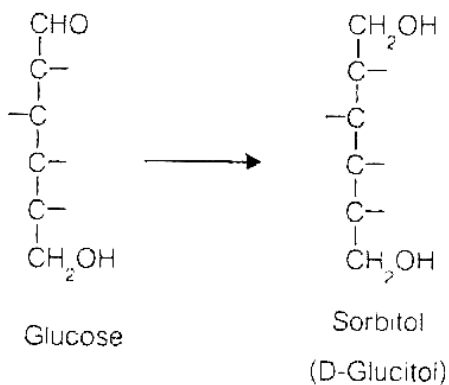
2.3 ซอร์บิทอล (Sorbitol) [22-23]

ซอร์บิทอล(sorbitol) (รูปที่2.22) มีชื่อเรียกอีกชื่อว่า กลูซิทอล (glucitol) เป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ที่ผลิตจากแป้ง โดยการ reduction ของกลูโคส เปลี่ยนหมู่แอลดีไฮด์เป็นหมู่ไฮดรอกซิล โดยมีลักษณะที่เป็นผงละเอียดสีขาว รสหวานเล็กน้อย ละลายน้ำได้ดี



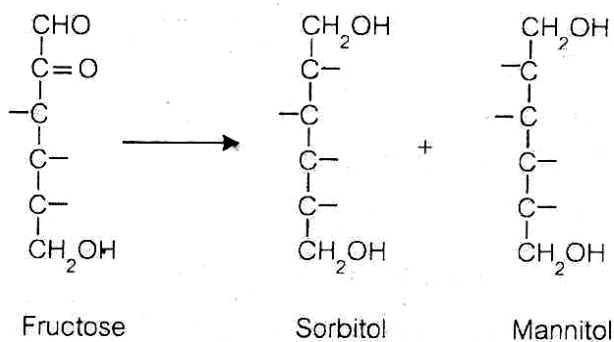
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของซอร์บิทอล [21]

การผลิตซอร์บิทอลโดยการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) ในน้ำตาลกลูโคส ในภาวะที่เหมาะสม [120-150 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจน 30-70 atmospheric pressure (atm) และ pH 5-6] โดยใช้ Rancy Nickel 3-6 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าจะมีการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิล กลุ่มของคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การเติมไฮโดรเจนของกลูโคสได้เป็นซอร์บิทอล [22]

ในกรณีที่ทำการเติมไฮโดรเจนกับน้ำตาลฟรักโทส จะได้ซอร์บิทอล และแมนนิทอล ซึ่งในกรณีปกติจะได้แมนนิทอลประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การเติมไฮโดรเจนของฟรักโทสได้ซอร์บิทอลและแมนนิทอล [22]

สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของซอร์บิทอลแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ในรูปผลึก ซอร์บิทอลและแมนนิทอลจะมี cooling effect [22] เนื่องจากมีค่าความร้อนในการละลายเป็นลบ (คายความร้อน) สามารถละลายน้ำ และเสถียร ประโยชน์ของซอร์บิทอล คือ ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร, ยา, ทำหมากฝรั่ง, ยาสีฟัน, วิตามินซี, เครื่องสำอาง และเป็นสารให้ความหวานที่มีปริมาณแคลลอรี่ต่ำสำหรับคนเป็นโรคเบาหวาน

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมี และสมบัติทางกายภาพของซอร์บิทอล [22-23]

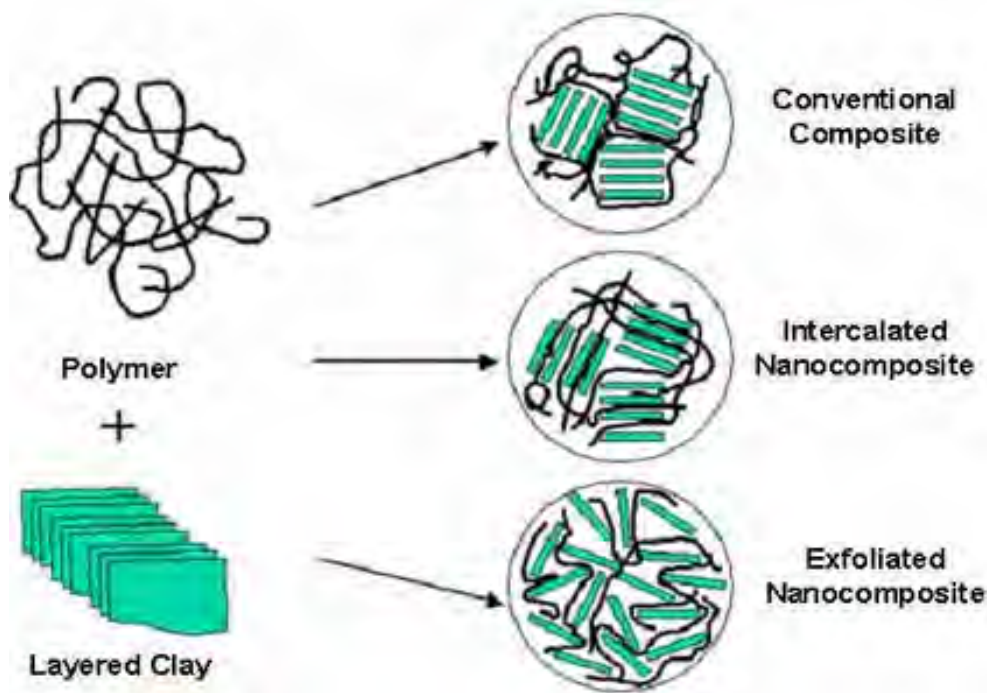
ชื่อ IUPAC	(2S,3R,4R,5R)-hexane-1,2,3,4,5,6-hexol
สูตรโครงสร้างทางเคมี	$C_6H_{14}O_6$
น้ำหนักโมเลกุล	182.17 กรัม/โมล
ความหนาแน่น	1.489 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
จุดหลอมเหลว	95 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	296 องศาเซลเซียส
ค่าความร้อนในการละลายที่ 25°C	-26.5 แคลอรี/กรัม
ความสามารถในการดูดความชื้น	ดูดความชื้น
ความสามารถในการละลายน้ำ (กรัม/น้ำ 100 กรัม ที่ 25°C)	ประมาณ 235

2.4 นาโนคอมพอสิต (Nanocomposites) [18, 24-25]

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่มีความสนใจเป็นอย่างมากในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ให้มีความแตกต่างจากเดิมได้ โดยการเติมสารเจือจำพวกซิลิกาที่มีช่องว่างเล็กๆ ระดับนาโนเมตรในปริมาณต่ำ (น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์) โมเลกุลของพอลิเมอร์จะเข้าไปแทรกตัวอยู่บางส่วน และทำให้สมบัติของวัสดุผสมนี้เปลี่ยนไปทั้งสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางแสง ความทนทานสารเคมี ความต้านทานการติดไฟ และสมบัติการสกัดกัน โดยไม่มีผลทำให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเหตุที่มีศักยภาพในการนำวัสดุชนิดนี้ไปใช้ในเชิงประยุกต์จึงทำให้มีความก้าวหน้าในงานวิจัยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งในลักษณะของการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตชนิดใหม่ การพัฒนาสารเจือที่เหมาะสม การวิเคราะห์โครงสร้าง การอธิบายเชิงทฤษฎี รวมทั้งการจำลองแบบโมเลกุลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อให้เกิดความเข้าใจต่อโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตมากขึ้น โดยการวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตได้เน้นการพัฒนาวิธีดัดแปรเคลย์ให้เหมาะกับการใช้งาน โดยการดัดแปรด้วยสารอินทรีย์เพื่อปรับปรุงให้เกิดโครงสร้างแบบเอกซ์โฟลียเอต (exfoliate) ระหว่างการผสม และการรวมตัวกับพอลิเมอร์

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตได้พัฒนาสู่การค้าเป็นครั้งแรกโดย Toyota Central R&D laboratory โดยใช้ caprolactam (nylon-clay nanocomposite) [25] เนื่องจากเมื่อได้ผสมพอลิเมอร์กับ ออร์กาโนเคลย์แล้วทำให้ชั้นซิลิเกตขยายออกจากกัน จึงเรียกว่า พอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต (polymer-clay nanocomposites) ซึ่งการกระจายตัวของเคลย์ในเนื้อพอลิเมอร์จะแบ่งเป็น 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์คอมพอสิต [17]

จากรูปที่ 2.25 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์-เคลย์สามารถเกิดเป็นวัสดุคอมพอสิตได้ 3 แบบ
ดังนี้

1. **คอมพอสิตแบบทั่วไป (Conventional composites):** อนุภาคของเคลย์จะเกาะกันเป็นกลุ่ม และพอลิเมอร์ไม่มีการแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของเคลย์
2. **อินเตอร์คาเลตนาโนคอมพอสิต (Intercalated nanocomposites):** อนุภาคของเคลย์มีการเกาะกันเป็นกลุ่ม แต่พบว่าระหว่างชั้นของเคลย์มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไปอยู่ภายในชั้นของเคลย์ โดยไม่ทำให้ชั้นของเคลย์กระจัดกระจาย ซึ่งยังคงสังเกตเห็นว่าเคลย์ยังคงมีการจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ซ้อนทับกันอยู่
3. **เอกซ์ฟอลิเอตนาโนคอมพอสิต (Exfoliated nanocomposites):** ชั้นของเคลย์จะกระจายตัวออกจากกันไม่มีโครงสร้างผลึกในแนวแกน C ทำให้ได้นาโนคอมพอสิตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสง แต่มีสมบัติเชิงกล และสมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดีอีกด้วย

2.4.1 ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต [17]

1. มีความใส เพราะอนุภาคนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง UV-Vis มาก จึงไม่ทำให้แสงเกิดการกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส
2. มีความแข็งแรง มอดุลัสสูงขึ้น เนื่องจากความแข็งแรงของชั้นซิลิเกต
3. มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของแก๊ส เนื่องจากอนุภาคเคลย์ที่กระจายอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์มีพื้นผิวและมี aspect ratio สูง ทำให้ระยะทางการเคลื่อนของแก๊สเพิ่มมากขึ้น
4. ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้ทำให้เกิดถ่าน (char) ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับรวดเร็ว
5. เมื่อผสมในพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ จะทำให้นำไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้น เพราะจำกัดการจัดตัวของโมเลกุลให้อยู่ในภาวะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลจะถูกยึดออกมากกว่าจะขดตัวทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดวกขึ้น

2.4.2 ผลกระทบที่สำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต [17]

1. ชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งให้ความแข็งแรง คงทน และทนไฟ
2. สีพ่นรถยนต์ ให้ความคงทนมากขึ้น
3. แผ่นฟิล์มกันออกซิเจนในขวดยา/อาหาร อาหารกระป๋อง ป้องกันอาหารเสื่อมสภาพ
4. ขวดน้ำอัดลม เบียร์ ป้องกันการสูญเสียแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัดไว้
5. ลูกเทนนิส ลูกบอลล ป้องกันการสูญเสียแก๊สภายในลูกบอล ลูกเทนนิส

2.4.3 แนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยี และพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต [16]

ต่างประเทศ : เทคโนโลยีนี้ได้รับการพัฒนาและถ่ายทอดสู่อุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา ญี่ปุ่น จีน เกาหลี และอีกหลายประเทศในยุโรป ได้แก่ เยอรมัน ฝรั่งเศส อิตาลี เป็นต้น โดยเน้นการนำไปใช้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. ชิ้นส่วนรถยนต์ ในปี 2004 บริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของโลกต่างประกาศว่าจะนำชิ้นส่วนที่ผลิตจากพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตมาใช้ในรถยนต์ เชื่อว่าในอนาคตสามารถผลิตรถยนต์ทั้งคันที่ทำจากนาโนคอมพอสิตได้ ซึ่งมีความปลอดภัยสูง โดยเฉพาะจากไฟไหม้ ปลอดภัยสูงเสีย โดยทนความร้อนสูงขึ้น และลดการลามไฟ
2. ผลิตภัณฑ์การแพทย์ ได้แก่ ชิ้นส่วนที่ต้องทนน้ำ ด้านการซึมผ่านของแก๊ส เช่น เครื่องมือแพทย์ และชิ้นส่วนลิ้นหัวใจเทียม
3. ผลิตภัณฑ์สำหรับอาหารและยา ได้แก่ फिल्मป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน และแก๊สต่างๆ และขวดน้ำอัดลม

ประเทศไทย : มีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย

1. อุตสาหกรรมยานยนต์: ชิ้นส่วนรถยนต์
2. ผลิตภัณฑ์การแพทย์: สารคอมพอสิตอุดฟัน สายยางหรือท่อต่างๆ
3. ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต : ปะเก็นล้อรถ ให้ความทนทาน แก้ปัญหา ยางเสื่อมสภาพเร็ว
4. ผลิตภัณฑ์กีฬา: ลูกบอล ลูกเทนนิส
5. อุตสาหกรรมเกษตร: फिल्मการเกษตร फिल्मห่อผัก ผลไม้ फिल्मเลี้ยงต้นอ่อน
6. อุตสาหกรรมเสื้อผ้าและแฟชั่น: เส้นใยนาโนคอมพอสิตทนไฟ ให้ความอบอุ่น ย้อมสีติดได้ดี
7. พลังงานและสิ่งแวดล้อม: ตัวตรวจวัดแก๊สอันตราย บำบัดน้ำเสีย สารอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่ของแข็ง (solid battery) เช่น แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (lithium ion battery)
8. อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร: फिल्मด้านแก๊สออกซิเจนซึมผ่าน ลดโอกาสอาหารเสื่อมสภาพ เป็นต้น

Huang และคณะ [27] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกล และพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน/นาโนซิลิกาคอมพอสิตที่เตรียมด้วยกระบวนการหลอมเหลว (melt blending process) ซึ่งพบว่า ความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน/นาโนซิลิกาคอมพอสิตมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้นาโนซิลิกา 4 phr และความทนแรงกระแทกมีค่ามากที่สุดเมื่อใช้นาโนซิลิกา 5 phr ซึ่งการเติมนาโนซิลิกาจะเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) เพิ่มระดับการเกิดผลึก (degree of crystallinity) และลดขนาดของสเฟียรูไลต์ (spherulites) ด้วย

Calcagno และคณะ [28] ได้ศึกษาผลของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ต่อสัณฐานวิทยา และพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตนาโนคอมพอสิต [poly(ethylene terephthalate) nanocomposite] พบว่า นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีสัณฐานวิทยาเป็นทั้งแบบอินเตอร์คาเลต (intercalate) และ เอกซ์โฟลียเอต (exfoliate) โดยเคลย์ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก และเพิ่มอัตราการเกิดผลึก ซึ่งนาโนคอมพอสิตประกอบด้วยนิวเคลียสจำนวนมากและสเฟียรูไลต์มีขนาดเล็กกว่าในพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลตบริสุทธิ์

Xu และคณะ [29] ได้ศึกษาผลของมอนต์มอริลโลไนต์ต่อพฤติกรรมการเกิดผลึกในพอลิเอทิลีนนาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบอินเตอร์คาเลต (intercalate) และเอกซ์โฟลียเอต (exfoliate) ซึ่งพบว่า มอนต์มอริลโลไนต์แสดงผลของการเป็นสารก่อผลึก และทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของนาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบ exfoliate มีค่าสูงขึ้น ขณะที่นาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบอินเตอร์คาเลต (intercalate) มีอุณหภูมิการเกิดผลึกต่ำลงเนื่องจากพอลิเมอร์ถูกกักไว้ในชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์

สารก่อผลึก [9] อาจเป็นสารอินทรีย์ หรือสารอนินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ถูกเติมเข้าไปในพอลิเมอร์ก่อนหรือระหว่างกระบวนการขึ้นรูปในปริมาณเพียงเล็กน้อย โดยลักษณะ และสมบัติที่ดีของสารก่อผลึก คือ

- (1) สามารถลดพลังงานเสรีระหว่างพื้นผิว กล่าวคือ ดูดซับ (adsorb) พอลิเมอร์ไว้บนพื้นผิวได้ที่จุดหลอมเหลวหรือต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์
- (2) ไม่ละลายในพอลิเมอร์ที่จุดหลอมเหลวหรือต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์
- (3) ควรหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์โดยไม่เกิดการแตกสลาย
- (4) ไม่ระเหย มีความเสถียร และไม่ทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม เช่น พอลิเมอร์ ออกซิเจน ความชื้น และสารเติมแต่งต่างๆ
- (5) ควรมีโครงสร้างผลึกคล้ายกับพอลิเมอร์

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี อุปกรณ์ และ เครื่องมือ

3.1.1 สารเคมี

3.1.1.1 โซเดียม-มอนต์มอริลโลไนต์ จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.1.2 ซอร์บิทอล เกรด laboratory จากบริษัท Ajax Finechem

3.1.1.3 ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ชื่อทางการค้า Moplen HP561R จากบริษัท เชซ เอ็ม ซี โปลีเมอร์ จำกัด (สมบัติแสดงไว้ในตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 สมบัติทั่วไปของพอลิโพรพิลีน

Resin properties (a)	Moplen HP561R	ASTM METHOD (b)
Melt flow rate (230°C / 2.16 kg), dg/min	25	D1238
Density, g/cm ³	0.90	D792B
Tensile strength at yield, MPa	32	D638
Elongation at yield, %	11	D638
Flexural modulus, MPa	1240	D790A
Notched izod impact strength at 23°C, J/m	24	D256A
Deflection temperature, at 455 kPa, °C	94	D648

(a) Values shown are averages and are not to be considered as specifications.

(b) ASTM test methods are the latest under Society's current procedures. All molded specimens are prepared by injection

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 3.1.2.1 หม้อต้มน้ำ
- 3.1.2.2 บีกเกอร์ขนาด 50 ml
- 3.1.2.3 เทอร์โมมิเตอร์ 100°C
- 3.1.2.4 ซ้อนตักสาร
- 3.1.2.5 แท่งแก้วคน
- 3.1.2.6 จานเพาะเชื้อ
- 3.1.2.7 ตะแกรงร่อนขนาด 50 mesh
- 3.1.2.8 โกร่งบด
- 3.1.2.9 Heater
- 3.1.2.10 เครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (high speed mixer)
- 3.1.2.11 อะลูมิเนียมฟอยล์
- 3.1.2.12 ตู้อบสูญญากาศ
- 3.1.2.13 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ของ Lab Tech Engineering (ภาควิชาวัสดุศาสตร์)
- 3.1.2.14 เครื่องอัดแบบ (compression molding machine) ของ Lab Tech Engineering (ภาควิชาวัสดุศาสตร์)
- 3.1.2.15 เครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer) ของ Thermo รุ่น 470 FT-IR (ภาควิชาวัสดุศาสตร์)
- 3.1.2.16 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter) ของ Perkin Elmer รุ่น DSC 7 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์)
- 3.1.2.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ของ JEOL รุ่น JSM-5410LV (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- 3.1.2.18 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer) ของ Bruker AXS รุ่น D8 discover (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- 3.1.2.19 เครื่อง Polarized microscope (PM) รุ่น Olympus BH2 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์)
- 3.1.2.20 เครื่อง Charpy impact tester รุ่น Izod-charpy Codice 10.17020 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์)

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยซอร์บิทอล

ผสมมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และซอร์บิทอลในอัตราส่วน MMT : ซอร์บิทอล เท่ากับ 1 : 2 โดยน้ำหนัก ในหม้อสแตนเลส ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำของผสมที่ได้ไปผสมด้วยเครื่องปั่นผสมชนิดความเร็วสูง (รูปที่ 3.1) ด้วยความเร็วรอบ 3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 นาที โดยทันที จากนั้นเทของผสมลงบนแผ่นฟอยล์ และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นจนของผสมแห้ง แล้วจึงนำมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอล (sorbitol-modified MMT) ที่เตรียมได้ไปบดด้วยโม่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 50 เมช



รูปที่ 3.1 เครื่องปั่นผสมชนิดความเร็วสูง (high speed mixer)

3.2.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของ MMT และ sorbitol-modified MMT ด้วยเทคนิค XRD

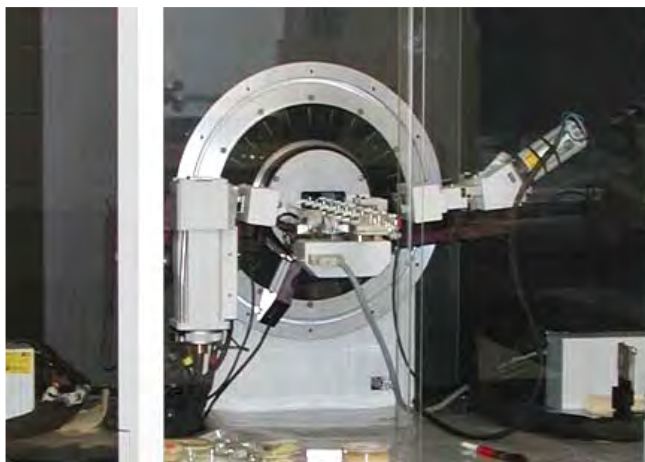
นำ MMT และ sorbitol-modified MMT ไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ของ Bruker AXS Model D8 Discover (รูปที่ 3.2) โดยใช้ภาวะในการตรวจสอบ ดังนี้

