

การเตรียมและสมบัติของอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

นางสาวชุติมา วรवास

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND PROPERTIES OF EVA/POLYSTYRENE/MONTMORILLONITE
NANOCOMPOSITES

Miss Chutima Worawas

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

การเตรียมและสมบัติของอีวีเอ/พอลิสไตรีน/

มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

โดย

นางสาวชุตติมา วรवास

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ุ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.พรทิพย์ แซ่เบ๊)

ชุดิมา วรवास : การเตรียมและสมบัติของอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์
 นาโนคอมพอสิต. (PREPARATION AND PROPERTIES OF EVA / POLYSTYRENE /
 MONTMORILLONITE NANOCOMPOSITES). อ. ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์หลัก :
 รศ.เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร, 94 หน้า

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเตรียมนาโนคอมพอสิตจากเอทิลีนไวนิลแอสซีเทตโคพอลิเมอร์ (อีวีเอ) พอลิสไตรีนอนุภาคขนาดนาโนเมตร และมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยการผสมในสภาพเลเท็กซ์ ซึ่งนาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีนถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียล ไมโครอิมัลชัน โดยใช้โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต และ 2,2'-อะโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์เป็นสารลดแรงตึงผิวและสารเริ่มปฏิกิริยา ตามลำดับ โดยปริมาณของแข็งในนาโนเลเท็กซ์ที่วัดด้วยวิธีชั่งน้ำหนักมีค่าประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของพอลิสไตรีนที่หาจากเครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัตมีค่าเท่ากับ 15 นาโนเมตร และสัณฐานของอนุภาคพอลิสไตรีนรูปทรงกลมถูกตรวจพบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พอลิเมอร์ผสมของอีวีเอและพอลิสไตรีนขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักแห้งเท่ากับ 90/10, 80/20 และ 70/30 ได้ถูกผสมกับมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 1, 3 และ 5 ส่วนต่อเรซินร้อยละ ด้วยเครื่องปั่นผสมความเร็วสูง ที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ของผสมที่เตรียมได้ถูกหล่อในแม่แบบที่ทำจากกระจก แล้วนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีอัดแบบให้เป็นแผ่นบางๆ ต่อไป จากนั้นชิ้นงานได้ถูกตรวจสอบโครงสร้าง สมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติเชิงกลพลวัต พฤติกรรมทางความร้อน และสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต เครื่องเทอร์โมแกรวิเมตริกแอนาไลเซอร์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติเชิงกลพลวัต เสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตได้ถูกปรับปรุงเมื่อเติมมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณที่เหมาะสม

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....

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

ปีการศึกษา 2552.....

#5172262423: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: EVA / POLYSTYRENE / MONTMORILLONITE / NANOCOMPOSITE

CHUTIMA WORAWAS : PREPARATION AND PROPERTIES OF EVA /

POLYSTYRENE / MONTMORILLONITE NANOCOMPOSITES. THESIS ADVISOR:

ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT, 94 pp.

The aim of this research is to prepare nanocomposites from ethylene vinyl acetate copolymer (EVA), polystyrene (PS) nanoparticles and montmorillonite (MMT) by latex compounding. The nanolatex of PS was synthesized by differential microemulsion polymerization using sodium dodecyl sulfate and 2,2'-azobisisobutyronitrile as a surfactant and an initiator, respectively. Solid content of the nanolatex determined by gravimetric method is about 22%. Average particle size of PS nanoparticles measured by a dynamic light scattering analyzer was 15 nm. Spherical-shaped PS nanoparticles were observed under a transmission electron microscope. The polymer blends of EVA and PS at EVA/PS dry weight ratios of 90/10, 80/20 and 70/30 were mixed with MMT at the amount of 1, 3 and 5 phr using a high speed mixer at 3000 rpm for 5 min. The latex mixtures were cast on a glass mold and then compressed into thin sheets. After that, the samples were examined for their structures, tensile properties, dynamic mechanical properties, thermal behaviors and morphology using an X-ray diffractometer, universal testing machine, dynamic mechanical analyzer, thermal gravimetric analyzer and scanning electron microscope, respectively. The results showed that the tensile properties, dynamic mechanical properties and thermal stability of the obtained intercalated nanocomposites could be improved by the addition of an appropriate amount of MMT.

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

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

Academic Year : 2009.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เพราะได้รับความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนาม ต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ การแก้ไขปัญหา การสนับสนุนทุนในการวิจัย รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูงที่ได้ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัย
3. ดร.ชัยวัฒน์ นรกานต์กร ที่ให้คำแนะนำและการแก้ปัญหาอย่างดียิ่งโดยเสมอมา
4. คุณอัญญพร บุญมหิทธิสุทธิ์ ที่ให้คำแนะนำและการแก้ปัญหาอย่างดียิ่งโดยเสมอมา
5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
8. บริษัท ดาว คอนนิง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี
9. บริษัท สยามเคมีคอล จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี
10. บริษัท อิเทอร์นอล เรซิน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาว น้องสาว รวมทั้งคุณณัฐนิชา ปิยะวงศ์ ที่ให้การสนับสนุนในด้านกำลังใจและด้านทุนทรัพย์ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ และพี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือ และความปรารถนาดีแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เอทิลีนไวเนิลแอลซีเทตโคพอลิเมอร์.....	3
2.2 พอลิสไตรีน.....	5
2.2.1 การเตรียมมอนอเมอร์.....	6
2.2.2 พอลิเมอร์ไรเซชัน.....	6
2.2.3 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์.....	8
2.3 แร่ดิน.....	9
2.3.1 มอนต์มอริลไลไนต์.....	13
2.4 นาโนคอมพอสิต.....	15
2.4.1 ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต.....	17
2.4.2 ผลกระทบที่สำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต.....	17
2.4.3 แนวโน้มการพัฒนานาโนเคลย์ และพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต.....	18
2.5 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน.....	20
2.6 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน.....	24
2.7 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน.....	27
3. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 สารเคมีที่ใช้.....	31

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมนาโนเลเท็กซ์.....	32
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมขึ้นตัวอย่างทดสอบ.....	32
3.2.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	32
3.3 วิธีการทดลอง.....	33
3.3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีน.....	33
3.3.2 การแยกพอลิสไตรีนออกจากนาโนเลเท็กซ์.....	35
3.3.3 การวิเคราะห์นาโนเลเท็กซ์.....	36
3.3.3.1 เปอร์เซนต์ผลได้ของพอลิสไตรีนในนาโนเลเท็กซ์.....	36
3.3.3.2 สัณฐานวิทยาของอนุภาคระดับนาโนของพอลิสไตรีน.....	37
3.3.3.3 ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค.....	37
3.3.4 การเตรียมอีวีเอ พอลิสไตรีนและมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต.....	39
3.3.5 การวิเคราะห์และทดสอบอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิต.....	41
3.3.5.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา.....	41
3.3.5.2 สมบัติด้านความทนแรงดึง.....	42
3.3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างผลึก.....	42
3.3.5.4 สมบัติทางความร้อน.....	43
3.3.5.5 สมบัติเชิงกลพลวัต.....	44
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	45
4.1 พอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์.....	45
4.2 เปอร์เซนต์ของแข็ง (%solid) เปอร์เซนต์ผลได้ (%yield) และขนาดอนุภาค ของพอลิสไตรีน.....	45
4.3 สัณฐานวิทยาของพอลิสไตรีนที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตร.....	46
4.4 สัณฐานวิทยา.....	46
4.5 สมบัติด้านความทนแรงดึงของวัสดุนาโนคอมพอสิต.....	49
4.5.1 สมบัติความทนแรงดึง.....	49

บทที่	
4.5.2	ยั้งส์มอดุลัส..... 51
4.5.3	เปอร์เซ็นต์การยึดตัว..... 52
4.6	การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิค XRD..... 53
4.7	เสถียรภาพทางความร้อนที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA..... 56
4.8	สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical property)..... 58
5.	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนะ..... 63
5.1	สรุปผลการทดลอง..... 63
5.2	ข้อเสนอนะ..... 64
รายการอ้างอิง 65
ภาคผนวก 68
ภาคผนวก ก 69
ภาคผนวก ข 70
ภาคผนวก ค 73
ภาคผนวก ง 81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 94

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์อิมัลชัน	31
ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์	34
ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารที่ใช้เตรียมอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต	39
ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง เปอร์เซ็นต์ผลได้ และขนาดอนุภาคของพอลิสไตรีนที่ สังเคราะห์จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน	46
ตารางที่ 4.2 ค่า 2θ ของพีคต่างๆ ที่ปรากฏในกราฟ XRD	55
ตารางที่ 4.3 ค่า d-spacing ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่คำนวณจากสมการของแบรกก์	55
ตารางที่ 4.4 คุณหมุมิการสลายตัวที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA	57

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของอีวีเอ.....	3
รูปที่ 2.2 ชั้นของซิลิกาเตตระฮีดรัล.....	9
รูปที่ 2.3 ชั้นของอะลูมินาออกตะฮีดรัล.....	10
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	14
รูปที่ 2.5 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน.....	14
รูปที่ 2.6 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์คอมพอสิต.....	16
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอินเตอร์คาเลตและเอกซ์พอลิเอตนาโนคอมพอสิต.....	17
รูปที่ 2.8 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของอีวีเอและมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต.....	19
รูปที่ 2.9 ผล TGA ของอีวีเอและมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต.....	20
รูปที่ 2.10 ค่า CMC และสมบัติทางกายภาพของสารละลายสารลดแรงตึงผิว.....	21
รูปที่ 2.11 การเกิดไมเซลล์ในกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน.....	22
รูปที่ 2.12 องค์ประกอบของระบบอิมัลชัน.....	23
รูปที่ 2.13 แผนภาพเฟสของ isotropic microemulsion.....	25
รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน.....	26
รูปที่ 2.15 กลไกการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการเกิดแบบ ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน.....	28
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดแรงตึงผิวกับขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์.....	29
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลทีกซ์ของพอลิสไตรีน.....	33
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลทีกซ์ของพอลิสไตรีน.....	34
รูปที่ 3.3 การตกตะกอนพอลิสไตรีนด้วยเมทานอลที่มากเกินไป.....	35
รูปที่ 3.4 การล้างและกรองอนุภาคระดับนาโนที่เตรียมได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ.....	35
รูปที่ 3.5 ตะกอนของพอลิสไตรีนก่อนนำไปอบ.....	36
รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	37
รูปที่ 3.7 เครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) รุ่น JEOL JEM-1230.....	38
รูปที่ 3.8 เครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) Analyzer รุ่น Nano-series ZX.....	38

รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมอีวีเอ พอลิสไตรีนและมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต.....	39
รูปที่ 3.10 เครื่องปั่นความเร็วสูง.....	40
รูปที่ 3.11 แม่พิมพ์ที่ทำจากแผ่นกระจกขนาด 20 × 20 × 0.15 เซนติเมตร.....	40
รูปที่ 3.12 เครื่องอัดแบบ (compression molding machine) ของบริษัท LAB TECH จำกัด... ..	41
รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM รุ่น Jeol JSM-5410LV).....	41
รูปที่ 3.14 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD LR 100K.....	42
รูปที่ 3.15 เครื่อง XRD ของ Bruker รุ่น AXS Model D8 Discover.....	43
รูปที่ 3.16 เครื่อง Thermogravimetric analyzer ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851°	44
รูปที่ 3.17 เครื่อง Dynamic mechanical analyzer ของ METTLER TOLEDO รุ่น 861°	44
รูปที่ 4.1 พอลิสไตรีนนาโนเลทเท็กซ์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครมิลชัน.....	45
รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดของพอลิสไตรีนที่มีอนุภาคนาโนเมตรที่สังเคราะห์ จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครมิลชัน.....	46
รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของพอลิสไตรีนที่รวมตัวกันเป็นทรงกลม.....	47
รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของ (a) อีวีเอบริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ผสมของ (b) 70EVA/30PS, (c) 80EVA/20PS และ (d) 90EVA/10PS.....	48
รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของนาโนคอมพอสิตของ (a) 70EVA/30PS/1MMT, (b) 70EVA/30PS/3MMT, (c) 70EVA/30PS/5MMT, (d) 80EVA/20PS/1MMT, (e) 80EVA/20PS/3MMT, (f) 80EVA/20PS/5MMT, (g) 90EVA/10PS/1MMT, (h) 90EVA/10PS/3MMT และ (i) 90EVA/10PS/5MMT.....	49
รูปที่ 4.6 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (อีวีเอ/พอลิสไตรีน) และพอลิเมอร์ผสม นาโนคอมพอสิต (อีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์).....	50
รูปที่ 4.7 ยัสมอดุลล์ของพอลิเมอร์ผสม (อีวีเอ/พอลิสไตรีน) และพอลิเมอร์ผสม นาโนคอมพอสิต (อีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์).....	51

รูปที่ 4.8	เปอร์เซ็นต์การยึดตัวของพอลิเมอร์ผสม (อีวีเอ/พอลิสไตรีน) และพอลิเมอร์ผสม นาโนคอมพอสิต (อีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์)	52
รูปที่ 4.9	กราฟ XRD ของ (a-c) มอนต์มอริลโลไนต์ และอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมอีวีเอ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 70/30, 80/20 และ 90/10.....	54
รูปที่ 4.10	ร้อยละการสลายตัวเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิต	56
รูปที่ 4.11	มอดุลัสสะสมเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิต.....	60
รูปที่ 4.12	ค่า $\tan \delta$ เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิต.....	62

บทที่ 1

บทนำ

พอลิเมอร์ผสม (polymer blends) และพอลิเมอร์คอมพอสิต (polymer composites) เป็นวัสดุที่สามารถปรับปรุงสมบัติ ลดต้นทุนการผลิต เพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ และขยายการใช้งานของวัสดุ หากแต่ปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตกำลังได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติการสกัดกันได้ถูกปรับปรุงด้วยการเติมฟิลเลอร์ที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรในปริมาณเล็กน้อย (ปกติไม่เกิน 5 % โดยน้ำหนัก) โดยมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) เป็นสารอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยชั้นซิลิเกต (layer silicates) ที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตร ได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต (polymer nanocomposites) เพราะมีอยู่เป็นปริมาณมากในธรรมชาติ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และราคาถูก เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์มีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นซิลิเกตขยายกว้างขึ้นเมื่อแช่อยู่ในน้ำ ดังนั้น สายโซ่พอลิเมอร์ที่อยู่ในเลททิซที่มีน้ำเป็นตัวกลางอาจแทรกเข้าไประหว่างชั้นซิลิเกตภายใต้การปั่นกววนอย่างรุนแรงโดยไม่จำเป็นต้องทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ให้เป็นออร์แกโนเคลย์ ซึ่งงานวิจัยนี้จะเตรียมนาโนคอมพอสิตของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเอทิลีนไวนิลแอลกอฮอล์โคพอลิเมอร์ (อีวีเอ) และพอลิสไตรีนที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรที่เติมแต่งด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ภายใต้ภาวะที่เป็นเลททิซหรืออิมัลชันเพื่อศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลพลวัต สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ โดยอีวีเอเป็นวัสดุที่ปราศจากฮาโลเจน (zero-halogen material) ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณของไวนิลแอลกอฮอล์ (VA) ที่มีอยู่ในโคพอลิเมอร์ โดยสามารถใช้งานในลักษณะเป็นยาง (VA = 40-45%) เทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (VA = 28-33%) และพลาสติก (VA = 9-18%) ในการทำเป็นพื้นรองเท้าชั้นกลาง (midsole) อุปกรณ์ทางการแพทย์ชนิดใช้ครั้งเดียว ของเด็กเล่น กาวหลอมด้วยความร้อน (hot melt adhesives) ฟิล์มหด (shrink film) เทปกาว และฉนวนหุ้มสายเคเบิล เป็นต้น ในขณะที่พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานอย่างกว้างในทางการค้าที่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีความคงรูปสูง แต่มีความเปราะที่จำกัดการใช้งาน การผสมอีวีเอกับพอลิสไตรีนที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรและมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณเล็กน้อย จะส่งผลให้น้ำหนักและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนไปอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยสมบัติของอีวีเออาจได้รับการปรับปรุงจากอนุภาคขนาดนาโนของสารอินทรีย์ (พอลิสไตรีน) และสารอนินทรีย์ (มอนต์มอริลโลไนต์) การสังเคราะห์อิมัลชันของพอลิสไตรีนที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรโดยทั่วไปใช้กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน (microemulsion polymerization) หากแต่จะมีข้อเสียหลายประการ ได้แก่ การใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant) จำนวนมาก ปริมาณพอลิสไตรีน

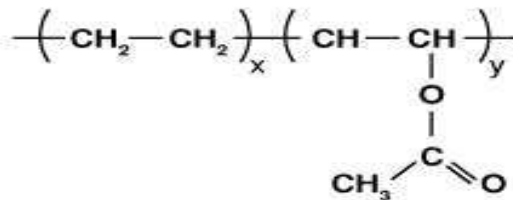
ในเลเท็กซ์ที่เตรียมได้มีค่าต่ำ (< 10% โดยน้ำหนัก) และอนุภาคของพอลิสไตรีนมีการกระจายขนาดที่กว้าง ซึ่งการใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณมากทำให้ไม่ได้รับการพัฒนาสูงสุดสาหรรม เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวมีราคาแพง สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารลดแรงตึงผิวออกจากระบบภายหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา และสารลดแรงตึงผิวที่ตกค้างมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติต่ำลง โดยงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน (differential microemulsion polymerization) สังเคราะห์พอลิสไตรีนที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตร โดยการใช้อะโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (azobisisobutyronitrile, AIBN) และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) เป็นสารเริ่มปฏิกิริยา (initiation) และสารลดแรงตึงผิว ตามลำดับในระบบของการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันจะประกอบด้วยตัวกลาง (น้ำ) สารลดแรงตึงผิว และสารเริ่มปฏิกิริยาผสมอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อให้ความร้อนแก่ระบบจนถึงอุณหภูมิที่สามารถเกิดพอลิเมอร์ได้แล้ว จึงเริ่มหยดสไตรีนมอนอเมอร์ลงไปทีละหยดด้วยระยะเวลาอันสั้น การทำเช่นนี้จะสามารถจำกัดการเติบโตของอนุภาคพอลิเมอร์ได้ และสามารถคงอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวและมอนอเมอร์ให้สูงได้เป็นเวลานาน ทำให้ใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่ต่ำกว่า และให้เปอร์เซ็นต์ผลได้ (%yield) ที่สูงกว่ากระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน งานวิจัยนี้คาดหวังว่านาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จะได้รับการปรับปรุงทั้งสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลพลวัต และสมบัติทางความร้อน

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 เอทิลีนไวนิลแอสีเทตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) [1-3]

เอทิลีนไวนิลแอสีเทตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer) หรืออีวีเอ (EVA) คือ โคพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบบัลก์ต่อเนื่อง (continuous bulk) หรือแบบสารละลาย (solution) ระหว่างเอทิลีนมอนอเมอร์ (ethylene monomer) กับไวนิลแอสีเทตมอนอเมอร์ (vinyl acetate monomer) ซึ่งไวนิลแอสีเทตจะจัดเรียงตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ โดยปกติอีวีเอที่นำมาใช้งานจะมีปริมาณของไวนิลแอสีเทตอยู่ในช่วง 2-50% และมีค่าดัชนีการไหล (melt index, MI) อยู่ที่ 5-25 กรัม/10 นาที โดยมีการจัดกลุ่มของอีวีเอตามปริมาณของไวนิลแอสีเทตที่อยู่ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ ดังนี้ ถ้ามีปริมาณไวนิลแอสีเทตอยู่ในช่วง 9-18% จะจัดอยู่ในกลุ่มของพลาสติก (plastics) ถ้ามีอยู่ในช่วง 28-33% จะจัดอยู่ในกลุ่มเทอร์โมพลาสติกอิลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomers) และถ้ามีถึง 45% จะจัดอยู่ในกลุ่มของยาง (rubbers) โดยมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของอีวีเอ

อีวีเอเป็นผลงานการวิจัยของบริษัทดูปองต์ (DuPont) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้รับการจดสิทธิบัตรตั้งตั้งแต่ปี ค.ศ.1956 และถูกผลิตออกสู่ตลาดในปี ค.ศ.1960 ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า เอลเว็กซ์ (Elvax) ปัจจุบันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ กาว และพื้นรองเท้า เป็นต้น

สมบัติของอีวีเอขึ้นกับปริมาณไวนิลแอสีเทตที่อยู่ในโคพอลิเมอร์ ถ้าปริมาณไวนิลแอสีเทตเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสม่ำเสมอของโครงสร้างลดลง ซึ่งมีผลให้ความเป็นผลึกลดลง และถ้ามี

ปริมาณไวนิลแอซีเตตต่ำ (7-8 mole%) อีวีเอจะมีลักษณะคล้ายพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ถูกดัดแปร (modified low density of polyethylene) และถ้ามีปริมาณไวนิลแอซีเตต (10-15 mole%) จะมีความยืดหยุ่นคล้ายพลาสติกไฮดรอกซี (plasticized PVC) คือ มีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นโดยไม่จำเป็นต้องใส่พลาสติกไฮดรอกซี ซึ่งอาจเป็นข้อดีในการใช้งานบางอย่าง เพราะความยืดหยุ่นจะไม่ขึ้นกับพลาสติกไฮดรอกซีที่อาจสูญเสียไประหว่างการใช้งาน สำหรับอีวีเอที่มีปริมาณของไวนิลแอซีเตตประมาณ 11 ร้อยละโดยโมล อาจถูกใช้เป็นสารเติมแต่งใน hot melt coating และ adhesive

ยางอีวีเอจะมีปริมาณไวนิลแอซีเตตอยู่ 40-70 ร้อยละโดยโมล เนื่องจากสายโซ่ของยางอีวีเอมีความอิมัลชันบวกรวม จึงทำให้ยางชนิดนี้ทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และสภาพดินฟ้าอากาศได้เป็นอย่างดี (สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องในอุณหภูมิสูงถึง 125 องศาเซลเซียส) ส่วนหมู่แอซีเตตซึ่งมีความเป็นขี้ผึ้ง จะทำให้ยางมีความทนทานต่อน้ำมันและตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งได้ดี แต่ยางอีวีเอมีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี และเนื่องจากยางมีความเป็นขี้ผึ้ง จึงมีสมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้าไม่ดี ส่วนใหญ่จะใช้ในการผลิตปลอกหุ้มสายเคเบิลเฉพาะกรณีที่ต้องการสมบัติพิเศษด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน สภาพอากาศ ความร้อน และน้ำมันเท่านั้น และเนื่องจากสายโซ่หลักของยางอีวีเอเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงไม่สามารถทำให้คงรูปได้ด้วยกำมะถัน แต่สามารถคงรูปได้ด้วยสารเปอร์ออกไซด์ และการเลือกใช้สารตัวเติม สารทำให้ยางนิ่ม และสารช่วยในกระบวนการผลิต ควรทำด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากสารตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นกรด หรือสารประกอบที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลสามารถรบกวนการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ เนื่องจากยางอีวีเอมีความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศสูง จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไป แต่ในกรณีที่ต้องการนำยางคงรูปไปใช้ที่อุณหภูมิสูงมากๆ ก็อาจเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพลงไปได้ ส่วนสารทำให้ยางนิ่มที่นิยมใช้กับยางชนิดนี้ ได้แก่ น้ำมันพาราฟินิกที่ระเหยได้ต่ำ หรือน้ำมันในกลุ่มเอสเทอร์ นอกจากการคงรูปด้วยระบบเปอร์ออกไซด์แล้ว ยังสามารถทำให้คงรูปได้ด้วยการฉายรังสีที่มีพลังงานสูง

นอกจากนี้ สมบัติของยางยังขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลอีกด้วย โดยอีวีเอที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะมีความเหนียวต่ำ จึงง่ายต่อการผลิตหรือขึ้นรูป ส่วนอีวีเอที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะเหมาะกับงานยึดติดที่ต้องการความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง และยืดหยุ่นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ การขึ้นรูปอีวีเอทำได้หลายวิธี ได้แก่ การอัดแบบ (compression molding) การฉีดแบบ (injection molding) และการอัดรีด (extrusion) ให้เป็นแผ่นแล้วใช้บล็อกมีดตัดให้มีรูปร่างตามต้องการ

ปัจจุบันมีการนำอีวีเอมาใช้งานหลากหลายมากขึ้น เนื่องจากมีสมบัติที่ดี ดังนี้

- มีราคาถูก
- มีความทนแรงกระแทก (impact strength) สูง
- ชิ้นงานของอีวีเอมีลักษณะใส หรือสีขาวง่ายต่อการให้สี
- มีความยืดหยุ่นและทนต่อการโค้งงอได้ดี
- สามารถละลายได้มากขึ้นเมื่อมีปริมาณไวนิลเอซีเทตเพิ่มขึ้น
- สามารถต้านการซึมผ่านของน้ำและเกลือได้ดี ซึ่งความสามารถในการซึมผ่านจะน้อยลงถ้ามีปริมาณไวนิลเอซีเทตเพิ่มขึ้น
- มีความต้านทานสภาวะแวดล้อมได้ดี
- สามารถต้านทานการเกิดรอยแตกได้ดี
- สามารถต้านทานแสง UV และโอโซนได้ดี
- ไม่มีกลิ่น ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ เพราะสามารถปิดผนึกได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และสามารถสัมผัสอาหารได้ตามกฎของ FDA
- สามารถทำการเชื่อมโยงข้าม (crosslinking) ได้ ทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี
- อีวีเอมีความเป็นขั้วสูงจากหมู่เอซีเทต ทำให้ทนน้ำมัน (oil resistance) และสามารถยึดเกาะกับวัสดุอื่น และมีความแข็งแรงยึดเกาะที่ดี

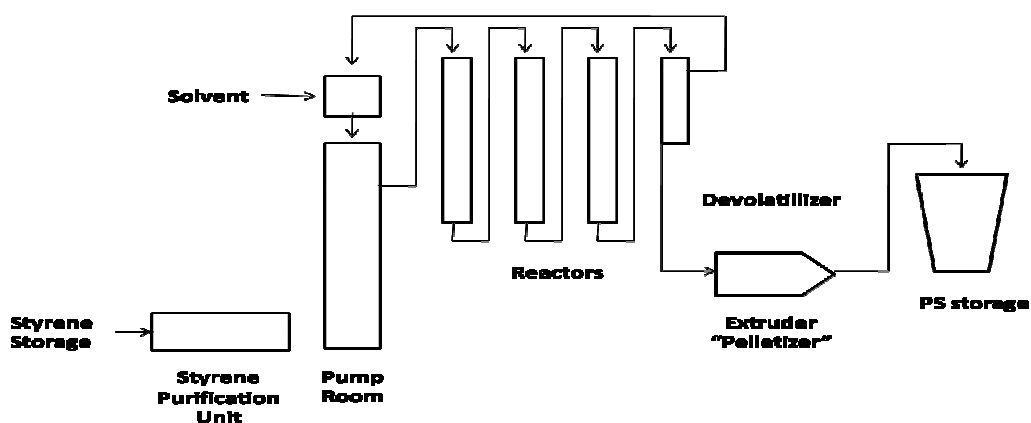
2.2 พอลิสไตรีน (Polystyrene) [4,5]

พอลิสไตรีนเป็นเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากการสังเคราะห์สไตรีนมอนอเมอร์ด้วยวิธีการเกิดพอลิเมอร์แบบรวมตัว (addition polymerization) ได้เป็นพอลิสไตรีนชนิดใช้งานทั่วไป (general purpose polystyrene, GPPS) ถูกผลิตขึ้นครั้งแรกโดยบริษัท I.G. Farbenindustrie ประเทศเยอรมัน และบริษัท Dow chemical ประเทศสหรัฐอเมริกา การนำพอลิสไตรีนมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ได้รับความนิยมมานานแล้ว เนื่องจากขึ้นรูปง่าย และมีความใส ทำให้มองเห็นผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ได้ชัดเจน

พอลิสไตรีนมีความโปร่งใส แข็งแต่เปราะ ไม่ดูดความชื้น ไม่นำไฟฟ้า เชื่อยต่อสารเคมี ทนกรด ทนด่าง ผสมสีได้ง่าย ทั้งยังขึ้นรูปได้ง่าย ทนความร้อนได้ต่ำ และละลายได้ดีในตัวทำละลายอะโรมาติก เช่น เบนซีน และโทลูอีน เป็นต้น จัดเป็นพลาสติกที่มีน้ำหนักเบาที่สุดในพลาสติกชนิดแข็ง สามารถเกิดเป็นโคพอลิเมอร์ได้ง่าย เช่น SBR SAN และ ABS เป็นต้น

2.2.1 การเตรียมมอนอเมอร์ [4]

อุตสาหกรรมการเตรียมสไตรีนมอนอเมอร์จากเบนซีนมีดังนี้



ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในขั้นตอนดีไฮโดรจิเนชัน (ขั้นตอนที่ 2) อาจเป็นออกไซด์ของโลหะ เช่น Cr_2O_3 , Cu_2O และ K_2O เป็นต้น สไตรีนที่ได้สามารถแยกออกจากเอทิลเบนซีน และทำให้บริสุทธิ์โดยการกลั่นแบบลำดับส่วน และลดความดัน อีกทั้งมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะตัวคล้ายกลิ่นกระเทียม และมีจุดเดือด 145 องศาเซลเซียส

2.2.2 พอลิเมอไรเซชัน [5]

การสังเคราะห์พอลิสไตรีนมีได้ทั้งแบบบัลก์ แบบสารละลาย แบบแขวนลอย และแบบอิมัลชัน

พอลิเมอไรเซชันแบบบัลก์ (Bulk polymerization)

เป็นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่ประกอบด้วยสไตรีนมอนอเมอร์ สารเริ่มต้นปฏิกิริยา ประเภทเปอร์ออกไซด์ และอาจเติมตัวทำละลายลงไปเล็กน้อย ในระหว่างการเตรียมอาจเกิดจุดร้อน (hot spot) ในเครื่องปฏิกรณ์ เป็นผลให้พอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สม่ำเสมอ หรือเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ทรมมส์ดอร์ฟ” (Trommsdorf) ดังนั้น จึงแก้ปัญหาดังกล่าวโดยแบ่งขั้นตอนการสังเคราะห์เป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรก เรียกว่า ขั้นพรีพอลิเมอไรเซชัน (prepolymerization) ซึ่งสไตรีนมอนอเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาด้วยความร้อน (thermal polymerization) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน โดยปฏิกิริยาดำเนินไป 33-35% และภายในเครื่องปฏิกรณ์จะประกอบด้วยสายโซ่พอลิเมอร์สั้นๆ และมอนอเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยา ในขั้นที่สอง ของผลที่ได้จากขั้นแรกจะถูกถ่ายไป

