ผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่อการเกิดนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีน

นางสาวพนิตนันท์ ศรีสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF MONTMORILLONITE CONTENT ON NUCLEATION OF POLYPROPYLENE

Miss Phanitnan Srisuwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology
Department of Materials Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2009
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่อการเกิดนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีน
โดย	นางสาวพนิตนันท์ ศรีสุวรรณ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. วรรณี ฉินศิริกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. วรรณี ฉินศิริกุล)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข)

พนิตนันท์ ศรีสุวรรณ : ผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่อการเกิดนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีน. (EFFECTS OF MONTMORILLONITE CONTENT ON NUCLEATION OF POLYPROPYLENE). อ.ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ : รศ. อรอุษา สรวารี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ดร. วรรณี ฉินศิริกุล, 131 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรต่อการเกิดนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีน โดยนำพอลิโพรพิลีนผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมแบบปิด จากนั้น นำพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน โดยกระบวนการแบบอัดและแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว นำชิ้นงานไปตรวจสอบประสิทธิภาพในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของมอนต์-มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรีและเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ศึกษาสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่าง

จากการทดลองพบว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรแม้ปริมาณเพียงเล็กน้อย มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการเกิดผลึกและดีกรีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น รวมทั้งทำให้สเฟียรูไลต์พอลิโพรพิลีนมีขนาดเล็กลง ชี้ให้เห็นว่า ทั้งมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนได้ โดยมอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพสูงกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร จากเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมแสดงให้เห็นว่า มอนต์มอริลโลไนต์ชักนำให้พอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบแอลฟา ในขณะที่มอนต์-มอริลโลไนต์ดัดแปรชักนำให้เกิดผลึกแบบแอลฟาส่วนใหญ่และมีผลึกแบบบีตาปะปนอยู่ในปริมาณต่ำ ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลพบว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้งชนิดที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้เสถียรภาพทางความร้อน ความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จากการพิจารณาประสิทธิภาพการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกและความสามารถในการกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนเมทริกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร รวมทั้งเสถียรภาพทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิโพรพิลีน ทำให้สรุปได้ว่า ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เหมาะสมในการผสมกับพอลิโพรพิลีนทั้งกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดและแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวคือ 1.0% และ 0.1% โดยน้ำหนักตามลำดับ

ภาควิชา วัสดุศาสตร์ ลายมือชื่อนิสิต..

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก...........

ปีการศึกษา 2552 ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม............

#5072662723: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : NUCLEATION / POLYPROPYLENE / MONTMORILLONITE

PHANITNAN SRISUWAN : EFFECTS OF MONTMORILLONITE CONTENT ON NUCLEATION OF POLYPROPYLENE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. ONUSA SARAVARI , THESIS CO-ADVISOR: WANNEE CHINSIRIKUL, Ph.D., 131 pp.

In this research, the effects of montmorillonite (MMT) and organomodified-montmorillonite (OMMT) content on nucleation of polypropylene (PP) were investigated. The PP/MMT and PP/OMMT composites containing different MMT or OMMT content (0.075-3.0 wt%) were prepared by a melt blending process using an internal mixer, followed by compression molded or single-screw casted into sheets. The nucleation effect of MMT and OMMT was characterized by differential scanning calorimetry and x-ray diffraction (XRD) technique. The thermal and mechanical properties of the PP composites were also studied.

It was found that the addition of even a very small amount of MMT or OMMT into PP resulted in a higher crystallization temperature, a higher degree of crystallinity, and a smaller size of spherulites. This indicated that both MMT and OMMT are able to nucleate PP in which MMT is more efficient. The XRD patterns showed that the addition of MMT did not affect the crystal structure of PP, i.e. the crystallites are α-phase. However, the crystallites of PP with OMMT addition are mostly α-phase with a minority of β-phase. Thermogravimetric analysis and mechanical properties test revealed that the thermal stability and the tensile and impact strengths of PP tended to be better with the optimum concentration of MMT or OMMT addition.

Considering the nucleating efficiency and the dispersibility in PP matrix of MMT or OMMT, the thermal stability, and the mechanical properties, it can be concluded that the optimum content of MMT and OMMT to be used as nucleating agent for PP in both compression molding and extruder sheet process were 1.0 and 0.1 wt% , respectively.

Department: Materials Science Student's Signature…………………...

Field of Study: Applied Polymer Science and Textile technology Advisor's Signature…………………...

Academic Year: 2009 Co-Advisor's Signature……………

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้นเป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัตถุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆเป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายนามดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ อรอุษา สรวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.วรรณี ฉินศิริกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาและแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

3. รองศาสตราจารย์ ดร. วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์ และ รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. คุณนพดล เกิดดอนแฝก ที่ให้คำแนะนำและแก้ปัญหาในการทำวิทยานิพนธ์อย่างดี

5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มัณฑนา โอภาประกาสิต ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์

6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า คะชิมา ที่ให้คำแนะนำซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์

7. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบ

9. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบและเครื่องมือ

10. ทุนโครงการส่งเสริมการสร้างนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภายใต้แผนพัฒนาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 100 ปี ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัย

11. บริษัท เอชเอ็มซี โปลีเมอส์ จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัย

12. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชาย ที่ให้การสนับสนุนในด้านกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่	
1. บทนำ	1
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พอลิโพรพิลีน	3
2.1.1 การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีน	3
2.1.2 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน	4
2.1.3 สมบัติทั่วไปของพอลิโพรพิลีน	5
2.1.4 โครงสร้างผลึกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน	6
2.1.4.1 รูปผลึกแบบแอลฟา	8
2.1.4.2 รูปผลึกแบบบีตา	9
2.1.4.3 รูปผลึกแบบแกมมา	9
2.1.4.4 รูปผลึกแบบสเมกติก	10
2.2 สารก่อผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน	11
2.2.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของสารก่อผลึก	13
2.2.2 ผลของสารก่อผลึกต่อสมบัติพอลิเมอร์	14
2.3 แร่ดิน	17
2.3.1 มอนต์มอริลโลไนต์	19
3. วิธีดำเนินงานวิจัย	25
3.1 วัตถุดิบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	25
3.1.1 วัตถุดิบ	25
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	26
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	26

หน้า

บทที่

3.2 วิธีการเตรียมและขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต 27
3.2.1 วิธีที่ 1 : กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด 29
3.2.1.1 การผสมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต 29
3.2.1.2 การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต 29
3.2.2 วิธีที่ 2 : กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 29
3.2.2.1 การผสมพอลิโพรพิลีนคอมพาวนด์เข้มข้น 29
3.2.2.2 การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต 29
3.3 การตรวจสอบมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 30
3.3.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 30
3.3.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทร-
โฟโตมิเตอร์ 30
3.3.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ 30
3.3.4 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ 31
3.4 การตรวจสอบการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิโพรพิลีน 31
3.4.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ 31
3.5 การตรวจสอบประสิทธิภาพของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดที่ไม่ผ่านการ
ดัดแปรและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรในการทำหน้าที่เป็น
สารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน 31
3.5.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ 31
3.5.2 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า 31
3.5.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์ 32
3.5.4 การตรวจสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์ 32
3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิโพรพิลีน 33
3.6.1 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง 33
3.6.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก 33
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 34
4.1 การตรวจสอบมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 34
4.1.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 34

หน้า

บทที่

4.1.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทร-
โฟโตมิเตอร์ 36
4.1.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ 37
4.1.4 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ 38
4.2 การตรวจสอบการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิโพรพิลีน
ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ 39
4.2.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด 39
4.2.2 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 43
4.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดที่ไม่ผ่านการดัดแปร
และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรในการทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียส
ผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน 46
4.3.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ 46
4.3.1.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด 46
4.3.1.2 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 48
4.3.2 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า 50
4.3.2.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด 50
4.3.2.2 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่น
สกรูเดี่ยว 51
4.3.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์ 54
4.3.3.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด 54
4.3.3.2 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่น
สกรูเดี่ยว 57
4.3.4 การตรวจสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์ 60
4.3.4.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด 60
4.3.4.2 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่น
สกรูเดี่ยว 62
4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิโพรพิลีน 64
4.4.1 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง 64

หน้า

บทที่

4.4.1.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด......64

4.4.1.2 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว......66

4.4.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก......70

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ......73

5.1 สรุปผลการทดลอง......73

5.2 ข้อเสนอแนะ......75

รายการอ้างอิง......76

ภาคผนวก......78

ภาคผนวก ก......79

ภาคผนวก ข......86

ภาคผนวก ค......94

ภาคผนวก ง......111

ภาคผนวก จ......128

ภาคผนวก ฉ......130

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์......131

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ผลของสารก่อผลึกชนิดต่างๆ ต่อสมบัติพอลิโพรพิลีน 12
ตารางที่ 2.2 ขนาดผลึก L_{hkl} ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์คอมพอสิต 22
ตารางที่ 3.1 สูตรต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต 28
ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 50
ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 52
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 55
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 57
ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 60
ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 62
ตารางที่ 4.7 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 64

หน้า

ตารางที่ 4.8 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 67
ตารางที่ 4.9 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 70

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบสเตอริโอของพอลิโพรพิลีน (a) ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (b) ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน และ (c) อะแทกติกพอลิโพรพิลีน 5
รูปที่ 2.2 คอนฟอร์เมชันของสายโซ่ไอโซพอลิโพรพิลีนแทกติก 6
รูปที่ 2.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบ (a) แอลฟา (b) บีตา และ (c) แกมมา 7
รูปที่ 2.4 ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบแอลฟาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน บนระนาบ ab โดยแกน c ตั้งฉากกับระนาบ 8
รูปที่ 2.5 ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบบีตาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบน ระนาบ ab โดยแกน c ตั้งฉากกับระนาบ 9
รูปที่ 2.6 ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบแกมมาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน บนระนาบ ab โดยแกน c ตั้งฉากกับระนาบ 10
รูปที่ 2.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบ สเมกติก 11
รูปที่ 2.8 ผลของสารก่อผลึกต่อขนาดของผลึกสเฟียรูไลต์ในพอลิโพรพิลีน 11
รูปที่ 2.9 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของพอลิโพรพิลีน 13
รูปที่ 2.10 ผลของสารก่อผลึกชนิดต่างๆในพอลิโพรพิลีนจากการทดสอบด้วยเทคนิค ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี 15
รูปที่ 2.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนและไอโซแทกติก พอลิโพรพิลีนที่มีการใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก 16
รูปที่ 2.12 รูปถ่ายสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีนจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (a) ไม่ใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก (b) ใส่ ADK NA 21 0.1% โดยน้ำหนัก และ (c) ใส่ Millad 0.1% โดยน้ำหนัก 16
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเกาลินไนต์ 18
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของอิลไลต์ 19
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ 19
รูปที่ 2.16 การแลกเปลี่ยนโซเดียมไอออนด้วยควอเทอร์แนรีแอมโมเนียม 20
รูปที่ 2.17 การกระจายของเคลย์ในพอลิเมอร์ 21

หน้า

รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (a) พอลิโพรพิลีน และ (b) พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ (ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก) 22
รูปที่ 2.19 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาลิซิสของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักพอลิโพรพิลีน) นาโนคอมพอสิต 23
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของ methyl, tallow, bis-2-hydroxyethyl, quaternary ammonium (MT2EtOH) 25
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต 27
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของมอนต์มอริลโลไนต์ที่กำลังขยาย (a) 200 เท่า และ (b) 10,000 เท่า 34
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่กำลังขยาย (a) 200 เท่า และ (b) 10,000 เท่า 35
รูปที่ 4.3 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ และ (b) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 36
รูปที่ 4.4 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ และ (b) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 37
รูปที่ 4.5 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ และ (b) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 38
รูปที่ 4.6 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (a) MMT, (b) PP/MMT 0.075%, (c) PP/MMT 0.1%, (d) PP/MMT 0.5%, (e) PP/MMT 1.0%, (f) PP/MMT 1.5%, (g) PP/MMT 2.0%, (h) PP/MMT 2.5% และ (i) PP/MMT 3.0% 39

หน้า

รูปที่ 4.7 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (a) OMMT, (b) PP/OMMT 0.075%, (c) PP/OMMT 0.1%, (d) PP/OMMT 0.5%, (e) PP/OMMT 1.0%, (f) PP/OMMT 1.5%, (g) PP/OMMT 2.0%, (h) PP/OMMT 2.5% และ (i) PP/OMMT 3.0% 40

รูปที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของนาโนคอมพอสิต (a) OMLS, (b) Intercalated, (c) Intercalated and flocculated และ (d) Exfoliated 41

รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (a) PP, (b) PP/OMMT 1.0% และ(c) PP/OMMT 3.0% 42

รูปที่ 4.10 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (a) MMT, (b) PP/MMT 0.075%, (c) PP/MMT 0.1%, (d) PP/MMT 0.5%, (e) PP/MMT 1.0%, (f) PP/MMT 1.5%, (g) PP/MMT 2.0%, (h) PP/MMT 2.5% และ (i) PP/MMT 3.0% 43

รูปที่ 4.11 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (a) OMMT, (b) PP/OMMT 0.075%, (c) PP/OMMT 0.1%, (d) PP/OMMT 0.5%, (e) PP/OMMT 1.0%, (f) PP/OMMT 1.5%, (g) PP/OMMT 2.0%, (h) PP/OMMT 2.5% และ (i) PP/OMMT 3.0% 44

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (a) PP, (b) PP/OMMT 1.0% และ (c) PP/OMMT 3.0% 45

หน้า

รูปที่ 4.13 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์-มอริลโลไนต์ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (a) PP, (b) PP/MMT 0.075%, (c) PP/MMT 0.1%, (d) PP/MMT 0.5%, (e) PP/MMT 1.0%, (f) PP/MMT 1.5%, (g) PP/MMT 2.0%, (h) PP/MMT 2.5% และ (i) PP/MMT 3.0% 46

รูปที่ 4.14 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์-มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (a) PP, (b) PP/OMMT 0.075%, (c) PP/OMMT 0.1%, (d) PP/OMMT 0.5%, (e) PP/OMMT 1.0%, (f) PP/OMMT 1.5%, (g) PP/OMMT 2.0%, (h) PP/OMMT 2.5% และ (i) PP/OMMT 3.0% 47

รูปที่ 4.15 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์-มอริลโลไนต์ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (a) PP, (b) PP/MMT 0.075%, (c) PP/MMT 0.1%, (d) PP/MMT 0.5%, (e) PP/MMT 1.0%, (f) PP/MMT 1.5%, (g) PP/MMT 2.0%, (h) PP/MMT 2.5% และ (i) PP/MMT 3.0% 48

รูปที่ 4.16 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์-มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (a) PP, (b) PP/OMMT 0.075%, (c) PP/OMMT 0.1%, (d) PP/OMMT 0.5%, (e) PP/OMMT 1.0%, (f) PP/OMMT 1.5%, (g) PP/OMMT 2.0%, (h) PP/OMMT 2.5% และ (i) PP/OMMT 3.0% 49

รูปที่ 4.17 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 51

รูปที่ 4.18 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 52

หน้า

รูปที่ 4.19 อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 56

รูปที่ 4.20 ดีกรีของความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 56

รูปที่ 4.21 อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 58

รูปที่ 4.22 ดีกรีของความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 58

รูปที่ 4.23 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 61

รูปที่ 4.24 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 63

รูปที่ 4.25 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 65

รูปที่ 4.26 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด 65

หน้า

รูปที่ 4.27 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 67
รูปที่ 4.28 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว 68
รูปที่ 4.29 ค่าความทนแรงกระแทกแบบ Izod ของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนัก 71
รูปที่ 4.30 ค่าความทนแรงกระแทกแบบ Izod ของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนัก 71

บทที่ 1

บทนำ

พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างแบบสเตอริโอ (stereo configurations) ได้ 3 แบบคือ แบบไอโซแทกติก (isotactic) แบบซินดิโอแทกติก (syndiotactic) และแบบอะแทกติก (atactic) แต่แบบที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางคือ แบบไอโซแทกติก โดยไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (iPP) สามารถเกิดผลึกได้ 4 รูปแบบที่แตกต่างกันตามการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล ได้แก่ รูปแบบผลึกแบบแอลฟา (α-form) แบบบีตา (β-form) แบบแกมมา (γ-form) และแบบสเมกติก (smectic) ซึ่งรูปผลึกแต่ละแบบจะมีลักษณะเฉพาะ เช่น ความหนาแน่น รูปแบบการหลอมเหลว และรูปแบบการกระเจิงหรือเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction pattern) ที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างผลึกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน จะประกอบด้วยผลึกแบบแอลฟาเป็นส่วนใหญ่ และอาจมีผลึกแบบบีตาบ้างเป็นส่วนน้อย ซึ่งไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกส่วนใหญ่เป็นแบบแอลฟา จะมีมอดุลัสและความทนแรงดึงสูง ความทนแรงกระแทกปานกลาง ในขณะที่พอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบบีตาเป็นส่วนใหญ่ จะมีมอดุลัสและความทนแรงดึงต่ำกว่า แต่มีความทนแรงกระแทกและสมบัติการยืด ณ จุดขาดสูงกว่า

สำหรับพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีอัตราการเติบโตของผลึกปานกลางและสามารถทำให้เกิดผลึกได้เร็วขึ้นโดยอาศัยวิธีการเกิดนิวเคลียสแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous nucleation) จากการใส่สารก่อผลึกลงไป ซึ่งสารก่อผลึกจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเติบโตของผลึก ทำให้ได้สเฟียรูไลต์ที่มีขนาดสม่ำเสมอเล็กลง และมีดีกรีของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ซึ่งการใช้สารก่อผลึกกับ พอลิโพรพิลีนจะทำให้เกิดแต่ผลึกแบบแอลฟาและบีตาเท่านั้น สำหรับสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกแบบแอลฟาสำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมทีบิวทิลเบโซเอต (sodium-t-butyl benzoate) อะลูมิเนียมเบนโซเอต (aluminium benzoate) ไดเบนซิลลิดีนซอร์บิทอล (dibenzylidene sorbitol, DBS) ทัลค์ เคาลิน ฯลฯ โดยสารอินทรีย์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าสารอนินทรีย์ ส่วนสารเคมีที่มีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกแบบบีตา สำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีหลายชนิด ได้แก่ ผงสีควินาคริโดน (quinacridone pigment) ไดโซเดียมฟทาเลต (disodium phthalate) แคลเซียมสเตียเรต (calcium stearate) ฯลฯ ซึ่งในการทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบบีตาจากการใช้สารก่อผลึก พบว่า ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีผลึกแบบแอลฟาอยู่ร่วมด้วยเสมอไม่มากก็น้อย

ในปัจจุบันแร่มอนต์มอริลโลไนต์กำลังได้รับความสนใจกันอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้งานในด้านต่างๆ เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และมีปริมาณมากในธรรมชาติ โดยมีลักษณะสำคัญคือ มีโครงสร้างของชั้นผลึกเป็นแบบ 2:1 ประกอบด้วยชั้นอะลูมินาออกตะฮีดรอล (octahedral) อยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิกาเตตระฮีดรอล (tetrahedral) ความหนาของชั้นผลึก 2:1 ประมาณ 0.7-1.0 นาโนเมตร ในขณะที่ความยาวด้านข้างอยู่ในระดับไมครอน โดยผิวหน้าผลึกมีประจุเป็นลบ จึงมักมีประจุบวกของแมกนีเซียม อะลูมิเนียม โซเดียม หรือแคลเซียม และอื่นๆ เข้ามาแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นผลึก ที่เรียกว่า gallery เพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ และช่วยยึดผลึกที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน มอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งอาจเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือชอบสารอินทรีย์โดยการแทนที่แคตไอออนของโลหะด้วยแคตไอออนของสารอินทรีย์ เช่น ควอเทอร์แนรีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) ทำให้ gallery เกิดการขยายตัว และมีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นผลึก ซึ่งมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้ผ่านการดัดแปรนี้ เรียกว่า ออร์แกโนเคลย์ (organoclay) โดยปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแคตไอออน

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความสามารถในการทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีนของมอนต์มอริลโลไนต์ทั้งชนิดที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรที่ปริมาณต่าง ๆ โดยงานวิจัยนี้ได้นำมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดมาใช้เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน โดยเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตจากเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) จากนั้นนำพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปชิ้นงาน ด้วยกระบวนการ 2 แบบ คือ กระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (compression molding) และกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (single-screw cast sheet) แล้วนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ประสิทธิภาพของมอนต์มอริลโลไนต์ในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน ศึกษาผลของการเกิดผลึกต่อสมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่าง

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 พอลิโพรพิลีน

ในปี ค.ศ. 1869 Berthelot ได้นำโพรพิลีนมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้เป็นของเหลวหนืดที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและใช้งานในอุตสาหกรรมไม่ได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1955 Natta G และคณะได้สังเคราะห์พอลิโพรพิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงได้เป็นผลสำเร็จโดยการใช้ตัวเร่งออร์กาโนเมทาลิก (organo metallic) ที่มีไททาเนียมและอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ และในปี ค.ศ. 1965 พอลิโพรพิลีน ออกวางจำหน่ายเป็นครั้งแรกโดยบริษัท Hoechst AG

พอลิโพรพิลีนเป็นสเตอริโอเรกุลาร์พอลิเมอร์ (stereoregular polymer) ที่มีความสำคัญทางการค้าตัวหนึ่ง พอลิโพรพิลีนถูกปรับปรุงให้เป็นพอลิเมอร์ที่มีความหลากหลายทางด้านโครงสร้างทางเคมี เช่น พอลิโพรพิลีนโฮโมพอลิเมอร์ (homopolymer) พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (random copolymer) และแบบบล็อก (block copolymer) นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เช่น งานฉีดขึ้นรูปชิ้นส่วนอุปกรณ์โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนรถยนต์ งานฉีดท่อน้ำหรือแผ่นฟิล์มที่มีการดึงยืดทิศทางเดียวและสองทิศทาง อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น

2.1.1 การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีน

การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์ จะคล้ายการสังเคราะห์พอลิเอทิลีน โดยมอนอเมอร์ทั้งสองได้มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น แก๊สธรรมชาติ หรือน้ำมันเบา (light oil) โดยส่วนที่เป็น C_3 (โพรพิลีนและโพรเพน) สามารถแยกจากแก๊สอื่นๆได้ง่าย ด้วยวิธีการกลั่นลำดับส่วน แต่การแยกโพรพิลีนจากโพรเพนค่อนข้างยาก จึงต้องระมัดระวังในการออกแบบหอกลั่น

การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีน จำเป็นต้องกำจัดสารเจือปน เช่น น้ำ และ เมทิลอะเซทิลีนออกด้วยความระมัดระวัง

กระบวนการของซีเกลอร์ ที่แนตตานำมาใช้สังเคราะห์พอลิโพรพิลีน จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เรียกว่า “ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตา” ซึ่งได้จากปฏิกิริยาระหว่างทิทาเนียมไตรคลอไรด์ กับอะลูมิเนียมไตรเอทิล หรืออะลูมิเนียมไตรบิวทิล หรืออะลูมิเนียมไดเอทิลโมโนคลอไรด์ในแนฟทาภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนเพื่อให้เกิดเป็นของเหลวข้นหนืดที่ประกอบด้วยประมาณ 10%

ของตัวเร่งปฏิกิริยาและ 90% แนฟทา สมบัติของพอลิเมอร์จะขึ้นกับส่วนประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งขนาด และรูปร่างอีกด้วย

พอลิโพรพิลีนจะถูกผ่านเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ภายใต้ความดัน โดยที่สารละลายของตัวเร่งปฏิกิริยากับสารเจือจาง (ปกติใช้แนฟทา) จะใส่แยกกัน และปฏิกิริยาจะดำเนินไปภายใต้อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-4 ชั่วโมง โดยปฏิกิริยาจะเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ 80-85% ปฏิกิริยาเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ และจะเป็นพอลิ-เมอไรเซชันแบบแขวนลอย (suspension polymerization) มากกว่าแบบสารละลาย (solution polymerization) [1]

2.1.2 โครงสร้างของพอลิโพรพิลีน

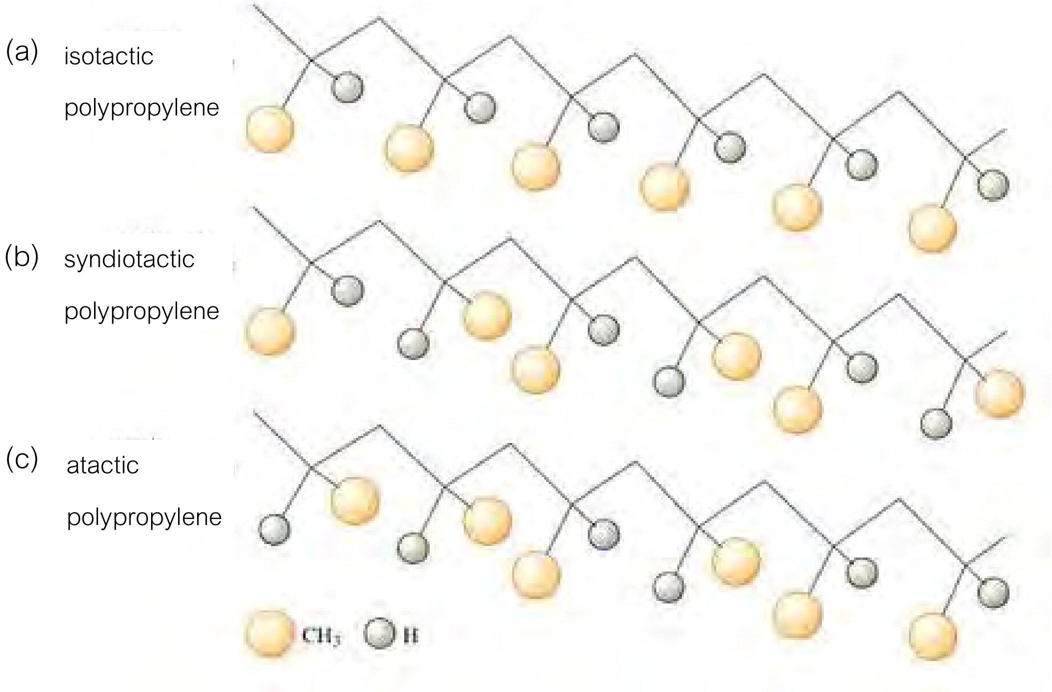
พอลิโพรพิลีนโฮโมพอลิเมอร์ประกอบด้วยส่วนของโมเลกุลโพรพิลีนในสายโซ่โมเลกุลซึ่งโครงสร้างที่ไม่สมมาตรของโพรพิลีนนำไปสู่การจัดเรียงทิศทางโมเลกุลภายในสายโซ่ได้ 3 แบบ คือ

1. แบบหัวต่อหาง (head to tail)
2. แบบหัวต่อหัว (head to head)
3. แบบหางต่อหาง (tail to tail)

จากผลด้านสเตอริก (steric effect) ของหมู่เมทิลทำให้เกิดการจัดเรียงแบบหัวต่อหางเป็นส่วนใหญ่ ได้เป็นสายโซ่พอลิโพรพิลีนที่มีความเป็นระเบียบทางเคมีสูง ซึ่งถ้าในโครงสร้างมีการจัดเรียงแบบหัวต่อหัวและหางต่อหางจะทำให้เกิดข้อบกพร่องทางโครงสร้างเคมีบนสายโซ่พอลิโพรพิลีน และจากการที่หมู่เมทิลมีตำแหน่งอยู่บนคาร์บอนอสมมาตรจึงเกิดโครงสร้างแบบสเตอริโอ (stereo configurations) ได้ 3 แบบ คือ

1. ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (isotactic polypropylene, iPP) คือการมีหมู่เมทิลอยู่ด้านเดียวกันของระนาบตลอดสายโซ่โมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.1(a)
2. ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน (syndiotactic polypropylene, sPP) คือการมีหมู่เมทิลอยู่สลับกันคนละด้านของระนาบสายโซ่โมเลกุล ดังแสดงในรูปที่ 2.1(b)
3. อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (atactic pokypropylene, aPP) คือการมีหมู่เมทิลอยู่แบบสุ่มบนแต่ละด้านของระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 2.1(c) ซึ่งอะแทกติกพอลิโพรพิลีนสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาแบบแรดิคัลระบบเก่าทำให้ได้พอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเกิดผลึกได้

การใช้ตัวเร่งซีเกลอร์แนตตาที่มีความจำเพาะทำให้สามารถเลือกสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้างแบบไอโซแทกติกหรือซินดิโอแทกติกได้ ซึ่งพอลิโพรพิลีนที่มีโครงสร้าง 2 แบบนี้สามารถเกิดผลึกได้โดยการจัดเรียงส่วนของสายโซ่โมเลกุลขนานกับสายโซ่ข้างเคียงอย่างต่อเนื่องกันไป



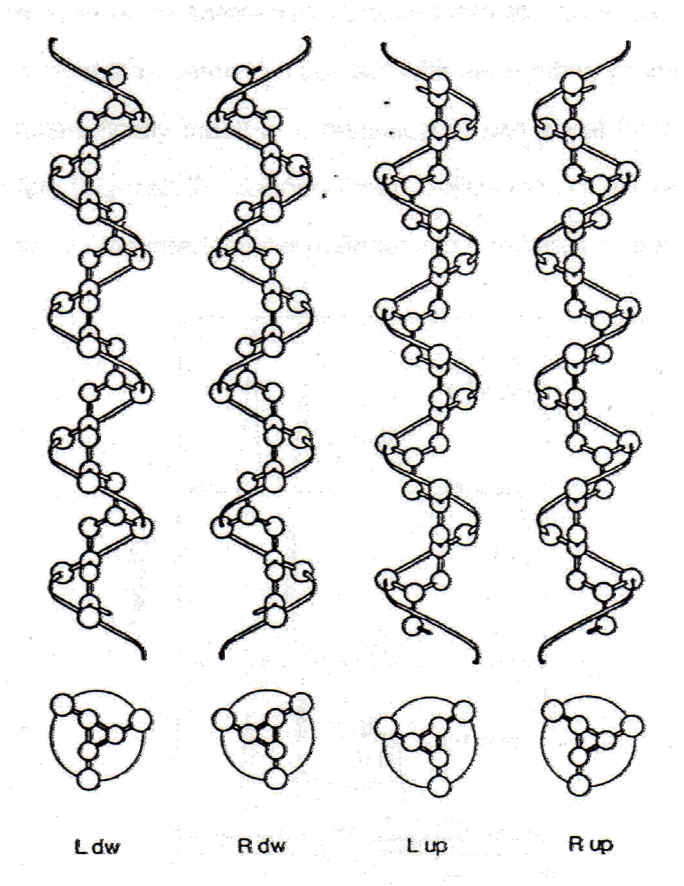
รูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบสเตอริโอของพอลิโพรพิลีน (a) ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (b) ซินดิโอแทกติกพอลิโพรพิลีน และ (c) อะแทกติกพอลิโพรพิลีน

2.1.3 **สมบัติทั่วไปของพอลิโพรพิลีน** [2]

พอลิโพรพิลีนมีความหนาแน่นประมาณ 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีความเงา ใส ป้องกันความชื้นได้ดีแต่การป้องกันอากาศซึมผ่านต่ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไปที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากพอลิโพรพิลีนมีความเป็นผลึกสูง ทนต่อกรดและเบสเป็นอย่างดี และเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป สามารถทนความล้า (fatigue) เนื่องจากการหักงอ (flexing) ได้ดี มีจุดอ่อนตัวที่ประมาณ 150 องศาเซลเซียส มีเสถียรภาพต่อความร้อน แสง และตัวออกซิไดซ์น้อยกว่าพอลิเอทิลีน เพราะมีไฮโดรเจนอะตอมที่ต่ออยู่กับคาร์บอนองศา 3 (tertiary carbon) ดังนั้นก่อนนำไปพอลิโพรพิลีนไปใช้งานต้องมีการเติมสารแอนติออกซิแดนท์และอัลตราไวโอเลตสเตบิไลเซอร์

2.1.4 **โครงสร้างผลึกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน** [3]

ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่มีแนวโน้มเกิดผลึกได้สูงเนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่มีความเป็นระเบียบ ซึ่งโคพอลิเมอร์แบบบล็อกและสุ่มของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณโคมอนอเมอร์ชนิดอื่นเพียงเล็กน้อยก็ให้แนวโน้มในลักษณะเดียวกัน โดยสายโซ่โมเลกุลของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนมีคอนฟอร์เมชันของสายโซ่แบบ 2×3/1 (tgtg) และหมู่แทนที่อสมมาตรของหมู่เมทิลทำให้เกิดการหมุนรอบแกนสันหลัง (backbone) ได้ 2 แบบ คือ เกลียววนขวา (right-handed helices) และเกลียววนซ้าย (left-handed helices) โดยตำแหน่งของหมู่เมทิลที่ติดกับสายโซ่นี้สามารถอยู่ได้ทั้งด้านบนและด้านล่างของแกนสายโซ่ ดังรูปที่ 2.2

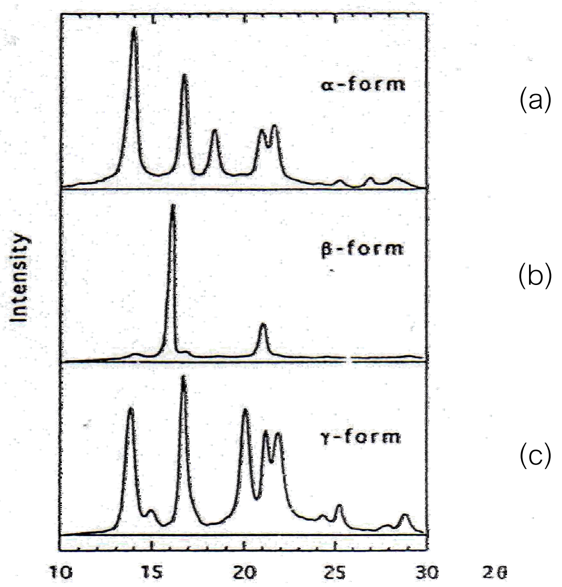


รูปที่ 2.2 คอนฟอร์เมชันของสายโซ่ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

ทำให้โครงสร้างผลึก (crystal structure หรือ polymorphs) ในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่เกิดจากการจัดเรียงสายโซ่โมเลกุลมี 4 แบบ คือ

1. รูปผลึกแบบมอนอคลินิก (monoclinic form) หรือแบบแอลฟา (alfa form, α-iPP)
2. รูปผลึกแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal form) หรือแบบบีตา (beta form, β-iPP)
3. รูปผลึกแบบไตรคลินิก (triclinic form) หรือแบบแกมมา (gamma form, γ-iPP)
4. รูปผลึกแบบสเมกติก (smectic form)

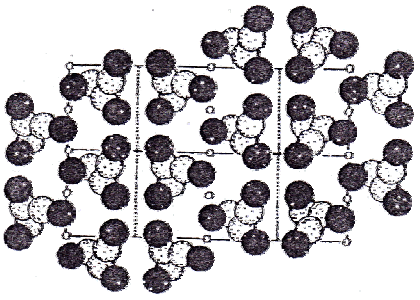
ซึ่งรูปผลึกแต่ละแบบจะมีลักษณะเฉพาะ เช่น ความหนาแน่น รูปแบบการหลอมเหลว และรูปแบบการกระเจิงหรือเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยโครงสร้างผลึกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนจะประกอบด้วยผลึกแบบแอลฟาเป็นส่วนใหญ่ และอาจมีผลึกแบบบีตาบ้างเป็นส่วนน้อย ซึ่งไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกส่วนใหญ่เป็นแบบแอลฟา จะมีมอดุลัสและความทนแรงดึงสูงแต่มีความทนแรงกระแทกปานกลาง ในขณะที่พอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบบีตาเป็นส่วนใหญ่ จะมีมอดุลัสและความทนแรงดึงต่ำกว่า แต่มีความทนแรงกระแทกและสมบัติการยืด ณ จุดขาดสูงกว่า



รูปที่ 2.3 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไปโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบ (a) แอลฟา (b) บีตา และ (c) แกมมา

2.1.4.1 รูปผลึกแบบแอลฟา

รูปผลึกแบบแอลฟาถูกค้นพบครั้งแรกโดย Natta G. ในปีค.ศ. 1956 โดยรูปผลึกแบบแอลฟาเป็นรูปผลึกที่เกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่ได้จากการลดอุณหภูมิของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวหรือจากสารละลายไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน

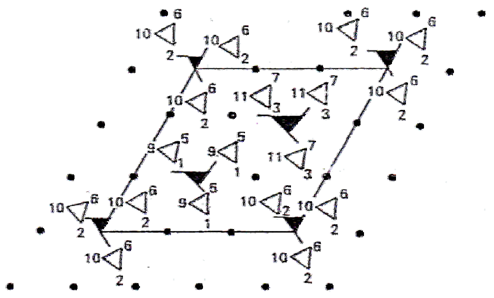


รูปที่ 2.4 ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบแอลฟาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบนระนาบ ab โดยแกน c ตั้งฉากกับระนาบ

จากการศึกษาด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พีกสำคัญของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบแอลฟา คือ พีกที่มุม 2θ = 14.1 16.9 18.8 และ 21.2° แสดงถึงระนาบ [110] [040] [130] และ [111] ของผลึกแอลฟา ส่วนยูนิตเซลล์ (unit cell) ของรูปผลึกแบบแอลฟาคือมอนอคลินิกแลททิส (monoclinic lattice) ที่มี lattice constant a = 0.666 นาโนเมตร b = 2.078 นาโนเมตร c = 0.6495 นาโนเมตร $\alpha = \gamma = 90^\circ$ และ $\beta = 99.62^\circ$ ความหนาแน่นของผลึกเท่ากับ 0.936 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีการจัดเรียงสายโซ่ที่มีเกลียววนซ้ายหันเข้าหาสายโซ่ที่มีเกลียววนขวาอย่างเป็นระเบียบและต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี พบว่ารูปผลึกแบบแอลฟามีอุณหภูมิหลอมเหลวสมดุล (equilibrium melting point, T_m°) ที่ประมาณ $208\pm8^\circ C$

2.1.4.2 รูปผลึกแบบบีตา

รูปผลึกแบบบีตาถูกค้นพบขึ้นในปี ค.ศ. 1959 โดย Keith H.D. และคณะ พบว่าสเฟียรูไลต์ของรูปผลึกแบบบีตาที่มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ต่างไปจากรูปผลึกแบบแอลฟาซึ่งเป็นรูปแบบผลึกปกติของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน



รูปที่ 2.5 ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบบีตาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบนระนาบ ab โดยแกน c ตั้งฉากกับระนาบ

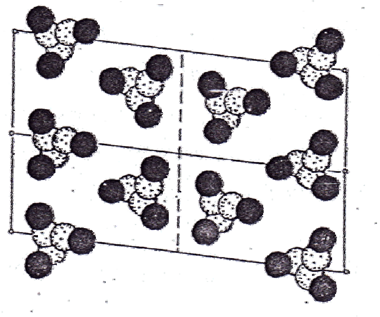
จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบบีตามีตำแหน่งพีกที่สำคัญคือ ที่ $2\theta = 16.1^{\circ}$ แสดงระนาบ [003] ของผลึกบีตา และจากการวิเคราะห์ยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบบีตา พบว่าการสะท้อนแสงที่แสดงถึงตำแหน่ง d spacing 0.553 นาโนเมตร และ 0.417 นาโนเมตร เกิดจากการสะท้อนของระนาบ [200] และ [201] จากเฮกซะโกนอลแลททิส (hexagonal lattice) ที่มีค่า lattice constant a = 1.274 นาโนเมตร c = 0.635 นาโนเมตร $\alpha = \beta = 90^{\circ}$ และ $\gamma = 120^{\circ}$ ความหนาแน่นของผลึกจากการคำนวณเท่ากับ 0.921 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยภายในแต่ละยูนิตเซลล์มีการจัดเรียงสายโซ่ที่มีเฉพาะเกลียววนซ้ายหรือเกลียววนขวาเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี พบว่ารูปผลึกแบบบีตามีอุณหภูมิหลอมเหลวสมดุลที่ประมาณ 176°C

2.1.4.3 รูปผลึกแบบแกมมา

รูปผลึกแบบแกมมาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1961 โดยพบได้เฉพาะในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มี degree of isotacticity สูง และใช้ความดันสูงในขณะขึ้นรูป ซึ่งลักษณะทางเรขาคณิตและสมบัติทางความร้อนของผลึกแบบแกมมายังไม่เป็นที่แน่ชัด

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบตำแหน่งพีกสำคัญของรูปผลึกแบบแกมมาที่มุม 2θ = 15.8 16.6 และ 20.0° แสดงถึงระนาบ [111] [008] และ [117] ของ

ผลึกแบบแกมมา และสามารถประมาณค่า lattice constant a = 0.654 นาโนเมตร b = 2.14 นาโนเมตร c = 0.650 นาโนเมตร α = 89° β = 99.36° และ γ = 99° ความหนาแน่นของผลึกเท่ากับ 0.954 กรัม/ลูกบากศ์เซนติเมตร ภายในยูนิตเซลล์ของผลึกแบบแกมมามีลักษณะคล้ายคลึงกับผลึกแอลฟาที่ถูกแรงเฉือนไปในแกน a ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี พบว่ารูปผลึกแบบแกมมามีอุณหภูมิหลอมเหลวสมดุลที่ประมาณ 187°C

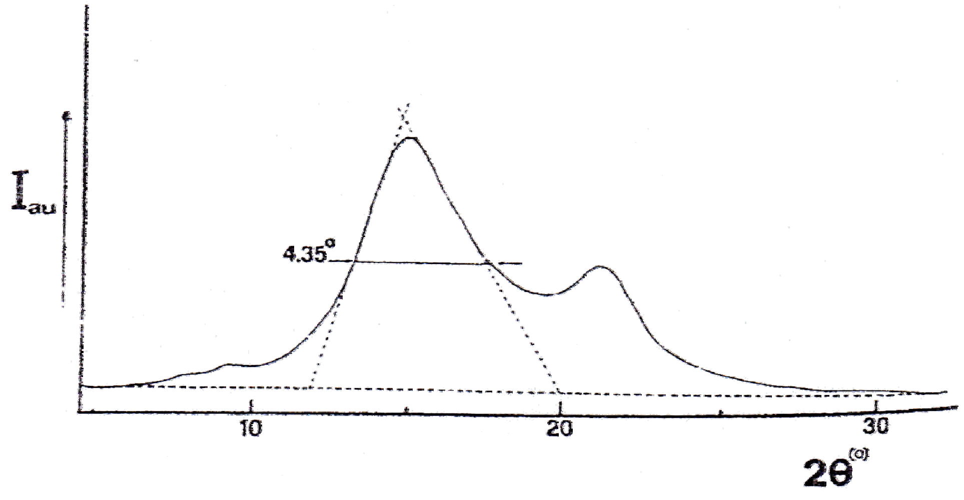


รูปที่ 2.6 ภาพฉายยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบแกมมาของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนบนระนาบ ab โดยแกน c ตั้งฉากกับระนาบ

2.1.4.4 รูปผลึกแบบสเมกติก

โครงสร้างยูนิตเซลล์ของรูปผลึกแบบสเมกติกเกิดจากการลดอุณหภูมิพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างรวดเร็ว ซึ่งยังไม่เป็นที่เข้าใจมากนัก โดยรูปผลึกแบบสเมกติกเป็นรูปแบบการจัดระเบียบสายโซ่ระหว่างความเป็นอสัณฐานและความเป็นผลึก มีความหนาแน่นของผลึกเท่ากับ 0.954 กรัม/ลูกบากศ์เซนติเมตร ซึ่งสูงกว่าความหนาแน่นของอะแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีค่าเท่ากับ 0.85 กรัม/ลูกบากศ์เซนติเมตร โดยภายในยูนิตเซซล์มีการจัดเรียงสายโซ่ที่มีเกลียววนซ้ายและเกลียววนขวาขนานกันอย่างไม่เป็นระเบียบมากนัก

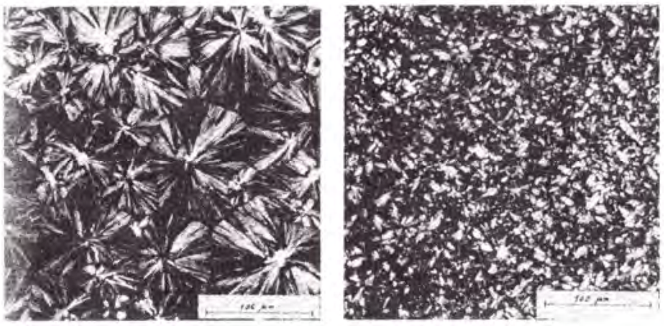
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบสเมกติก พบตำแหน่งพีกสำคัญที่มุม 2θ = 14.8° และ 21.2° ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกแบบสเมกติก

2.2 สารก่อผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน [4]

พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีอัตราการเติบโตของผลึกปานกลาง และสามารถทำให้เกิดผลึกได้เร็วขึ้น จากการใส่สารเติมแต่งที่เรียกว่า สารก่อผลึกลงไป ซึ่งสารก่อผลึกจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดนิวเคลียสและอัตราการเติบโตของผลึก ทำให้ได้สเฟียรูไลต์ที่มีขนาดสม่ำเสมอและเล็กและมีดีกรีของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น รูปที่ 2.8 แสดงผลของสารก่อผลึกต่อขนาดของสเฟียรูไลต์ในพอลิโพรพิลีนซึ่งวัดโดย polarized optical microscopy ซึ่งจะเห็นได้ว่า สเฟียรูไลต์มีขนาดเล็กลงในกรณีที่ใส่สารก่อผลึก



ไม่ใส่สารก่อผลึก   ใส่สารก่อผลึก

รูปที่ 2.8 ผลของสารก่อผลึกต่อขนาดของผลึกสเฟียรูไลต์ในพอลิโพรพิลีน

ตารางที่ 2.1 แสดงผลของสารก่อผลึกชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิโพรพิลีน รวมทั้งแสดงเวลาที่ลดลงในการทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแข็งตัวเมื่อใส่สารก่อผลึก โดยกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้คือ กระบวนการฉีดเข้าแม่แบบ

สำหรับพอลิเมอร์ที่นิยมใช้สารก่อผลึกเพื่อลดเวลาที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป และเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติในการใช้งานดีขึ้น ได้แก่ พอลิโพรพิลีน พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต และพอลิเอไมด์ 6

ตารางที่ 2.1 ผลของสารก่อผลึกชนิดต่างๆ ต่อสมบัติของพอลิโพรพิลีน*

Nucleating agent	T_c , °C	Cooling Time Reduction, %	Modulus, MPa	Gardner Imp., J @ -30°C	HDT, °C
None	109	-	1060	1.8	79
Millad 3988[a]	124	32.4	1340	1.7	95
ADK NA-11[b]	125	27.8	1260	1.3	102
HPN-68[c]	127	39.8	1270	1.8	102

* Medium-Impact Copolymer, Milliken Chemical

a Dibenzylidene sorbitol-based clarifier, Milliken Chemical

b Organophosphate nucleating agent, Amfine Chemicals

c Norbornane carboxylic acid salt nucleating agent, Milliken Chemical

สำหรับสารที่มีประสิทธิภาพในการทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกแบบแอลฟาของไอโซแทกติก-พอลิโพรพิลีนมีทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมทีบิวทิลเบนโซเอต (sodium-t-butyl benzoate) โซเดียมพาราเมทิลเบนโซเอต (sodium p-methyl benzoate) โซเดียมเบนโซเอต (sodium benzoate) อะลูมิเนียมเบนโซเอต (aluminium benzoate) โมโนไฮดรอกซิลอะลูมิเนียมพารา-ที-บิวทิลเบนโซเอต (monohydroxylaluminium p-t-butyl benzoate) ไดเบนซิลลิดีนซอร์-บิทอล (dibenzylidene sorbitol, DBS) ทัลค์ เคาลิน เป็นต้น

สารก่อผลึกแบบบีตาสำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน มีหลายชนิด ได้แก่ ผงสีควินาคริโดน (quinacridone pigment) หรือที่รู้จักในชื่อ Permanent Red E3B ไตรฟีนอลไดไตร-แอซีน (triphenol ditriazine) แคลเซียมไพเมเลต (calcium pimelate) แคลเซียมฟทาเลต (calcium phthalate) ไดโซเดียมฟทาเลต (disodium phthalate) สารผสมระหว่างกรดไพเมลิก

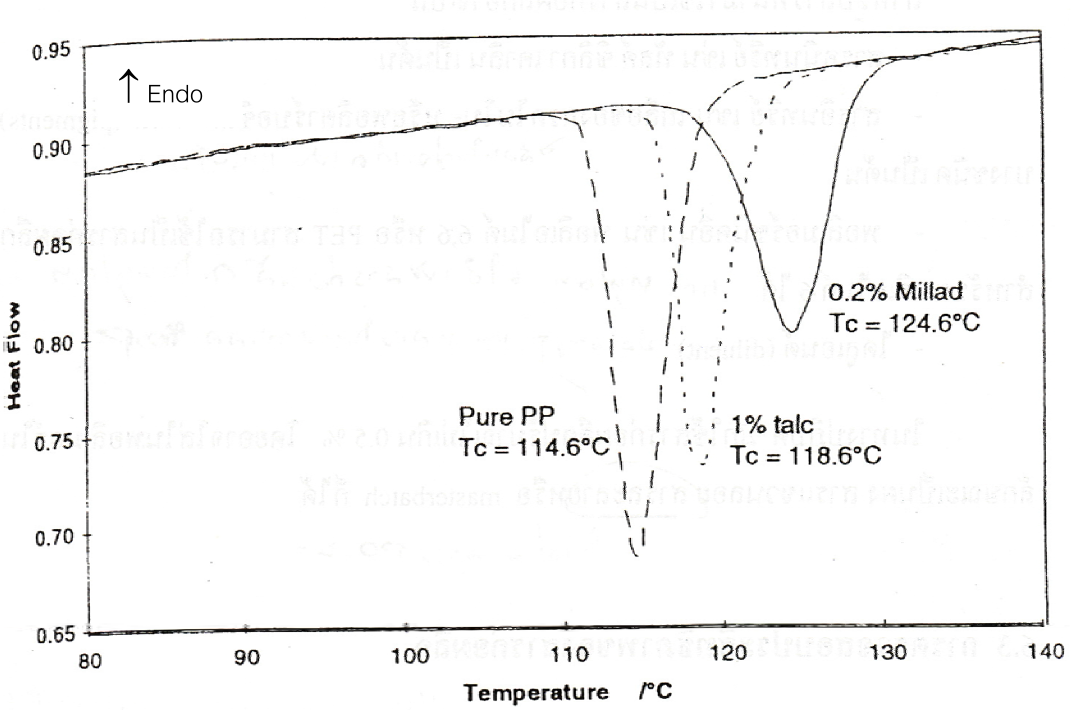
(pimelic acid) และแคลเซียมสเตียเรต (calcium stearate) ฯลฯ ซึ่งในการทำให้ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนเกิดผลึกแบบบีตาจากการใช้สารก่อผลึก พบว่า ผลึกที่เกิดขึ้นจะมีผลึกแบบแอลฟาอยู่ร่วมด้วยเสมอไม่มากก็น้อย