หลอดรังสีเอกซ์	:	Cu
ความยาวคลื่น (λ)	:	0.154 nm
ความต่างศักย์	:	40 kV
กระแสไฟฟ้า	:	40 mA
มุมที่ใช้	:	1-10 degree
Increment	:	0.02 degree
Scan speed	:	0.5 sec/step

คำนวณหาขนาดช่องว่างระหว่างชั้นของอะลูมิเนียมซิลิเกตด้วย Bragg's Equation

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

เมื่อ	n	คือ จำนวนเต็ม (1, 2, 3,, n)
	λ	คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิด, หน่วย nm
	d	คือ ระยะห่างระหว่างผลึก, หน่วย nm
	θ	คือ มุมตกกระทบของรังสีกับแผ่นผลึก



รูปที่ 3.2 เครื่อง XRD ของ Bruker รุ่น AXS Model D8 Discover

3.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของซอร์บิทอล, MMT และ sorbitol-modified MMT ด้วยเทคนิค FT-IR

นำซอร์บิทอล, MMT และ sorbitol-modified MMT ไปอัดเม็ดกับผงโปแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ของ Thermo รุ่น 470 FT-IR (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 เครื่อง FT-IR ของ Thermo scientific Nicolet รุ่น 6700 FT-IR

3.2.4 การเตรียมพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

ผสมพอลิโพรพิลีน (PP) กับ MMT และ sorbitol-modified MMT ในอัตราส่วนพอลิโพรพิลีน 100 ส่วน ต่อมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรเป็น 1, 3, 5 และ 7 ส่วน ด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วรอบ 12 รอบ/นาที เป็นเวลา 8 นาที จากนั้นขึ้นรูปนาโนคอมพอสิตให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดแบบ (compression molding) ให้มีความหนา 3 มิลลิเมตร ภายใต้ภาวะดังต่อไปนี้

Temperature	185	°C
Pre-heat time	60	sec
Venting time	10	sec (7 times)
Pressure time	150	sec
Cooling time	200	sec
Pressure	1000	psi

3.2.5 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค XRD

นำ พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอล และพอลิโพรพิลีน/มอนต์-มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer ของ Bruker รุ่น AXS Model D8 discover โดยใช้ภาวะในการตรวจสอบ ดังนี้

หลอดรังสีเอกซ์	:	Cu
ความยาวคลื่น (λ)	:	0.154 nm
ความต่างศักย์	:	40 kV
กระแสไฟฟ้า	:	40 mA
มุมที่ใช้	:	1 – 30 degree
Scan speed	:	0.5 sec/step

คำนวณหาขนาดช่องว่าง ระหว่างชั้นของอะลูมิเนียมซิลิเกตด้วย Bragg's Equation ($n\lambda = 2d \sin\theta$) เช่นเดียวกับวิธีในหัวข้อ 3.2.2 และคำนวณหาขนาดของผลึกแอลฟา (D) (α - crystal) ด้วย Sherrer's Equation

$$D = K\lambda / B\cos\theta = 0.9\lambda / B\cos\theta$$

$$B = \frac{1}{2} (2\theta_1 - 2\theta_2)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิด, หน่วย nm
 θ_1, θ_2 คือ มุมที่อยู่ตรงครึ่งหนึ่งของความสูงของพีค
 B คือ ค่าความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความสูงของพีค

3.2.6 การตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค DSC

ตรวจสอบพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน, พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลนาโนคอมพอสิต โดยหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) อุณหภูมิหลอมเหลว (melt temperature, T_m) และปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) ของ Perkin Elmer รุ่น DSC 7 (รูปที่ 3.4) ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 50–200 องศาเซลเซียส

โดยให้ความร้อนในอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที จากนั้นให้ความร้อนคงที่ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที แล้วทำให้เย็นลงด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที คงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 นาที แล้วทำให้อุ่นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 50–200 องศาเซลเซียส

ปริมาณผลึก (degree of crystallinity, X_c) ของพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีนนาโนคอม-พอลิเมอร์ คำนวณได้จากสมการ

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0}$$

เมื่อ ΔH_m คือ เอนทาลปีการหลอมเหลวของชิ้นทดสอบ

ΔH_m^0 คือ เอนทาลปีการหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณผลึก

(X_c) เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 209 จูลต่อกรัม (J/g)



รูปที่ 3.4 เครื่อง DSC ของ Perkin Elmer รุ่น DSC 7

3.2.7 การตรวจสอบลักษณะผลึกของพอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิค polarized microscopy (PM)

ตรวจสอบลักษณะผลึกของพอลิโพรพิลีน, พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลนาโนคอมพอลิเมอร์ ด้วยเครื่อง polarized microscope (PM) รุ่น Olympus BH2 (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 เครื่อง Polarized microscopy (PM) รุ่น Olympus BH2

3.2.8 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค SEM

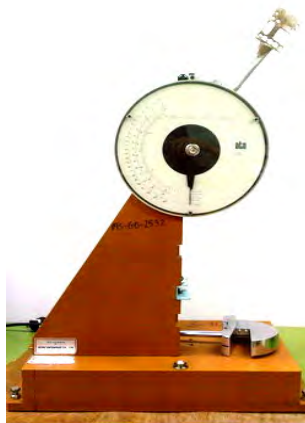
ทำการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิโพรพิลีน, พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลนาโนคอมพอสิต ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-5410LV (รูปที่ 3.6) ที่ความต่างศักย์ 20 kv, magnification $15 \times 35,000$, resolution 5.5 ที่บริเวณพื้นผิวของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต



รูปที่ 3.6 เครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM-5410LV

3.2.9 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของนาโนคอมพอสิตด้วยเครื่อง Charpy impact tester

ทำการทดสอบความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน, พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลนาโนคอมพอสิต ด้วยเครื่อง Charpy impact tester รุ่น Izod-charpy Codice 10.17020 (รูปที่ 3.7) ที่อุณหภูมิต่างๆ (-30°C , 0°C และ 25°C) ตามมาตรฐาน ASTM D256 โดยนำชิ้นทดสอบไปเก็บไว้ในตู้แช่แข็งก่อนนำมาทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



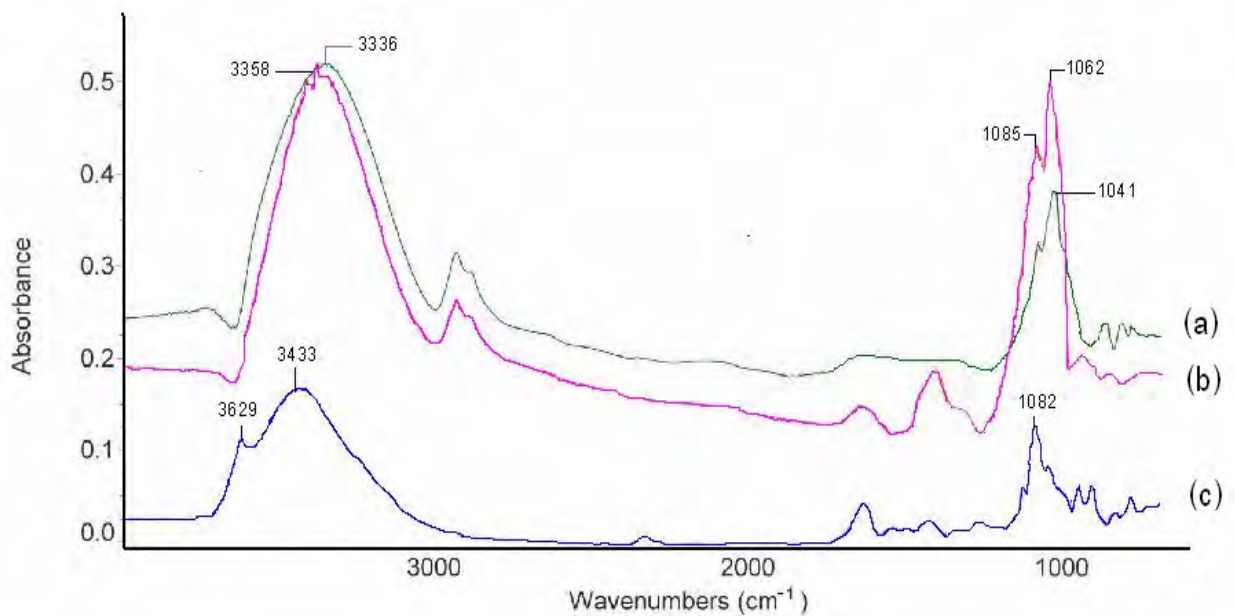
รูปที่ 3.7 เครื่อง Charpy Impact Tester รุ่น Izod-charpy Codice 10.17020

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของซอร์บิทอล, มอนต์มอริลโลไนต์ และ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

รูปที่ 4.1 แสดง FT-IR สเปกตรัมของซอร์บิทอล, มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอล (sorbitol-modified MMT) ในช่วงความยาวคลื่น 800-4000 cm^{-1}



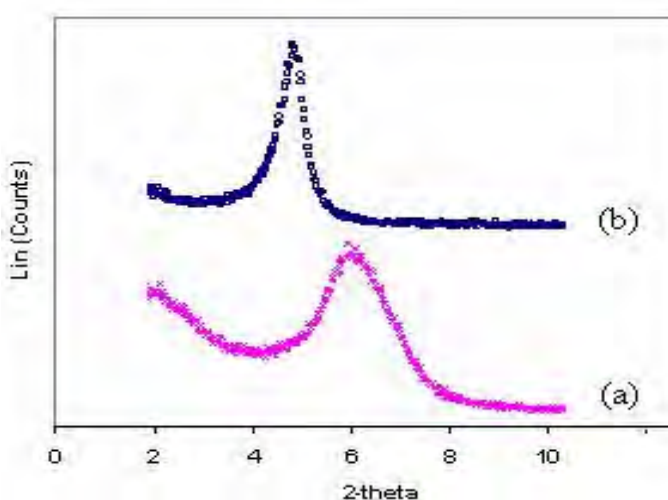
รูปที่ 4.1 FT-IR สเปกตรัมของ (a) ซอร์บิทอล (b) sorbitol-modified MMT และ (c) MMT