ยังหอบปฏิริยาซึ่งสูงประมาณ 25 ฟุต ในหอบปฏิริยาดังกล่าวของเหลวจะไหลจากด้านบนลงด้านล่าง ซึ่งแต่ละตอนของหอบจากบนสู่ล่างนั้นมีช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 110-180 องศาเซลเซียส ส่วนตรงกลางหอบมีอุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส และส่วนด้านล่างสุดของหอบมีอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เพื่อให้ปฏิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ และอีกเหตุผลหนึ่ง คือ เพื่อไล่มอนอเมอร์ที่เหลือติดมากับพอลิเมอร์ออก ส่วนพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะถูกผ่านเข้าสู่เครื่องอัดรีดเพื่อทำเป็นเม็ดพอลิสไตรีนต่อไป

พอลิเมอไรเซชันแบบละลาย (Solution polymerization)

เป็นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่แก้ปัญหาค่าการเตรียมพอลิสไตรีนแบบบัลก์ที่มีปัญหาเรื่องการถ่ายเทความร้อนขณะที่ปฏิริยาดำเนินไป และความหนืดที่สูงขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ควบคุมการผลิตได้ยาก อีกทั้งน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งการเตรียมพอลิสไตรีนแบบสารละลายประกอบด้วยสไตรีนมอนอเมอร์ สารเริ่มต้นปฏิริยา ตัวทำละลาย และสารถ่ายโอนสายโซ่ (chain transfer agent) ตัวทำละลายส่วนใหญ่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีจุดเดือดปานกลาง เช่น โทลูอีน และ ไซโคลเฮกเซน เป็นต้น

การเตรียมพอลิสไตรีนแบบสารละลายจะได้พอลิสไตรีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสม่ำเสมอ แต่ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง เนื่องจากราคาของตัวทำละลายและค่าใช้จ่ายในการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ค่อนข้างสูง ดังนั้น กระบวนการนี้จึงไม่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ แต่จะใช้ในห้องปฏิบัติการมากกว่า

พอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย (Suspension polymerization)

การสังเคราะห์พอลิสไตรีนด้วยกระบวนการแบบสารละลาย มีข้อจำกัดเรื่องค่าใช้จ่ายของตัวทำละลาย ซึ่งตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิดมีค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำ เพราะมีค่าความจุความร้อนต่ำ ส่วน “น้ำ” เป็นตัวทำละลายที่มีจุดเดือดและค่าความจุความร้อนสูง และที่สำคัญ คือ ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้น จึงเหมาะที่จะใช้เป็นตัวทำละลายในการเตรียมพอลิสไตรีน แต่น้ำเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วสูง ไม่สามารถละลายสไตรีนมอนอเมอร์และพอลิสไตรีนได้ ดังนั้น จึงมีการผสมผสานระหว่างการพอลิเมอไรเซชันแบบบัลก์และแบบสารละลายเข้าด้วยกัน ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการแบบแขวนลอย โดยสไตรีนมอนอเมอร์และสารเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารเริ่มต้นปฏิริยาจะกระจายเป็นเม็ดเล็กๆ แขวนลอยอยู่ในน้ำ ด้วยการใส่ไบพัตตี และสารช่วยการกระจาย (dispersant) หรือสารเพิ่มเสถียรภาพ (stabilizer) โดยสารทั้งสองจะหุ้มเม็ดสไตรีนเพื่อป้องกันการรวมตัว ซึ่งภายในเม็ดสไตรีน มอนอเมอร์ที่แขวนลอยจะเสมือนเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (micro

reactor) และจะมีการถ่ายโอนความร้อนดีกว่ากระบวนการแบบสารละลาย โดยทั่วไปนิยมใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารช่วยกระจาย ซึ่งลักษณะและขนาดของเม็ดพอลิสไตรีนที่เตรียมได้จะถูกควบคุมด้วยความเร็วของการกวน และอัตราส่วนโดยปริมาตรของสไตรีนมอนอเมอร์และน้ำที่เติมเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์

ข้อเสียของการเตรียมพอลิสไตรีนด้วยกระบวนการแบบแขวนลอย คือ ปริมาณเม็ดพอลิสไตรีนที่เตรียมได้ต่อครั้งค่อนข้างน้อย เนื่องจากปริมาตรส่วนใหญ่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็นน้ำ (70%) และเม็ดพอลิสไตรีนที่ได้มีความชื้นสูง จึงต้องนำไปอบก่อนใช้งาน บางครั้งการอบด้วยความร้อนสูงอาจทำให้เม็ดพอลิสไตรีนเปลี่ยนสีได้ ซึ่งปกติวิธีนี้นิยมใช้เตรียมโฟมพอลิสไตรีน (expandable polystyrene, EPS) เป็นส่วนใหญ่ เพราะสามารถเติมสารฟู่ (blowing agent) เข้าไปในระหว่างการผลิตได้

พอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization)

การเตรียมพอลิสไตรีนด้วยกระบวนการแบบอิมัลชัน จะมีวิธีและหลักการคล้ายกระบวนการแบบแขวนลอย ต่างกันตรงที่สารเริ่มต้นปฏิกิริยาจะละลายอยู่ในน้ำซึ่งเป็นตัวกลางสำหรับการกระจาย ดังนั้น สารเริ่มต้นปฏิกิริยาที่นิยมใช้ คือ $K_2S_2O_8$ (potassium persulfate) โดยเม็ดสไตรีนจะแขวนลอยอยู่ในน้ำในลักษณะของคอลลอยด์ และมีสารประเภทสบู่ทำหน้าที่เป็นอิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) ป้องกันไม่ให้เม็ดสไตรีนกลับมารวมตัวกัน

2.2.3 สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ [4]

พอลิสไตรีนมีความหนาแน่น $1.04-1.06 \text{ g/cm}^3$ มีโครงสร้างเป็นแบบอะแทกติก และมีความเป็นอสัณฐาน (amorphous) หรือไม่มีความเป็นผลึกเลย พอลิสไตรีนที่มีโครงสร้างแบบไอโซแทกติกสามารถเตรียมได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตา เช่น n-butyllithium แต่สมบัติไม่มีอะไรเหนือกว่าโครงสร้างแบบอะแทกติกมากนัก ดังนั้น จึงไม่มีการผลิตพอลิสไตรีนที่เป็นแบบไอโซแทกติกในเชิงพาณิชย์

พอลิสไตรีนสามารถละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิด ได้แก่ ตัวทำละลายประเภทอะโรแมติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีน และโทลูอีน เป็นต้น ตัวทำละลายประเภทไฮโดรคาร์บอนที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) คลอโรฟอร์ม ($CHCl_3$) ไตรคลอโรเอทิลีน ($CHCl=CCl_2$) คลอโรเบนซีน (Ar-Cl) และ 1,2-ไดคลอโรเบนซีน (Ar-2Cl) เป็นต้น ตัวทำละลายจำพวกคีโตน เช่น เมทิลเอทิลคีโตน ($CH_3CH_2COCH_3$) แต่ไม่ละลายในอะซีโตน และ

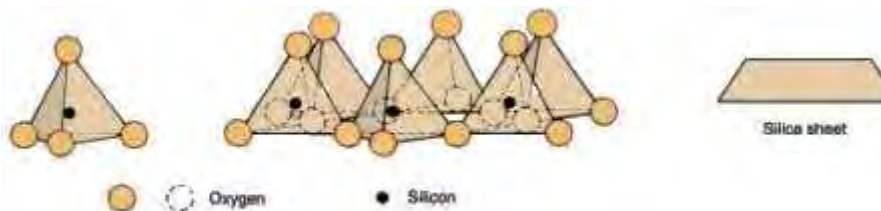
ตัวทำละลายจำพวกเอสเตอ์ เช่น เอทิลอะซิเตต ($\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$) แต่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว เช่น เฮกเซน และเฮปเทน เป็นต้น

พอลิสไตรีนมีสมบัติเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไปเช่นเดียวกับไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์อื่นๆ แต่สามารถทนกรดแก่ และเบสแก่ทั่วไปได้ดี อีกทั้งสามารถทนกรดเฮไลต์ ตัวออกซิไดซ์ และตัวรีดิวซ์ทั่วไป อย่างไรก็ตาม สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์นี้จะลดลงถ้าพอลิเมอร์สัมผัสกับแสงแดด ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานๆ (เช่น อาจเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและเกิดรอยแตกได้)

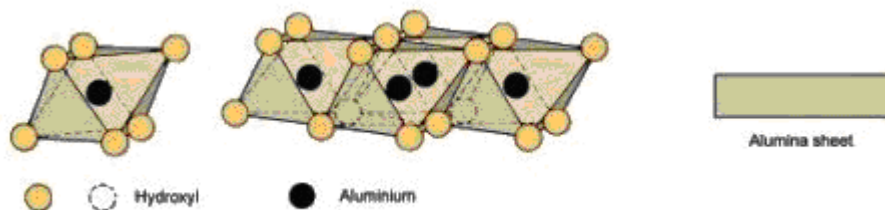
สมบัติของพอลิสไตรีนที่ทำให้ได้รับความสนใจในเชิงการค้า คือ ขึ้นรูปง่าย โดยเฉพาะด้วยการฉีดแบบ และพอลิสไตรีนหลังการเติมสาร เช่น พลาสติกไซเซออร์ แอนติออกซิแดนต์ สารเพิ่มเสถียรภาพที่เหมาะสมแล้ว จะสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์มากมาย เช่น เป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า ด้ามปากกา ลูกคลื่น ไม้บรรทัด ภาชนะ ขวดบรรจุอาหาร ของเด็กเล่น และโฟม เป็นต้น

2.3 แร่ดิน (clay) [6-9]

แร่ดินประกอบด้วยแร่ธาตุหลายชนิดขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด โดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบจำพวกไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrous aluminous silicate) มีสมบัติ plasticity เมื่อผสมกับน้ำ และเมื่อนำไปอบแห้งจะเปราะ โดย plasticity ของแร่ดินขึ้นกับธรรมชาติ และความละเอียดของแร่ดิน ถ้าละเอียดมากจะมี plasticity สูง ซึ่งแร่ดินที่นำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์ และนาโนคอมพอสิต เป็นแร่ที่มีจุดเด่น คือ มีโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่น (sheet silicate) เรียงซ้อนกันจัดอยู่ในพวกฟิลโลซิลิเกต (phyllosilicate) ประกอบด้วยชั้นของซิลิกาเตตระฮีดรัล (silica-tetrahedral) และอะลูมินาออกตะฮีดรัล (alumina-octahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ และในระหว่างชั้นรอยต่อของชุด (interlayer) อาจมีไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโพแทสเซียม เป็นต้น หรือโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ ทำให้มีความ



รูปที่ 2.2 ชั้นของซิลิกาเตตระฮีดรัล (silica tetrahedral)



รูปที่ 2.3 ชั้นของอะลูมินาออกตะฮีดรัล (alumina-octahedral)

ยึดหยุ่น และมีความเป็นขั้วที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม โดยแร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีกหลายแบบขึ้นอยู่กับปริมาณ ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ ชนิดโครงสร้างผลึก หรืออัญรูป เป็นต้น กลุ่มแร่ดินที่สำคัญ ได้แก่ อิลไลต์ (illite) เกาลินไนต์ (kaolinite) สเมคไทต์ (smectite) และเวอร์มิคิวไลต์ (vermiculite) ยกเว้นแอตตาปุลไกต์ (attapulgite) หรือรู้จักในนามปาลิโกรซไกต์ (palygorskite) มีโครงสร้างต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ (chain silicate) แร่ดินในธรรมชาติสามารถแบ่งแยกตามโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มเกาลินไนต์ (Kaolinite group)

สูตรเคมีทั่วไป คือ $2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 1:1 ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรัล 1 ชั้น จับยึดกับแผ่นอะลูมินาออกตะฮีดรัล 1 ชั้น และวางซ้อนกันขึ้นไปตามแนวแกน c และแต่ละแผ่นของอะลูมินาออกตะฮีดรัล และซิลิกาเตตระฮีดรัลจับยึดต่อเนื่องไปตามแนวนอนที่เรียกว่าแกน a และ b เกาลินไนต์มีรูปผลึกแบบไตรคลินิก (triclinic) แร่ในกลุ่มนี้ได้แก่ เกาลินไนต์ (kaolinite) ดิกไกต์ (dickite) นาโคริต์ (nacrite) แฮลลอยไซต์ (halloysite) และแอลโลเฟน (allophane) โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

- ไม่มีการแทนที่ของธาตุภายในโครงสร้างหรือมีน้อยมาก ซึ่งเป็นผลทำให้มีประจุถาวรต่ำ (low permanent charge)
- ผลึกแต่ละหน่วย (crystal unit) ยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างชั้น (inter-layer) มีผลทำให้แร่ดินเหนียวซิลิเกตมีการบวมตัวและหดตัว (swelling and shrinking) น้อยมาก
- ขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับแร่ดินเหนียวชนิดอื่น เนื่องจากว่ามีหน่วยที่ยึดซ้อนกันค่อนข้างมาก ทำให้แร่ดินเหนียวกลุ่มนี้มีขนาด 0.1-5.0 ไมครอน แต่ส่วนใหญ่มี

ขนาด 0.2-2.0 ไมครอน เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่จึงทำให้มีพื้นที่ผิวภายนอก (external surface) น้อย และพื้นที่ผิวภายใน (internal surface) มีน้อยมากหรือไม่มีเลย

- มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity: CEC) ต่ำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยและมีประจุลบในผลึกน้อยมาก CEC มีค่า 3–15 มิลลิสมมูลย์ (milliequivalent, meq)/100 กรัม

กลุ่มแร่อิลไลต์ (Illite group)

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

- ประมาณ 15–25 เปอร์เซ็นต์ ของ Si^{+4} ในชั้นเตตระฮีดรอลจะถูกแทนที่ด้วย Al^{+3} จึงทำให้เกิดประจุลบที่ถาวร (permanent negative charge) ปริมาณมากในชั้นเตตระฮีดรอล
- ประจุลบที่เกิดในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิกेटจะถูกทำให้สมดุลด้วย K^+ ที่มีขนาดพอเหมาะกับช่องว่างนั้น
- มีแรงดึงดูดสูงสุดตามกฎของ Coulomb ที่เกิดขึ้นระหว่างประจุลบในชั้นเตตระฮีดรอล และ K^+ ที่อยู่ใกล้กัน
- เป็นพวกที่ไม่สามารถขยายตัวได้ เนื่องจาก K^+ เปรียบเสมือนสลักทำหน้าที่ยึดหน่วยผลึกแต่ละหน่วยไว้ด้วยกันค่อนข้างแน่น ซึ่งมีผลทำให้ไม่สามารถยึดเข้าหรือออกได้
- K^+ ไม่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ (unexchangeable) หรือเป็นพวกที่ถูกตรึงไว้ให้อยู่กับที่เท่านั้น (K-fixation)
- มีการบวมตัวและหดตัว พื้นที่ผิวภายในและภายนอก และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกค่อนข้างต่ำ แต่มากกว่าแร่ดินเหนียวกาลินไนต์ [CEC ประมาณ 15–40 มิลลิสมมูลย์ (meq)/100 กรัม]

กลุ่มแร่เวอร์มิคิวไลต์ (vermiculite)

มีสูตรเคมี คือ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot XH_2O$ เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มไมกา ซึ่งเกิดขึ้นคลุมรูปร่างของแร่ไฟลโกไพต์ และไบโอไทต์ และมักมีการแทนที่ซิลิกอนด้วยอะลูมิเนียม ประจุที่ขาดไป

ทำให้เกิดการแทนที่ Mg ด้วย Fe^{3+} และไอออนที่ถูกดูดซับได้ เวอร์มิคิวไลต์แสดงลักษณะหลายอย่างคล้ายมอนต์มอริลโลไนต์ เช่น การแลกเปลี่ยนไอออนบวก และช่องว่างระหว่างชั้น ซึ่งแปรผันไปตามปริมาณของน้ำที่เป็นองค์ประกอบและชนิดของไอออนบวกที่ถูกดูดซับไว้

ลักษณะพิเศษเฉพาะตัวของเวอร์มิคิวไลต์ คือ สามารถขยายตัวขนานกับแกน c เพิ่มขึ้นได้ถึง 30 เท่า ของปริมาณเดิม เมื่อทำให้น้ำร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงช่วงอุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส ผลจากการขยายตัวนี้ทำให้นำมาใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน พบมากในการสลายตัวของโพลีไพท์ และไบโอไพท์ และพบในดินบางชนิดโดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้ คือ

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

กลุ่มแร่สเมคไทต์ (Smectite group)

มีสูตรเคมี คือ $M_x(Al_{4-x}Mg_x)Si_8O_{20}(OH)_4$ โดย M คือ แคตไอออน (cation) ที่มีส่วนประกอบที่สำคัญของหินชั้น (sedimentary rock) และทราย (sand) เป็นกลุ่มของแร่ดินที่สามารถแสดงการขยายตัว (expandability) เมื่อใส่น้ำหรือโมเลกุลของสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้าง และมีสมบัติแลกเปลี่ยนไอออนบวก แร่ในกลุ่มนี้ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) บีเดลไลต์ (beidellite) และนอนโทรไนต์ (nontronite) แร่พวกนี้มีโครงสร้างแบบแผ่นชนิด 2:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 สามารถใช้ในอุตสาหกรรมอิฐ (brick) เซรามิก (ceramic) และใช้ทำโคลนเจาะ (drilling mud) มีลักษณะแปรผันไปได้มาก เพราะองค์ประกอบแปรผันได้ โดยเฉพาะน้ำ แม้แต่ค่าดัชนีหักเหของแสงยังเปลี่ยนแปลงได้ในพิสัย 1.50-1.64 แร่กลุ่มนี้มีการแทนที่ของอะตอมมาก องค์ประกอบของแร่แปรผันออกไปจากสูตรเคมี มีการแทนที่อะลูมิเนียมโดยแมกนีเซียม และแทนที่ซิลิกอนโดยอะลูมิเนียม ซึ่งทำให้เกิดประจุลบบนชั้นโครงสร้าง ทำให้สามารถดูดซับไอออนบวก เช่น Ca^{2+} , Na^+ และ H_3O^+ ไว้ระหว่างชั้นในโครงสร้างได้ ทำให้แร่ชนิดนี้สามารถพองตัวเมื่อถูกน้ำและ

แลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ ปกติมอนต์มอริลโลไนต์จะเป็นแร่ที่มีอะลูมิเนียมสูง และมีแร่ที่อยู่ในกลุ่มนี้ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่ มีองค์ประกอบแตกต่างกันไปบ้าง คือ นอนโทรไนต์ ซึ่งมีสีเหลืองแกมเขียว มีเหล็กมาก เพราะมีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยเหล็ก ซาไฟไนต์มีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยแมกนีเซียม ซอโคไนต์มีการแทนที่อะลูมิเนียมด้วยสังกะสี และบีเดลไลต์มีการแทนที่ซิลิกอนด้วยอะลูมิเนียม ถ้าถูกน้ำแล้วจับจะลื่นมือเหมือนสบู่ และทำให้เกิดลักษณะเหมือนวุ้นเมื่อแช่น้ำ

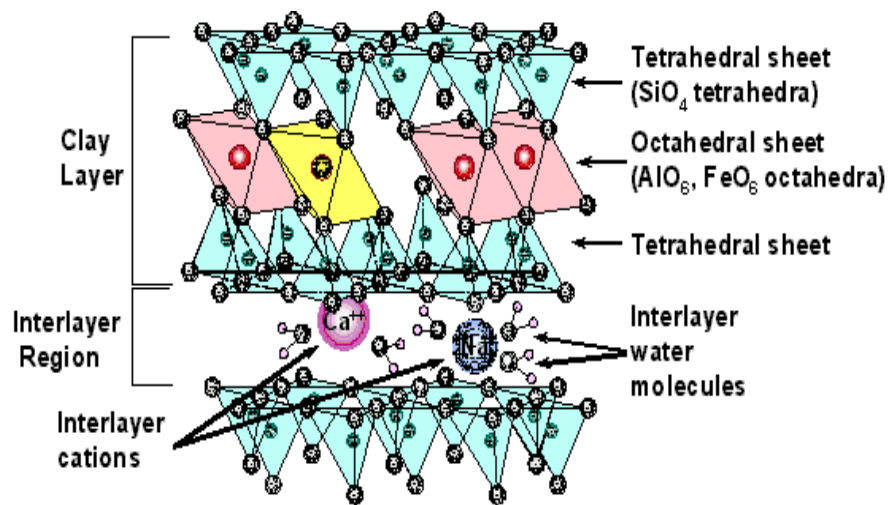
การดุลประจุ (charge balance) เกิดขึ้นจากการแทนที่ของไอออนในชั้นออกตะฮีดรอน (Al หรือ Mg) และชั้นเตตระฮีดรัล โดยส่วนมากใช้ Ca หรือ Na เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ ผลรวมระหว่างความหนาของชั้นดิน และพื้นที่บริเวณระหว่างชั้นของดินแต่ละชุดจะมีความกว้างของช่องว่างเท่าๆ กัน ซึ่งคำนวณจากระนาบ 001 โดยตรวจสอบได้จากเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรชัน (X-ray Diffraction) ค่าระยะห่างระหว่างชั้น (*d*-spacing) ของ silica-alumina-silica 1 ชุดของดินไซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์จะมีค่าตั้งแต่ 9.6-20 อังสตรอม สำหรับดินที่กระจายตัวในน้ำ ตำแหน่งที่มีประจุบวกหรือโมเลกุลของน้ำอยู่จะเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน โดยลักษณะที่สำคัญของแร่กลุ่มนี้คือ

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

2.3.1 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [6-10]

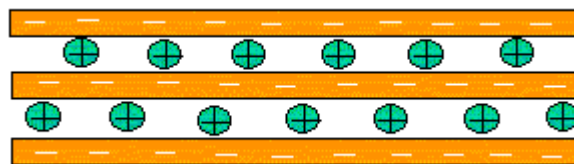
มอนต์มอริลโลไนต์ อยู่ในตระกูลฟิลโลซิลิเกต (phyllosilicate) มีต้นกำเนิดจากฝุ่นภูเขาไฟแหล่งที่พบมากอยู่ในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น ฝรั่งเศส สหราชอาณาจักร คือ $Al_4Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$ เป็น

แร่ดินเหนียวที่สำคัญนำไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์ และนาโนคอมพอลิเมอร์เนื่องจากว่ามีโครงสร้างผลึกเป็นแผ่น หรือชั้นเรียงซ้อนกัน มีลักษณะโครงสร้างชั้นผลึกที่เรียกว่า 2:1 ประกอบด้วยชั้นของอะลูมินาออกไซด์ที่ถูกระบายอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นซิลิกาเตตระฮีดรัล ชั้นผลึกเหล่านี้มีความยืดหยุ่น และมีความเป็นขั้วหรือประจุ โดยแต่ละชั้นมีความหนาประมาณ 0.7-1.0 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (700-800 ตารางเมตรต่อกรัม) [18] และมีความยาวมากกว่าความหนา 200 เท่าระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็ก เรียกว่า แกลเลอรี (gallery) (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [7]

ในช่องว่างระหว่างชั้นซิลิกาเกิดจะมีประจุลัพท์เป็นลบจึงมักจะมีประจุบวกของโซเดียม ไอออน แมกนีเซียม ไอออน อะลูมิเนียม ไอออน หรือแคลเซียม ไอออน เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึกเพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ (ไม่มีประจุ) และจะทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดแน่น (รูปที่ 2.5)



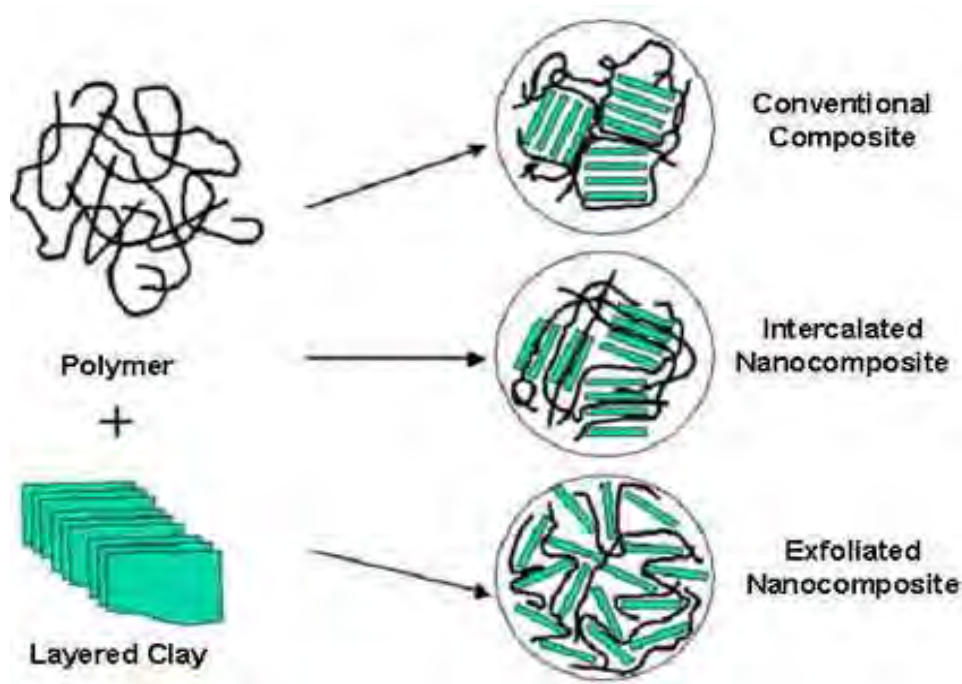
รูปที่ 2.5 การยึดติดกันระหว่างชั้นของดินกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นของดิน [8]

เนื่องจากสมบัติของความมีขั้วจึงทำให้มอนต์มอริลโลไนต์ชอบน้ำ (ความหนาของชั้นผลึกขยายถึง 1.2 นาโนเมตร เมื่อมีความชื้น) และดูดน้ำได้มาก เพราะสามารถขยายตัวได้มาก และถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมอาหาร เคมีภัณฑ์ เครื่องสำอาง เพราะสามารถดูดพิษต่างๆ ได้ดี ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อปรับความหนืด หรือใช้เป็นสารดูดกลิ่น รวมถึงในงานบำบัดน้ำเสีย มอนต์มอริลโลไนต์นิยมใช้เป็นสารเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ เนื่องจากทำให้สมบัติบางอย่างของพอลิเมอร์ดีขึ้น เช่น ความทนแรงดึง (tensile strength) ความทนการดัดโค้ง (flexural strength) และความต้านทานความร้อน (heat resistance) เป็นต้น ซึ่งได้มีการเปิดเผยครั้งแรกโดยทีมงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการบริษัท ผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ในประเทศญี่ปุ่น คือ บริษัทโตโยต้า โดยนำมอนต์มอริลโลไนต์มาเสริมแรงให้กับไนลอน 6 เพื่อผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ [13]

2.4 นาโนคอมพอสิต (Nanocomposites) [11-13]

พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่ได้รับการสนใจเป็นอย่างมากในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ให้มีความแตกต่างจากเดิมได้ โดยการเติมสารจำพวกซิลิเกตที่มีช่องว่างเล็กๆ ระดับนาโนเมตรในปริมาณต่ำ (น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์) โมเลกุลของพอลิเมอร์จะเข้าไปแทรกตัวอยู่บางส่วน และทำให้สมบัติของวัสดุผสมนี้เปลี่ยนไปทั้งสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางแสง ความทนทานสารเคมี ความต้านทานการติดไฟ และสมบัติการกัดกร่อน โดยไม่มีผลทำให้ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเหตุที่มีศักยภาพในการนำวัสดุชนิดนี้ไปใช้ในเชิงประยุกต์จึงทำให้มีความก้าวหน้าในงานวิจัยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งในลักษณะของการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตชนิดใหม่ การพัฒนาสารเจือที่เหมาะสม การวิเคราะห์โครงสร้าง การอธิบายเชิงทฤษฎี รวมทั้งการจำลองแบบโมเลกุลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อให้เกิดความเข้าใจต่อโครงสร้างและสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตมากขึ้น โดยการวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตได้เน้นการพัฒนาวิธีดัดแปรเคลย์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการดัดแปรด้วยสารอินทรีย์เพื่อปรับปรุงให้เกิดโครงสร้างแบบเอกซ์ฟอลิเอต (exfoliate) ระหว่างการผสม และการรวมตัวกับพอลิเมอร์

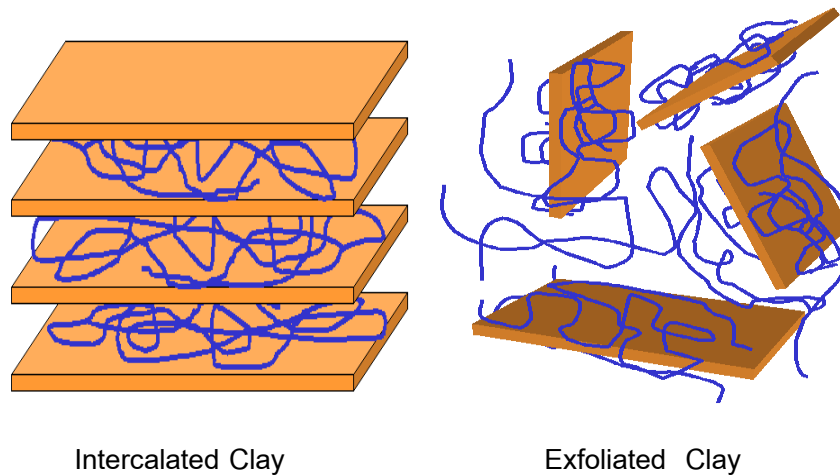
พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตได้พัฒนาสู่การค้าเป็นครั้งแรกโดย Toyota Central R&D laboratory โดยใช้ caprolactam (nylon-clay nanocomposite) [13] เนื่องจากเมื่อได้ผสมพอลิเมอร์กับออร์กาโนเคลย์แล้วทำให้ชั้นซิลิเกตขยายออกจากกัน จึงเรียกว่า พอลิเมอร์เคลย์นาโนคอมพอสิต (polymer-clay nanocomposites) ซึ่งการกระจายตัวของเคลย์ในเนื้อพอลิเมอร์จะแบ่งเป็น 3 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การกระจายตัวของเคลย์ในพอลิเมอร์คอมพอสิต [10]

จากรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์-เคลย์สามารถเกิดเป็นวัสดุคอมพอสิตได้ 3 แบบ ดังนี้

1. **คอมพอสิตแบบทั่วไป (Conventional composites):** โดยอนุภาคของเคลย์จะเกาะกันเป็นกลุ่ม และพอลิเมอร์ไม่มีการแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของเคลย์
2. **อินเทอร์คาลาเลตนาโนคอมพอสิต (Intercalated nanocomposites):** อนุภาคของเคลย์ มีการเกาะกันเป็นกลุ่ม แต่พบว่าระหว่างชั้นของเคลย์มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์สามารถแทรกเข้าไปอยู่ภายในชั้นของเคลย์ โดยไม่ทำให้ชั้นของเคลย์กระจัดกระจาย ซึ่งยังคงสังเกตเห็นว่าเคลย์ยังคงมีการจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ ซ้อนทับกันอยู่ (รูปที่ 2.7)
3. **เอกซ์ฟอลิเอตนาโนคอมพอสิต (Exfoliated nanocomposites):** ชั้นของเคลย์จะกระจายตัวออกจากกันไม่มีโครงสร้างผลึกในแนวแกน c ทำให้ได้นาโนคอมพอสิตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสง แต่มีสมบัติเชิงกล และสมบัติป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ดีอีกด้วย (รูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอินเทอร์คาเลตและเอกซ์โฟลียเอตนาโนคอมพอสิต

2.4.1 ลักษณะสำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต [10]

- มีความใส เพราะอนุภาคขนาดนาโนเมตรจะเล็กกว่าความยาวคลื่นแสง UV-Vis มาก จึงไม่ทำให้แสงเกิดการกระเจิง ไม่เกิดความขุ่น ไม่ทึบแสง แต่จะโปร่งใส
- มีความแข็งแรง โมดูลัสสูงขึ้น เนื่องจากความแข็งของชั้นซิลิเกต
- มีสมบัติสกัดกั้นการซึมผ่านของแก๊ส เนื่องจากอนุภาคเคลย์ที่กระจายอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์มีพื้นผิวและมี aspect ratio สูง ทำให้ระยะทางการเคลื่อนของแก๊สเพิ่มมากขึ้น
- ทนความร้อนสูงได้ดี เพราะซิลิเกตเป็นฉนวนที่ดี การเผาไหม้ทำให้เกิดถ่าน (char) ปกคลุมที่ผิวหน้า จึงไม่ลามไฟ และไฟดับรวดเร็ว
- เมื่อผสมในพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้ จะทำให้นำไฟฟ้าหรืออิเล็กทรอนิกส์ได้ดีขึ้น เพราะจำกัดการจัดตัวของโมเลกุลให้อยู่ในภาวะที่เอื้อต่อการนำไฟฟ้า เช่น สายโซ่โมเลกุลจะถูกยึดออกมากกว่าจะขดตัวทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสะดวกขึ้น

2.4.2 ผลิตภัณฑ์สำคัญของพอลิเมอร์-เคลย์นาโนคอมพอสิต [10]

- ชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งให้ความแข็งแรง คงทน และทนไฟ
- สีพ่นรถยนต์ ให้ความคงทนมากขึ้น
- แผ่นฟิล์มกันออกซิเจนในขวดยา/อาหาร อาหารกระป๋อง ป้องกันอาหาร

เสื่อมสภาพ

- ขวดน้ำอัดลม เบียร์ ป้องกันการสูญเสียแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัดไว้
- ลูกเทนนิส ลูกบอลล ป้องกันการสูญเสียแก๊สภายในลูกบอลล ลูกเทนนิส

2.4.3 แนวโน้มการพัฒนานาโนเคลย์ และพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต [9]

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

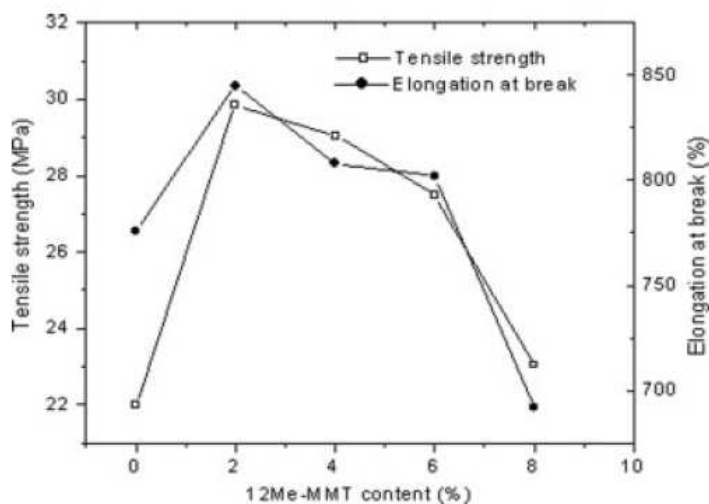
1. ชิ้นส่วนรถยนต์ ในปี 2004 บริษัทผู้ผลิตรถยนต์รายใหญ่ของโลกต่างประกาศว่าจะนำชิ้นส่วนที่ผลิตจากพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตมาใช้ในรถยนต์ เชื่อว่าในอนาคตสามารถผลิตรถยนต์ทั้งคันที่ทำจากนาโนคอมพอสิตได้ ซึ่งมีความปลอดภัยสูง โดยเฉพาะจาก ไฟไหม้ ชะลอความสูญเสีย โดยทนความร้อนสูงขึ้น และลดการลามไฟ
2. ผลิตภัณฑ์การแพทย์ ได้แก่ ชิ้นส่วนที่ต้องทนน้ำ ด้านการซึมผ่านของแก๊ส เช่น เครื่องมือแพทย์ และชิ้นส่วนลิ้นหัวใจเทียม
3. ผลิตภัณฑ์สำหรับอาหารและยา ได้แก่ ฟิล์มป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน และแก๊สต่างๆ และขวดน้ำอัดลม

ประเทศไทย : มีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย

1. อุตสาหกรรมยานยนต์: ชิ้นส่วนรถยนต์
2. ผลิตภัณฑ์การแพทย์: สารคอมพอสิตอุดฟัน สายยางหรือท่อต่างๆ
3. ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาตินาโนคอมพอสิต: ปะเก็นล้อรถ ให้ความทนทาน แก้ปัญหา ยางเสื่อมสภาพเร็ว
4. ผลิตภัณฑ์กีฬา: ลูกบอลล ลูกเทนนิส
5. อุตสาหกรรมเกษตร: ฟิล์มการเกษตร ฟิล์มห่อผัก ผลไม้ ฟิล์มเลี้ยงต้นอ่อน
6. อุตสาหกรรมเสื้อผ้าและแฟชั่น: เส้นใยนาโนคอมพอสิตทนไฟ ให้ความอบอุ่น ย้อมสีติดได้ดี
7. พลังงานและสิ่งแวดล้อม: ตัวตรวจวัดแก๊สอันตราย บำบัดน้ำเสีย สารอิเล็กทรอนิกส์ในแบตเตอรี่ของแข็ง (solid battery) เช่น แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (lithium ion battery)
8. อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร: ฟิล์มต้านแก๊สออกซิเจนซึมผ่าน ลดโอกาสอาหาร

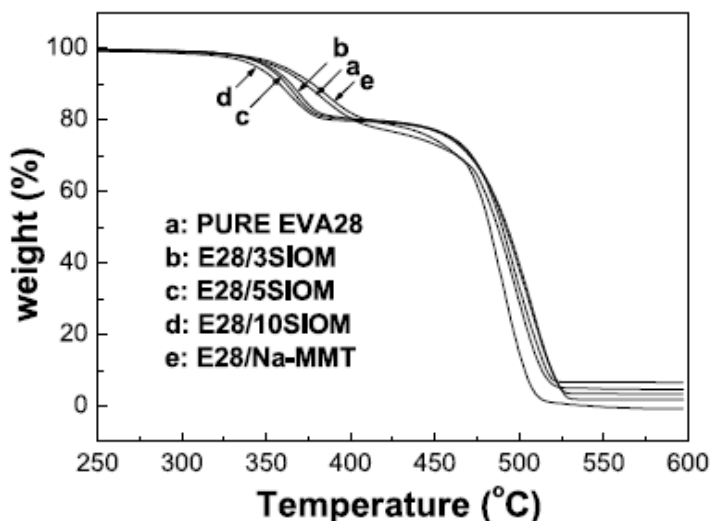
เสถียรภาพ เป็นต้น

Srivastava และคณะ [26] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตระหว่างอีวีเอและมอนต์มอริลโลไนต์ โดยกระบวนการผสมแบบหลอม เมื่อนำไปทดสอบพบว่านาโนคอมพอสิตที่ได้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นและมีค่าความทนแรงดึงที่สูงขึ้น เมื่อเติมมอนต์มอริลโลไนต์ที่ 2% โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเติมมอนต์มอริลโลไนต์มากกว่า 2% โดยน้ำหนัก ค่าความทนแรงดึงมีค่าต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เนื่องจากเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์มากขึ้นจะเกาะรวมกลุ่มกันทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องบนชิ้นทดสอบ นั้นแสดงให้เห็นว่าการเติมมอนต์มอริลโลไนต์จะช่วยปรับปรุงสมบัติของอีวีเอได้ แต่เติมได้เพียงปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 2.8 ผลการทดสอบความทนแรงดึงของอีวีเอและมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

Wei และ Zhang [27] เมื่อพิจารณาจากผลของ TGA พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์ช่วยปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของอีวีเอให้สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผล TGA ของอีวีเอและมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

2.5 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization) [4]

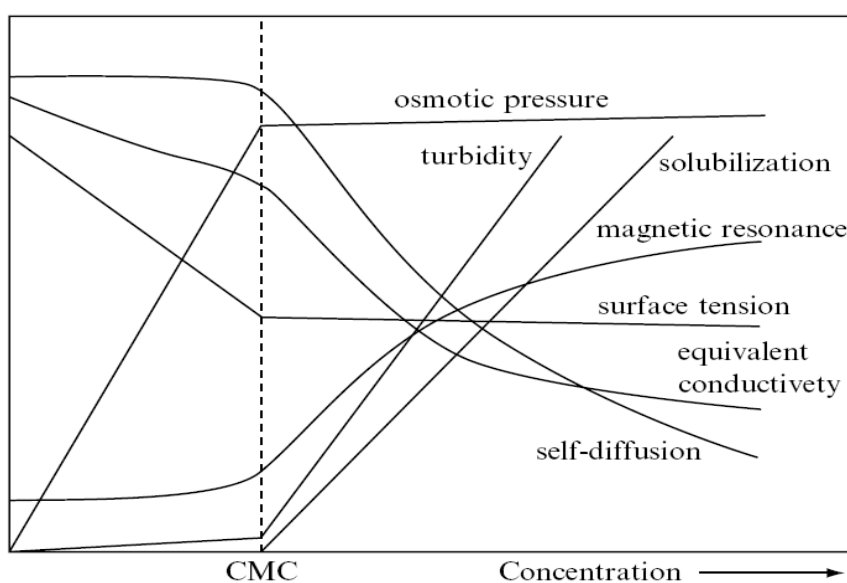
กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชันเป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบฟรีแรดิคัล (free radical polymerization) แบบหนึ่งที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่สำคัญหลายชนิด เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิคลอโรพรีน เป็นต้น โดยอิมัลชันหรือเลเท็กซ์ที่เตรียมได้สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง เช่น สี กาว สารเคลือบผิว และน้ำยาขัดพื้น เป็นต้น

ส่วนประกอบในระบบของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน คือ

1. มอนอเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ (water-insoluble monomer) หรือละลายน้ำได้น้อยมาก เช่น บิวตะไดอีน สไตรีน อะคริโลไนไตรล์ ไวนิลแอลกอฮอล์ และไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น
2. ตัวกลางสำหรับการกระจาย โดยส่วนมากใช้น้ำเป็นตัวกลาง
3. สารลดแรงตึงผิว (surfactant)
4. สารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายในน้ำ (water soluble initiator) (เช่น โซเดียมเปอร์ซัลเฟต, NaPS) หรือสารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายในน้ำมัน (oil-soluble initiator) (เช่น 2,2' อะโซบิส-ไอโซบิวทีโรไนไตรล์, AIBN)

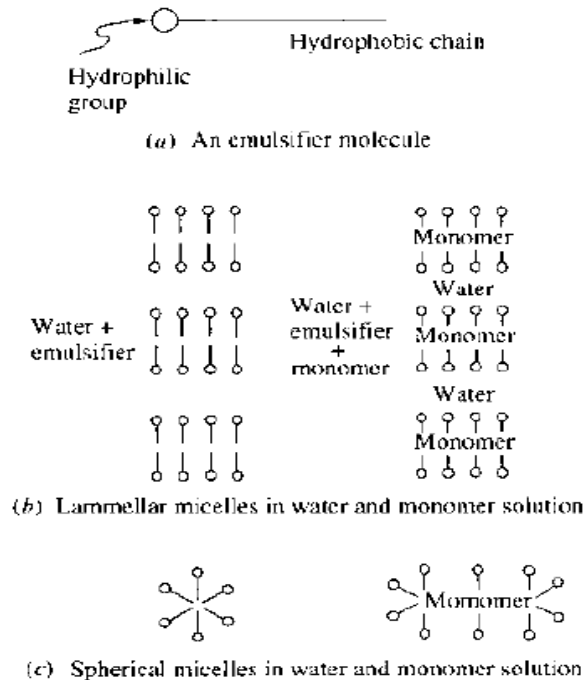
สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทสำคัญมากในกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวที่ชอบน้ำ (hydrophilic head) และส่วนหางซึ่งเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic tail) สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นชนิดแอนไอออนิก (anionic surfactants) เช่น โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl

sulphate, SDS) โดยเมื่อละลายสารลดแรงตึงผิวในน้ำ สมบัติทางกายภาพของสารละลายที่ได้ เช่น ความดันออสโมติก (osmotic pressure) สภาพการนำ (conductivity) ความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) และแรงตึงผิว (surface tension) จะเปลี่ยนแปลงไปจากสมบัติเดิมของน้ำ โดยรูปที่ 2.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นเชิงโมลาร์ของสารลดแรงตึงผิวที่ละลายอยู่ในน้ำ พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นหนึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงความชันของสมบัติต่างๆ อย่างทันทีทันใด ซึ่งความเข้มข้นนี้ เรียกว่า ความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤต (critical micelle concentration, CMC)



รูปที่ 2.10 ค่า CMC และสมบัติทางกายภาพของสารละลายสารลดแรงตึงผิว [14]

เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเล็กน้อยในน้ำ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะกระจายไปทั่วอย่างอิสระ และเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นสูงกว่าค่า CMC (CMC หมายถึง ความเข้มข้นต่ำสุดของสารลดแรงตึงผิวซึ่งอยู่ในรูปไมเซลล์) โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวกันในลักษณะเป็นกลุ่มคอลลอยด์เล็กๆ เรียกว่า ไมเซลล์ (micelles) โดยค่า CMC ของสารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.001-0.1 โมลต่อลิตร และรูปแบบของไมเซลล์แสดงไว้ในรูปที่ 2.11



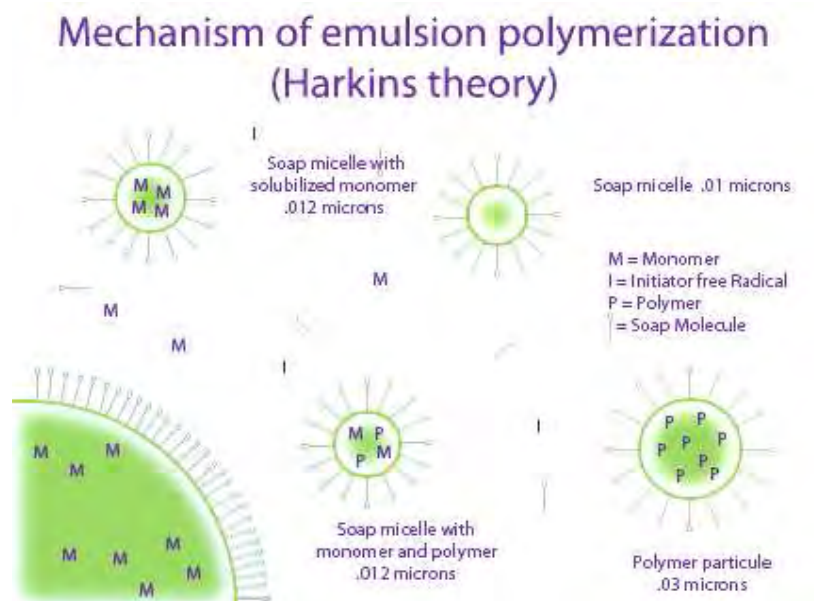
รูปที่ 2.11 การเกิดไมเซลล์ในกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน [15]

ไมเซลล์ทั่วไปมีขนาด 2-10 นาโนเมตร ซึ่งประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิว 50-150 โมเลกุล และโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่จัดตัวในรูปไมเซลล์อยู่ในลักษณะที่หันปลายไม่ชอบน้ำเข้าด้านในของไมเซลล์และหันปลายไฮดรอกซิลออกทางด้านกลางที่เป็นน้ำ

เมื่อเติมมอนอเมอร์ที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ (0.01-1%) เข้าสู่ระบบที่มีการกวนตลอดเวลา มอนอเมอร์บางส่วนจะละลายในไมเซลล์ ทำให้ขนาดของไมเซลล์ใหญ่ขึ้น มอนอเมอร์อื่นๆ (ยกเว้นส่วนที่ละลายน้ำซึ่งมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น) จะอยู่กันเป็นหยดเล็กๆ ที่มีรัศมี 2-3 ไมโครเมตร กระจายไปทั่วระบบ หยดมอนอเมอร์เหล่านี้ค่อนข้างเสถียร (ไม่รวมตัวเป็นหยดใหญ่) ดังนั้น ระบบจึงประกอบด้วย 3 ภูมิภาค คือ

1. ภูมิภาคของน้ำที่มีมอนอเมอร์และสารลดแรงตึงผิวละลายอยู่เล็กน้อย
2. หยดมอนอเมอร์ที่อยู่ค่อนข้างเสถียร
3. ไมเซลล์ที่ล้อมตัวด้วยมอนอเมอร์ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าหยดมอนอเมอร์มาก แต่มี

จำนวนมากกว่ามาก องค์ประกอบของระบบแสดงไว้ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 องค์ประกอบของระบบอิมัลชัน [16]

เมื่อเติมสารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายน้ำได้เข้าสู่ระบบ ฟรีเรดิคัลที่เกิดจากการแตกตัวของสารเริ่มปฏิกิริยาจะสามารถทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ในระบบได้ทั้ง 3 วัฏภาค ภายในระบบ คือ

1. มอนอเมอร์ที่ละลายในน้ำ
2. หยดมอนอเมอร์ (โดยการแพร่)
3. ไมเซลล์ที่อิมัลชันด้วยมอนอเมอร์ (โดยการแพร่)

เนื่องจากในสารละลายส่วนที่เป็นน้ำจะมีความเข้มข้นของมอนอเมอร์ต่ำมาก จึงอาจกล่าวได้ว่าไม่มีปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ในน้ำ ดังนั้นจึงเหลือเพียง 2 วัฏภาค เท่านั้นที่จะเกิดปฏิกิริยา คือ ในไมเซลล์ และในหยดมอนอเมอร์ จากการคำนวณพบว่าจำนวนไมเซลล์มีประมาณ 10^{18} ไมเซลล์ต่อตารางเซนติเมตร หรือเท่ากับพื้นผิว 50-100 ตารางเมตร หรือประมาณ 10-1000 เท่าของพื้นผิวทั้งหมดของหยดมอนอเมอร์ จากอัตราการแพร่ของฟรีเรดิคัลซึ่งแปรผันโดยตรงกับพื้นที่ผิว ฟรีเรดิคัลทั้งหมดที่เกิดขึ้นจึงแพร่เข้าสู่ ไมเซลล์ทำให้ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ทั้งหมดเกิดขึ้นภายในไมเซลล์ นอกจากนี้ จากการคำนวณพบว่าไม่มีการเกิดพอลิเมอร์ในหยดมอนอเมอร์เลย

เมื่อฟรีเรดิคัลแพร่เข้าไปในไมเซลล์กระบวนการเริ่มปฏิกิริยาและการขยายขนาดจะเกิดขึ้นทันที ซึ่งในขณะเดียวกันจะมีการบ่อนมอนอเมอร์จากแหล่งอื่นๆ คือ จากหยดมอนอเมอร์ และมอนอเมอร์ที่ละลายในน้ำเข้าสู่ไมเซลล์นี้ ขนาดของไมเซลล์จะขยายใหญ่ขึ้นควบคู่ไปกับการขยายขนาดของพอลิเมอร์ (ซึ่งขณะนี้เรียกว่าอนุภาคมอนอเมอร์-พอลิเมอร์) จึงจำเป็นต้องมี

โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มเข้ามาเพื่อคงความเสถียรของไมเซลล์ ซึ่งทำโดยดึงจากไมเซลล์อื่นๆ ที่ไม่ได้มีปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ การขยายขนาดจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ในอนุภาคมอนอเมอร์-พอลิเมอร์จนกว่าฟรีแรดิคัลอื่นจะแพร่เข้าไปยังอนุภาคนั้นเพื่อดำเนินขั้นตอนสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบรวมตัว หรือฟรีแรดิคัลของพอลิเมอร์ที่กำลังขยายขนาดเกิดการสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบถ่ายทอดสู่มอนอเมอร์อื่นและแพร่ออกจากอนุภาคนั้น

ข้อดีของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน คือ

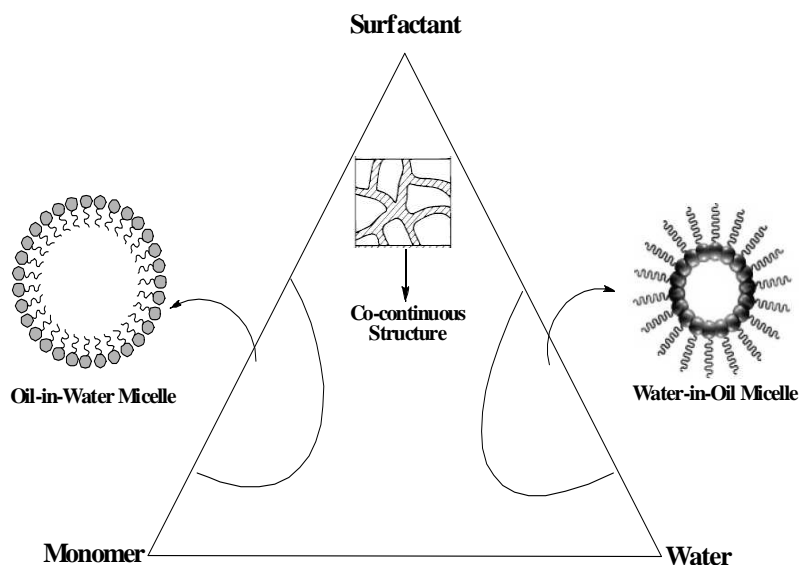
1. ความหนืดต่ำตลอดปฏิกิริยา
2. การควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาทำได้ง่าย
3. พอลิเมอร์ที่ได้อยู่ในรูปของอิมัลชันหรือเลเท็กซ์ สามารถนำไปใช้ได้ทันทีโดยไม่ต้องนำไปผ่านกระบวนการตกตะกอน
4. ได้ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงเป็นพอลิเมอร์ (% conversion) สูง
5. อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วมาก โดยพอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมี การกระจายขนาดอนุภาคที่แคบ

ข้อเสียของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน คือ

1. การกำจัดสารลดแรงตึงผิวออกจากพอลิเมอร์อิมัลชันทำได้ยาก
2. ขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่ (มากกว่า 100 นาโนเมตร)

2.6 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน (Microemulsion polymerization) [17]

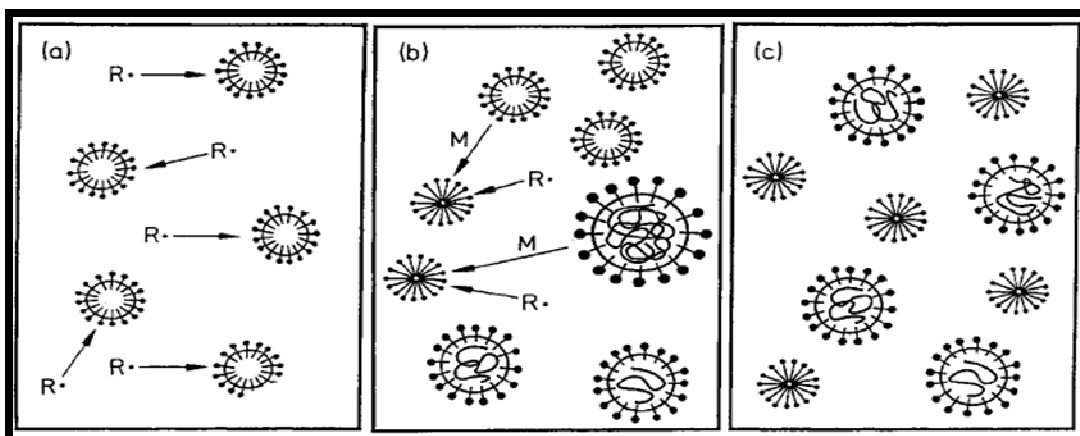
ไมโครอิมัลชัน คือ ของเหลวสองชนิดที่ไม่สามารถผสมผสานกันได้ โดยมีเสถียรภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ มีความเป็นไอโซโทรปิก และมีความใส ซึ่งประกอบด้วยน้ำ น้ำมัน และสารลดแรงตึงผิว ในระบบไมโครอิมัลชันที่มีปริมาณน้ำมากกว่าน้ำมันจะเกิดไมเซลล์แบบ oil-in-water (o/w) และในระบบที่มีปริมาณน้ำมันมากกว่าน้ำจะเกิดไมเซลล์แบบ water-in-oil (w/o) ซึ่งระบบทั้งสองจะมีหยดน้ำมันเล็กๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 10 นาโนเมตร ถูกล้อมรอบด้วยสารลดแรงตึงผิว 1 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แผนภาพเฟสของ isotropic microemulsion [17]

กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Stoffer และคณะ [18] โดยใช้เมทิลอะคริเลต (methyl acrylate) มอนอเมอร์ในการศึกษาระบบไมโครอิมัลชันดังกล่าวเป็นระบบแบบน้ำในน้ำมัน (water-in-oil system, W/O) กล่าวคือ มีเฟสกระจาย (disperse phase) ได้แก่ น้ำที่ถูกล้อมรอบด้วยน้ำมันซึ่งเป็นเฟสต่อเนื่อง (continuous phase) ปัจจุบันกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากสามารถใช้เตรียมพอลิเมอร์เลทเท็กซ์ที่มีอนุภาคขนาดระดับนาโนเมตรได้ และพอลิเมอร์ที่ได้อาจมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายๆ ด้าน เช่น พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conducting polymer) พอลิเมอร์ซัพพอร์ตสำหรับการประสานไอออนของโลหะ (polymeric support for binding metal ions) และอนุภาคคอลลอยด์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหลากหลายสำหรับใช้งานในด้านวัสดุพอลิเมอร์ทางการแพทย์ อย่างไรก็ตาม กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันเป็นวิธีที่ต้องใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณมาก และบางครั้งมากกว่าปริมาณมอนอเมอร์

โดยกลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 ซึ่งในระบบประกอบด้วยน้ำ มอนอเมอร์ สารเริ่มปฏิกิริยาและสารลดแรงตึงผิว



รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน [19]

กลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. รูปที่ 2.14(a) แสดงขั้นเริ่มปฏิกิริยา (initiation) โดยระบบประกอบด้วยตัวกลางที่เป็นน้ำ มอนอเมอร์ไมเซลล์ (monomer micelles) และฟรีแรดิคัลของสารเริ่มปฏิกิริยา (R) โดยปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์เริ่มขึ้นเมื่อฟรีแรดิคัลเคลื่อนเข้าไปทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ในมอนอเมอร์ไมเซลล์
2. รูปที่ 2.14(b) แสดงขั้นขยายขนาด (propagation) ของพอลิเมอร์ภายในไมเซลล์ และเปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ไมเซลล์ (polymer micelle) นอกจากนี้ มอนอเมอร์ในไมเซลล์และที่เหลืออยู่ในพอลิเมอร์ไมเซลล์อาจแพร่เข้าสู่ไมเซลล์ว่าง (empty micelle) และทำปฏิกิริยากับฟรีแรดิคัลของสารเริ่มปฏิกิริยาที่ถูกจับโดยไมเซลล์ว่างเกิดเป็นพอลิเมอร์ไมเซลล์ได้เช่นกัน
3. รูปที่ 2.14(c) แสดงขั้นสิ้นสุดปฏิกิริยา (termination) โดยฟรีแรดิคัลที่มีในระบบถูกทำให้หมดไปด้วยกระบวนการสิ้นสุดการขยายขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ (chain termination process)

Leong และ Candau [20] ได้รายงานการเกิดพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคไมโครอิมัลชันของอะครีลาไมด์ (acrylamide) ในโทลูอีน ซึ่งทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักรวมสูงมาก แต่ต้องใช้อัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวที่สูงกว่าระบบอิมัลชันทั่วไป เนื่องจากในระบบมีไมเซลล์เป็นจำนวนมากจึงจำเป็นต้องใช้สารลดแรงตึงผิวปริมาณมากกว่า สารลดแรงตึงผิวเหล่านั้นนอกจากมีราคาแพงแล้ว ยังมีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ อีกทั้งการกำจัดสารลดแรงตึงผิวออกจากระบบภายหลังการเกิดพอลิเมอร์สิ้นสุดลงทำได้ยาก และต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงอีกด้วย นอกจากนี้ ร้อยละของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ยังมีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

โดยทั่วไปแล้ว การเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันต่างจากการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน เพราะระบบประกอบด้วยหยดไมโครอิมัลชันขนาดระดับนาโนเมตรที่มีเสถียรภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ และหยดเล็กๆ เหล่านี้มีอนุภาคของพอลิเมอร์ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 10-50 นาโนเมตร) บรรจุอยู่ โดยแต่ละอนุภาคของพอลิเมอร์ประกอบด้วยสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เพียง 2-3 โมเลกุลเท่านั้น นอกจากนี้ พอลิเมอร์ที่เตรียมได้ยังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก (10^6 - 10^7 g mol⁻¹) อีกด้วย

ข้อดีของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน คือ

1. ขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์มีขนาดเล็ก (น้อยกว่า 50 นาโนเมตร)
2. ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