2.2.1 การตรวจสอบประสิทธิภาพของสารก่อผลึก

วิธีการที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกของพอลิเมอร์หลอมเหลวและตรวจสอบประสิทธิภาพของสารก่อผลึกคือ การหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) จากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC (differential scanning calorimetry) โดยทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลว แล้วลดความร้อนลงโดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิคงที่ จะได้ DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิซึ่งปรากฏพีกการคายพลังงานที่แสดงถึงอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิเมอร์

รูปที่ 2.9 แสดง DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนทั้งในกรณีที่ไม่ได้ใส่และใส่สารก่อผลึก (ทัลค์ 1% และ Millad 0.1%) ซึ่งจะเห็นได้ว่า T_c ของพอลิโพรพิลีนสูงขึ้นเมื่อใส่สารก่อผลึก (แสดงว่าพอลิเมอร์เกิดผลึกได้เร็วขึ้น)

สำหรับขนาดของสเฟียรูไลต์สามารถวัดได้โดย polarized optical microscopy (ดูรูปที่ 2.8) นอกจากนี้ ในกรณีที่การก่อผลึกไม่สูงนัก สามารถหาความหนาแน่นของนิวเคลียสได้จากการนับปริมาณของสเฟียรูไลต์



รูปที่ 2.9 DSC เทอร์โมแกรมการลดอุณหภูมิของพอลิโพรพิลีน

2.2.2 ผลของสารก่อผลึกต่อสมบัติพอลิเมอร์

โดยทั่วไปแล้ว ผลจากการใส่สารก่อผลึกในพอลิเมอร์มีดังนี้

1. อัตราการเกิดผลึกโดยรวมของพอลิเมอร์สูงขึ้น กล่าวคือ ผลึกเกิดได้เร็วขึ้น (T_c สูงขึ้น) ทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแข็งตัวเร็วขึ้น ดังนั้น เวลาโดยรวมที่ใช้ในกระบวนการฉีดเข้าแม่แบบ (injection molding) จึงลดลง ส่งผลให้ศักยภาพในการผลิตสูงขึ้น

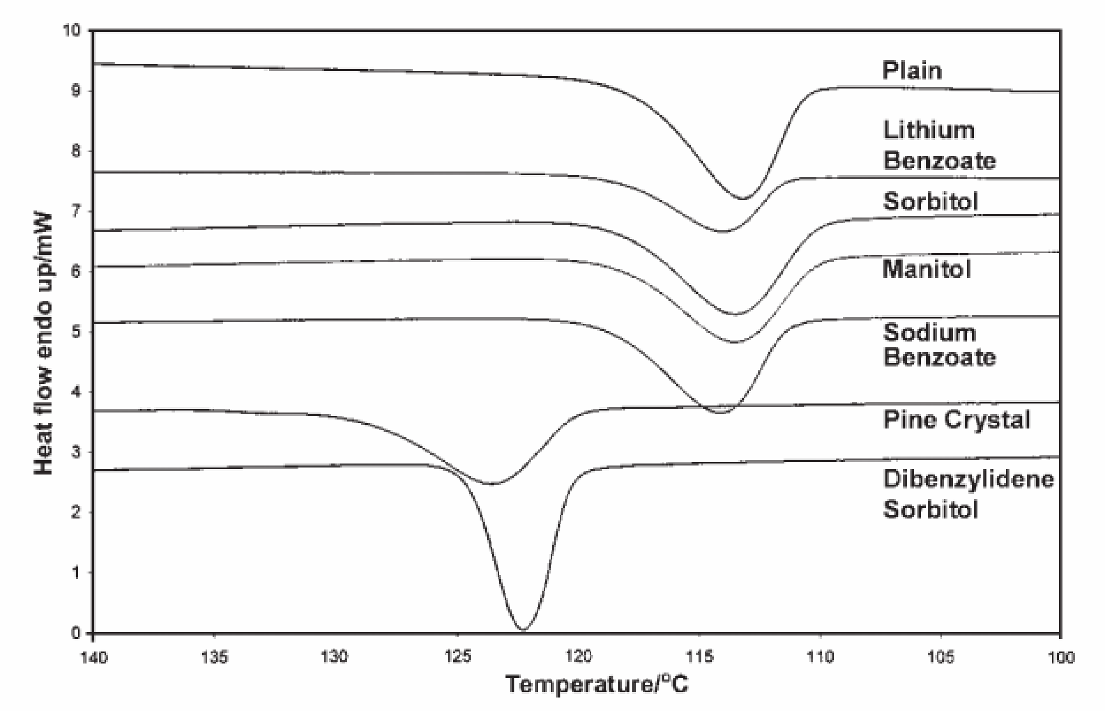
2. ดีกรีของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ดังนั้น พอลิเมอร์จะมีความทนแรงดึง มอดุลัส และความแข็งเพิ่มขึ้น

3. ผลึกสเฟียรูไลต์มีขนาดสม่ำเสมอและเล็กลง (ดูรูป 2.8) ทำให้แสงสามารถผ่านผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้น ผลิตภัณฑ์จึงมีความใส (clarity) มากขึ้น หรือมีความมัว (haze) ลดลงซึ่งในกรณีที่การใช้สารก่อผลึกทำให้พอลิเมอร์มีความโปร่งใสสูง จะเรียกสารก่อผลึกว่า สารทำให้ใส (clarifying agents)

นอกจากนี้ จากการที่โครงสร้างผลึกมีความละเอียดและสม่ำเสมอมากขึ้น จึงช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงกระแทกและการยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ด้วย เนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวจะช่วยกระจายแรงที่กระทำบนพอลิเมอร์ได้ดี (อย่างไรก็ตาม พบว่าการใช้สารก่อผลึกในบางกรณีอาจทำให้ความทนแรงกระแทกลดลงเล็กน้อย)

จึงมีงานวิจัยทดลองนำสารชนิดต่างๆทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์มาใช้เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน ดังนี้

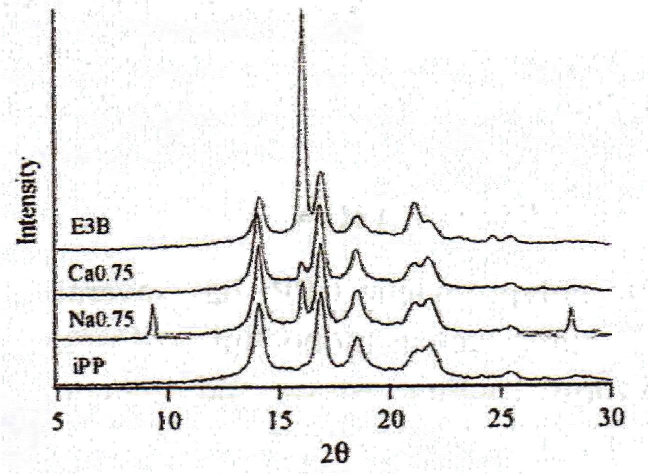
ในปี ค.ศ. 2000 Nagarajan และคณะ [5] ได้ศึกษาผลของสารก่อผลึกชนิดต่างๆ ได้แก่ ไดเบนซิลลิดีนซอร์บิทอล, pine crystal 1500, โซเดียมและโพแทสเซียมเบนโซเอต (sodium and potassium benzoates) ต่อพฤติกรรมการเกิดผลึกในไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ผลการทดลองพบว่า ทั้งไดเบนซิลลิดีนซอร์บิทอล และ pine crystal 1500 มีประสิทธิภาพในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสูง เนื่องจากมีความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึกและปริมาณนิวเคลียสที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเกิดผลึก



รูปที่ 2.10 ผลของสารก่อผลึกชนิดต่างๆในพอลิโพรพิลีนจากการทดสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี

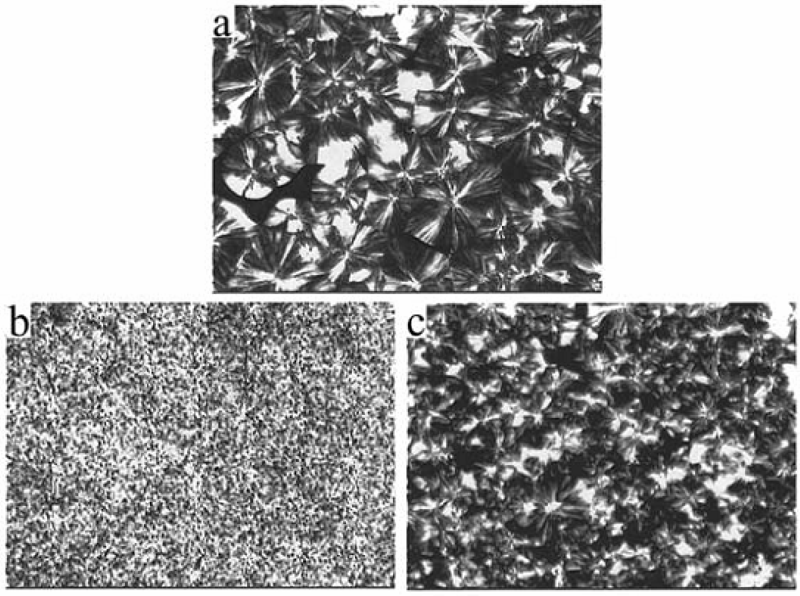
Medeiros และคณะ [6] ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของทัลค์และอัตราการทำให้พอลิเมอร์เย็นตัวต่อดีกรีของความเป็นผลึกและอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน ซึ่งจากการทดลอง พบว่า ทั้งดีกรีของความเป็นผลึกและอุณหภูมิการเกิดผลึกเพิ่มขึ้นตามปริมาณทัลค์ (แต่ต้องไม่เกินร้อยละ 2) และที่อัตราการเย็นตัวอย่างช้าๆ

นพดล เกิดดอนแฝก และคณะ [3] ได้เตรียมไดโซเดียมเทเรฟทาเลตและแคลเซียมเทเรฟทาเลตจากการนำขวดเพททีใช้แล้วมาย่อยสลายด้วยกระบวนการอัลคาไลดีคอมพอสิชันแล้วนำเกลือเทเรฟทาเลตทั้งสองชนิดที่เตรียมได้ ไปทดลองใช้เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน โดยตรวจสอบความสามารถในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี และเทคนิคไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (Wide angle X-ray diffraction) ซึ่งจากการทดลองพบว่า เกลือเทเรฟทาเลตทั้งสองชนิดสามารถชักนำให้ไอโซแทกติก พอลิโพรพิลีนเกิดผลึกได้ทั้งแบบแอลฟาและบีตา ดังรูปที่ 2.11 นอกจากนี้จากการทดสอบสมบัติเชิงกล ยังพบว่าเกลือเทเรฟทาเลตทั้งสองชนิดสามารถปรับปรุงความทนแรงกระแทกและความทนแรงดึงของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนให้เพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 2.11 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนและไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีการใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก

Osowiecka และคณะ [7] ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกระหว่างสารอินทรีย์ (Millad 3988, ADK NA21) และสารอนินทรีย์ (ทัลค์) จากการวิจัยพบว่าสารอินทรีย์มีประสิทธิภาพสูงกว่า กล่าวคือ การใช้สารอินทรีย์นอกจากจะทำให้พอลิโพรพิลีนมีผลึกที่สม่ำเสมอและละเอียดกว่าดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 แล้ว ยังทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่าด้วย



รูปที่ 2.12 ภาพถ่ายสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีนจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (a) ไม่ใส่สารก่อนิวเคลียสผลึก (b) ใส่ ADK NA 21 0.1% โดยน้ำหนัก และ (c) ใส่ Millad 0.1% โดยน้ำหนัก

ยงยุทธ ประจำ [8] ศึกษาการเตรียมพอลิโพรพิลีน/แร่ดินเหนียวคอมพอสิตโดยกระบวนการหลอมเหลวผ่านเครื่องอัดรีดสกรูคู่ พบว่าการเติมสารประกอบแอริลเอไมด์ในปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก 0.05-0.3 สามารถก่อให้เกิดผลึกแบบบีตาของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีน/แร่ดินเหนียวได้ จากการศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึก โครงสร้างผลึก และสัณฐานของพอลิเมอร์คอมพอสิตด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี เทคนิคทรานสมิสชันอิเล็กตรอนไมโครสโกปี (Transmission Electron Microscopy) และเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน พบว่าการเติมสารก่อนิวเคลียสผลึกแบบบีตาส่งผลต่อโครงสร้างผลึก สัณฐาน สมบัติเชิงกล และสมบัติความร้อนของคอมพอสิต ซึ่งการเกิดผลึกแบบบีตาของพอลิโพรพิลีน/แร่ดินเหนียว สามารถพัฒนาสมบัติเชิงกลด้านการยืดจนขาดของพอลิโพรพิลีน/แร่ดินเหนียวคอมพอสิตได้ โดยที่สมบัติเชิงกลด้านความแข็งเหนียวและการทนแรงกระแทกอยู่ในระดับสูงกว่าพอลิโพรพิลีนธรรมดา นอกจากนี้ การเติมสารประกอบแอริลเอไมด์สามารถเพิ่มอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิ-ลีน/แร่ดินเหนียวได้อย่างชัดเจน

2.3 **แร่ดิน** (clay minerals) [9]

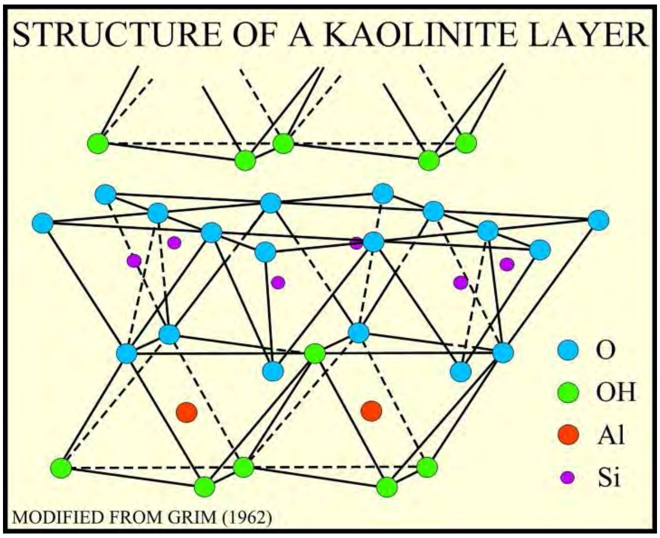
แร่ดินเหนียวเป็นสารประกอบจำพวกไฮดรัสอะลูมินัมซิลิเกต (hydrous aluminum silicates) มีลักษณะซึมซับน้ำได้ดี ยืดหยุ่นเมื่อเปียก และยึดน้ำได้ดี มีความเชื่อมแน่นเมื่อแห้ง แร่ดินส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบแผ่น (sheet silicate) จัดอยู่ในพวก phyllosilicates ประกอบด้วยชั้นของอลูมิเนียมออกตะฮีดรอน (Al-octahedral) และซิลิกอนเตตระฮีดรอน (Si-tetrahedral) และในระหว่างชั้นรอยต่อ (interlayer) อาจมีไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แมกนีเซียม แคลเซียม โพแทสเซียม โซเดียม หรือ โมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ ทำให้ดินแต่ละชนิดมีลักษณะแตกต่างกัน โดยปกติแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้

1. กลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite)

มีสูตรเคมีคือ $(OH)_4Al_4Si_8O_{20}\cdot nH_2O$ มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยแผ่นอลูมิเนียมออกตะฮีดรอนอยู่ระหว่างแผ่นซิลิกอนเตตระฮีดรอน 2 แผ่นประกบกัน การจับตัวระหว่างแผ่นแร่ค่อนข้างหลวม ทำให้แร่ไม่อยู่ตัว โดยเฉพาะเมื่อเปียก สามารถดูดซับน้ำได้มากเกิดการบวมตัว (swell) และขยายตัว (expansion) สูง สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอิฐ เซรามิก ใช้ทำโคลนเจาะ (drilling mud) และผสมทรายทำกากกัมมันตรังสีได้อีกด้วย

2. กลุ่มเกาลินไนต์ (kaolinite)

มีสูตรเคมีคือ $(OH)_4Al_4Si_8O_{20}\cdot nH_2O$ มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 1:1 ประกอบด้วยซิลิกอนเตตระฮีดรอน 1 ชั้น จับยึดกับแผ่นอลูมิเนียมออกตะฮีดรอน 1 ชั้น เกิดการซ้อนกันหลายชั้นไม่มีสิ้นสุดเกิดเป็นโครงสร้างผลึกของแร่ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



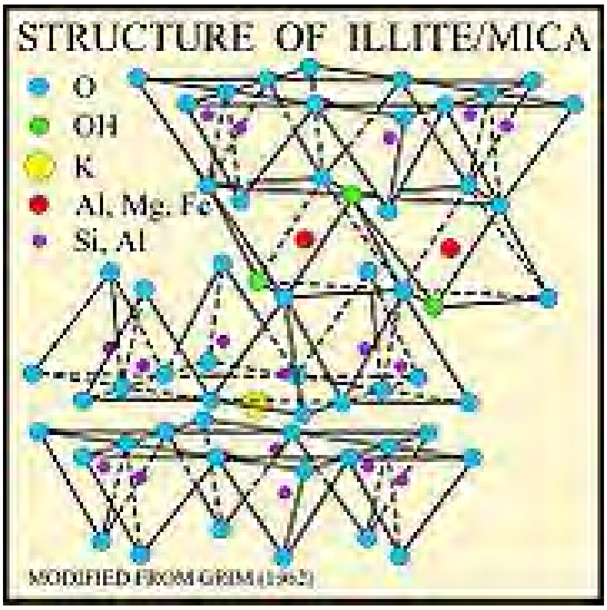
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเกาลินไนต์

เกาลินไนต์มีรูปผลึกแบบไตรคลินิก (triclinic) แร่ในกลุ่มนี้ได้แก่ เกาลินไนต์ (kaolinite) ดิกไกต์ (dickite) นาไครต์ (nacrite) แฮลลอยไซต์ (halloysite) และแอลโลเฟน (allophane) โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้คือ แต่ละหน่วยผลึก (crystal unit) ยึดกันค่อนข้างเหนียวแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างชั้น (interlayer) มีผลทำให้แร่ดินเหนียวซิลิเกตมีการบวมตัวและหดตัว (swelling and shrinking) น้อยมาก จำนวนหน่วยที่ซ้อนยึดกันมีค่อนข้างมาก จึงทำให้มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับแร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆ ขนาดของแร่ดินเหนียวกลุ่มนี้อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 5.0 ไมครอน เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่จึงทำให้มีพื้นที่ผิวภายนอก (external surface) น้อย และพื้นที่ผิวภายใน (internal surface) มีน้อยมากหรือไม่มีเลย และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity, CEC) ต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยและมีประจุลบในผลึกน้อยมาก CEC มีค่า 3-15 meg/100 กรัม

3. กลุ่มอิลไลท์ (illite)

มีสูตรเคมีคือ $(OH)_4K_y(Al_4Fe_4Mg_4)(Si_{8-y}Al_y)O_{20}$ มีองค์ประกอบและโครงสร้างอยู่ระหว่างมัสโคไวต์และมอนต์มอริลโลไนต์ แร่นี้บางทีเรียกกันว่าไมกา (mica) ส่วนประกอบพื้นฐานของอิลไลต์ประกอบด้วยแผ่นกิบบ์ไซต์รูปแปดเหลี่ยม (gibbsite octrahedron) ระหว่างแผ่นซิลิกาสี่เหลี่ยม (silica tetrahedron) 2 แผ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เป็นแร่ดินเหนียวที่พบมากในหินตะกอนและในสภาพที่มีการตกตะตอนต่างๆ มีคุณสมบัติไม่เหมือนมอนต์มอริลโลไนต์ โดยอิลไลต์จะรวมตัวกันเป็นขนาดใหญ่จึงสามารถซึมซับน้ำได้น้อยกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ มีการบวมตัวได้

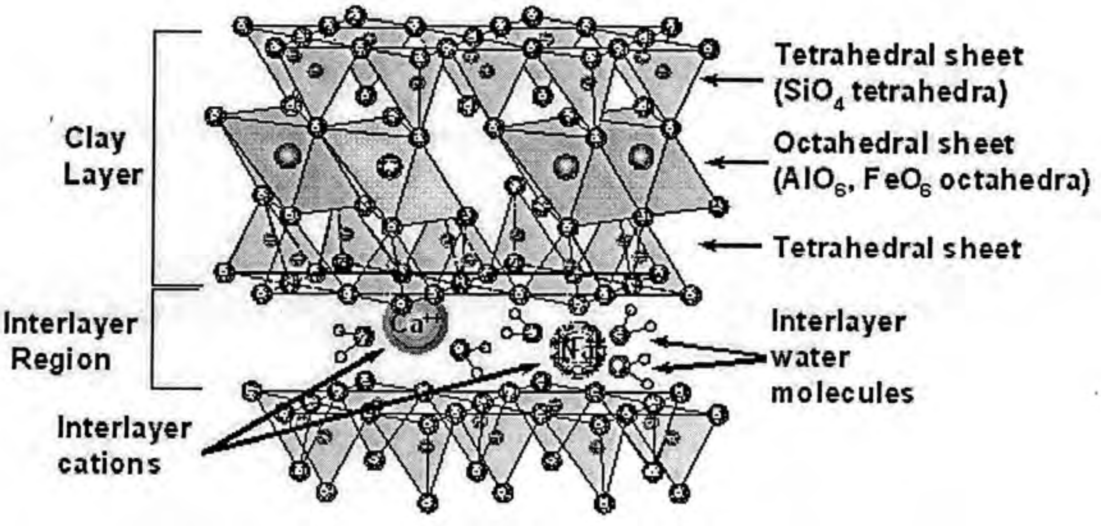
น้อยกว่า และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกค่อนข้างต่ำ CEC ของอิลไลต์มีค่าประมาณ 15-40 meq/100 กรัม



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของอิลไลต์

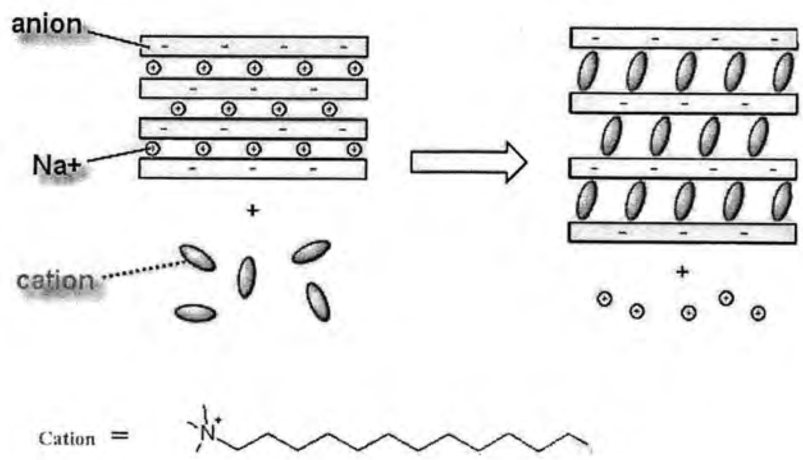
2.3.1 **มอนต์มอริลโลไนต์** (Montmorillonite) [10]

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างของชั้นผลึกเป็นแบบ 2:1 ประกอบด้วยชั้นอะลูมินาออกตะฮีดรอล (octahedral) อยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิกาเตตระฮีดรอล (tetrahedral) ความหนาของชั้นผลึก 2:1 ประมาณ 0.7-1.0 นาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

ในขณะที่ความยาวด้านข้างอยู่ในระดับไมครอน โดยผิวหน้าผลึกมีประจุเป็นลบ จึงมักมีประจุบวกของแมกนีเซียม อะลูมิเนียม โซเดียม หรือแคลเซียม และอื่นๆ เข้ามาแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นผลึก ที่เรียกว่า gallery เพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ และช่วยยึดผลึกที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน



รูปที่ 2.16 การแลกเปลี่ยนโซเดียมไอออนด้วยควอเทอร์แนรีแอมโมเนียม

มอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งอาจเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือชอบสารอินทรีย์โดยการแทนที่แคตไอออนของโลหะด้วยแคตไอออนของสารอินทรีย์ เช่น ควอเทอร์แนรีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) ทำให้ gallery เกิดการขยายตัว และมีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นผลึก ซึ่งมอนต์มอริลโลไนต์ที่ได้ผ่านการดัดแปรนี้ เรียกว่า ออร์แกโนเคลย์ (organoclay) โดยปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแคตไอออนแสดงได้ในรูปที่ 2.16

ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุด้วยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกทำให้ช่อง gallery ขยายออก นั่นคือ ระยะห่างระหว่างชั้นของดินจะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้ดินเกิดการบวมตัวเรียกว่า organoclay ที่มีโครงสร้างแบบนี้ว่า intercalated clay แต่ถ้าชั้นของดินเกิดการบวมตัวมากจนทำให้เกิดการแยกชั้นของดินออกจากกันอย่างชัดเจน ซึ่งเรียกว่า exfoliated clay ซึ่งทำให้ได้อนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร สามารถนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ จะทำให้เกิดการกระจายตัวของเคลย์ในเนื้อพอลิเมอร์ได้เป็น 3 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.17

1. คอมพอสิตแบบทั่วไป (conventional composites)

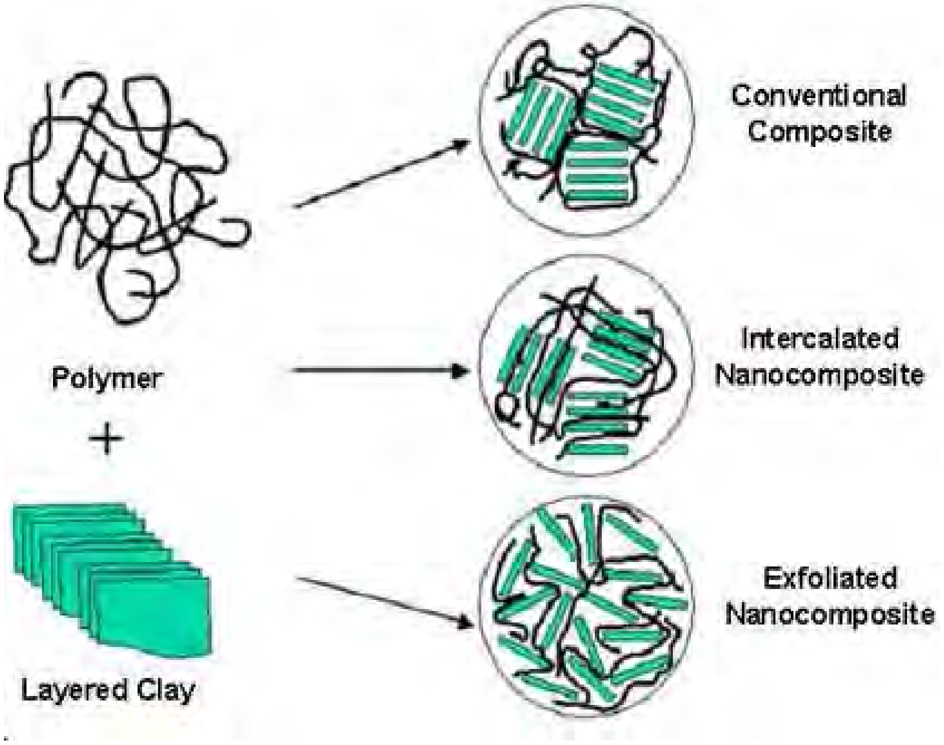
ประกอบด้วยอนุภาคเคลย์กระจายตัวอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ โดยที่อนุภาคเคลย์มีการเกาะกันเป็นกลุ่มไม่แยกออกจากกัน พอลิเมอร์ไม่มีการแทรกสอดเข้าไปในชั้นเคลย์

2. นาโนคอมพอสิตแบบแทรกสอด (Intercalated nanocomposites)

ประกอบด้วยอนุภาคเคลย์กระจายตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ โดยที่อนุภาคเคลย์เกาะกันเป็นกลุ่ม มีสายโซ่พอลิเมอร์แทรกสอดอยู่ในระหว่างชั้นเคลย์ ทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นของเคลย์เพิ่มขึ้น

3. นาโนคอมพอสิตแบบแยกจากกัน (Exfoliated nanocomposites)

ชั้นของอนุภาคเคลย์แยกตัวออกจากกันไม่มีโครงสร้างผลึกในแนวแกน c

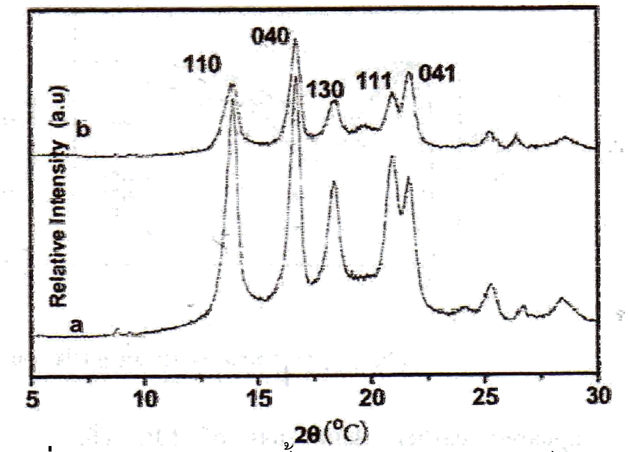


รูปที่ 2.17 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์

ในปี 2007 Golebiewski และ Galeski [11] ได้ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิ-โพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต (อัตราส่วนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์:พอลิโพรพิลีนเท่ากับ 1:15) ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี และเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริก-แอนาลิซิส (Thermogravimetric analysis) ที่ช่วงอุณหภูมิห้องถึง 500 องศาเซลเซียส ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จากการวิเคราะห์พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนนาโนคอมพอสิตเท่ากับ 420 องศาเซลเซียส ในขณะที่พอลิโพรพิลีนสลายตัวที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยเกลืออัลคิลแอมโมเนียม ซึ่งกระจายตัวแบบ exfoliated ในนาโนคอมพอสิตช่วยทำให้พอลิโพรพิลีนมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น เนื่องจากออกซิเจนสามารถผ่านเข้าไปในพอลิโพรพิลีนได้น้อยลง

Cauvin และคณะ [12] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต โดยผสมมอนต์มอริลโลไนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ (ร้อยละ 2-7 โดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน) กับพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องอัดรีดสกรูคู่ (Twin-screw extruder) แล้วนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบความทนแรงดึงด้วยกระบวนการฉีดเข้าแม่แบบ (Injection molding) ตามมาตรฐาน ASTM 938 ผลการทดลองพบว่า ค่ายังส์มอดุลัส (Young's modulus) เพิ่มขึ้นตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น

Mingliang และคณะ [13] ได้ศึกษาสมบัติการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์คอมพอสิต (ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน) ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน และศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึกในสภาวะ isothermal ของ พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์คอมพอสิตด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริเมทรี ผลจากการทดลองพบว่า การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ขนาดของผลึกพอลิโพรพิลีนลดลง (แสดงในตารางที่ 2.2) ผลึกเกิดได้เร็วขึ้น และจุดหลอมเหลวของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า มอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกและเร่งกระบวนการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนได้



รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบน (a) พอลิโพรพิลีน และ (b) พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ (ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก)

ตารางที่ 2.2 ขนาดผลึก L_{hkl} ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์คอมพอสิต

	L_{110}(nm)	L_{040}(nm)	L_{130}(nm)	L_{111}(nm)	L_{041}(nm)
พอลิโพรพิลีน	9.88	10.30	10.32	10.36	10.37
พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์คอมพอสิต	7.21	9.56	9.25	12.24	9.99

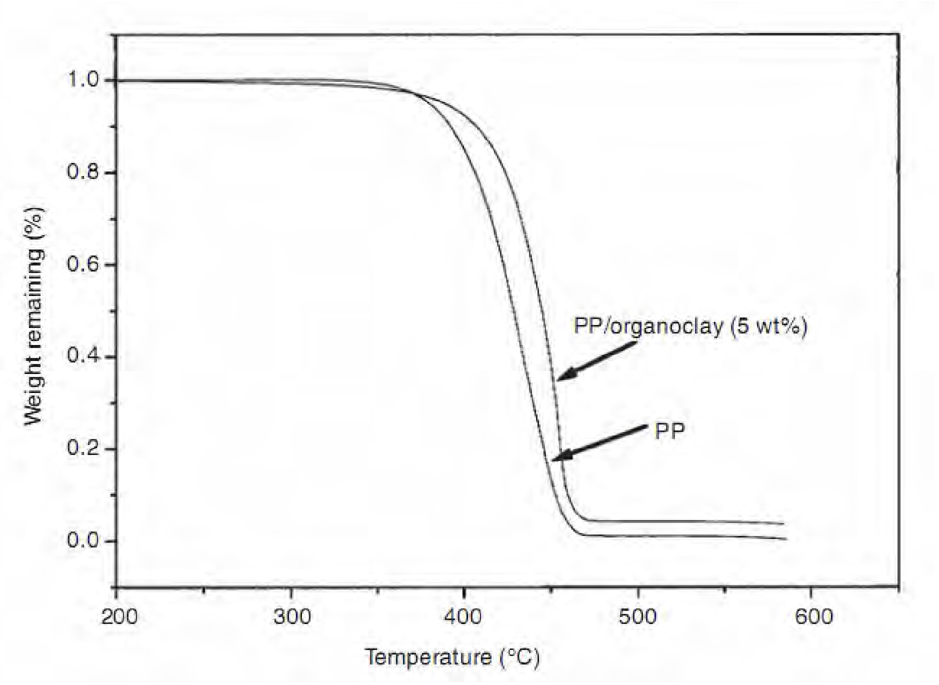
สำหรับงานวิจัยนี้ $L_{hkl} = \dfrac{0.90\lambda}{\beta_0 \cos\theta}$

โดย L_{hkl} = ขนาดผลึกในระนาบต่างๆ (นาโนเมตร)

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (0.154 นาโนเมตร)

β_0 = full width half maxima, FWHM

ในปี 2008 Mingliang และคณะ [14] ได้ศึกษาสมบัติการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยอัลคิลแอมโมเนียมไอออน ผสมกับพอลิโพรพิลีนในอัตราส่วนร้อยละ 3-7 โดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน จากการทดสอบด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน และเทคนิคทรานสมิสชันอิเล็กตรอนไมโครสโกปี แสดงให้เห็นว่าสายโซ่พอลิโพรพิลีนเกิดการแทรกสอดเข้าไปให้ชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ มีการกระจายตัวแบบ exfoliated การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรไม่ทำให้โครงสร้างผลึกของพอลิโพรพิลีนเปลี่ยนแปลง ส่วนอุณหภูมิการเกิดผลึกและอุณหภูมิการสลายตัว (แสดงในรูปที่ 2.19) ของพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรนาโน-คอมพอสิตสูงกว่าพอลิโพรพิลีน และจากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า พอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรนาโนคอมพอสิตมีค่าความทนแรงกระแทกสูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้เติมมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 2.19 ผลการทดสอบด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาลิซิสของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีน/มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักพอลิโพรพิลีน) นาโนคอมพอสิต

ในบทต่อไปเป็นการรายงานถึงวิธีการทดลอง โดยการนำมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมาใช้เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน ซึ่งเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตจากเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) จากนั้นนำพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปชิ้นงาน ด้วยกระบวนการ 2 แบบ คือ กระบวนการแบบอัด (compression molding) และกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (single-screw cast sheet) นำชิ้นงานไปวิเคราะห์ความสามารถในการทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีนของมอนต์มอริลโลไนต์ทั้งชนิดที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรที่ปริมาณต่าง ๆ ศึกษาผลของการเกิดผลึกต่อสมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่าง

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัตถุดิบ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

3.1.1 วัตถุดิบ

1. พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

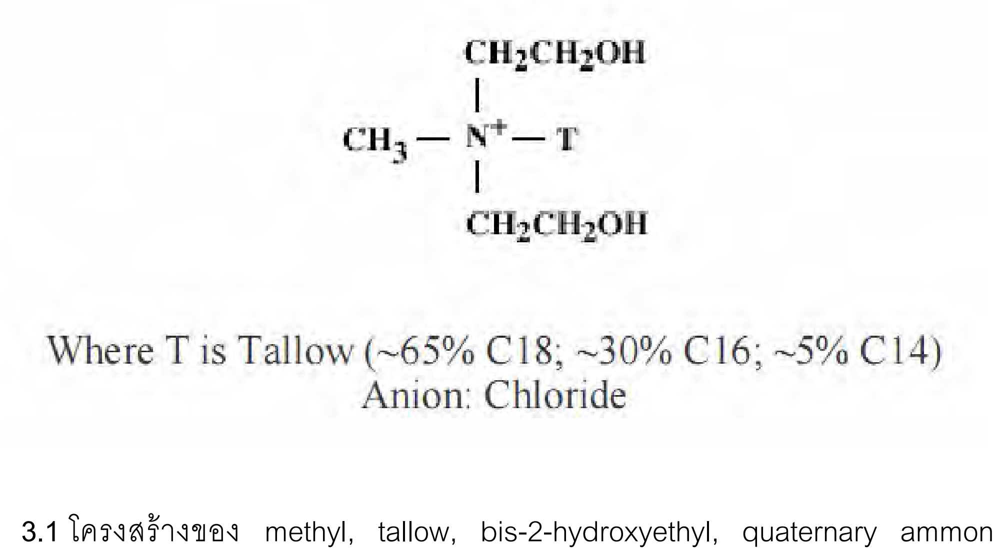
พอลิโพรพิลีนที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ เกรดของพอลิโพรพิลีนที่ใช้นี้คือ HP420J จากบริษัท เอ็ชเอ็มซี พอลิเมอร์ จำกัด (HMC Polymers Co., Ltd)

2. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT)

มอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้มีค่าความสามารในการแลกเปลี่ยนประจุบวกเท่ากับ 72 meq/100 g.clay จากบริษัท Southern Clay Products, Inc. (TeXas, USA)

3. มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (Organomodified-montmorillonite, OMMT)

มอริลโลไนต์ดัดแปรที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โดยมอนต์มอริลโลไนต์ที่ใช้คือ Cloisite 30B จากบริษัท Southern Clay Products, Inc. (TeXas, USA) เป็นมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วย methyl, tallow, bis-2-hydroxyethyl, quaternary ammonium (MT2EtOH) ซึ่งโครงสร้างของ MT2EtOH แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของ methyl, tallow, bis-2-hydroxyethyl, quaternary ammonium (MT2EtOH)

4. สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat Stabilizer)

สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ใช้ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ใช้คือ Irganox ® B125 จากบริษัท Ciba Inc. (Switzerland)

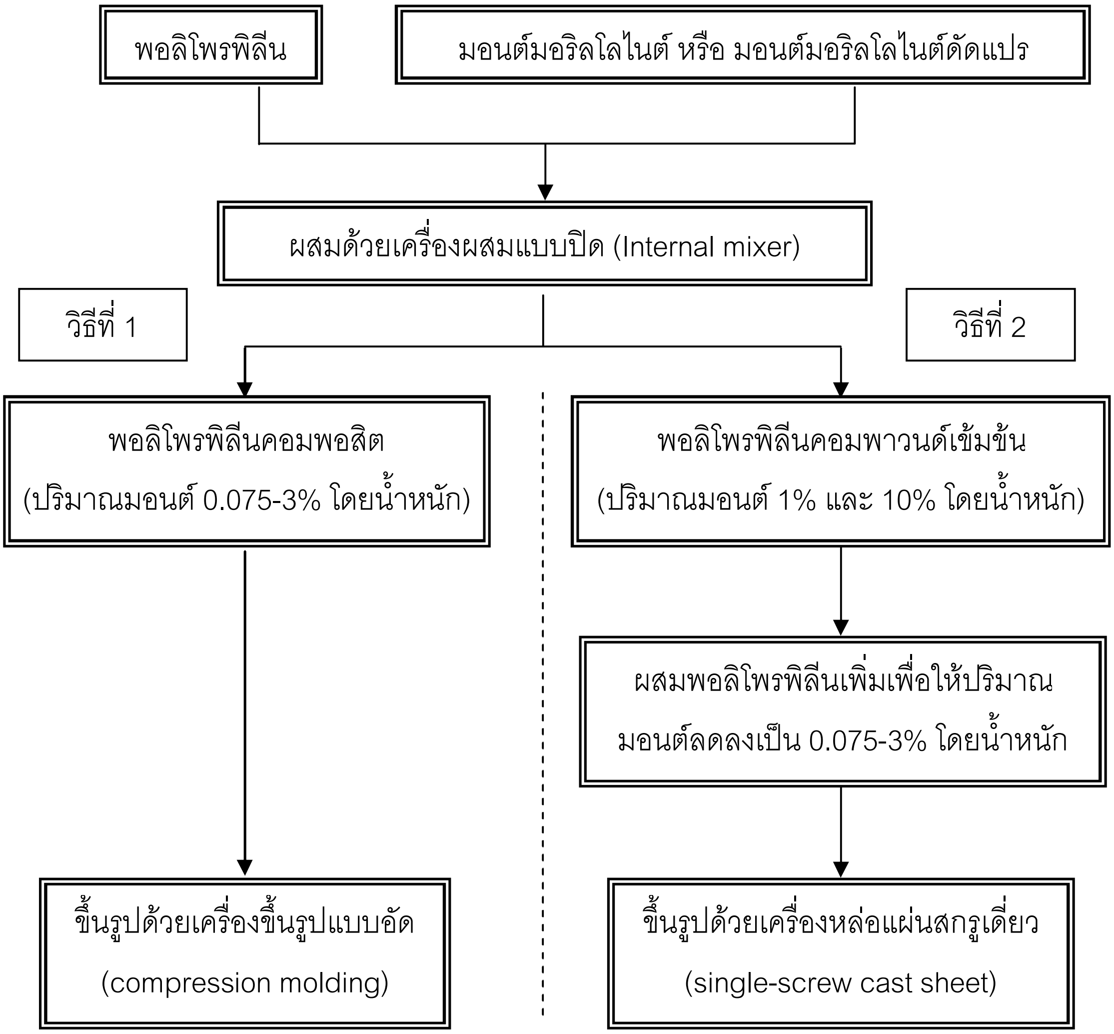
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ตะแกรงร่อนสาร ขนาด 250 mesh
2. ตู้อบสาร
3. เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer, Haake)
4. เครื่องตัด (Zerma)
5. เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding รุ่น V508-18-CX)
6. เครื่องหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (single-screw cast sheet, Haake)
7. สกรู (mixing head แบบ pin type, เส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร, L/D 25)

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL รุ่น JSM-6400)
2. เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD, Bruker AXS รุ่น D8 Discover)
3. ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR, Nicolet รุ่น impact 400)
4. กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM, Olympus รุ่น CX31)
5. Hot stage (รุ่น FP82HT)
6. ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์ (DSC, Perkin-Elmer)
7. เทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์ (TGA, METTLER รุ่น TGA/SDTA851)
8. เครื่องทดสอบแรงดึง (LLOYD Universal Testing Machine รุ่น model 500)
9. เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Gotech รุ่น GT-7045MD)

3.2 วิธีการเตรียมและขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

นำมอนต์มอริลโลไนต์ หรือ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรง ขนาด 250 mesh และอบในตู้อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง มาผสมกับพอลิโพรพิลีนตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.1 โดยสามารถแบ่งวิธีการผสมและขึ้นรูปได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

ตารางที่ 3.1 สูตรต่าง ๆ ที่ใช้ในการเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณสารก่อนิวเคลียสผลึก (กรัม)		Heat Stabilizer (กรัม)
	มอนต์มอริลโลไนต์	มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร	
PP	-	-	0.25
PP/MMT 0.075	0.075	-	0.25
PP/MMT 0.1	0.10	-	0.25
PP/MMT 0.50	0.50	-	0.25
PP/MMT 1.00	1.00	-	0.25
PP/MMT 1.50	1.50	-	0.25
PP/MMT 2.00	2.00	-	0.25
PP/MMT 2.50	2.50	-	0.25
PP/MMT 3.00	3.00	-	0.25
PP/OMMT 0.075	-	0.075	0.25
PP/OMMT 0.10	-	0.10	0.25
PP/OMMT 0.50	-	0.50	0.25
PP/OMMT 1.00	-	1.00	0.25
PP/OMMT 1.50	-	1.50	0.25
PP/OMMT 2.00	-	2.00	0.25
PP/OMMT 2.50	-	2.50	0.25
PP/OMMT 3.00	-	3.00	0.25

3.2.1 วิธีที่ 1 : กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด

3.2.1.1 การเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

นำพอลิโพรพิลีนผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ หรือ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ในปริมาณ 0.075 0.1 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 และ 3.0% โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมแบบปิด โดยตั้งภาวะการผสมที่อุณหภูมิเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนผสมช่วงแรก 40 rpm เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้น ใช้ความเร็วรอบการหมุนผสม 60 rpm เป็นเวลา 5 นาที และตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัด

3.2.1.2 การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

นำพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตที่เตรียมได้ใส่ลงในแม่แบบแล้วนำเข้าเครื่องขึ้นรูปแบบอัด โดยตั้งภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความดันเท่ากับ 1000 psi เป็นเวลา 10 นาที

3.2.2 วิธีที่ 2 : กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

3.2.2.1 การเตรียมพอลิโพรพิลีนคอมพาวนด์เข้มข้น

นำพอลิโพรพิลีนผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ หรือ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ในปริมาณ 1% และ 10% โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องผสมแบบปิด โดยตั้งภาวะการผสมที่อุณหภูมิเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบการหมุนช่วงแรก 40 rpm เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นใช้ความเร็วรอบการหมุนผสม 60 rpm เป็นเวลา 5 นาที และตัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องตัด

3.2.2.2 การขึ้นรูปพอลิโพรพิลีนคอมพอสิต

นำพอลิโพรพิลีนคอมพาวนด์ 1% โดยน้ำหนักมาผสมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อให้ได้ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ลดลงเป็น 0.075 0.1 และ 0.5% โดยน้ำหนัก และพอลิโพรพิลีนคอมพาวนด์ 10% โดยน้ำหนักมาผสมกับพอลิโพรพิลีนเพื่อให้ได้ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ลดลงเป็น 1.0 1.5 2.0 2.5 และ 3.0% โดยน้ำหนัก ผ่านเข้าเครื่องหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (single-screw cast sheet) โดยตั้งอุณหภูมิที่กระบอกสกรูเท่ากับ 190 210 220 และ 225 องศาเซลเซียสตามลำดับ ความเร็วรอบการหมุนของสกรู 80 rpm และแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ได้นี้ผ่านลูกกลิ้งหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3.3 การตรวจสอบมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

3.3.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตรวจดูลักษณะรูปร่างอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร โดยนำมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมายึดติดบนแท่นวางชิ้นงาน ทำการเคลือบผิวทอง เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้แก่ตัวอย่าง และเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดประจุอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของตัวอย่าง แล้วนำไปส่องดูลักษณะรูปร่างอนุภาค ด้วยเทคนิคสแกนนิงอิเล็กตรอน-ไมโครสโกปี (Scanning Electron Microscopy)

3.3.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟาเรดสเปกโทรโฟโต-มิเตอร์

ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ซึ่งมีขั้นตอนในการตรวจสอบ ดังนี้

1. นำมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมาบดผสมกับโพแทส-เซียมโบรไมด์ (KBr) ในอัตราส่วน KBr 2 ส่วน ต่อมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1 ส่วน จากนั้นนำไปอัดเป็นแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องไฮโดรลิกอัดแผ่นตัวอย่าง

2. นำแผ่นฟิล์มที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทโฟโต-มิเตอร์ (Nicolet – Impact 400)

3.3.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

ตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ ภาวะที่ใช้ในการทดลองหลอดรังสีเอกซ์ Cu แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ Cukα โดยตั้งภาวะทดสอบที่ 40 kV 40 mA ความเร็วทดสอบเท่ากับ 1 องศาต่อนาที และช่วงการตรวจสอบ 2θ = 2-10 องศา คำนวณระยะห่างระหว่างระนาบ 001 (d001) ของมอนต์มอริลโลไนต์ จากสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) ดังนี้

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

โดย
- d คือ ระยะห่างระหว่างชั้นผลึก
- n คือ ตัวเลขจำนวนเต็ม (n = 1)
- λ คือ ความยาวคลื่น (wavelength) ของแสง (λ = 0.1542 นาโนเมตร)
- θ คือ มุมที่รังสีเอกซ์ตกกระทบผิวของผลึก

3.3.4 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

ตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ เพื่อศึกษารูปผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ภาวะที่ใช้ในการทดลองหลอดรังสีเอกซ์ Cu แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ Cukα โดยตั้งสภาวะทดสอบที่ 40 kV 40 mA ความเร็วทดสอบเท่ากับ 1 องศาต่อนาที และช่วงการตรวจสอบ 2θ = 2-30 องศา