จากรูปที่ 4.1 พบว่า FT-IR สเปกตรัม (a) ของซอร์บิทอลปรากฏพีก O-H stretching ($3300-3500 \text{ cm}^{-1}$) ที่ความยาวคลื่น 3336 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง hydroxyl groups (-OH) และพีก C-O stretching ($1000-1200 \text{ cm}^{-1}$) ที่ความยาวคลื่น 1041 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึง C-OH group ส่วนสเปกตรัม (c) ของ MMT ปรากฏพีก O-H stretching ($3300-3500 \text{ cm}^{-1}$) ที่ความยาวคลื่น 3433 cm^{-1} , free O-H stretching ($3600-3700 \text{ cm}^{-1}$) ที่ความยาวคลื่น 3629 cm^{-1} และ C-O stretching ($1000-1200 \text{ cm}^{-1}$) ที่ความยาวคลื่น 1082 cm^{-1} สำหรับพีก (b) ของ sorbitol-modified MMT นั้นพบว่า พีกของ O-H stretching ขยับไปที่ความยาวคลื่น 3358 cm^{-1} และพีก C-O stretching ขยับไปเกิดที่ความยาวคลื่น 1062 และ 1041 cm^{-1} และพบว่า ไม่ปรากฏพีกของ free O-H stretching ซึ่งแสดงว่าหมู่ C-OH ของซอร์บิทอลเข้าไปทำปฏิกิริยากับ free O-H stretching และ O-H

stretching ของ MMT ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าโมเลกุลของซอร์บิทอลได้แทรกสอดเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตของ MMT ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตใน sorbitol-modified MMT ที่ระนาบ 001 ขยายกว้างขึ้น

4.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์, มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร และ พอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

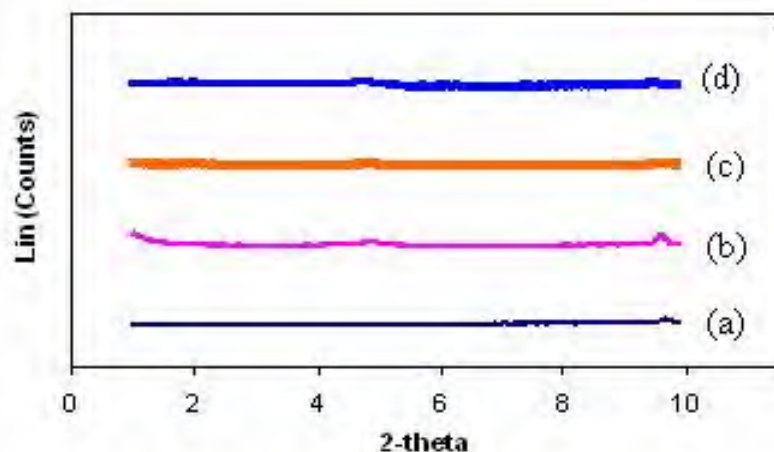
รูปที่ 4.2 แสดง XRD pattern ของ MMT และ sorbitol-modified MMT ในช่วง $2\theta = 2-10^\circ$



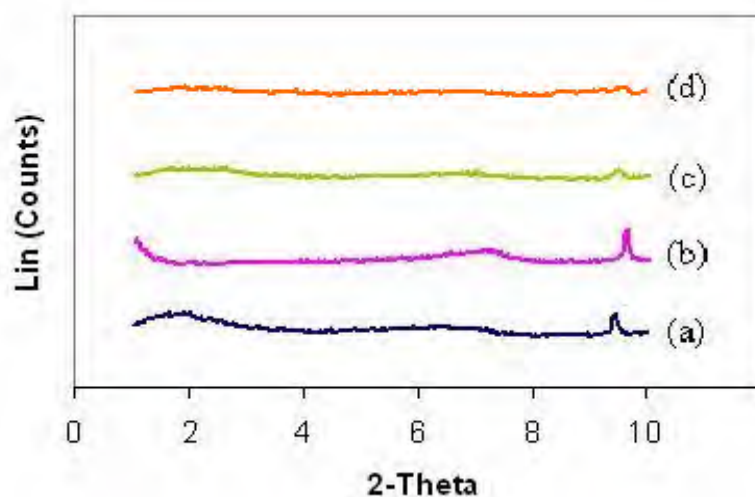
รูปที่ 4.2 XRD pattern ของ (a) MMT และ (b) sorbitol-modified MMT

จากรูปที่ 4.2 แสดงพีก (a) ของ MMT ที่ระนาบ 001 (d_{001}) พบว่า ปรากฏพีกที่ $2\theta = 5.95^\circ$ ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณค่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตจากสมการของแบร็กก์ (Bragg's Equation) พบว่า มีค่า = 1.485 นาโนเมตร ในขณะที่พีก (b) ของ sorbitol-modified MMT ปรากฏพีกที่ $2\theta = 4.84^\circ$ ซึ่งเมื่อนำไปคำนวณหาค่าระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกต พบว่า มีค่า = 1.824 นาโนเมตร ซึ่งการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตใน sorbitol-modified MMT เนื่องจากโมเลกุลของซอร์บิทอลสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกตของ MMT โดยพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของซอร์บิทอลกับหมู่ไฮดรอกซิลของชั้น ซิลิเกตใน MMT ประกอบกับอนุภาคซอร์บิทอลมีขนาดเล็กมากพอ จึงทำให้ซอร์บิทอลสามารถถูกเหนี่ยวนำให้เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตของ MMT จึงทำให้โครงสร้างของ MMT ที่ผ่านการดัดแปรมีลักษณะแบบ intercalation

รูปที่ 4.3 แสดง XRD pattern ของพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลนาโนคอมพอสิต (PP/sorbitol-modified MMT nanocomposites) และรูปที่ 4.4 แสดง XRD pattern ของพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (PP/MMT nanocomposites) ในช่วง $2\theta = 1-10^\circ$



รูปที่ 4.3 XRD pattern ของนาโนคอมพอสิต (a) 100 PP/1 modified-MMT (b) 100 PP/3 modified-MMT (c) 100 PP/5 modified-MMT และ (d) 100 PP/7 modified-MMT

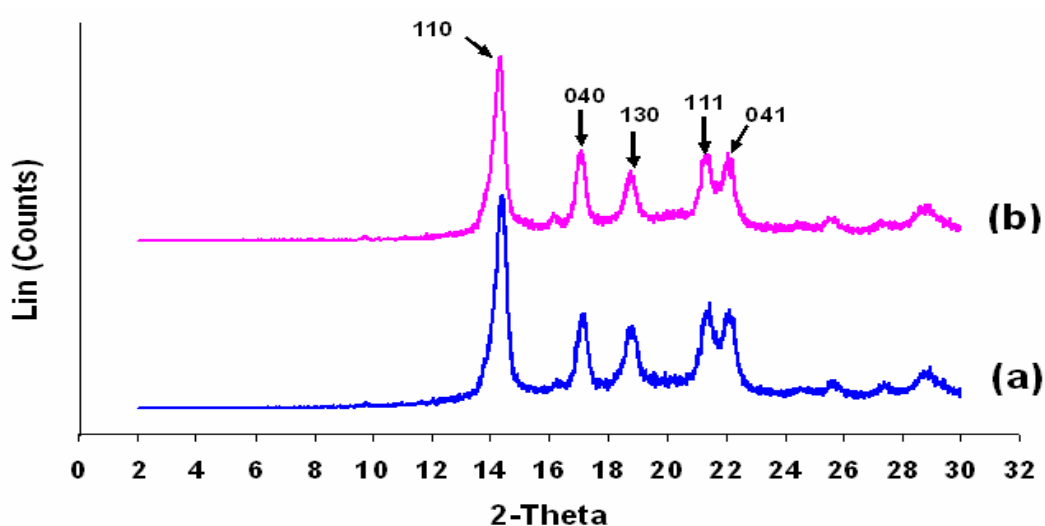


รูปที่ 4.4 XRD pattern ของนาโนคอมพอสิต (a) 100 PP/1 MMT (b) 100 PP/3 MMT (c) 100 PP/5 MMT และ (d) 100 PP/7 MMT

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นว่าไม่ปรากฏฟีกของโครงสร้าง MMT ที่ระนาบ 001 (d_{001}) ในช่วง $2\theta = 2-10^\circ$ เพราะชั้นซิลิเกตของ MMT เกิดการแตกออก เนื่องจากโมเลกุล PP ได้แทรกสอดเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของ MMT จนทำให้โครงสร้างของแผ่นซิลิเกตที่เรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ

ใน MMT แยกออกจากกัน ทั้งนี้เนื่องจากผลของ shear-stress และความร้อน ที่เกิดขึ้นขณะทำการผสม PP กับ MMT จึงส่งผลให้แผ่นซิลิเกตที่แยกออกจากกันกระจายตัวอยู่ใน PP ซึ่งแสดงให้เห็นว่า MMT ที่ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลใน PP นาโนคอมพอสิตมีโครงสร้างแบบ exfoliation

รูปที่ 4.5 แสดง XRD pattern ของ PP และ 100 PP/1 sorbitol-modified MMT nanocomposite



รูปที่ 4.5 XRD pattern ของ (a) PP และ (b) 100 PP/1 modified-MMT nanocomposite

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ปรางูพีกที่สำคัญ 5 พีกที่ $2\theta = 14.06^\circ, 17.16^\circ, 18.80^\circ, 21.41^\circ$ และ 22.09° ซึ่งมีความสัมพันธ์กับระนาบ (001), (040), (130), (111) และ (040) ตามลำดับ ในผลึกแบบแอลฟา (α -phase) ของ PP ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การเติม sorbitol-modified MMT เข้าไปใน PP ไม่มีผลต่อการเกิดผลึกแบบอัลฟาของ PP ใน PP nanocomposites เพราะชั้นซิลิเกตที่แยกออกจากกันมีขนาดเล็กมาก จึงไม่เป็นอุปสรรคต่อการเกิดผลึกของ PP

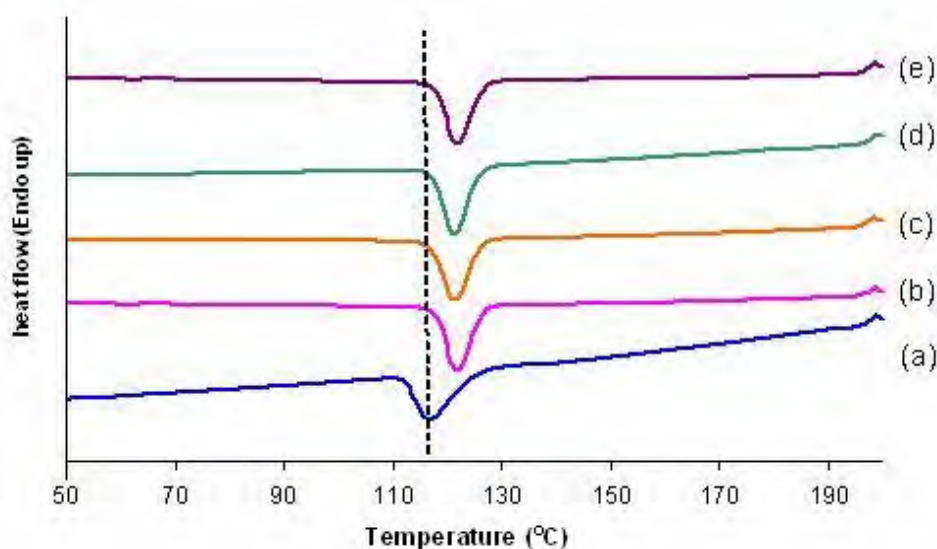
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดผลึกแบบแอลฟาของ PP และของ PP ในนาโนคอมพอสิตที่คำนวณจากความเข้มของพีกที่ระนาบ 110 (d_{110}) ด้วยสมการของเชอร์เรอร์ (Sherrer's Equation) พบว่าผลึกแบบแอลฟาของ PP ในนาโนคอมพอสิตมีขนาดเล็กกว่าใน PP บริสุทธิ์เล็กน้อย แสดงว่าชั้นของซิลิเกตใน sorbitol-modified MMT ที่กระจายอยู่ใน PP ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อกผลึกให้กับ PP ในนาโนคอมพอสิต จึงทำให้ผลึกแบบแอลฟาของ PP ในนาโนคอมพอสิตมีขนาดลดลง