ข้อเสียของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน คือ

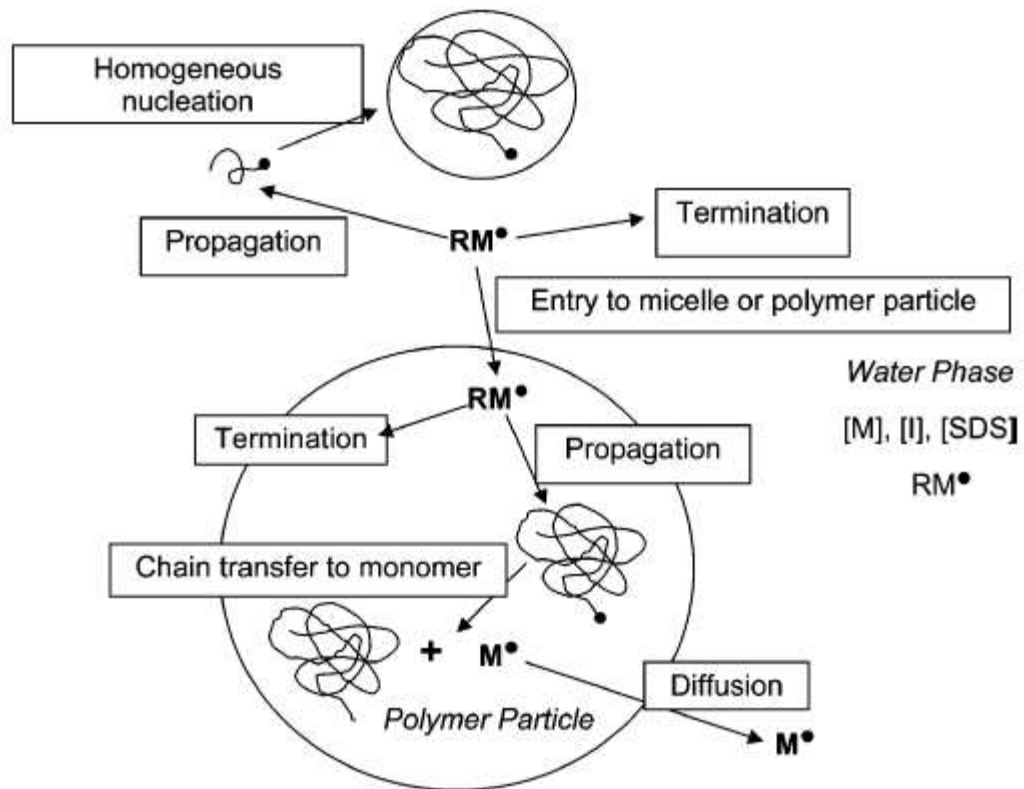
1. อัตราส่วนระหว่างมอนอเมอร์ต่อสารลดแรงตึงผิวต่ำ (น้อยกว่า 1)
2. ปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก)

2.7 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

(Differential microemulsion polymerization)

การเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันเป็นการปรับปรุงกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันให้ใช้สารลดแรงตึงผิวลดลง โดยยังสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรและควบคุมขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย อีกทั้งร้อยละผลได้ของพอลิเมอร์ในอิมัลชันมากกว่าร้อยละผลได้ของพอลิเมอร์จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน [21-24] ซึ่งหลักการของเทคนิคนี้คล้ายการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน กล่าวคือ ในระบบแรกเริ่มประกอบด้วยน้ำ สารลดแรงตึงผิว และสารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายน้ำ (เช่น แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต) ผสมอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อให้ความร้อนแก่ระบบจนถึงที่อุณหภูมิที่กำหนด จึงเริ่มหยดมอนอเมอร์ลงไปในระบบที่ละหยด ไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวจะแย่งกันดึงมอนอเมอร์เข้าไปอยู่ในไมเซลล์ได้ง่ายกว่าเทคนิคการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน จึงทำให้เทคนิคนี้สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่จำเป็นต้องใช้ให้มีค่าต่ำกว่าค่าความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤติได้ นอกจากนี้ ยังสามารถควบคุมขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย

รูปที่ 2.15 แสดงกลไกการเกิดพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันที่นำเสนอโดย He และคณะ [22] ซึ่งภายในระบบก่อนเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วยสารเริ่มปฏิกิริยา สารลดแรงตึงผิว และสารลดแรงตึงผิวร่วม (co-surfactant)

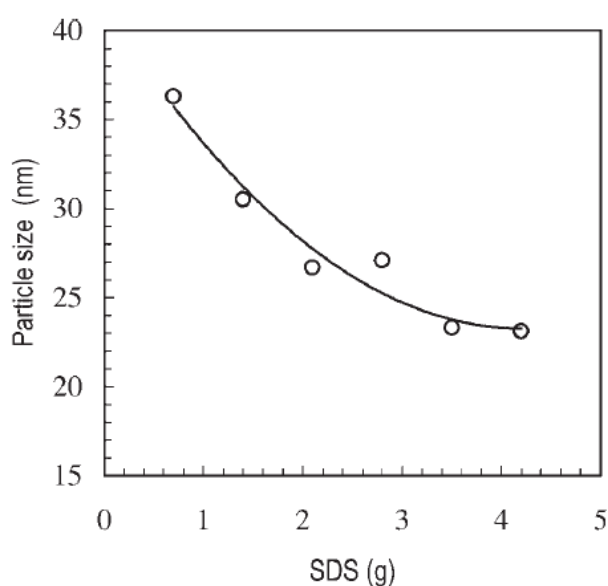


รูปที่ 2.15 กลไกการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการเกิดแบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

โดยสารเริ่มปฏิกิริยาแตกตัวในเฟสน้ำกลายเป็นเรดิคัลปฐมภูมิ ซึ่งแบ่งส่วนเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบด้วยการหยดอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นมอนอเมอร์เรดิคัล (RM^\bullet) และขยายเป็นพอลิเมอร์เรดิคัล ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งพอลิเมอร์เรดิคัลเหล่านี้จะขยายขนาดในเฟสน้ำจนได้ความยาวสายโซ่วิกฤติ (critical chain length) และตกตะกอนโดยการเคลื่อนเข้าไปอยู่ในไมเซลล์เกิดเป็นอนุภาคของพอลิเมอร์ กลไกดังกล่าวนี้เรียกว่าการเกิดอนุภาคแบบเนื้อเดียวกัน (homogeneous nucleation) นอกจากนี้ RM^\bullet ยังสามารถเคลื่อนเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ในไมเซลล์ที่บวมตัวด้วยมอนอเมอร์เกิดเป็นอนุภาคพอลิเมอร์กลไกนี้เรียกว่าการเกิดอนุภาคแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous nucleation) ซึ่งอนุภาคพอลิเมอร์พีเรดิคัลเหล่านี้จะขยายขนาดต่อไป และสายโซ่พอลิเมอร์จะสิ้นสุดการขยายภายหลังการเกิด chain transfer ไปยังมอนอเมอร์ และมอนอเมอร์เรดิคัลที่เกิดจาก chain transfer และมอนอเมอร์

แรติคัลที่เกิดจาก chain transfer (M') สามารถเริ่มต้นเกิดพอลิเมอร์ต่อไปได้ หรือแพร่ออกสู่เฟสน้ำ เนื่องจากมีขนาดที่เล็กมาก [21]

He และ Pan [24] ได้ทำการสังเคราะห์พอลิสไตรีนที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน โดยใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มปฏิกิริยา และโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตเป็นสารลดแรงตึงผิว จากผลการทดลอง พบว่าการสังเคราะห์พอลิสไตรีนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน นอกจากได้พอลิสไตรีนที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 50 นาโนเมตร (ประมาณ 20 นาโนเมตร) ดังแสดงในรูป 2.16 ยังใช้สารลดแรงตึงผิวปริมาณน้อยกว่าวิธีการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันมาก



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดแรงตึงผิวกับขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์

Nshuti และคณะ [25] เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีวีเอและพอลิสไตรีนด้วยเคลย์ที่ดัดแปรด้วยเกลือเฟอร์ซีน (ferrocene) และเฟอร์โรซีนเนียม (ferrocenium) โดยกระบวนการผสมแบบหลอมเหลว (melt blending) พบว่าพอลิเมอร์คอมพอสิตที่เตรียมได้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ จากการยืนยันด้วยเทคนิค TEM พบว่าเคลย์ที่ถูกดัดแปรกระจายตัวได้ไม่ดีในเมทริกซ์ของอีวีเอและพอลิสไตรีน จึงทำให้สมบัติเชิงกลไม่ได้รับการปรับปรุง ซึ่งการผสมพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างต่างกันจะทำให้วัสดุที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่ำลง เนื่องจากความไม่เข้ารวมตัวซึ่งกันและกัน ดังนั้น จึงได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่มุ่งเน้นที่จะเพิ่มความเข้ากันได้และปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ผสม และจากงานวิจัยดังกล่าวทำให้เกิดแนวความคิดที่จะ

ปรับปรุงสมบัติของอีวีเอโดยการนำไปผสมกับพอลิสไตรีนที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ปริมาณเล็กน้อยแล้วเสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ในสภาพที่เป็นอิมัลชันเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้

1. สไตรีนมอนอเมอร์ [มีส่วนผสมของสารยับยั้ง (inhibitor) 10-15 ส่วนในล้านส่วน (part per million, ppm)] ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเคมีคอลอินดัสตรี จำกัด (Siam Chemical Industry Co., Ltd.)

2. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) ชนิดเกล็ด ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 97 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทคอกนิส (ประเทศไทย) จำกัด [Cognis (Thailand) Co., Ltd.]

3. 2,2'-อะโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (2,2'-azobisisobutyronitrile, AIBN) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเคมีคอลอินดัสตรี จำกัด (Siam Chemical Industry Co., Ltd.)

4. เมทานอล เกรดที่ใช้ทั่วไป (practical grade)

5. น้ำกลั่น

6. แร่มอนต์มอริลโลไนต์ ได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7. เอทิลีนไวนิลแอสีเทตโคพอลิเมอร์ (ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) (EVA DA-101) อิมัลชัน ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทอีเทอร์นัลเรซิน (Eternal Resin Co., Ltd.) สมบัติแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของเอทิลีนไวนิลแอสีเทตโคพอลิเมอร์อิมัลชัน

สมบัติ	ผลการทดสอบ
Appearance	milky white homogeneous viscous liquid
Viscosity (cps, 25°C)	2,100
Non-volatile content (%) 160°C, 40 minutes	55.3
pH	4.5

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมนาโนเลเท็กซ์

1. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารแบบควบคุมด้วยระบบดิจิทัล (stirring/temperature controlled digital hot plate)
2. เครื่องปฏิกรณ์แก้วไพเรกซ์ (Pyrex glass reactor) ขนาด 500 ml แบบมีฝาปิด-เปิด
3. แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar)
4. อุปกรณ์ควบแน่นแบบสองชั้น (double jacket condenser)
5. กรวยหยดสารแบบปิด (closed dropping funnel)

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมชิ้นตัวอย่างทดสอบ

1. เครื่องผสมความเร็วสูง (high speed mixer) ที่สามารถปรับความเร็วรอบได้
2. เตาอบแบบสุญญากาศ (vacuum oven)
3. แม่พิมพ์ที่ทำจากแผ่นกระจกขนาด 20×20×0.15 เซนติเมตร
4. เครื่องอัดแบบ (compression molding) ของบริษัท LAB TECH จำกัด

3.2.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

1. ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ของแข็ง (%solid) ในนาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันด้วย Gravimetric Method เพื่อใช้คำนวณน้ำหนักของนาโนเลเท็กซ์ที่ใช้ผสมกับอีวีเออิมัลชันและมอนต์มอริลโลไนต์
2. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (Dynamic Light Scattering Analyzer, DLS) รุ่น Nano-series ZX (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น Jeol JSM-5410LV (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) รุ่น JEOL JEM-1230 (แผนกห้องปฏิบัติการ โรงพยาบาลศิริราช)

5. เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Tensile Testing Machine) รุ่น LLOYD LR 100K Universal Testing Machine (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

6. เครื่อง X-ray diffraction (XRD) รุ่น Bruker AXS D8 Discover (คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

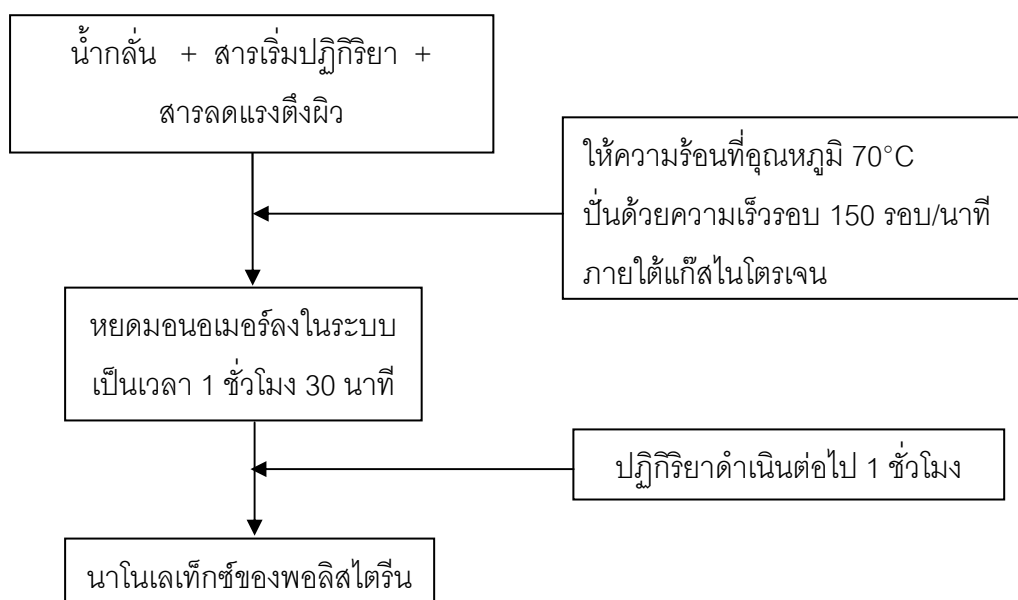
7. เครื่องเทอร์โมแกรวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer, TGA) รุ่น METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851° (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

8. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Analyzer, DMA) รุ่น METTLER TOLEDO DMA/SDTA 861° (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการสังเคราะห์นาโนเลทีกซ์ของพอลิสไตรีน

การสังเคราะห์นาโนเลทีกซ์ของพอลิสไตรีนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันมีขั้นตอนและปริมาณสารที่ใช้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ตามลำดับ

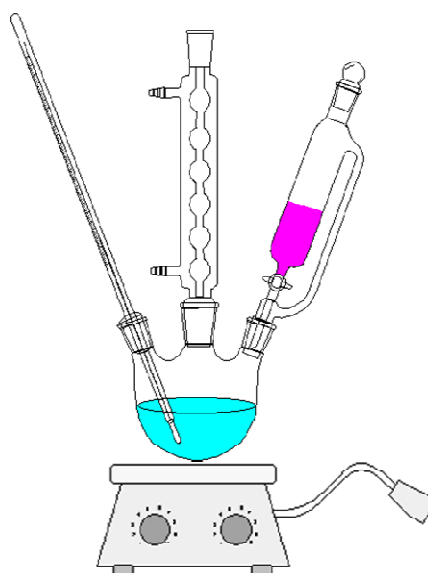


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลทีกซ์ของพอลิสไตรีน

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์

Composition	Amount
SDS (g)	8
Styrene monomer (ml)	22.5
AIBN (g)	0.12
Distilled water (ml)	60

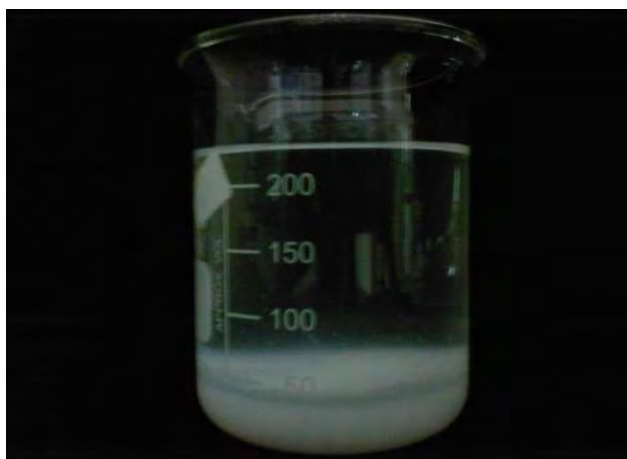
การเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีนเริ่มจากนำสารลดแรงตึงผิว (SDS) 8 กรัม สารเริ่มปฏิกิริยา (AIBN) 0.12 กรัม และน้ำกลั่น 60 มิลลิลิตร ใส่ลงใน glass reactor ที่มีการต่อ double jacket condenser และควบคุมอุณหภูมิด้วย hot plate (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) และให้ความร้อนภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอที่อัตราเร็วในการหมุนของแท่งแม่เหล็ก 150 รอบ/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนโดยทำการจ่ายแก๊สไนโตรเจนผ่านหลอดนำแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 70 องศาเซลเซียส จึงเริ่มหยดสไตรีนมอนอเมอร์ทีละหยดเล็กๆ อย่างสม่ำเสมอโดยใช้ dropping funnel เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จนหมด (22.5 มิลลิลิตร) จากนั้นให้คงปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พร้อมการกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง เพื่อให้สไตรีนมอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาเป็นพอลิสไตรีนอย่างสมบูรณ์ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีน

3.3.2 การแยกพอลิสไตรีนออกจากนาโนเลเท็กซ์

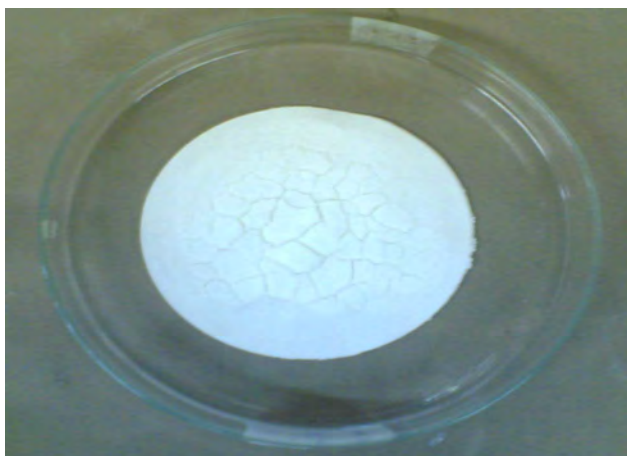
นำนาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.3.1 ซึ่งบรรจุอยู่ใน glass reactor ไปทำให้ตกตะกอนโดยใช้เมทานอลปริมาณมากเกินไป (รูปที่ 3.3) ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนประมาณ 5-10 นาที แล้วกรองด้วยเครื่องกรองระบบสุญญากาศ (รูปที่ 3.4) และล้างสารลดแรงตึงผิวและโพลิโกเมอร์ด้วยน้ำกลั่นและเมทานอลอย่างละ 1 ลิตร นำตะกอนของพอลิสไตรีนที่แยกได้ (รูปที่ 3.5) ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.3 การตกตะกอนพอลิสไตรีนด้วยเมทานอลที่มากเกินไป



รูปที่ 3.4 การล้างและกรองอนุภาคนาโนเมตรที่เตรียมได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ



รูปที่ 3.5 ตะกอนของพอลิสไตรีนก่อนนำไปอบ

3.3.3 การวิเคราะห์น้ำหนักแห้ง

3.3.3.1 ร้อยละผลได้ (% yield) ของพอลิสไตรีนในนาโนเลเท็กซ์

ร้อยละผลได้ของพอลิสไตรีนในนาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.3.1 หาได้จากวิธีการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง (รูปที่ 3.6) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละผลได้ (\% yield)} = \frac{\text{ร้อยละของแข็ง}}{\text{ร้อยละของมอนอเมอร์}} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยร้อยละของแข็งหาได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละของแข็ง (\% solid)} = \frac{\text{น้ำหนักของพอลิสไตรีนในนาโนเลเท็กซ์}}{\text{น้ำหนักของนาโนเลเท็กซ์ (g)}} \times 100 \quad (3.2)$$

และเปอร์เซ็นต์ของมอนอเมอร์หาได้จากสมการที่ 3.3

$$\text{ร้อยละของมอนอเมอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของมอนอเมอร์ (g)}}{\text{น้ำหนักของของผสม (g)}} \times 100 \quad (3.3)$$

หมายเหตุ :

1. น้ำหนักของพอลิสไตรีนในนาโนเลเท็กซ์ หาได้จากการตกตะกอนนาโนเลเท็กซ์ในข้อ 3.3.2
2. น้ำหนักของมอนอเมอร์หาได้จากความหนาแน่นของสไตรีน (0.904) × ปริมาตรของสไตรีน
3. น้ำหนักของของผสมได้จากน้ำหนักของสไตรีนมอนอเมอร์ + SDS + AIBN + น้ำกลั่น



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งน้ำหนัก

3.3.3.2 สัณฐานวิทยาของอนุภาคขนาดนาโนเมตรของพอลิสไตรีน

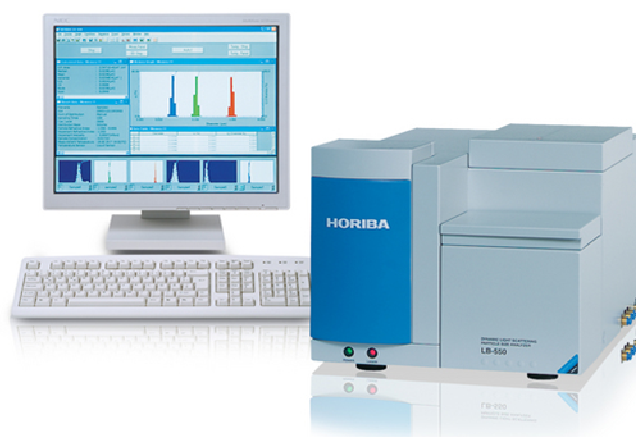
วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคขนาดนาโนเมตรของพอลิสไตรีนด้วยเครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) รุ่น JEOL JEM-1230 (รูปที่ 3.7) ซึ่งดำเนินการที่ 80 kV โดยทำการเจือจางนาโนเลเท็กซ์ด้วยน้ำกลั่นจนมีความเข้มข้นประมาณ 0.1-0.5 wt% ก่อนวางตัวอย่างลงบนคอปเปอร์กริด



รูปที่ 3.7 เครื่อง Transmission Electron Microscope (TEM) รุ่น JEOL JEM-1230

3.3.3.3 ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค

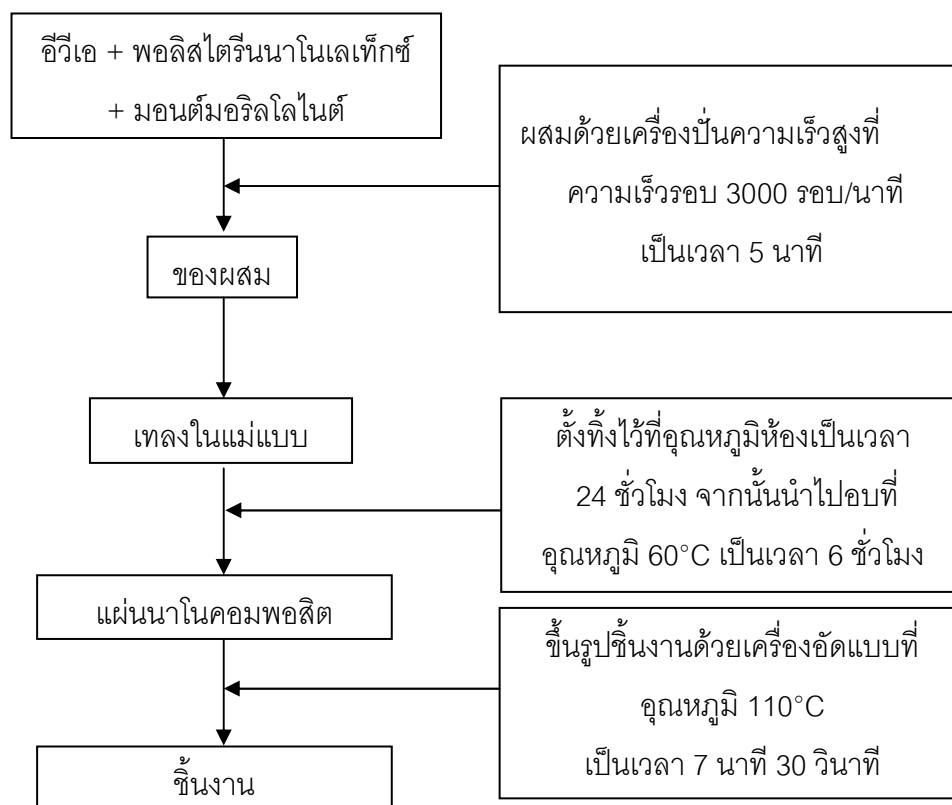
น่านาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1 ไปวิเคราะห์หา number-average diameter (D_n) และ intensity-average diameter (D_z) ด้วยเครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) Analyzer รุ่น Nano-series ZX (รูปที่ 3.8) ของอนุภาคต่างๆที่อยู่ในนาโนเลเท็กซ์ ซึ่งวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคได้ในช่วง 0.6-6000 นาโนเมตร



รูปที่ 3.8 เครื่อง Dynamic Light Scattering (DLS) Analyzer รุ่น Nano-series ZX

3.3.4 การเตรียมอีวีเอ พอลิสไตรีนและมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

ขั้นตอนการเตรียมอีวีเอ พอลิสไตรีนและมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตแสดงไว้ในรูปที่ 3.9 โดยปริมาณของสารที่ใช้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเตรียมอีวีเอ พอลิสไตรีนและมอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารที่ใช้เตรียมอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

ปริมาณ พอลิสไตรีน (%solid)	ปริมาณ นาโนเลเท็กซ์ (ที่ใช้จริง) (g)	EVA (%solid)	ปริมาณ EVA (ที่ใช้จริง) (g)	MMT (phr)	ปริมาณ MMT (ที่ใช้จริง) (g)
10	22	90	78	1	1
20	38	80	62	3	3
30	52	70	48	5	5

การเตรียมอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต เริ่มจากการนำอีวีเอ อิมัลชัน พอลิสไตรีนนาโนเลทีกซ์ และมอนต์มอริลโลไนต์ มาผสมกันตามอัตราส่วนที่ได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 3.3 จากนั้นทำการปั่นผสมด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง (high speed mixer) (รูปที่ 3.10) ด้วยความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเทของผสมที่ได้ลงในแม่แบบที่ทำจากแผ่น กระดาษที่มีขนาด $20 \times 20 \times 0.15$ เซนติเมตร (รูปที่ 3.11) และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานออกจากแม่แบบไป ขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดแบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที 30 วินาที จะได้ชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 3.10 เครื่องปั่นความเร็วสูง (high speed mixer)



รูปที่ 3.11 แม่พิมพ์ที่ทำจากแผ่นกระดาษขนาด $20 \times 20 \times 0.15$ เซนติเมตร



รูปที่ 3.12 เครื่องอัดแบบ (compression molding machine) ของบริษัท LAB TECH จำกัด

3.3.5 การวิเคราะห์และทดสอบอีวีเอ/พอลิस्टาไรีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิต

3.3.5.1 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาพื้นผิวของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM รุ่น Jeol JSM-5410LV) (รูปที่ 3.13) ดำเนินการที่ 15 kV เคลือบตัวอย่างด้วยทองคำก่อนส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



รูปที่ 3.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM รุ่น Jeol JSM-5410LV)

3.3.5.2 สมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile properties)

การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D882 เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (% elongation at break) และยังสัมมอดูลัส (Young's modulus) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD LR 100K ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยใช้ระยะดึง (gauge length) เท่ากับ 100 มิลลิเมตร Load cell 100 N และความเร็วในการดึงเท่ากับ 50 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.14 เครื่อง Universal Testing Machine รุ่น LLOYD LR 100K

3.3.5.3 การตรวจสอบโครงสร้างผลึก

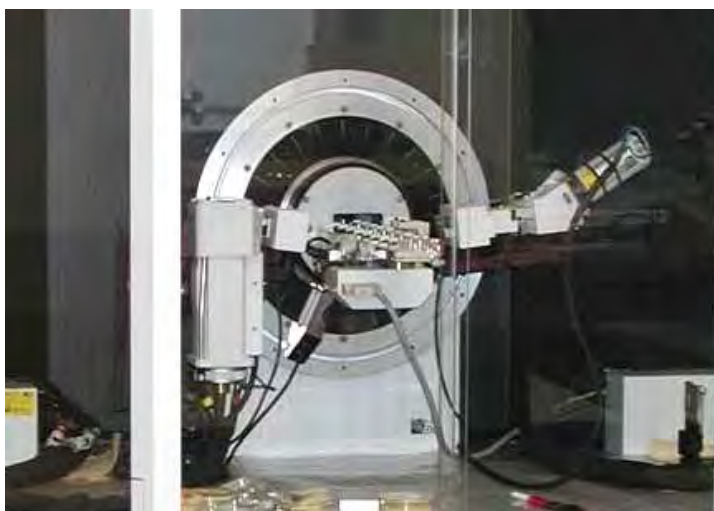
นำอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ของ Bruker AXS Model D8 Discover (รูปที่ 3.15) โดยใช้ภาวะ ในการตรวจสอบ ดังนี้

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

คำนวณหาขนาดช่องว่างระหว่างชั้นของอะลูมิเนียมออกไซด์เกิดด้วย Bragg's Equation

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

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



รูปที่ 3.15 เครื่อง XRD ของ Bruker รุ่น AXS Model D8 Discover

3.3.5.4 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric analysis) เป็นการหาเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงาน ทำโดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของมวลเทียบกับอุณหภูมิ สมบัติสำคัญที่สามารถหาได้จากผลการทดลองนี้คือ อุณหภูมิในการสลายตัว (degradation temperature) ของชิ้นงาน การทดสอบใช้เครื่อง METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851° (รูปที่ 3.16) โดยนำชิ้นงานที่มีน้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม บรรจุลงในภาชนะที่ทำจากอะลูมินาแล้วนำไปทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-1000°C โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 20°C/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลด้วยอัตราเร็ว (gas flow rate) 20 มิลลิลิตร/นาที



รูปที่ 3.16 เครื่อง Thermogravimetric analyzer ของ METTLER TOLEDO รุ่น TGA/SDTA 851°

3.3.5.5 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic Mechanical Property)