3.4 การตรวจสอบการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิโพรพิลีน

3.4.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

ตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ภาวะที่ใช้ในการทดลองหลอดรังสีเอกซ์ Cu แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ Cukα โดยตั้งภาวะทดสอบที่ 40 kV 40 mA ความเร็วทดสอบเท่ากับ 1 องศาต่อนาที และช่วงการตรวจสอบ 2θ = 2-10 องศา

3.5 การตรวจสอบประสิทธิภาพของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดที่ไม่ผ่านการดัดแปรและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรในการทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน

3.5.1 การตรวจสอบด้วยเทคนิคไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

ตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิคไวด์แองเกิล-เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน เพื่อวิเคราะห์รูปแบบผลึก ภาวะที่ใช้ในการทดลองหลอดรังสีเอกซ์ Cu แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ Cukα โดยตั้งภาวะทดสอบที่ 40 kV 40 mA ความเร็วทดสอบเท่ากับ 1 องศาต่อนาที และช่วงการตรวจสอบ 2θ = 5-30 องศา

3.5.2 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า

ตรวจสอบรูปร่างและขนาดสเฟียรูไลต์เฉลี่ยของชิ้นงานพอลิโพรพิลีน โดยตัดชิ้นทดสอบสี่เหลี่ยมจากแผ่นพอลิโพรพิลีน ประกบแผ่นพอลิโพรพิลีนด้วยแผ่นกระจก นำไปวางบนแท่น hot stage แล้วกดให้แผ่นพอลิโพรพิลีนเป็นแผ่นบาง ตั้งภาวะทดสอบที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 200 องศาเซลเซียส ลดอุณหภูมิโดยใช้อัตราให้ความร้อนเท่ากับ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 115 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับการเกิดผลึก นำแผ่นกระจกที่ประกบแผ่น

พอลิโพรพิลีนมาตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง โดยใช้แสงโพลาไรซ์ในการตรวจสอบที่กำลังขยาย 400 เท่า

3.5.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์

ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียล-สแกนนิงคาลอริเมทรี (Differential Scanning Calorimetry) โดยตัดชิ้นทดสอบสี่เหลี่ยมจากแผ่นพอลิโพรพิลีนปริมาณประมาณ 5 มิลลิกรัม บรรจุใส่ใน DSC Pan ชั่งน้ำหนักแน่นอนแล้วปิดผนึก ทำการทดสอบโดยตั้งภาวะการทดสอบดังนี้

1. เพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนถึง 210 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
2. ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 210 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที
3. ลดความร้อนจากอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส จนถึง 50 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการลดอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
4. ให้อุณหภูมิคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 นาที
5. เพิ่มความร้อนจากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนถึง 210 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

ทำการทดสอบภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ตรวจสอบหาอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) โดยวิเคราะห์จากพีกการเกิดผลึก และ ดีกรีของความเป็นผลึก (degrees of crystallinity, X_c) ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$\text{ดีกรีของความเป็นผลึก (\%)} = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \times 100$$

เมื่อ ΔH_f = เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนตัวอย่าง

ΔH_f^0 = เอนทัลปีของพอลิโพรพิลีนที่มีการเกิดผลึก 100%

โดยในที่นี้ให้ ΔH_f^0 มีค่าเท่ากับ 209 จูลต่อกรัม [15]

3.5.4 การตรวจสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์

ตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมทริก-แอนาลิซิส (Thermogravimetric analysis) โดยตัดชิ้นทดสอบสี่เหลี่ยมจากแผ่นพอลิโพรพิลีนปริมาณประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุใส่ใน crucible ตั้งภาวะทดสอบโดยให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วเพิ่มอุณหภูมิโดยใช้อัตราให้ความร้อนเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

3.6 การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิโพรพิลีน

3.6.1 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

ทดสอบสมบัติความทนแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่างพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง โดยวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด ใช้หัวดึงขนาด 1 กิโลนิวตัน ตั้งค่าภาวะทดสอบที่ความเร็วดึงเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะ gauge length เท่ากับ 65 มิลลิเมตร ตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D638 ส่วนวิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว ทดสอบสมบัติความทนแรงดึงตามแนว MD ของชิ้นงานตัวอย่างพอลิโพรพิลีน โดยใช้หัวดึงขนาด 10 กิโลนิวตัน ตั้งค่าภาวะทดสอบที่ความเร็วดึงเท่ากับ 50 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะ gauge length เท่ากับ 100 มิลลิเมตร ตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D882

3.6.2 การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทก ใช้หัวค้อนตีแบบ Izod ทำการทดสอบตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM D256

บทที่ 4

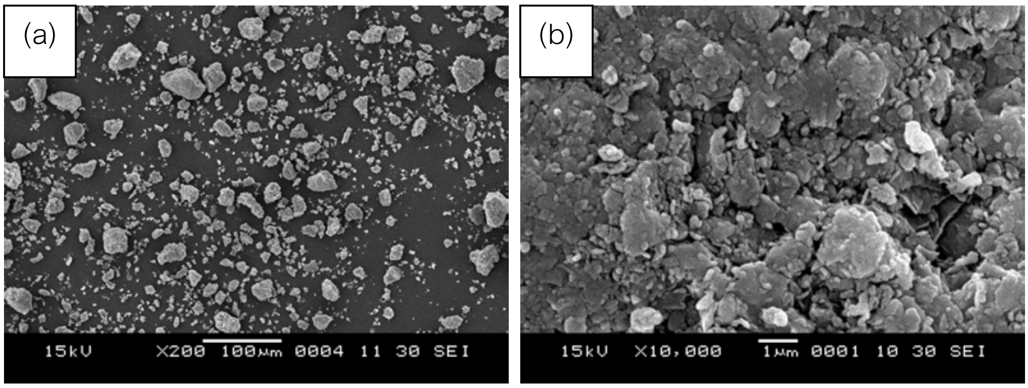
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การตรวจสอบมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

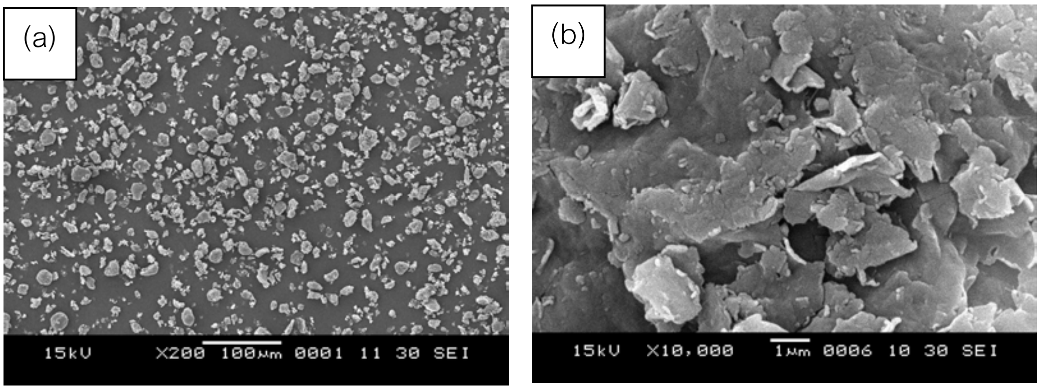
4.1.1 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ผลการตรวจสอบรูปร่างอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1-4.2 ตามลำดับ โดยพบว่าทั้งมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีรูปร่างอนุภาคเหมือนกัน คือเป็นแผ่นและเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ซึ่งจากฉาพถ่ายที่กำลังขยาย 200 เท่า จะเห็นได้ว่า กลุ่มก้อนของมอนต์มอริลโล-ไนต์มีขนาดแตกต่างกัน อยู่ในช่วง 15-50 ไมโครเมตร ในขณะที่กลุ่มก้อนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีการกระจายตัวอยู่ในช่วงที่แคบกว่า และอยู่ในช่วง 15-25 ไมโครเมตร นอกจากนี้ จากภาพถ่ายที่กำลังขยาย 10,000 เท่า จะเห็นว่าแผ่นของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีการแยกชั้นมากกว่าแผ่นของมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากสารดัดแปร (MT2EtOH) แทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร จึงทำให้ระยะห่างของโครงสร้างผลึกเพิ่มมากขึ้น

จากผลการตรวจสอบดังกล่าว เพื่อเป็นการยืนยันว่า มอนต์มอริลโลไนต์หลังผ่านการดัดแปรเกิดการแยกชั้นของซิลิเกต จึงได้ทำการตรวจสอบต่อไปด้วยเทคนิค FT-IR และ XRD



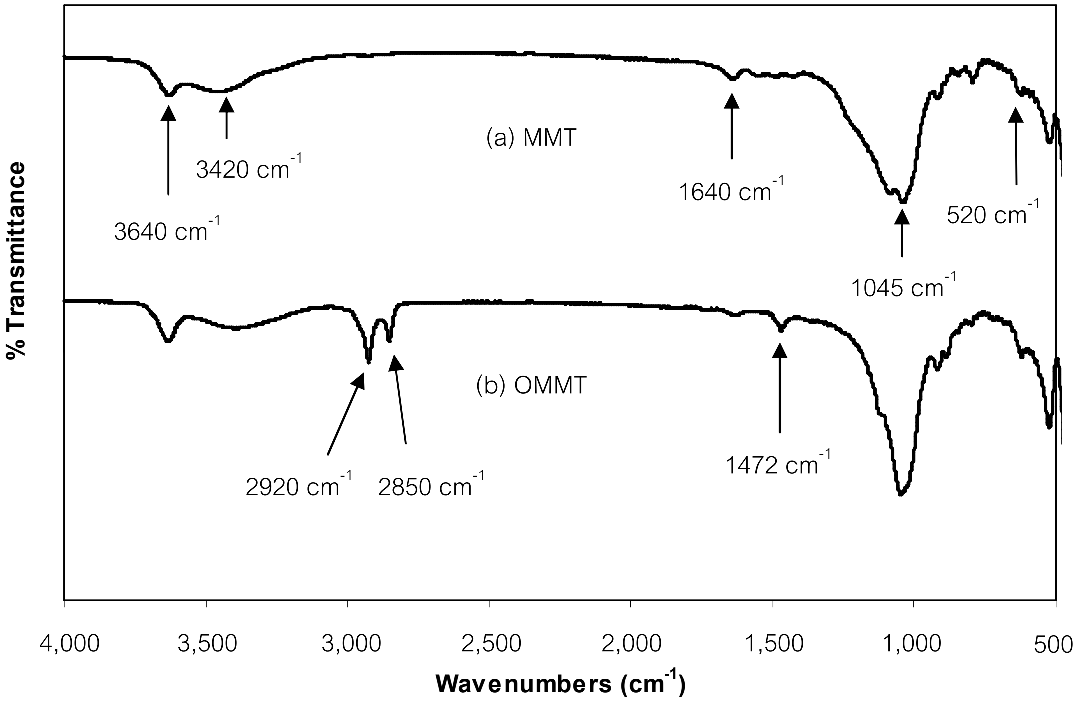
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของมอนต์มอริลโลไนต์ที่กำลังขยาย (a) 200 เท่า และ (b) 10,000 เท่า



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ที่กำลังขยาย (a) 200 เท่า และ (b) 10,000 เท่า

4.1.2 การตรวจสอบด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโต-มิเตอร์

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ด้วยเทคนิค FT-IR ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3

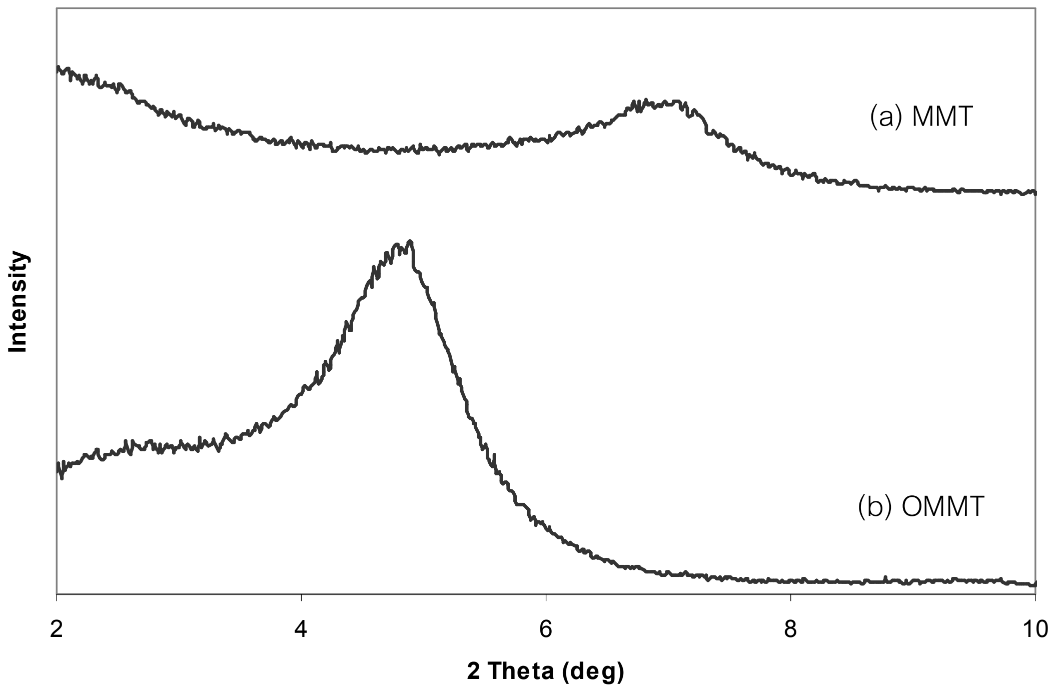


รูปที่ 4.3 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ (b) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของทั้งมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ปรากฏพีกการดูดกลืนของ –OH stretching ของหมู่ไฮดรอกซิล, -OH stretching ของน้ำ, -OH deformation ของน้ำ, Si-O stretching และ Al-O-Si deformation ที่ความถี่ 3640, 3420, 1640, 1045 และ 520 cm^{-1} ตามลำดับ นอกจากนี้ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ยังปรากฏพีกการดูดกลืนของ C-H asymmetric stretching ของ CH_2 หรือ CH_3, C-H symmetric stretching ของ CH_2 หรือ CH_3 และ CH_2 scissoring ที่ความถี่ 2920, 2850 และ 1472 cm^{-1} ตามลำดับ ขณะที่มอนต์มอริลโลไนต์ไม่ปรากฏพีกการดูดกลืนที่ความถี่ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า MT2EtOH ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารดัดแปร อาจแทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยการแทนที่แคตไอออนของโลหะที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน ด้วยปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cationic exchange)

4.1.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเทคนิค XRD ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโล-ไนต์แสดงพีกที่ตำแหน่ง $2\theta = 6.86^\circ$ ซึ่งเมื่อคำนวณหาค่า d-spacing จากสมการของ Bragg's Law ได้ค่าเท่ากับ 12.88 Å ในขณะที่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรแสดงพีกที่ตำแหน่ง $2\theta = 2.75$ และ 4.86° ซึ่งเมื่อคำนวณหาค่า d-spacing ได้ค่าเท่ากับ 32.06 Å และ 18.15 Å ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีช่องว่างระหว่างชั้นผลึกกว้างกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ เนื่องจากโมเลกุลของสารดัดแปรได้แทรกเข้าไปในโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ จึงทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการยืนยันผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM และผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค FT-IR ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

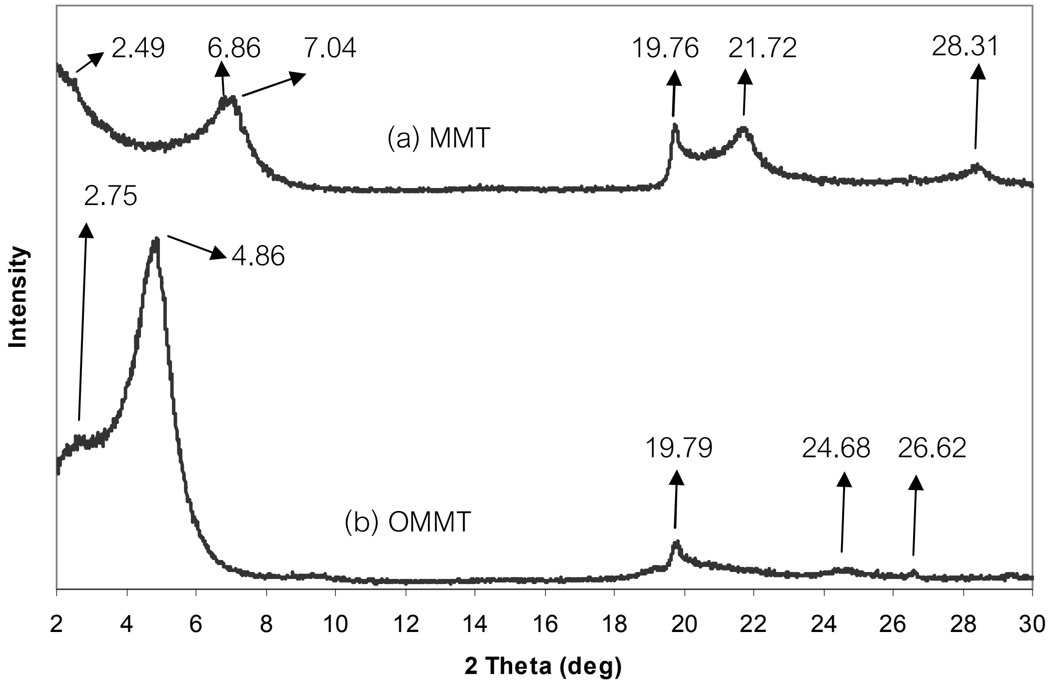


รูปที่ 4.4 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ และ (b) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

4.1.4 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

จากการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ด้วยเทคนิค WAXD ในช่วงการตรวจสอบที่มุม 2θ = 2-30° ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยพบว่าเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์ปรากฏพีกสำคัญที่มุม 2θ = 2.49 6.86 7.04 19.76 21.72 และ 28.31° ซึ่งต่างจากเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรซึ่งปรากฏพีกสำคัญที่มุม 2θ = 2.75 4.86 19.79 24.68 และ 26.62° แสดงว่ามอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ ยังพบว่าเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีพีกสำคัญที่ตำแหน่งไม่ตรงกับพีกสำคัญของพอลิโพรพิลีนที่มีรูปผลึกทั้งแบบแอลฟา (2θ = 14.1 16.9 18.8 และ 21.2°) และบีตา (2θ = 16.1°) (ดูรูปที่ 2.3) จึงทำให้สามารถวิเคราะห์รูปผลึกของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่เติมสารทั้ง 2 ชนิดด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันได้

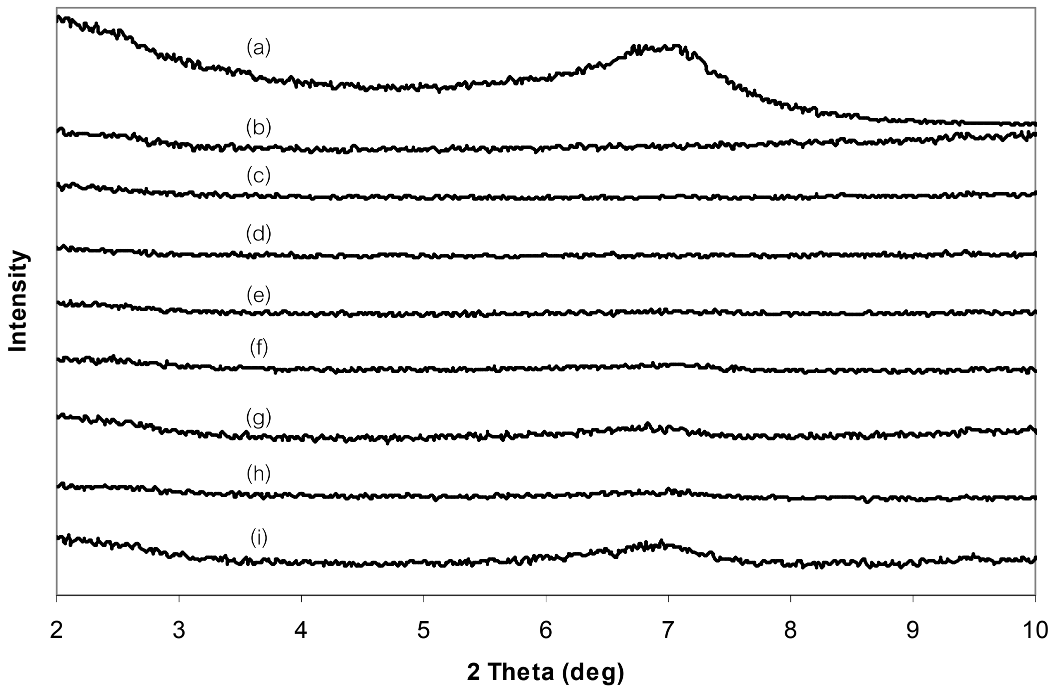


รูปที่ 4.5 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ และ (b) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

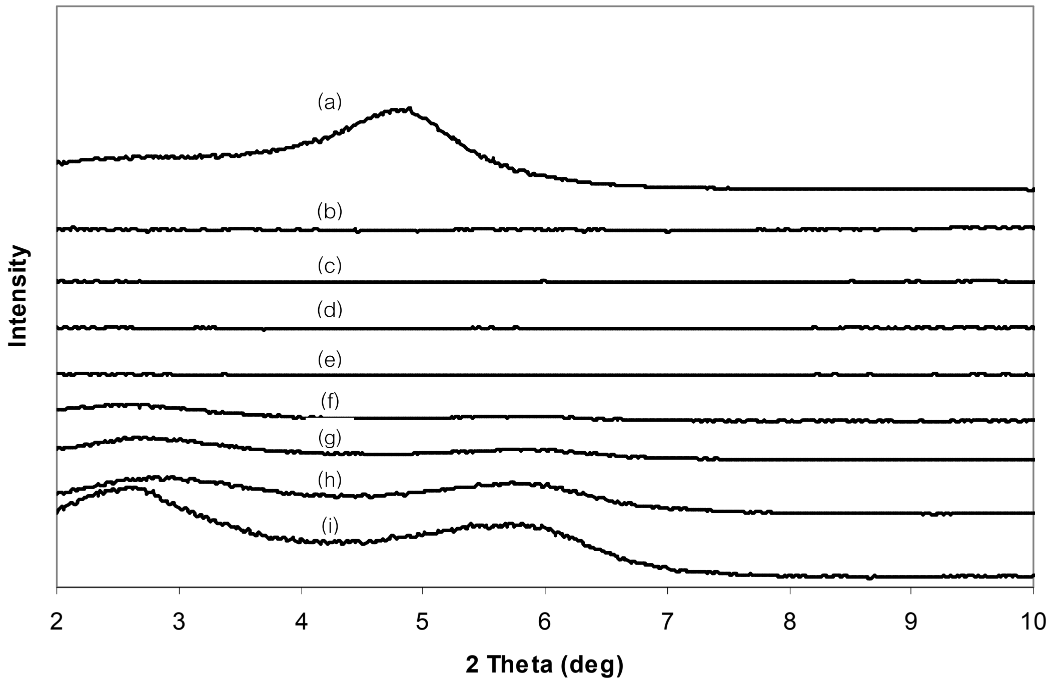
4.2 การตรวจสอบการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

4.2.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด

จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดด้วยเทคนิค XRD ในช่วงการตรวจสอบที่มุม 2θ = 2-10° ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (a) MMT, (b) PP/MMT 0.075%, (c) PP/MMT 0.1%, (d) PP/MMT 0.5%, (e) PP/MMT 1.0%, (f) PP/MMT 1.5%, (g) PP/MMT 2.0%, (h) PP/MMT 2.5% และ (i) PP/MMT 3.0%

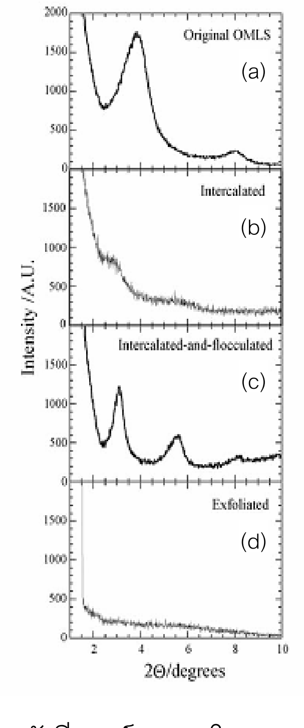


รูปที่ 4.7 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (a) OMMT, (b) PP/OMMT 0.075%, (c) PP/OMMT 0.1%, (d) PP/OMMT 0.50%, (e) PP/OMMT 1.0%, (f) PP/OMMT 1.5%, (g) PP/OMMT 2.0%, (h) PP/OMMT 2.5% และ (i) PP/OMMT 3%

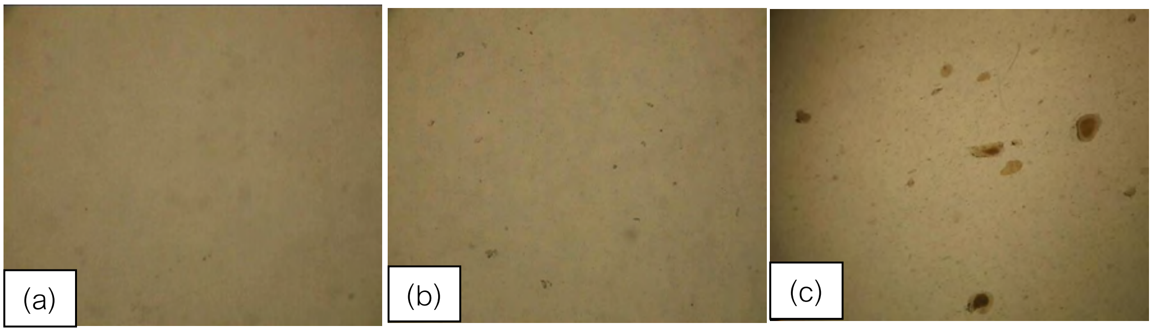
จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด ที่มีมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.075 0.1 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 และ 3.0% โดยน้ำหนักกับพอลิโพรพิลีน พบว่าที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดเท่ากับ 0.075%-1.0% โดยน้ำหนัก ไม่ปรากฏพีกที่แสดงถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด แสดงว่าชั้นของซิลิเกตในมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ได้แยกออกจากกันจนไม่มีโครงสร้างผลึกและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน จึงอาจกล่าวได้ว่าพอลิโพรพิลีนคอมพอสิตดังกล่าวมีโครงสร้างแบบแยกจากกัน (exfoliate)

นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.6 ยังแสดงให้เห็นด้วยว่า ที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 1.5% โดยน้ำหนักขึ้นไป พบพีกของมอนต์มอริลโลไนต์ในช่วง 2θ = 6.80-7.05° ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยพีกดังกล่าวมีความเข้มสูงขึ้นตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น ชี้ให้เห็นว่า พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์มีโครงสร้างแบบแยกจากกันได้ลดลง หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่า ชั้นของซิลิเกตบางส่วนไม่ได้แยกออกจากกัน

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในปริมาณ 1.5% โดยน้ำหนัก พบตำแหน่งพีกที่ 2θ = 2.75° ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร แสดงว่า ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนดังกล่าวมีโครงสร้างแบบแยกจากกันได้ลดลง นอกจากนี้จากรูปที่ 4.7 ยังพบว่าที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 2% โดยน้ำหนักขึ้นไป ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 2.75° ซึ่งเป็นพีกของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร และยังพบพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 5.72° ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แตกต่างกับพีกของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ซึ่งเมื่อพิจารณาเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมดังกล่าว จะมีลักษณะเดียวกับนาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบแทรกสอด (Intercalate) ผสมอยู่กับแบบจับกลุ่ม (flocculate) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (c) [16] ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 2.0% โดยน้ำหนักขึ้นไป พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างแบบแทรกสอดและมีมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรบางส่วนเกิดการจับกลุ่ม ซึ่งเมื่อได้นำพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่ปริมาณ 1.0% และ 3.0% โดยน้ำหนัก มาถ่ายขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยพบว่าในกรณีของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 1.0% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีโครงสร้างแบบแยกจากกัน จะพบอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเป็นจุดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปในพอลิโพรพิลีน ในขณะที่พอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 3.0% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีโครงสร้างแบบแทรกสอดและจับกลุ่ม จะพบอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเกิดการจับกลุ่มซึ่งมีขนาดใหญ่



รูปที่ 4.8 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของนาโนคอมพอสิต (a) OMLS, (b) Intercalated, (c) Intercalated and flocculated และ (d) Exfoliated

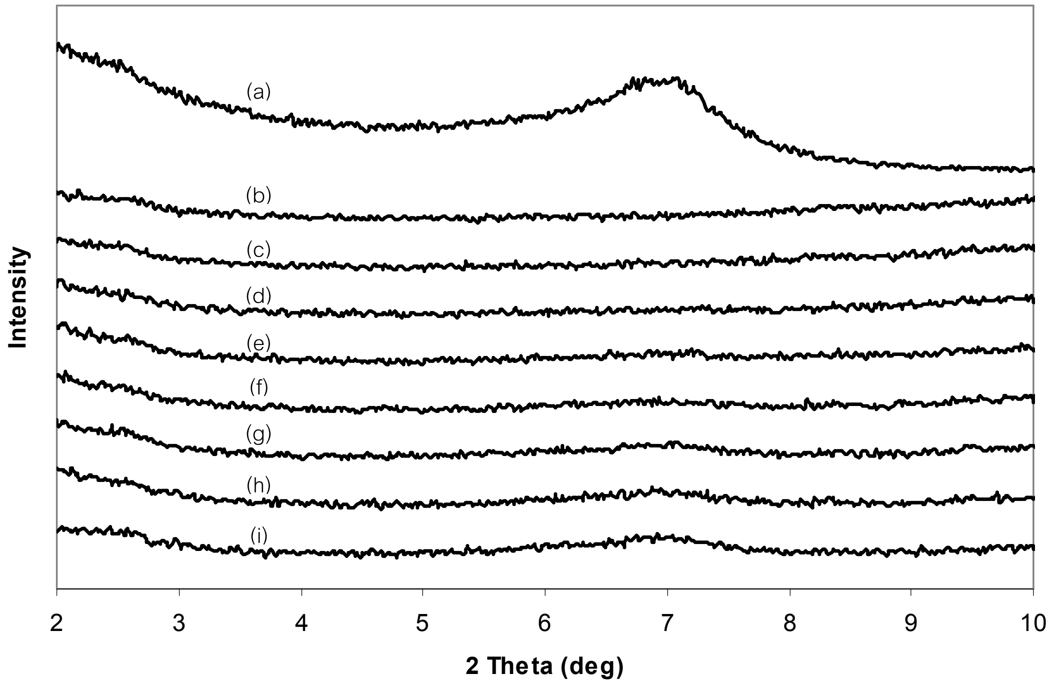


รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า ของพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (a) PP, (b) PP/OMMT 1.0% และ (c) PP/OMMT 3.0%

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในพอลิโพรพิลีนจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด ทำให้สรุปได้ว่า วิธีการขึ้นรูปนี้เหมาะสมกับการผสมมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดในพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณ 0.075%-1.0% โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่อมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดเพิ่มสูงกว่า 1.0% โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรในพอลิโพรพิลีนลดลง

4.2.2 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

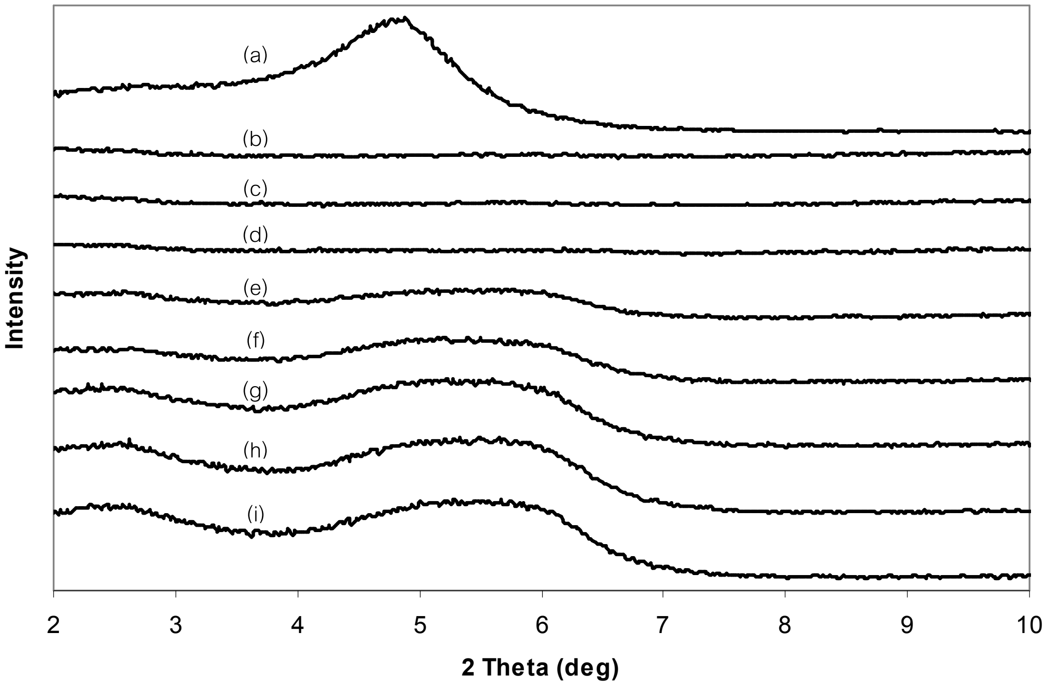
จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวด้วยเทคนิค XRD ในช่วงการตรวจสอบที่มุม 2θ = 2-10° ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (a) MMT, (b) PP/MMT 0.075%, (c) PP/MMT 0.1%, (d) PP/MMT 0.5%, (e) PP/MMT 1.0%, (f) PP/MMT 1.5%, (g) PP/MMT 2.0%, (h) PP/MMT 2.5% และ (i) PP/MMT 3.0%

จากรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวโดยมีมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.075 0.1 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 และ 3.0%โดยน้ำหนัก กับพอลิโพรพิลีน พบว่าที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 0.075%–1.5% โดยน้ำหนัก ไม่ปรากฏพีกที่แสดงถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ แสดงว่าชั้นของซิลิเกตในมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ได้แยกออกจากกันจนไม่มีโครงสร้างผลึกและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน จึงอาจกล่าวได้ว่า พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดังกล่าวมีโครงสร้างแบบแยกจากกัน (exfoliate) อย่างไรก็ตามที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 2.0% โดย

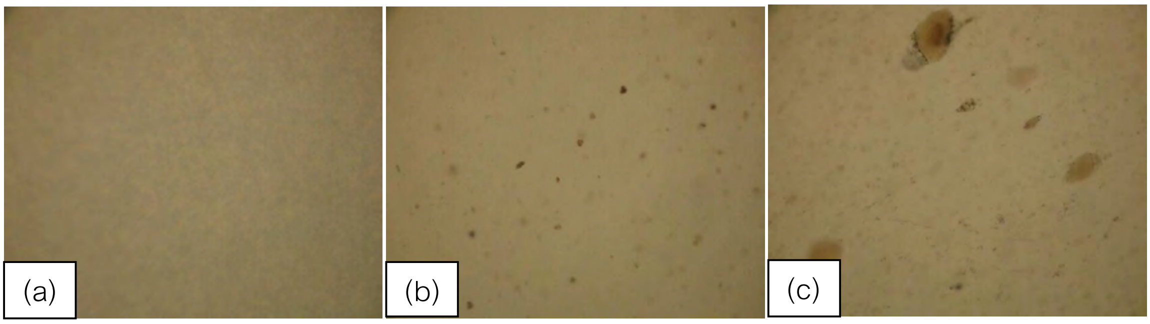
น้ำหนักขึ้นไป พบพีกในช่วง 2θ = 6.95° ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ มอนต์มอริลโลไนต์ ชี้ให้เห็นว่า พอลิโพรพิลีนคอมพอสิตนี้มีโครงสร้างแบบแยกจากกันได้ลดลง กล่าวคือ ชั้นซิลิเกตบางส่วนไม่ได้แยกออกจากกัน



รูปที่ 4.11 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (a) OMMT , (b) PP/OMMT 0.075%, (c) PP/OMMT 0.1%, (d) PP/OMMT 0.5%, (e) PP/OMMT 1.0%, (f) PP/OMMT 1.5%, (g) PP/OMMT 2.0%, (h) PP/OMMT 2.5% และ (i) PP/OMMT 3.0%

จากรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว โดยมีมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.075 0.1 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 และ 3.0% โดยน้ำหนักกับพอลิโพรพิลีน พบว่าที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 0.075%–0.5% โดยน้ำหนัก ไม่ปรากฏพีกที่แสดงถึงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร แสดงว่าชั้นของซิลิเกตในมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ได้แยกออกจากกันจนไม่มีโครงสร้างผลึกและกระจายตัวได้ดีในเมทริกซ์ของพอลิโพรพิลีน จึงอาจกล่าวได้ว่า พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรดังกล่าวมีโครงสร้างแบบแยกจากกัน (exfoliate) นอกจากนี้ที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1.0% โดยน้ำหนักขึ้นไป ปรากฏพีกในลักษณะทำนองเดียวกันกับพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด กล่าวคือ พบพีก 2 ตำแหน่งที่ 2θ = 2.75 และ 5.37°

แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรปริมาณ 1%โดยน้ำหนักขึ้นไป มีโครงสร้างแบบแทรกสอดผสมกันกับแบบจับกลุ่ม ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง 100 เท่าของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 100 เท่า ของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (a) PP, (b) PP/OMMT 0.5% และ (c) PP/OMMT 3.0%

จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในพอลิโพรพิลีนจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว แสดงให้เห็นว่าปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เหมาะสมในการผสมกับพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว คือ 0.075%-1.5% โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เหมาะสมเท่ากับ 0.075%-0.5% โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสูงกว่า 1.5% และ 0.5% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ มีผลทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดลดลง

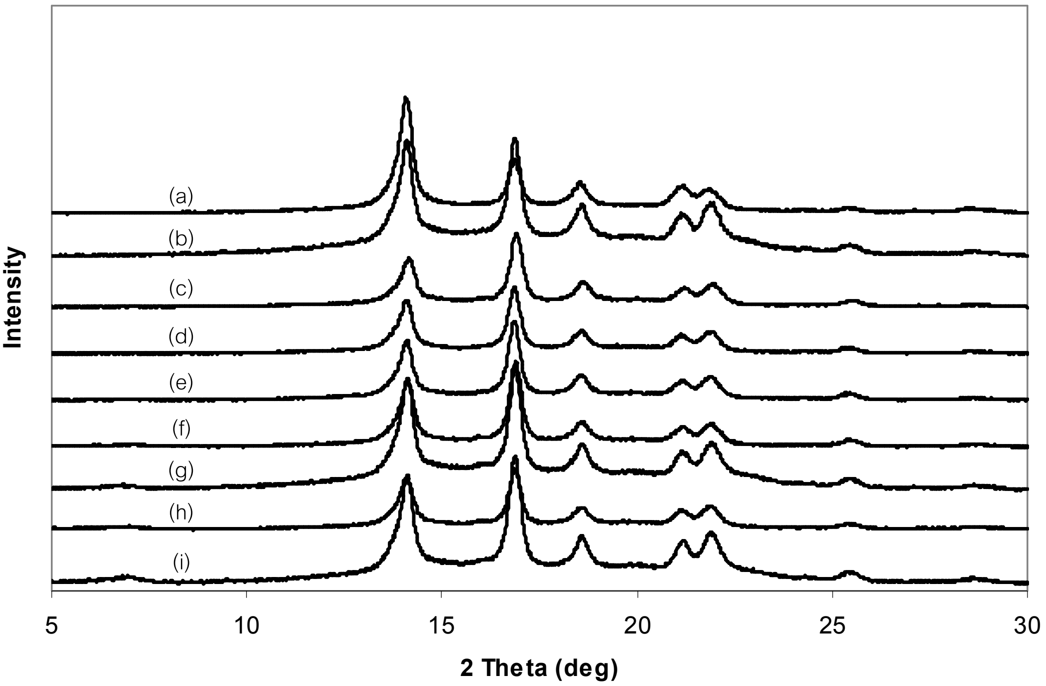
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดในพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการที่แตกต่างกัน สามารถสรุปได้ว่า พอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวสามารถผสมมอนต์มอริลโลไนต์ได้ที่ปริมาณสูงกว่าจากกระบวนการแบบอัด (1.5% ต่อ 1.0% โดยน้ำหนัก) ในขณะที่การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในพอลิโพรพิลีน พบว่าการใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบอัด ทำให้สามารถผสมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรได้ที่ปริมาณสูงกว่ากระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (1.0 % ต่อ 0.5% โดยน้ำหนัก)

4.3 การตรวจสอบประสิทธิภาพของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดที่ไม่ผ่านการดัดแปรและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรในการทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสำหรับพอลิโพรพิลีน

4.3.1 การตรวจสอบด้วยเครื่องไวด์แองเกิลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

4.3.1.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด

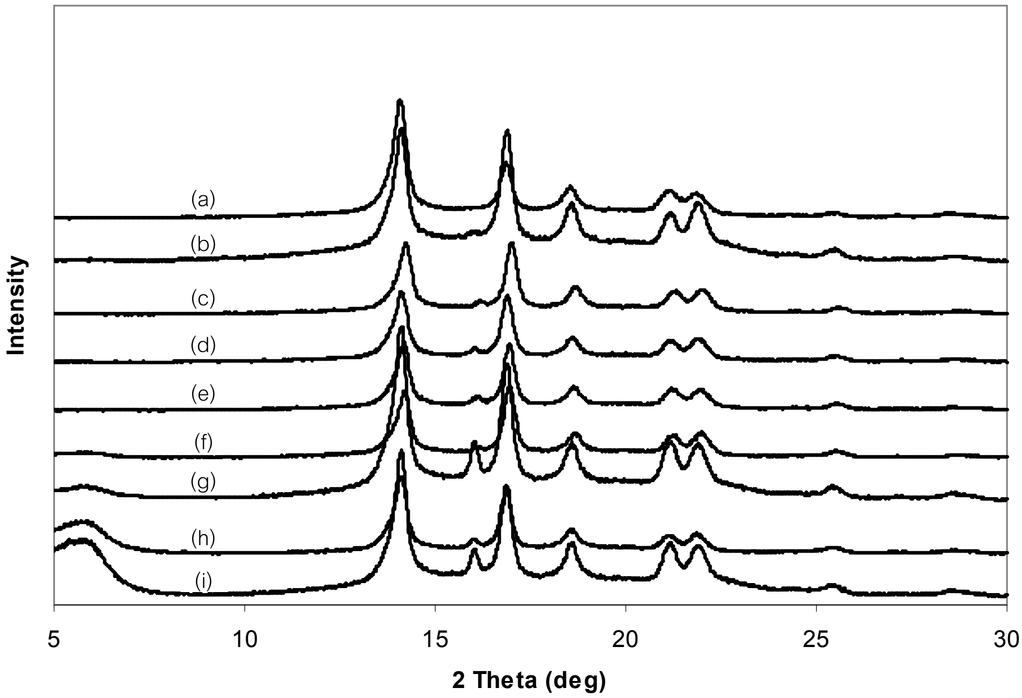
จากการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดด้วยเทคนิค WAXD เพื่อวิเคราะห์รูปแบบผลึกของชิ้นงานพอลิโพรพิลีน ได้เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรม ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14



รูปที่ 4.13 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนทีใส่มอนต์มอริลโลไนต์ จากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (a) PP, (b) PP/MMT 0.075%, (c) PP/MMT 0.1%, (d) PP/MMT 0.5%, (e) PP/MMT 1.0%, (f) PP/MMT 1.5%, (g) PP/MMT 2.0%, (h) PP/MMT 2.5% และ (i) PP/MMT 3.0%

จากรูปที่ 4.13 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์กับพอลิโพรพิลีน พบว่าเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของทั้งพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 14.1 16.9 18.8 และ 21.2° ซึ่งเป็นพีกที่แสดงถึงระนาบ [110] [040] [130] และ [111] ตามลำดับ ของรูป

ผลึกแบบแอลฟาโดยไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 16.1° ที่แสดงระนาบ [003] ของผลึกบีตา แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทุกสูตรมีรูปผลึกแบบแอลฟาเพียงอย่างเดียว ผลจากการทดสอบดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mingliang และคณะ [13] ที่พบว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ไม่ได้ทำให้โครงสร้างผลึกของพอลิโพรพิลีนซึ่งเป็นแบบแอลฟาเปลี่ยนแปลงไป



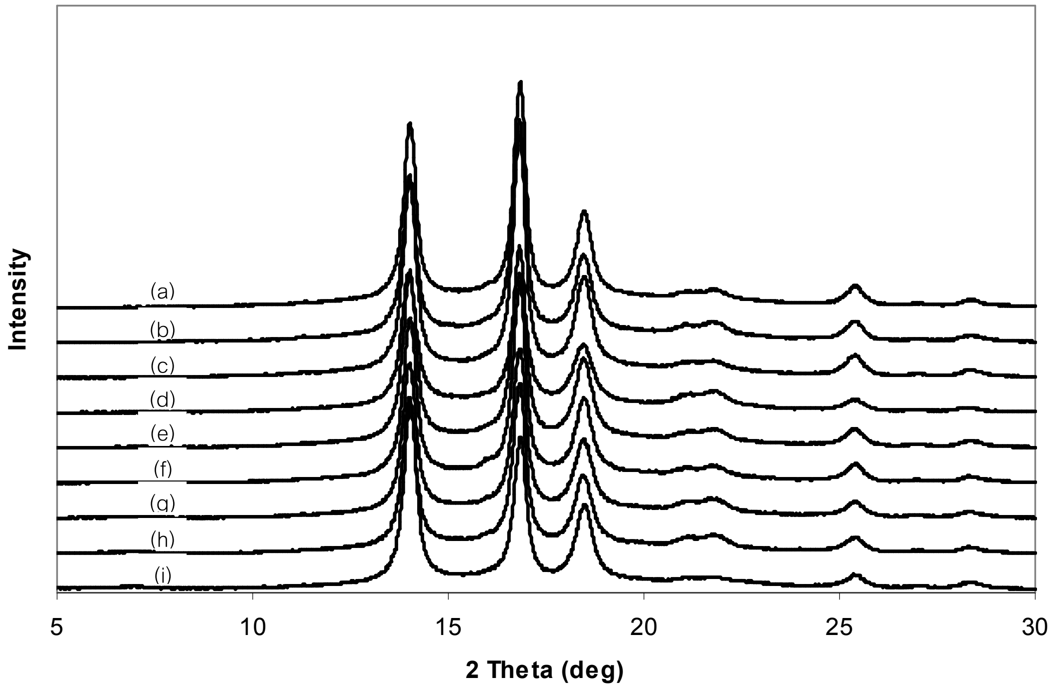
รูปที่ 4.14 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด (a) PP, (b) PP/OMMT 0.075%, (c) PP/OMMT 0.1%, (d) PP/OMMT 0.5%, (e) PP/OMMT 1.0%, (f) PP/OMMT 1.5%, (g) PP/OMMT 2.0%, (h) PP/OMMT 2.5% และ (i) PP/OMMT 3.0%

จากรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรกับพอลิโพรพิลีน พบว่าเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโต-แกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรทุกสูตรปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 14.1 16.9 18.6 และ 21.2° ซึ่งเป็นพีกแสดงถึงระนาบต่าง ๆ ของรูปผลึกแบบแอลฟา และยังพบพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 16.1° ซึ่งแสดงระนาบ [003] ของผลึกแบบบีตาด้วย โดยพีกที่ตำแหน่งดังกล่าวมีความเข้มต่ำ แสดงให้เห็นว่า สารดัดแปรที่นำมาใช้ดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ (MT2EtOH) สามารถก่อผลึกแบบบีตาในพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และคณะ [17] ที่พบว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนไนต์ที่ดัดแปรด้วย Cloisite 15A

(ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับ Cloisite 30B ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้) ทำให้พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบแอลฟาส่วนใหญ่และมีผลึกแบบบีตาปะปนอยู่ในปริมาณต่ำ

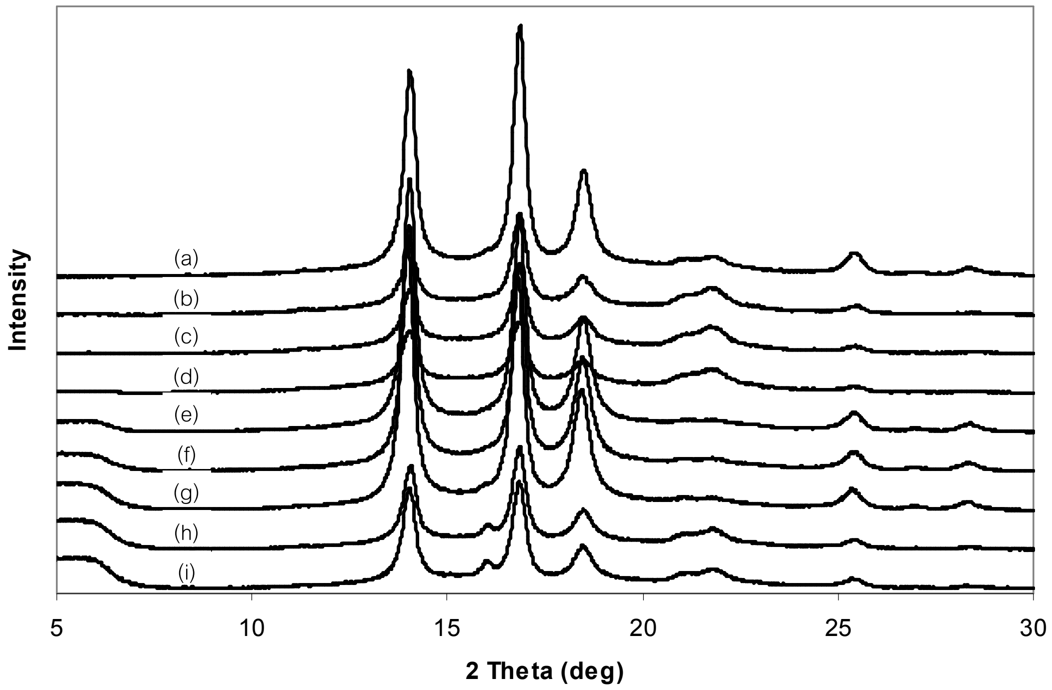
4.3.1.2 **ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว**

จากการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวด้วยเทคนิค WAXD เพื่อวิเคราะห์รูปแบบผลึก ได้ผลเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์จากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (a) PP, (b) PP/MMT 0.075%, (c) PP/MMT 0.1%, (d) PP/MMT 0.5%, (e) PP/MMT 1.0%, (f) PP/MMT 1.5%, (g) PP/MMT 2.0%, (h) PP/MMT 2.5% และ (i) PP/MMT 3.0%

จากรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์กับพอลิโพรพิลีน พบว่าเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของทั้งพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 14.1 16.9 18.6 และ 21.2° ซึ่งเป็นพีกของรูปผลึกแบบแอลฟาเท่านั้น แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทุกสูตรมีรูปผลึกแบบแอลฟาเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.16 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (a) PP, (b) PP/OMMT 0.075%, (c) PP/OMMT 0.1%, (d) PP/OMMT 0.5%, (e) PP/OMMT 1.0%, (f) PP/OMMT 1.5%, (g) PP/OMMT 2.0%, (h) PP/OMMT 2.5% และ (i) PP/OMMT 3.0%

จากรูปที่ 4.16 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรกับพอลิโพรพิลีน พบว่าเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรทุกสูตร ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 14.1 16.9 18.6 และ 21.2° ซึ่งเป็นตำแหน่งของผลึกแบบแอลฟา อย่างไรก็ตาม พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 2.5% และ 3.0% โดยน้ำหนัก ยังปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 2θ = 16.1° ซึ่งแสดงระนาบ [003] ของผลึกบีตาด้วย โดยพีกที่ตำแหน่งดังกล่าวมีความเข้มต่ำ แสดงให้เห็นว่าพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสูตรดังกล่าว มีรูปผลึกแบบแอลฟาและมีผลึกแบบบีตาปะปนอยู่ในปริมาณต่ำ

เมื่อพิจารณารูปผลึกที่เกิดขึ้นในพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค WAXD ทำให้สรุปได้ว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร จะทำให้พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบแอลฟาเพียงอย่างเดียว ในขณะที่การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรจะทำให้พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างเป็นแบบแอลฟาส่วนใหญ่ และมีผลึกแบบบีตาปะปนอยู่ในปริมาณต่ำ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร

มีประสิทธิภาพเป็นสารก่อผลึกแบบแอลฟา ในขณะที่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีประสิทธิภาพเป็นสารก่อผลึกทั้งแบบแอลฟาและบีตา

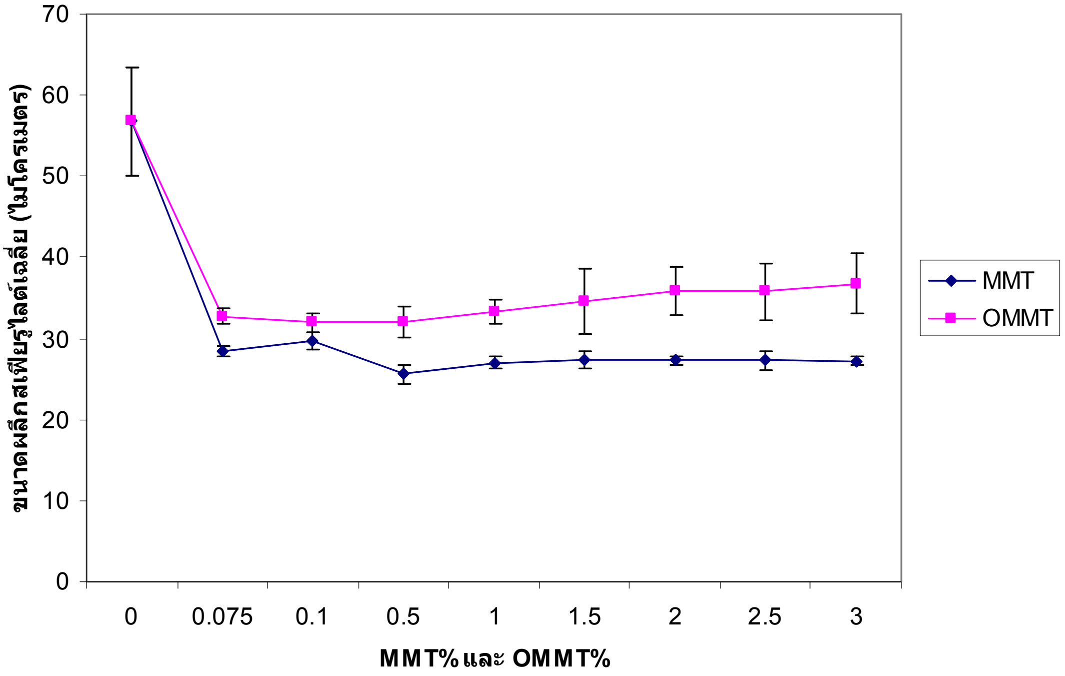
4.3.2 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า

4.3.2.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด

เมื่อนำพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ที่เตรียมได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดไปตรวจสอบหาขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.17 โดยพบว่า ขนาดสเฟียรูไลต์เฉลี่ยของพอลิโพรพิลีนเท่ากับ 56.78 ไมโครเมตร ในขณะที่พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 25.58-29.71 ไมโครเมตร และ 31.94–36.79 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.5% โดยน้ำหนัก มีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยเล็กที่สุดคือ 25.58 ไมโครเมตร และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.1% โดยน้ำหนัก มีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยเล็กที่สุดคือ 31.94 ไมโครเมตร จึงอาจสรุปได้ว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรทำให้พอลิโพรพิลีนมีผลึกสเฟียรูไลต์เล็กลง หรืออาจกล่าวได้ว่า มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนได้

ตารางที่ 4.1 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

ตัวอย่าง	ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ย (ไมโครเมตร)	ตัวอย่าง	ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ย (ไมโครเมตร)
PP	56.78	-	-
PP/MMT 0.075%	28.35	PP/OMMT 0.075%	32.69
PP/MMT 0.1%	29.71	PP/OMMT 0.1%	31.94
PP/MMT 0.5%	25.58	PP/OMMT 0.5%	32.00
PP/MMT 1.0%	26.98	PP/OMMT 1.0%	33.27
PP/MMT 1.5%	27.40	PP/OMMT 1.5%	34.64
PP/MMT 2.0%	27.28	PP/OMMT 2.0%	35.90
PP/MMT 2.5%	27.29	PP/OMMT 2.5%	35.83
PP/MMT 3.0%	27.23	PP/OMMT 3.0%	36.79



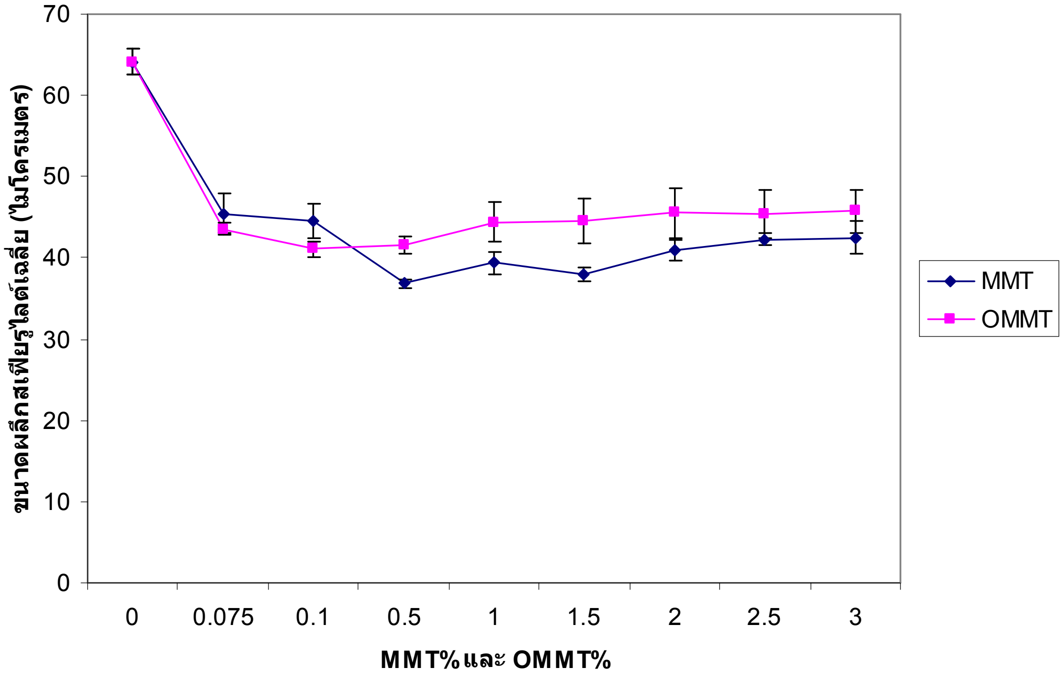
รูปที่ 4.17 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

4.3.2.2 **ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว**

ผลการตรวจสอบขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงของพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

ตัวอย่าง	ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ย (ไมโครเมตร)	ตัวอย่าง	ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ย (ไมโครเมตร)
PP	64.07	-	-
PP/MMT 0.075%	45.49	PP/OMMT 0.075%	43.57
PP/MMT 0.1%	44.57	PP/OMMT 0.1%	41.05
PP/MMT 0.5%	36.84	PP/OMMT 0.5%	41.62
PP/MMT 1.0%	39.43	PP/OMMT 1.0%	44.40
PP/MMT 1.5%	38.00	PP/OMMT 1.5%	44.58
PP/MMT 2.0%	40.92	PP/OMMT 2.0%	45.52
PP/MMT 2.5%	42.29	PP/OMMT 2.5%	45.39
PP/MMT 3.0%	42.51	PP/OMMT 3.0%	45.80



รูปที่ 4.18 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร มีผลทำให้ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เล็กลง โดยพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์มีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 36.84–45.49 ไมโครเมตร ซึ่งพบว่า พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.5% โดยน้ำหนัก มีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยเล็กที่สุด คือ 36.84 ไมโครเมตร ในขณะที่พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยอยู่ในช่วง 41.05–45.80 ไมโครเมตร โดยพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรปริมาณ 0.1% โดยน้ำหนัก มีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยเล็กที่สุดคือ 41.05 ไมโครเมตร จากผลดังกล่าว จึงอาจสรุปได้ว่า มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนได้

จากผลการตรวจสอบขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ในภาวะทดสอบที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส ทำให้สรุปได้ว่า

1. กระบวนการขึ้นรูปทั้ง 2 แบบ การใส่มอนต์มอริลโลไนต์มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เล็กกว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปร

2. ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดมีขนาดเล็กกว่าที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

4.3.3 การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์

4.3.3.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด

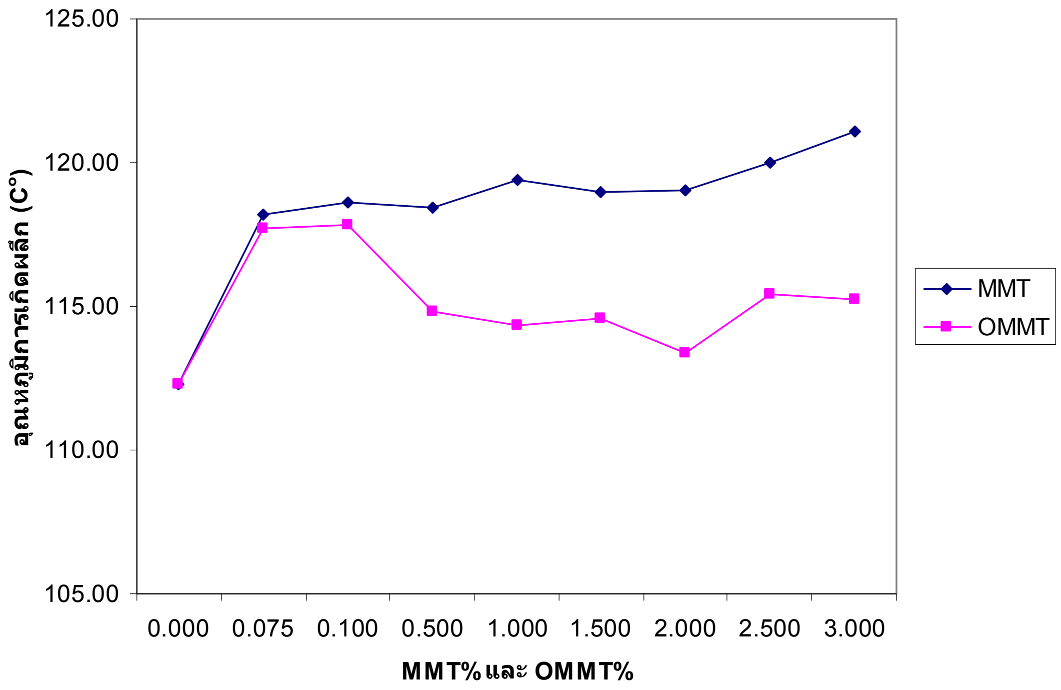
เมื่อนำพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดมาตรวจสอบสมบัติทางความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.19–4.20 โดยพบว่า พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 161.7 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการเกิดผลึก เท่ากับ 112.3 องศาเซลเซียส และมีดีกรีของความเป็นผลึก เท่ากับ 33.88% ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด พบว่า ในกรณีที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอมเหลวสูงขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกสูงขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ยังช่วยทำให้ดีกรีของความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร พบว่า ให้ผลในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร มีผลให้ดีกรีของความเป็นผลึกและอุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปร จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกต่ำกว่า

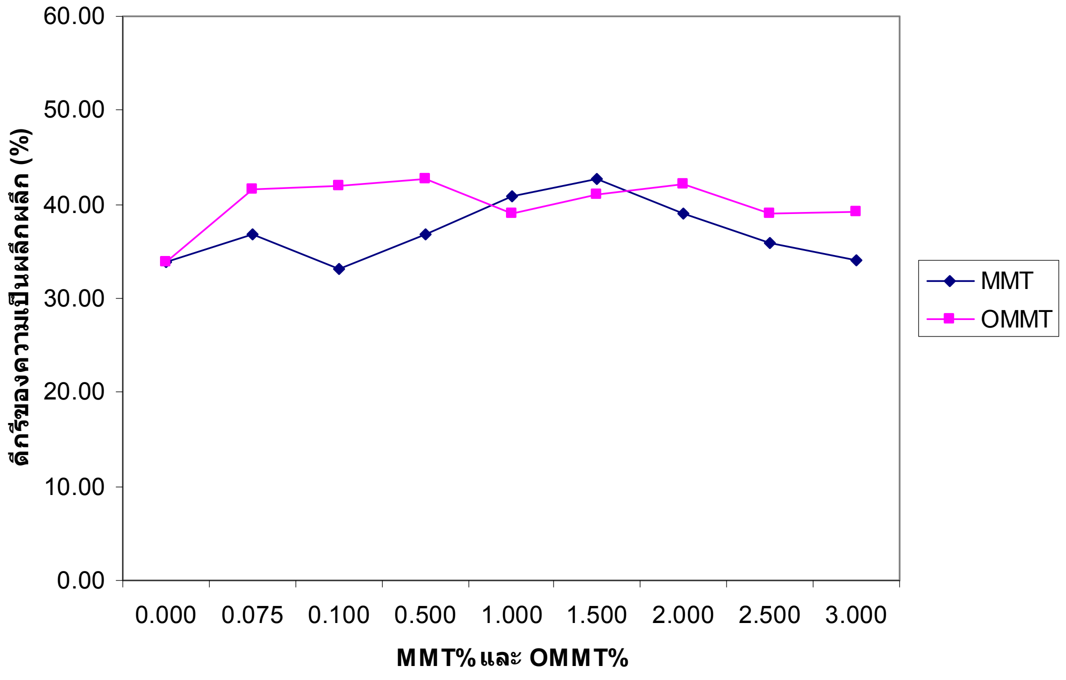
จากผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC จะเห็นได้ว่า ทั้งมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนได้โดยมอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนสูงกว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

ตัวอย่าง	อุณหภูมิหลอมเหลว T_m (°C)	อุณหภูมิการเกิดผลึก T_c (°C)	ดีกรีของความเป็นผลึก X_c (%)
PP	161.7	112.3	33.88
PP/MMT 0.075%	161.7	118.2	36.74
PP/MMT 0.1%	162.5	118.6	33.16
PP/MMT 0.5%	163.7	118.4	36.77
PP/MMT 1.0%	163.3	119.4	40.84
PP/MMT 1.5%	163.4	119.0	42.73
PP/MMT 2.0%	163.6	119.1	38.97
PP/MMT 2.5%	162.0	120.0	35.92
PP/MMT 3.0%	163.1	121.1	34.05
PP/OMMT 0.075%	164.9	117.7	41.53
PP/OMMT 0.1%	162.7	117.8	42.05
PP/OMMT 0.5%	162.9	114.8	42.78
PP/OMMT 1.0%	163.4	114.3	39.06
PP/OMMT 1.5%	162.2	114.6	41.03
PP/OMMT 2.0%	163.9	113.4	42.15
PP/OMMT 2.5%	162.3	115.4	39.10
PP/OMMT 3.0%	163.4	115.2	39.15



รูปที่ 4.19 อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



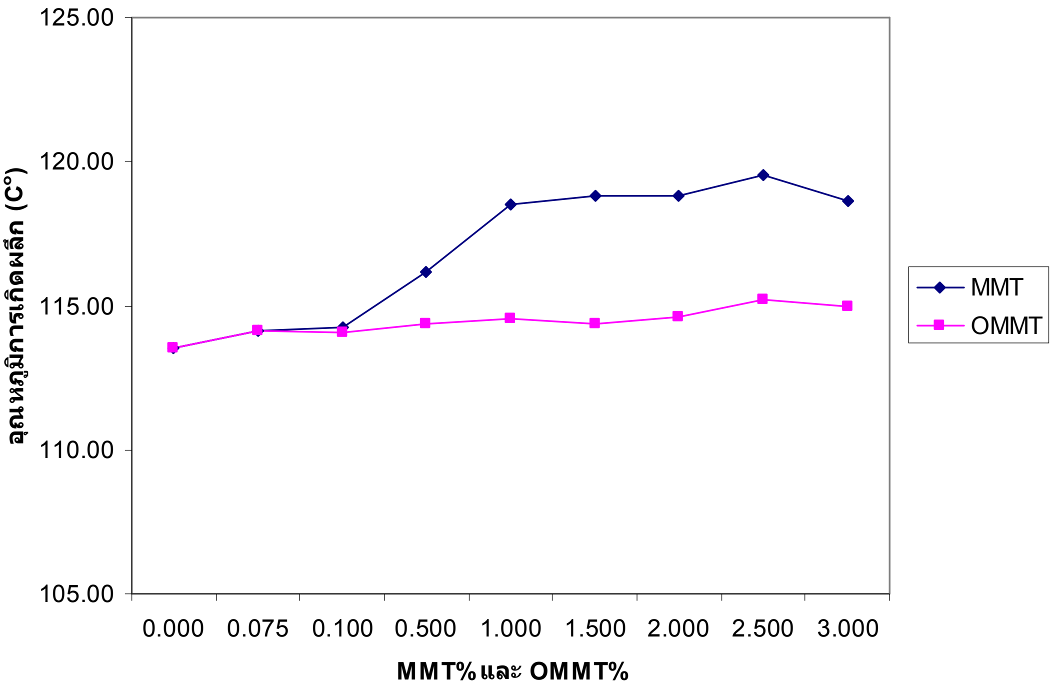
รูปที่ 4.20 ดีกรีของความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

4.3.3.2 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

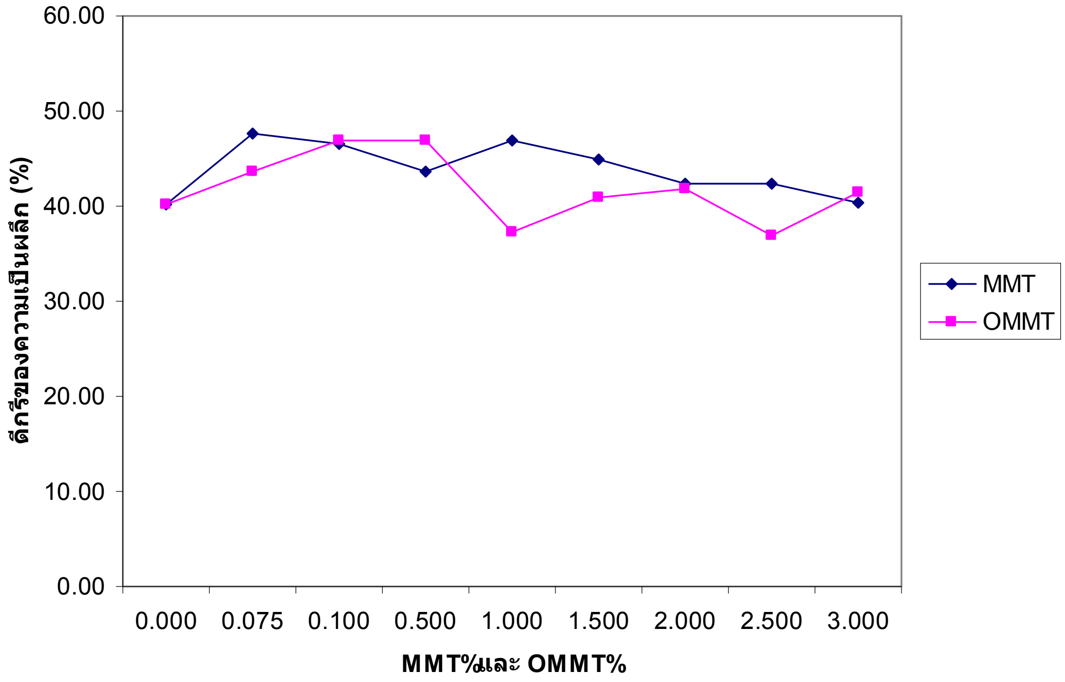
ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว ด้วยเทคนิค DSC แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.21–4.22

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

ตัวอย่าง	อุณหภูมิหลอมเหลว T_m (°C)	อุณหภูมิการเกิดผลึก T_c (°C)	ดีกรีของความเป็นผลึก X_c (%)
PP	163.0	113.5	40.25
PP/MMT 0.075%	166.4	114.1	47.71
PP/MMT 0.1%	165.2	114.2	46.57
PP/MMT 0.5%	164.5	116.2	43.64
PP/MMT 1.0%	164.2	118.5	46.90
PP/MMT 1.5%	165.8	118.8	44.94
PP/MMT 2.0%	164.6	118.8	42.34
PP/MMT 2.5%	165.6	119.5	42.34
PP/MMT 3.0%	165.9	118.6	40.41
PP/OMMT 0.075%	163.5	114.1	43.64
PP/OMMT 0.1%	164.6	114.1	46.90
PP/OMMT 0.5%	163.2	114.4	46.86
PP/OMMT 1.0%	165.0	114.6	37.29
PP/OMMT 1.5%	166.5	114.4	40.96
PP/OMMT 2.0%	163.4	114.6	41.89
PP/OMMT 2.5%	164.1	115.2	36.96
PP/OMMT 3.0%	162.2	115.0	41.43



รูปที่ 4.21 อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



รูปที่ 4.22 ดีกรีของความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

จากตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และดีกรีของความเป็นผลึก (X_c) ของพอลิโพรพิลีน และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว พบว่า พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ 163.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการเกิดผลึก เท่ากับ 113.5 องศาเซลเซียส และมีดีกรีของความเป็นผลึก เท่ากับ 40.25% ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด พบว่า ในกรณีที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร มีผลทำให้พอลิโพรพิลีน มีอุณหภูมิหลอมเหลว อุณหภูมิการเกิดผลึก และดีกรีของความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์สูงกว่าของพอลิโพรพิลีน โดยอุณหภูมิการเกิดผลึกมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรกับพอลิโพรพิลีน พบว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิการเกิดผลึกสูงขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ดีกรีความเป็นผลึกสูงกว่า เมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรต่ำกว่า 1.0% โดยน้ำหนัก สำหรับพอลิโพรพิลีนที่มีมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรตั้งแต่ 1.0% โดยน้ำหนักขึ้นไป มีดีกรีความเป็นผลึกใกล้เคียงกันกับของพอลิโพรพิลีน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้งชนิดที่ไม่ผ่านและผ่านการดัดแปรต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนที่เตรียมได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว จะเห็นได้ว่า พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิหลอมเหลวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งกรณีที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ในขณะที่อุณหภูมิการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรสูงกว่าของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปร จึงอาจสรุปได้ว่า มอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพในการเป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกสูงกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเช่นเดียวกันกับในกรณีของพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

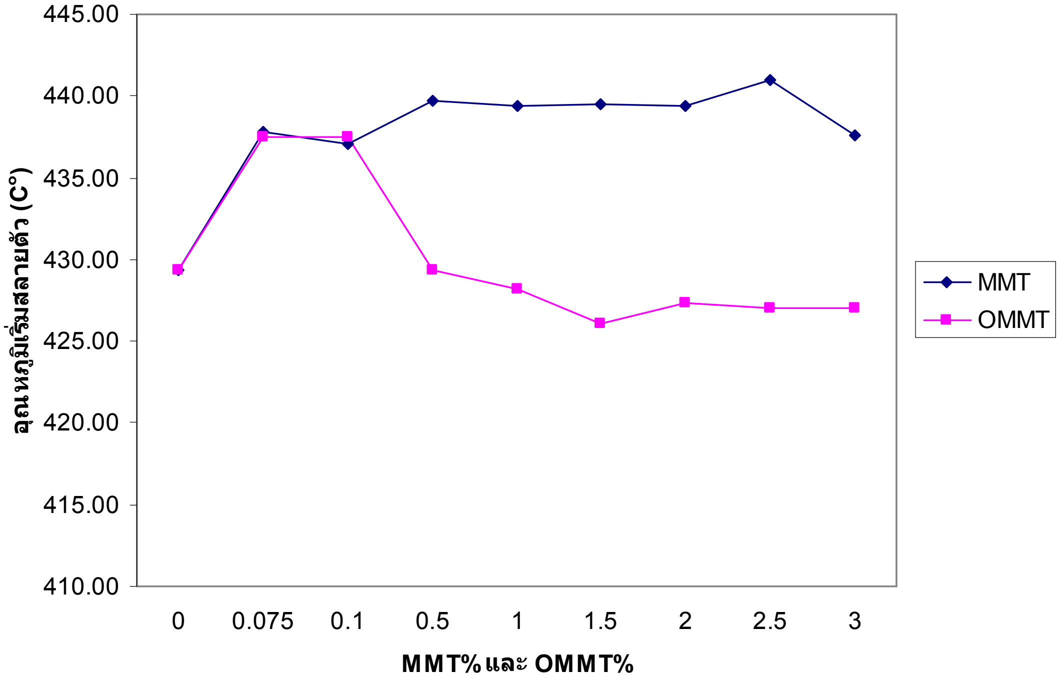
4.3.4 การตรวจสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์

4.3.4.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด

จากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดด้วยเทคนิค TGA โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50-600 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)
PP	429.3	-	-
PP/MMT 0.075%	437.8	PP/OMMT 0.075%	437.5
PP/MMT 0.1%	437.1	PP/OMMT 0.1%	437.5
PP/MMT 0.5%	439.7	PP/OMMT 0.5%	429.3
PP/MMT 1.0%	439.4	PP/OMMT 1.0%	428.2
PP/MMT 1.5%	439.5	PP/OMMT 1.5%	426.1
PP/MMT 2.0%	439.4	PP/OMMT 2.0%	427.4
PP/MMT 2.5%	441.0	PP/OMMT 2.5%	427.1
PP/MMT 3.0%	437.6	PP/OMMT 3.0%	427.0



รูปที่ 4.23 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

จากตารางที่ 4.5 พบว่าพอลิโพรพิลีนเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 429.3 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้น โดยเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์มีแนวโน้มสูงขึ้นและสูงที่สุดเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 2.5% โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร พบว่าที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรน้อยกว่า 0.5% โดยน้ำหนัก มีผลทำให้อุณหภูมิสลายตัวของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเพิ่มขึ้นกลับมีผลทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรลดลง ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากสารที่ดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ (MT2EtOH) เกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส เกิดเป็นอนุมูลอิสระที่สามารถกระตุ้นให้พอลิโพรพิลีนเกิดการสลายตัวได้เร็วขึ้น มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนเกิดการสลายตัวเร็วขึ้น

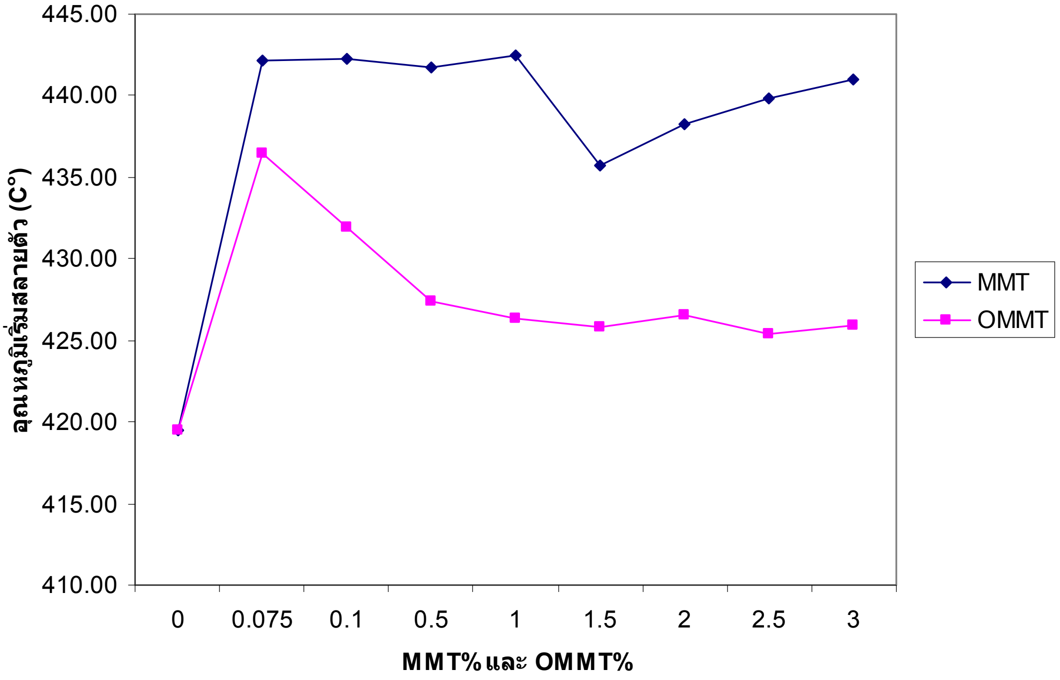
จากผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA สามารถสรุปได้ว่าการใส่มอนต์มอริลโล-ไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร ส่งผลให้พอลิโพรพิลีนมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปร

4.3.4.2 **ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว**

ผลการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.24 โดยพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนเท่ากับ 419.5 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด โดยพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงกว่าพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร นอกจากนี้ ในกรณีของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรลดลงเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับในกรณีของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)	ตัวอย่าง	อุณหภูมิเริ่มสลายตัว (°C)
PP	419.5	-	-
PP/MMT 0.075%	442.2	PP/OMMT 0.075%	436.5
PP/MMT 0.1%	442.3	PP/OMMT 0.1%	431.9
PP/MMT 0.5%	441.8	PP/OMMT 0.5%	427.4
PP/MMT 1.0%	442.5	PP/OMMT 1.0%	426.3
PP/MMT 1.5%	435.8	PP/OMMT 1.5%	425.8
PP/MMT 2.0%	438.2	PP/OMMT 2.0%	426.5
PP/MMT 2.5%	439.8	PP/OMMT 2.5%	425.4
PP/MMT 3.0%	441.0	PP/OMMT 3.0%	425.9



รูปที่ 4.24 อุณหภูมิเริ่มสลายตัวของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิโพรพิลีนที่มีมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าให้ผลในลักษณะเช่นเดียวกัน กล่าวคือ การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนสูงกว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

4.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานพอลิโพรพิลีน

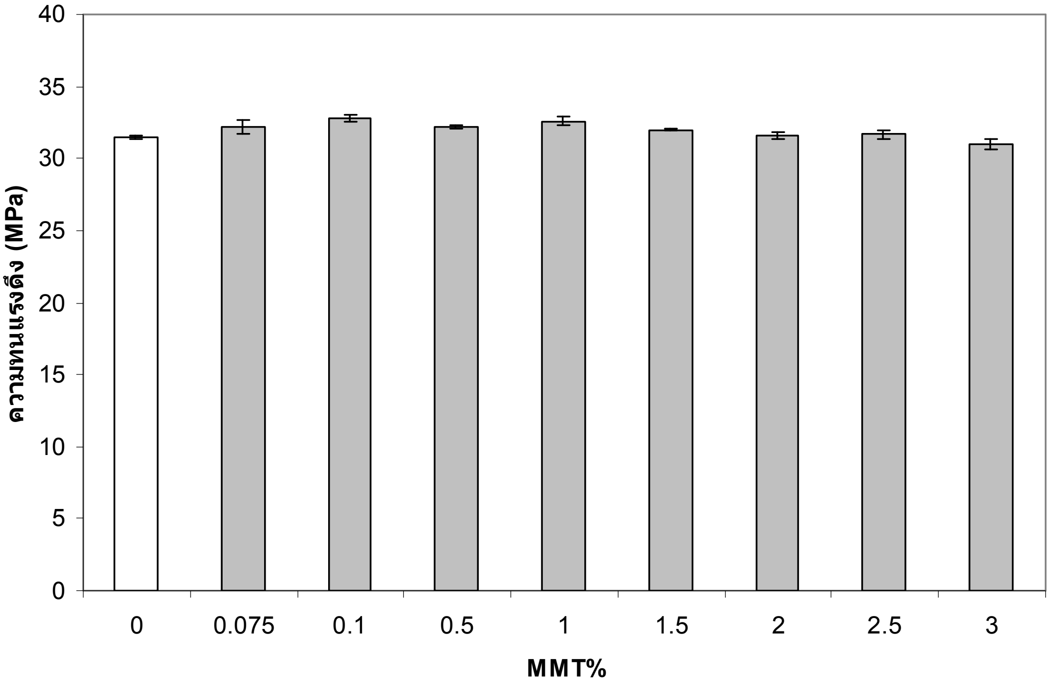
4.4.1 การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

4.4.1.1 ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด

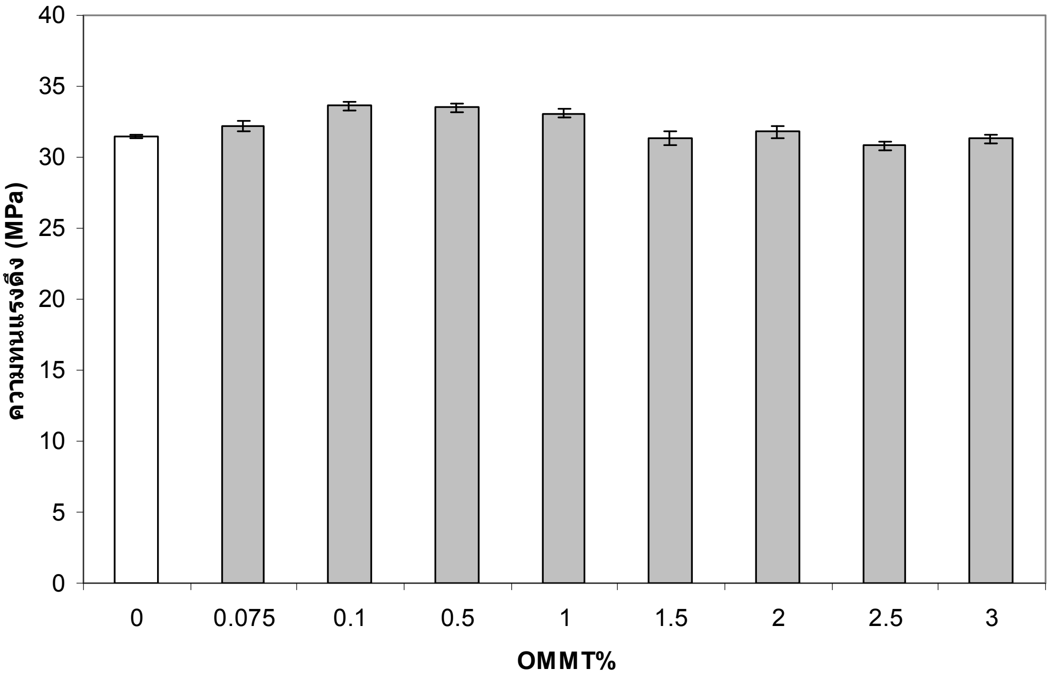
เมื่อนำชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้งชนิดที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรมาทดสอบหาความทนแรงดึงเปรียบเทียบกับชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ไม่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ รูปที่ 4.25-4.26

ตารางที่ 4.7 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

ตัวอย่าง	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ตัวอย่าง	ค่าความทนแรงดึง (MPa)
PP	31.5	-	-
PP/MMT 0.075%	32.2	PP/OMMT 0.075%	32.2
PP/MMT 0.1%	32.8	PP/OMMT 0.1%	33.6
PP/MMT 0.5%	32.2	PP/OMMT 0.5%	33.5
PP/MMT 1.0%	32.6	PP/OMMT 1.0%	33.1
PP/MMT 1.5%	32.0	PP/OMMT 1.5%	31.3
PP/MMT 2.0%	31.6	PP/OMMT 2.0%	31.8
PP/MMT 2.5%	31.7	PP/OMMT 2.5%	30.8
PP/MMT 3.0%	31.0	PP/OMMT 3.0%	31.3



รูปที่ 4.25 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



รูปที่ 4.26 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.25 ซึ่งแสดงค่าความทนแรงดึงของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนและชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร พบว่า ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนมีความทนแรงดึงเท่ากับ 31.5 MPa และชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.075%-1.5% โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ชิ้นงานพอลิโพรพิ-ลีนที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์มากกว่า 1.5% โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงใกล้เคียงกันกับของพอลิโพรพิลีน โดยชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่มีปริมาณมอนต์มอริลโนต์ 3.0% โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงต่ำที่สุด ซึ่งที่เป็นดังนี้ คาดว่าเป็นผลมาจากมอนต์มอริลโลไนต์สามารถกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนลดลงเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์สูงกว่า 1.5% โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการตรวจสอบการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ที่ได้กล่าวไว้แล้ว

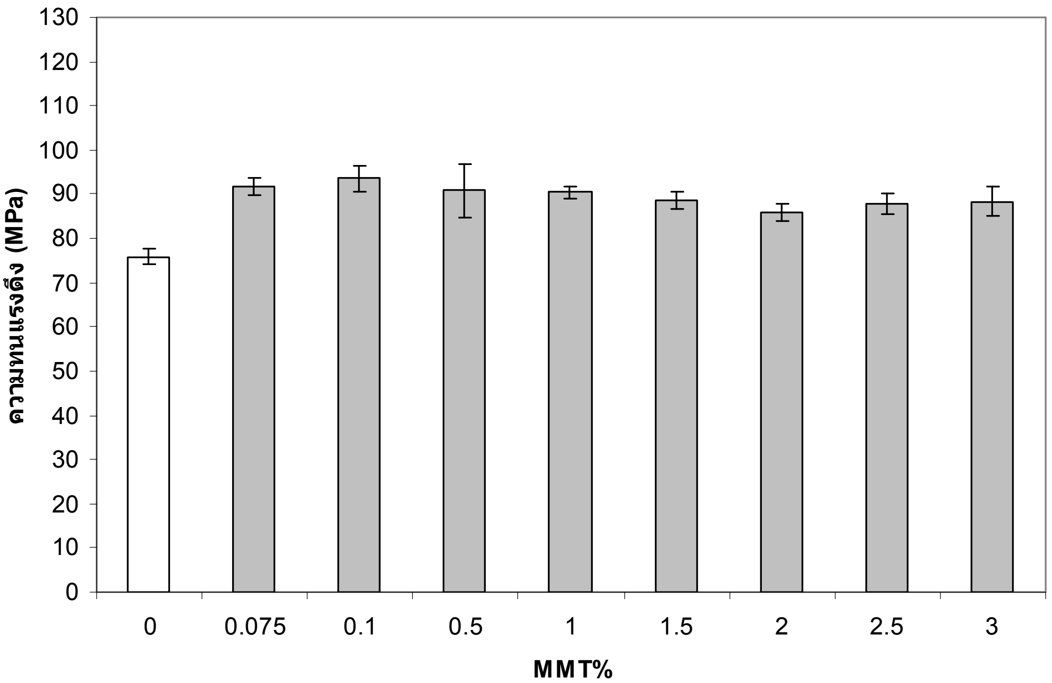
เมื่อพิจารณาค่าความทนแรงดึงของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนและชิ้นงานพอลิโพรพิ-ลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่า ให้ผลในลักษณะทำนองเดียวกันกับชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ไม่ดัดแปร กล่าวคือ ที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรไม่เกิน 1.5% โดยน้ำหนัก ความทนแรงดึงของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรปริมาณมากกว่า 1.5% โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงใกล้เคียงกันกับของพอลิโพรพิลีน ซึ่งคาดว่าที่เป็นเช่นนี้ เป็นผลมาจากความสามารถในการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในพอลิโพรพิลีนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการตรวจสอบการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในพอลิโพรพิลีนด้วยเทคนิค XRD ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.4.1.2 **ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว**

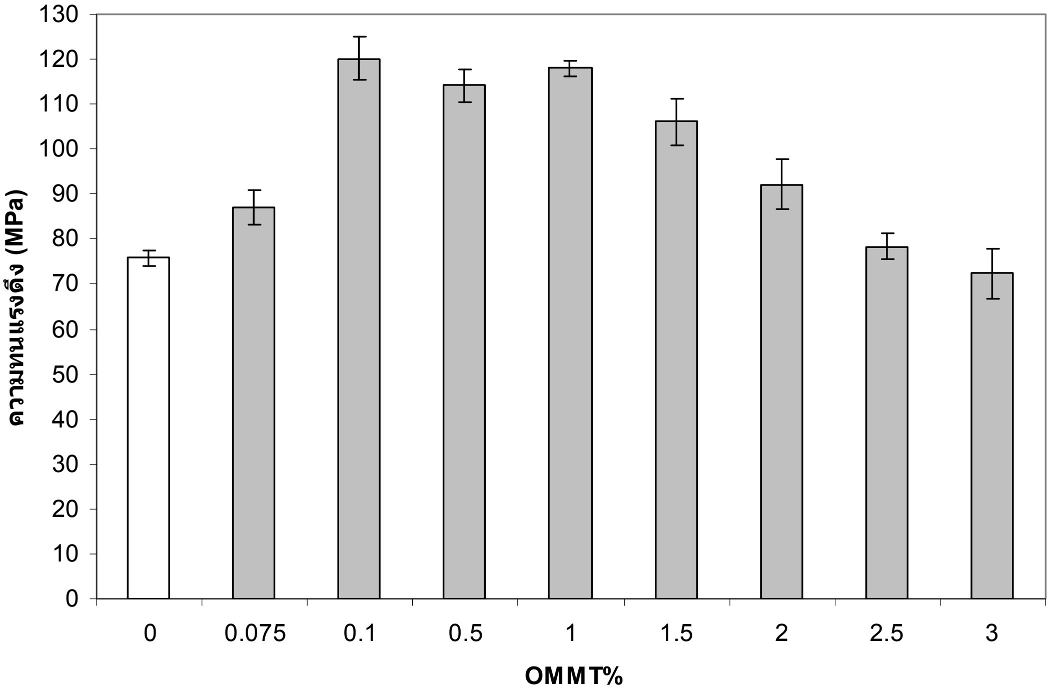
เมื่อนำชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้งชนิดที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรมาทดสอบหาความทนแรงดึงเปรียบเทียบกับชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ไม่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8 และ รูปที่ 4.27-4.28

ตารางที่ 4.8 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

ตัวอย่าง	ค่าความทนแรงดึง (MPa)	ตัวอย่าง	ค่าความทนแรงดึง (MPa)
PP	75.8	-	-
PP/MMT 0.075%	91.7	PP/OMMT 0.075%	87.0
PP/MMT 0.1%	93.5	PP/OMMT 0.1%	120.1
PP/MMT 0.5%	90.8	PP/OMMT 0.5%	114.2
PP/MMT 1.0%	90.5	PP/OMMT 1.0%	118.0
PP/MMT 1.5%	88.6	PP/OMMT 1.5%	106.1
PP/MMT 2.0%	85.8	PP/OMMT 2.0%	92.1
PP/MMT 2.5%	87.7	PP/OMMT 2.5%	78.4
PP/MMT 3.0%	88.4	PP/OMMT 3.0%	72.3



รูปที่ 4.27 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



รูปที่ 4.28 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

เมื่อพิจารณาค่าความทนแรงดึงของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนเปรียบเทียบกับชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ จะเห็นได้ว่าความทนแรงดึงของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์มีค่าใกล้เคียงกันและสูงกว่าความทนแรงดึงของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ โดยชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.1% โดยน้ำหนัก มีความทนแรงดึงสูงที่สุด นอกจากนี้จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.27 ยังพบว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์มากกว่า 1.0% โดยน้ำหนัก จะมีความทนแรงดึงลดลงเล็กน้อย ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากความสามารถในการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิโพรพิลีนลดลง ซึ่งสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากการตรวจสอบการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิโพรพิลีนด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ที่ได้กล่าวไว้แล้ว

ในกรณีของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร พบว่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 0.1 0.5 และ 1.0% โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมากกว่า 1.0% โดยน้ำหนัก กลับมีผลทำให้ความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีนลดลงตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความสามารถในการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิโพรพิลีนลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าความทนแรงดึงของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวมีความทนแรงดึงสูงกว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากระหว่างกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว มีการดึงพอลิโพรพิลีนเข้าลูกกลิ้ง ทำให้ผลึกมีการจัดเรียงตัวตามแนว MD ทำให้ความแผ่นพอลิโพรพิลีนที่ได้มีความแข็งแรงตามแนว MD มากขึ้น

จากผลการทดสอบความทนแรงดึง ทำให้สรุปได้ว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดในพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงดึงสูงขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากการทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค DSC ที่พบว่า ปริมาณผลึกของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้นหลังใส่มอนต์มอริลโลไนต์

4.4.2 การตรวจสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

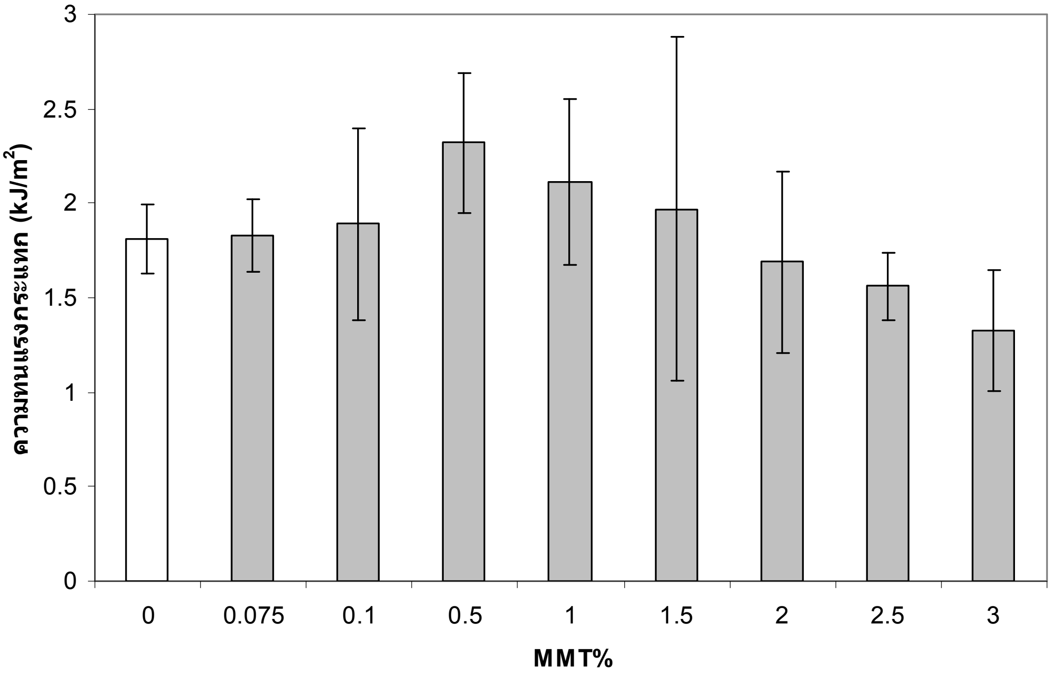
การหาความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนจะทดสอบเฉพาะชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดเท่านั้น เนื่องจากชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว มีความหนาน้อยกว่าชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน

จากการทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทกแบบ Izod ของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.29-4.30 โดยพบว่าชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีน มีความทนแรงกระแทกเท่ากับ 1.81 kJ/m^2 และเมื่อใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปริมาณต่างๆในพอลิโพรพิลีน พบว่า ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.5 และ 1.0% โดยน้ำหนัก มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงกระแทกสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากชิ้นงานทดสอบดังกล่าวมีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยที่เล็กกว่าชิ้นงานทดสอบ (ดูตารางที่ 4.1) นอกจากนี้ จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.29 ยังแสดงให้เห็นด้วยว่า ชิ้นงานทดสอบที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์สูงกว่า 1.5% โดยน้ำหนัก มีความทนแรงกระแทกต่ำกว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีน ทั้งนี้เพราะความสามารถในการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิโพรพิลีนลดลง

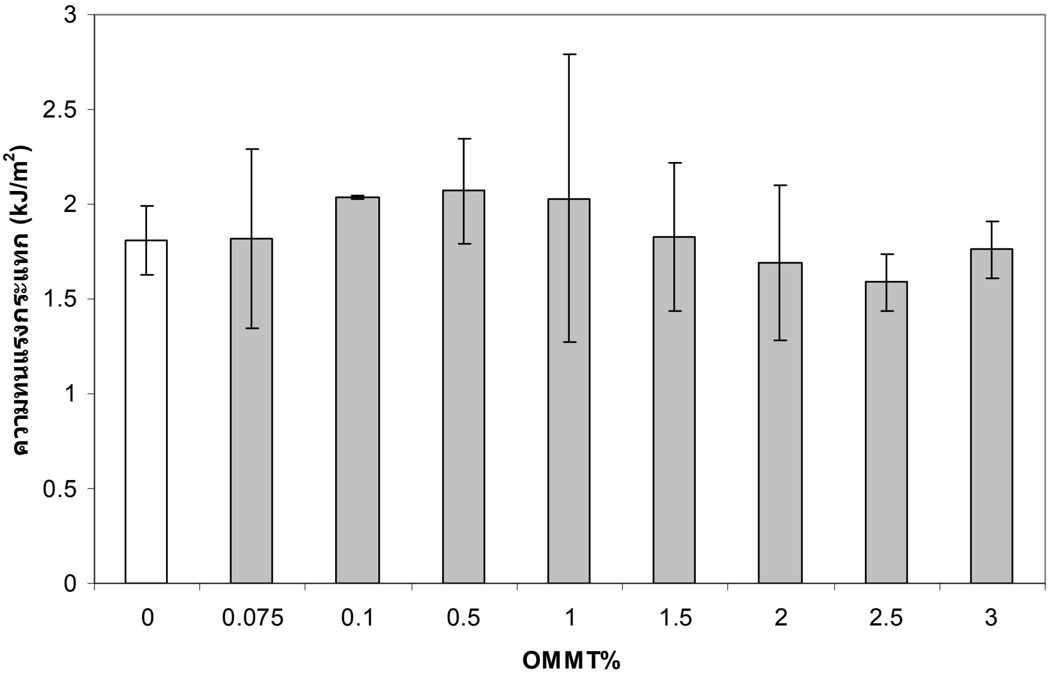
เมื่อพิจารณาค่าความทนแรงกระแทกของชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริล-โลไนต์ดัดแปร พบว่าพอลิโพรพิลีนมีความทนแรงกระแทกสูงขึ้น เมื่อใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในปริมาณ 0.1%-1.0% โดยน้ำหนัก ในขณะที่การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในปริมาณที่สูงกว่า 1.5% มีผลทำให้ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนมีความทนแรงกระแทกลดลง

ตารางที่ 4.9 ค่าความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

ตัวอย่าง	ค่าความทนแรงกระแทก (kJ/m^2)	ตัวอย่าง	ค่าความทนแรงกระแทก (kJ/m^2)
PP	1.81	-	-
PP/MMT 0.075%	1.83	PP/OMMT 0.075%	1.82
PP/MMT 0.1%	1.89	PP/OMMT 0.1%	2.04
PP/MMT 0.5%	2.32	PP/OMMT 0.5%	2.07
PP/MMT 1.0%	2.11	PP/OMMT 1.0%	2.03
PP/MMT 1.5%	1.97	PP/OMMT 1.5%	1.83
PP/MMT 2.0%	1.69	PP/OMMT 2.0%	1.69
PP/MMT 2.5%	1.56	PP/OMMT 2.5%	1.59
PP/MMT 3.0%	1.33	PP/OMMT 3.0%	1.76



รูปที่ 4.29 ค่าความทนแรงกระแทกแบบ Izod ของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.30 ค่าความทนแรงกระแทกแบบ Izod ของชิ้นงานทดสอบพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรปริมาณ 0.075%-3.0% โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความทนแรงกระแทกของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร พบว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทำให้พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงกระแทกสูงกว่าใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ทั้งนี้เพราะชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์มีขนาดสเฟียรูไลต์เฉลี่ยเล็กกว่าชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (ดูตารางที่ 4.1)

จากผลการทดสอบความทนแรงกระแทกทำให้สรุปได้ว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิด ในพอลิโพรพิลีนที่ปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ทั้งนี้คาดว่าเป็นผลมาจากพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดมีขนาดผลึกสเฟียรูไลต์เฉลี่ยเล็กกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ นอกจากนี้ยังอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างผลึกแบบแอลฟาของพอลิโพรพิลีนที่มีมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดนี้มีขนาดเล็กกว่าพอลิโพรพิลีนที่ไม่ได้เติมสารก่อนิวเคลียสผลึก ดังนั้นเมื่อขนาดผลึกเล็กจึงมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้มีโมเลกุลเชื่อมโยงระหว่างผลึกจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดการส่งถ่ายแรงภายในพอลิโพรพิลีนดีขึ้น จึงทำให้ความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเพิ่มสูงกว่า 1.5% และ 1.0% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ กลับมีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีความทนแรงกระแทกลดลง ทั้งนี้เพราะที่ปริมาณดังกล่าว ความสามารถในการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดในพอลิโพรพิลีนลดลง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีรูปร่างอนุภาคเหมือนกัน กล่าวคือเป็นแผ่นและเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน โดยมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีขนาดของกลุ่มก้อนอยู่ในช่วงที่เล็กกว่า และแผ่นของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีการแยกชั้นมากกว่าแผ่นของมอนต์มอริลโลไนต์

5.1.2 จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR และ XRD แสดงให้เห็นว่า มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีช่องว่างระหว่างชั้นผลึกมากกว่ามอนต์มอริลโลไนต์

5.1.3 จากการตรวจสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์-มอริลโลไนต์ดัดแปร ด้วยเทคนิค WAXD แสดงให้เห็นว่า มอนต์มอริลโลไนต์ 2 ชนิดมีโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน

5.1.4 จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค XRD เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของมอนต์มอริล-โลไนต์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในพอลิโพรพิลีน ทำให้สรุปได้ว่า

- ในกรณีที่ใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบอัด พบว่า มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสามารถกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนได้ดีเมื่อมีปริมาณไม่เกิน 1.0% โดยน้ำหนัก
- ในกรณีที่ใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว พบว่า มอนต์มอริลโล-ไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสามารถกระจายตัวในพอลิโพรพิลีนได้ดีเมื่อมีปริมาณไม่เกิน 1.5% และ 0.5% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

5.1.5 จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค WAXD แสดงให้เห็นว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร จะทำให้พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบแอลฟาเพียงอย่างเดียว ในขณะที่การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรจะทำให้พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างเป็นแบบแอลฟาส่วนใหญ่และมีผลึกแบบบีตาปะปนอยู่ในปริมาณต่ำ

5.1.6 การใส่มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปทั้ง 2 ชนิดทำให้พอลิโพรพิลีนมีผลึกสเฟียรูไลต์เล็กลง โดยขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดเล็กกว่าที่เตรียมได้จาก

กระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว จึงกล่าวได้ว่า มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนได้

5.1.7 จากการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าการใส่มอนต์มอริล-โลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปทั้ง 2 กระบวนการ ทำให้อุณหภูมิการเกิดผลึกและดีกรีของความเป็นผลึกของพอลิโพรพิลีนเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า ทั้งมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร สามารถทำหน้าที่เป็นสารก่อนิวเคลียสผลึกของพอลิโพรพิลีนได้โดยมอนต์มอริลโลไนต์มีประสิทธิภาพสูงกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

5.1.8 จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA แสดงให้เห็นว่า การใส่มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรในปริมาณที่เหมาะสม มีผลทำให้พอลิโพรพิลีนมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพอลิโพรพิลีนสูงกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

5.1.9 การใส่มอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรทำให้พอลิโพรพิลีนมีสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

5.1.10 จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า

ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

- ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เหมาะสมในการผสมกับพอลิโพรพิลีนคือ 1.0% โดยน้ำหนัก โดยพอลิโพรพิลีนที่ได้มีอุณหภูมิการเกิดผลึกเท่ากับ 119.4 องศาเซลเซียส ดีกรีของความเป็นผลึกเท่ากับ 40.84% อุณหภูมิเริ่มสลายตัวเท่ากับ 439.4 องศาเซลเซียส ความทนแรงดึงเท่ากับ 32.6 MPa และความทนแรงกระแทกเท่ากับ 2.11 kJ/m^2

- ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เหมาะสมในการผสมกับพอลิโพรพิลีนคือ 0.1% โดยน้ำหนัก โดยพอลิโพรพิลีนที่ได้มีอุณหภูมิการเกิดผลึกเท่ากับ 117.8 องศาเซลเซียส ดีกรีของความเป็นผลึกเท่ากับ 42.05% อุณหภูมิเริ่มสลายตัวเท่ากับ 437.5 องศาเซลเซียส ความทนแรงดึงเท่ากับ 33.6 MPa และความทนแรงกระแทกเท่ากับ 2.04 kJ/m^2

ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

- ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เหมาะสมในการผสมกับพอลิโพรพิลีนคือ 1.0% โดยน้ำหนัก โดยพอลิโพรพิลีนที่ได้มีอุณหภูมิการเกิดผลึกเท่ากับ 118.5 องศาเซลเซียส ดีกรีของความเป็นผลึกเท่ากับ 46.90% อุณหภูมิเริ่มสลายตัวเท่ากับ 442.5 องศาเซลเซียส และ ความทนแรงดึงเท่ากับ 90.5 MPa
- ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เหมาะสมในการผสมกับพอลิโพรพิลีนคือ 0.1% โดยน้ำหนัก โดยพอลิโพรพิลีนที่ได้มีอุณหภูมิการเกิดผลึกเท่ากับ 114.1 องศาเซลเซียส ดีกรีของความเป็นผลึกเท่ากับ 46.90% อุณหภูมิเริ่มสลายตัวเท่ากับ 431.9 องศาเซลเซียส และ ความทนแรงดึงเท่ากับ 120.1 MPa

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการขึ้นรูปหรือการขึ้นรูปด้วยเทคนิคอื่นๆ ซึ่งอาจมีผลต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดเป็นสารก่อผลึก

5.2.2 ศึกษาผลของมอนต์มอริลโลไนต์และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรต่อการเกิดผลึกของพอลิโพรพิลีนแบบอื่นๆ เช่น พอลิโพรพิลีนโคพอลิเมอร์แบบสุ่มหรือแบบบล็อก หรือการใช้มอนต์มอริลโลไนต์ทั้ง 2 ชนิดเป็นสารก่อผลึกสำหรับพอลิเมอร์ชนิดอื่น

รายการอ้างอิง

[1] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์. กรุงเทพ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

[2] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์. ฟิล์มพลาสติก. กรุงเทพ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

[3] นพดล เกิดดอนแฝก. การเกิดผลึกของไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนโดยสารก่อผลึกที่ได้จากการรีไซเคิลขวดเพทที่ใช้แล้วด้วยกระบวนการทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

[4] อรอุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม1.กรุงเทพ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

[5] Nagarajan, K., Levon, K. and Myerson, A.S. Nucleating Agents in Polypropylene. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 59 (2000): 497-508.

[6] Medeiros, E.S., Tocchetto, R.S., Carvalho, L.H., Santos, I.M.G. and Souza, A.G. Nucleating Effect and Dynamic Crystallization of a Poly(propylene)/Talc System. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 66 (2001): 523-531.

[7] Osowiecka, B., Bukowski, A. Zielinski, J., Ciesinska, W. and Zielinski, T. Investigations on Nucleated Polypropylene with Using Thermal Analysis Method. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 74 (2003): 673-679.

[8] ยงยุทธ ประจำ. การเกิดนิวเคลียสผลึกแบบบีตาคอมพอสิตพอลิโพรพิลีน/แร่ดินเหนียว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[9] ไพจิตร ยิ่งศิริวัฒน์. เนื้อดินเซรามิก. พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพ:สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2541.

[10] รัตนวรรณ มกรพันธุ์. Thaiscience. (ออนไลน์).2550. แหล่งที่มา: http://www.thaiscience.com/lab_vol/p18/NANOCLAY.asp (2551, มิถุนายน 26)

[11] Golebiewski, J. and Galeski, A. Thermal Stability of Nanoclay Polypropylene Composites by Simultaneous DSC and TGA. Composites Science and Technology 67 (2007): 3442-3447.

[12] Cauvin, L., Bhatnagar, N. Brieu, M. and Kondo, D. Experimental Study and Micromechanical Modeling of MMT Platelet-Reinforced PP Nanocomposites. Comptes Rendus Mecanique 335 (2007): 702-707.

[13] Mingliang, G., Demin, J. and Weibing, X. Study on the Crystallization Properties of Polypropylene/Montmorillonite Composites. Polymer-Plastics Technology and Engineering 46 (2007): 985-990.

[14] Mingliang, G. and Demin, J. Preparation and Properties of Polypropylene/Clay Nanocomposites using an Organoclay Modified through Solid State Method. Journal of Reinforced Plactics and Composites 28 (2009): 5-16.

[15] Leng,P.B., Akil, H.M. and Lin, O.H. Thermal Properties of Microsilica and Nanosilica Filled Polypropylene Composite with Epoxy as Dispersing Aid. Journal of Reinforced Plactics and Composites 26 (2007): 761-770.

[16] Sinha, S. and Okamoto, M. Polymer/Layered Silicate Nanocomposites: a Review from Preparation to Processing. Progress in Polymer Science 28 (2003): 1539-1641.

[17] Simtech. Melt Processing and Properties of Intercalated Polypropylene/Organoclay Nanocomposites. (ออนไลน์). 2007 แหล่งที่มา: http://www.simtech.a-star.edu.sg/Research/TechnicalReports/TR04FT04.pdf (2553, มีนาคม 31)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

เครื่องมือทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

รูป ก-1 เครื่องตัด (Zerma)

รูป ก-2 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer, Haake)

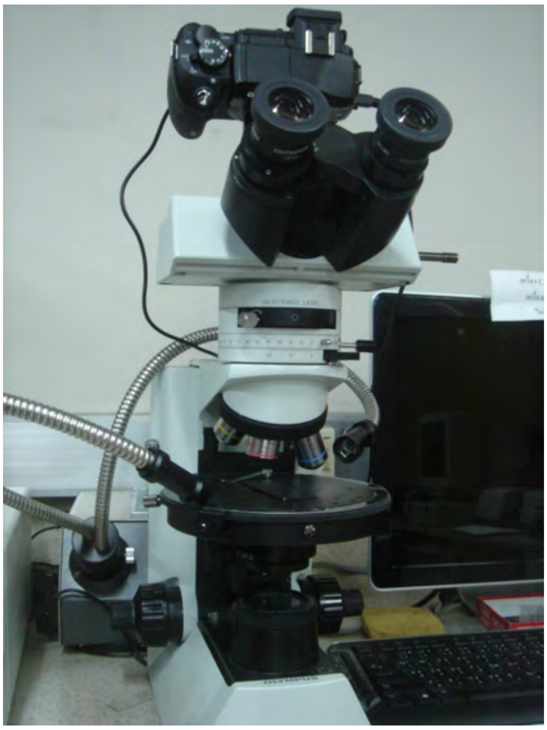
รูป ก-3 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding รุ่น V508-18-CX)

รูป ก-4 เครื่องขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว (single-screw cast sheet, Haake)

รูป ก-5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL รุ่น JSM-6400)

รูป ก-6 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์(XRD, Bruker AXS รุ่น D8 Discover)

รูป ก-7 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FT-IR, Nicolet รุ่น impact 400)



รูป ก-8 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM, Olympus รุ่น CX31)

รูป ก-9 Hot stage (รุ่น FP82HT)

รูป ก-10 ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์ (DSC, Perkin-Elmer)

รูป ก-11 เทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์ (TGA, METTLER รุ่น TGA/SDTA851)

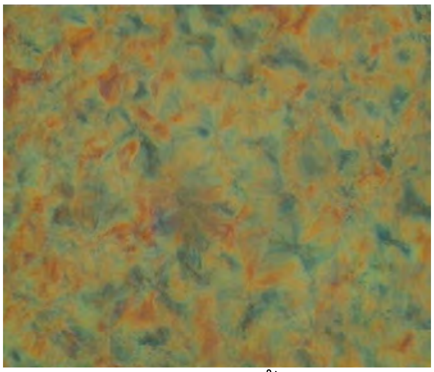
รูป ก-12 เครื่องทดสอบแรงดึง (LLOYD Universal Testing Machine รุ่น model 500)

รูป ก-13 เครื่องทดสอบความทนแรงกระแทก (Gotech รุ่น GT-7045MD)

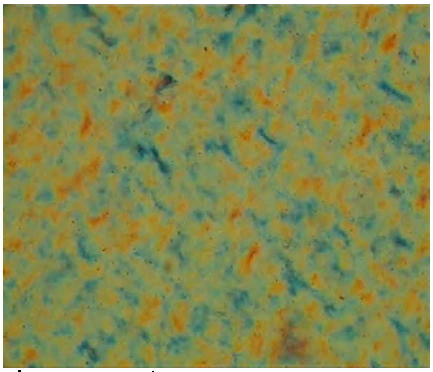
ภาคผนวก ข

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า

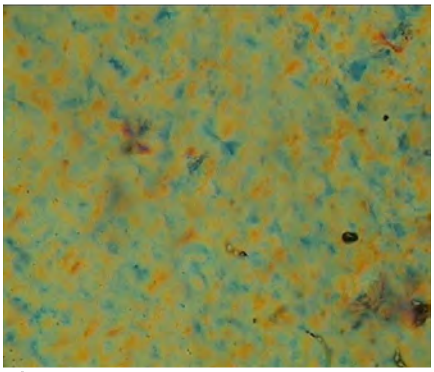
1. ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด



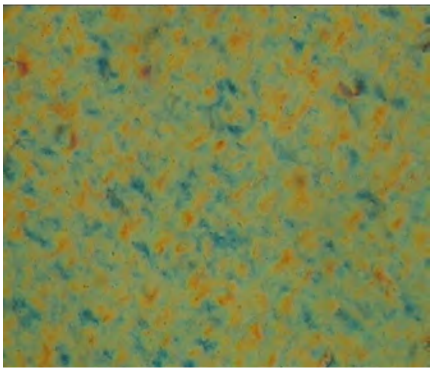
รูป ข-1 ภาพถ่ายของ PP ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



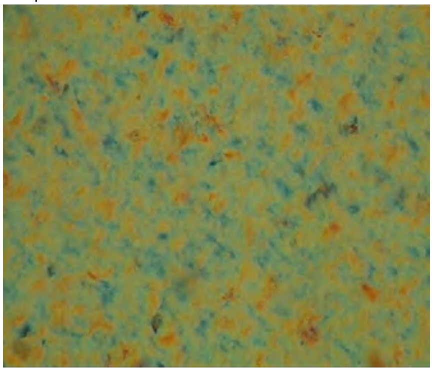
รูป ข-2 ภาพถ่ายของ PP/MMT 0.075% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



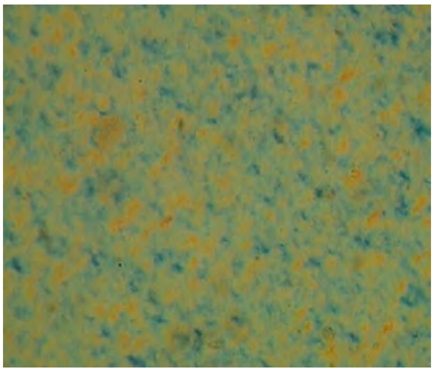
รูป ข-3 ภาพถ่ายของ PP/MMT 0.1% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



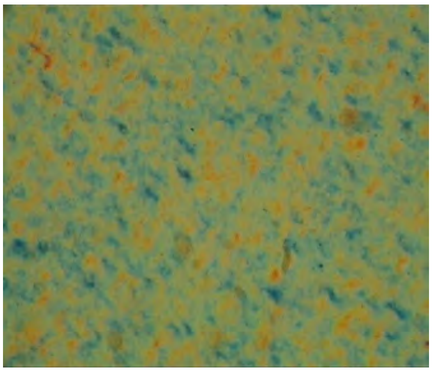
รูป ข-4 ภาพถ่ายของ PP/MMT 0.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



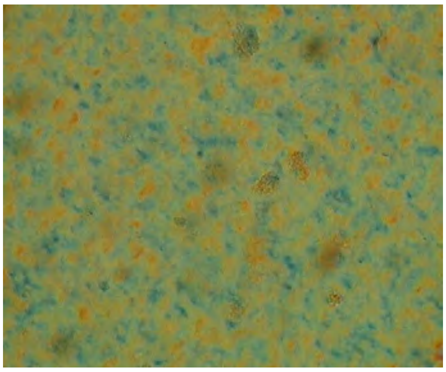
รูป ข-5 ภาพถ่ายของ PP/MMT 1.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



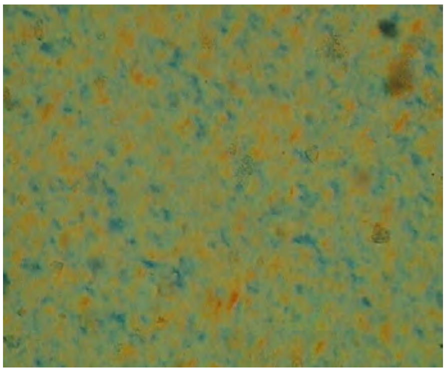
รูป ข-6 ภาพถ่ายของ PP/MMT 1.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



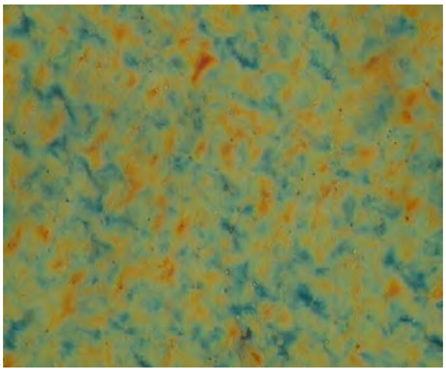
รูป ข-7 ภาพถ่ายของ PP/MMT 2.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



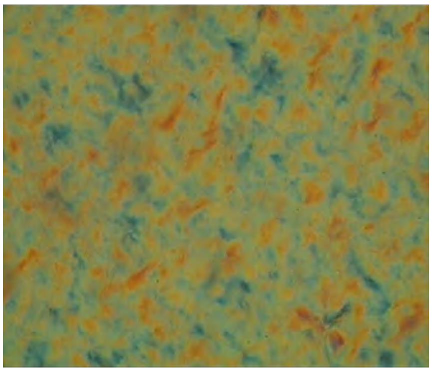
รูป ข-8 ภาพถ่ายของ PP/MMT 2.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



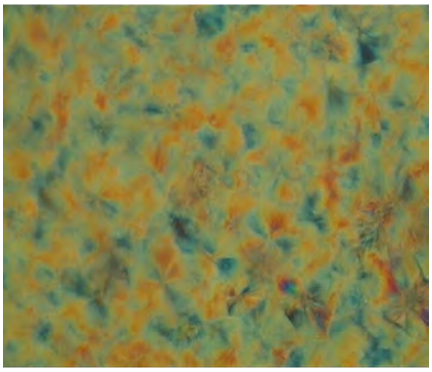
รูป ข-9 ภาพถ่ายของ PP/MMT 3.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



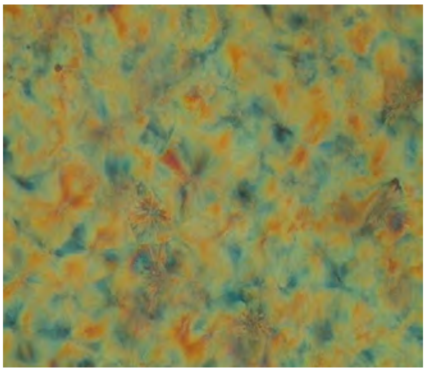
รูป ข-10 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 0.075% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



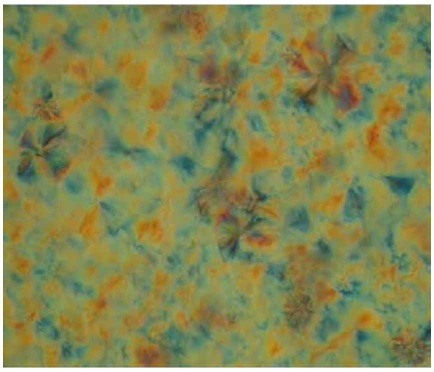
รูป ข-11 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 0.1% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



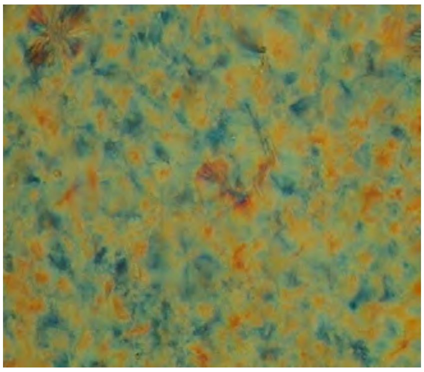
รูป ข-12 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 0.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



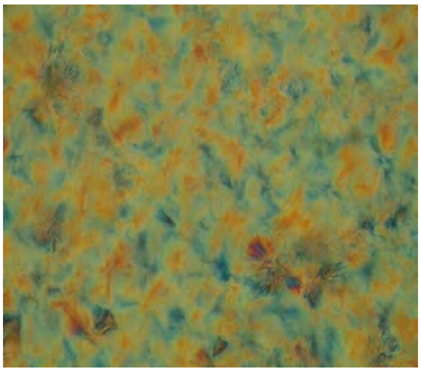
รูป ข-13 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 1.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



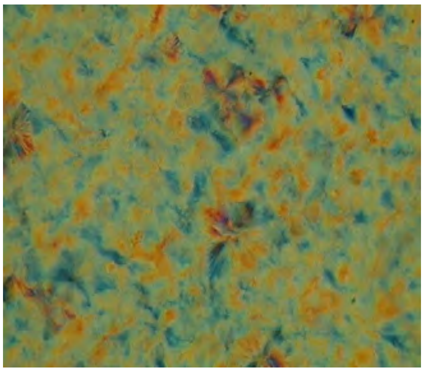
รูป ข-14 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 1.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



รูป ข-15 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 2.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



รูป ข-16 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 2.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า

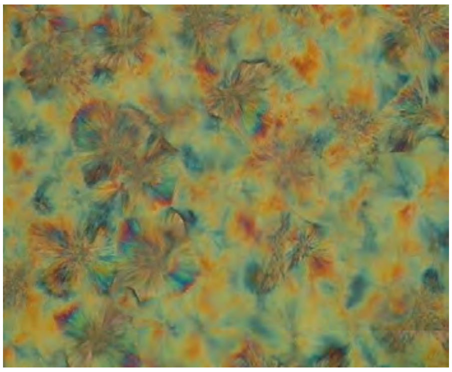


รูป ข-17 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 3.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า

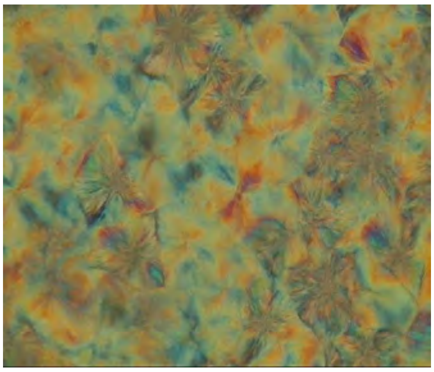
ตารางที่ ข-1 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

S	spherulites size(microns)							x	sd
	1	2	3	4	5	6	7		
PP	65.68	55.79	63.17	47.20	50.43	54.76	60.45	56.78	6.72
PP/MMT 0.075%	28.92	28.03	29.22	28.55	27.89	28.45	27.37	28.35	0.63
PP/MMT 0.1%	30.68	30.49	30.63	30.21	29.65	28.27	28.03	29.71	1.12
PP/MMT 0.5%	25.18	24.39	27.40	26.58	24.39	26.11	25.03	25.58	1.15
PP/MMT 1%	27.07	27.60	27.27	25.47	27.55	27.07	26.83	26.98	0.72
PP/MMT 1.5%	29.22	25.90	27.64	26.38	27.97	27.75	26.94	27.40	1.10
PP/MMT 2%	27.27	26.83	27.75	26.83	26.81	28.27	27.21	27.28	0.55
PP/MMT 2.5%	28.20	27.24	28.41	28.01	26.11	27.61	25.42	27.29	1.12
PP/MMT 3%	27.94	26.42	27.23	26.66	27.74	27.77	26.83	27.23	0.60
PP/OMMT 0.075%	32.79	30.98	32.53	33.97	33.61	32.54	32.40	32.69	0.96
PP/OMMT 0.1%	30.81	34.05	31.91	32.65	31.48	31.16	31.54	31.94	1.10
PP/OMMT 0.5%	31.80	29.28	30.04	34.71	32.40	33.29	32.47	32.00	1.86
PP/OMMT 1%	31.91	36.17	34.30	33.28	32.59	32.54	32.08	33.27	1.51
PP/OMMT 1.5%	41.95	37.36	35.40	33.59	30.86	30.85	32.48	34.64	4.00
PP/OMMT 2%	41.31	35.70	31.88	35.61	34.50	38.04	34.30	35.90	3.02
PP/OMMT 2.5%	41.13	38.37	37.36	30.86	32.66	35.44	34.95	35.83	3.48
PP/OMMT 3%	39.70	42.11	34.56	32.31	33.03	39.79	36.01	36.79	3.78

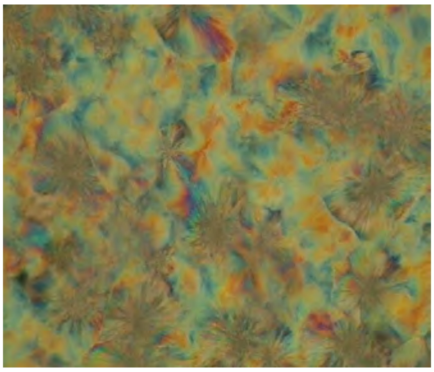
2. **ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว**



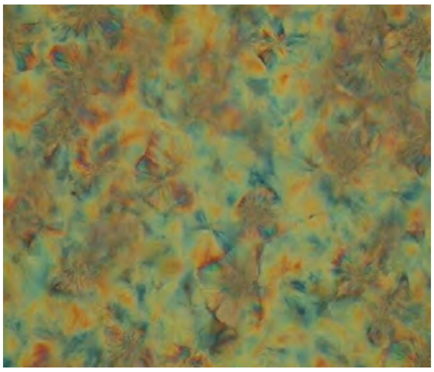
รูป ข-18 ภาพถ่ายของ PP ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



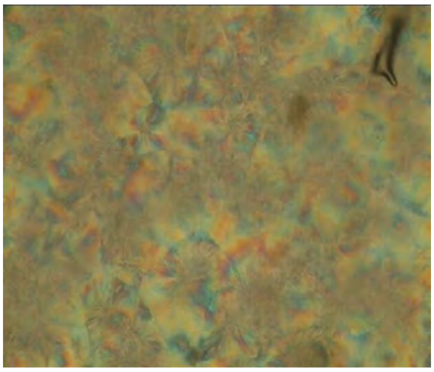
รูป ข-19 ภาพถ่ายของ PP/MMT 0.075% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



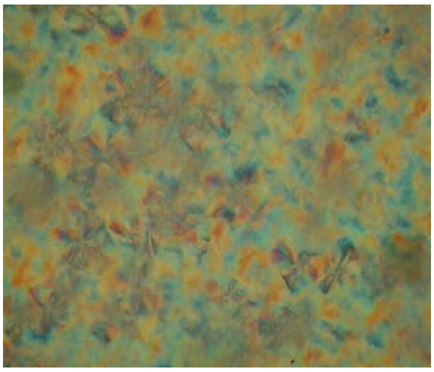
รูป ข-20 ภาพถ่ายของ PP/MMT 0.1% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



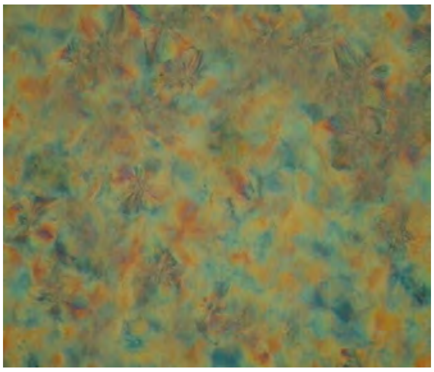
รูป ข-21 ภาพถ่ายของ PP/MMT 0.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



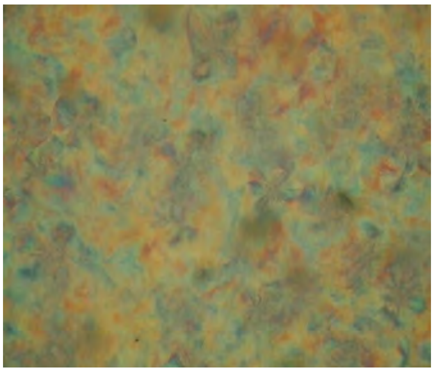
รูป ข-22 ภาพถ่ายของ PP/MMT 1.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



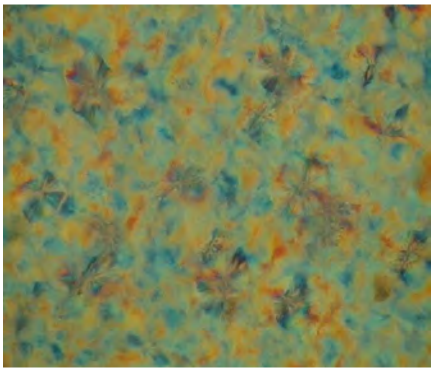
รูป ข-23 ภาพถ่ายของ PP/MMT 1.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



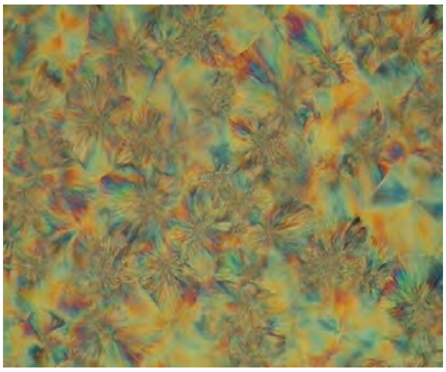
รูป ข-24 ภาพถ่ายของ PP/MMT 2.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



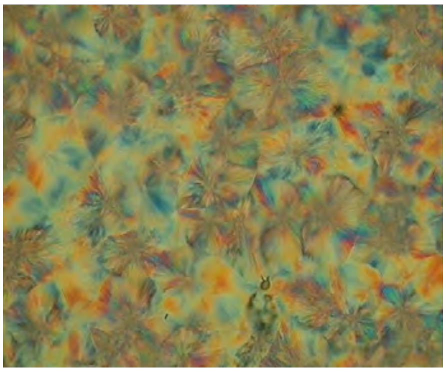
รูป ข-25 ภาพถ่ายของ PP/MMT 2.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



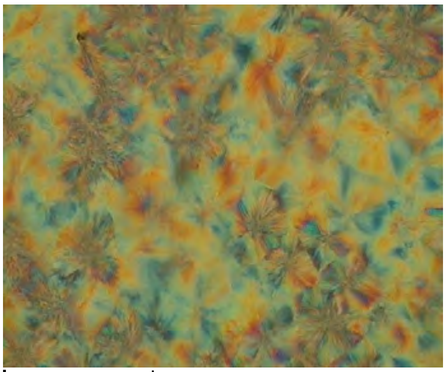
รูป ข-26 ภาพถ่ายของ PP/MMT 3.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



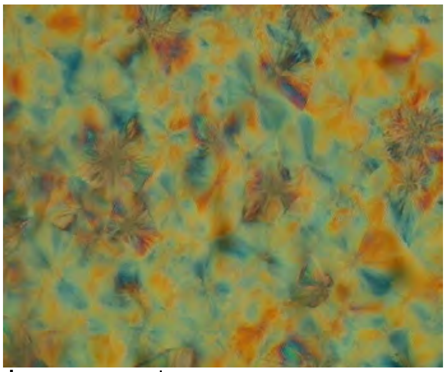
รูป ข-27 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 0.075% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



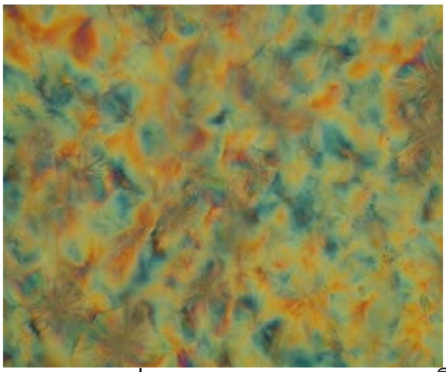
รูป ข-28 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 0.1% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



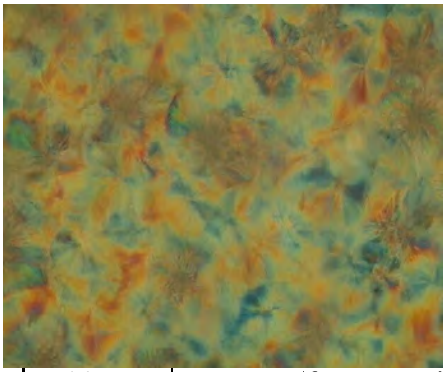
รูป ข-29 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 0.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



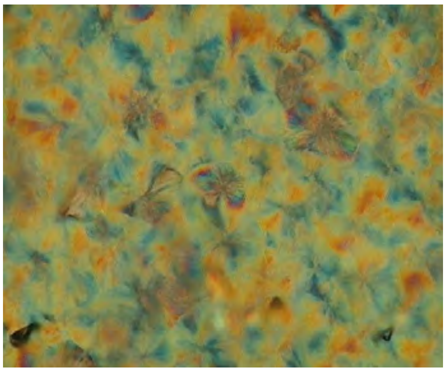
รูป ข-30 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 1.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



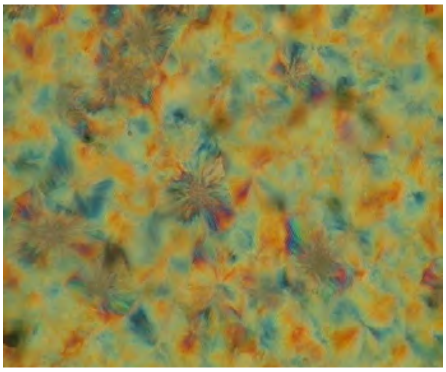
รูป ข-31 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 1.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



รูป ข-32 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 2.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



รูป ข-33 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 2.5% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า



รูป ข-34 ภาพถ่ายของ PP/OMMT 3.0% ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยวกล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 400 เท่า

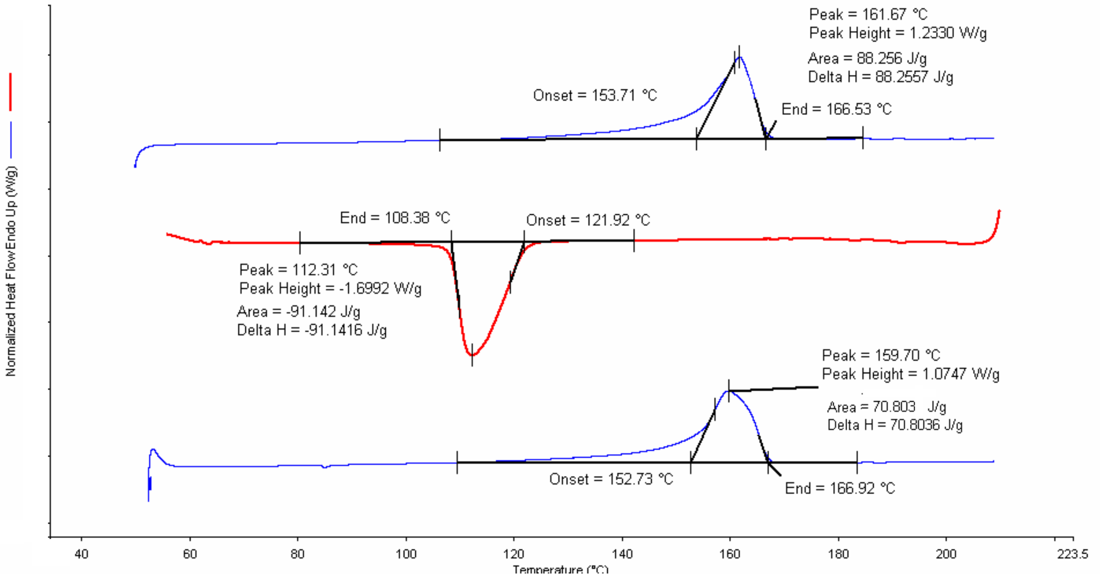
ตารางที่ ข-2 ขนาดผลึกสเฟียรูไลต์ของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

S	spherulites size(microns)							x	SD
	1	2	3	4	5	6	7		
PP	64.58	60.84	65.65	64.96	63.94	65.06	63.42	64.07	1.60
PP/MMT 0.075%	46.97	46.72	45.36	43.27	41.53	48.80	45.78	45.49	2.43
PP/MMT 0.1%	46.60	44.51	41.41	47.55	45.16	42.21	44.56	44.57	2.20
PP/MMT 0.5%	37.31	36.69	36.01	36.97	36.84	36.34	37.70	36.84	0.57
PP/MMT 1%	38.75	39.74	40.74	40.66	37.89	40.69	37.53	39.43	1.38
PP/MMT 1.5%	36.16	37.87	38.70	38.73	37.82	38.29	38.46	38.00	0.89
PP/MMT 2%	41.39	41.47	42.15	39.27	40.66	39.41	42.08	40.92	1.19
PP/MMT 2.5%	41.54	41.64	41.93	41.99	42.06	43.34	43.53	42.29	0.81
PP/MMT 3%	40.06	41.71	40.91	41.27	44.10	44.72	44.80	42.51	1.98
PP/OMMT 0.075%	44.10	43.05	44.51	43.64	43.98	43.03	42.71	43.57	0.67
PP/OMMT 0.1%	42.58	41.18	40.03	42.14	40.71	40.35	40.38	41.05	0.97
PP/OMMT 0.5%	43.03	41.68	42.90	40.74	40.59	41.68	40.73	41.62	1.02
PP/OMMT 1%	44.98	46.54	41.69	47.85	41.22	43.15	45.41	44.40	2.48
PP/OMMT 1.5%	40.89	48.42	44.70	43.03	45.06	47.50	42.50	44.58	2.70
PP/OMMT 2%	48.79	41.42	42.46	49.33	45.51	44.51	46.60	45.52	2.99
PP/OMMT 2.5%	43.43	46.92	45.96	47.28	42.37	49.79	41.95	45.38	2.90
PP/OMMT 3%	44.02	48.50	49.75	42.46	43.62	46.08	46.17	45.80	2.65

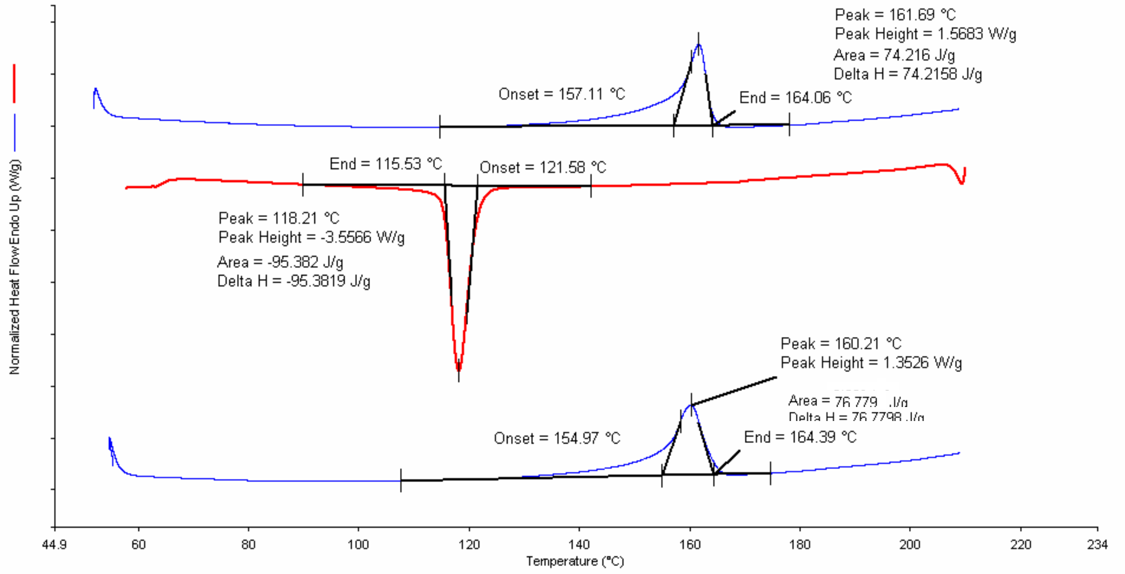
ภาคผนวก ค

การตรวจสอบด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิงคาลอริมิเตอร์

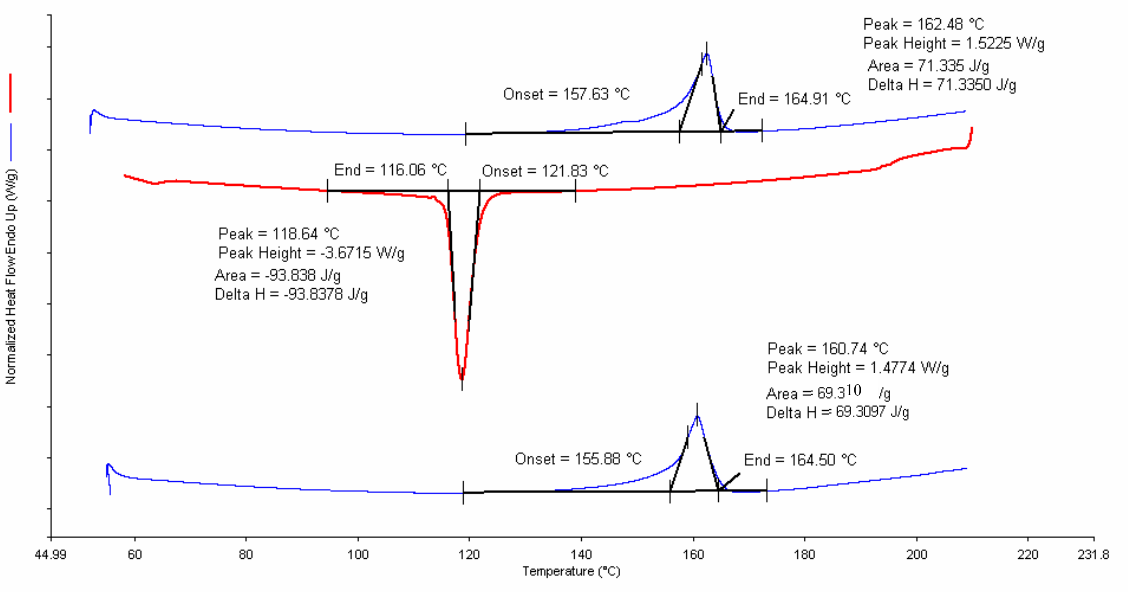
1. ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด



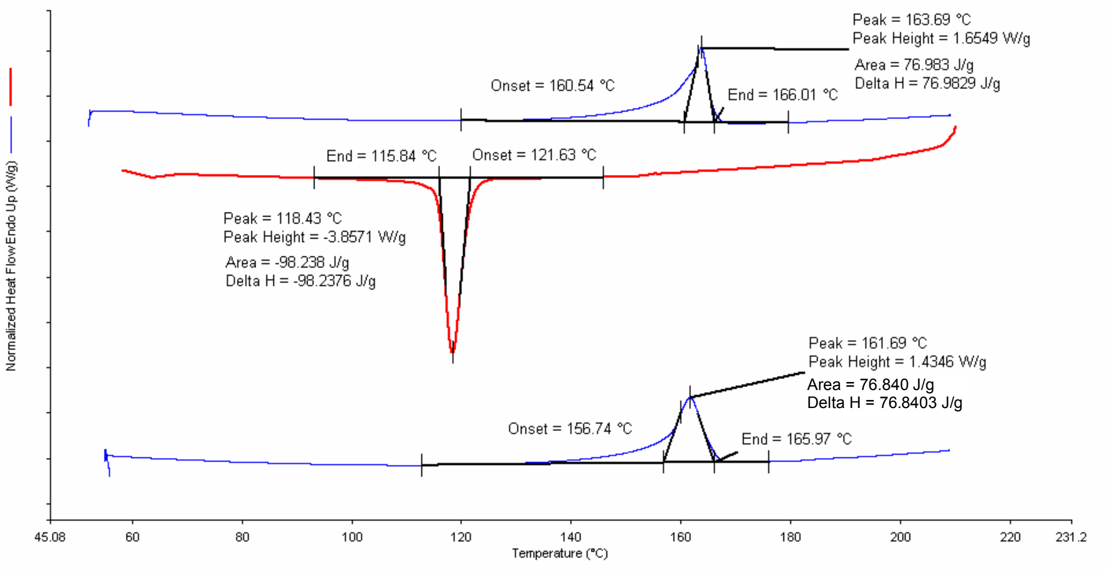
รูป ค-1 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