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกแบบแอลฟาของ PP และของ PP ในนาโนคอมพอสิต

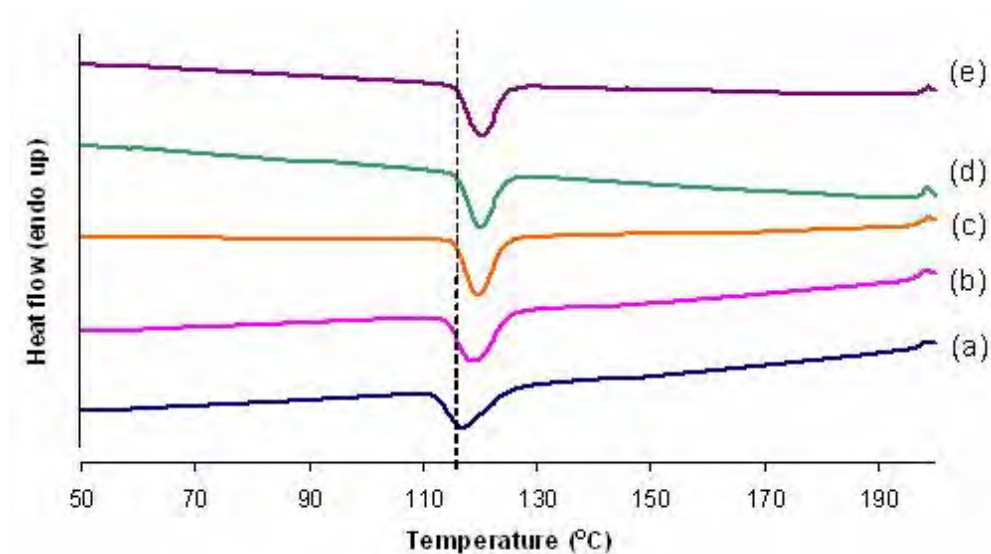
Composition	α -crystal diameter (nm)
Neat PP	60.80
100 PP/1 MMT	57.46
100 PP/3 MMT	56.78
100 PP/5 MMT	56.50
100 PP/7 MMT	59.00
100 PP/1 modified-MMT	53.79
100 PP/3 modified-MMT	54.20
100 PP/5 modified-MMT	60.68
100 PP/7 modified-MMT	58.69

4.3 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน และปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นของพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

สมบัติทางความร้อน และปริมาณผลึกที่เกิดขึ้นของ PP/sorbitol-modified MMT nanocomposites แสดงไว้ในรูปที่ 4.6-4.7 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.6 อุณหภูมิการก่อผลึก (T_c) ของ PP ใน (a) PP และ (b) 100 PP/1 modified-MMT, (c) 100 PP/3 modified-MMT, (d) 100 PP/5 modified-MMT และ (e) 100 PP/7 modified-MMT nanocomposites



รูปที่ 4.7 อุณหภูมิการก่อผลึก (T_c) ของ PP ใน (a) PP และ (b) 100 PP/1 MMT, (c) 100 PP/3 MMT, (d) 100 PP/5 MMT และ (e) 100 PP/7 MMT nanocomposites

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และปริมาณผลึก (X_c) ของ PP และ PP nanocomposites

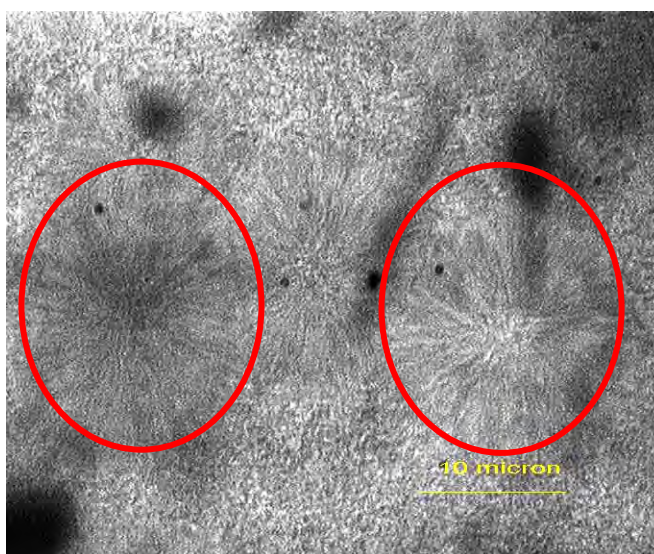
	PP	PP/modified-MMT				PP/MMT			
		100/1	100/3	100/5	100/7	100/1	100/3	100/5	100/7
T_c (°C)	115.42	122.72	122.06	122.30	122.78	119.42	120.29	120.57	120.78
ΔH (J/g)	90.30	101.50	93.01	91.62	93.15	93.20	91.25	94.12	88.50
X_c (%)	43.21	48.64	44.50	43.83	44.52	44.60	43.66	45.03	42.35
T_m (°C)	165.41	165.00	164.12	164.64	165.10	165.88	165.54	165.8	165.76

รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) ของ PP/modified-MMT nanocomposites มีค่าไม่ต่างจากของ PP/MMT nanocomposites และของพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ อีกทั้งยังสามารถตรวจพบได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีเพียงผลึกแบบแอลฟาเท่านั้นที่เกิดขึ้น ส่วนผลึกแบบบีตาและแบบแกมมาไม่สามารถถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้ด้วย MMT และ modified-MMT

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และปริมาณผลึกที่เกิดขึ้น (X_c) ของ PP, PP/modified-MMT nanocomposites และ PP/MMT nanocomposites ที่เตรียมได้จากสมการ $X_c = \Delta H_m / \Delta H_m^0$ พบว่า T_m ของ PP nanocomposites ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจาก PP บริสุทธิ์ แสดงว่าผลึกที่เกิดขึ้นมีเพียงผลึกแบบอัลฟาแบบเดียวเท่านั้น นอกจากนี้ พบว่า PP/modified-MMT nanocomposites มีปริมาณผลึกมากกว่าที่ใน PP/MMT nanocomposites และ PP บริสุทธิ์ เนื่องจากชั้นของซิลิเกตใน MMT และ modified-MMT สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับ PP ได้ จึงทำให้ PP สามารถเกิดผลึกได้ง่ายขึ้น และทำให้มี T_c สูงขึ้นด้วย

4.4 การตรวจสอบลักษณะผลึกของพอลิโพรพิลีน, พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรนาโนคอมพอสิต ด้วยเทคนิค polarized microscopy

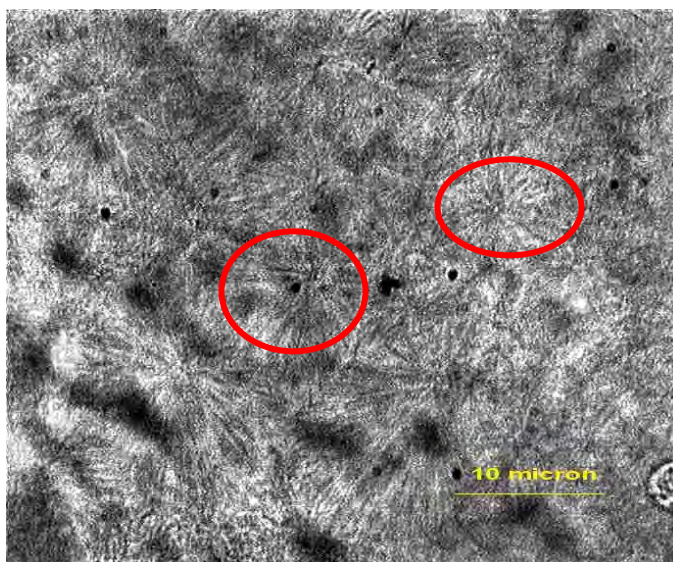
โดยปกติ PP ที่มีสเฟียรูไลต์ขนาดเล็กจะมีปริมาณความเป็นผลึกสูงกว่า และมีความเหนียวมากกว่า PP ที่มีสเฟียรูไลต์ขนาดใหญ่ ผลของ MMT และ modified-MMT ที่มีต่อขนาดและปริมาณผลึกของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.8-4.16



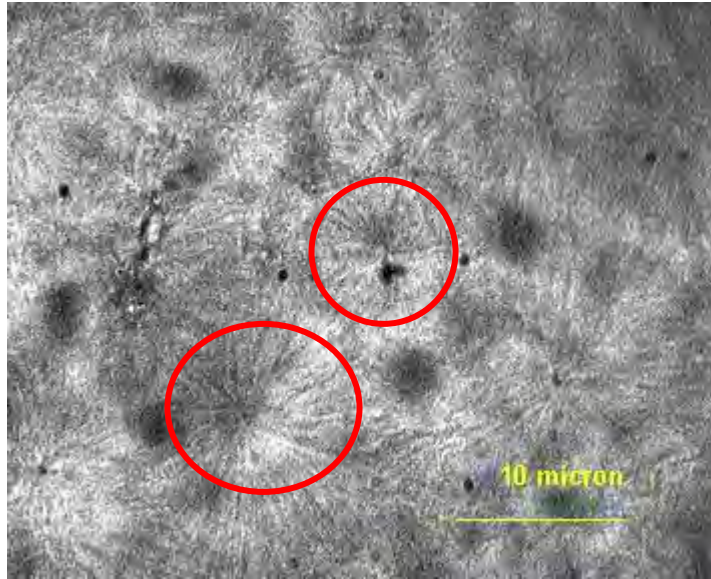
รูปที่ 4.8 ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ PP บริสุทธิ์