คุณสมบัติกลศาสตร์ของชิ้นงานสามารถหาได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Dynamic mechanical analyzer (DMA) ของ METTLER TOLEDO รุ่น 861° (รูปที่ 3.17) โดยใช้ตัวจับแบบ compression เพื่อจับชิ้นงานที่มีขนาด $10 \times 10 \times 1$ มิลลิเมตร ทดสอบภายใต้ความถี่ 1 Hz ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -50°C ถึง 140°C โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเหลวในการลดอุณหภูมิในการทดสอบ



รูปที่ 3.17 เครื่อง Dynamic mechanical analyzer ของ METTLER TOLEDO รุ่น 861°

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 พอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์

พอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 พอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

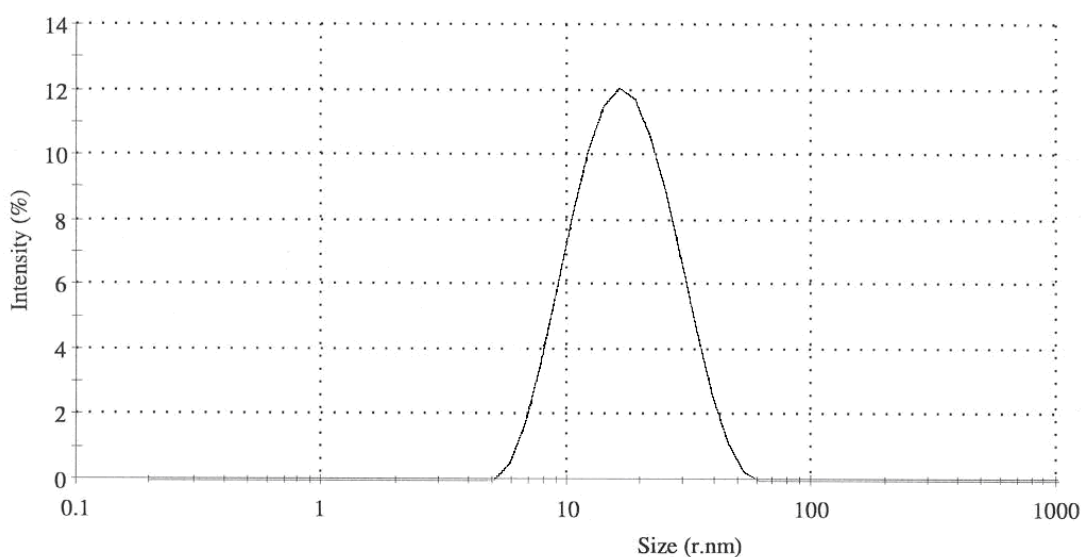
4.2 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง (%solid) เปอร์เซ็นต์ผลได้ (%yield) และขนาดอนุภาคของพอลิสไตรีน

ผลของเปอร์เซ็นต์ของแข็ง เปอร์เซ็นต์ผลได้ และขนาดอนุภาคของพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันที่ใช้ SDS 8 กรัม, AIBN 0.12 กรัม และสไตรีนมอนอเมอร์ 22.5 มิลลิลิตร แสดงในตารางที่ 4.1 โดยการกระจายขนาดอนุภาคที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องวิเคราะห์การกระเจิงแสงแบบพลวัต (Dynamic Light Scattering Analyzer, DLS) รุ่น Nano-series ZX แสดงไว้ในรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง เปอร์เซ็นต์ผลได้ และขนาดอนุภาคของพอลิสไตรีนที่

สังเคราะห์จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

ตัวอย่าง	ร้อยละของแข็ง (% solid)	ร้อยละผลได้ (% yield)	ขนาดอนุภาค
พอลิสไตรีน	22.0	95.68	15.07 ± 0.04

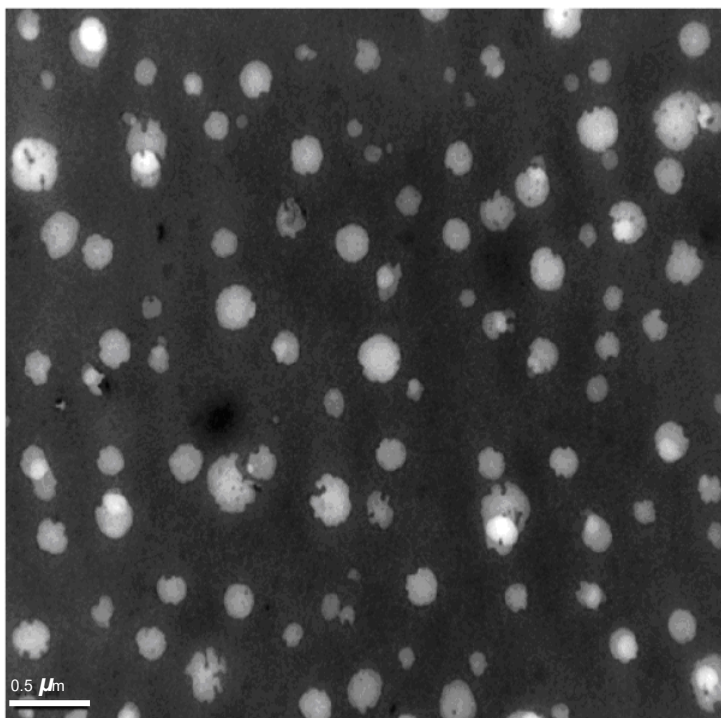


รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดของพอลิสไตรีนที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรที่สังเคราะห์

จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

4.3 สันฐานวิทยาของพอลิสไตรีนที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตร

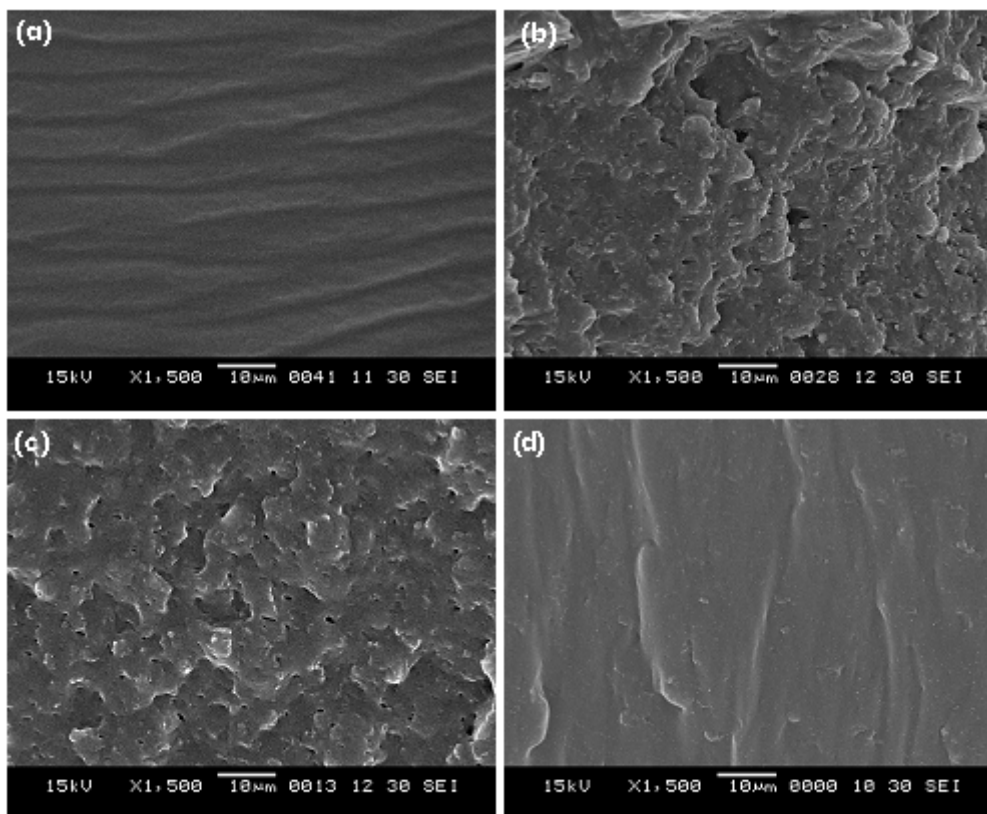
สันฐานวิทยาของพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 พบว่า โมเลกุลของพอลิสไตรีนรวมตัวกันมีอนุภาคเป็นทรงกลม



รูปที่ 4.3 สัณฐานวิทยาของพอลิสไตรีนที่รวมตัวกันเป็นทรงกลม

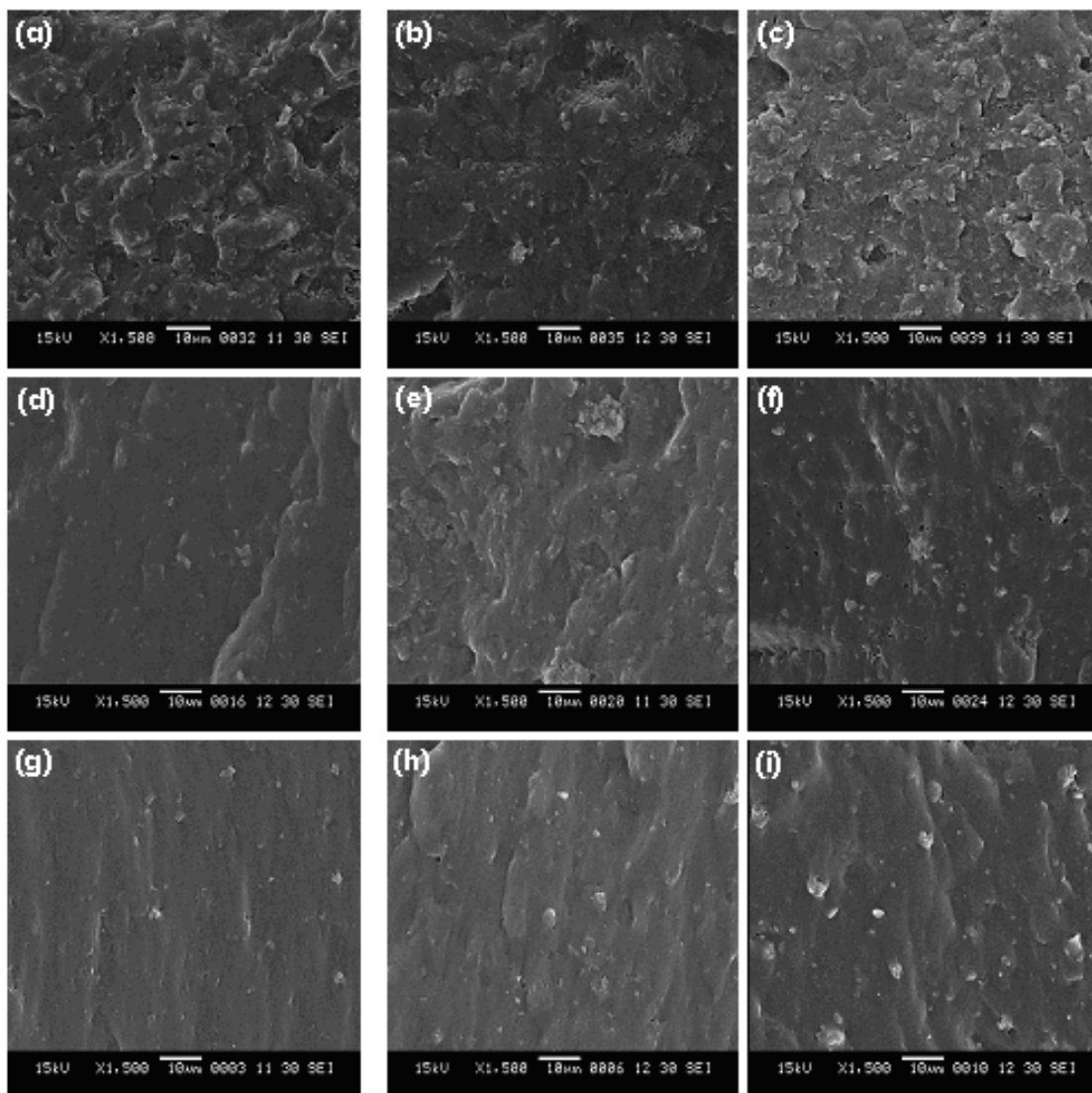
4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

สัณฐานวิทยาของอีวีเอปรีสุทรี และพอลิเมอร์ผสมอีวีเอ/พอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่อัตราส่วน 70/30, 80/20 และ 90/10 ที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ภายใต้กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่า พื้นผิวรอยแตกหักของอีวีเอปรีสุทรีค่อนข้างเรียบเพราะมีเพียงเฟสเดียว หากแต่มีสันคล้ายคลื่น เนื่องจากเป็นลักษณะรอยแตกหักของวัสดุที่เหนียว (tough material) สำหรับพอลิเมอร์ผสม พบว่า ความเข้ากันได้ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองลดลงเมื่อปริมาณของพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคนาโนเมตรของพอลิสไตรีนจับกันเป็นกลุ่มก้อน ความสามารถในการกระจายตัวลดลง ซึ่งพิจารณาได้จากความลึกของรอยแตก (crack) ช่องว่าง (void) และความหยาบ (roughness) ของพื้นผิว เนื่องจากพอลิสไตรีนที่เกาะกันเป็นกลุ่มก้อนหลุดออกไปจากเมทริกซ์ของอีวีเอ ซึ่งความไม่เข้ากันของอีวีเอและพอลิสไตรีนอาจมีผลทำให้สมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง



รูปที่ 4.4 ภาพ SEM ของ (a) อีวีเอบริสุทธิ์ และพอลิเมอร์ผสมของ (b) 70EVA/30PS, (c) 80EVA/20PS และ (d) 90EVA/10PS

รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิตที่เติมมอนต์มอริลโลไนต์ ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr ที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่า ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเกาะเป็นกลุ่มก้อนของพอลิสไตรีนลดลง โดยจากรูปแสดงให้เห็นว่าช่องว่างและรอยแตกลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากโมเลกุลของอีวีเอและพอลิสไตรีนได้สอดแทรก (intercalate) เข้าไปในระหว่างชั้นซิลิเกตของมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้ความเข้ากันได้ของวัสดุนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติด้านความทนแรงดึงของวัสดุนาโนคอมพอสิตได้รับการปรับปรุง

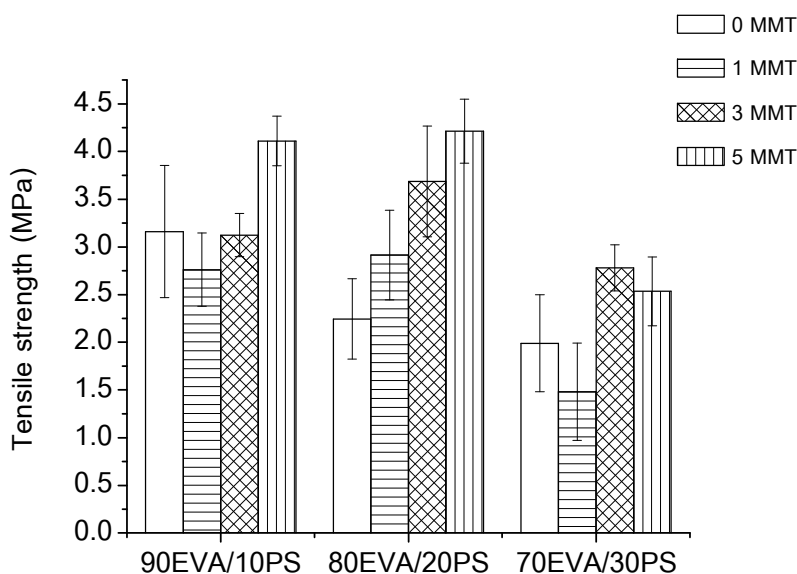


รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของนาโนคอมพอสิตของ (a) 70EVA/30PS/1MMT, (b) 70EVA/30PS/3MMT, (c) 70EVA/30PS/5MMT, (d) 80EVA/20PS/1MMT, (e) 80EVA/20PS/3MMT, (f) 80EVA/20PS/5MMT, (g) 90EVA/10PS/1MMT, (h) 90EVA/10PS/3MMT และ (i) 90EVA/10PS/5MMT

4.5 สมบัติด้านความทนแรงดึงของวัสดุนาโนคอมพอสิต

4.5.1 ความทนแรงดึง

ผลการทดสอบความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (อีวีเอ/พอลิสไตรีน) และพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิต (อีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์) ที่เตรียมได้โดยวิธีการหล่อเป็นแผ่นในแม่แบบที่ทำจากกระจก แล้วนำมาตัดเป็นชิ้นทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6

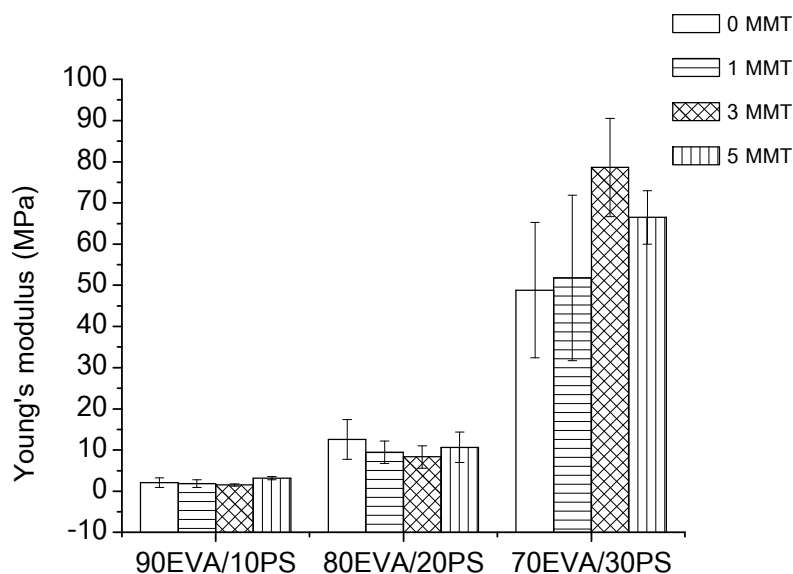


รูปที่ 4.6 ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (อีวีเอ/พอลิสไตรีน) และพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิต (อีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์)

จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่างอีวีเอและพอลิสไตรีนมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอีวีเอที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความมีขั้วของหมู่แอซีเทตในโมเลกุลของอีวีเอที่ทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูง ซึ่งส่งผลให้ค่าความทนแรงดึงสูงขึ้นตามปริมาณของอีวีเอที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน การใส่พอลิสไตรีนที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรจำนวนมากในพอลิเมอร์ผสมทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดการเกาะเป็นกลุ่มก้อน และมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ไม่ได้ ซึ่งได้ส่งผลให้ความทนแรงดึงลดลง อย่างไรก็ตาม การใส่มอนต์มอริลโลไนต์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมในปริมาณที่เหมาะสมทำให้วัสดุนาโนคอมพอสิตที่ได้มีความทนแรงดึงเพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ 4.21 MPa เมื่ออัตราส่วนระหว่างอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์ เท่ากับ 80/20/5 การที่ความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการมีอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิว (interfacial interaction) ของมอนต์มอริลโลไนต์กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เกิดจากการที่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้สอดแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นซิลิเกตของมอนต์มอริลโลไนต์ นอกจากนี้ การเตรียมนาโนคอมพอสิตของอีวีเอ/มอนต์มอริลโลไนต์สามารถทำได้ง่าย เพราะอีวีเอประกอบด้วยหมู่มีขั้วดังที่ได้กล่าวมาแล้วจึงเกิดอันตรกิริยากับมอนต์มอริลโลไนต์อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นนาโนคอมพอสิตที่มีอีวีเอและมอนต์มอริลโลไนต์จำนวนมากจึงมีความทนแรงดึงสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.6

4.5.2 ยั่งส์มอดุลัส

ผลของยั่งส์มอดุลัสที่ได้จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (อีวีเอ/พอลิสไตรีน) และพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิต (อีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์) แสดงไว้ในรูปที่ 4.7



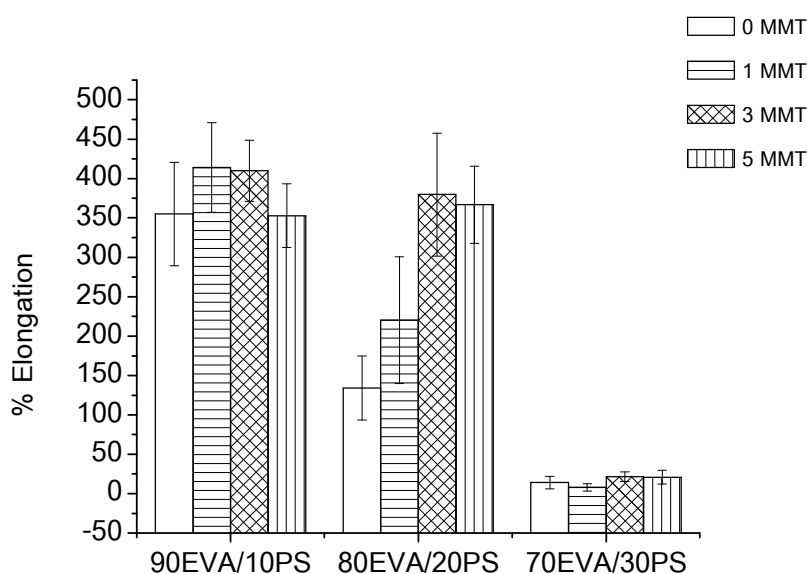
รูปที่ 4.7 ยั่งส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม (อีวีเอ/พอลิสไตรีน) และพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิต (อีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์)

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่ายั่งส์มอดุลัสของพอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิต ซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้ว่าชิ้นงานมีค่ายั่งส์มอดุลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งการใส่มอนต์มอริลโลไนต์เข้าไปในปริมาณเพียงพอที่ทำให้มอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น การที่ชิ้นงานมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นวัสดุที่มีความแข็งตึง และมอนต์มอริลโลไนต์มีลักษณะพื้นฐานวิทยาเป็นแผ่น (platelet) จึงสามารถขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของอีวีเอได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ โมเลกุลของอีวีเอและพอลิสไตรีนบางส่วนยังได้สอดแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นซิลิเกต จึงทำให้จำกัดการเคลื่อนไหวของพอลิเมอร์ทั้งสองอีกด้วย ดังนั้น วัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่มียั่งส์มอดุลัสสูงที่สุด คือ ที่มีอัตราส่วนของอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 70/30/3 แต่ที่อัตราส่วน 70/30/5 มีค่ายั่งส์มอดุลัสลดลงเนื่องจากมีปริมาณพอลิสไตรีนและมอนต์มอริลโลไนต์มากทำให้ทั้งพอลิสไตรีนและมอนต์มอริลโลไนต์เกิดการเกาะกลุ่มกันเอง ทำให้

เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อของพอลิสไตรีนและมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้ปริมาตรอิสระรอบๆ โมเลกุลของอีวีเอมีมากขึ้น อีวีเอจึงสามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย ทำให้ค่ายังสัมมอดุลล์ลดลง

4.5.3 เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (% Elongation)

ผลของเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ที่ได้จากการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสม (อีวีเอ/พอลิสไตรีน) และพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิต (อีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์) แสดงไว้ในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม (อีวีเอ/พอลิสไตรีน) และพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิต (อีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์)

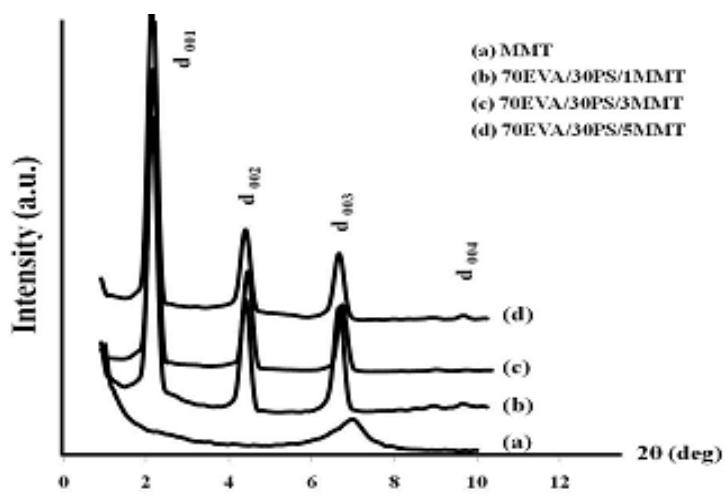
จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของพอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิต ซึ่งสังเกตพบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อปริมาณของพอลิสไตรีนในชิ้นงานมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งเปราะ ดังนั้นเมื่อปริมาณพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการยืดตัวลดลง ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าต่ำสุดที่อัตราส่วนระหว่างอีวีเอ/พอลิสไตรีน เท่ากับ 70/30 และการใส่มอนต์มอริลโลไนต์เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมอัตราส่วนนี้ ไม่ได้ช่วยปรับปรุงให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าพอลิเมอร์ผสมที่อัตราส่วนอื่น (80EVA/20PS และ 90EVA/10PS) การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถปรับปรุงเปอร์เซ็นต์การยืดตัวได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ แต่การเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การยึดตัวไม่ได้แปรตามปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเพราะยังมีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นจะยังมีอันตรกิริยากับพอลิเมอร์มากขึ้นจนทำให้ความสามารถในการยึดตัวของชิ้นงานลดลง

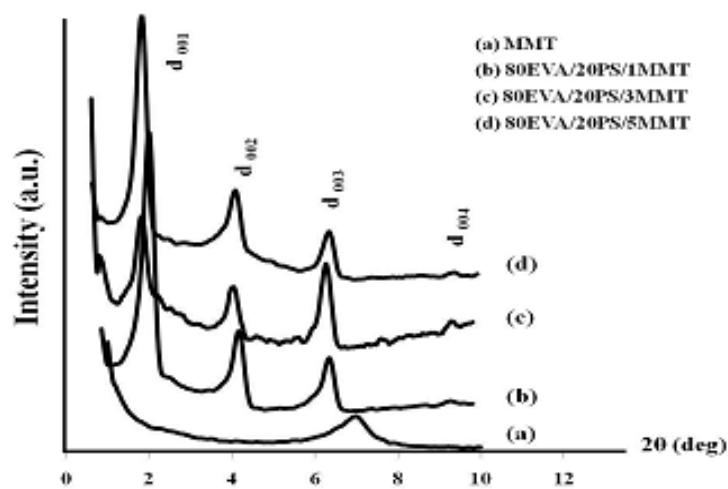
4.6 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิค XRD

รูปที่ 4.9 แสดงกราฟ XRD ของมอนต์มอริลโลไนต์ และนาโนคอมพอสิตที่ประกอบด้วยอีวีเอ พอลิสไตรีน และมอนต์มอริลโลไนต์อัตราส่วนต่างๆ กัน โดยมอนต์มอริลโลไนต์บริสุทธิ์แสดงพีกของระนาบ 001 ที่ $2\theta = 7^\circ$ ซึ่งสอดคล้องกับค่าระยะ d_{001} เท่ากับ 1.261 นาโนเมตร ขณะที่พีกของระนาบ 001 ของมอนต์มอริลโลไนต์ในวัสดุนาโนคอมพอสิตเลื่อนเข้าสู่ค่า 2θ ที่ลดลง ซึ่งแสดงถึงระยะ d_{001} มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้แสดงว่าสายโซ่พอลิเมอร์ได้สอดแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ จึงมีผลทำให้ค่า d_{001} เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่า d_{001} จะคำนวณจากพีกแรกที่ปรากฏอยู่ในกราฟ XRD นอกจากนี้ ยังพบพีกที่ตำแหน่ง 2θ อื่นๆ ของระนาบ 002, 003, 004 อีกด้วย ซึ่งแสดงถึงการมีโครงสร้างแบบสอดแทรกที่ค่อนข้างเป็นระเบียบ [28] นอกจากนี้ ตารางที่ 4.2 และ 4.3 ยังแสดงค่า 2θ ที่อ่านได้จากกราฟ XRD ทั้งหมด และที่คำนวณค่า d -spacing ได้จากสมการของแบรกก์

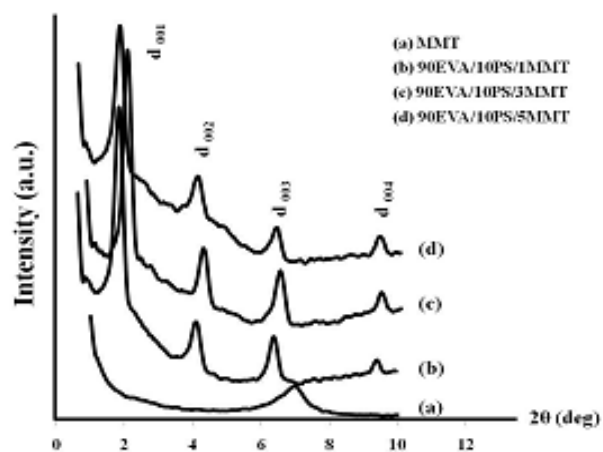
จากรูปที่ 4.9 พบว่า ปรากฏพีกที่สำคัญ 4 พีก ที่ 2θ ประมาณ 2.18° , 4.34° , 6.54° และ 9.44° ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ ไม่มีผลต่อโครงสร้างผลึกของนาโนคอมพอสิต



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.9 กราฟ XRD ของ (a-c) มอนต์มอริลโลไนต์ และอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์ นาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 1, 3 และ 5 phr เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมอีวีเอ/พอลิสไตรีนที่อัตราส่วน 70/30, 80/20 และ 90/10