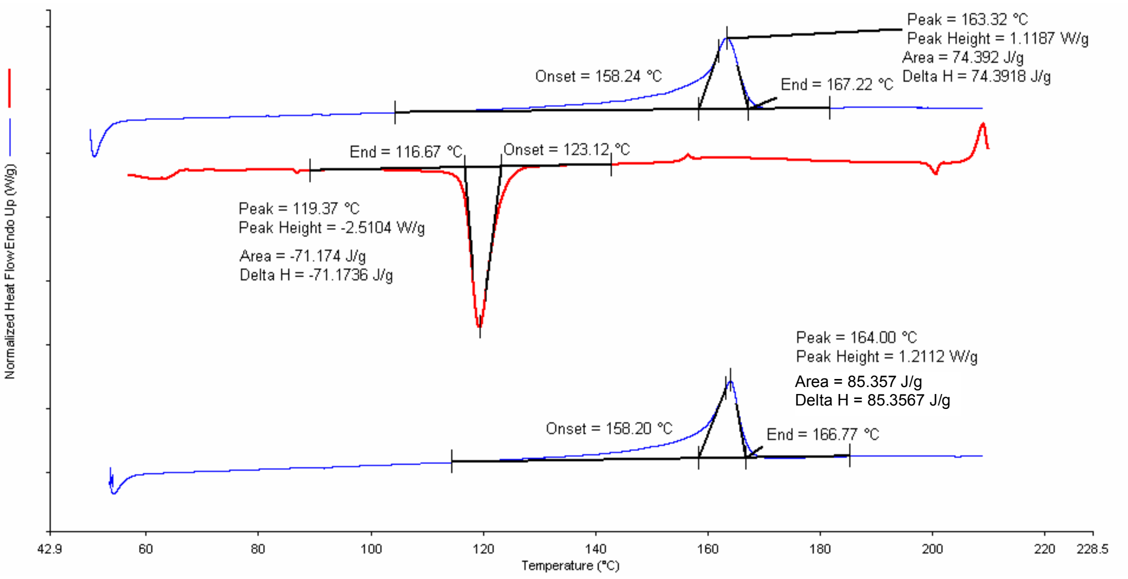
รูป ค-2 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.075% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



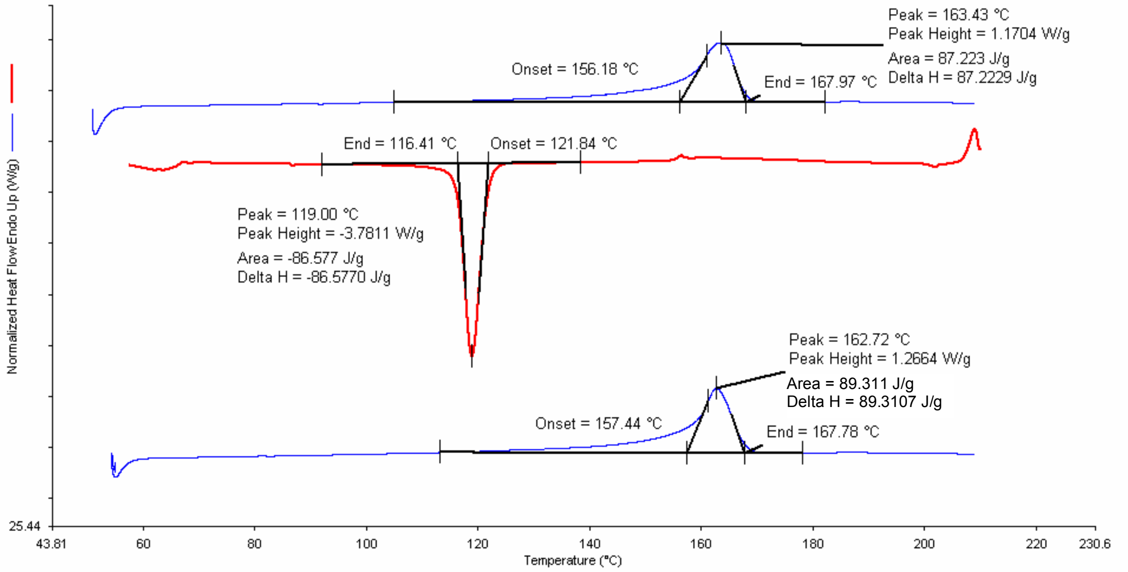
รูป ค-3 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.1% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



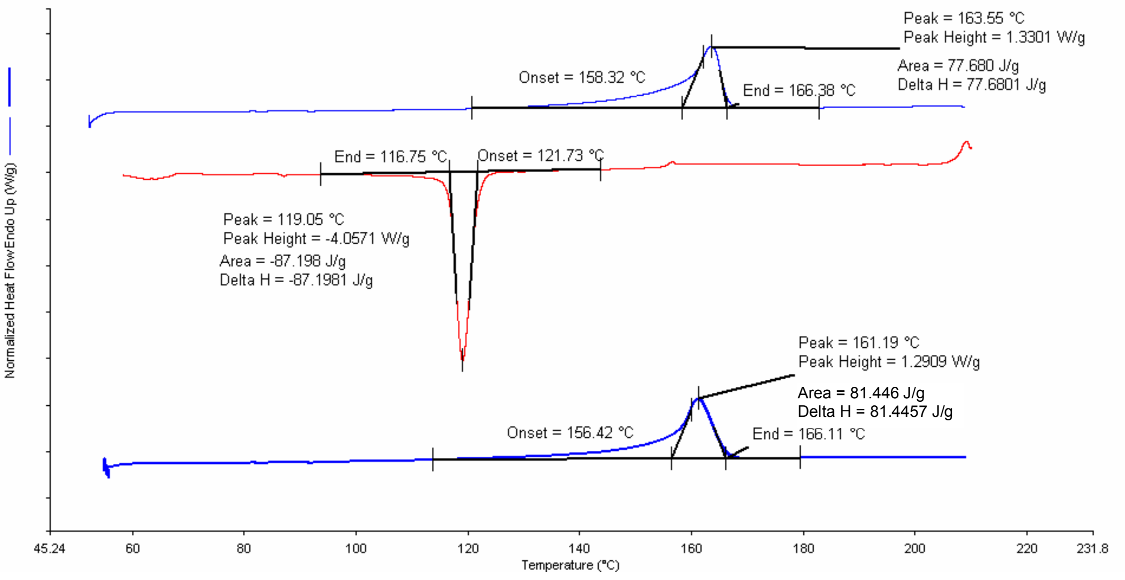
รูป ค-4 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



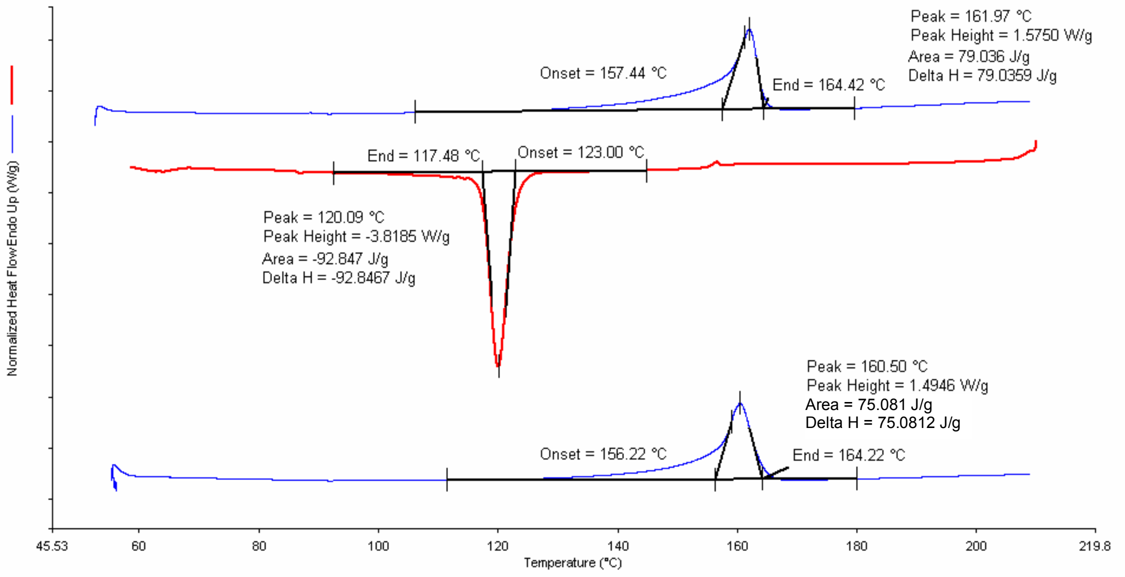
รูป ค-5 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 1.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



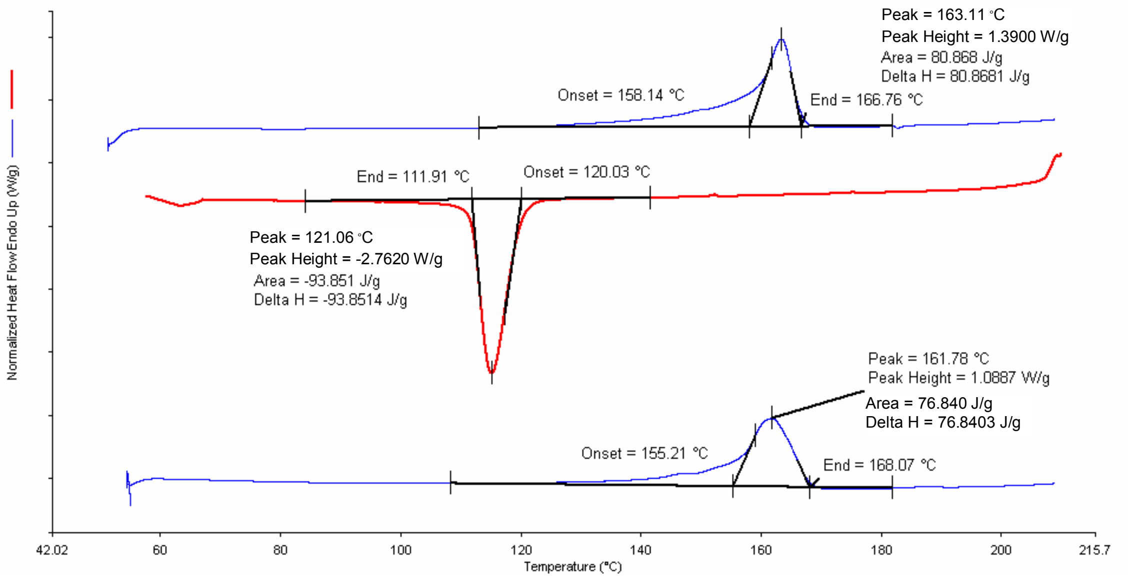
รูป ค-6 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 1.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



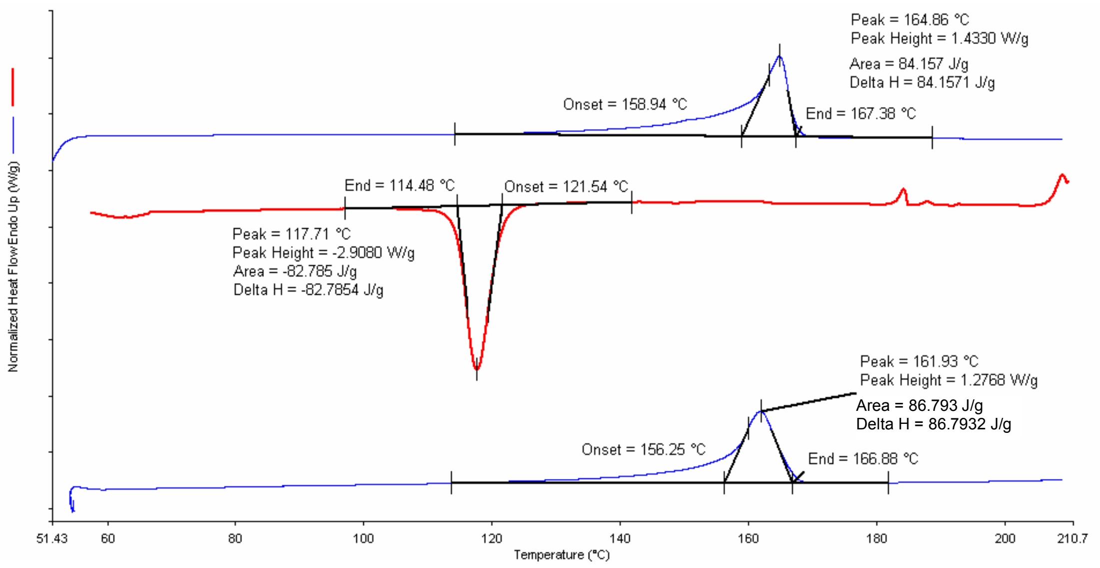
รูป ค-7 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 2.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



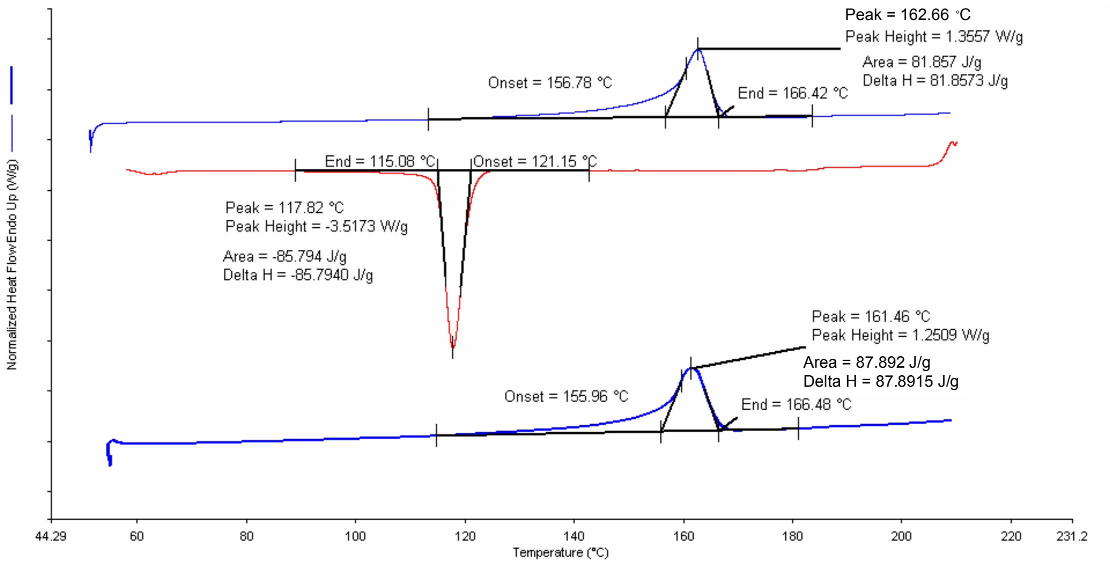
รูป ค-8 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 2.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



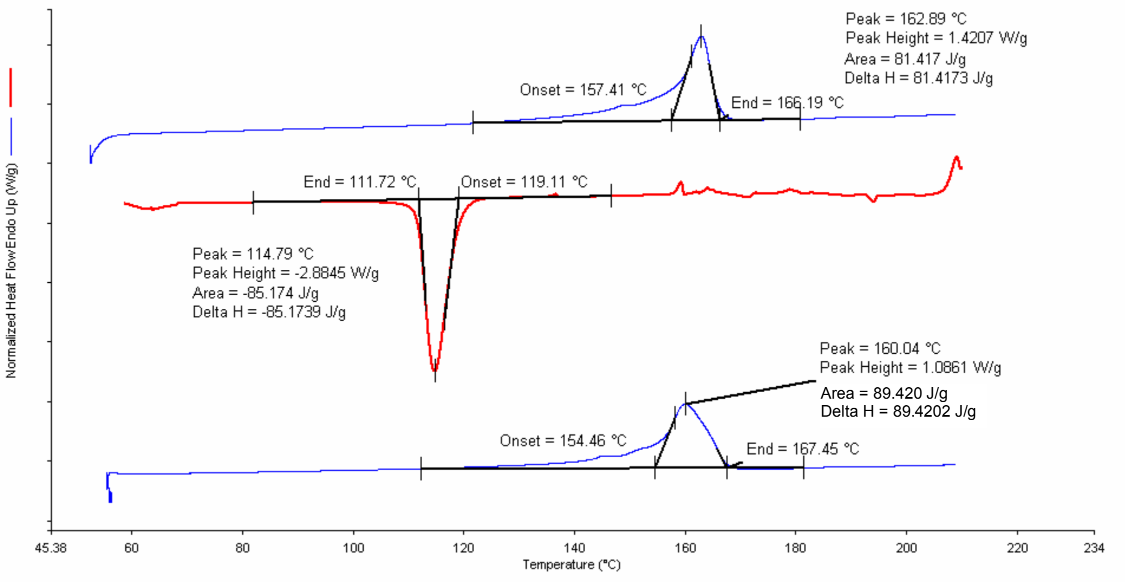
รูป ค-9 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 3.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



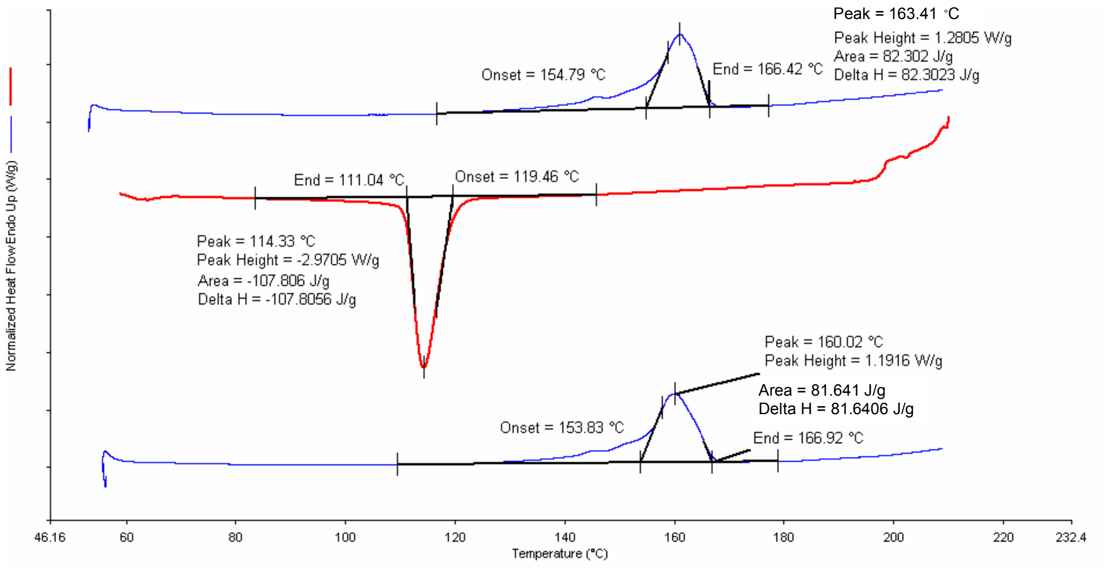
รูป ค-10 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.075% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



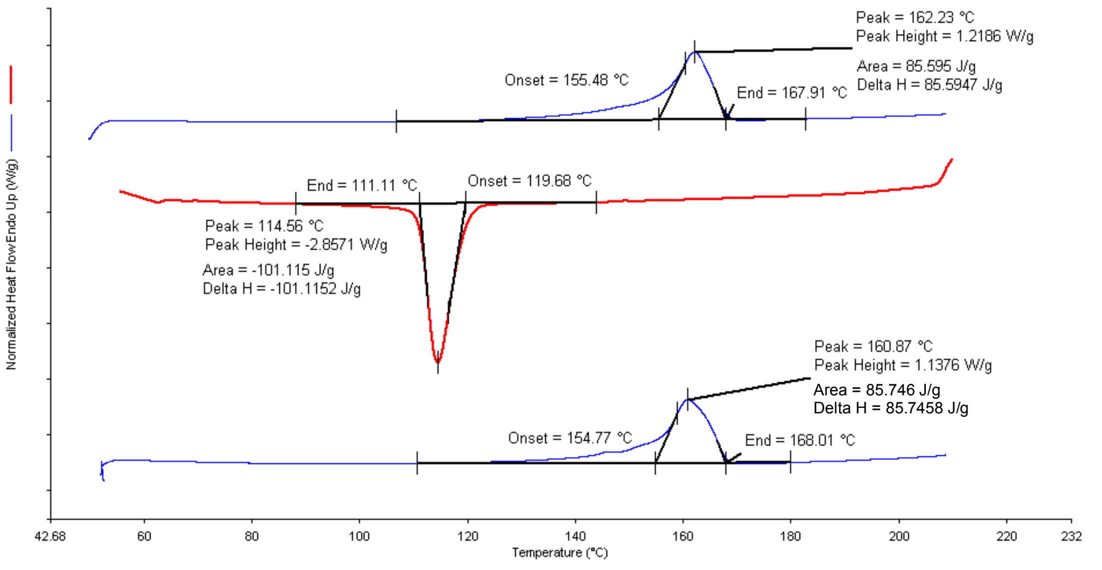
รูป ค-11 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.1% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



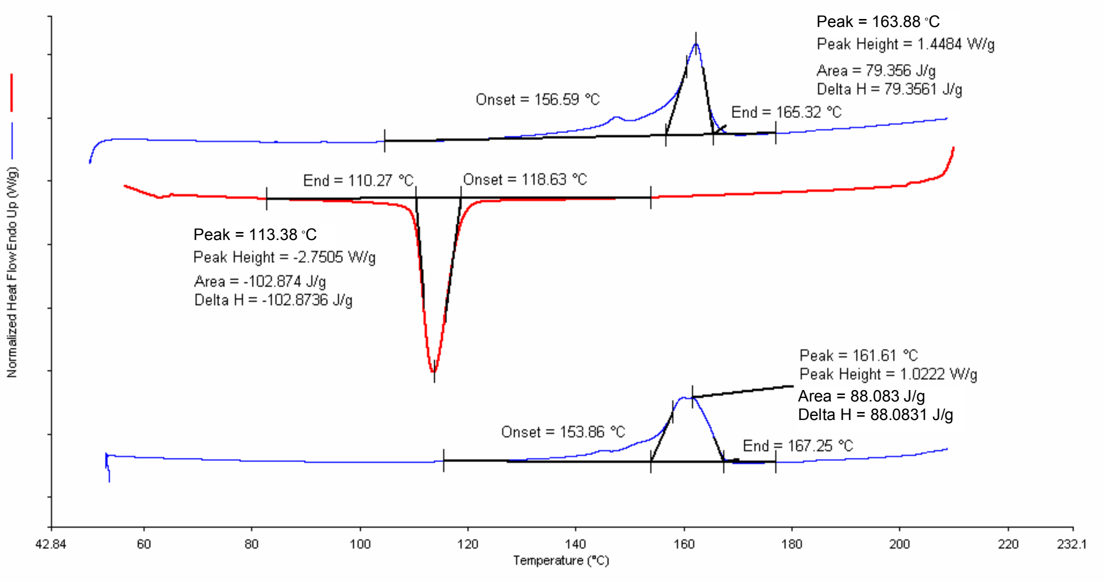
รูป ค-12 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.5% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



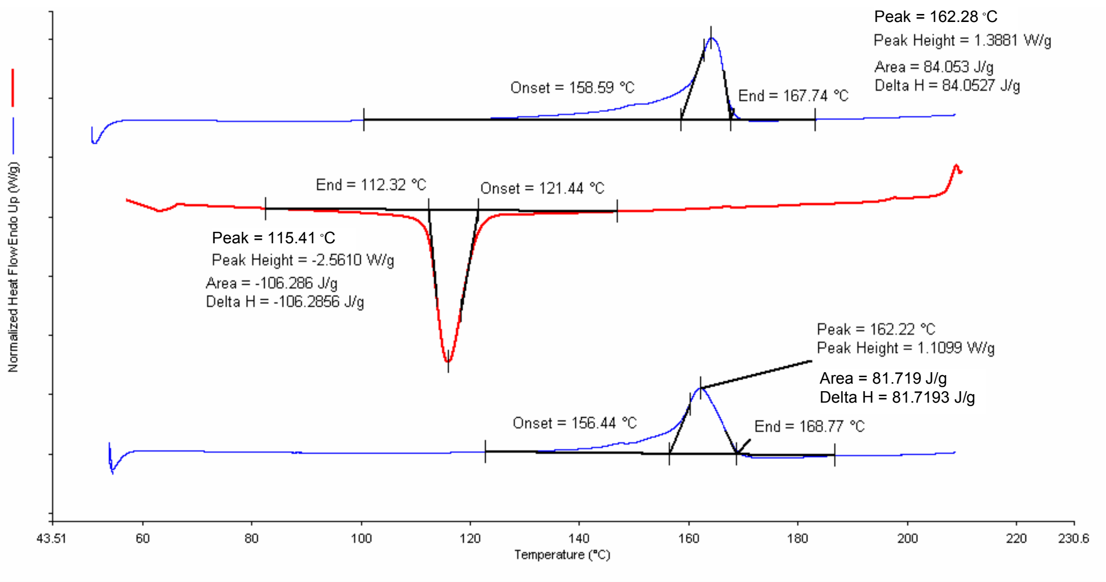
รูป ค-13 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



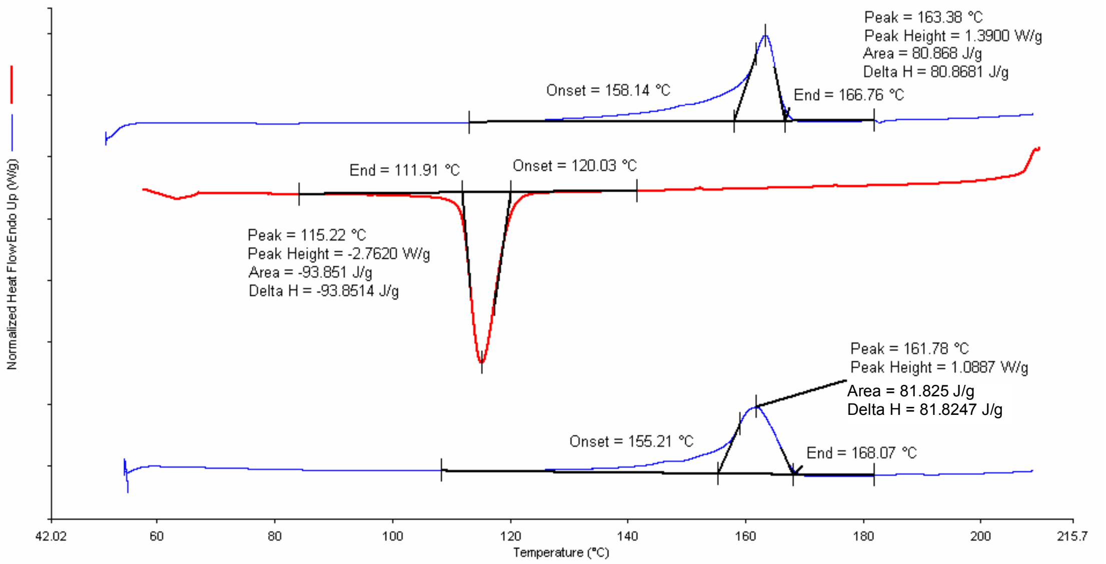
รูป ค-14 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



รูป ค-15 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 2.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

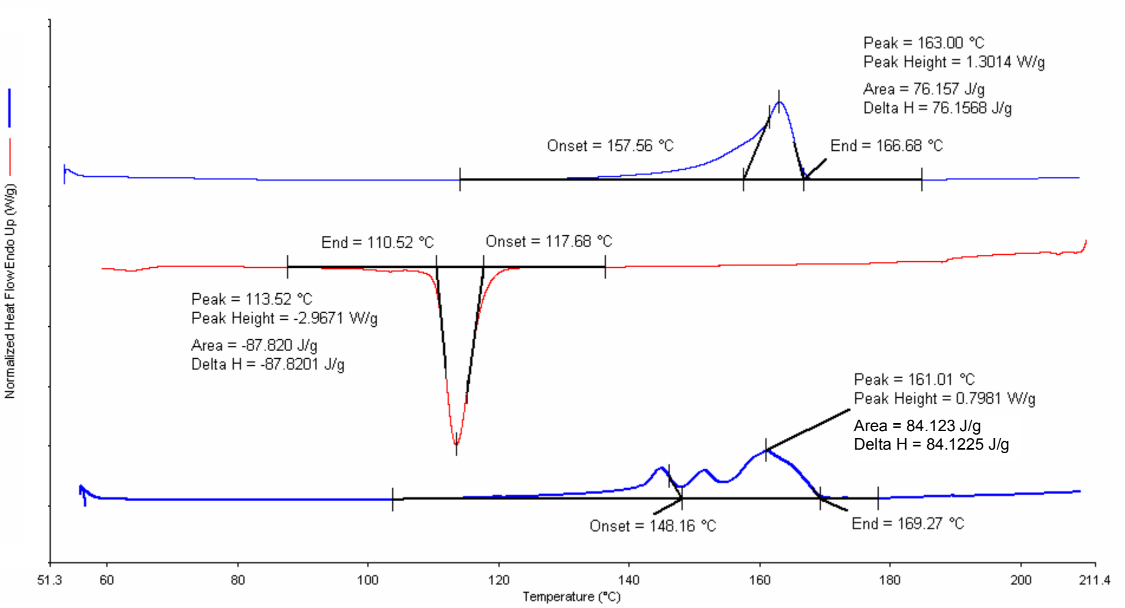


รูป ค-16 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 2.5% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

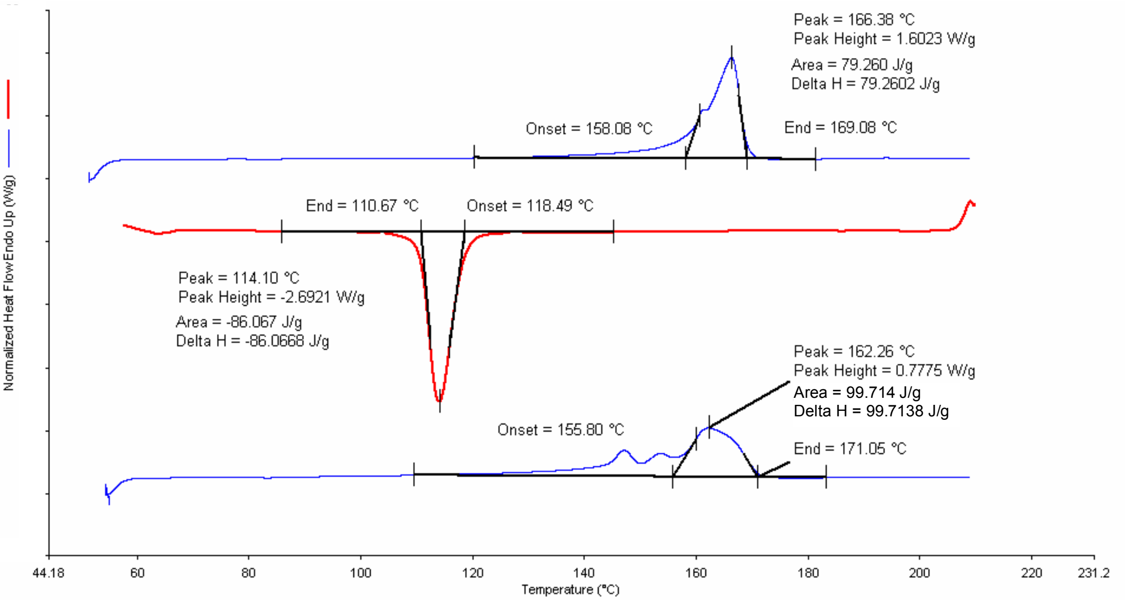


รูป ค-17 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 3.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

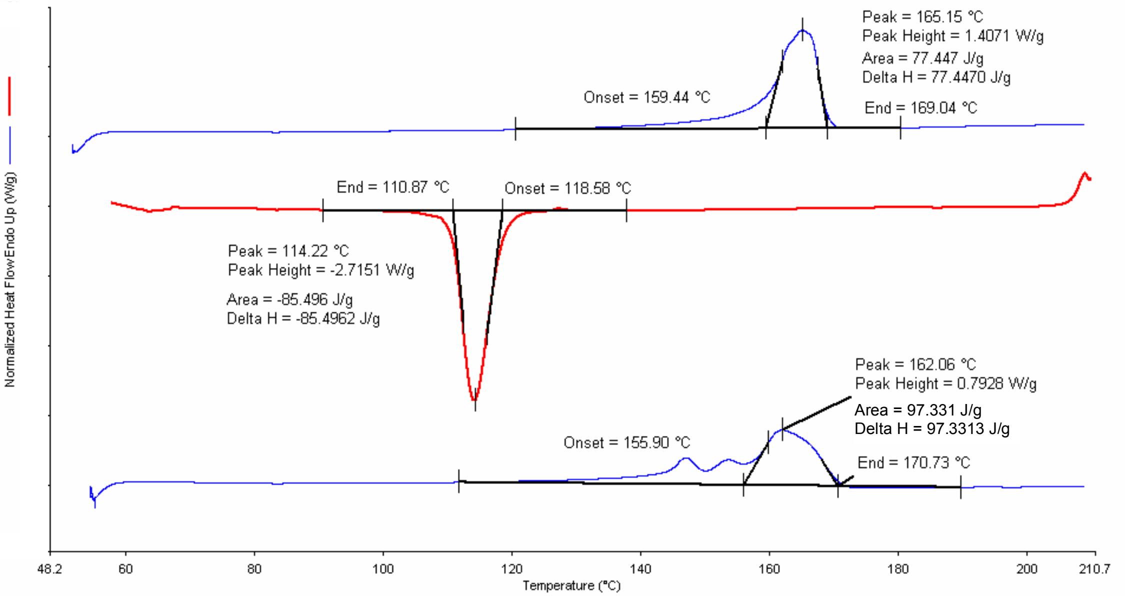
2. ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



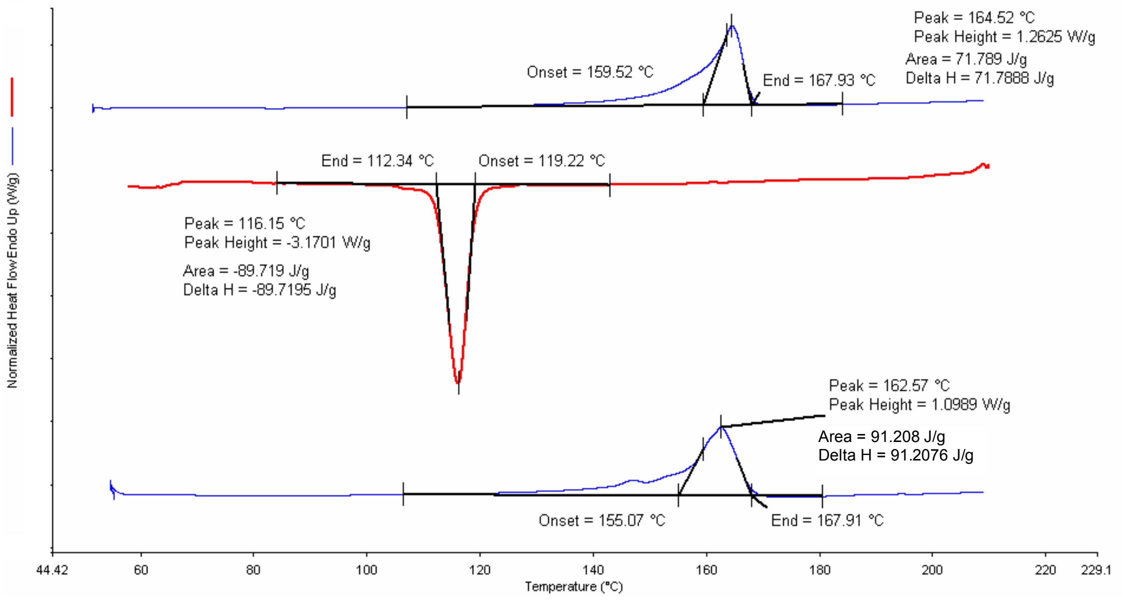
รูป ค-18 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



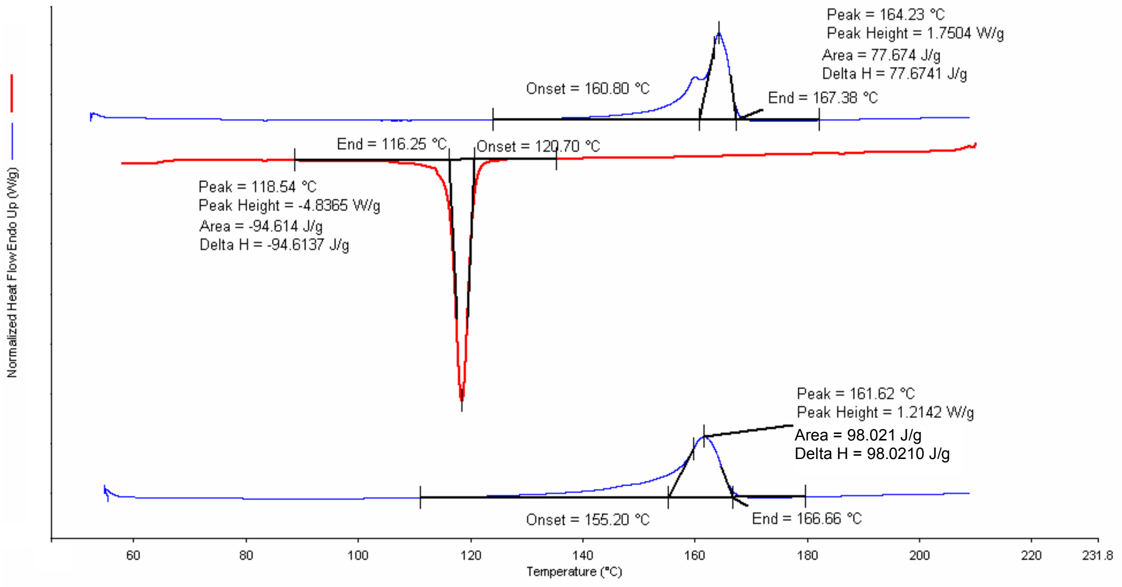
รูป ค-19 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.075% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



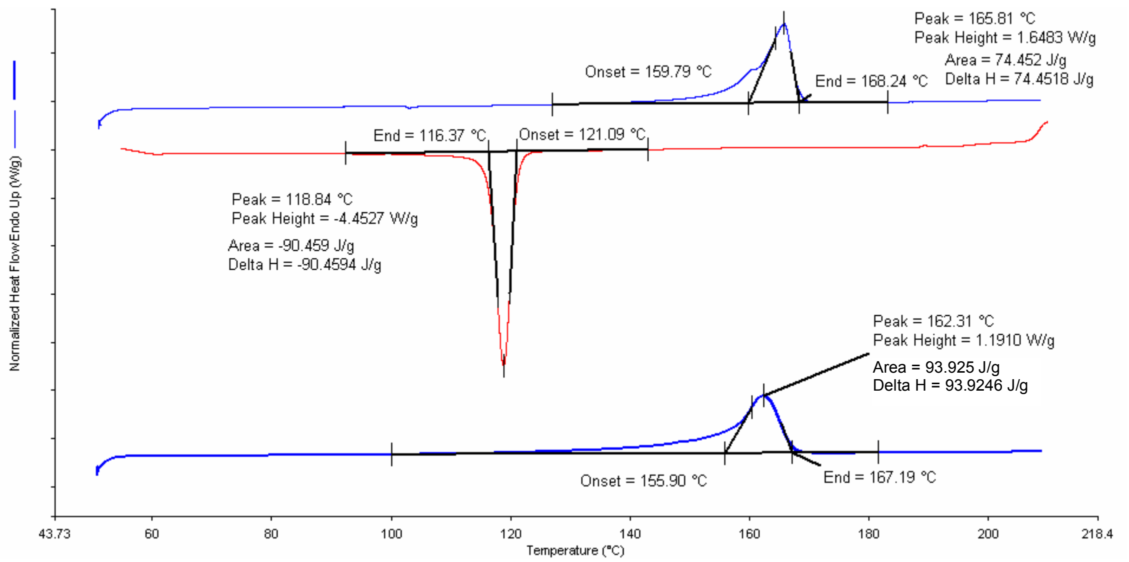
รูป ค-20 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.1% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



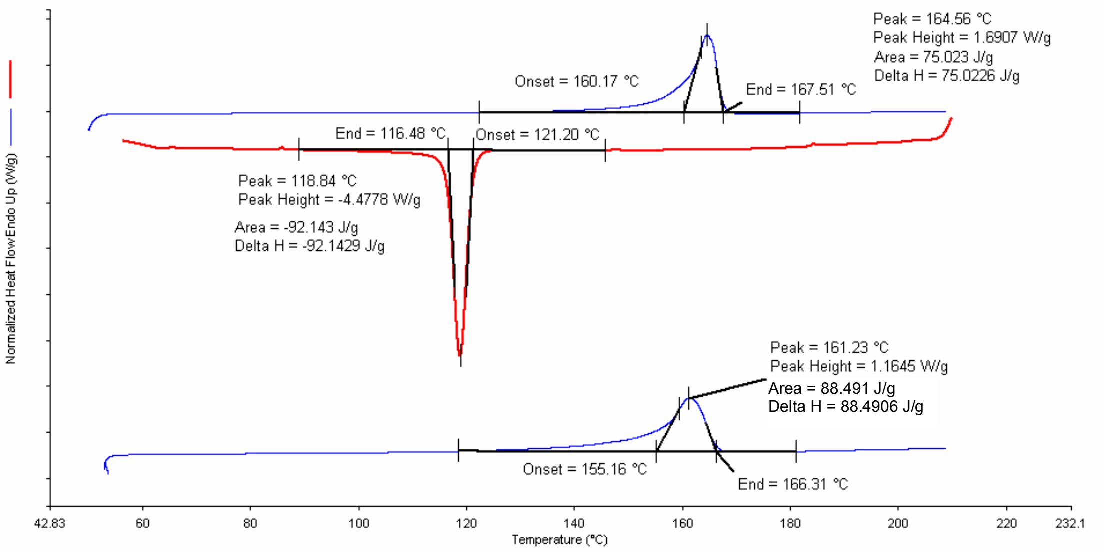
รูป ค-21 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



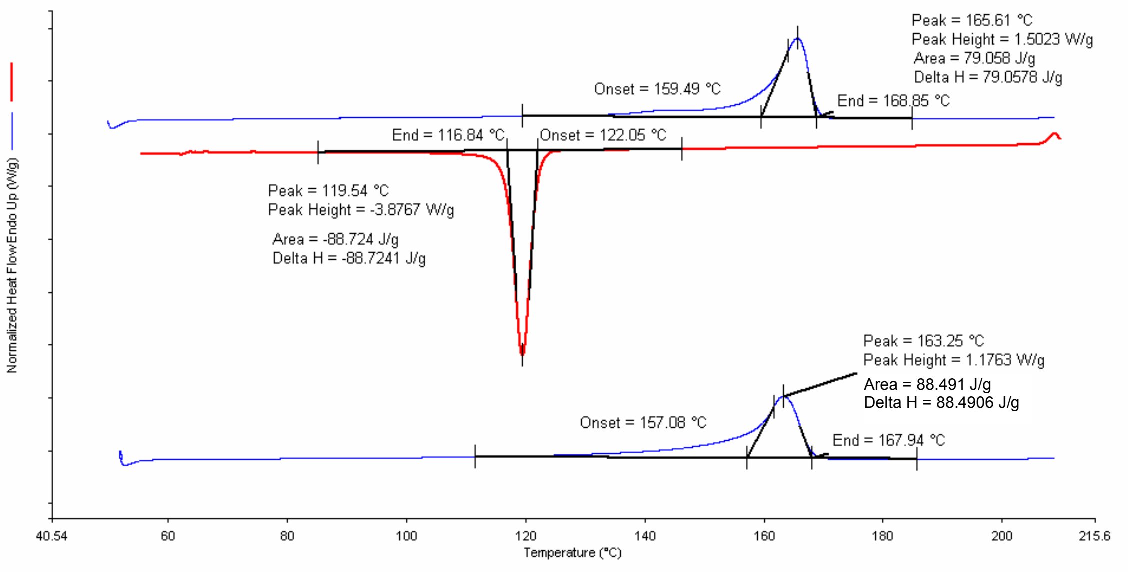
รูป ค-22 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 1.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



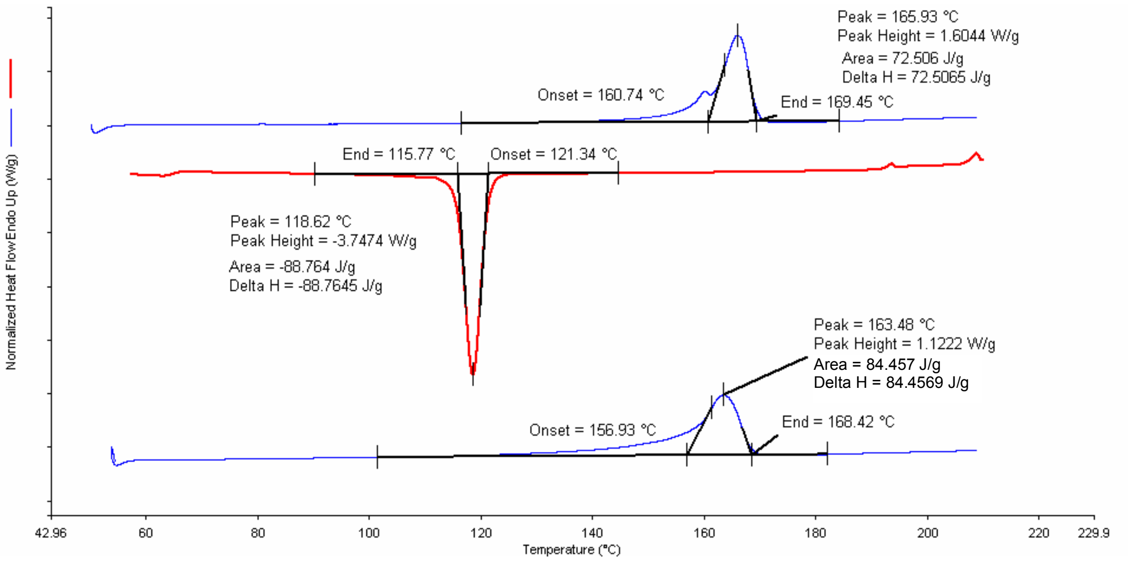
รูป ค-23 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 1.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



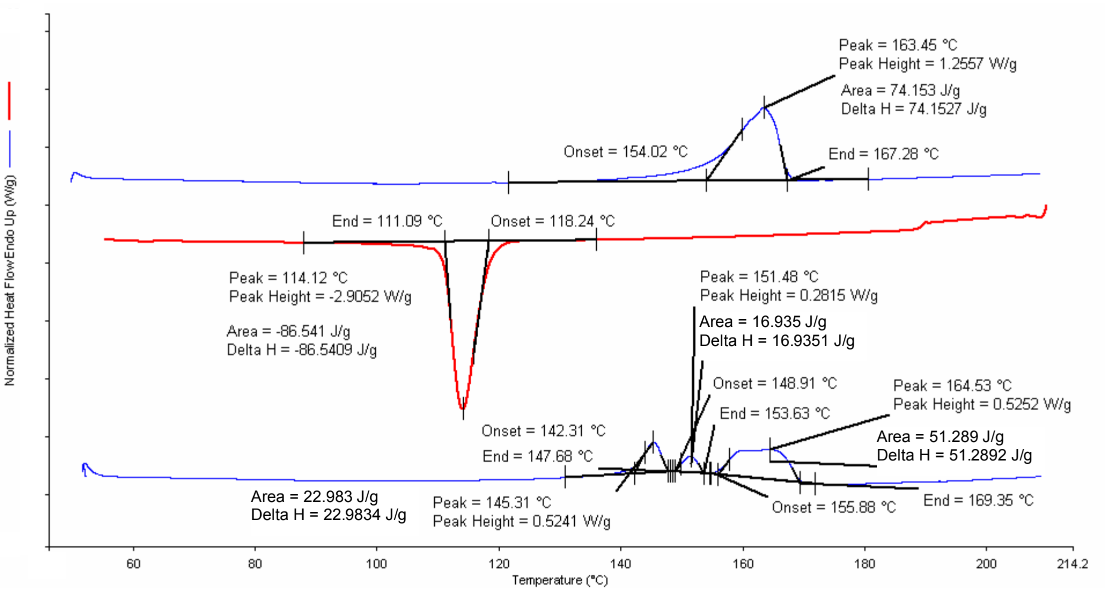
รูป ค-24 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 2.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



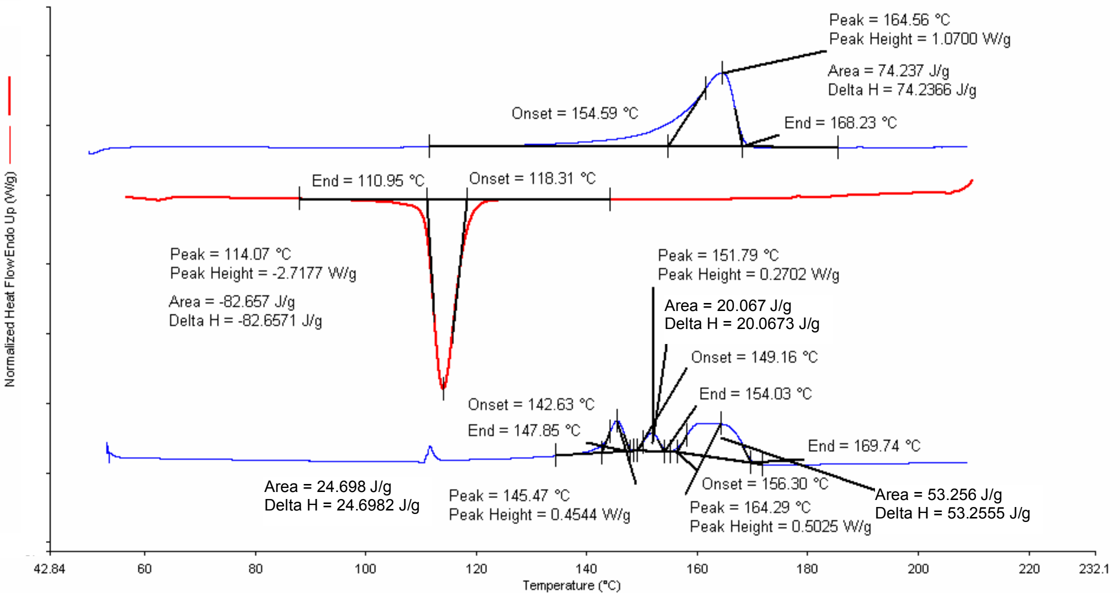
รูป ค-25 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 2.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