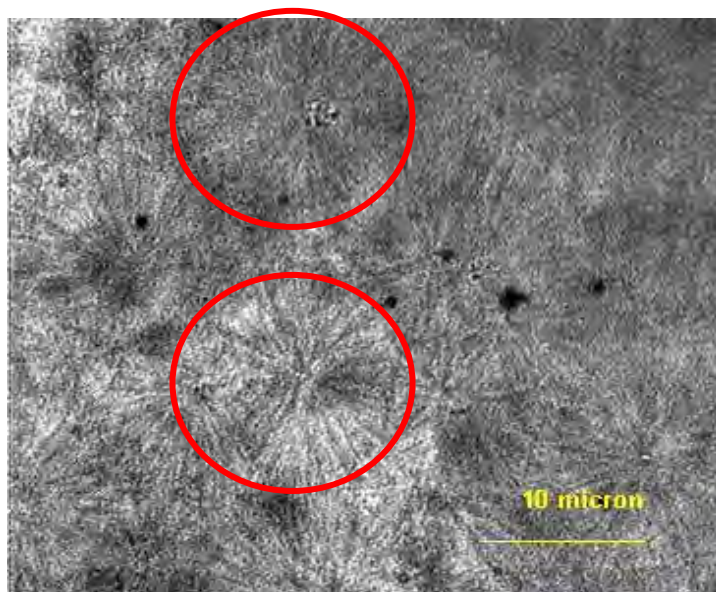
รูปที่ 4.9 ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ 100 PP/1 modified-MMT nanocomposite



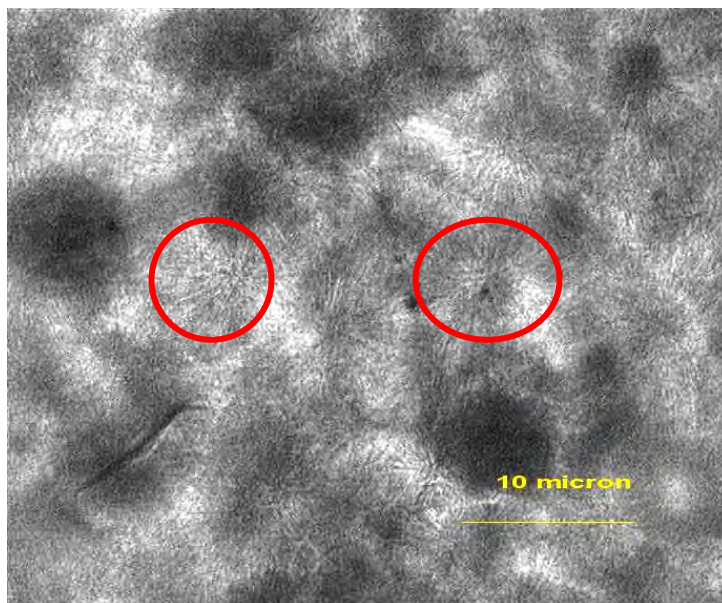
รูปที่ 4.10 ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ 100 PP/3 modified-MMT nanocomposite



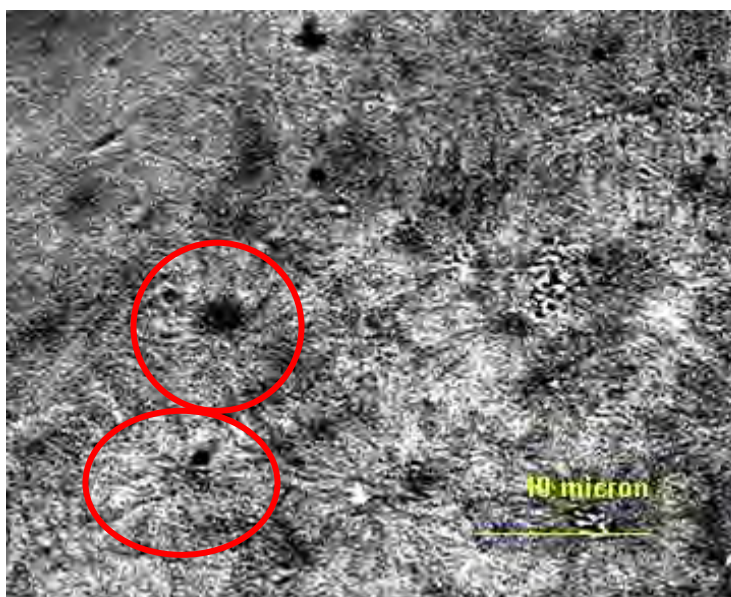
รูปที่ 4.11 ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ 100 PP/5 modified-MMT nanocomposite



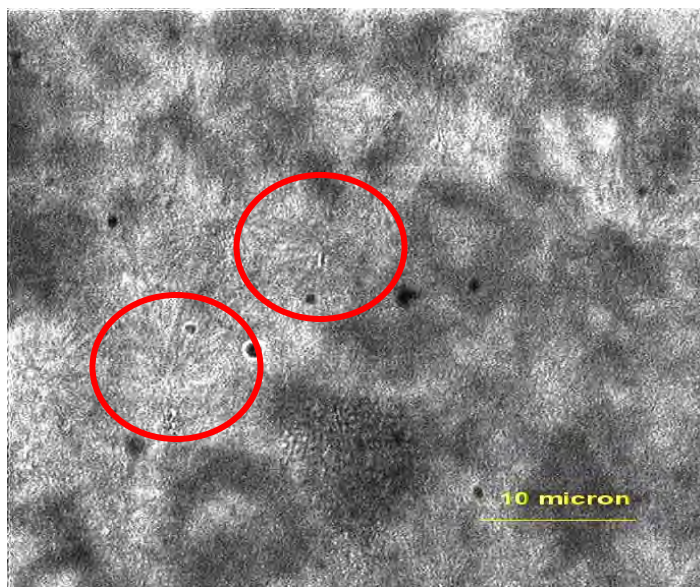
รูปที่ 4.12 ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ 100 PP/7 modified-MMT nanocomposite



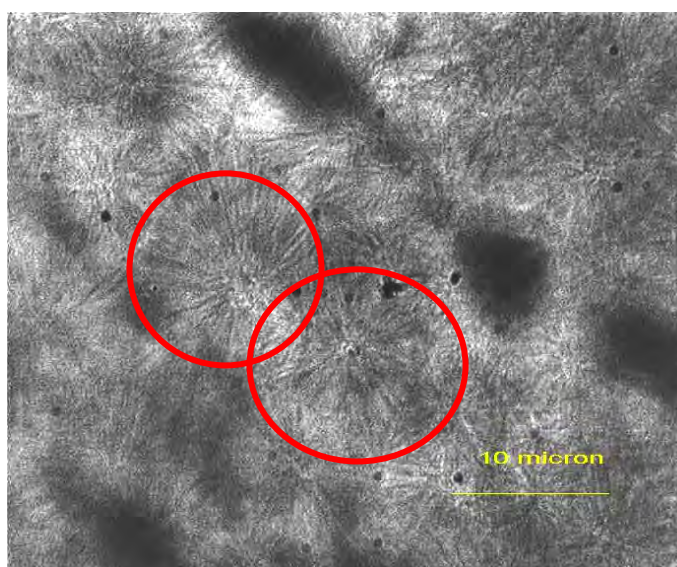
รูปที่ 4.13 ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ 100 PP/1 MMT nanocomposite



รูปที่ 4.14 ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ 100 PP/3 MMT nanocomposite



รูปที่ 4.15 ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ 100 PP/5 MMT nanocomposite

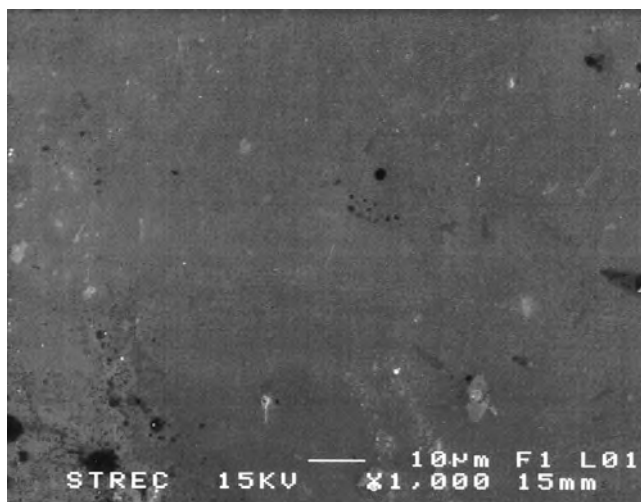


รูปที่ 4.16 ลักษณะสเฟียรูไลต์ของ 100 PP/7 MMT nanocomposite

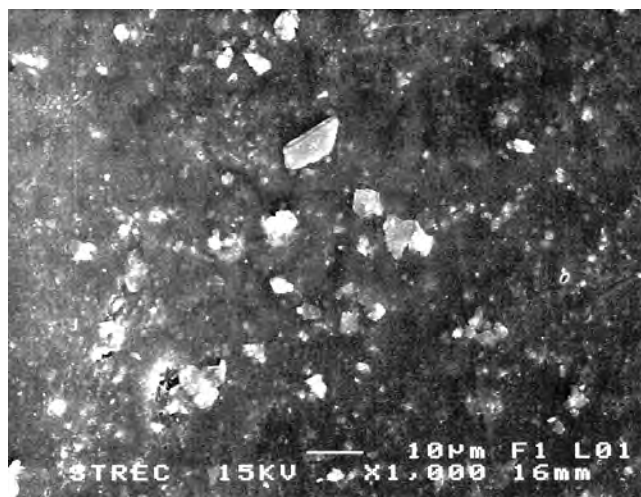
จากรูปที่ 4.8-4.16 แสดงให้เห็นว่า การเติม MMT และ modified-MMT ใน PP ช่วยเพิ่มปริมาณสเฟียรูไลต์และยังสามารถลดขนาดของสเฟียรูไลต์ได้ด้วย โดยสเฟียรูไลต์มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ MMT และ modified-MMT ใน PP แต่สเฟียรูไลต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นนี้ก็ยังมีขนาดเล็กกว่าสเฟียรูไลต์ของ PP บริสุทธิ์ แสดงว่า MMT ที่เติมลงไปใน PP สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกให้กับ PP

4.5 การตรวจสอบการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร
ในพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
(Scanning electron microscope, SEM)

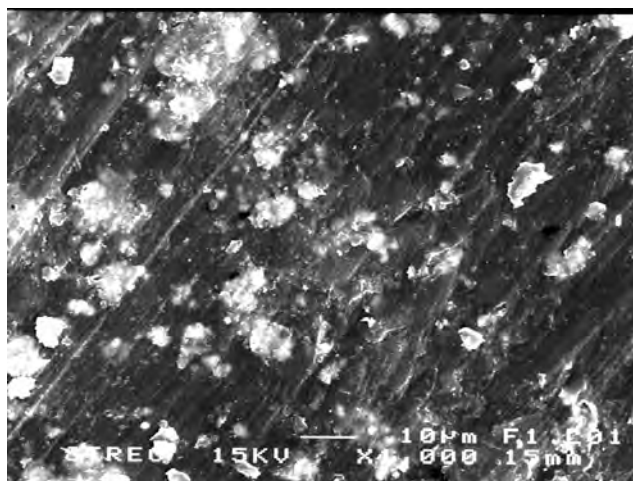
ความสามารถในการกระจายตัวของ MMT และ modified-MMT ที่ตรวจสอบด้วยกล้อง
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงไว้ในรูปที่ 4.17-4.25