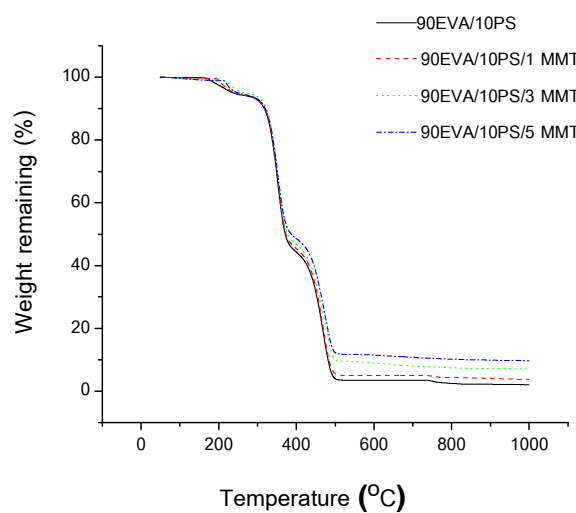
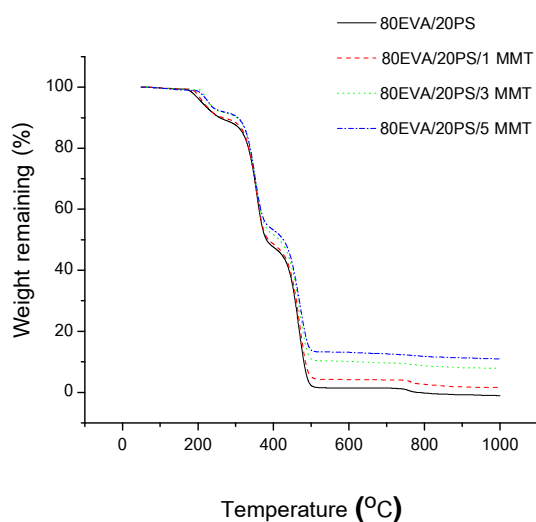
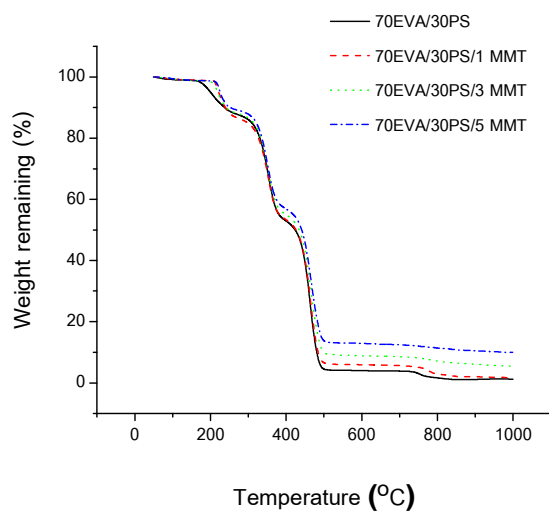
ตารางที่ 4.2 ค่า 2θ ของพีคต่างๆ ที่ปรากฏในกราฟ XRD

EVA/PS/MMT	$2\theta_{001}$	$2\theta_{002}$	$2\theta_{003}$	$2\theta_{004}$
MMT	7			
70/30/1MMT	2.2	4.36	6.54	9.44
70/30/3MMT	2.2	4.38	6.56	9.44
70/30/5MMT	2.2	4.36	6.54	9.44
80/20/1MMT	2.16	4.32	6.52	9.46
80/20/3MMT	2.18	4.36	6.54	9.48
80/20/5MMT	2.16	4.34	6.54	9.46
90/10/1MMT	2.16	4.34	6.54	9.46
90/10/3MMT	2.16	4.34	6.54	9.44
90/10/5MMT	2.16	4.34	6.52	9.42

ตารางที่ 4.3 ค่า d-spacing ของมอนต์มอริลโลไนต์ที่คำนวณจากสมการของแบรกก์

EVA/PS/MMT	d_{001}	d_{002}	d_{003}	d_{004}
MMT100	1.26			
70/30/1MMT	4.01	2.02	1.35	0.94
70/30/3MMT	4.01	2.02	1.35	0.94
70/30/5MMT	4.01	2.02	1.35	0.94
80/20/1MMT	4.08	2.04	1.35	0.93
80/20/3MMT	4.05	2.02	1.35	0.93
80/20/5MMT	4.08	2.03	1.35	0.93
90/10/1MMT	4.08	2.03	1.35	0.93
90/10/3MMT	4.085	2.03	1.35	0.94
90/10/5MMT	4.085	2.03	1.35	0.94

4.7 เสถียรภาพทางความร้อนที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA



รูปที่ 4.10 ร้อยละการสลายตัวเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.4 แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของ SDS, อีวีเอ, พอลิสไตรีน, พอลิเมอร์ผสมของ อีวีเอ/พอลิสไตรีน และนาโนคอมพอสิตของอีวีเอ/พอลิสไตรีน/มอนต์มอริลโลไนต์ที่ตรวจสอบด้วย เทคนิค TGA

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัวที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA

Blend system	Onset ₁ (°C)	Onset ₂ (°C)	Onset ₃ (°C)	50% Decomposition temperature (°C)
70EVA/30PS	173	318	432	425
70EVA/30PS/1MMT	212	319	433	430
70EVA/30PS/3MMT	207	318	430	440
70EVA/30PS/5MMT	216	316	431	445
80EVA/20PS	174	314	430	385
80EVA/20PS/1MMT	186	315	432	395
80EVA/20PS/3MMT	208	319	438	420
80EVA/20PS/5MMT	203	318	436	431
90EVA/10PS	168	319	433	378
90EVA/10PS/1MMT	194	320	437	380
90EVA/10PS/3MMT	216	317	432	380
90EVA/10PS/5MMT	210	319	435	395
EVA	319	436		
PS	215	415		
SDS	204			

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นงานอีวีเอ พบว่า มีอุณหภูมิ สลายตัวอยู่สลายตัว 2 ช่วง คือ ประมาณ 319°C ที่เกิดจากการสลายตัวของหมู่แอซีเทต และการ

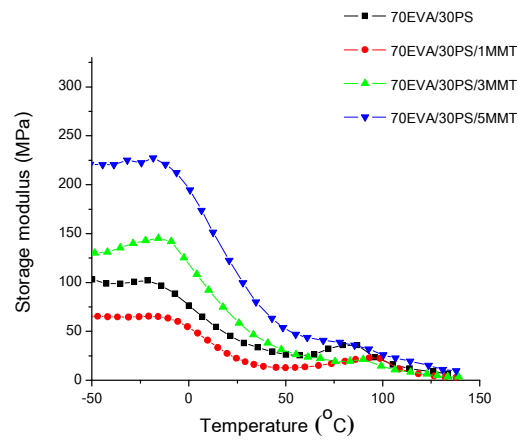
สลายตัวช่วงที่สองที่ประมาณ 436°C ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสายโซ่เอทิลีน (ethylene chain) [27] ส่วนชิ้นงานของพอลิสไตรีนได้พบการสลายตัวที่อุณหภูมิ 2 ช่วง คือที่ประมาณ 215°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ SDS ที่หลงเหลือจากขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิสไตรีน และที่ประมาณ 415°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิสไตรีน

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์ผสม และพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตพบว่า มี 3 ช่วง คือ ช่วงแรกที่ประมาณ 173-216 องศาเซลเซียส ช่วงที่สองที่ประมาณ 314-320 องศาเซลเซียส และช่วงที่สามประมาณ 430-437 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวของ SDS, อีวีเอ และพอลิสไตรีน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวเมื่อนำหนักของชิ้นงานลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ชิ้นงานที่มีปริมาณอีวีเอสูงมีอุณหภูมิการสลายตัวต่ำกว่า เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของอีวีเอมีค่าต่ำกว่าของพอลิสไตรีน ดังนั้น เมื่อมีปริมาณอีวีเอเพิ่มมากขึ้น จึงมีผลให้อุณหภูมิการสลายตัวโดยรวมมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อใส่มอนต์มอริลโลไนต์เข้าไป ทั้งนี้เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารอนินทรีย์ที่ประกอบด้วยชั้นของซิลิเกตซึ่งมีอุณหภูมิการสลายตัวสูง รวมทั้งมีสมบัติการสกัดกั้น (barrier properties) สูง จึงป้องกันความร้อนไม่ให้ผ่านพอลิเมอร์ได้เร็ว และขัดขวางการระเหยของโมเลกุลเล็กๆ ที่เกิดระหว่างการสลายตัว ดังนั้น สูตรที่มีมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นจึงมีอุณหภูมิการสลายตัวสูงขึ้น นั่นคือมอนต์มอริลโลไนต์ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับวัสดุนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้

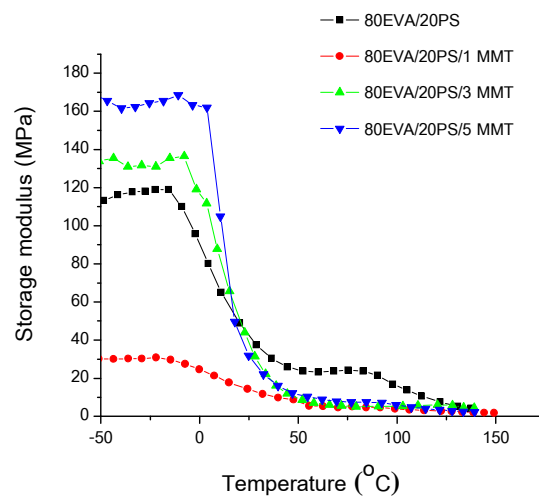
4.8 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical property)

การตรวจสอบสมบัติเชิงกลพลวัตเพื่อวัดสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้แรงที่ไม่ต่อเนื่อง (periodic forces) ซึ่งผลของชั้นซิลิเกตในมอนต์มอริลโลไนต์ต่อค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus, E') ของวัสดุนาโนคอมพอสิตเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มอดุลัสสะสมของพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตทุกอัตราส่วนของอีวีเอ/พอลิสไตรีนที่ได้ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 3 และ 5 phr มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการมีอัตราส่วนระหว่างชั้นซิลิเกตกับสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ จึงมีผลทำให้มอดุลัสสะสมมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิเมอร์ผสมจะช่วยปรับปรุงสมบัติการใช้งานเชิงกลได้ด้วย ในขณะที่ค่ามอดุลัสสะสมของนาโนคอมพอสิตที่ใส่มอนต์มอริลโลไนต์ 1 phr มีค่าลดลง อาจเนื่องจากการ

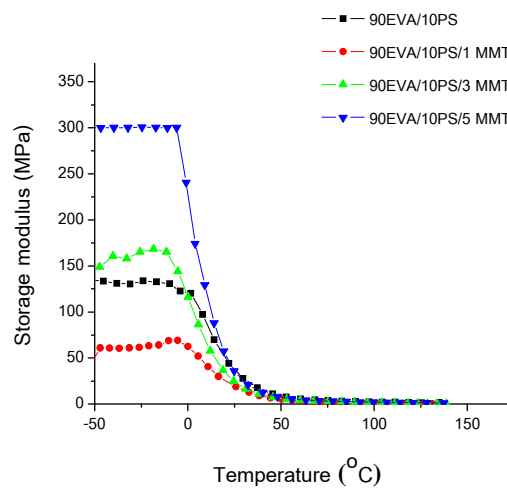
สอดแทรกของสายโซ่พอลิเมอร์เข้าไปในมอนต์มอริลโลไนต์เกิดเพียงเล็กน้อย และยังขัดขวางการจัดเรียงตัวของอีวีเออีกด้วย ซึ่งมีผลให้ปริมาตรเสรี (free volume) รอบๆ สายโซ่อีวีเอเพิ่มขึ้น จึงทำให้การเคลื่อนที่ของพอลิเมอร์เกิดได้ง่ายขึ้นและมอดุลัสสะสมลดลง



(a)



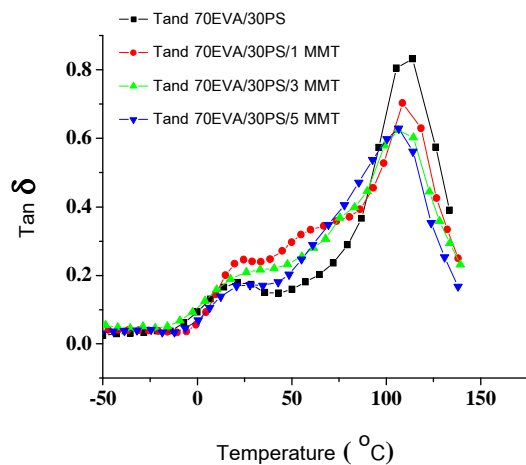
(b)



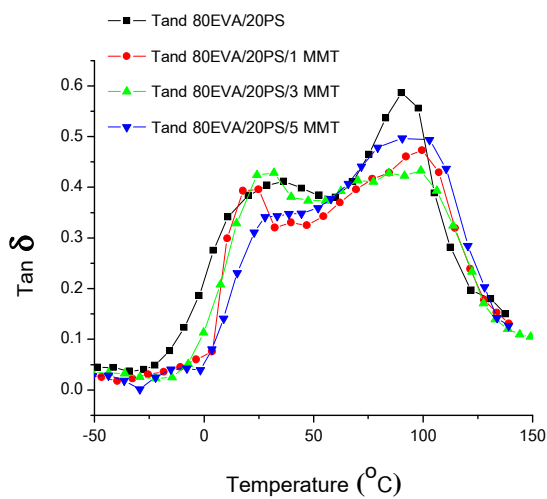
(c)

รูปที่ 4.11 มอดุลัสสะสมเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิต

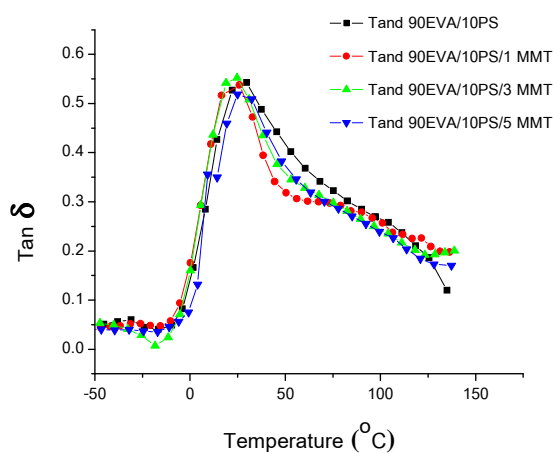
รูปที่ 4.11 แสดงค่า $\tan \delta$ ของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิตเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ พบว่า อุณหภูมิกลาสแทรนซิชัน (glass transition temperature, T_g) ของอีวีเอ และพอลิสไตรีนมีค่าประมาณ 25°C และ 120°C ตามลำดับ ในทุกอัตราส่วนของอีวีเอ/พอลิสไตรีน (70EVA/30PS และ 80EVA/20PS) แต่ที่อัตราส่วนของอีวีเอ/พอลิสไตรีน 90EVA/10PS จะสังเกตเห็นอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของพอลิสไตรีนได้ไม่ชัดเจนเนื่องจากปริมาณของพอลิสไตรีนมีน้อย การใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิเมอร์ผสมพบว่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นั่นแสดงว่าการใส่มอนต์มอริลโลไนต์ในพอลิเมอร์ผสมไม่มีผลต่ออุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิต



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 4.12 ค่า Tan δ เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิต

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สามารถสังเคราะห์พอลิस्टไตรีนที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 15.07 นาโนเมตร และมีเปอร์เซ็นต์ผลได้ประมาณ 96% ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

5.1.2 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพอลิस्टไตรีนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่า โมเลกุลของพอลิस्टไตรีนรวมตัวกันมีอนุภาคเป็นทรงกลม

5.1.3 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อได้เติมมอนอเมอร์โพลีโพรพิลีนเข้าไป เนื่องมาจากการสอดแทรกของสายโซ่พอลิเมอร์เข้าไประหว่างชั้นซิลิกาของมอนอเมอร์โพลีโพรพิลีน

5.1.4 การผสมมอนอเมอร์โพลีโพรพิลีนเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมในปริมาณที่เหมาะสม พบว่า สามารถปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง ยังสัมผัส และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของวัสดุนาโนคอมพอสิต

5.1.5 จากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของชิ้นงานด้วยเทคนิค XRD พบว่า พอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างเป็นแบบสอดแทรก

5.1.6 จากการตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค TGA พบว่า การใส่มอนอเมอร์โพลีโพรพิลีนเข้าไปในพอลิเมอร์ผสมได้ทำให้นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากมอนอเมอร์โพลีโพรพิลีนเป็นสารอินทรีย์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง มีสมบัติการสกัดกั้นที่ดี

5.1.7 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตด้วยเทคนิค DMA พบว่า พอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิตมีความอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นเมื่อใส่มอนอเมอร์โพลีโพรพิลีนในปริมาณ 3 และ 5 phr เนื่องจากการมีอัตราการกระจายระหว่างชั้นซิลิกาเกิดกับสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลช่วยปรับปรุงสมบัติการใช้ของผลิตภัณฑ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิตจากพอลิเมอร์อื่นๆ เพื่อให้ได้วัสดุประเภทใหม่ๆ ที่มีสมบัติเหมาะกับการใช้งาน

5.2.2 ทดลองเตรียมพอลิเมอร์ผสมนาโนคอมพอสิตจากสารอินทรีย์ที่มีอนุภาคระดับนาโนประเภทอื่นๆ เช่น ซิลิกา คาร์บอนนาโนทิวบ์ และไททาเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารเหล่านี้

รายการอ้างอิง

- [1] Pramanik, M. 2001. Preparation and Properties of Ethylene Vinyl Acetate-Clay Hybrids. Materials Science Letters 20: 1377-1380.
- [2] MTEC. Ethylene Vinyl Acetate. 2008. National Metal and Materials Technology Center [Online]. Available from : <http://www.mtec.or.th> [2009, March]
- [3] SpecialChem. Ethylene Copolymer. 2009. SpecialChem [Online]. Available from : <http://www.specialchem4adhesives.com/tc/ethylene-copolymers> [2009, March]
- [4] ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2527. เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. สงขลา: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [5] Chuayjuljit, S., and others. 2005. Use of Natural Rubber-g-Polystyrene as a Compatibilizer in Casting Natural Rubber/Polystyrene Blend Films. Journal of Applied Polymer Science 95: 826-831.
- [6] ระพีพรรณ ทองระอา. 2548. การเตรียมนาโนคอมโพสิตของพีวีซี/อีวีเอ/มอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] Clois, E.P. and Gary, W.B. 2004. Physical Properties of Polymer/Clay Nanocomposites. Texas: Texas State University.
- [8] Bergaya, F., Theng, B.K.G. and Lagaly, G. 2006. Handbook of Clay Science. Elsevier.
- [9] บงกช นันทบุญเลิศ. 2548. การเตรียมนาโนคอมโพสิตของยางธรรมชาติ/อีวีเอ/มอนต์มอริลโลไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] รัตนวรรณ มกรพันธุ์. 2552. นาโนเคลย์/นาโนคอมโพสิต (Nanoclay/Nanocomposites) [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.thaiscience.com/lab_vol/P18/NANOCLAY.asp [2552, มกราคม 3]
- [11] Ray, S.S., Pouliot, S., Bousmina, M. and Utracki, L.A. 2004. Role of Organically Modified Layered Silicate as an Active Interfacial Modifier in Immiscible Polystyrene/Polypropylene Blends. Polymer 45: 8403-8413.

- [12] Ray, S.S. and Okamoto, M. 2003. Polymer/Layered Silicate Nanocomposites: A Review from Preparation to Processing. Progress in Polymer Science 28: 1539-1641.
- [13] Kojima, Y., Usuki, A., Kawasumi, M., Okada, A., Kurauchi, T. and Kamigaito, O. 1993. Synthesis of Nylon 6-Clay Hybrid by Montmorillonite Intercalated with 3-Caprolactam. Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry 31: 983.
- [14] Preston, W. 1948. Some Correlating Principles of Detergent Action. Journal of Physical Colloid Chemistry 52: 84-97.
- [15] Capek, I. 1999. Radical Polymerization of Polar Unsaturated Monomers in Direct Microemulsion Systems. Advances in Colloid and Interface Science 80: 85-149.
- [16] Encyclopedia Britannica. 2009. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1426100/chemistry-of-industrial-polymers> [2009, May]
- [17] Elaissari, A. 2003. Colloidal Polymers. New York: Marcel Dekker.
- [18] Stoffer, J.O. and Bone, T. 1980. Polymerization in Water-in-Oil Microemulsion Systems. Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition 18: 2641-2648.
- [19] Antonietti, M. 1995. Polymerization in Microemulsions-a New Approach to Ultrafine, Highly Functionalized Polymer Dispersions. Macromolecular Chemistry and Physics 196: 441-466.
- [20] Jayakrishnan, A., and Shah, D.O. 1984. Polymerization of Oil-in-Water Microemulsion: Polymerization of Styrene and Methyl Methacrylate. Journal of Polymer Science: Polymer Letters Edition 22: 31-38.
- [21] He, G., Pan, Q., and Rempel, G. L. 2003. Synthesis of Poly(methyl methacrylate) Nanosize Particles by Differential Microemulsion Polymerization. Macromolecular Rapid Communications 24: 585-588.
- [22] He, G., Pan, Q., and Rempel, G.L. 2007. Modeling of Differential Microemulsion Polymerization for Synthesizing Nanosized Poly(methyl methacrylate) Particles. Industrial Engineering and Chemistry Research 46: 1682-1689.

- [23] He, G., Pan, Q., and Rempel, G.L. 2007. Differential Microemulsion Polymerization of Styrene: A Mathematical Kinetic Model. Journal of Applied Polymer Science 105: 2129-2137.
- [24] He, G., and Pan, Q. 2004. Synthesis of Polystyrene and Polystyrene/Poly-(methyl/methacrylate) Nanoparticles. Macromolecular Rapid Communications 25: 1545-1548.
- [25] Nshuti, C.M. and Wilkie, C.A. 2007. Ferrocene and Ferrocenium Modified Clays and Their Styrene and EVA Composites. Polymer Degradation and Stability 92: 1803-1812.
- [26] Pramanik, M., Srivastava, S.K. and Samantaray, B.K. 2001. Preparation and Properties of Ethylene Vinyl Acetate-Clay Hybrids. Journal of Materials Science Letters 20: 1377-1380.
- [27] Zhang, W., Chen, D., Zhao, Q., and Fang, Y. 2003. Effects of different Kinds of clay and different vinyl acetate content on the morphology and properties of EVA/clay nanocomposites. Polymer 44: 7953-7961.
- [28] Liang, Y., and others. 2005. Preparation and properties of isobutylene-isoprene rubber (IIR)/clay nanocomposites. Polymer Testing 24: 12-17.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก. ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของพอลิไสตรีนนาโนเลเทกซ์

สารตัวอย่าง	ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
PS	15.05	15.07	0.04
	15.12		
	15.04		

ภาคผนวก ข

ตาราง ข-1 ค่าความทนแรงดึงของอีวีเอ พอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ และมอนต์มอริลโลไนต์
นาโนคอมพอสิต

สารตัวอย่าง EVA/PS/MMT	ค่าสูงสุด (MPa)	ค่าต่ำสุด (MPa)	ค่าเฉลี่ย (MPa)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
70/30	3.0026	1.2669	1.9902	0.50767
70/30/1MMT	2.4681	0.88901	1.4815	0.5098
70/30/3MMT	3.2217	2.4190	2.7801	0.24296
70/30/5MMT	3.0256	2.0186	2.5336	0.36188
80/20	2.7989	1.6334	2.2448	0.42281
80/20/1MMT	3.6668	2.2191	2.9162	0.47018
80/20/3MMT	4.5599	2.7786	3.6865	0.57984
80/20/5MMT	5.0364	3.8364	4.2132	0.33645
90/10	4.4373	2.3910	3.1602	0.6918
90/10/1MMT	3.4505	2.4239	2.7611	0.38454
90/10/3MMT	3.4638	2.6420	3.1239	0.22742
90/10/5MMT	4.6324	3.6998	4.1108	0.26104

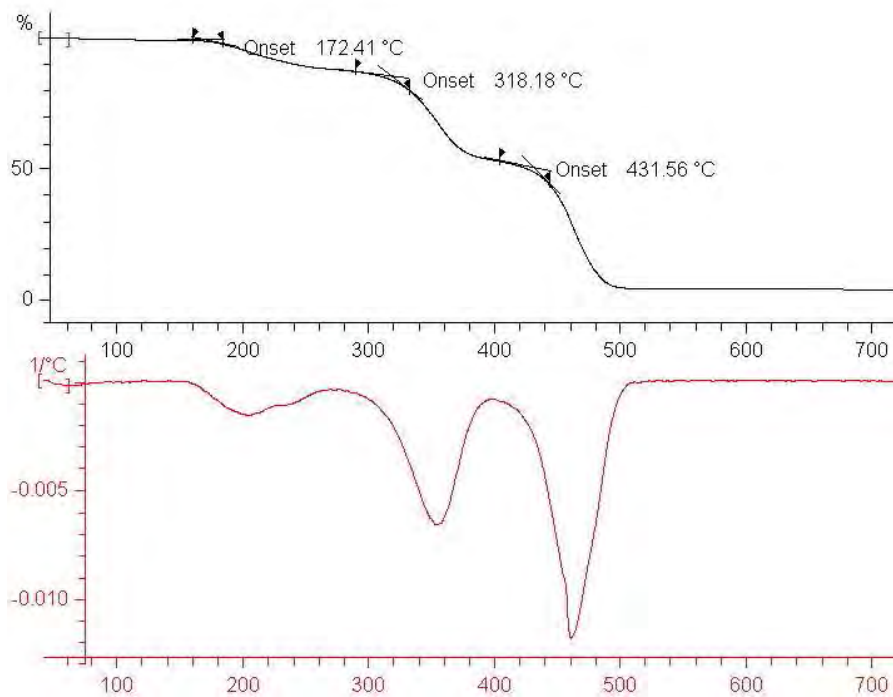
ตาราง ข-2 ค่ามอดุลัสของยังของอีวีเอ พอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ และมอนต์มอริลโลไนต์
นาโนคอมพอสิต

สารตัวอย่าง EVA/PS/MMT	ค่าสูงสุด (MPa)	ค่าต่ำสุด (MPa)	ค่าเฉลี่ย (MPa)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
70/30	80.143	33.858	48.825	16.398
70/30/1MMT	85.335	29.498	51.796	20.114
70/30/3MMT	97.561	55.125	78.589	11.934
70/30/5MMT	75.586	53.980	66.474	6.475
80/20	19.630	4.370	12.559	4.831
80/20/1MMT	14.735	5.743	9.438	2.736
80/20/3MMT	11.940	4.645	8.317	2.717
80/20/5MMT	19.328	7.117	10.664	3.685
90/10	3.729	0.733	2.094	1.125
90/10/1MMT	3.941	0.942	1.865	0.972
90/10/3MMT	1.982	1.194	1.495	0.232
90/10/5MMT	3.932	2.591	3.162	0.379

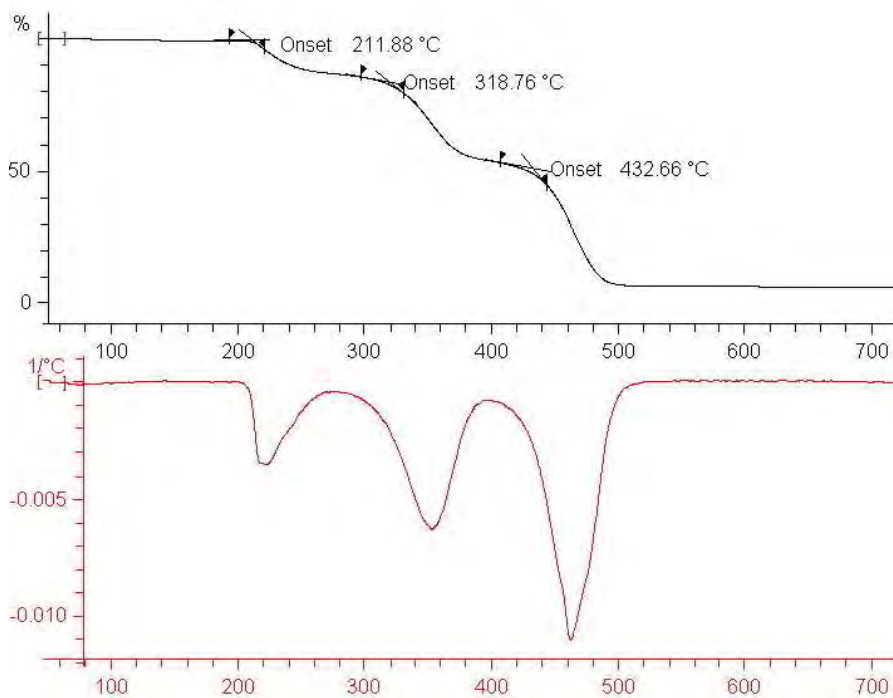
ตาราง ข-3 ร้อยละของการยึดตัวของอีวีเอ พอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ และมอนต์มอริลโลไนต์
นาโนคอมพอสิต

สารตัวอย่าง EVA/PS/MMT	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
70/30	27.952	4.9775	14.259	7.9716
70/30/1MMT	15.831	3.2860	8.0968	4.6472
70/30/3MMT	34.006	13.396	21.489	6.1221
70/30/5MMT	37.968	11.673	20.877	8.8166
80/20	178.2	57.201	133.96	40.649
80/20/1MMT	413.01	136.69	220.3	80.574
80/20/3MMT	494.41	283.06	379.66	77.88
80/20/5MMT	469.71	292.97	366.8	48.813
90/10	469.03	268.60	354.93	65.581
90/10/1MMT	480.96	308.04	413.9	56.959
90/10/3MMT	449.38	344.24	409.82	38.825
90/10/5MMT	398.61	281.30	352.85	40.404

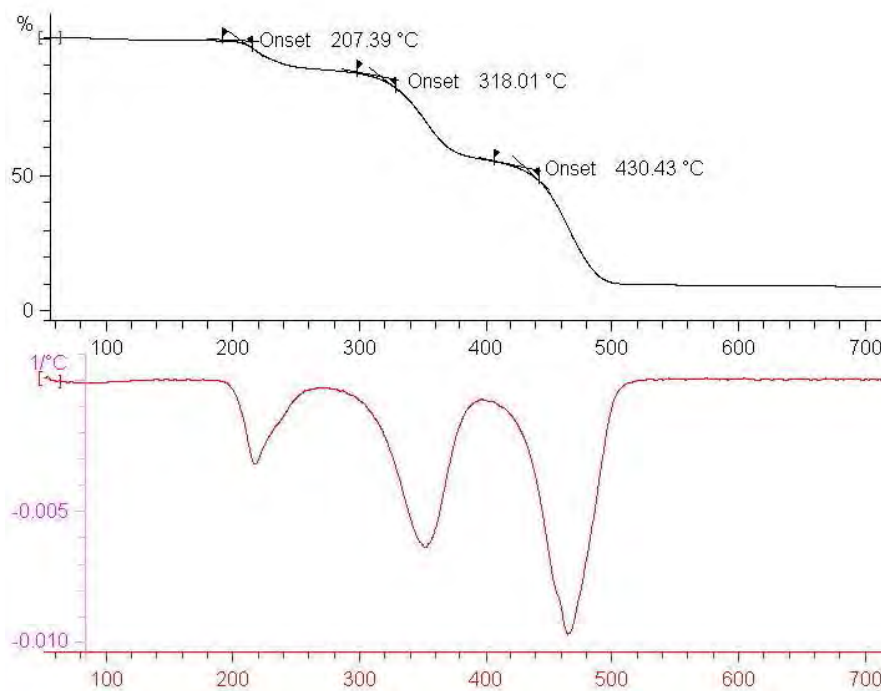
ภาคผนวก ค



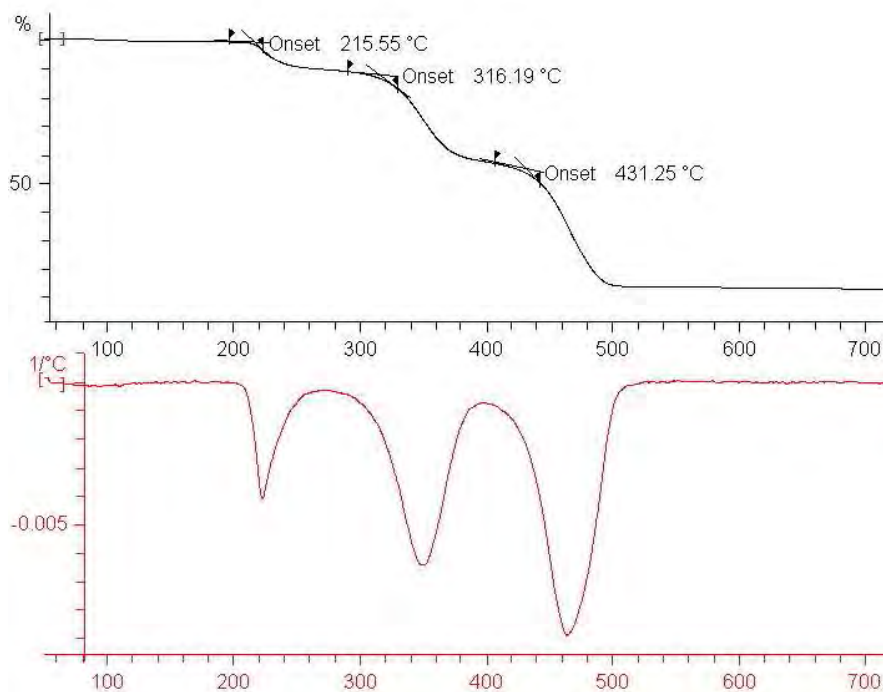
รูป ค-1 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS



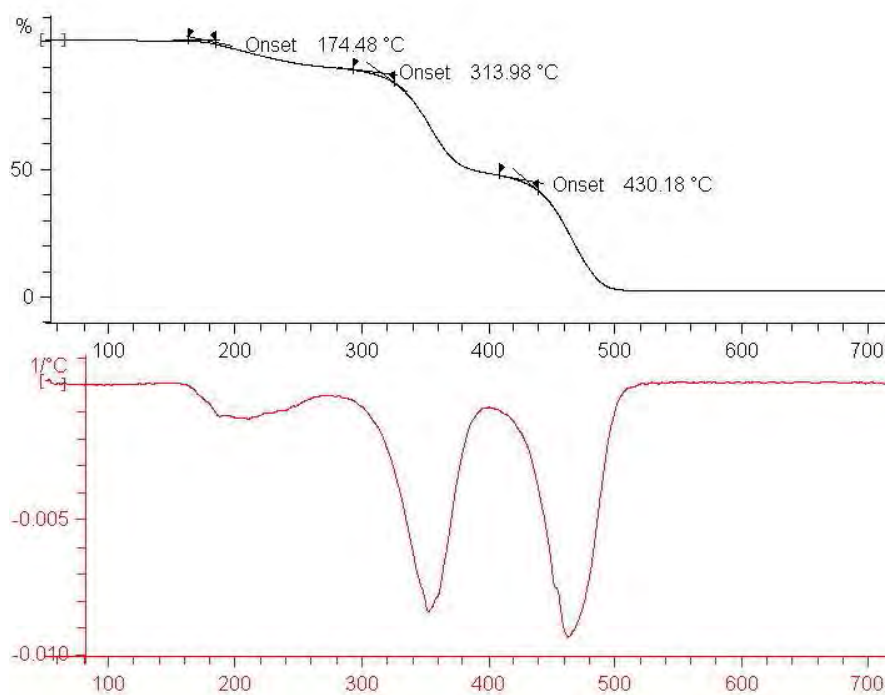
รูป ค-2 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS/1MMT



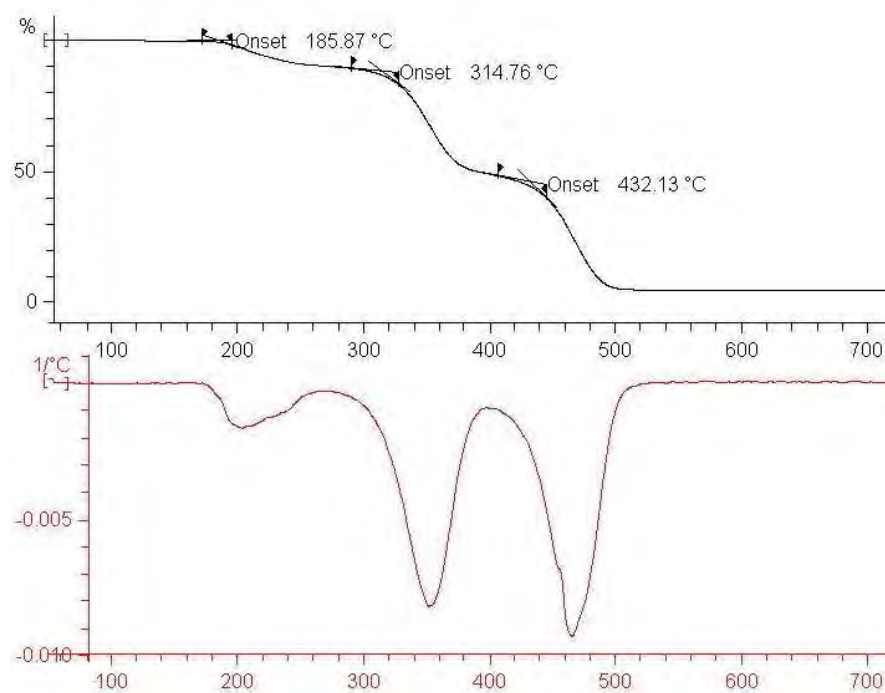
รูป ค-3 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS/3MMT



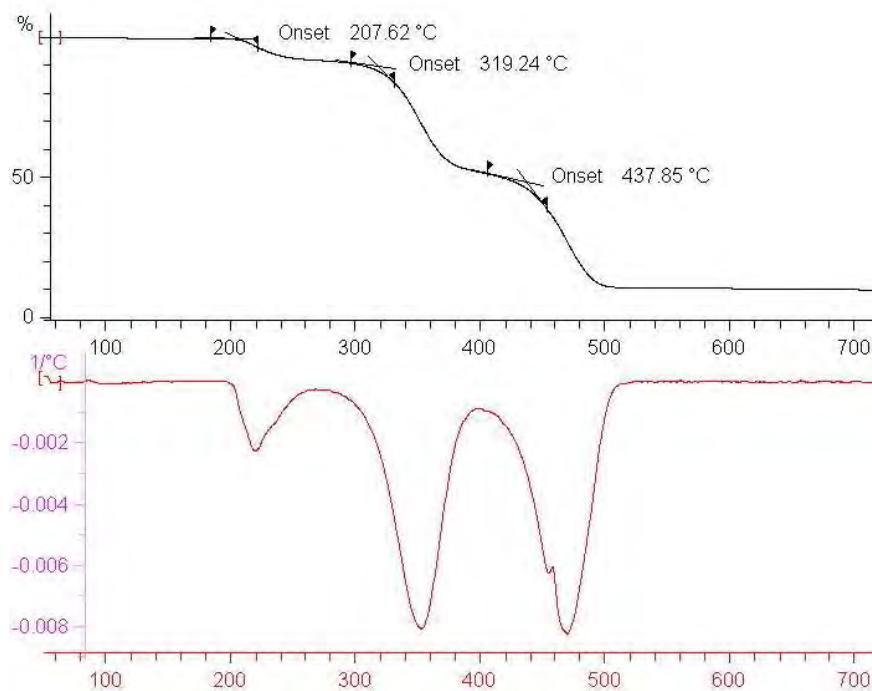
รูป ค-4 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS/5MMT



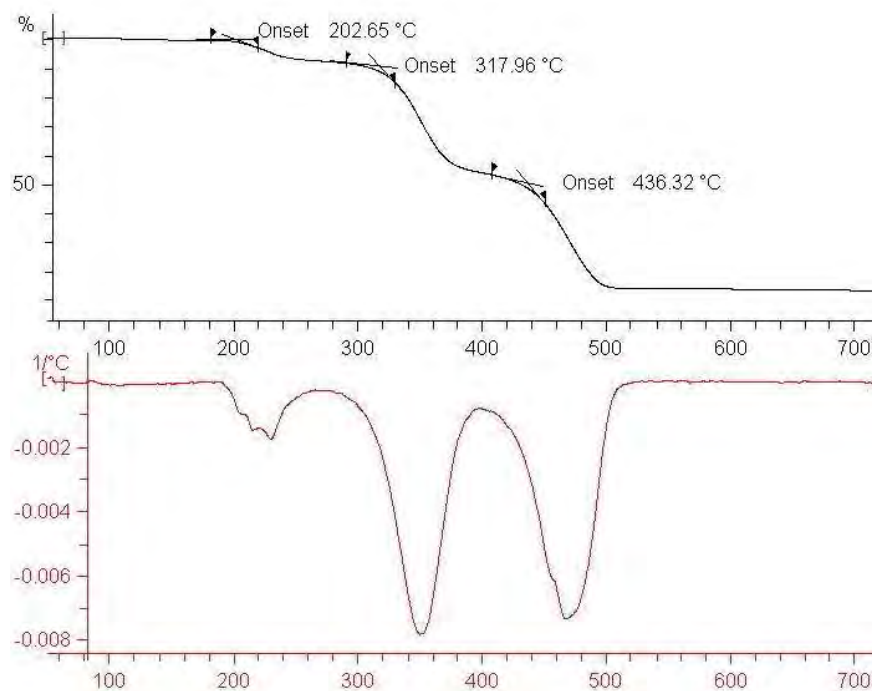
รูป ค-5 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS



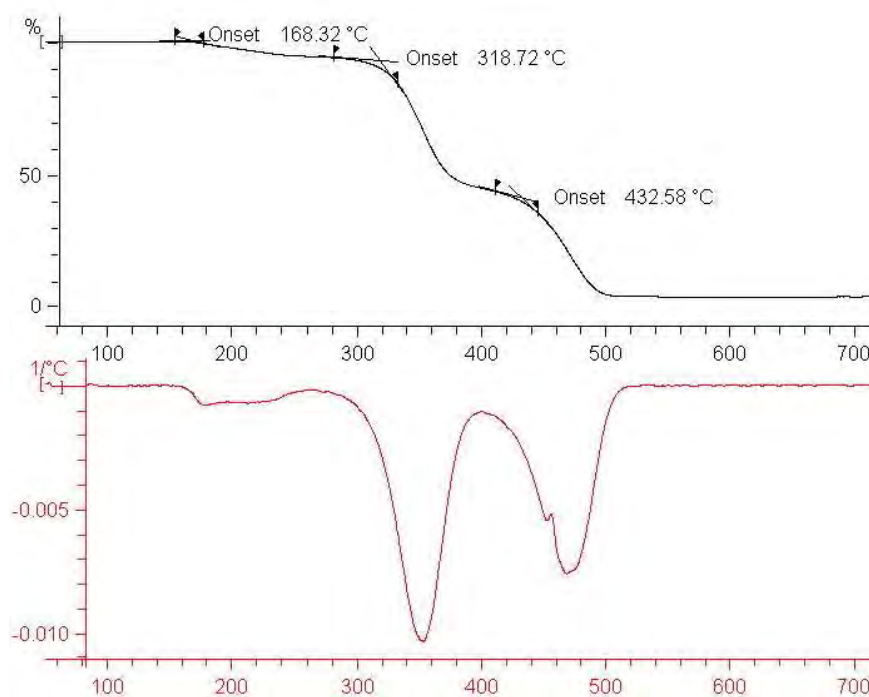
รูป ค-6 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS/1MMT



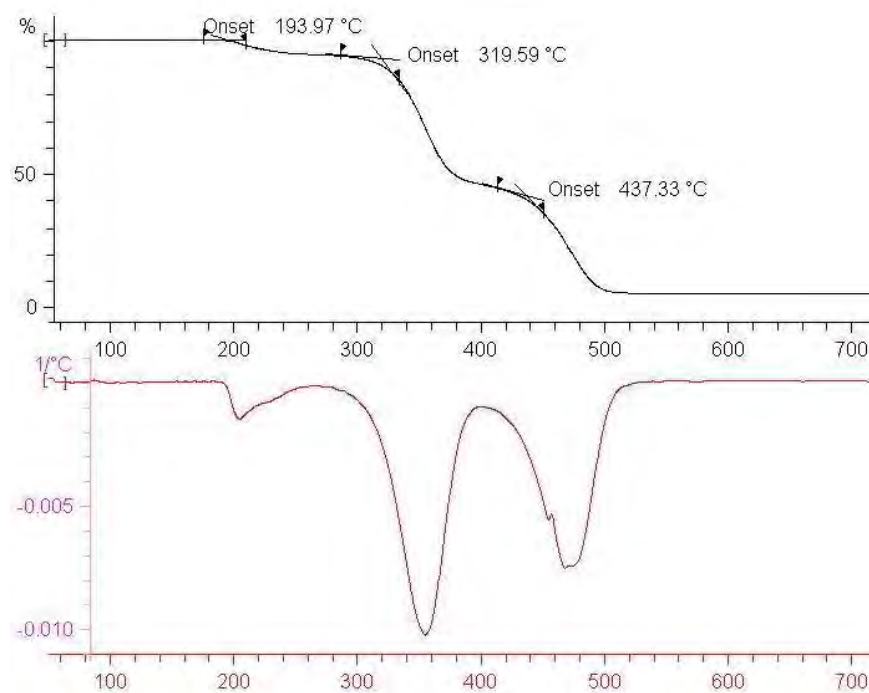
รูป ค-7 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS/3MMT



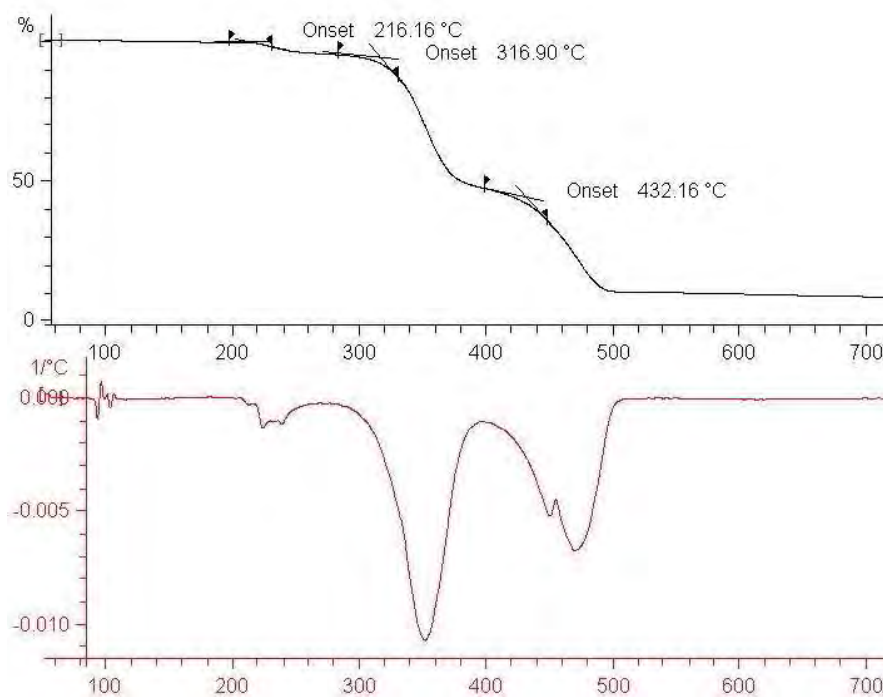
รูป ค-7 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS/5MMT



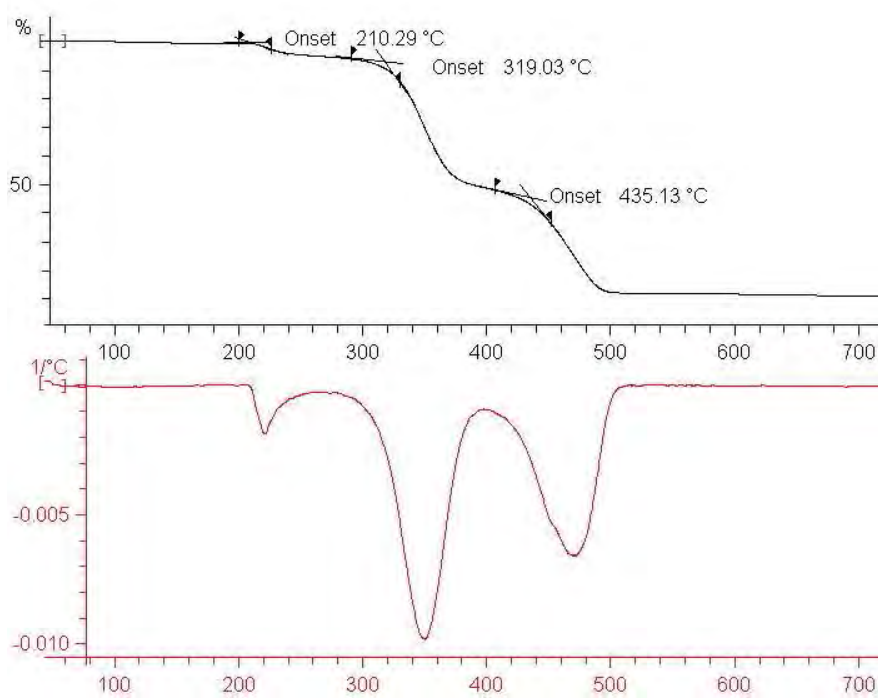
รูป ค-8 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS



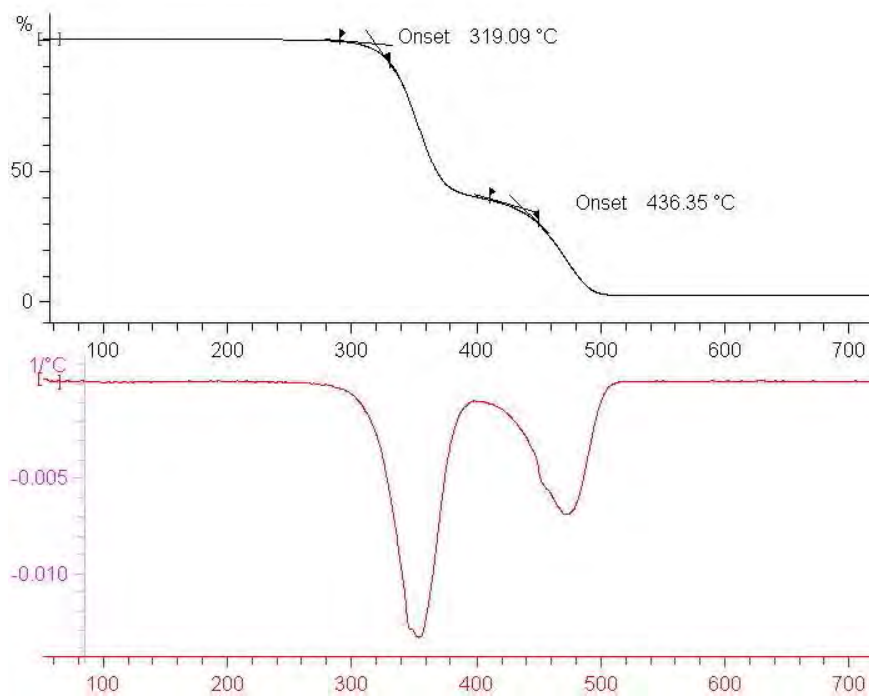
รูป ค-9 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS/1MMT



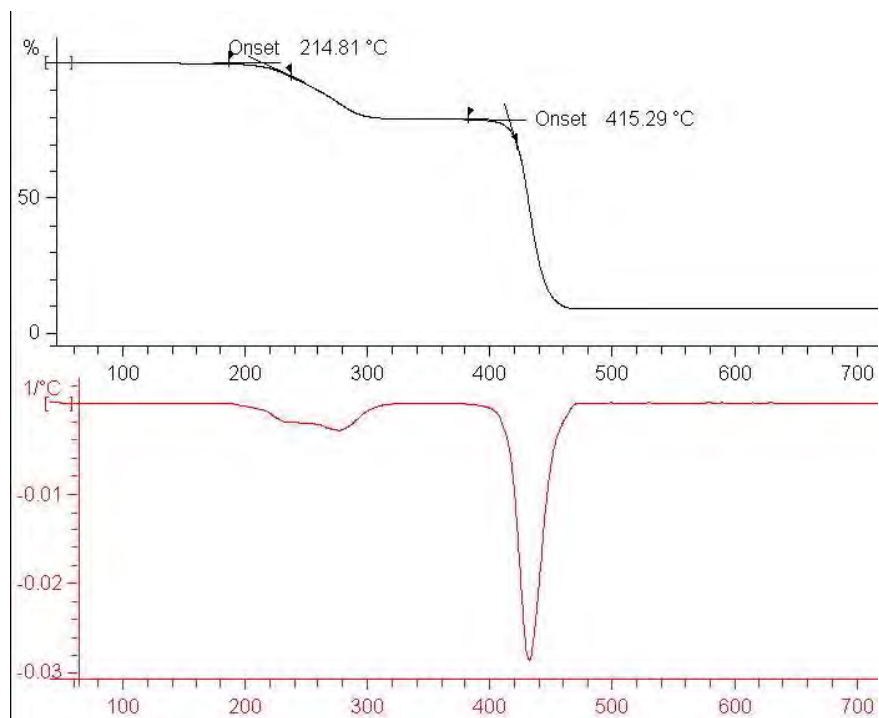
รูป ค-10 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS/3MMT



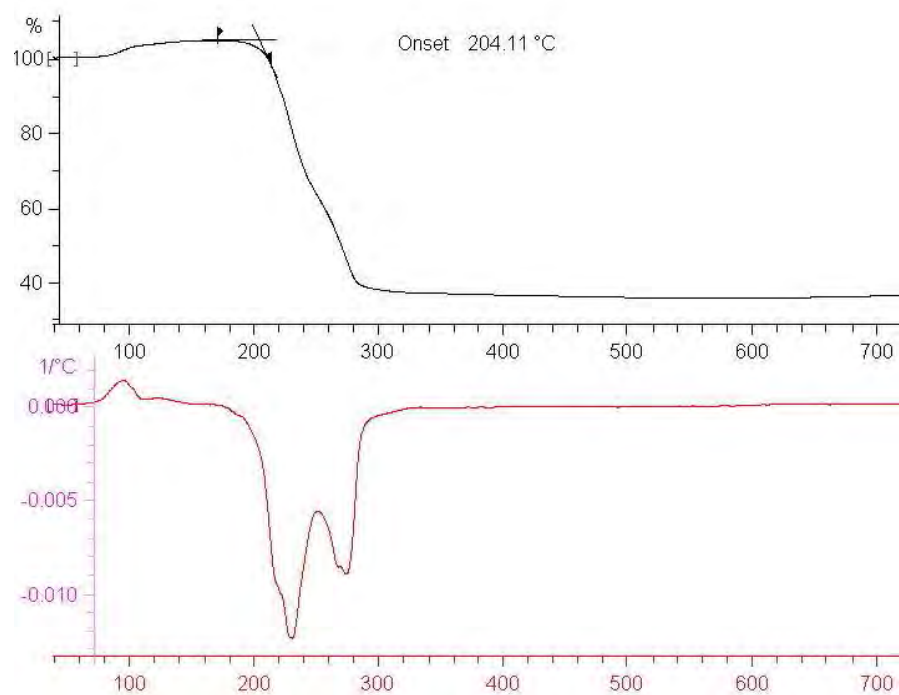
รูป ค-11 TGA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS/5MMT



รูป ค-12 TGA เทอร์โมแกรมของอีวีเอ

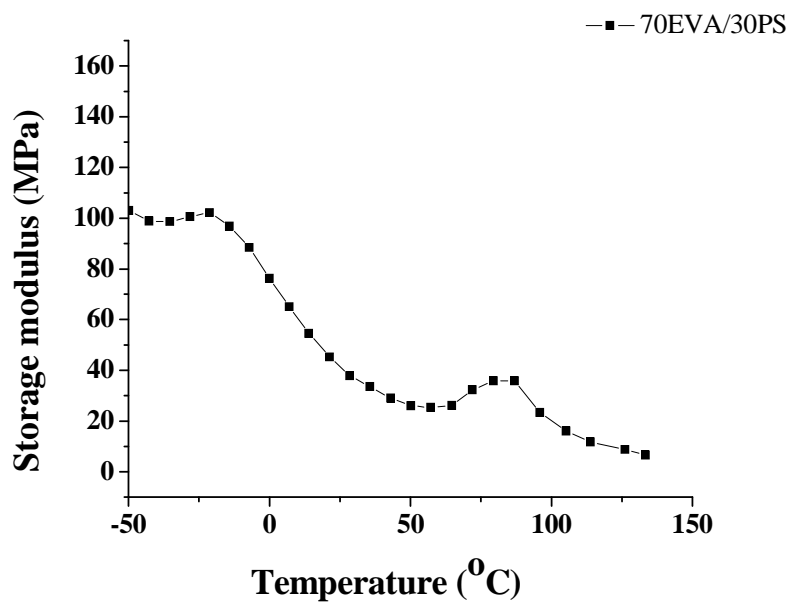


รูป ค-13 TGA เทอร์โมแกรมของพอลิอินโดล

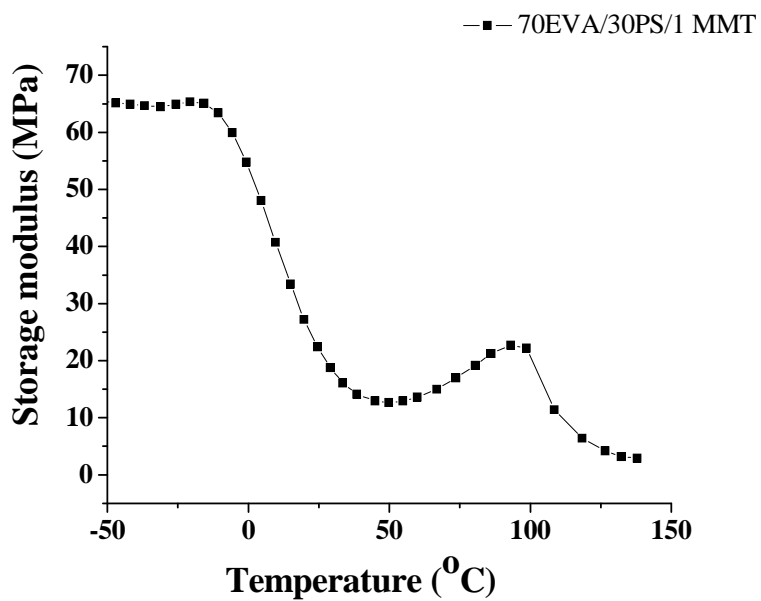


รูป ค-14 TGA เทอร์โมแกรมของไซเดียมโดเดซิลซิลเฟต

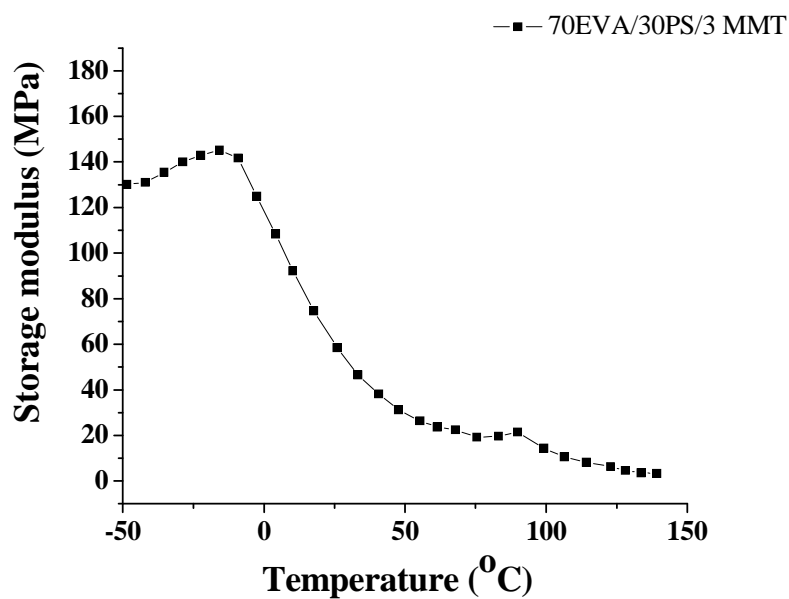
ภาคผนวก ง



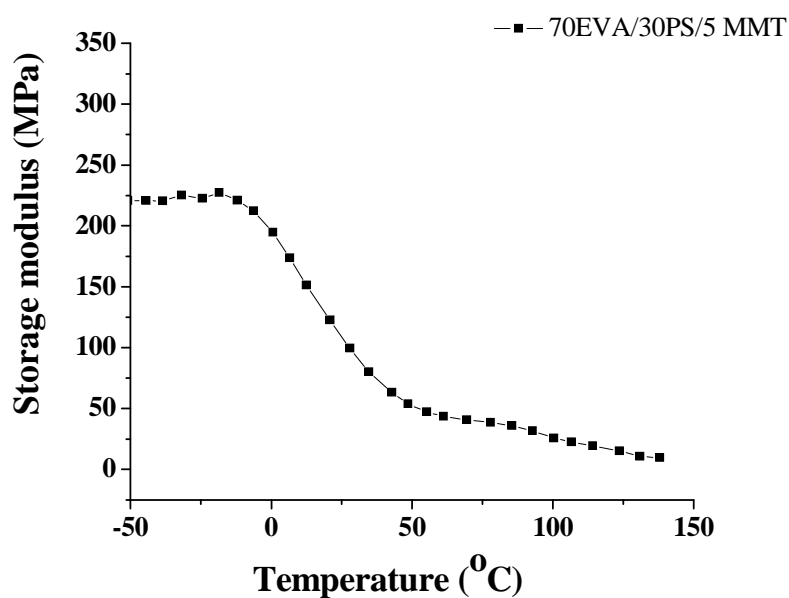
รูป ง-1 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS