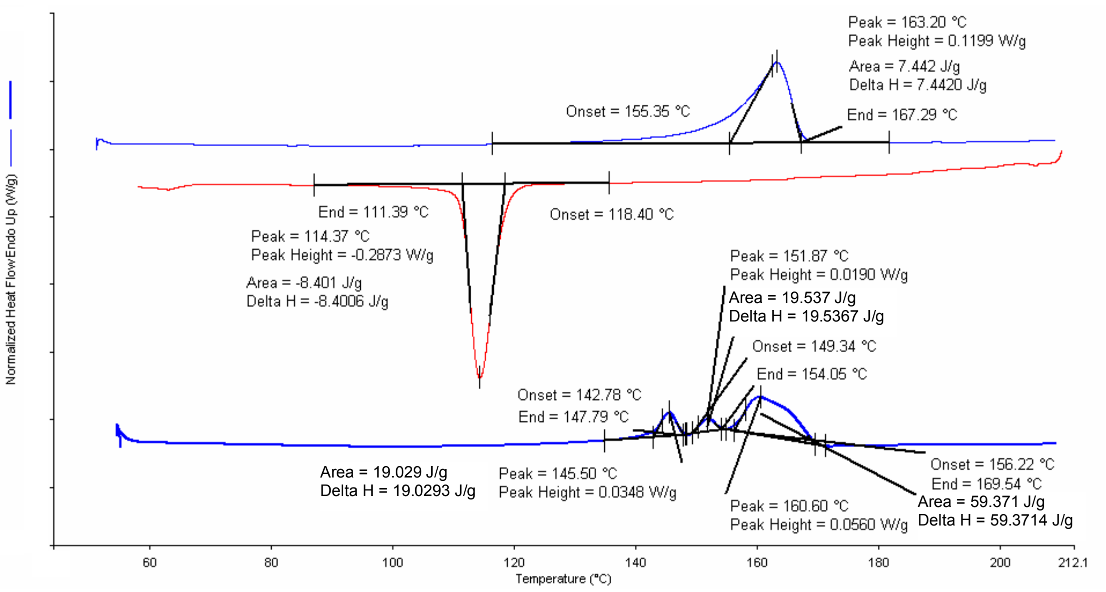
รูป ค-26 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 3.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



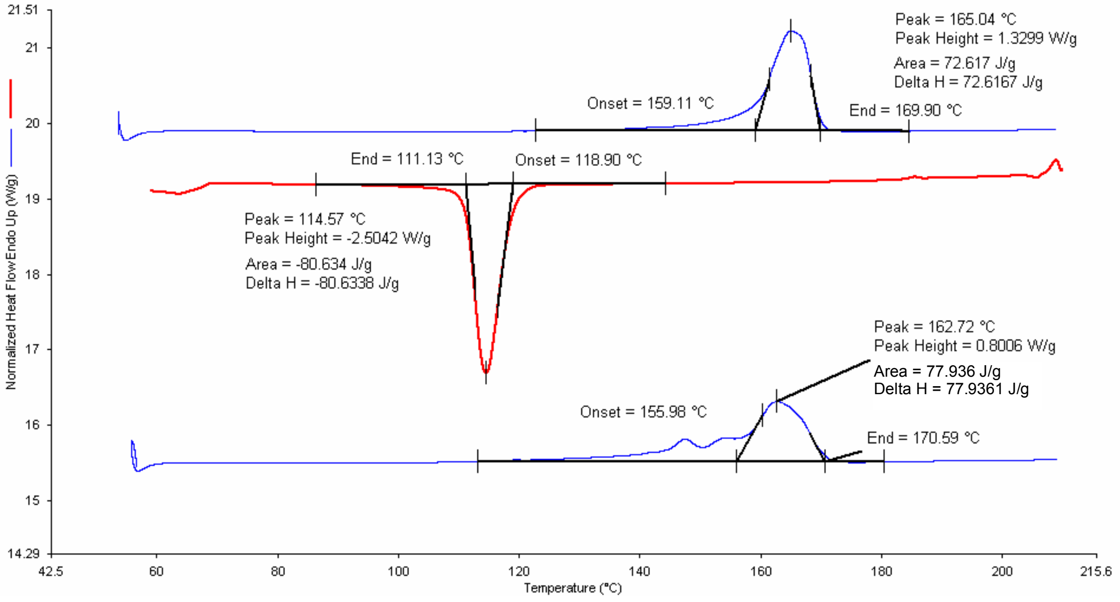
รูป ค-27 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.075% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



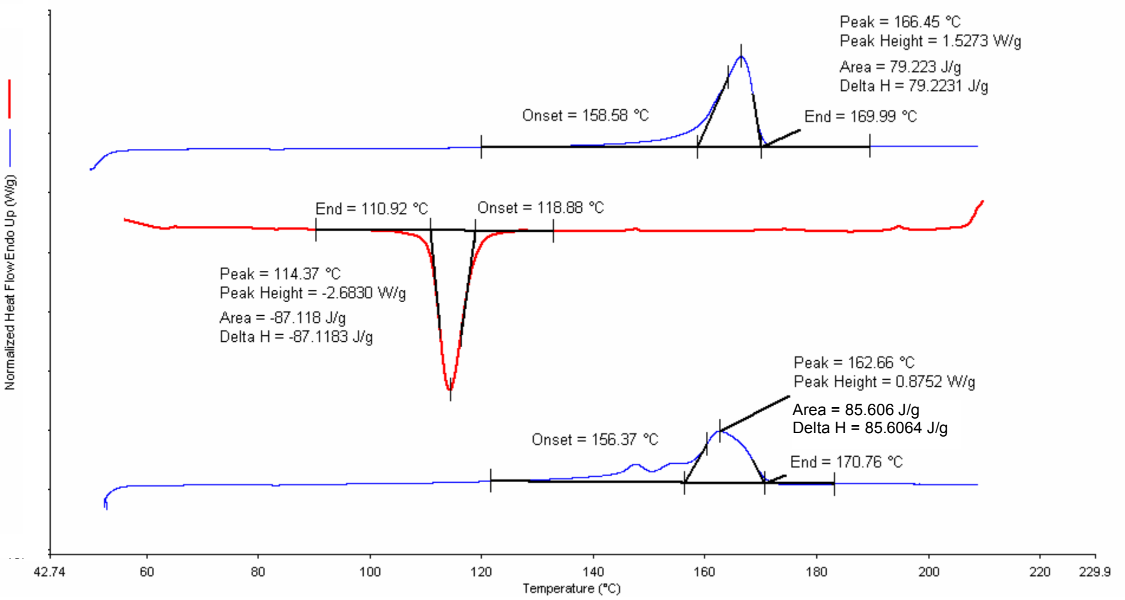
รูป ค-28 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.1% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



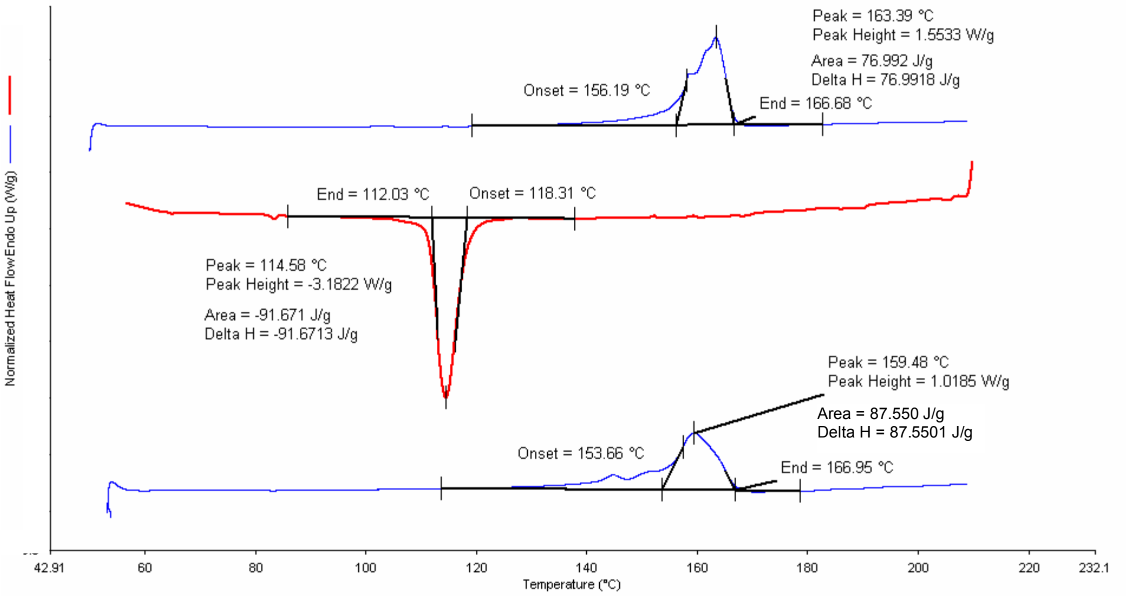
รูป ค-29 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.5% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



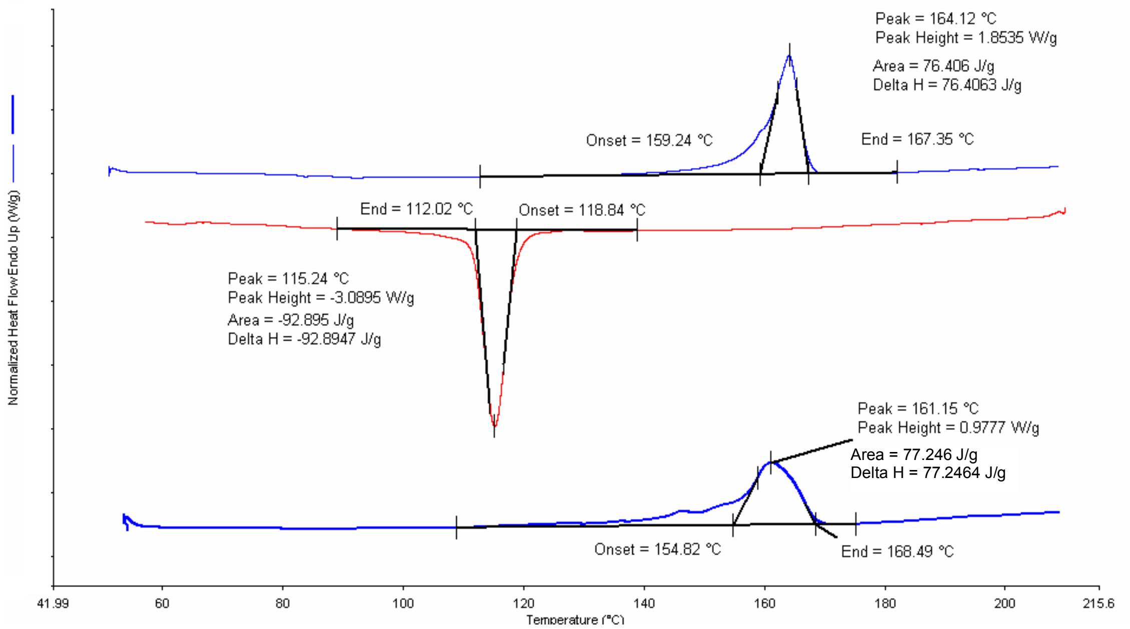
รูป ค-30 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



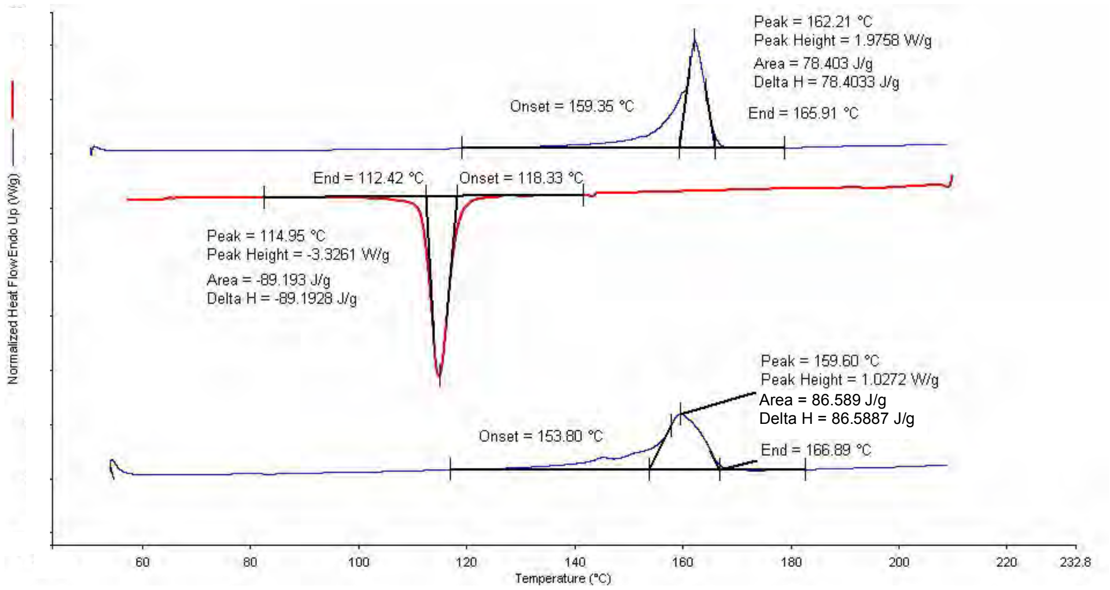
รูป ค-31 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1.5% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



รูป ค-32 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 2.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



รูป ค-33 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 2.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

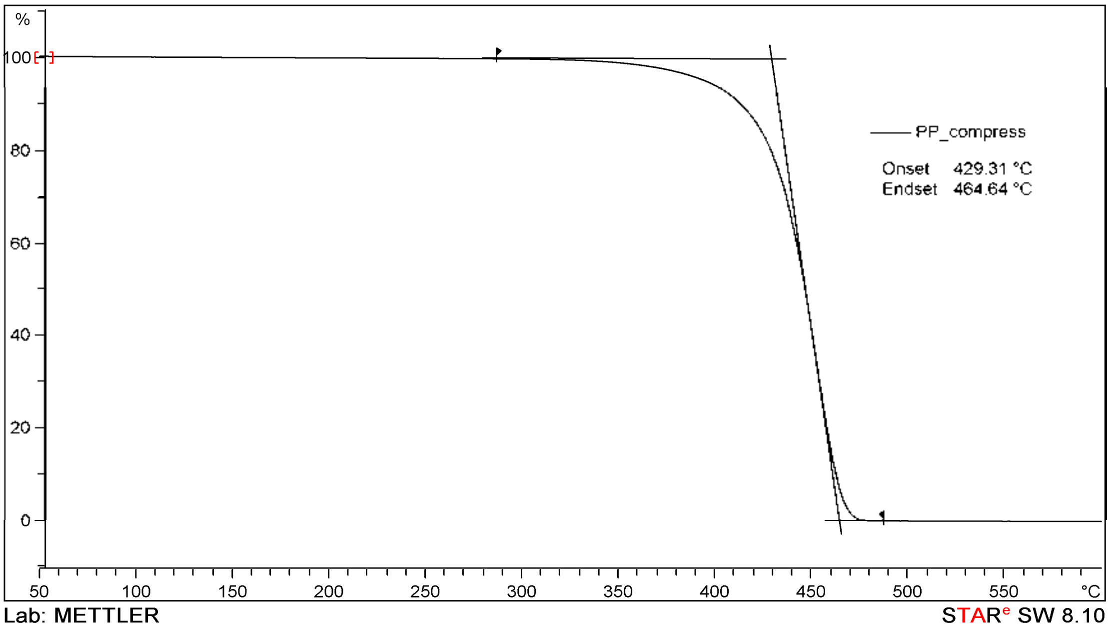


รูป ค-34 DSC เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 3.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

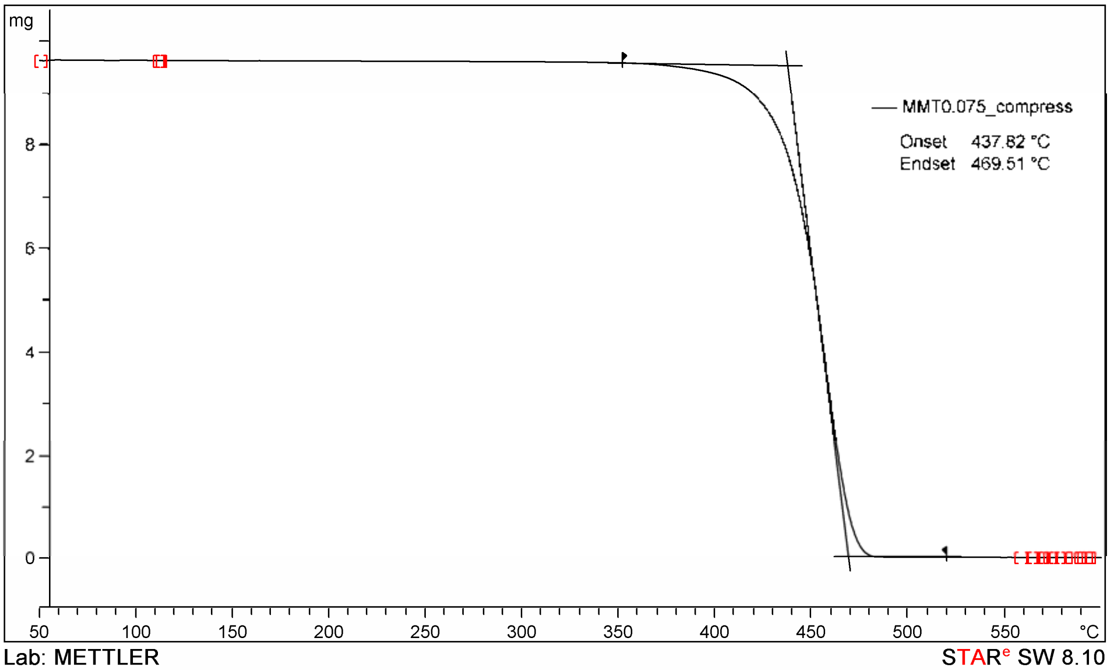
ภาคผนวก ง

การตรวจสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกแอนาไลเซอร์

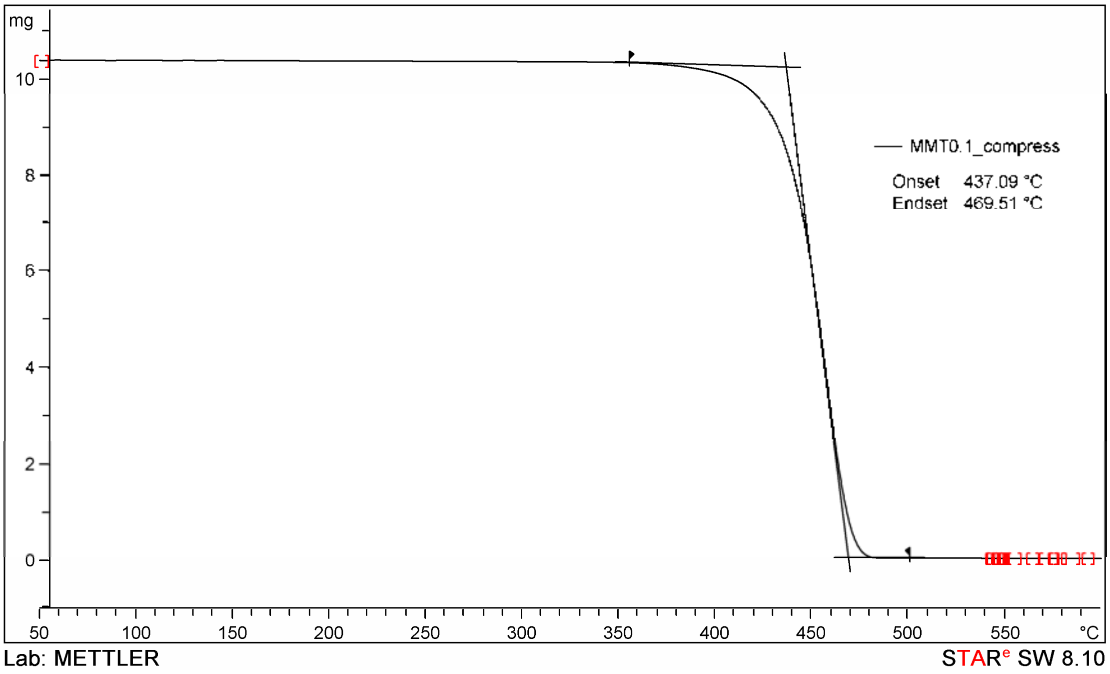
1. ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบอัด



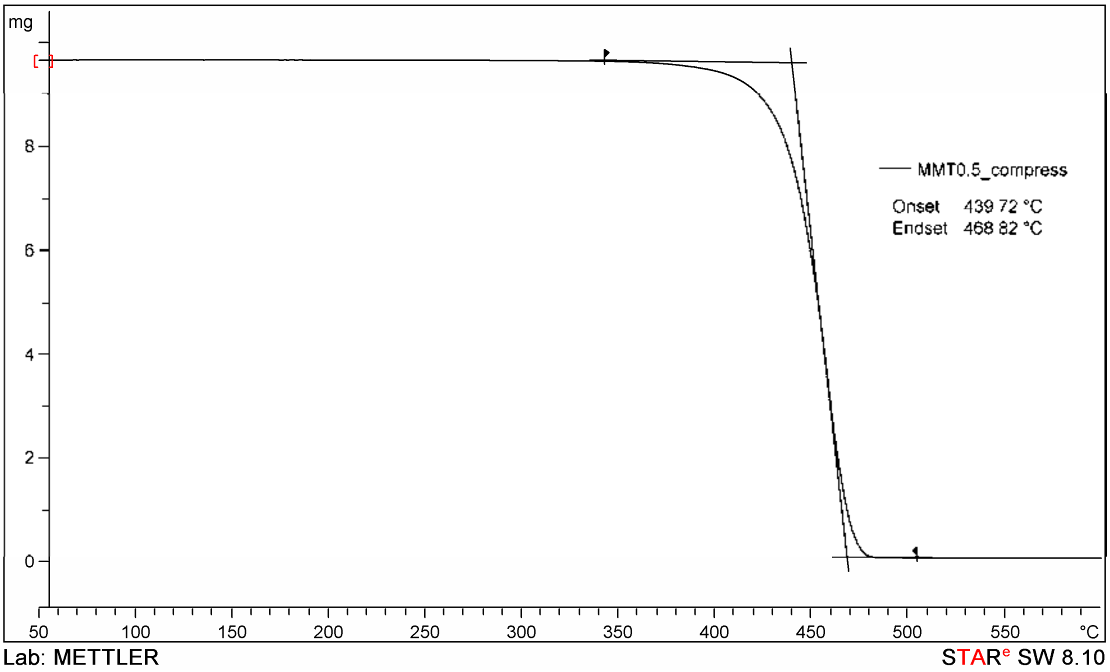
รูป ง-1 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



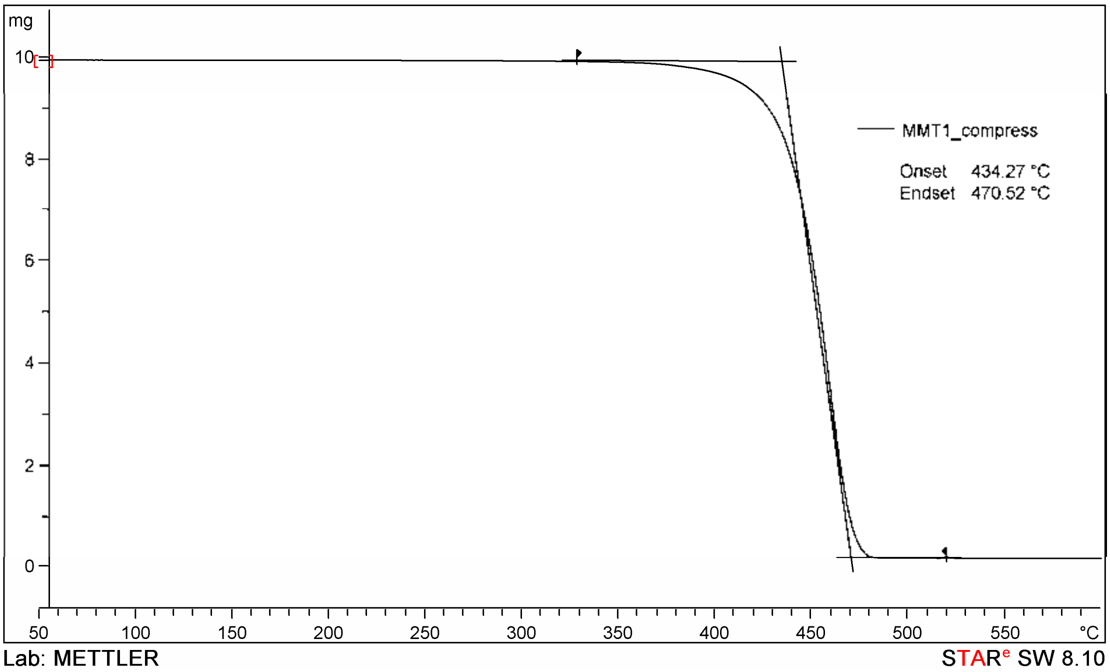
รูป ง-2 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.075% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



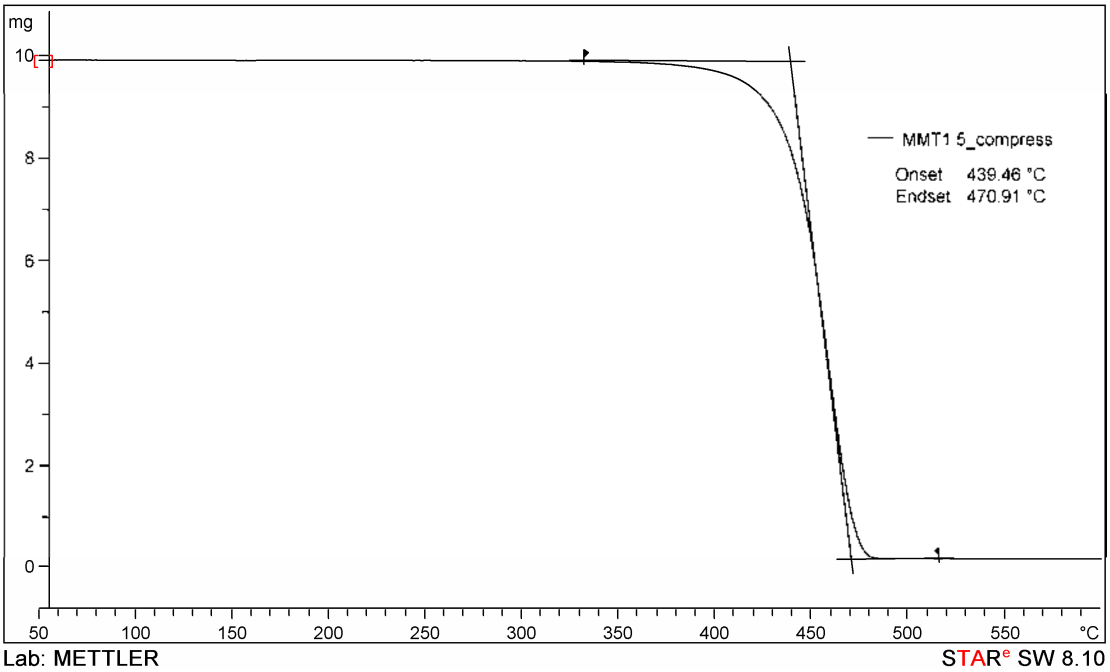
รูป ง-3 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.1% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



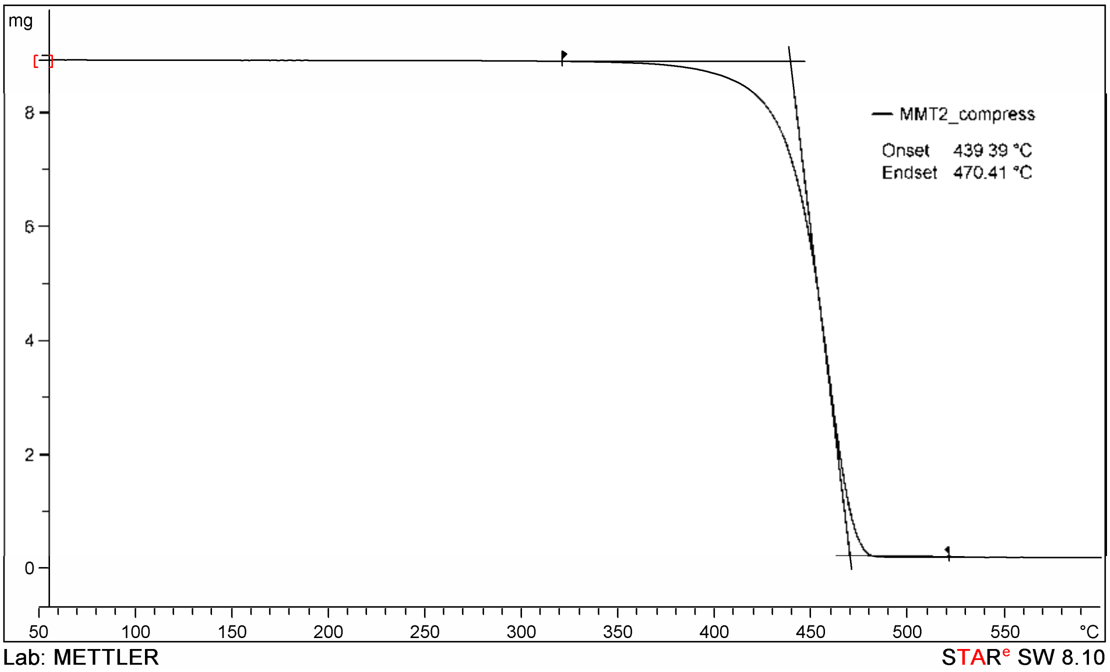
รูป ง-4 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



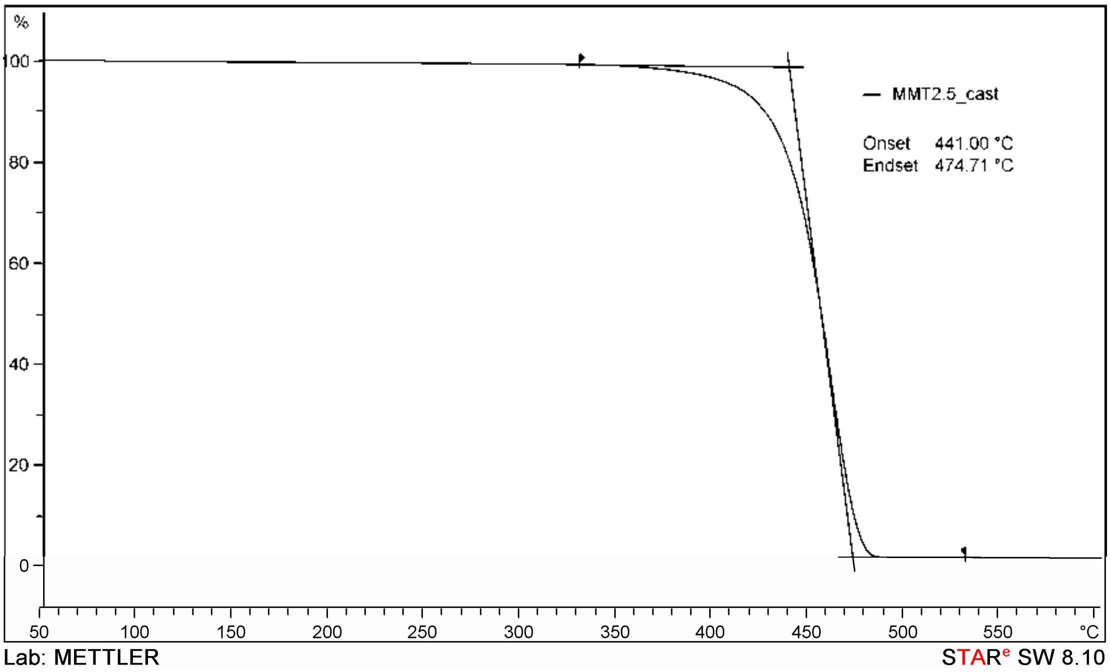
รูป ง-5 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 1.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



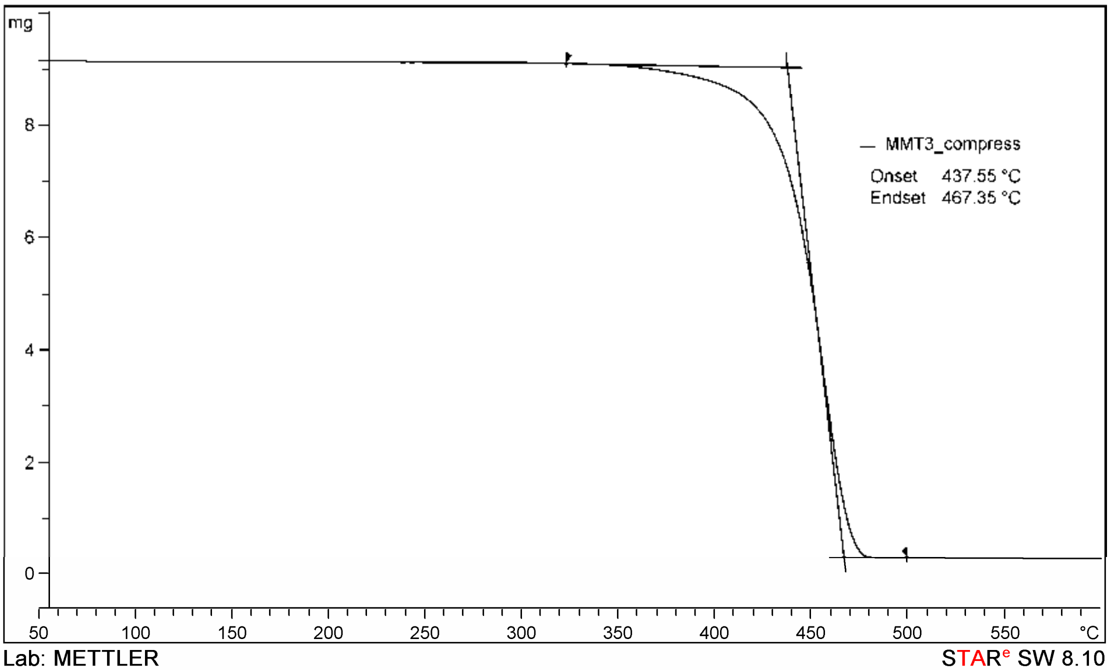
รูป ง-6 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 1.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



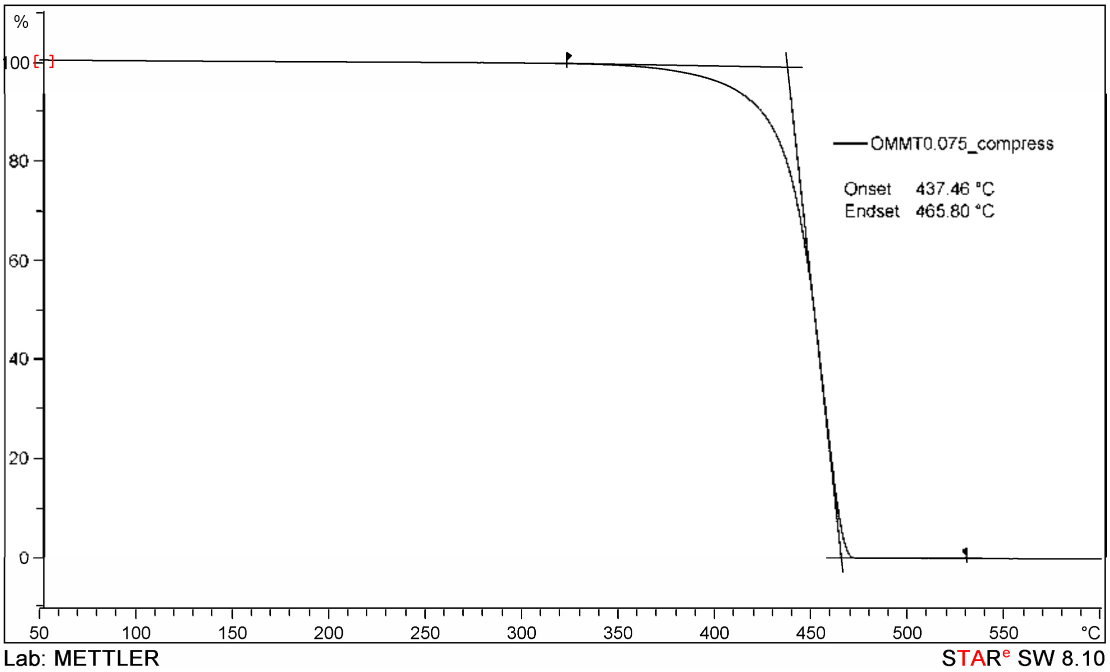
รูป ง-7 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 2.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



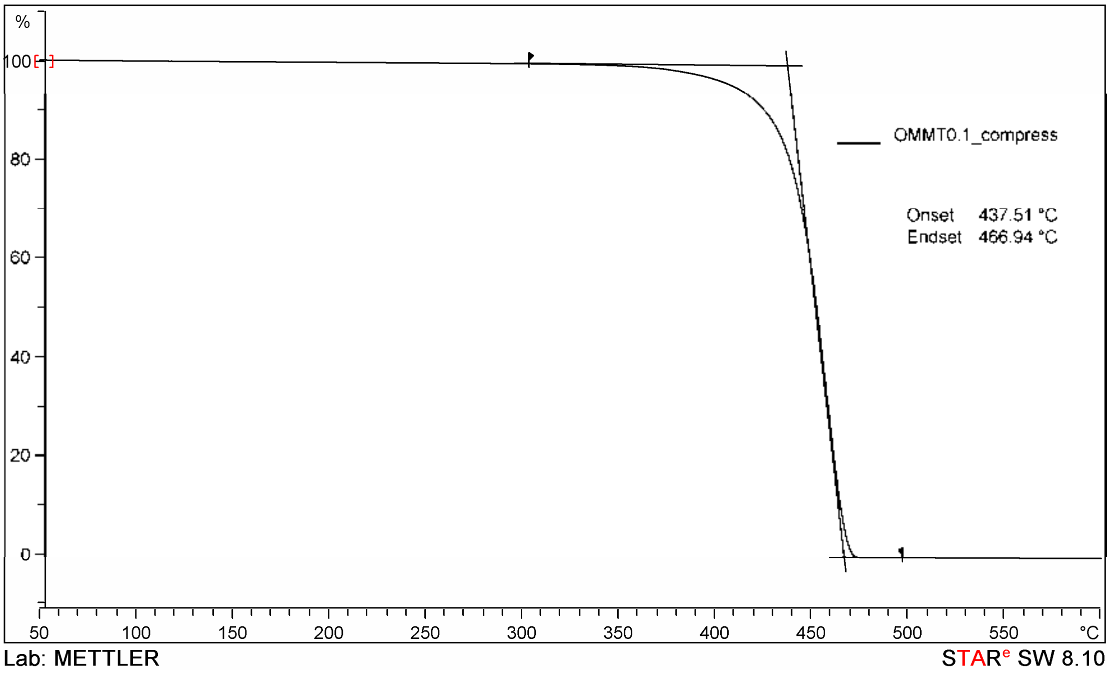
รูป ง-8 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 2.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



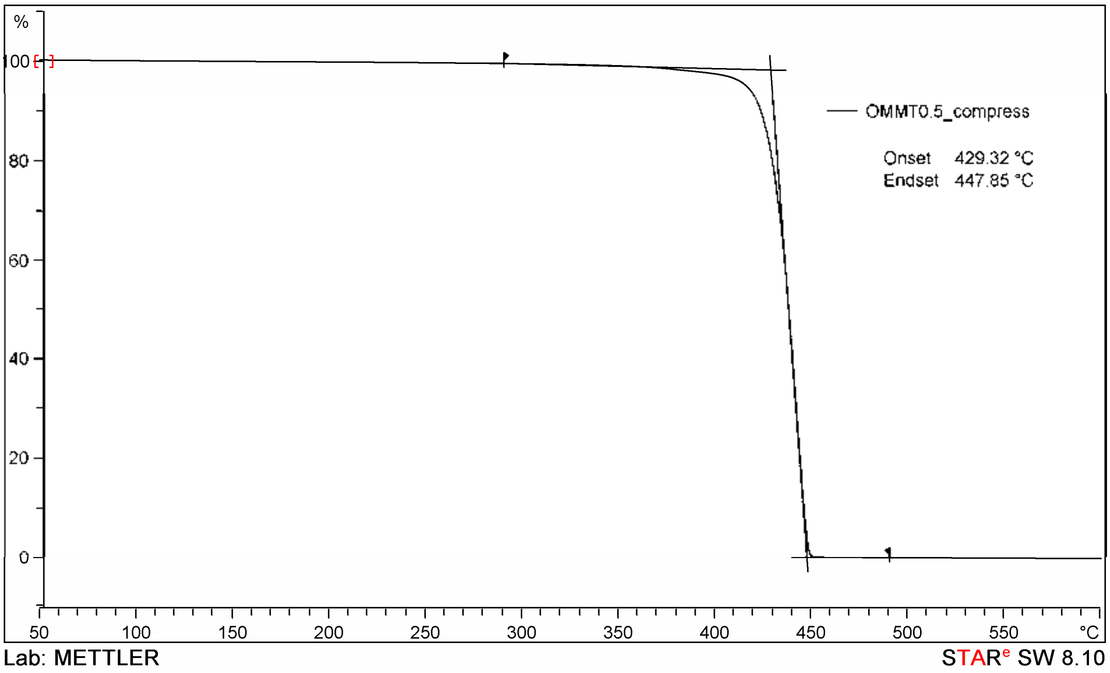
รูป ง-9 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 3.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



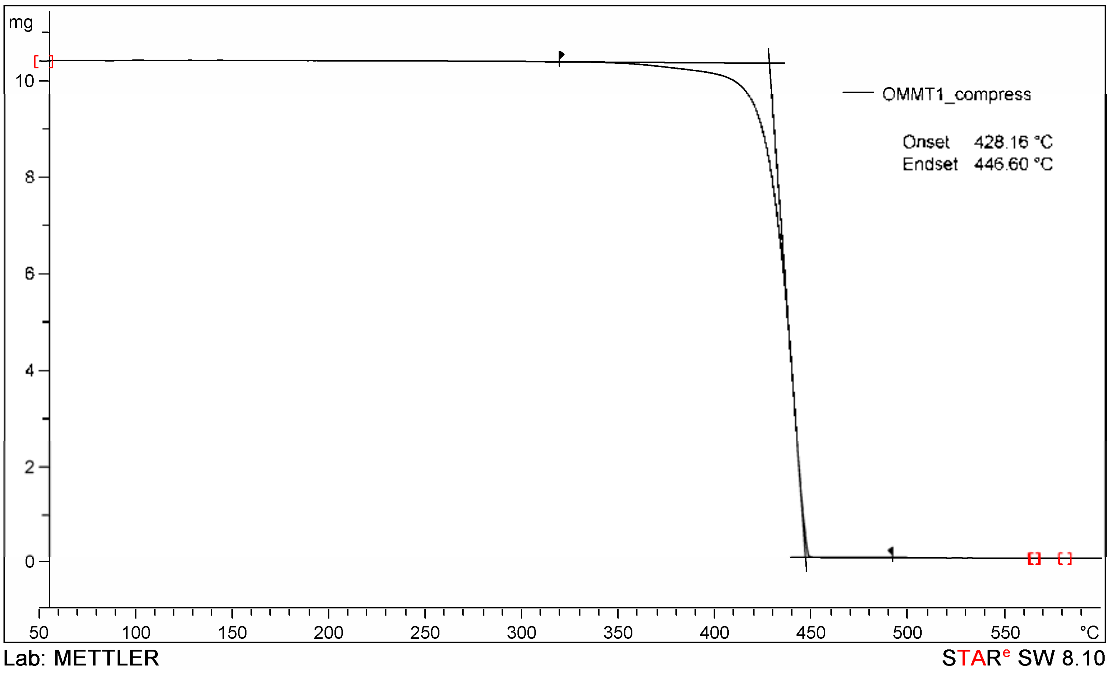
รูป ง-10 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.075% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



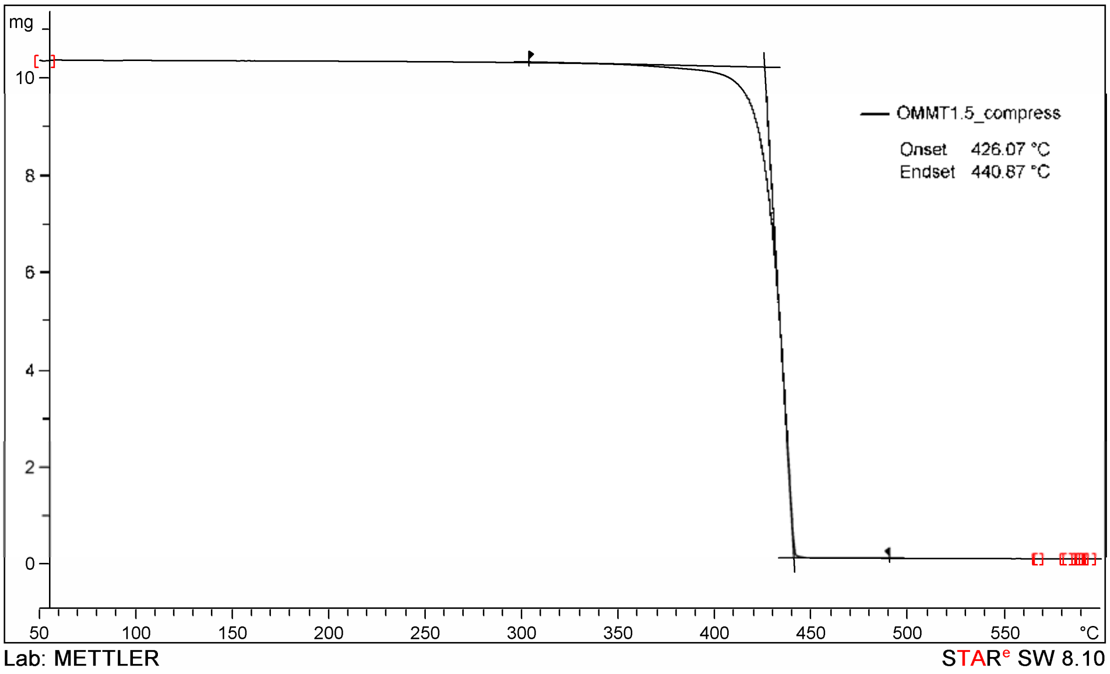
รูป ง-11 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.1% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



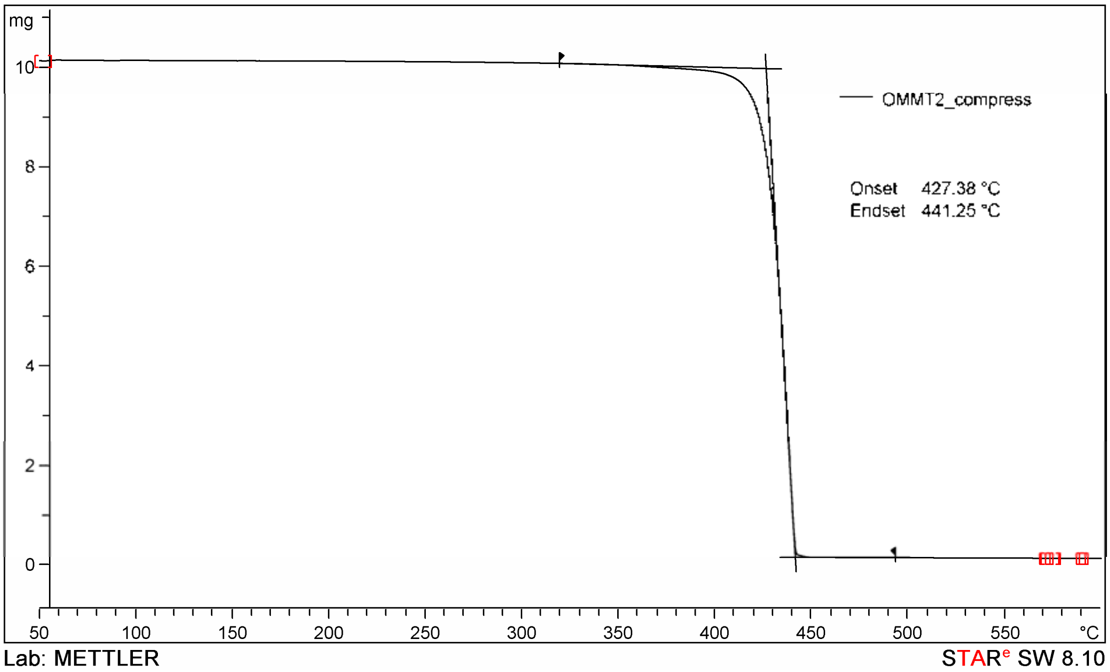
รูป ง-12 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



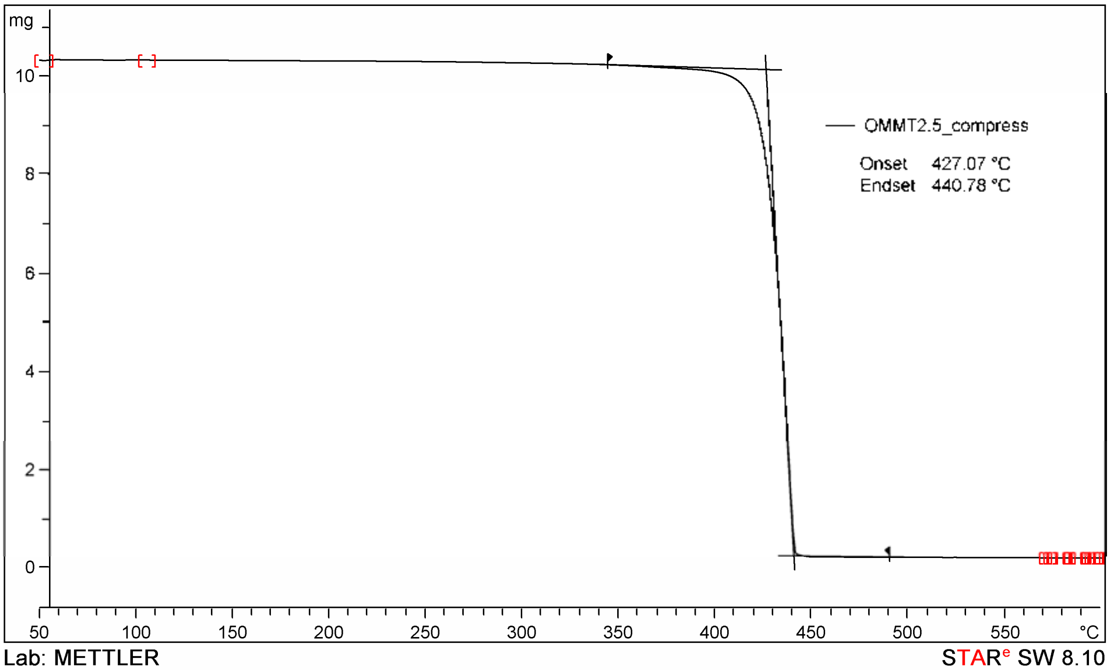
รูป ง-13 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