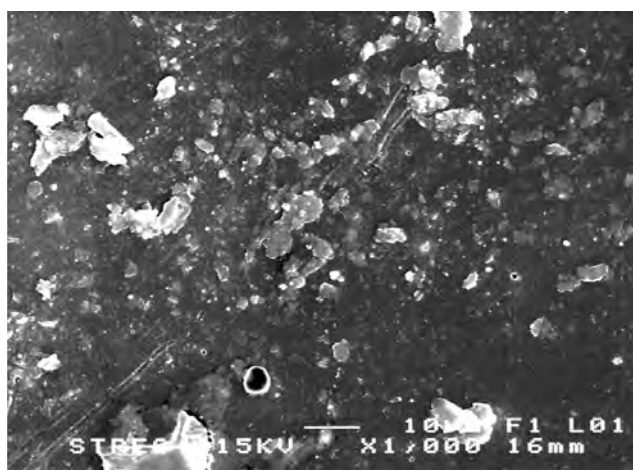
รูปที่ 4.17 ภาพ SEM ของ PP บริสุทธิ์



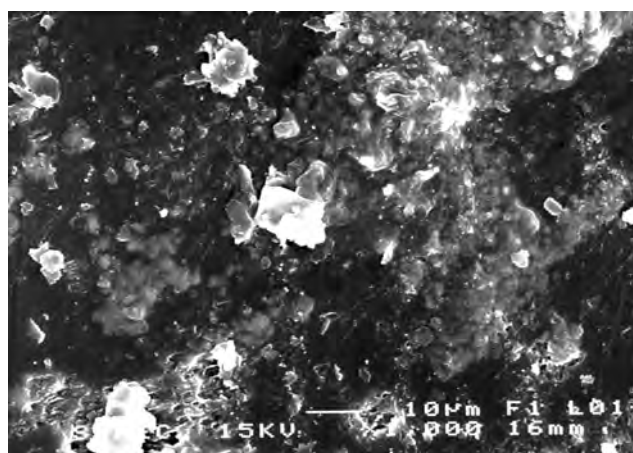
รูปที่ 4.18 ภาพ SEM ของ 100 PP/1 modified-MMT nanocomposite



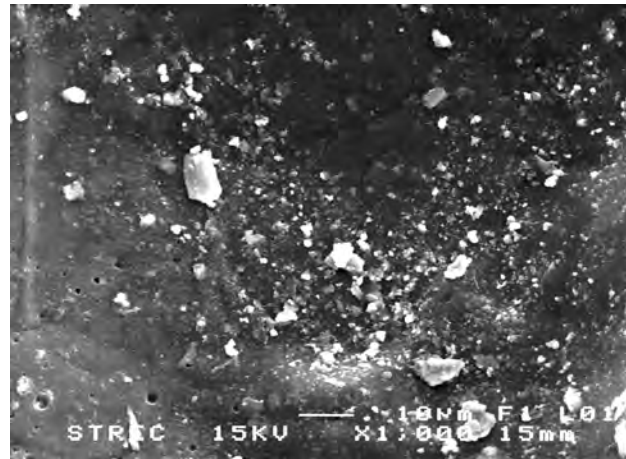
รูปที่ 4.19 ภาพ SEM ของ 100 PP/1 MMT nanocomposite



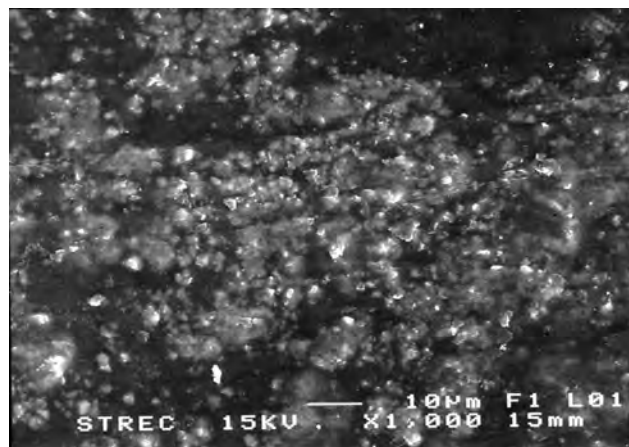
รูปที่ 4.20 ภาพ SEM ของ 100 PP/3 modified-MMT nanocomposite



รูปที่ 4.21 ภาพ SEM ของ 100 PP/3 MMT nanocomposite



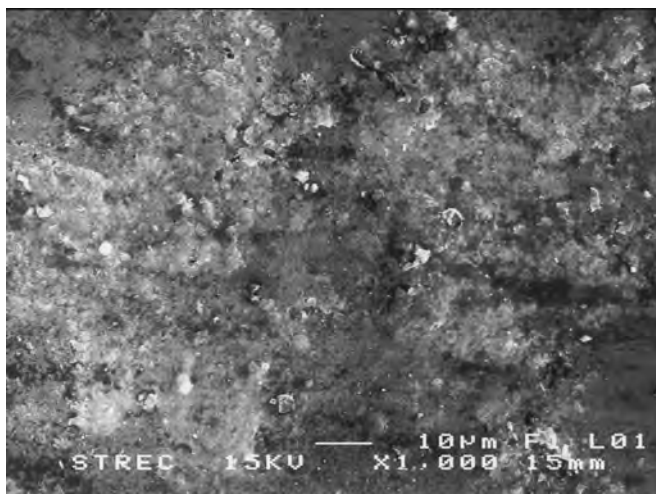
รูปที่ 4.22 ภาพ SEM ของ 100 PP/5 modified-MMT nanocomposite



รูปที่ 4.23 ภาพ SEM ของ 100 PP/5 MMT nanocomposite



รูปที่ 4.24 ภาพ SEM ของ 100 PP/7 modified-MMT nanocomposite

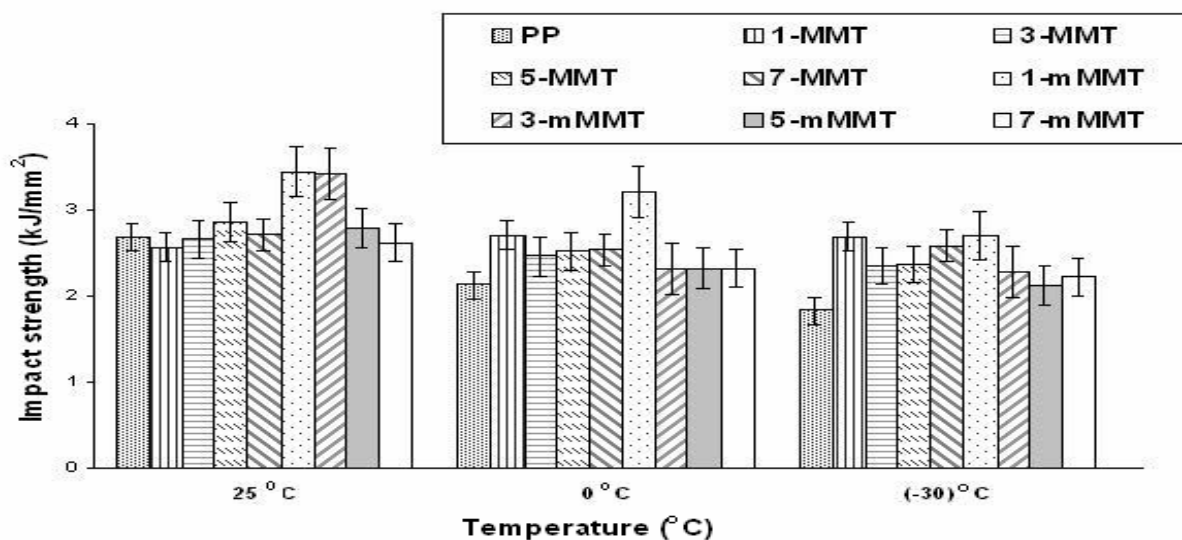


รูปที่ 4.25 ภาพ SEM ของ 100 PP/7 MMT nanocomposite

รูปที่ 4.18–4.25 แสดงสัณฐานวิทยาการกระจายตัวของ MMT และ modified-MMT ใน PP nanocomposites พบว่า sorbitol-modified MMT มีความสามารถในการกระจายตัวได้ดีกว่า MMT ที่ไม่ได้ดัดแปร แต่หากเติม sorbitol-modified MMT ในปริมาณมากกว่า 3 phr จะพบการเกาะกลุ่มกันของ MMT จึงทำให้ PP nanocomposites มีผลึกขนาดใหญ่ขึ้น และมีสเฟียรูไลต์ขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

4.6 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

ผลของการเติม MMT และ modified-MMT ต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของชิ้นงาน แสดงไว้ในรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.26 ความทนแรงกระแทกที่ 25°C, 0°C และ -30°C ของ PP และ PP nanocomposites

ตารางที่ 4.3 ความทนแรงกระแทกที่ 25°C, 0°C และ -30°C ของ PP และ PP nanocomposites

Impact strength(kJ/mm ²)	25°C	0°C	-30°C
PP	2.68 ± 0.16	2.13 ± 0.14	1.83 ± 0.14
1-MMT	2.57 ± 0.12	2.70 ± 0.17	2.68 ± 0.25
3-MMT	2.66 ± 0.22	2.46 ± 0.182	2.35 ± 0.07
5-MMT	2.86 ± 0.19	2.52 ± 0.220	2.37 ± 0.03
7-MMT	2.71 ± 0.18	2.53 ± 0.136	2.58 ± 0.08
1-modified-MMT	3.44 ± 0.24	3.21 ± 0.29	2.7 ± 0.22
3-modified-MMT	3.41 ± 0.30	2.31 ± 0.21	2.29 ± 0.07
5-modified-MMT	2.78 ± 0.12	2.32 ± 0.24	2.12 ± 0.20
7-modified-MMT	2.62 ± 0.11	2.32 ± 0.21	2.22 ± 0.17

จากรูปที่ 4.26 และ ตารางที่ 4.3 พบว่า PP nanocomposites มีความทนแรงกระแทกสูงกว่า พอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ในปริมาณ 1 phr ทำให้ชิ้นงานมีความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิ 25°C, 0°C และ -30°C สูงที่สุด ซึ่งเกิดจากการมีผลึกขนาดเล็ก (มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก) จึงทำให้มี tie molecule จำนวนมากแทรก อยู่ระหว่างสเฟียรูไลต์ โดย tie molecule เหล่านี้มีความยืดหยุ่นดี จึงทำให้สามารถดูดซับพลังงาน ที่เกิดจากการกระแทกได้ดีขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมากกว่า 5 phr พบว่า ความทนแรงกระแทกมีค่าลดลงเนื่องจากทั้ง MMT และ modified-MMT เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบเอกซ์โฟลิต