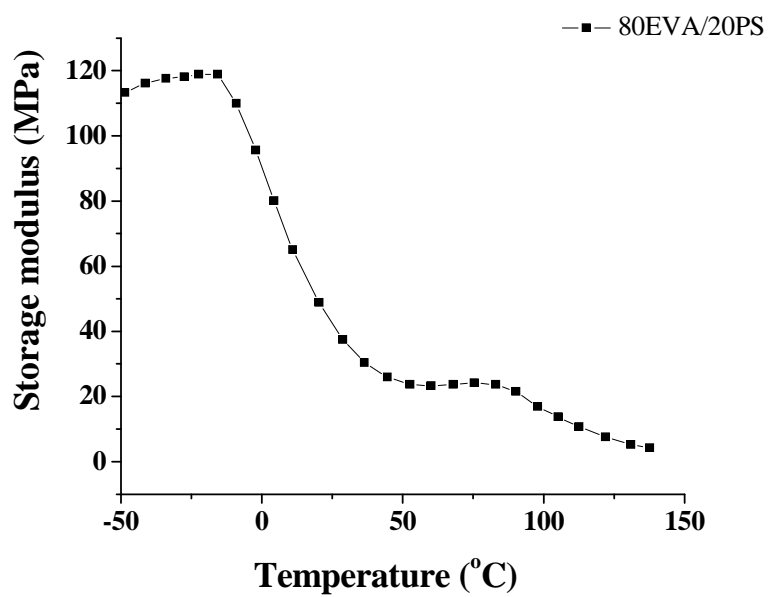
รูป ง-2 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS/1MMT



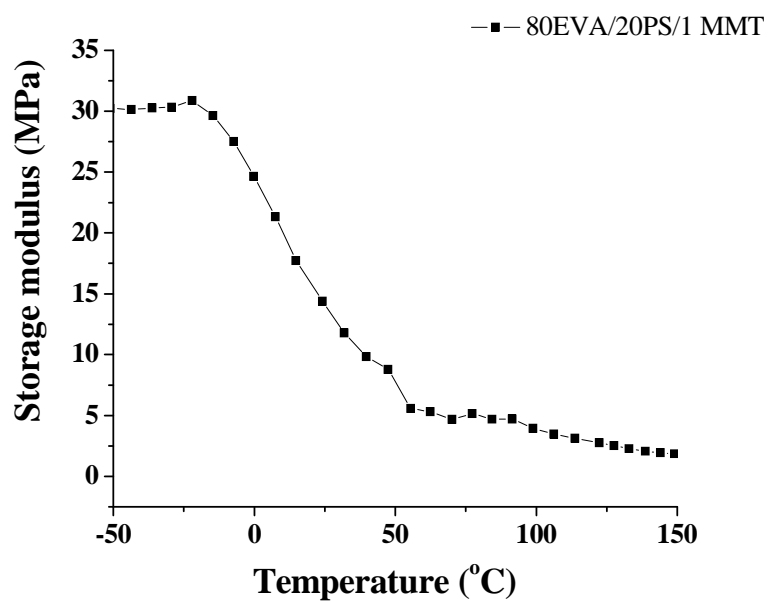
รูป ง-3 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS/3MMT



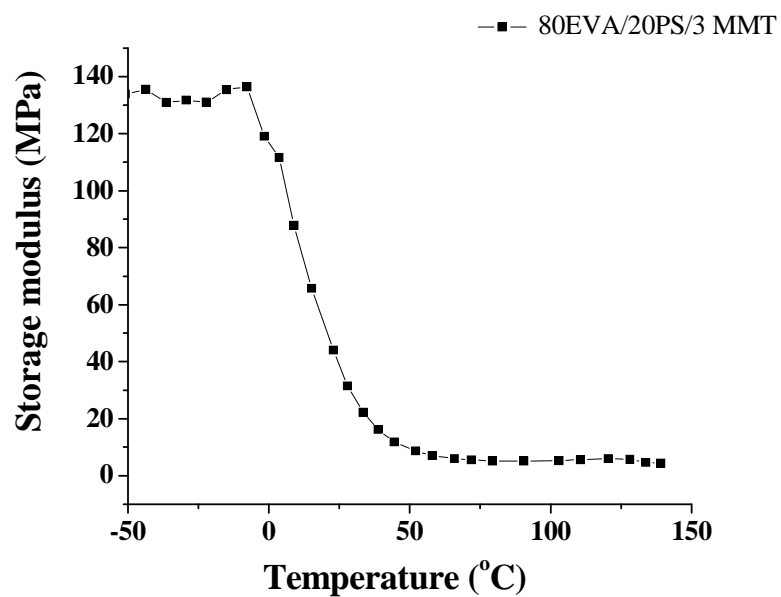
รูป ง-4 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS/5MMT



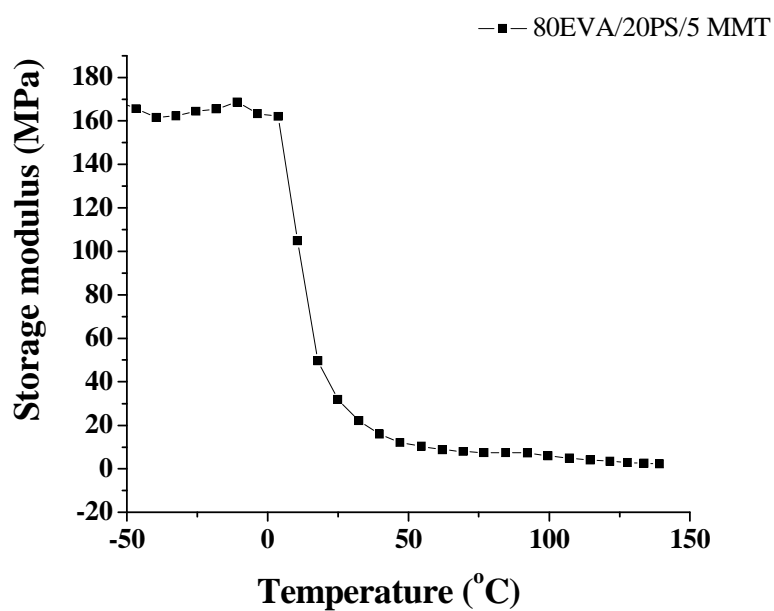
รูป ง-5 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS



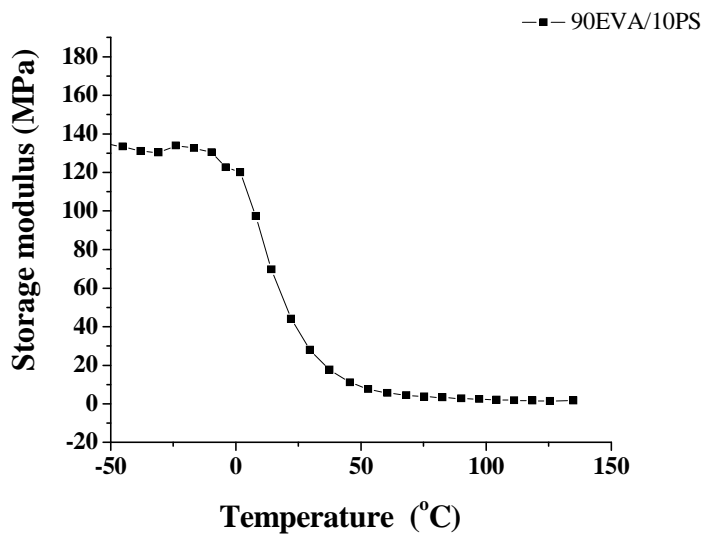
รูป ง-6 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS/1MMT



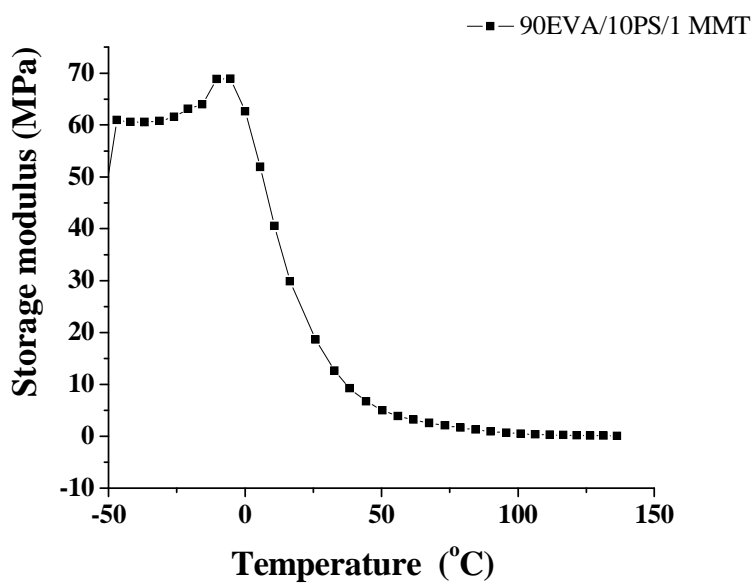
รูป ง-7 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS/3MMT



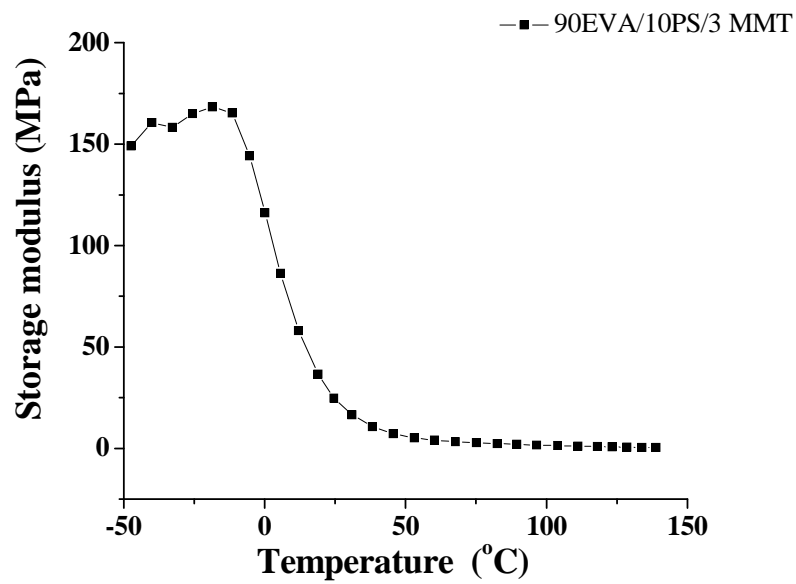
รูป ง-8 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS/5MMT



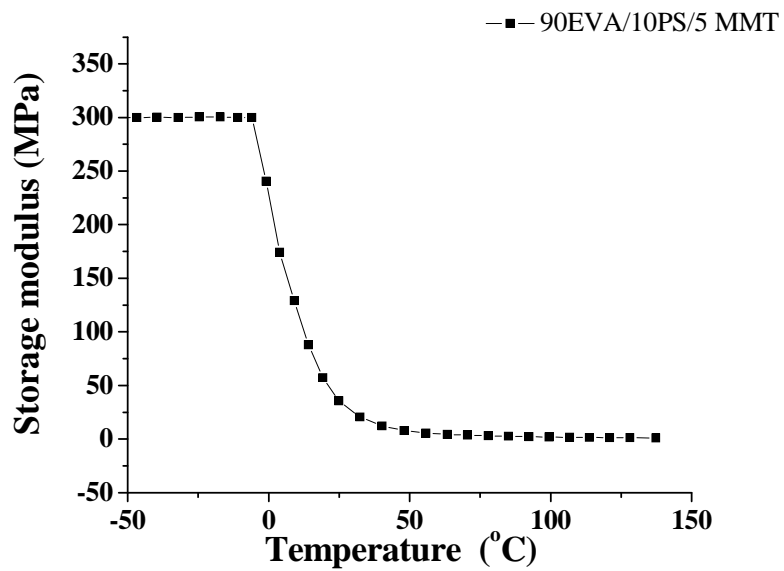
รูป ง-9 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS



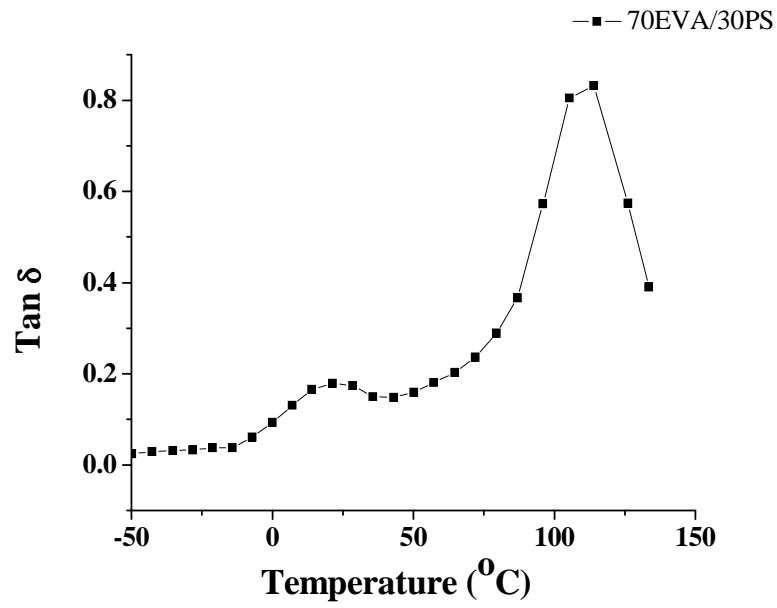
รูป ง-10 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS/1MMT



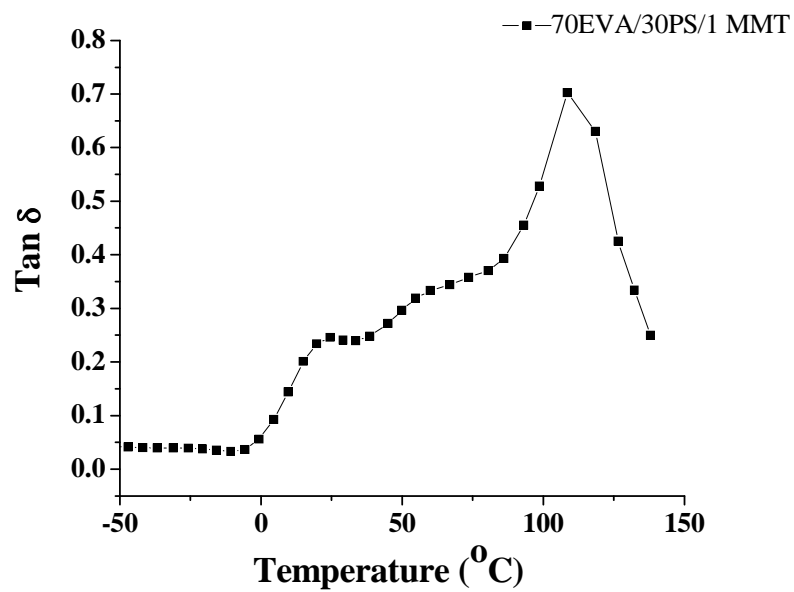
รูป ง-11 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS/3MMT



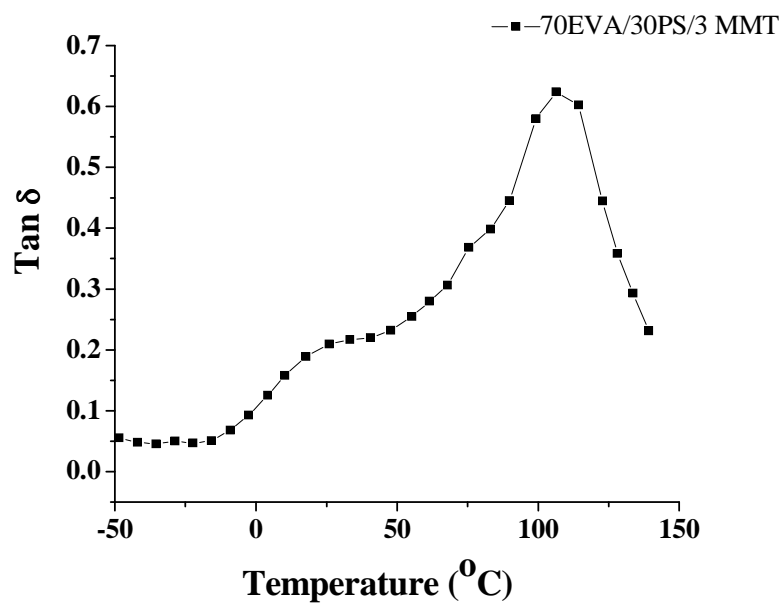
รูป ง-12 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS/5MMT



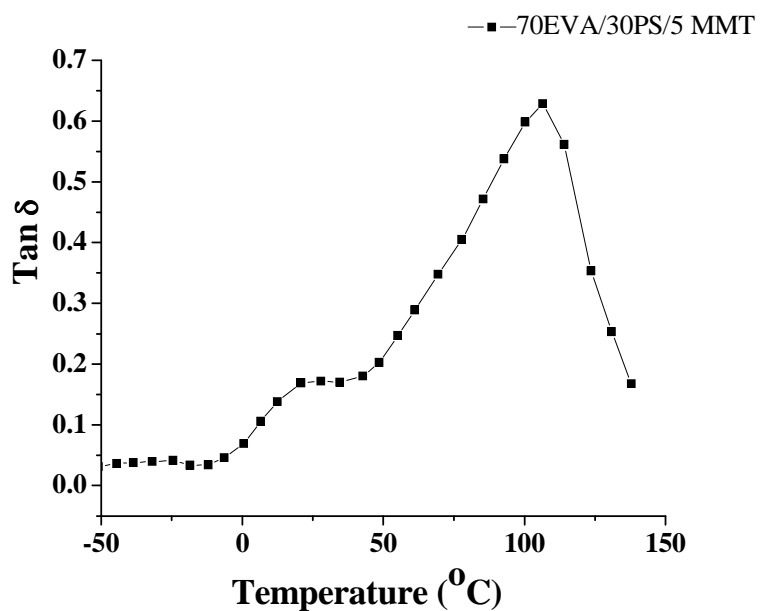
รูป ง-13 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS



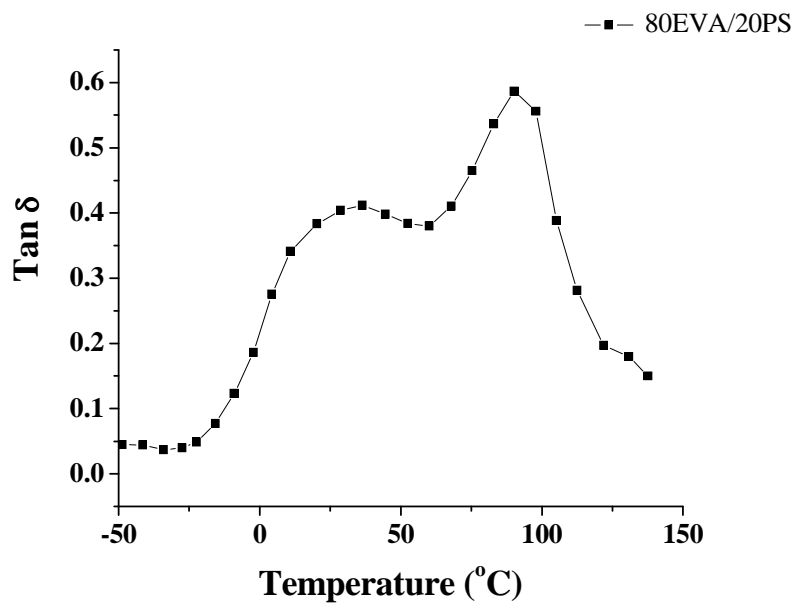
รูป ง-14 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS/1MMT



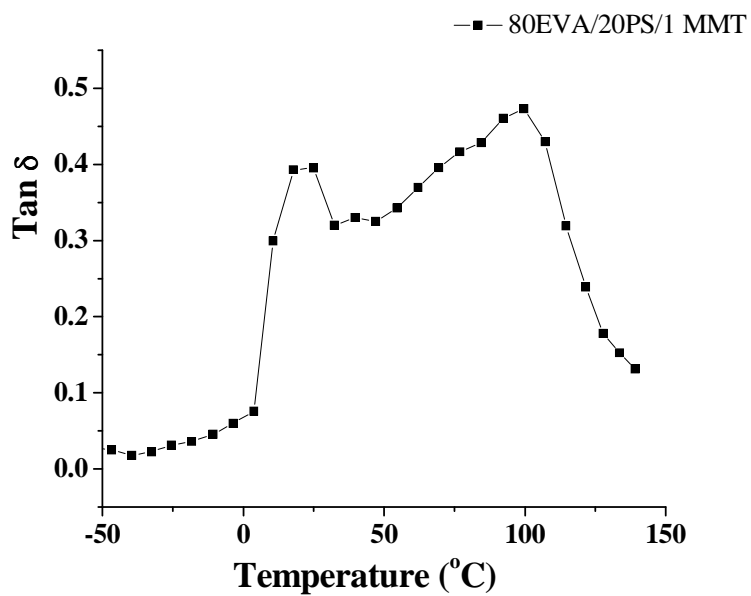
รูป ง-15 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS/3MMT



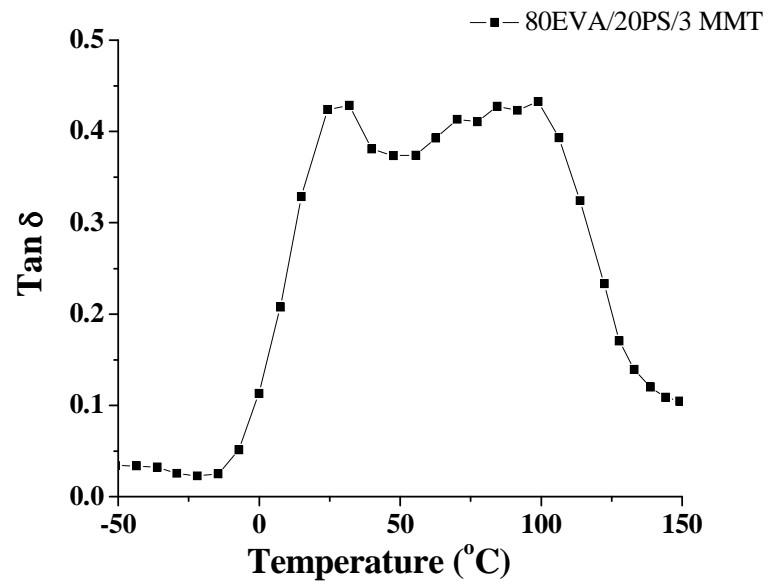
รูป ง-16 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 70EVA/30PS/5MMT



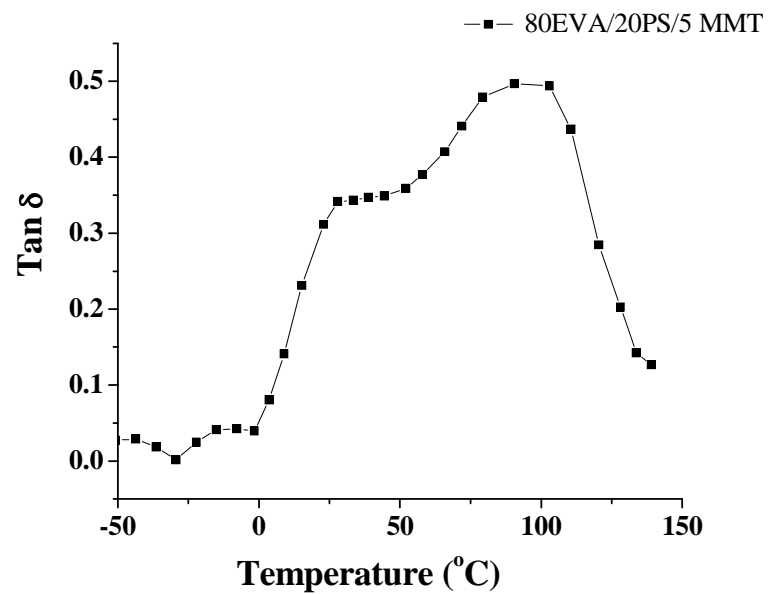
รูป ง-17 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS



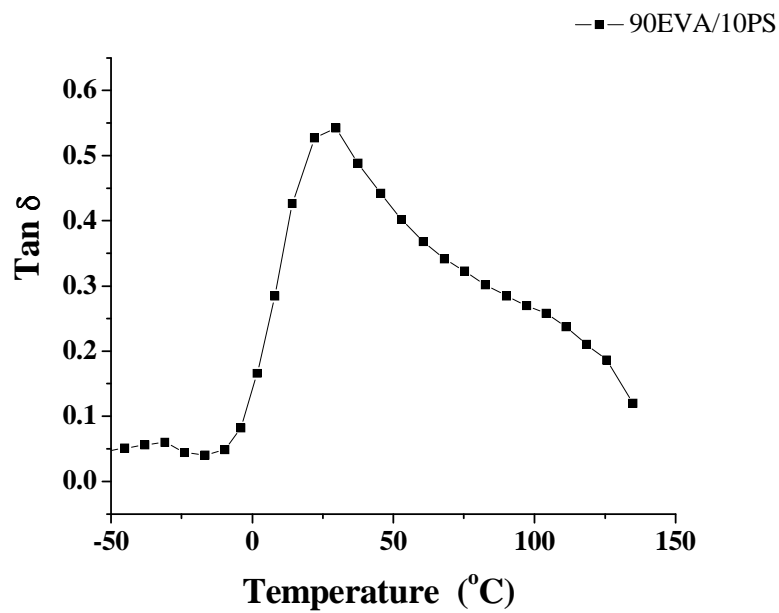
รูป ง-18 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS/1MMT



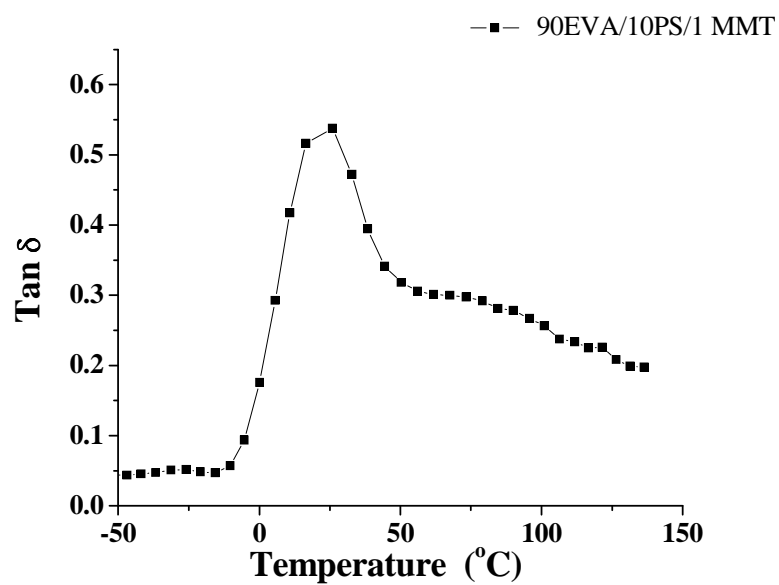
รูป ง-19 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS/3MMT



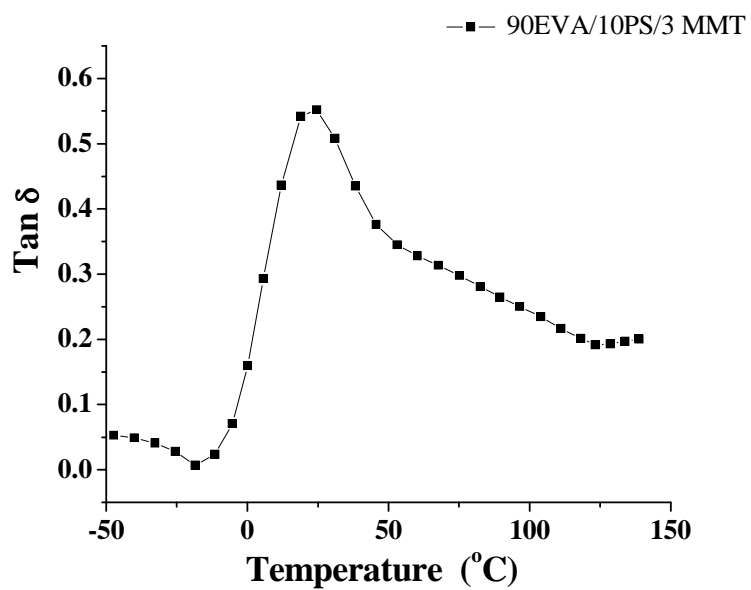
รูป ง-20 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 80EVA/20PS/5MMT



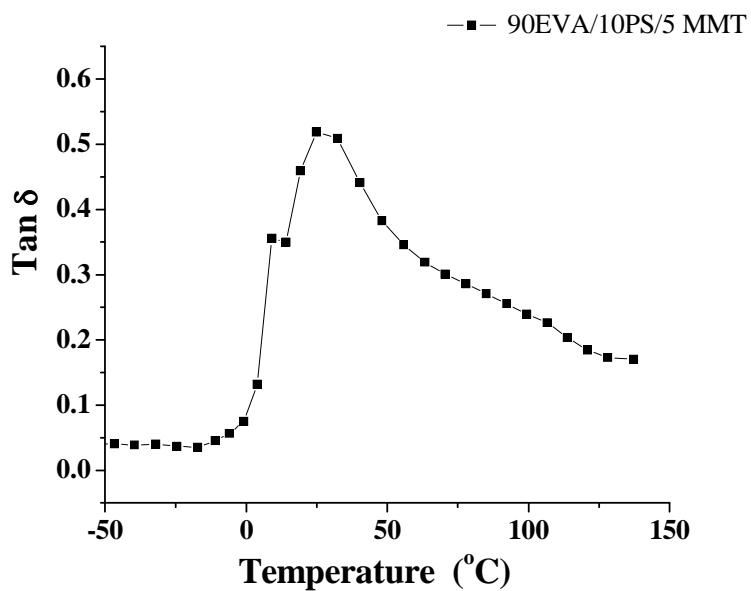
รูป ง-21 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS



รูป ง-22 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS/1MMT



รูป ง-23 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS/3MMT



รูป ง-24 DMA เทอร์โมแกรมของนาโนคอมพอสิต 90EVA/10PS/5MMT

ตาราง ง-1 ค่าอุณหภูมิกลาสแทรนซิชันของพอลิเมอร์ผสมและนาโนคอมพอสิต

Blend system	T _g EVA (°C)	T _g PS (°C)
70EVA/30PS	21.4	113.9
70EVA/30PS/1MMT	24.55	108.6
70EVA/30PS/3MMT	25.95	106.4
70EVA/30PS/5MMT	27.9	106.6
80EVA/20PS	28.75	97.9
80EVA/20PS/1MMT	24.9	99.6
80EVA/20PS/3MMT	24.25	99
80EVA/20PS/5MMT	27.95	102.95
90EVA/10PS	29.65	-
90EVA/10PS/1MMT	25.95	-
90EVA/10PS/3MMT	24.6	-
90EVA/10PS/5MMT	24.9	-

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชุติมา วรवास เกิดเมื่อวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2551 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2552