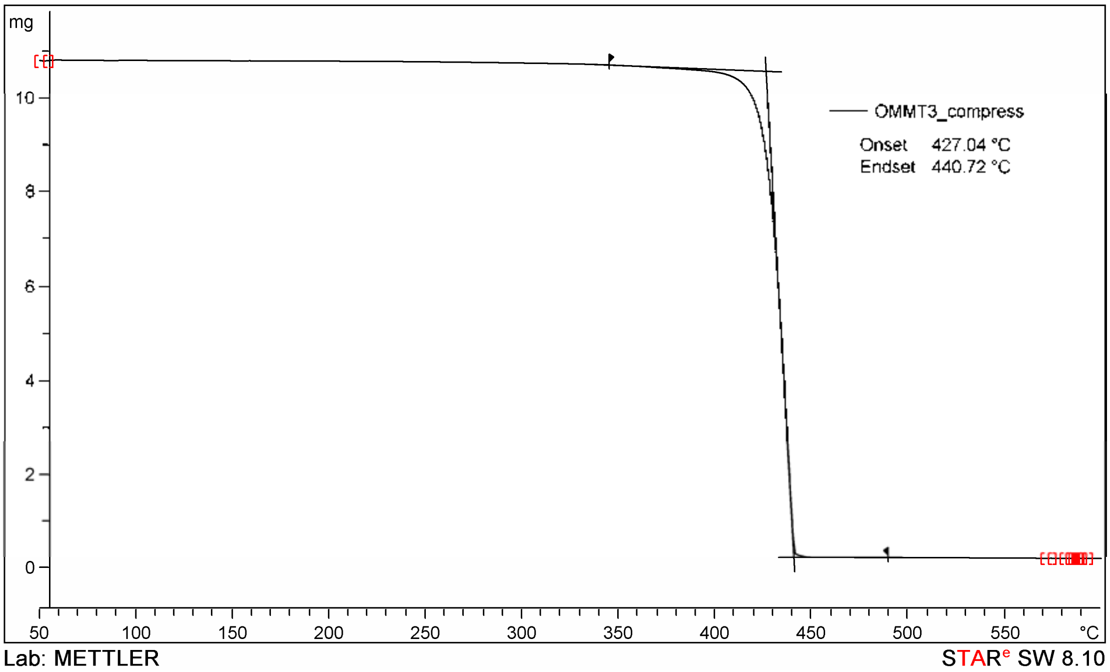
รูป ง-14 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1.5% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด



รูป ง-15 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 2.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

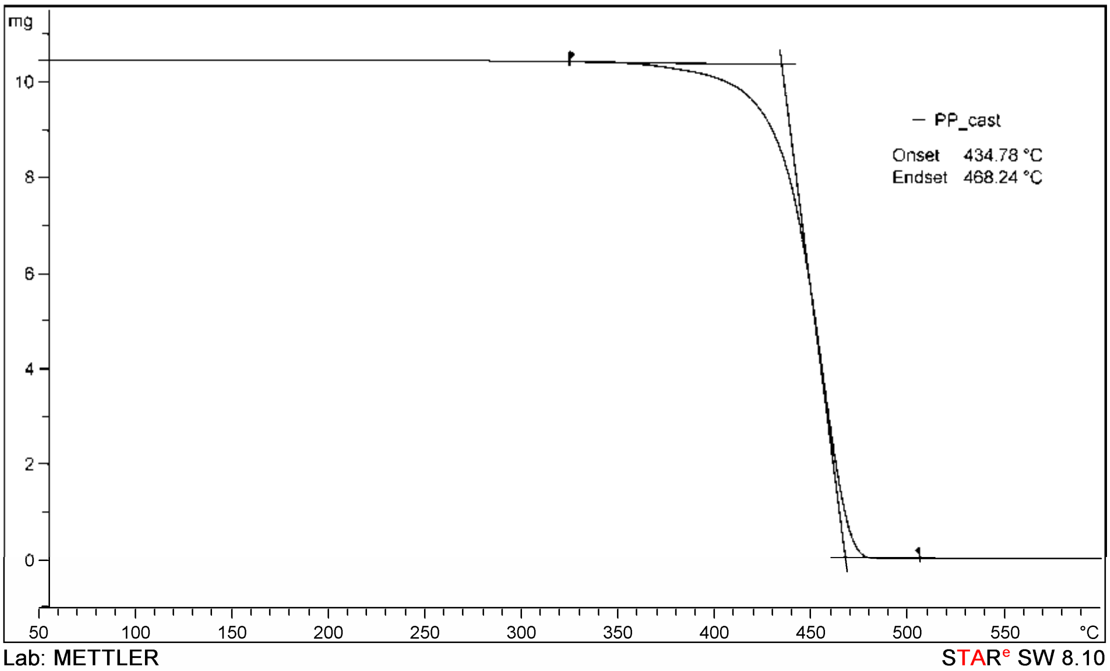


รูป ง-16 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 2.5% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

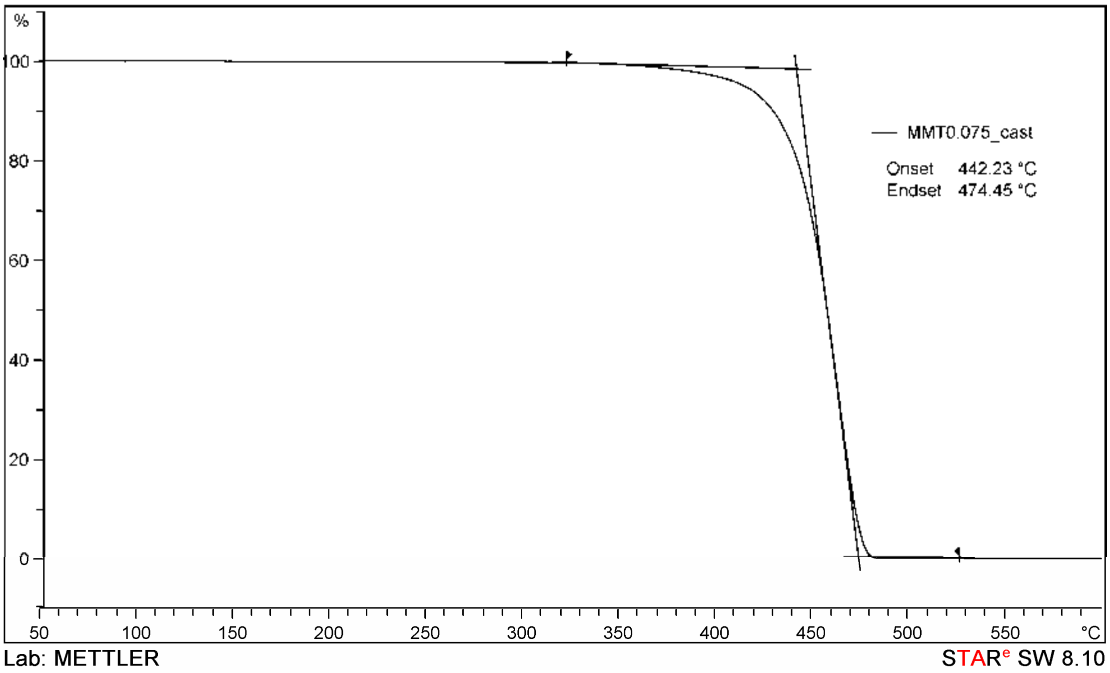


รูป ง-17 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 3.0 % โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

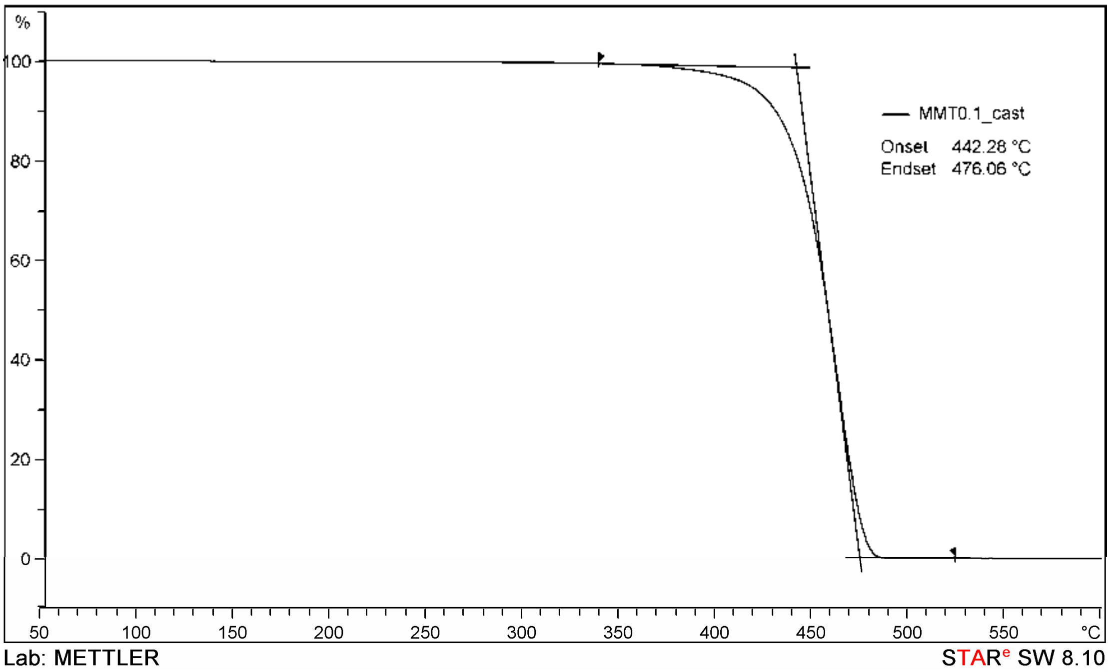
2. **ชิ้นงานพอลิโพรพิลีนที่ขึ้นรูปจากกระบวนการแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว**



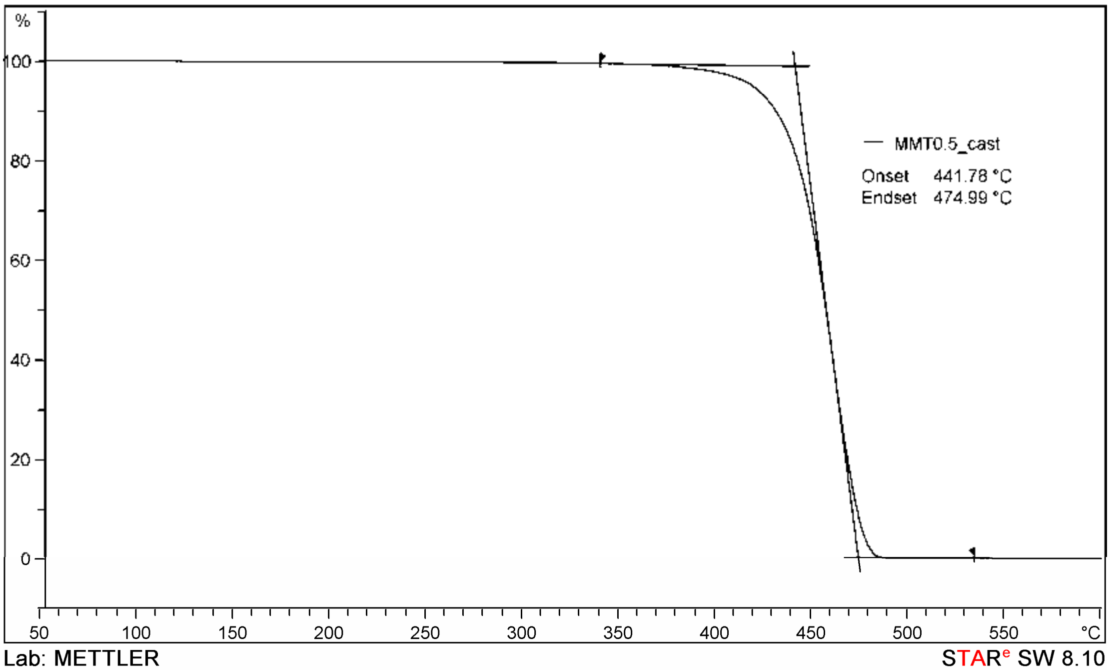
รูป ง-18 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



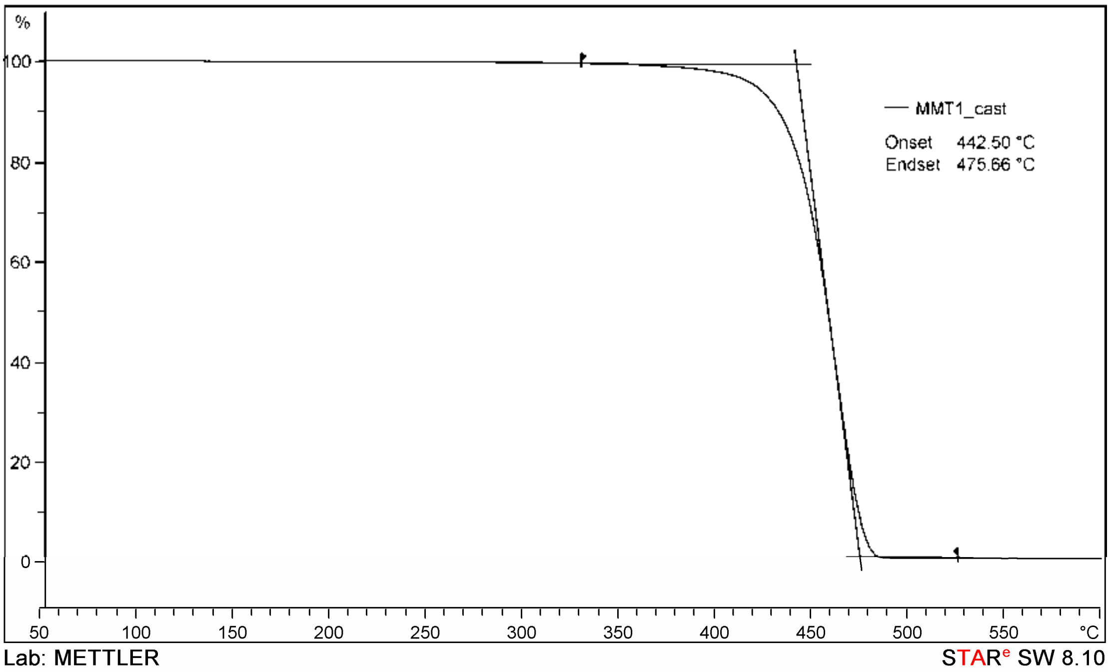
รูป ง-19 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.075% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



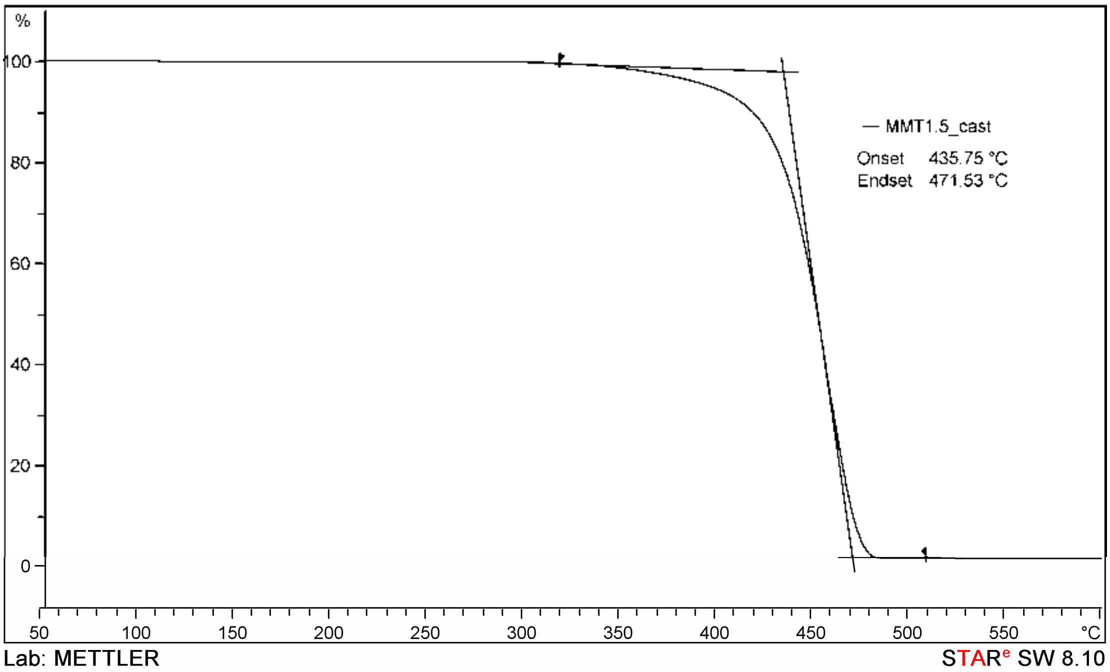
รูป ง-20 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.1% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



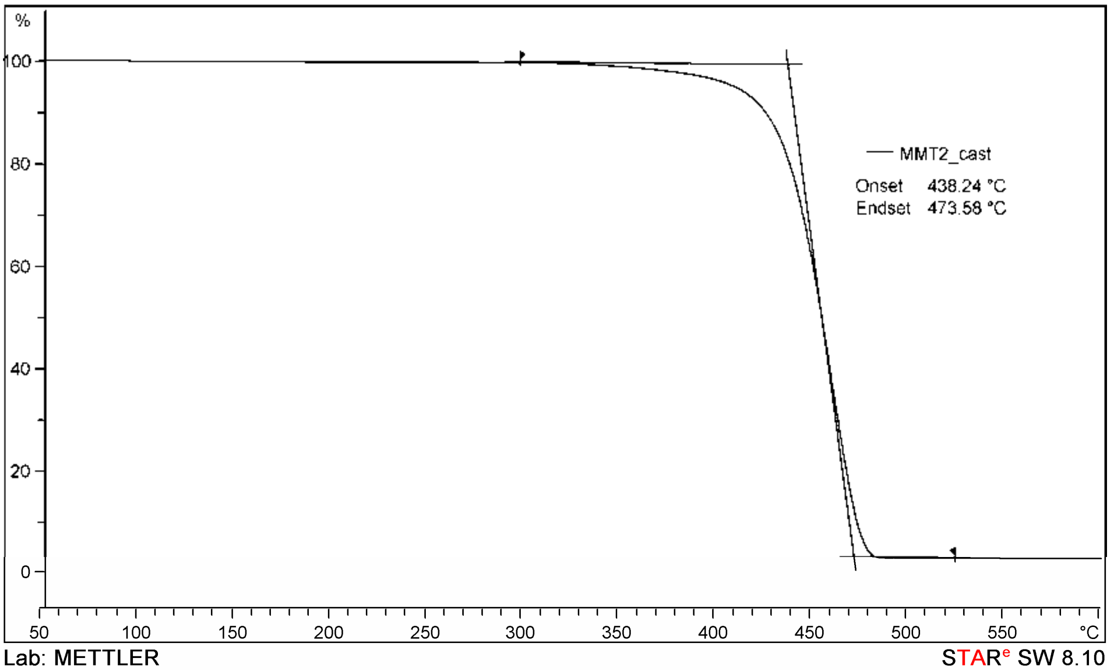
รูป ง-21 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 0.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



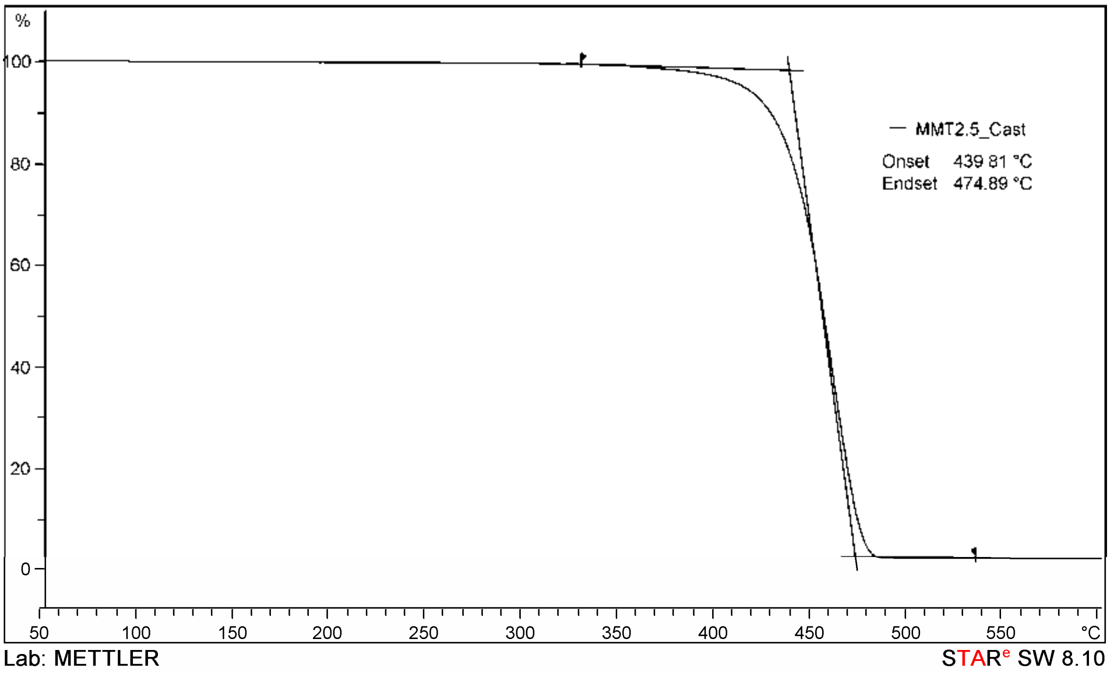
รูป ง-22 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 1.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



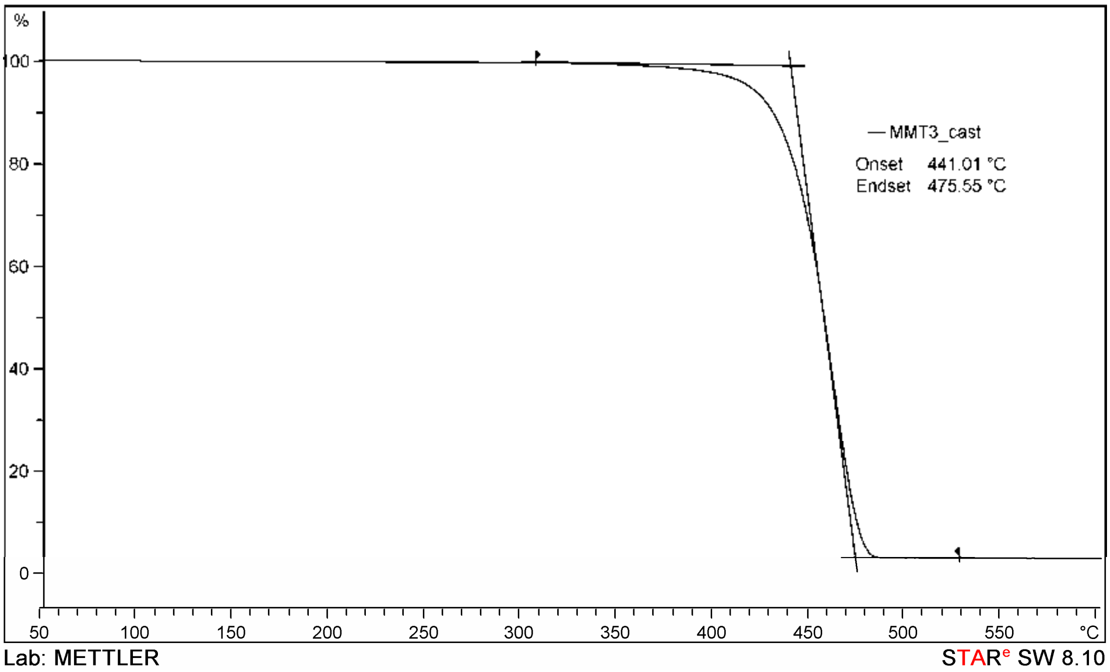
รูป ง-23 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 1.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



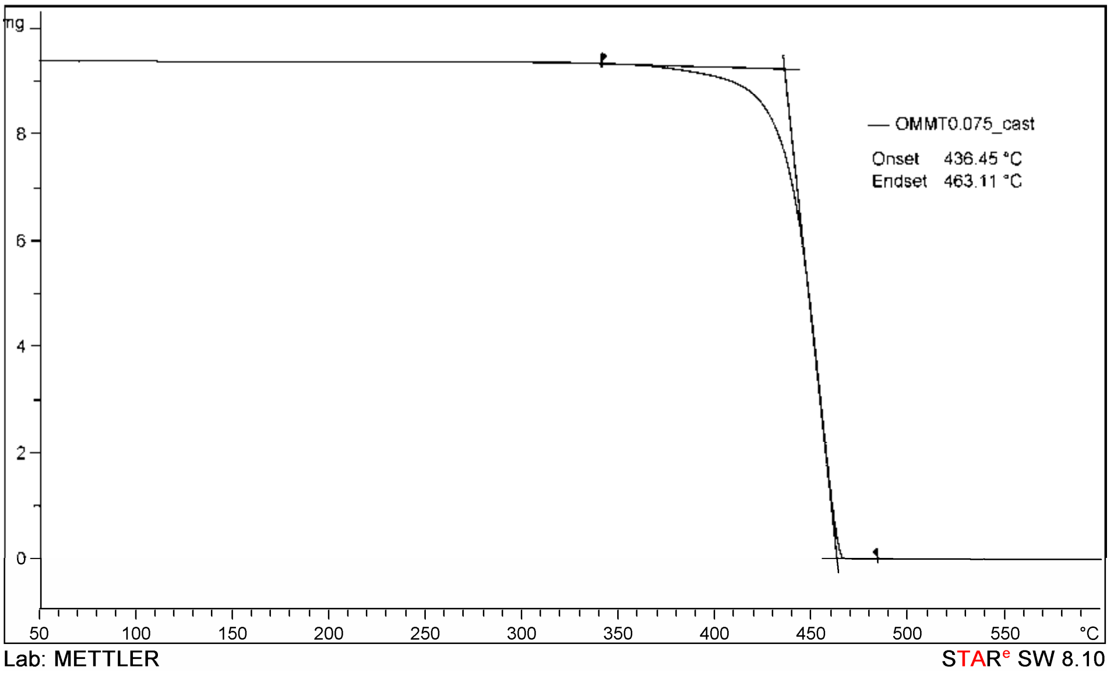
รูป ง-24 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 2.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



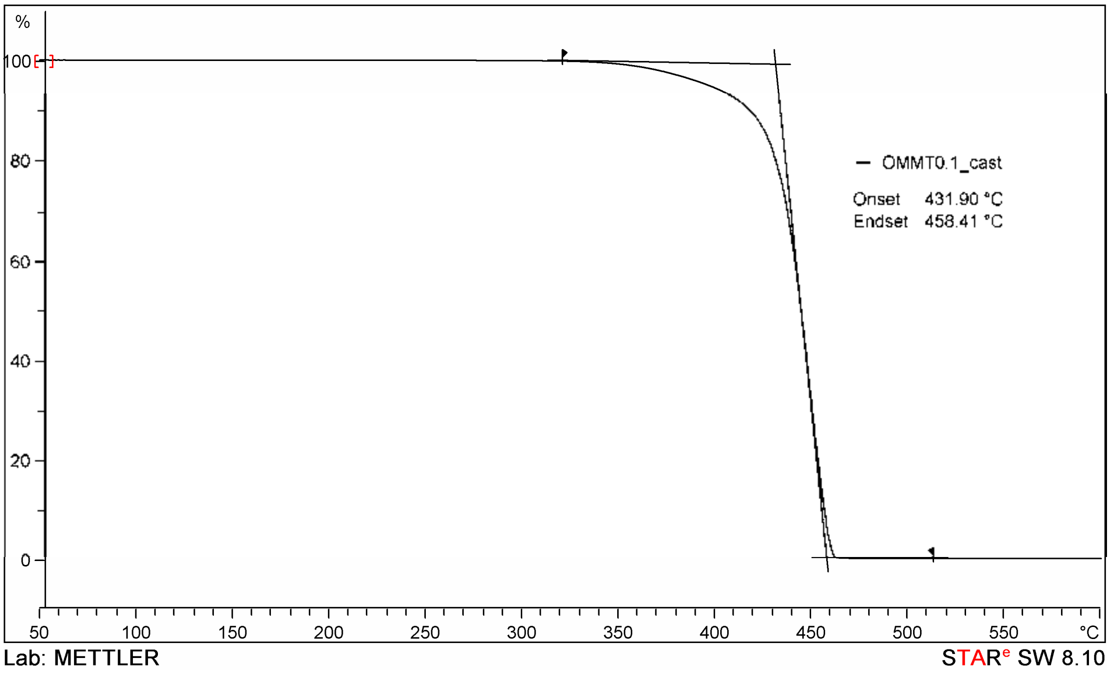
รูป ง-25 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 2.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



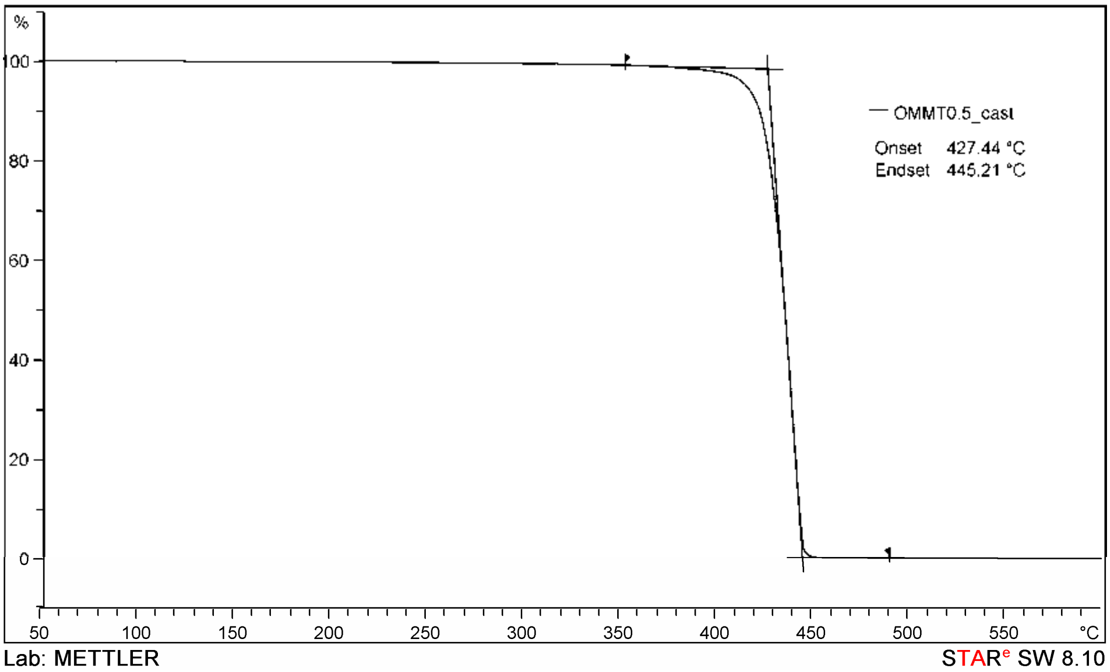
รูป ง-26 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 3.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



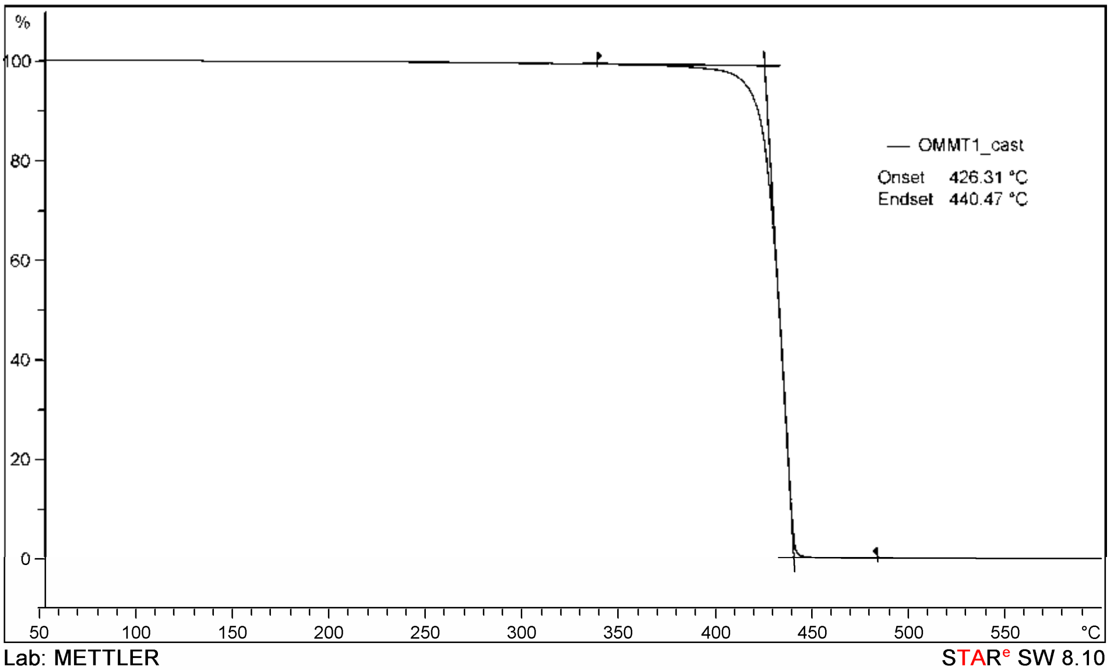
รูป ง-27 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.075% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



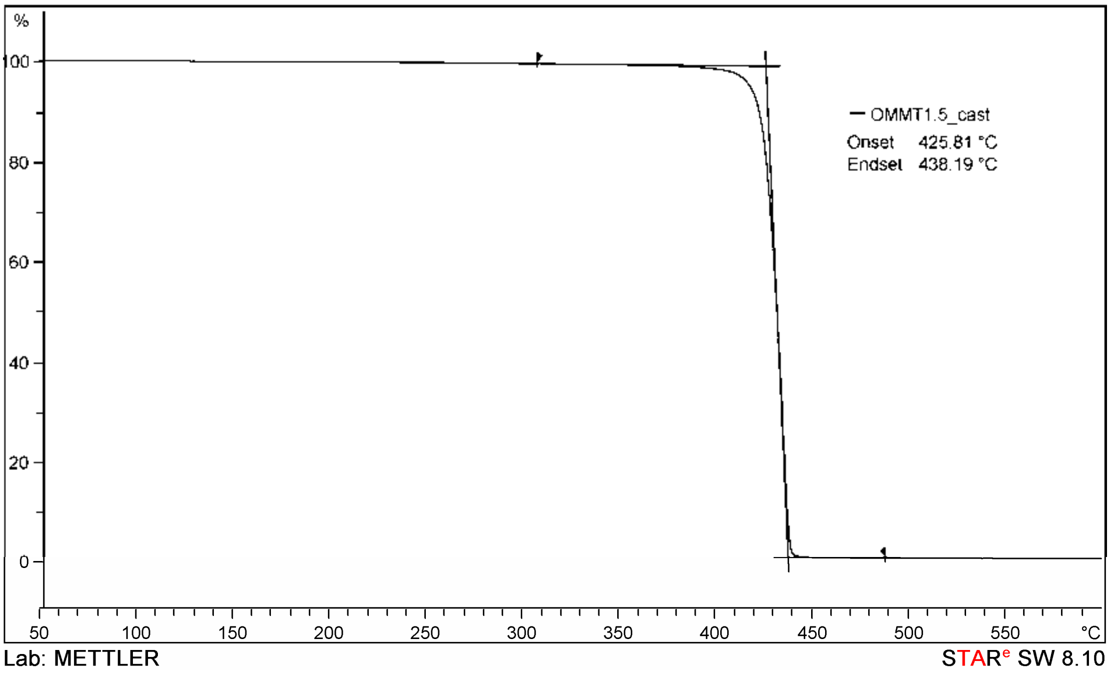
รูป ง-28 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.1% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



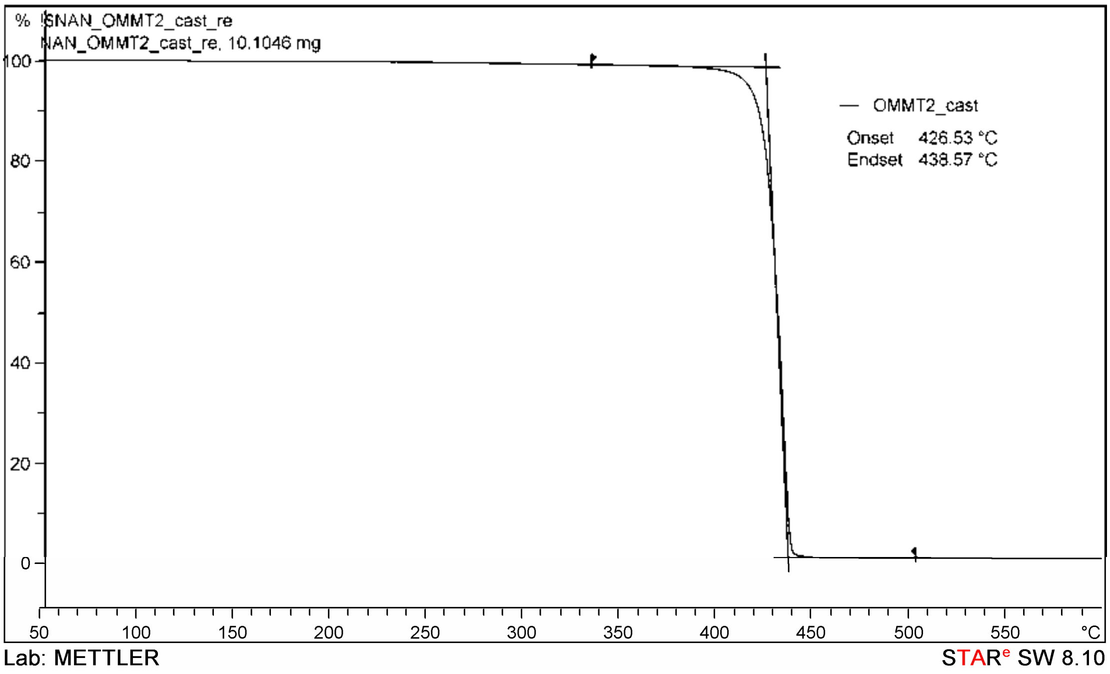
รูป ง-29 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 0.5% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



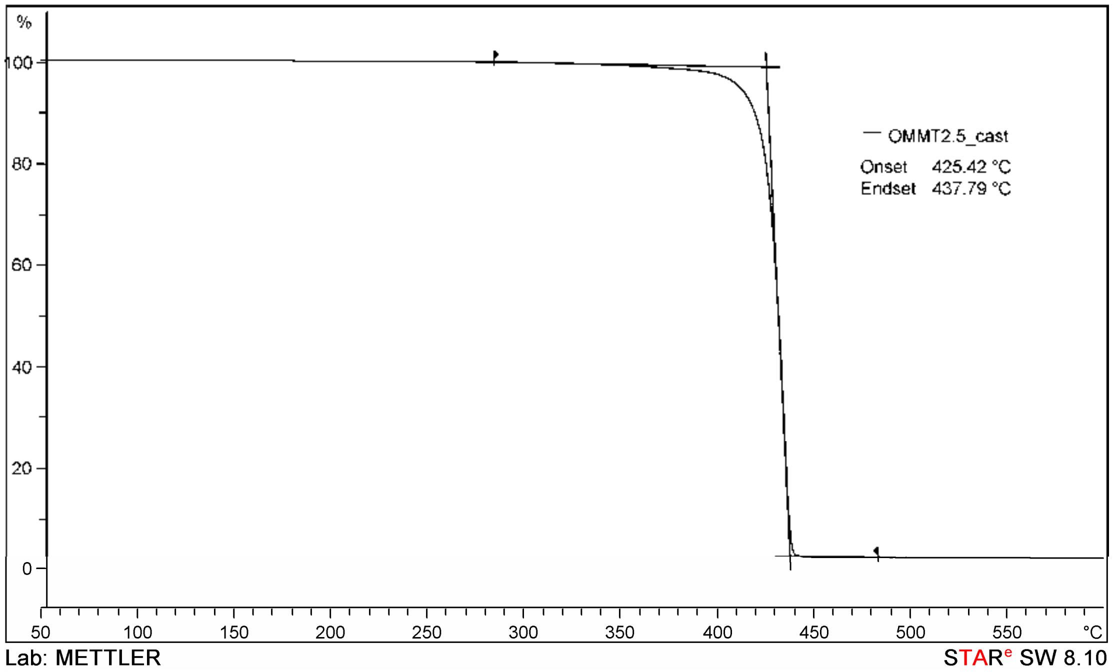
รูป ง-30 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1.0% โดยน้ำหนัก ที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



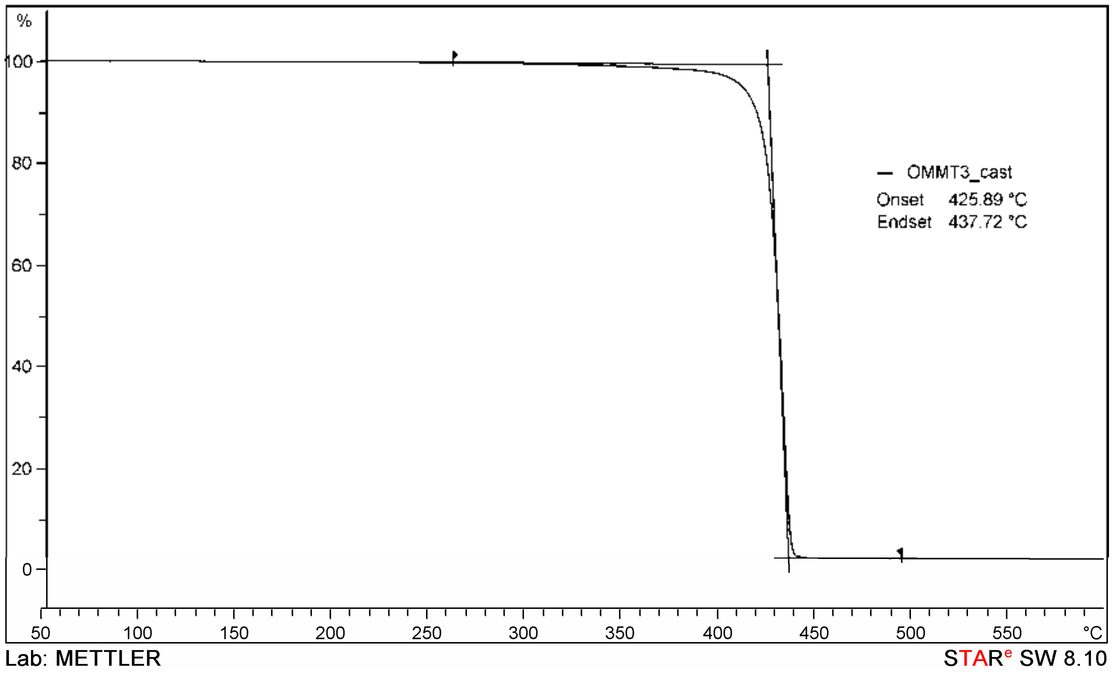
รูป ง-31 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 1.5% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



รูป ง-32 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 2.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



รูป ง-33 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 2.5% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว



รูป ง-34 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร 3.0% โดยน้ำหนักที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นสกรูเดี่ยว

ภาคผนวก จ

การทดสอบสมบัติความทนแรงดึง

ตาราง จ-1 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

S	Tensile strength (N/mm^2)					X	SD
	1	2	3	4	5		
PP	31.4	31.6	31.5	31.3	31.6	31.5	0.1
PP/MMT 0.075%	31.5	32.5	32.7	32.1	32.4	32.2	0.5
PP/MMT 0.1%	33.6	33.7	33.5	33.7	33.3	33.6	0.2
PP/MMT 0.5%	33.4	33.6	33.4	33.4	33.5	33.5	0.1
PP/MMT 1 %	32.8	33.4	33.1	32.8	33.4	33.1	0.3
PP/MMT 1.5%	31.3	31.1	31.2	31.3	31.3	31.3	0.1
PP/MMT 2%	31.6	31.6	31.9	31.8	32.0	31.8	0.2
PP/MMT 2.5%	30.9	30.3	30.5	30.8	31.1	30.8	0.3
PP/MMT 3%	31.6	30.8	31.4	31.0	31.8	31.3	0.4
PP/OMMT 0.075%	32.3	31.9	32.6	31.7	32.5	32.2	0.4
PP/OMMT 0.1%	33.3	32.6	32.8	32.7	32.4	32.8	0.3
PP/OMMT 0.5%	32.2	32.5	32.4	32.1	31.7	32.2	0.3
PP/OMMT 1%	32.2	32.9	32.8	32.4	32.4	32.6	0.3
PP/OMMT 1.5%	32.3	31.5	32.2	32.4	31.4	32.0	0.5
PP/OMMT 2%	31.9	31.7	31.3	32.0	31.1	31.6	0.4
PP/OMMT 2.5%	31.4	31.6	32.0	32.0	31.4	31.7	0.3
PP/OMMT 3%	30.6	30.9	31.3	31.2	31.1	31.0	0.3

ตาราง จ-2 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบหล่อแผ่นกสรูเดี่ยว

S	Tensile strength (N/mm^2)					X	SD
	1	2	3	4	5		
PP	74.2	77.5	75.1	77.5	74.3	75.8	1.7
PP/MMT 0.075%	89.0	92.3	84.1	86.6	82.7	87.0	3.8
PP/MMT 0.1%	116.1	126.4	118.1	115.8	124.0	120.1	4.8
PP/MMT 0.5%	113.7	111.3	120.3	111.7	113.9	114.2	3.6
PP/MMT 1 %	119.1	120.1	116.2	116.4	118.1	118.0	1.7
PP/MMT 1.5%	101.0	107.7	100.1	111.9	109.9	106.1	5.3
PP/MMT 2%	94.4	96.1	83.9	89.2	97.0	92.1	5.5
PP/MMT 2.5%	78.1	79.7	82.9	76.1	75.3	78.4	3.0
PP/MMT 3%	77.7	76.2	75.1	67.9	64.8	72.3	5.7
PP/OMMT 0.075%	94.0	89.7	89.8	93.6	91.6	91.7	2.0
PP/OMMT 0.1%	94.7	94.1	88.2	94.4	95.8	93.5	3.0
PP/OMMT 0.5%	85.6	97.0	86.5	87.6	97.5	90.8	5.9
PP/OMMT 1%	92.2	90.0	91.4	88.9	90.0	90.5	1.3
PP/OMMT 1.5%	91.2	86.3	89.3	89.5	86.7	88.6	2.1
PP/OMMT 2%	86.4	83.9	83.9	88.2	86.4	85.8	1.9
PP/OMMT 2.5%	85.8	86.8	86.0	88.3	91.5	87.7	2.3
PP/OMMT 3%	85.1	86.7	89.0	93.5	87.8	88.4	3.2

ภาคผนวก ฉ

การทดสอบสมบัติความทนแรงกระแทก

ตาราง ฉ-1 ค่าความทนแรงดึงของพอลิโพรพิลีน พอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์และพอลิโพรพิลีนที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมจากกระบวนการขึ้นรูปแบบอัด

S	Impact strength (kJ/m^2)					X	SD
	1	2	3	4	5		
PP	1.92	1.59	1.94	1.97	1.64	1.81	0.18
PP/MMT 0.075%	1.43	2.37	2.27	1.35	1.69	1.82	0.47
PP/MMT 0.1%	2.03	2.03	2.05	2.03	2.05	2.04	0.01
PP/MMT 0.5%	2.30	1.66	1.99	2.05	2.37	2.07	0.28
PP/MMT 1 %	1.01	1.69	2.37	3.04	2.03	2.03	0.76
PP/MMT 1.5%	1.70	2.39	2.03	1.69	1.35	1.83	0.39
PP/MMT 2%	1.69	2.03	2.03	1.69	1.01	1.69	0.41
PP/MMT 2.5%	1.66	1.64	1.32	1.66	1.69	1.59	0.15
PP/MMT 3%	1.69	1.69	2.03	1.69	1.69	1.76	0.15
PP/OMMT 0.075%	1.69	2.03	1.69	1.69	2.03	1.83	0.19
PP/OMMT 0.1%	2.39	2.31	1.34	2.03	1.37	1.89	0.51
PP/OMMT 0.5%	1.71	2.73	2.39	2.39	2.39	2.32	0.37
PP/OMMT 1%	2.05	1.71	2.70	2.39	1.69	2.11	0.44
PP/OMMT 1.5%	3.38	2.03	1.02	2.05	1.35	1.97	0.91
PP/OMMT 2%	2.03	1.35	1.35	2.37	1.35	1.69	0.48
PP/OMMT 2.5%	1.35	1.69	1.71	1.37	1.69	1.56	0.18
PP/OMMT 3%	1.66	1.35	1.01	1.01	1.63	1.33	0.32

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพนิตนันท์ ศรีสุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคปลายของปีการศึกษา 2550 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2552