5.1.2 มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) ให้กับพอลิโพรพิลีนได้ โดยช่วยเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึก และอัตราการเกิดผลึกให้กับพอลิโพรพิลีน สเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็กลง และมีปริมาณผลึกมากกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์

5.1.3 มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยซอร์บิทอลสามารถกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ดัดแปร

5.1.4 นาโนคอมพอสิตของพอลิโพรพิลีนที่เติมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1 phr มีความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิห้อง, 0 องศาเซลเซียส และ -30 องศาเซลเซียส สูงสุด คือ 3.4, 3.2 และ 2.7 กิโลจูลต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ และมีค่าความเป็นผลึกมากกว่าพอลิโพรพิลีนบริสุทธิ์ร้อยละ 12.56

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรเพิ่มการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) เพื่อยืนยันโครงสร้างของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้

5.2.2 ควรเพิ่มการทดสอบความทนแรงกระแทกที่อุณหภูมิสูงด้วย เพื่อที่จะได้สามารถทราบช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิต

5.2.3 ควรศึกษาระยะเวลาห่างระหว่างชั้นซิลิเกตที่เพิ่มขึ้นหลังจากดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ว่ามีปริมาณของโมเลกุลซอร์บิทอลแทรกสอดอยู่เท่าไร

รายการอ้างอิง

- [1] Frank ,P.T.J., Eindhoven, V.D.B., 2002. Crystallization of isotactic polypropylene : The influence of stereo-defects. Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven.
- [2] นภดล เกิดดอนแฝก. 2544. การเกิดผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนโดยสารก่อผลึกที่ได้จากการรีไซเคิลขวดพลาสติกที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] James, L. W., David D. C. 2005. Polyolefins : Processing, Structure Development and Properties. Germany: Hanser Publishers.
- [4] Lehmann, B., Friedrich, K., CHUN, L. W., Ming, Q. Z. and MIN, Z. R. 2003. Improvement of notch toughness of low nano-SiO₂ filled polypropylene composites. Journal of materials science letters. 22: 1027–1030.
- [5] Zhang, H., Zhang, Z. 2007. Impact behaviour of polypropylene filled with multi-walled carbon nanotubes. European polymer journal. 43(8): 3197-3207.
- [6] Clive, M., Teresa, C. 1998. Polypropylene. Plastics Design Library. the United state of America: William Andrew Inc.
- [7] Paul, C. P. and Michael M. C. 1994. Fundamentals of Polymer Science - An Introductory Text. Cambridge: University of Cambridge.
- [8] Romankiewicz, A., Sterzynski, T., Brostow, W. 2004. Structural Characterization of α - and β -Nucleated Isotactic Polypropylene. Polymer International. 53: 2086-2091.
- [9] Beck, H.N. 1967. Heterogeneous Nucleating Agents for Polypropylene Crystallization. Journal of Applied Polymer Science. 11: 673-685.
- [10] อรุณา สรวารี. 2000. สารเติมแต่ง (Additive). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [11] Deshmane, C., Yuan, Q., Perkins, R.S., and Misra, R.D.K. 2007. On Striking Variation in Impact Toughness of Polyethylene-Clay and Polypropylene-Clay-Polymer Interaction. Materials Science and Engineering A. 458: 150-157.

- [12] สุธีรัตน์ ใช้เอกปัญญา. 2550. การเตรียมนาโนคอมพอสิตพอลิโพรพิลีน/แป้งมัน – สำหรับหลัง/มอนต์มอริลโลไนต์.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [13] ระพีพรรณ ทงระอา.2548. การเตรียมนาโนคอมพอสิตของพีวีซี/อีวีเอ/มอนต์มอริลโลไนต์.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [14] Clois, E. P. and Gary, W. B. 2004. Physical Properties of Polymer/Clay Nanocomposites.chapter 33. Texas: Texas State University.
- [15] Bergaya, F., Theng, B.K.G., Lagaly, G. 2006 Handbook of clay science, Elsevier Ltd.
- [16] บงกช นันทบุญเลิศ. 2548. การเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/อีวีเอ/มอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [17] รัตน์วรรณ มกรพันธุ์. นาโนเคลย์/นาโนคอมพอสิต (Nanoclay/Nanocomposites) [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: www.thaiscience.com/lab_vol/P18/NANOCLAY.asp [2552, มกราคม 3]
- [18] Ray, S. S., Pouliot, S., Bousmina, M., and Utracki, L.A. 2004. Role of Organically Modified Layered Silicate as an Active Interfacial Modifier in Immiscible Polystyrene/Polypropylene Blends. Polymer.45: 8403-8413.
- [19] Ma, X., Yu, J., and Wang, N. 2007. Production of Thermoplastic Starch/MMT-Sorbitol Nanocomposites by Dual-Melt Extrusion Process. Macromolecular Materials and Engineering. 292: 723-728.
- [20] Madhuchhanda, S., Kausik, D., Sankar, G. and Manath B. 2008. Polypropylene–clay composite prepared from Indian bentonite. Bulletin Materials Science. 31(1): 23–28.
- [21] Jimmy W. sorbitol [online]. Available <http://en.wikipedia.org/wiki/Sorbitol>. [2551, October 2]
- [22] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

- [23] Wang, S., Hu, Y., Zong, R., Tang, Y., Chen, Z., and Fan, W. 2004. Preparation and Characterization of Flame Retardant ABS/Montmorillonite Nanocomposite. Applied Clay Science. 25: 49-55.
- [24] Ray, S.S., and Okamoto, M. 2003. Polymer/layered Silicate Nanocomposites: a Review from Preparation to Processing. Progress in Polymer Science. 28: 1539-1641.
- [25] Kojima, Y., Usuki, A., Kawasumi, M., Okada, A., Kurauchi, T., Kamigaito, O. 1993. Synthesis of nylon 6-clay hybrid by montmorillonite intercalated with 3-caprolactam. Journal of polymer science: Part A: polymer chemistry. 31: 983.
- [26] Moore, D. M., Reynolds J. R. C. 1997. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals; 2nd edition.; Oxford University Press; Oxford.
- [27] Huang, L., Renbo, Z. and Yafei, L. 2006. Mechanical Properties and Crystallization Behavior of Polypropylene/Nano-SiO₂ Composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites. 25: 1001-1012.
- [28] Calcagno, C.I.W., Mariani, C.M., Teixeira, S.R., and Mauler, R.S. 2007. The Effect of Organic Modifier of the Clay on Morphology and Crystallization Properties of PET Nanocomposites. Polymer. 48: 966-974.
- [29] Xu, J.T., Wang, Q. and Fan, Z.Q. 2005. Non-isothermal Crystallization Kinetics of Exfoliated and Intercalated Polyethylene/Montmorillonite Nanocomposites Prepared by in situ Polymerization. European Polymer Journal. 41: 3011-3017.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบ

ตารางที่ 1 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน, และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิต ที่อุณหภูมิ 25°C

25 °C	PP	1-MMT	3-MMT	5-MMT	7-MMT
kJ/mm^2	2.51	2.69	2.82	2.73	2.82
	2.73	2.51	2.51	2.88	2.88
	2.82	2.47	2.77	2.51	2.82
	2.66	2.60	2.63	2.95	2.51
	2.59	2.52	2.56	2.98	2.51
STD	0.161	0.118	0.221	0.194	0.185
เฉลี่ย	2.68	2.57	2.66	2.86	2.71

ตารางที่ 2 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย ซอร์บิทอลนาโนคอมพอสิต ที่อุณหภูมิ 25°C

25 °C	PP	1-mMMT	3-mMMT	5-mMMT	7-mMMT
kJ/mm^2	2.51	3.45	3.13	2.66	2.51
	2.73	3.29	3.76	2.88	2.51
	2.82	3.33	3.13	2.66	2.73
	2.66	3.29	3.57	2.82	2.66
	2.59	3.76	3.13	2.60	2.62
STD	0.161	0.238	0.299	0.119	0.111
เฉลี่ย	2.68	3.44	3.41	2.78	2.62

ตารางที่ 3 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์
นาโนคอมพอสิต ที่อุณหภูมิ 0°C

0 °C	PP	1-MMT	3-MMT	5-MMT	7-MMT
kJ/mm^2	2.02	2.89	2.60	2.60	2.66
	2.17	2.60	2.89	2.26	2.40
	2.05	2.61	2.46	2.61	2.60
	2.31	2.77	2.60	2.60	2.45
	2.14	2.59	2.61	2.89	2.51
STD	0.138	0.167	0.182	0.226	0.136
เฉลี่ย	2.13	2.70	2.64	2.52	2.53

ตารางที่ 4 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย
ซอร์บิทอลนาโนคอมพอสิต ที่อุณหภูมิ 0°C

0 °C	PP	1-mMMT	3-mMMT	5-mMMT	7-mMMT
kJ/mm^2	2.02	3.48	2.02	2.17	2.60
	2.17	3.47	2.31	2.17	2.31
	2.05	3.62	2.17	2.31	2.38
	2.31	2.60	2.52	2.60	2.02
	2.14	3.62	2.26	2.66	2.46
STD	0.138	0.529	0.215	0.236	0.214
เฉลี่ย	2.13	3.29	2.26	2.22	2.31

ตารางที่ 5 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์
นาโนคอมพอสิต ที่อุณหภูมิ (-30)°C

(-30) °C	PP	1-MMT	3-MMT	5-MMT	7-MMT
kJ/mm^2	1.88	2.75	2.46	2.26	2.60
	1.73	2.73	2.43	2.31	2.46
	2.02	2.38	2.47	2.38	2.66
	2.03	2.89	2.31	2.34	2.43
	1.87	2.53	2.54	2.29	2.54
STD	0.138	0.251	0.072	0.028	0.083
เฉลี่ย	1.92	2.68	2.42	2.30	2.53

ตารางที่ 6 ความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย
ซอร์บิทอลนาโนคอมพอสิต ที่อุณหภูมิ (-30)°C

(-30) °C	PP	1-mMMT	3-mMMT	5-mMMT	7-mMMT
kJ/mm^2	1.88	2.46	2.31	2.31	2.31
	1.73	2.89	2.34	2.02	2.02
	2.02	2.60	2.38	2.26	2.34
	2.03	3.18	2.17	2.08	2.19
	1.87	2.77	2.29	2.15	2.25
STD	0.138	0.221	0.072	0.204	0.167
เฉลี่ย	1.92	2.78	2.28	2.17	2.22

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

น.ส. อาจารย์ อัสวดีลภฤทธิ เกิดเมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ.2528 สำเร็จการศึกษา
รับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549 หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์
พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นของปีการศึกษา 2550 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี