

การปรับปรุงสมบัติของพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ด้วยอนุภาคระดับนาโนเมตรของ
พอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกา

นายณัฐพล สุขเกษม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

PROPERTY IMPROVEMENT OF PLASTICIZED POLY(VINYL CHLORIDE) BY
POLY(METHYL METHACRYLATE) AND SILICA NANOPARTICLES

Mr. Nuttapol Sukkasem

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การปรับปรุงสมบัติของพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ด้วย
อนุภาคระดับนาโนเมตรของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกา
โดย นายณัฐพล สุขเกษม
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ชัยวุฒิจิตร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุษมา แสงวัฒนาโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ชัยวุฒิจิตร)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์)

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

ณัฐพล สุขเกษม : การปรับปรุงสมบัติของพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ด้วยอนุภาคระดับนาโนเมตรของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกา.(PROPERTY IMPROVEMENT OF PLASTICIZED POLY(VINYL CHLORIDE) BY POLY(METHYL METHACRYLATE) AND SILICANANOPARTICLES) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. เสาวรจน์ช่วยจุลจิตร 70 หน้า.

ในงานนี้ สมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) ได้ถูกปรับปรุงด้วยการเติมนาโนซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตร และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตร และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันที่ใช้อะซิโตนบิวทิลโรโนไทรล์และไซเตียมโดเดซิลซัลเฟต เป็นสารเริ่มปฏิกิริยาและสารลดแรงตึงผิว ตามลำดับ พลาสติกพีวีซีที่ประกอบด้วยพีวีซีเรซินทางการค้า (100 ส่วน) พลาสติกไซเซออร์ (40 ส่วน) สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (2 ส่วน) และสารหล่อลื่น (0.2 ส่วน) ถูกนำมาผสมแบบหลอมเหลวกับนาโนฟิลเลอร์แต่ละประเภทที่ปริมาณต่างๆ (3, 5, 7 และ 9 ส่วน) ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง ตามด้วยการอัดแบบให้เป็นแผ่นหนา 3 มิลลิเมตร ขึ้นทดสอบที่เตรียมได้ถูกนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล (ความทนแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด ยั่งสัมมอดูลัส และความทนแรงฉีกขาด) เสถียรภาพทางความร้อน และสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความทนแรงดึงของพลาสติกโพลีไวนิลคลอไรด์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ถูกปรับปรุงโดยการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรในปริมาณ 7 และ 9 ส่วน ในขณะที่ ยั่งสัมมอดูลัส ความทนแรงฉีกขาด และเสถียรภาพทางความร้อนได้รับการปรับปรุงเมื่อเติมนาโนฟิลเลอร์ทุกประเภท โดยขึ้นกับปริมาณนาโนฟิลเลอร์ที่ใส่เข้าไป อย่างไรก็ตาม การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลงเมื่อเติมนาโนฟิลเลอร์ทุกประเภทเข้าไปในนาโนคอมพอสิต นอกจากนี้ ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นผิวของนาโนคอมพอสิตที่มีความหยาบ ซึ่งเป็นลักษณะของชั้นทดสอบที่มีความอ่อนเหนียว

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

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2554.....

#5272700023: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: PVC / POLY(METHYL METHACRYLATE)-ENCAPSULATED NANOSILICA /
NANOCOMPOSITES / MECHANICAL PROPERTIES / MORPHOLOGY

NUTTAPOL SUKKASEM : PROPERTY IMPROVEMENT OF PLASTICIZED POLY(VINYL
CHLORIDE) BY POLY(METHYL METHACRYLATE) AND SILICA NANOPARTICLES.

ADVISOR: ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT, 70 pp.

In this study, mechanical properties and thermal stability of plasticized poly(vinyl chloride) (PVC) were improved by the incorporation of nanosilica ($n\text{SiO}_2$), nanosized poly(methyl methacrylate) (nPMMA) and PMMA-encapsulated $n\text{SiO}_2$ (PMMA- $n\text{SiO}_2$). The nPMMA and PMMA- $n\text{SiO}_2$ were synthesized by differential microemulsion polymerization using azobisisobutyronitrile and sodium dodecyl sulfate as initiator and surfactant, respectively. Plasticized PVC, composed of commercial PVC resin (100 parts), plasticizer (40 parts), heat stabilizer (2 parts) and lubricant (0.2 parts) was melt mixed with varied loadings (3, 5, 7 and 9 parts) of each nanofiller on a two-roll mill, followed by compression molding into 3-mm sheet. The prepared specimens were examined for their mechanical properties (tensile strength, elongation at break, Young's modulus and tear strength), thermal stability and morphology using universal testing machine, thermogravimetric analyzer (TGA) and scanning electron microscope (SEM), respectively. The results showed that the tensile strength of the prepared plasticized PVC nanocomposites was improved by the addition of nanosized PMMA at 7 and 9 phr, whilst the Young's modulus, tear strength and thermal stability were improved by all nanofillers in a dose dependent manner. However, the elongation at break of the nanocomposites was deteriorated by the addition of nanofillers into the nanocomposites. Moreover, SEM images of all the nanocomposites illustrated rough surfaces, caused by the ductile characteristic of the specimens.

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

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

Academic Year: 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เพราะได้รับความเอื้อเฟื้อด้านข้อมูล วัสดุดิบ วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย รวมถึงการให้คำปรึกษาทางวิชาการ และคำแนะนำจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่านที่มีส่วนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้า จึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนาม ต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ การแก้ไขปัญหา การสนับสนุนทุนในการวิจัย รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. บริษัท ไทยนามพลาสติกส์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
3. คุณกัญญา บุญยืนวิทย์ ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำทางด้านวิชาการ
4. ดร.ชัยวัฒน์ นรกานต์กร ที่ให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
5. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
8. บริษัท ดาว คอนนิง จำกัด
9. บริษัท ดาวเคมีคัล จำกัด

ในการนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีส่วนในการจัดทำวิทยานิพนธ์ทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งนางสาวอัญญาพร บุญมहितิสุทธิที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี.....	4
2.1.1 โครงสร้างโมเลกุลของพีวีซี.....	4
2.1.2 การสังเคราะห์พีวีซี.....	5
2.1.2.1 การสังเคราะห์แบบแขวนลอย.....	5
2.1.2.2 การสังเคราะห์แบบบัลก์.....	6
2.1.2.3 การสังเคราะห์แบบอิมัลชัน.....	6
2.1.3 ส่วนประกอบของพีวีซีคอมพาวด์.....	7
2.1.3.1 พลาสติไซเซอร์.....	7
2.1.3.2 สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน.....	8
2.1.3.3 สารหล่อลื่น.....	8
2.1.3.4 สารเติมแต่ง.....	9
2.1.3.5 สารสี.....	9
2.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	9
2.2.1 การเตรียมเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์.....	10
2.2.2 การเตรียมพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	11
2.2.3 สมบัติและการใช้งาน.....	11

บทที่	หน้า
2.3 ซิลิกา.....	12
2.3.1 วิธีสังเคราะห์นาโนซิลิกา.....	13
2.3.1.1 วิธี Flame aerosol process.....	13
2.3.1.2 วิธีโซล-เจล.....	14
2.3.2 ปัญหาของการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารเติมแต่ง.....	16
2.4 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน.....	17
2.5 การห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยพอลิเมอร์.....	19
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	23
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมนาโนเลเท็กซ์.....	24
3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมขึ้นทดสอบ.....	24
3.2.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	24
3.3 วิธีการทดลอง.....	25
3.3.1 การสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	25
3.3.2 การแยกพอลิเมทิลเมทาคริเลตออกจากราโนเลเท็กซ์.....	27
3.3.3 การปรับปรุงผิวอนุภาคของนาโนซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลีน.....	28
3.3.4 การสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตออกจากราโนเลเท็กซ์.....	28
3.3.5 การแยกพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตออกจากราโนเลเท็กซ์.....	29
3.3.6 การวิเคราะห์นาโนเลเท็กซ์.....	30
3.3.6.1 ร้อยละผลได้และร้อยละของแข็งของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในนาโนเลเท็กซ์.....	30
3.3.6.2 ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค.....	31

ภาคผนวก ข.....	63
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	70

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การสังเคราะห์และการใช้งานของพีวีซี.....	5
ตารางที่ 2.2 สารเคมีในกระบวนการสังเคราะห์นาโนซิลิกาโดยวิธี Flame aerosol process.....	14
ตารางที่ 2.3 ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของ ออกซิเจน.....	14
ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้ในการสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์.....	29
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมพลาสติกไฮดรอกซี/ซิลิกานาโนคอมพอสิต.....	33
ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมพลาสติกไฮดรอกซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโน คอมพอสิต.....	33
ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมพลาสติกไฮดรอกซี/ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิล เมทาคริเลตนาโนคอมพอสิต.....	34
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ของพลาสติกไฮดรอกซี และพลาสติกไฮดรอกซีนานาโนคอมพอสิต.....	48

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1	โครงสร้างทางเคมีของพีวีซี.....	4
ภาพที่ 2.2	กระบวนการเตรียมเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์.....	11
ภาพที่ 2.3	ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	11
ภาพที่ 2.4	กระบวนการผลิตนาโนซิลิกาโดยวิธี Flame aerosol process	13
ภาพที่ 2.5	การเตรียมนาโนซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจล.....	15
ภาพที่ 2.6	กระบวนการผลิตนาโนซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจล.....	15
ภาพที่ 2.7	การเกาะกลุ่มของนาโนซิลิกา.....	16
ภาพที่ 2.8	ลักษณะของหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา.....	16
ภาพที่ 2.9	กลไกการของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน.....	18
ภาพที่ 2.10	การปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลิโคน.....	20
ภาพที่ 3.1	ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของ PMMA	25
ภาพที่ 3.2	เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	26
ภาพที่ 3.3	การตกตะกอนพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเมทานอลที่มากเกินไป.....	27
ภาพที่ 3.4	การล้างและกรองอนุภาคระดับนาโนที่เตรียมได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ... ..	27
ภาพที่ 3.5	ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของ PMMAและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วย PMMA.....	28
ภาพที่ 3.6	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต.....	31
ภาพที่ 3.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	32
ภาพที่ 3.8	ขั้นตอนการเตรียมนาโนคอมพอสิตของพีวีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลต/ซิลิกา.....	35
ภาพที่ 3.9	เครื่องอัดรีดสองลูกกลิ้ง.....	36
ภาพที่ 3.10	เครื่องอัดแบบ.....	36
ภาพที่ 3.11	ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ของนาโนคอมพอสิตของพีวีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลต/ ซิลิกา.....	37
ภาพที่ 3.12	เครื่องตัดชิ้นงาน compress air sample cutter	37
ภาพที่ 3.13	เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล.....	38
ภาพที่ 3.14	เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความชื้น (ทีจีเอ).....	39

ภาพที่ 3.15	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	39
ภาพที่ 4.1	นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	40
ภาพที่ 4.2	การกระจายขนาดอนุภาคของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	41
ภาพที่ 4.3	การเกาะกลุ่มของอนุภาคนาโนซิลิกา.....	42
ภาพที่ 4.4	สัณฐานวิทยาของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต.....	42
ภาพที่ 4.5	ความทนแรงดึงของพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีและพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีนาโนคอมพอสิต.....	43
ภาพที่ 4.6	ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีและพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีนาโนคอมพอสิต.....	44
ภาพที่ 4.7	ยังส์มอดุลัสของของพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีและพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีนาโนคอมพอสิต.....	45
ภาพที่ 4.8	ความทนแรงฉีกขาดของพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีและพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีนาโนคอมพอสิต...	46
ภาพที่ 4.9	ทีจีเอเทอร์โมแกรมของพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีและพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซี/ซิลิกานาโนคอมพอสิต.....	47
ภาพที่ 4.10	ทีจีเอเทอร์โมแกรมของพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซี และพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนคอมพอสิต.....	47
ภาพที่ 4.11	ทีจีเอเทอร์โมแกรมของพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซี และพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซี/ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนคอมพอสิต.....	48
ภาพที่ 4.12	สัณฐานวิทยาของพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีและพลาสติกไฮดรอกซีฟีวซีนาโนคอมพอสิต.....	50

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันการเตรียมพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์คอมพอสิตมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น ในทางอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและใช้การลงทุนต่ำกว่าการผลิตพอลิเมอร์ชนิดใหม่ เพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ ซึ่งจากการอาศัยสมบัติเด่นของวัสดุที่นำมาผสมกันจะทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ถูกปรับปรุงเพื่อให้สามารถขยายการใช้งานให้กว้างมากขึ้น โดยสมบัติของผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับความสามารถในการกระจายตัว ขนาดของอนุภาค อัตราส่วนของแต่ละองค์ประกอบ กระบวนการขึ้นรูป รวมทั้งอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์-พอลิเมอร์ และพอลิเมอร์-สารตัวเติม อย่างไรก็ตาม การค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตได้เข้ามามีบทบาทต่อทั้งภาคการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากการมีผลงานวิจัยจำนวนมากได้ถูกตีพิมพ์เผยแพร่สู่สาธารณะอย่างต่อเนื่องตลอดมา

พอลิไวนิลคลอไรด์ (พีวีซี) เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีการผลิตและการใช้งานมากเป็นอันดับสองรองจากพอลิเอทิลีน โดยสามารถพบเห็นการใช้งานของพีวีซีได้ทั่วไปรอบๆ ตัว ไม่ว่าจะเป็นการใช้งานภายในบ้าน สถานที่ทำงาน โรงงานอุตสาหกรรม งานก่อสร้าง งานด้านกีฬา และงานด้านการเกษตร เพื่อใช้ทำของใช้ภายในบ้าน อุปกรณ์ไฟฟ้า บรรจุภัณฑ์ ฟิล์ม และผลิตภัณฑ์หนังเทียม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานของพีวีซีจำเป็นต้องมีการใส่สารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติทั้งในด้านการขึ้นรูปและการใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากพีวีซีเป็นพอลิเมอร์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ จะแตกสลายได้ง่ายเมื่อนำไปขึ้นรูปด้วยความร้อน นอกจากนี้ พีวีซียังเป็นพลาสติกที่มีสมบัติแข็งและเปราะ ซึ่งสารเติมแต่งที่ใช้ทั่วไปกับพีวีซี ได้แก่ สารเพิ่มเสถียรภาพความร้อน พลาสติไซเซอร์ สารหล่อลื่น สารสี และสารตัวเติม เป็นต้น การผสมพีวีซีกับสารเติมแต่งต่างๆ ด้วยชนิดและปริมาณที่เหมาะสมจะได้พีวีซีคอมพาวด์ที่ไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ ขึ้นรูปได้ง่าย ราคาถูก โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เหล่านี้จะมีสมบัติหลากหลายตั้งแต่ยืดหยุ่นจนถึงแข็งเกร็ง และโปร่งใสจนถึงทึบแสง ถึงแม้การใส่พลาสติไซเซอร์จะทำให้พีวีซีมีความยืดหยุ่นและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น แต่ความทนแรงดึงและเสถียรภาพทางความร้อนจะลดลง ซึ่งการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติไซส์พีวีซีอาจทำได้โดยการผสมกับเทอร์โมพลาสติกชนิดอื่นและ/หรือสารตัวเติม อนินทรีย์ ปัจจุบันพอลิเมอร์และสารอนินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรกำลังได้รับความสนใจและมีบทบาทสำคัญในด้านการแพทย์ วัสดุกึ่งตัวนำ และวัสดุนาโนคอมพอสิต เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจาก

สามารถใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล สมบัติการสกัดกั้น และสมบัติทางความร้อนโดยไม่ส่งผลกระทบต่อน้ำหนักและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังประหยัดพลังงานในการผสมอีกด้วย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงสมบัติของ พลาสติกซีลพีวีซีด้วยการเตรียมนาโนคอมพอสิตของพีวีซีด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซิลิกา และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาสามารถเข้ารวมตัวกับพีวีซีได้ดีเพราะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวสูงมาก จึงทำให้เกิดแรงยึดเกาะระหว่างผิวกับพีวีซีในระดับโมเลกุลได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะส่งผลให้พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น

พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน (differential microemulsion polymerization) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้สังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตให้มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 50 นาโนเมตร โดยการใช้สารลดแรงตึงผิวปริมาณน้อยกว่าที่ใช้ในกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันแบบดั้งเดิมมาก นอกจากนี้ ยังเป็นกระบวนการที่ให้ร้อยละผลได้ (% yield) มากกว่า ดังนั้น จึงเป็นกระบวนการที่สามารถพัฒนาสู่อุตสาหกรรมได้

สำหรับนาโนซิลิกาเป็นสารตัวเติมอนินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรชนิดหนึ่งที่ถูกนำไปใช้เตรียมนาโนคอมพอสิตอย่างแพร่หลายทั้งในพลาสติกและยาง เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการใช้งานสูง นาโนซิลิกาที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมจะมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิ 10-40 นาโนเมตร อย่างไรก็ตาม อนุภาคของนาโนซิลิกาจะประกอบด้วยหมู่ซิลานอล (silanol groups, -Si-OH) จำนวนมากบนพื้นผิวของอนุภาค จึงเป็นสาเหตุทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค และมีแนวโน้มที่จะเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่า “แอกกรีเกต” (aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) และลดการกระจายตัวในเมทริกซ์ของพอลิเมอร์ ซึ่งการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอมีผลทำให้สมบัติเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตลดลง หรือประสิทธิภาพของการเป็นสารเสริมแรงลดลง ซึ่งโครงสร้างนี้จะไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป นอกจากนี้ แอกรีเกตของนาโนซิลิกายังชอบจับกลุ่มกันเป็นก้อนใหญ่มากขึ้นที่เรียกว่า “แอกโกลเมอเรต” (agglomerate) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) ที่กระจายตัวได้ยากในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ดังนั้น แนวทางในการแก้ปัญหา คือ ทำการห่อหุ้มอนุภาคของนาโนซิลิกาด้วยพอลิเมอร์ โดยงานวิจัยนี้ จะห่อหุ้มอนุภาคของนาโนซิลิกาด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตผ่าน

กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อินซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน ('*in situ*' differential microemulsion polymerization) ซึ่งนอกจากช่วยเพิ่มการกระจายตัวของนาโนซิลิกาในพอลิเมอร์เมทริกซ์แล้ว ยังลดความเป็นพิษของสารอนินทรีย์อีกด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะปรับปรุงสมบัติของพลาสติกไฮสปีซีโดยอาศัยนาโนเทคโนโลยี ด้วยการเตรียมนาโนคอมพอสิตของพลาสติกไฮสปีซีจากอนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตรของพอลิเมอร์ (พอลิเมทิลเมทาคริเลต) สารอนินทรีย์ (นาโนซิลิกา) และสารอนินทรีย์ที่ถูกห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ (นาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต) แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้

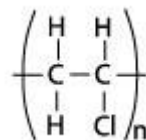
บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพีวีซี [Poly(vinyl chloride), PVC] [1-8]

2.1.1 โครงสร้างโมเลกุลของพีวีซี

พีวีซีเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยส่วนใหญ่มีการจัดเรียงตัวแบบอะแทกติก (atactic) และมอนอเมอร์จับตัวกันแบบหัวต่อหาง (head-to-tail)



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพีวีซี

จากภาพที่ 2.1 จะเห็นว่า มีอะตอมขนาดใหญ่ของคลอรีนต่อกับคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างของพีวีซี จึงส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของพีวีซีจัดเรียงตัวเพื่อเกิดผลึกได้น้อย ดังนั้น พีวีซีจึงเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semi-crystalline polymer) ที่มีความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 5-10 เท่านั้น แต่ถ้าพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำๆ ความเป็นผลึกจะเพิ่มขึ้น โดยมีโครงสร้างแบบซินดิโอแทกติก (syndiotactic) เพิ่มขึ้น หากแต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทำให้โครงสร้างเป็นแบบไอโซแทกติก (isotactic)

พีวีซี ที่ยังไม่ได้ใส่สารเติมแต่งใดๆ มีสมบัติ ดังนี้

- แข็ง เปราะ แตกง่าย เป็นพลาสติกอสังฐาน
- ไม่มีสี ใส
- มีความหนาแน่นประมาณ 1.4 กรัม/เซนติเมตร³
- มีช่วงอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ประมาณ 212 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ประมาณ 87 องศาเซลเซียส
- เมื่อติดไฟจะสามารถดับได้เอง
- สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนและแสงแดด จึงจำเป็นต้องใส่สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (heat stabilizer)

2.1.2 การสังเคราะห์พีวีซี

พีวีซีสามารถสังเคราะห์ได้โดยอาศัยกลไกแบบฟรีเรดิคัล (free radical) ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้หลายวิธี ได้แก่ แบบแขวนลอย (suspension polymerization) แบบบัลก์ (bulk polymerization) และแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) ซึ่งจะเลือกสังเคราะห์ด้วยวิธีใดขึ้นกับความเหมาะสมในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การสังเคราะห์และการใช้งานของพีวีซี

กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน	สัดส่วนการผลิต (%)	การใช้งาน
แบบแขวนลอย	80	ใช้ทำท่อ กรอบประตู/หน้าต่าง และงานที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้าง
แบบบัลก์	10-15	ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร เนื่องจากพีวีซีที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง
แบบอิมัลชัน	10	ใช้ทำหนังเทียม กระเบื้องยาง ถูมือ

2.1.2.1 การสังเคราะห์แบบแขวนลอย (Suspension polymerization)

อุณหภูมิในการสังเคราะห์พีวีซีแบบแขวนลอยอยู่ในช่วง 40-75 องศาเซลเซียส อาศัยการกวนสารละลายระหว่างมอนอเมอร์ (VCM) กับสารเริ่มปฏิกิริยา (initiator) ในตัวกลางที่ไม่ผสมกับสารละลายมอนอเมอร์ เช่น น้ำ เป็นต้น อย่างรวดเร็ว ความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะระบายออกจากหยดมอนอเมอร์ไปยังตัวกลางการสังเคราะห์ โดยการกวนจะกระทำอย่างต่อเนื่อง จนปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเกิดขึ้นในปริมาณที่สูงพอประมาณ (ร้อยละ 80-90) จนทำให้หยดมอนอเมอร์มีสภาพผิวที่แกร่งพอจนสามารถแยกออกจากระบบได้ ในทางปฏิบัติอาจมีการเติมสารความแกร่งหรือสร้างประจุบนผิวของหยดมอนอเมอร์ เรียกว่า “สารซัสเพนดิ้ง (suspending agent)” เพื่อให้การรวมตัวของหยดมอนอเมอร์ที่เกิดเมื่อมีการกระทบกันระหว่างการกวนน้อยลง ปฏิกิริยาการสังเคราะห์จะถูกล่าช้าลงโดยการทำให้มอนอเมอร์ระเหยกลายเป็นไอแยกออกจากอนุภาคของพีวีซีที่แขวนลอยอยู่ในน้ำซึ่งอยู่ในรูปของเหลวข้น (slurry) ซึ่งสามารถแยกออกได้ง่ายโดยการกรอง ตามด้วยการล้างน้ำแล้วทำให้แห้ง พีวีซีที่ได้มีลักษณะเป็ยกเรียกว่า “cake” จากนั้นก็นำมาผ่านขั้นตอนการอบแห้ง บด และคัดขนาด พีวีซีที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ เรียกว่า

“S-PVC” พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะมีรูปทรงกลมหรือรีเล็กน้อยตามลักษณะของหยดมอนอเมอร์ที่แขวนลอยหรือกระจายตัวอยู่ในตัวกลาง ส่วนสารเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ เช่น เปอร์ออกไซด์ (peroxide) จะสามารถละลายอยู่ในหยดของมอนอเมอร์ได้ และการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็นเพื่อช่วยไม่ให้อุณหภูมิในการสังเคราะห์สูงเกินไป

2.1.2.2 การสังเคราะห์แบบบัลค์ (Bulk polymerization)

การสังเคราะห์พีวีซีแบบบัลค์เป็นระบบที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์และสารเริ่มปฏิกิริยาหรือตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เท่านั้น อุณหภูมิการสังเคราะห์อยู่ในช่วง 40-70 องศาเซลเซียส สายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายในมอนอเมอร์ และตกตะกอนออกมา ลักษณะคล้ายแป้งภายใต้การกวน 2 ขั้นตอน โดยขั้นแรกจะกวนด้วยความเร็วสูง เกรนของพีวีซีจึงมีขนาดสม่ำเสมอที่เปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน (conversion) ต่ำ (ประมาณร้อยละ 10) โดย VCM ที่อยู่ในรูปของเหลวจะถูกดูดซับอยู่บนรูพรุนของพอลิเมอร์ และความหนืดของระบบจะเพิ่มขึ้นในขณะที่เกรนของพีวีซีมีการเติบโต จากนั้นจึงลดความเร็วในการกวนให้ต่ำลง พอลิเมอร์จะเติบโตสมบูรณ์ในขั้นนี้และปฏิกิริยาจะถูกทำให้สิ้นสุดลงจากการกำจัดมอนอเมอร์ออกจากระบบด้วยการใช้น้ำและแก๊สเฉื่อยทำหน้าที่เป็นตัวพาเมื่อเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชันอยู่ที่ประมาณร้อยละ 80 พีวีซีที่สังเคราะห์ด้วยวิธีนี้เรียกว่า “Bulk-PVC” หรือ “Mass-PVC” ซึ่งเป็นระบบที่มีความบริสุทธิ์สูงมากจะได้พอลิเมอร์ที่มีการปนเปื้อนต่ำ เพราะเมื่อปฏิกิริยาเสร็จสิ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเพียงพอลิเมอร์เท่านั้น อาจมีมอนอเมอร์เหลืออยู่บ้างเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะมอนอเมอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น การมีพอลิเมอร์ละลายอยู่ในมอนอเมอร์ทำให้ความหนืดของส่วนผสมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในระหว่างการสังเคราะห์ และเนื่องจากปฏิกิริยา พอลิเมอร์เซชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้อุณหภูมิภายในระบบเพิ่มขึ้นอีกด้วย การกระจายความร้อนภายในระบบเกิดได้น้อย เพราะความหนืดที่เพิ่มขึ้นระหว่างการสังเคราะห์ ทำให้มีโอกาสเกิดตำแหน่งจุดสัมผัสของความร้อน ซึ่งอาจเป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์

2.1.2.3 การสังเคราะห์แบบอิมัลชัน (Emulsion polymerization)

ภายในระบบของการสังเคราะห์พีวีซีแบบอิมัลชันจะประกอบด้วยมอนอเมอร์ สารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายในน้ำ เช่น โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (potassium persulphate) หรือ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulphate) สารอิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) ซึ่งเป็นสารที่มีหัวและไม่มีส่วนอยู่ในสารตัวเดียวกัน และน้ำ การกวนจะทำให้หยดมอนอเมอร์กระจายตัวและ

มีขนาดเล็ก (ประมาณ 0.1 ไมโครเมตร) สารเริ่มปฏิกิริยาจะทำหน้าที่สร้างอนุมูลอิสระในวัฏภาคน้ำ ทำให้เกิดการเริ่มต้นปฏิกิริยาระหว่างวัฏภาคน้ำและหยดมอนอเมอร์ อุณหภูมิการเริ่มปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 40-60 องศาเซลเซียส อนุภาคของพอลิเมอร์ที่ถูกสร้างขึ้นจะมีขนาดใหญ่ขึ้นระหว่างที่ปฏิกิริยาดำเนินไป สารอิมัลซิฟายเออร์จะเป็นตัวควบคุมเสถียรภาพของอิมัลชัน เมื่อเปอร์เซ็นต์คอนเวอร์ชัน เป็นร้อยละ 90 สำหรับมอนอเมอร์ส่วนเกินจะถูกกำจัดออกจากระบบเพื่อให้เกิดการสิ้นสุดของปฏิกิริยา อนุภาคพอลิเมอร์จะถูกแยกออกและทำให้แห้งด้วยวิธี “spray-drying” แล้วทำการบดและคัดขนาด พีวีซีที่ได้จากการสังเคราะห์นี้ เรียกว่า “E-PVC” พอลิเมอร์ที่ได้มีขนาดเล็กมากจนมีลักษณะคล้ายผงละเอียด และมีสภาพผิวที่ขรุขระมากกว่าและบริสุทธิ์น้อยกว่าการสังเคราะห์แบบแขวนลอย ข้อเสียของการสังเคราะห์พีวีซีวิธีนี้ คือ ยุ่งยากและราคาแพง

2.1.3 ส่วนประกอบของพีวีซีคอมพาวด์ (PVC compound)

พีวีซีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ท่อ ขวด ฉนวนหุ้มสายไฟ และหนังเทียม ไม่ได้ผลิตจากพีวีซีเพียงอย่างเดียว แต่จะผสมสารเติมแต่งอีกหลายชนิดลงไปเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติตามต้องการ [6] ซึ่งต้องผสมสารเหล่านี้ให้เป็นเนื้อเดียวกันกับพีวีซีก่อนทำการผลิตขั้นต่อไป สารเติมแต่งที่ใช้มีหลายชนิด ดังนี้

2.1.3.1 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

พลาสติไซเซอร์เป็นสารประกอบน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ไม่ระเหย (non-volatile) ซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางเป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมพลาสติก เพื่อปรับปรุงความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์และกระบวนการผลิต โดยทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ลดลง [6] ทั้งนี้เนื่องจากพลาสติไซเซอร์จะเข้าไปแทรกอยู่ในโครงสร้างของพอลิเมอร์ และลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ ทำให้สายโซ่โมเลกุลเป็นอิสระและเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น และมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น สำหรับพลาสติไซเซอร์ที่ดีต้องสามารถผสมเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี ไม่ระเหยง่าย และคงทนอยู่ในพอลิเมอร์ได้นาน พลาสติไซเซอร์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ พลาสติไซเซอร์ภายนอก (external plasticizer) ซึ่งผสมอยู่กับพอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์ และพลาสติไซเซอร์ภายใน (internal plasticizer) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์ โดยสารที่นิยมใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ภายนอกสำหรับพีวีซี ได้แก่ ไดออกทิลฟทาเลต (dioctyl phthalate, DOP) และไดไอโซโนนิลฟทาเลต (diisononyl phthalate, DINP) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การใช้พลาสติไซเซอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีผลทำให้สมบัติ

ทางกายภาพ เช่น ความแข็ง ความทนแรงดึง มอดุลัส ความหนาแน่น และความหนืด เป็นต้น ของพอลิเมอร์ลดลง หากแต่มีผลทำให้ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ การยืดตัว ความต้านทานการแตกหัก ค่าคงที่ได้อิเล็กทริก (dielectric constant) และความสามารถในการขึ้นรูปเพิ่มขึ้น [6,7]

2.1.3.2 สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilizer)

ถึงแม้พีวีซีจะมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ราคาถูก สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ทนทานสารเคมี และติดไฟได้ยาก หากแต่มีข้อเสียที่สำคัญ คือ มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิของการขึ้นรูป ซึ่งการแตกสลายด้วยกระบวนการดีไฮโดรคลอรีเนชัน (dehydrochlorination) ทำให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น ทำให้เกิดสี (decoloration) และสมบัติเชิงกลต่างๆ ลดลง ซึ่งการใช้สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่เหมาะสมจะสามารถยับยั้งการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของพีวีซีขณะขึ้นรูป โดยป้องกันการเกิดพันธะคู่แบบคอนจูเกต (conjugated double bonds) ด้วยการแทนที่อะตอมของคลอรีนในสายโซ่พีวีซีที่ตำแหน่งแอลลิลิก (allylic) และเทอเชียรี (tertiary) เป็นต้น ซึ่งจะขัดขวางปฏิกิริยาการเกิดดีไฮโดรคลอรีเนชันแบบเร่งตัวเอง (self-catalytic dehydrochlorination) ด้วยการดูดซับไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างการแตกสลายของพีวีซี โดยของผสมระหว่างแคลเซียมสเตียเรต (calcium stearate, CaSt_2) และซิงค์สเตียเรต (zinc stearate, ZnSt_2) เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนที่ไม่มีพิษสำหรับพีวีซี ซึ่งการใช้แคลเซียมสเตียเรตทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนนานกว่า ด้วยการดูดซับ HCl แต่จะทำให้พีวีซีเปลี่ยนสี ขณะที่ซิงค์สเตียเรตมีผลยับยั้งการเกิดสีแต่ทำให้มีเสถียรภาพทางความร้อนสั้นกว่า เพราะซิงค์สเตียเรตจะปลดปล่อยซิงค์คลอไรด์ (zinc chloride, ZnCl_2) ซึ่งอาจเร่งการแตกสลายของพีวีซีเนื่องจากมีความเป็นกรดลูอิสแก่ (strong Lewis acidity) อย่างไรก็ตาม ของผสม $\text{CaSt}_2/\text{ZnSt}_2$ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมสามารถแสดงการเสริมประสิทธิภาพการเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับพีวีซี [8]

2.1.3.3 สารหล่อลื่น (Lubricant)

สารหล่อลื่นเป็นสารที่ช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวและช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างสายโซ่กับเครื่องจักร ช่วยให้กระบวนการผลิตทำได้ง่ายขึ้น ช่วยแก้ปัญหาคาเกิด die swell และช่วยปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของพอลิเมอร์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารหล่อลื่นภายนอก (external lubricant) จะทำหน้าที่ลดแรงเสียดทานระหว่างพอลิเมอร์กับเครื่องจักร โดยการเกิดเป็นฟิล์มกั้นเอาไว้ และสารหล่อลื่นภายใน (internal lubricant) เป็นสารที่

สามารถผสมเข้ากับพอลิเมอร์ได้และทำหน้าที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุล ตัวอย่างของสารที่นิยมใช้เป็นสารหล่อลื่นสำหรับพีวีซี ได้แก่ fatty acid salt

2.1.3.4 สารเติมแต่ง (Filler)

สารเติมแต่งเป็นสารที่เติมเข้าไปเพื่อเพิ่มปริมาตรให้กับผลิตภัณฑ์ ใสเพื่อลดต้นทุนในการผลิต มักเป็นสารที่มีราคาถูก ตัวอย่างของสารที่นิยมใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับพีวีซี ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เกาลิน (kaolin) ซิลิกา (silica) ทัลค์ (talc) คาร์บอนแบล็ก (carbon black) และไชนาเคลย์ (china clay) เป็นต้น

ปัจจุบันการใช้สารเติมแต่งอนินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของพอลิเมอร์กำลังได้รับความสนใจและถูกนำมาใช้ในทางการค้าเพิ่มขึ้น โดยสารอนินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรนอกจากออร์แกนอเคลย์ (organoclay) แล้ว ยังมีนาโนฟิลเลอร์อื่นๆ ได้แก่ ซิลิกา [9-13] แอนติโมนีไดรอกไซด์ [14] แคลเซียมคาร์บอเนต [15] คาร์บอนนาโนทิวบ์ [16] และแฮลโลยไซต์นาโนทิวบ์ (halloysite nanotube) [17] เป็นต้น

2.1.3.5 สารสี (Pigment)

สารสีเป็นสารที่ใส่เข้าไปเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีสวยงาม และทนต่อสภาวะอากาศได้มากขึ้นแบ่งเป็นผงสีอินทรีย์ (organic pigment) และผงสีอนินทรีย์ (inorganic pigment) ตัวอย่างของสารที่นิยมใช้เป็นสารสีสำหรับพีวีซี เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) ให้สีขาวและช่วยให้ทึบแสง

2.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต [Poly(methyl methacrylate), PMMA] [18,19]

พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นเทอร์โมพลาสติกอสัณฐานที่มีความโปร่งใส ไม่มีสี แข็งและเปราะ PMMA หรือที่เรียกว่า ‘อะคริลิก’ (acrylic) เป็นพลาสติกที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยสมบัติเด่นด้านความใส และความทนต่อสภาวะแวดล้อมดีเยี่ยม PMMA ถูกพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1930 ที่ประเทศอังกฤษ และเริ่มผลิตพอลิเมอร์นี้ในเชิงการค้าตั้งแต่ปี ค.ศ. 1934 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจาก PMMA ได้เข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวันมากขึ้น โดยใช้ได้ทั้งงานฉีดแบบ (injection molding) และงานอัดรีด (extrusion) ชิ้นงานที่เห็นทั่วไป ได้แก่ ฝาครอบไฟรถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า โคมไฟ ก้อนน้ำคริสตัล และเครื่องใช้ในครัวเรือน เป็นต้น

พลาสติกใสที่ใช้กันแพร่หลายมีเพียง 4-5 ชนิด ซึ่งได้แก่ พอลิสไตรีน (polystyrene, PS) สไตรีนอะคริไนด์ไนไตรลโคพอลิเมอร์ (styrene acrylonitrile copolymer, SAN) พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate, PC) พอลิไวนิลคลอไรด์ และ PMMA เป็นต้น

สมบัติของ PMMA เทียบกับพลาสติกใสอื่นๆ มีดังนี้

ความใส : แสงส่องผ่าน PMMA ได้สูงสุดถึงร้อยละ 92 ขณะที่พลาสติกอื่นๆ แสงส่องผ่านได้ต่ำกว่า ที่รองลงมา ได้แก่ SAN, PC, PS และ PVC ตามลำดับ ดังนั้น งานที่ต้องการความใสเป็นพิเศษจึงมักใช้ PMMA

การทนต่อสภาวะแวดล้อม : PMMA ทนต่อสภาวะแวดล้อมได้ดี โดยเฉพาะต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต รองลงมา ได้แก่ SAN, PC, PS และ PVC ตามลำดับ จึงเหมาะกับการกลางแจ้งอีกด้วย เช่น ผลิตภัณฑ์ประเภทไฟรถยนต์ เป็นต้น

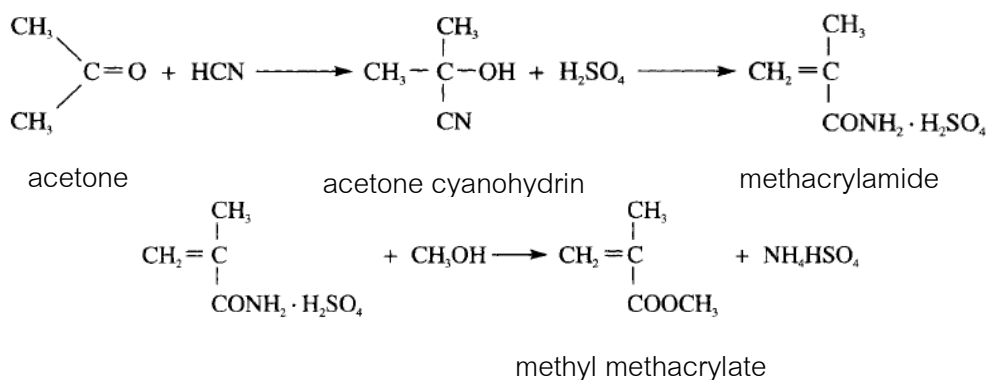
การทนความร้อน : PMMA ทนความร้อนได้สูงเมื่อเทียบกับ PS, SAN และ PVC แต่ทนได้น้อยกว่า PC ใช้ทำไฟรถยนต์ และฝาครอบไฟ เป็นต้น

การทนต่อสารเคมี : PMMA ทนสารเคมีได้ดีเมื่อเทียบกับ SAN, PS และ PC

การทนต่อการขีดขูด : PMMA ทนการขีดขูดได้ดีกว่า PS, SAN และ PC ดังนั้น ชิ้นงานที่ทำจาก PMMA จึงดูสวยงาม ไม่พบปัญหารอยขีดข่วน

2.2.1 การเตรียมเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์

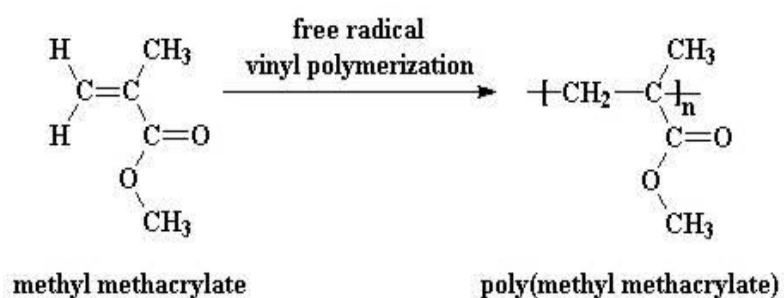
การเตรียมเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์มีหลายขั้นตอน เริ่มจากการเปลี่ยนแอสีโตนให้เป็นแอสีโตนไซยาโนไฮดรินด้วยไฮโดรเจนไซยาไนด์ แล้วเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ 100 องศาเซลเซียส ติดตามด้วยการผ่านผลิตภัณฑ์ที่ได้ลงไปยังสารละลายเมทานอล โดยเมทิลเมทาคริเลตที่ได้มีสถานะเป็นของเหลวไม่มีสี มีจุดเดือด 100.5 องศาเซลเซียส ปฏิกริยาทั้งหมดแสดงไว้ในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กระบวนการเตรียมเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์[20]

2.2.2 การเตรียมพอลิเมทิลเมทาคริเลต

การเตรียม PMMA ในทางอุตสาหกรรมกระทำโดยกลไกแบบฟรีเรดิคัล ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งมีหลายวิธี เช่น แบบบัลก์ (bulk) แบบสารละลาย (solution) แบบแขวนลอย (suspension) และแบบอิมัลชัน (emulsion) แต่วิธีที่ดีที่สุด ได้แก่ แบบบัลก์



ภาพที่ 2.3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลต[21]

2.2.3 สมบัติและการใช้งาน (Properties and applications)

PMMA ที่เตรียมโดยกลไกแบบฟรีเรดิคัลมีโครงสร้างแบบเส้น มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ 105 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิหลอมเหลวสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส สมบัติเด่นของ PMMA คือ ไม่มีสี และใสเหมือนแก้ว นอกจากนี้ ยังแข็งแรงกว่า และทนต่ออินฟราอากาศได้ดีกว่า PS แต่ไม่สามารถทนทานการสึกหรอได้ดีเท่าแก้ว

PMMA ละลายได้ในตัวทำละลายหลายชนิด ได้แก่ อะโรเมติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีน และโทลูอีน เป็นต้น คลอริเนตไฮโดรคาร์บอน เช่น คลอโรฟอร์ม และเอทิลีนคลอไรด์ เป็นต้น และสารจำพวกเอสเทอร์ เช่น เอทิลแอสีเตต เป็นต้น สารอินทรีย์บางชนิด เช่น แอลกอฮอล์ทั่วไป

และอะมีน ถึงแม้จะไม่ละลาย PMMA แต่จะทำให้ PMMA เกิดรอยแตกได้ PMMA สามารถทนน้ำ และสารเคมีได้เป็นอย่างดี รวมทั้งกรดอ่อน เบสอ่อน และปฏิกิริยาซาพอนิฟิเคชัน (saponification) แต่กรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ไฮโดรฟลูออริก (HF) และสารออกซิไดซ์เข้มข้น เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) จะทำปฏิกิริยากับ PMMA ได้

สมบัติเชิงกล และความทนความร้อนดีมากเช่นกัน ส่วนสมบัติฉนวนไฟฟ้าดีปานกลาง เพราะพอลิเมอร์นี้ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิเลตซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้ว จากความโปร่งใส และการนำไปย้อมสีได้ง่ายของ PMMA จึงสามารถนำไปใช้งานเป็นส่วนประกอบของเครื่องไฟฟ้ามากกว่า กิ่งหนึ่งใช้เป็นส่วนประกอบของรถยนต์ เช่น พลาสติกหุ้มไฟหน้า ไฟท้าย ไฟเลี้ยว หน้าปัดเข็มไมล์ ประโยชน์การใช้งานอื่นๆ ได้แก่ ป้ายโฆษณา สัญลักษณ์จราจร เลนซ์ และเครื่องประดับ เป็นต้น

2.3 ซิลิกา (Silica) [22-26]

ซิลิกามีชื่อทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO_2) และอาจมีน้ำในผลึกอยู่ด้วย ซิลิกาเป็นสารเติมแต่งที่ไม่ใช่สีดำ (nonblack filler) ที่ดีที่สุดและนิยมใช้กันมาก สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ซิลิกาบด (ground mineral silica) เป็นแร่ซิลิกาบด หรือทรายบดละเอียด มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 200 เมช (75,000 angstrom) ซึ่งเป็นขนาดที่หยาบ ไม่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ แต่มีราคาถูกจึงนิยมใช้เป็นสารเติมแต่งในยางทนความร้อน เนื่องจากขนาดอนุภาคใหญ่ จึงทำให้สมบัติไม่ดีและพื้นที่ผิวน้อย การดูดซึมสารเร่งวัลคาไนซ์ไว้ที่ผิวจะมีน้อย ดังนั้น ซิลิกาบดจึงไม่มีผลต่อเวลาในการคงรูป

2. ซิลิกาที่ได้จากการตะกอน (precipitated silica) โดยการนำทรายมาละลายในด่างให้กลายเป็นสารประกอบซิลิเกต จากนั้นจึงตกตะกอนเอาซิลิกาออกมาล้างและทำให้แห้ง จะได้ซิลิกาผง ซึ่งมีน้ำอยู่ในอนุภาคซิลิกาที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 100-400 angstrom ซิลิกาชนิดนี้เป็นสารเติมแต่งที่เสริมความแข็งแรงให้กับยางที่นิยมใช้มากที่สุด โดยทำให้ยางมีความทนแรงดึง การฉีกขาดและการสึกหรอ นอกจากนี้ยังทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปมักใช้กับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลักษณะโปร่งแสงและมีสีสวย

3. ซิลิกาที่เตรียมได้จากการเผาไหม้ (furnace silica) ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง SiCl_4 กับไอน้ำในเปลวไฟของไฮโดรเจนและออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400 องศาเซลเซียส

จะเกิดการสลายตัวให้ซิลิกาออกมา มีขนาดอนุภาคเล็กมาก จึงเสริมความแข็งแรงได้ดีมาก ทำให้ยางมีความทนแรงดึง การฉีกขาดและการสึกหรอ ซิลิกาชนิดนี้มีราคาแพงมากมักใช้เพื่อวัตถุประสงค์พิเศษกับยางซิลิโคน เป็นต้น ซิลิกาที่เตรียมจากการตกตะกอนและการเผาไหม้เมื่อใช้กับยางจะก่อให้เกิดการชะลอการคงรูป เนื่องจากผิวหน้าที่ไวต่อปฏิกิริยาของอนุภาคซิลิกาจะดูดซึมสารเร่งวัลคาไนซ์ จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณของสารเร่งวัลคาไนซ์ หรือใช้สารเคมีช่วยเร่งปฏิกิริยาคงรูปได้แก่ พวกไกลคอล เช่น DEG และ PEG เป็นต้น หรือพวกเอมีน เช่น triethanolamine เป็นต้น โดยใช้ประมาณร้อยละ 6 ของปริมาณซิลิกาในยาง

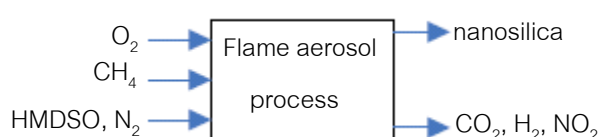
ปัจจุบัน นาโนซิลิกาได้มีการนำมาพัฒนาใช้ในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ใช้เป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ยาง พลาสติก และเครื่องสำอาง เป็นสารเพิ่มความแข็งแรงด้านทันตกรรม ใช้เติมในสีเพื่อเพิ่มความเหนียวขึ้น รวมถึงในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เนื่องจากนาโนซิลิกามีสมบัติที่แข็งแรง มีความเป็นรูพรุนสูง อีกทั้งยังเป็นสารกึ่งตัวนำ อย่างไรก็ดีเนื่องจากนาโนซิลิกาเป็นอนุภาคที่เล็กมาก อาจทำให้หลุดลอยออกมาและส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้

2.3.1 วิธีสังเคราะห์นาโนซิลิกา [24]

การสังเคราะห์นาโนซิลิกามีหลายวิธี ได้แก่ Flame aerosol process และกระบวนการโซล-เจล (Sol-gel process) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์กันอย่างแพร่หลาย

2.3.1.1 วิธี Flame aerosol process

การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถผลิตนาโนซิลิกาได้ในทางการค้า ซึ่งได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงของเฮกซะเมทิลไดซิลอกเซน (hexamethyldisiloxane, HMDSO) โดยใช้ HMDSO เป็นสารตั้งต้นในการผลิต ส่วนไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพาในกระบวนการ ใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิง และแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิแดนซ์ ซึ่งสารเหล่านี้จะทำการป้อนเข้าสู่กระบวนการโดยสารเคมีที่ป้อนและกระบวนการผลิตแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และ ภาพที่ 2.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.4 กระบวนการผลิตนาโนซิลิกาโดยวิธี Flame aerosol process

ตารางที่ 2.2 สารเคมีในกระบวนการสังเคราะห์นาโนซิลิกาโดยวิธี Flame aerosol process

สารเคมีที่ป้อน	อัตราการป้อน (ลิตรต่อชั่วโมง)	ป้อนเข้าสู่ท่อ
HMDSO	1	แกนกลางท่อ
มีเทน	85	แกนกลางท่อ
ไนโตรเจน	176	ท่อตรงกลาง
ออกซิเจน	75	ท่อด้านนอก

ผลการผลิตนาโนซิลิกาด้วยวิธี Flame aerosol process สามารถผลิตนาโนซิลิกาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10–100 นาโนเมตร และอัตราการผลิตที่ได้ คือ 17 กรัม/ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าวิธีนี้สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของออกซิเจนดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของออกซิเจน

อัตราการไหลของออกซิเจน (ลิตรต่อนาที)	ขนาดอนุภาคนาโนซิลิกา (นาโนเมตร)
2.5	44 nm
4.7	78 nm
8.5	55 nm
13.3	41 nm
24	23 nm

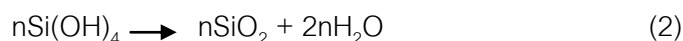
2.3.1.2 วิธีโซล-เจล (Sol-gel process)

วิธีโซล-เจลเป็นการใช้สารละลายต่างๆ ทำปฏิกิริยากัน ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิด เป็น เจล จากเจลที่ได้นำไปทำให้แห้งหรือเผาที่อุณหภูมิต่ำจะได้นาโนซิลิกา ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดประกอบไปด้วยปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis) และปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ ดังสมการต่อไปนี้

ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส

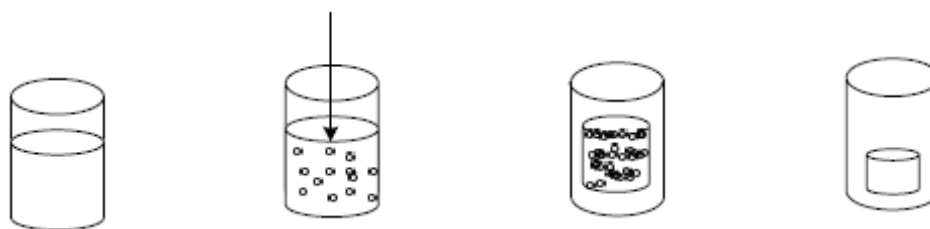


ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์



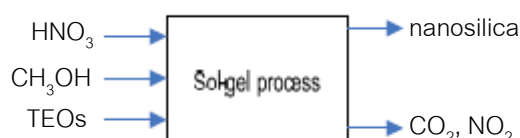
โดยวิธีโซล-เจลจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ (1) การเตรียมเจล (preparation of gel) (2) การทำให้เกิดเจล (aging of gel) และ (3) การทำเจลให้แห้ง (drying of gel) โดยการเกิดซิลิกาเจลแสดงได้ดังแสดงในภาพที่ 2.5

สารละลาย $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ในเมทานอล + น้ำ	เกิดอนุภาคของโซล จากปฏิกิริยาการ เกิดพอลิเมอร์	อนุภาคของโซล จับกันเป็นโครงข่าย	สารละลายแข็งตัว กลายเป็นเจล
--	--	------------------------------------	--------------------------------



ภาพที่ 2.5 การเตรียมนาโนซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจล

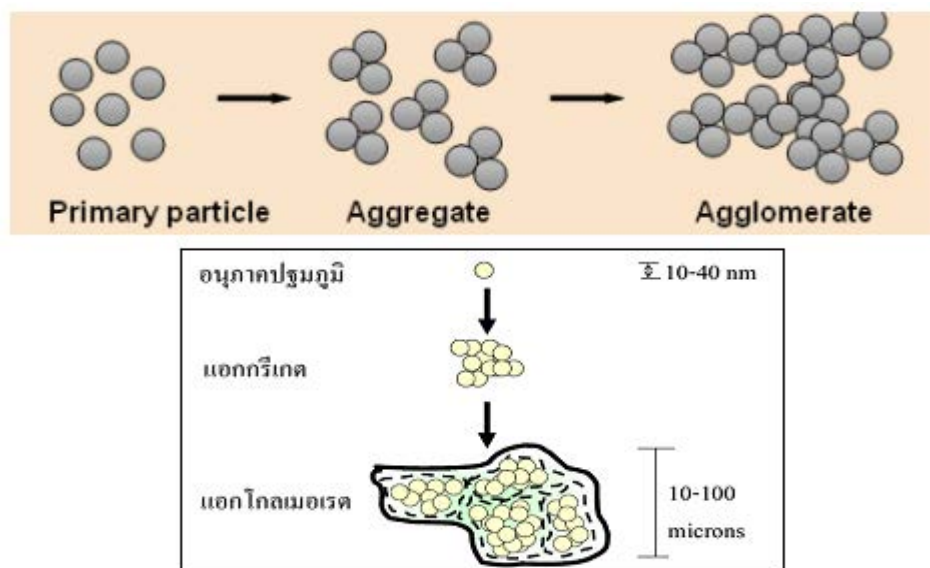
การสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีนี้จะทำการเตรียมแโรเจลซึ่งจะใช้สารละลายเททราเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethylortho-silicate, TEOs) ในแอลกอฮอล์ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กรดไนตริกลงไป 2-3 หยด ทิ้งไว้ประมาณ 14-16 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดเป็นเจล จากนั้นนำไปทำให้แห้งภายใต้ภาวะจุดวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์ นาโนซิลิกาที่เตรียมได้จากวิธีโซล-เจลจะมีสมบัติทางกายภาพ คือ ขนาดอนุภาค 5-50 นาโนเมตร, พื้นที่ผิว 935-1150 ตารางเมตร/กรัม ความหนาแน่น 0.043-0.089 กรัม/ตารางเซนติเมตร และปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด 8.6-10.9 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งกระบวนการผลิตแสดงไว้ในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กระบวนการผลิตนาโนซิลิกาโดยวิธีโซล-เจล

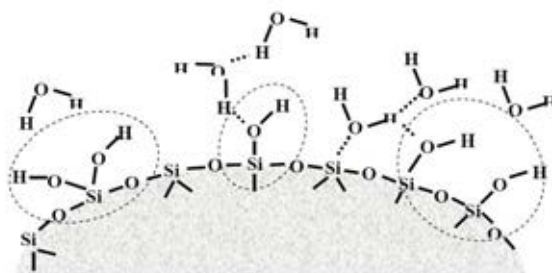
2.3.2 ปัญหาของการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารเติมแต่ง [25,26]

เนื่องจากซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิ 10-40 นาโนเมตร ซิลิกาจะไม่อยู่อย่างเดี่ยวๆ ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จะจับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่า “แอกกรีเกต” (aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม นอกจากนี้ แอกรีกเกตของซิลิกายังชอบจับกลุ่มกันเป็นก้อนใหญ่มากขึ้น เรียกว่า “แอกโกลเมอเรต” (agglomerate) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 การเกาะกลุ่มของนาโนซิลิกา

การจับตัวเป็นกลุ่มก้อนก่อนของซิลิกานี้จะทำให้การกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดได้ยาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการเสริมแรงลดลง นอกจากนี้ โครงสร้างบนพื้นผิวของซิลิกา ประกอบด้วยหมู่ซิลานอล (silanol groups, $-\text{Si}-\text{OH}$) ปกคลุมอยู่อย่างหนาแน่น (4-5 หมู่ต่อ 100 angstrom) ซึ่งหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกานี้จะเกาะอยู่ในหลายลักษณะ ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ลักษณะของหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา[27]

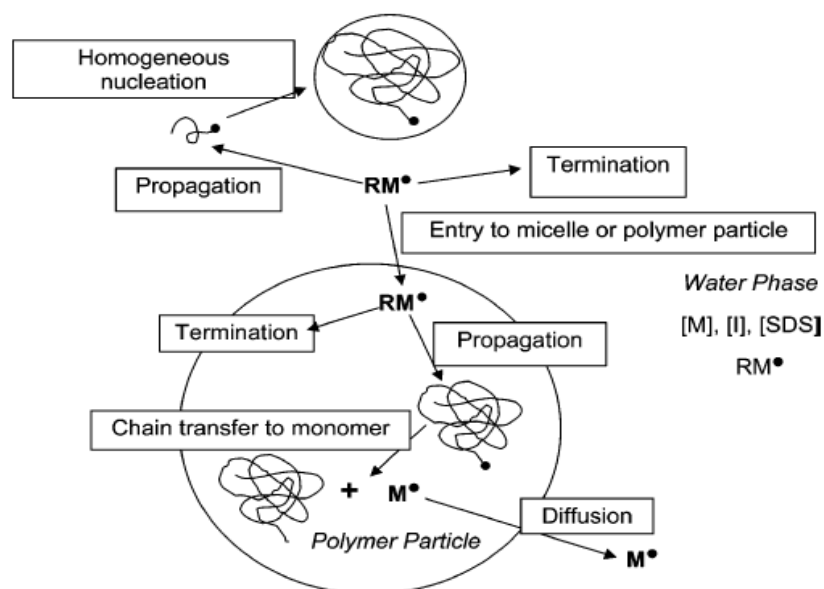
หมู่ซิลานอลทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน ซิลิกาจึงอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า 'แอกไกลเมอเรต' เพราะอันตรกิริยาที่ยึดซิลิกาเข้าด้วยกัน ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงแตกตัว (disperse) และกระจายตัว (distribute) ในพอลิเมอร์ได้ยาก นอกจากนี้ หมู่ซิลานอลบนพื้นผิวซิลิกายังสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี โดยในสภาพการเก็บรักษาทั่วไปแล้ว ซิลิกาจะมีความชื้นร้อยละ 4-7 (ปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงไปตามความชื้นของสิ่งแวดล้อม) ความชื้นที่จับอยู่กับหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวซิลิกานอกจากมีผลทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ยากขึ้น

2.4 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน (Differential micro-emulsion polymerization) [28-30]

อนุภาคที่มีขนาดระดับนาโนเมตรกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เพราะมีสมบัติและคุณลักษณะดีเด่นหลายประการ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กมากทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงมาก และปริมาณโมเลกุลหรืออะตอมบนผิวของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งนำไปสู่การใช้งานหลายๆ ด้าน เช่น การแพทย์ (medical) สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) การเกษตร (agriculture) และสิ่งแวดล้อม (environment) เป็นต้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรถูกใช้ในการนำส่งยา (drug delivery) ตัดแปรความทนแรงกระแทก (impact modifier) สำหรับพลาสติก และอื่นๆ

พอลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรส่วนใหญ่จะสังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชันและไมโครอิมัลชัน (emulsion and microemulsion polymerization) สำหรับกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันได้ถูกพัฒนามาจากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชันและไมโครอิมัลชัน ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถลดปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวในกระบวนการเกิดพอลิเมอร์อีกทั้งสามารถควบคุมขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย ซึ่งหลักการของเทคนิคนี้คล้ายกระบวนการแบบไมโครอิมัลชัน กล่าวคือ ในระบบแรกเริ่มจะประกอบด้วยน้ำ สารลดแรงตึงผิว และสารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายน้ำผสมอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเมื่อให้ความร้อนแก่ระบบจนถึงที่อุณหภูมิที่กำหนด จึงเริ่มหยดมอนอเมอร์ลงไปทีละหยด ไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวจะแย่งกันดึงมอนอเมอร์เข้าไปอยู่ในไมเซลล์ได้ง่ายกว่ากระบวนการแบบไมโครอิมัลชัน จึงสามารถลดปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่จำเป็นต้องให้ให้มีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤติ (critical micelle concentration, CMC) ได้ ซึ่งเป็นข้อดีของกระบวนการนี้ เพราะสารลดแรงตึงผิวมีราคาแพง อีกทั้งไม่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารลดแรงตึงผิวภายหลังกระบวนการเกิดพอลิเมอร์

ภาพที่ 2.9 แสดงกลไกการเกิดพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันที่นำเสนอโดย He และคณะ [28] ซึ่งภายในระบบก่อนเริ่มเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วยสารเริ่มปฏิกิริยา สารลดแรงตึงผิว และสารลดแรงตึงผิวร่วม (co-surfactant)



ภาพที่ 2.9 กลไกการของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน[28]

โดยสารเริ่มปฏิกิริยาแตกตัวในวัฏภาคน้ำกลายเป็นเรดิคัลปฐมภูมิ ซึ่งแบ่งส่วนเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบด้วยการหยดอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นมอนอเมอร์เรดิคัล (RM•) และขยายเป็นพอลิเมอร์เรดิคัล ซึ่งพอลิเมอร์เรดิคัลเหล่านี้จะขยายขนาดในวัฏภาคน้ำจนได้ความยาวสายโซ่วิกฤติ (critical chain length) และตกตะกอนโดยการเคลื่อนเข้าไปอยู่ในไมเซลล์เกิดเป็นอนุภาคของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ RM• ยังสามารถเคลื่อนเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ในไมเซลล์ที่บวมตัวด้วยมอนอเมอร์เกิดเป็นอนุภาคพอลิเมอร์ ซึ่งอนุภาคพอลิเมอร์ฟรีเรดิคัลเหล่านี้จะขยายขนาดต่อไป สายโซ่พอลิเมอร์จะสิ้นสุดการขยายภายหลังการเกิด chain transfer ไปยังมอนอเมอร์ และมอนอเมอร์เรดิคัลที่เกิดจาก chain transfer (M•) สามารถเริ่มต้นเกิดพอลิเมอร์ต่อไปได้ หรือแพร่ออกสู่วัฏภาคน้ำเนื่องจากมีขนาดเล็กมาก

He และคณะ [28] ได้สังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน โดยใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate) เป็นสารเริ่มปฏิกิริยา และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) เป็นสารลดแรงตึงผิว โดยศึกษาผลของภาวะการสังเคราะห์ต่อขนาดของอนุภาค ซึ่ง

ผลการทดลอง พบว่า พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 20 นาโนเมตร เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิว/มอนอเมอร์ เท่ากับ 1/18 และอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิว/น้ำ เท่ากับ 1/120 ซึ่งเป็นการใช้สารลดแรงตึงผิวปริมาณน้อยกว่าวิธีการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันมาก

Norakankorn และคณะ [30] ได้สังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน โดยใช้ AIBN เป็นสารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายในน้ำมัน (oil-soluble initiator) และใช้โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเป็นสารลดแรงตึงผิว พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 1-3 ล้าน และมีขนาดอนุภาค 20-30 นาโนเมตร นอกจากนี้ ยังได้นาโนเลทเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีปริมาณของแข็งสูงถึงร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดแรงตึงผิวจะทำให้ได้ร้อยละของการเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ สูงขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของมอนอเมอร์ต่อน้ำไม่มีนัยสำคัญใดๆ ต่อร้อยละของการเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ และสามารถลดอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิว/มอนอเมอร์ เท่ากับ 1/130 และ อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิว/น้ำ เท่ากับ 1/600

2.5 การห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยพอลิเมอร์ [31-35]

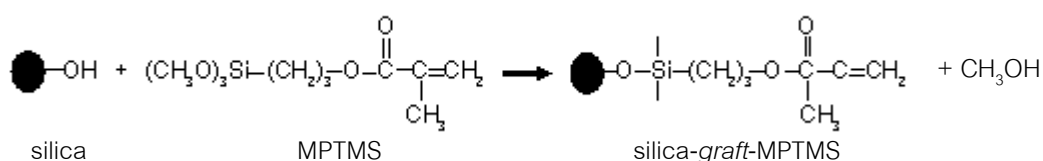
ปัจจุบันเทคนิคการห่อหุ้มอนุภาคของสารอนินทรีย์ด้วยพอลิเมอร์เป็นอนุภาคนาโนคอมพอสิต (nanocomposite particles) กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของวัสดุที่ถูกห่อหุ้ม เนื่องจากอนุภาคเหล่านี้แสดงสมบัติที่ดีเยี่ยมหรือสมบัติใหม่ๆ ทั้งสมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี และเพิ่มการกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ลดความเป็นพิษของสารอนินทรีย์ และสามารถเก็บและขนส่งได้สะดวก ดังนั้น การห่อหุ้มอนุภาคของซิลิกาที่มีขนาดระดับนาโนเมตรด้วยพอลิเมอร์ เช่น พอลิสไตรีน และพอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นต้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

ปัญหาในการห่อหุ้มอนุภาคซิลิกาในระดับนาโนด้วยพอลิเมอร์ คือ การแยกเฟสระหว่างอนุภาคซิลิกาและพอลิเมอร์ ซึ่งวิธีเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาคอนินทรีย์และพอลิเมอร์อาจทำได้ 5 วิธี คือ

1. การใช้พอลิเมอร์ที่มีอันตรกิริยา (พันธะแวนเดอร์วาล พันธะไดโพล และพันธะไฮโดรเจน) กับอนุภาคอนินทรีย์
2. การยึดติดด้วยพันธะโควาเลนต์ของชั้นอินทรีย์บนผิวของอนุภาคอนินทรีย์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (compatibilizer) ของพื้นผิวอนุภาค/พอลิเมอร์

3. ทำการห่อหุ้มอนุภาคด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์เทคนิคพิเศษ เช่น กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน
4. การยึดติดของหมู่ฟังก์ชันบนอนุภาคที่สามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับพอลิเมอร์
5. การยึดติดของหมู่เริ่มปฏิกิริยาบนผิวอนุภาคสำหรับการกราฟต์สายโซ่พอลิเมอร์

Yu และคณะ [31] ได้สังเคราะห์อนุภาคซิลิกา/พอลิสไตรีนนาโนคอมพอสิตด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ ‘อินซิทู’ ไมโครอิมัลชัน โดยใช้ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 10 ± 5 นาโนเมตร ซึ่งก่อนห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาจำเป็นต้องดัดแปรผิวของซิลิกาด้วย 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane (MPTMS) ซึ่งเป็นสารคู่ควบซิลีน (silane coupling agent) เพื่อให้หมู่ซิลินอลของซิลิกาทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบซิลีนผ่านพันธะโควาเลนต์ของ O-Si ทำให้เกิดพันธะคูบนผิวของซิลิกาและสามารถทำปฏิกิริยากับสไตรีนเกิดเป็นโคพอลิเมอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 จากผลการทดลอง พบว่า ซิลิกาที่ไม่ผ่านการดัดแปรผิวจะไม่มีพอลิสไตรีนมากราฟต์บนผิวของซิลิกาเลย ขณะที่ซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรผิวมีพันธะคู่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับสไตรีนเกิดเป็นโคพอลิเมอร์ และได้โครงสร้างแบบ core-shell ที่มีซิลิกาเป็นแก่นกลาง (core) และพอลิสไตรีนเป็นเปลือกหุ้ม (shell) อย่างหนาแน่น โดยมีประสิทธิภาพในการห่อหุ้ม (encapsulating efficiency) มากกว่าร้อยละ 80 และอนุภาคนาโนคอมพอสิตที่ได้มีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 45 นาโนเมตร อย่างไรก็ตาม การห่อหุ้มนาโนซิลิกาด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ ‘อินซิทู’ ไมโครอิมัลชันไม่ได้รับความสนใจมากนัก เนื่องจากต้องใช้สารลดแรงตึงผิวจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน



ภาพที่ 2.10 การปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลีน [34]

Xavier และคณะ [33] ได้ศึกษาผลของสารเริ่มปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ในการเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน โดยใช้สารลดแรงตึงผิวแบบนอนไอออนิก (โนนิลฟีนอลพอลิออกซีเอทิลีน) และใช้สารเริ่มปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ 2,2-azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride (AIBA), potassium persulfate (KPS) และ azobis(isobutyronitrile) (AIBN) ซึ่งเป็นประเภทแคตไอออนิก แอนไอออนิก และนอนไอออนิก ตามลำดับ โดยนาโนซิลิกาที่ใช้มีอนุภาคขนาดประมาณ 68 นาโนเมตร ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ดำเนินไป

ภายใต้ภาวะที่เป็นต่าง ผลการทดลองพบว่า AIBA สามารถถูกดูดซับบนผิวของนาโนซิลิกาเนื่องจาก การมีอันตรกิริยาของไฟฟ้าสถิตระหว่างหมู่อะมิไดน์ (amidine) ของสารเริ่มปฏิกิริยาแคตไอออนิก และหมู่ซิลานอล ขณะที่สารเริ่มปฏิกิริยาแอนไอออนิกและนอนไอออนิกไม่ถูกดูดซับบนซิลิกา ภายใต้ภาวะ ของการทดลองเดียวกัน นอกจากนี้ พบว่าเกิดพอลิเมทิลเมทาคริเลตมากถึงร้อยละ 65 โดยน้ำหนักบนผิวของนาโนซิลิกาเมื่อใช้ AIBA เป็นสารเริ่มปฏิกิริยา ในขณะที่มีเพียงร้อยละ 40 สำหรับ KPS และร้อยละ 25 สำหรับ AIBN

Zheng และคณะ [35] ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโนคอมพอสิตของพอลิเมทิลเมทาคริเลต/ซิลิกา ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมออร์แบบแขวนลอย โดยทำการดัดแปรนาโนซิลิกา 2 วิธี คือ ดัดแปรด้วย แกมมาเมทาซิลออกซีโพรพิลไตรเมทอกซีซิเลน (γ -methactloxypropyl trimethoxy silane, KH570) และ ลอริลแอลกอฮอล์ (lauryl alcohol, 12COH) ส่วนอีกวิธีได้แก่การกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตบนผิว ของซิลิกาที่ถูกทรีตด้วย KH570 แล้วทำการตรวจสอบโครงสร้างของอนุภาคนาโนคอมพอสิตด้วยเทคนิค ฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรด (FT-IR) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ซึ่งผลของ FT-IR สเปกตรัมแสดงให้เห็นว่ามีอันตรกิริยาระหว่างซิลิกาที่ถูกดัดแปรและสายโซ่พอลิเมออร์ และภาพ จาก TEM ยืนยันถึงฐานวิทยาและพฤติกรรมกระจายของซิลิกาที่ถูกดัดแปรใน PMMA/SiO₂ นาโน-คอมพอสิต นอกจากนี้ พบว่าวิธีการกราฟต์พอลิเมทิลเมทาคริเลตบนผิวของซิลิกาที่ถูกทรีตด้วย KH570 เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการเตรียมอนุภาคนาโนคอมพอสิตด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมออร์ แบบแขวนลอย

Zhu และคณะ [36] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนคอมพอสิตของพอลิเมทิลเมทาคริเลต/ซิลิกาด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมออร์แบบแขวนลอย-กระจายตัว (suspension-dispersion polymerization) ในระบบเอเควียส พบว่า พอลิเมทิลเมทาคริเลตถูกกราฟต์อย่างสม่ำเสมอบนผิวของนาโนซิลิกา นอกจากนี้ อนุภาคนาโนคอมพอสิตยังถูกใช้เป็นฟิลเลอร์ในพีวีซีเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของ PMMA-SiO₂/PVC นาโนคอมพอสิต ซึ่งผลการตรวจสอบฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่ปกคลุมบนซิลิกาได้ปรับปรุงการกระจายตัวของซิลิกาในพีวีซีเมทริกซ์ และเพิ่มการยึดเกาะระหว่าง ผิวระหว่างซิลิกาและพีวีซี และผลจากการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าอนุภาคแบบคอร์-เชลล์ที่เตรียม ได้นี้ สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพีวีซีเมทริกซ์

Chuayjuljit และ Boonmahitthisud [37] ได้ทดลองห่อหุ้มนาโนซิลิกาด้วยพอลิสไตรีนผ่าน กระบวนการเกิดพอลิเมออร์แบบ 'อินซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน แล้วนำไปเสริมแรงให้กับ ยางธรรมชาติในสภาพที่เป็นเลเท็กซ์ โดยทำการดัดแปรผิวของนาโนซิลิกาด้วย MPTMS ก่อนนำไป

ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนที่สังเคราะห์ได้จากการใช้ SDS เป็นสารลดแรงตึงผิว และ AIBN เป็นสารเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งอนุภาคนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 40 นาโนเมตร และมีสัณฐานวิทยาเป็นแบบคอร์-เชลล์ ซึ่งช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของนาโนซิลิกาในยางธรรมชาติ และสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติอีกด้วย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

- 3.1.1 พอลิไวนิลคลอไรด์ [poly(vinyl chloride), PVC] ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยนามพลาสติกส์ จำกัด (มหาชน) [Thai Nam Plastic (Public) Co., Ltd]
- 3.1.2 เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (methyl methacrylate monomer, MMA) (commercial grade, Thai MMA Co., Ltd.)
- 3.1.3 โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) ชนิดเกล็ด ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 97 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทคอกนิส (ประเทศไทย) จำกัด [Cognis (Thailand) Co., Ltd.]
- 3.1.4 2,2'-อะโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (2,2'-azobisisobutyronitrile, AIBN) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเคมีคัล จำกัด (Siam Chemical Industry Co., Ltd.)
- 3.1.5 ซิลิกา (silica) ที่มีขนาดอนุภาค 15-20 นาโนเมตร จากบริษัทซิกมา-อัลดริช จำกัด (Sigma-Aldrich Co., Ltd.)
- 3.1.6 3-เมทาคริโลออกซีโพรพิลไตรเมทอกซีซิลเลน (3-methacryloxypropyltrimethoxy-silane methacryloxypropyltrimethoxysilane, MPTMS) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทดาวคอร์นิ่ง จำกัด (Dow Corning Co., Ltd.)
- 3.1.7 กรดสเตียริก (stearic acid) ได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัทไทยนามพลาสติก จำกัด
- 3.1.8 แคลเซียม/ซิงค์สเตียเรต (Ca/Zn stearate) ได้รับการอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยนามพลาสติก จำกัด
- 3.1.9 ไดไอโซนิลฟทาเลต (diisononyl phthalate) ได้รับการอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยนามพลาสติก จำกัด
- 3.1.10 เมทานอล เกรดที่ใช้ทั่วไป (practical grade)

3.1.11 น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมนาโนเลเท็กซ์

3.2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แก้วไพเรกซ์ (Pyrex glass reactor) ที่มีขนาดบรรจุ 500 มิลลิลิตร แบบมีฝาปิด-เปิด

3.2.1.2 อุปกรณ์ควบแน่นแบบสองชั้น (double jacket condenser)

3.2.1.3 กรวยหยดสารแบบปิด (closed dropping funnel)

3.2.1.4 เครื่องให้ความร้อนและกวนสารด้วยระบบดิจิทัล (stirring/temperature controlled digital hot plate)

3.2.1.5 แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar)

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมชั้นทดสอบ

3.2.2.1 เครื่องอัดรีดแบบสองลูกกลิ้ง (Two-Roll Mill) รุ่น LRM-S-110 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.2.2.2 เครื่องอัดแบบ (compression molding) รุ่น LP-S-50 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.2.2.3 แม่พิมพ์ทำจากแผ่นเหล็กขนาด 14×10×0.3 เซนติเมตร

3.2.2.4 เครื่องตัด compress air sample cutter รุ่น SDAP-100-N

3.2.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.2.3.1 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (Dynamic Light Scattering Analyzer, DLS) รุ่น Nano-series ZX (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

3.2.3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) รุ่น JEOL JEM-2100 (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.2.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JEOL JSM-5410LV (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

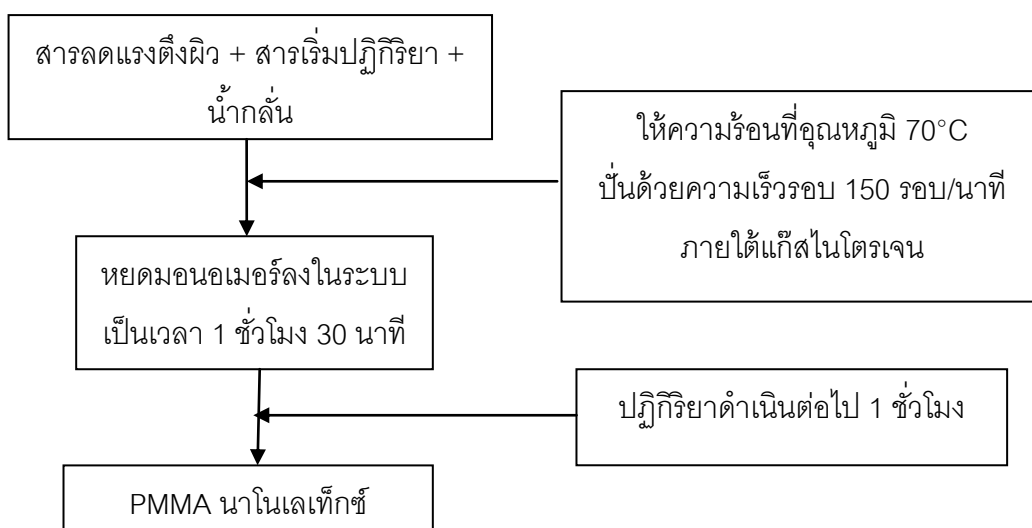
3.2.3.4 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine) รุ่น LLOYD LR 100K (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.2.3.5 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (Thermogravimetric Analyzer, TGA) รุ่น METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851° (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA)

ขั้นตอนการสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันแสดงไว้ในภาพที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 (สูตรที่ 1)



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของ PMMA

การเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตเริ่มจากนำสารลดแรงตึงผิว (SDS) 8 กรัม สารเริ่มปฏิกิริยา (AIBN) 0.12 กรัม และน้ำกลั่น 60 มิลลิลิตร ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แก้วที่มีการต่อกับอุปกรณ์ควบคุมแบบสองชั้น และควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องให้ความร้อนและกวนสารแบบควบคุมด้วยระบบดิจิทัล (ดังแสดงในภาพที่ 3.2) และให้ความร้อนภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอที่อัตราเร็วในการหมุนของแท่งแม่เหล็ก 150 รอบ/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนโดยทำการจ่ายแก๊สไนโตรเจนผ่านหลอดนำแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่ระดับกึ่งกลางความสูงของสารละลายทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 70 องศาเซลเซียส จึงเริ่มหยดเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ที่ละหดยเล็กน้อยอย่างสม่ำเสมอโดยใช้กรวยหยดสารเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จนครบ 22.5 กรัม จากนั้นให้คงปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พร้อมการกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง เพื่อให้เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาเป็นพอลิเมทิลเมทาคริเลตอย่างสมบูรณ์ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

3.3.2 การแยกพอลิเมทิลเมทาคริเลตออกจากรานาโนเลเท็กซ์

นำนาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.3.1 ซึ่งบรรจุอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์แก้ว ไปทำให้ตกตะกอนโดยใช้เมทานอลปริมาณมากเกินไป (ภาพที่ 3.3) ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนประมาณ 5-10 นาที แล้วกรองด้วยเครื่องกรองระบบสุญญากาศ (ภาพที่ 3.4) และล้างสารลดแรงตึงผิวและโอลิโกเมอร์ด้วยน้ำกลั่นและเมทานอลอย่างละ 1 ลิตร นำตะกอนของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่แยกได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



ภาพที่ 3.3 การตกตะกอนพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเมทานอลที่มากเกินไป



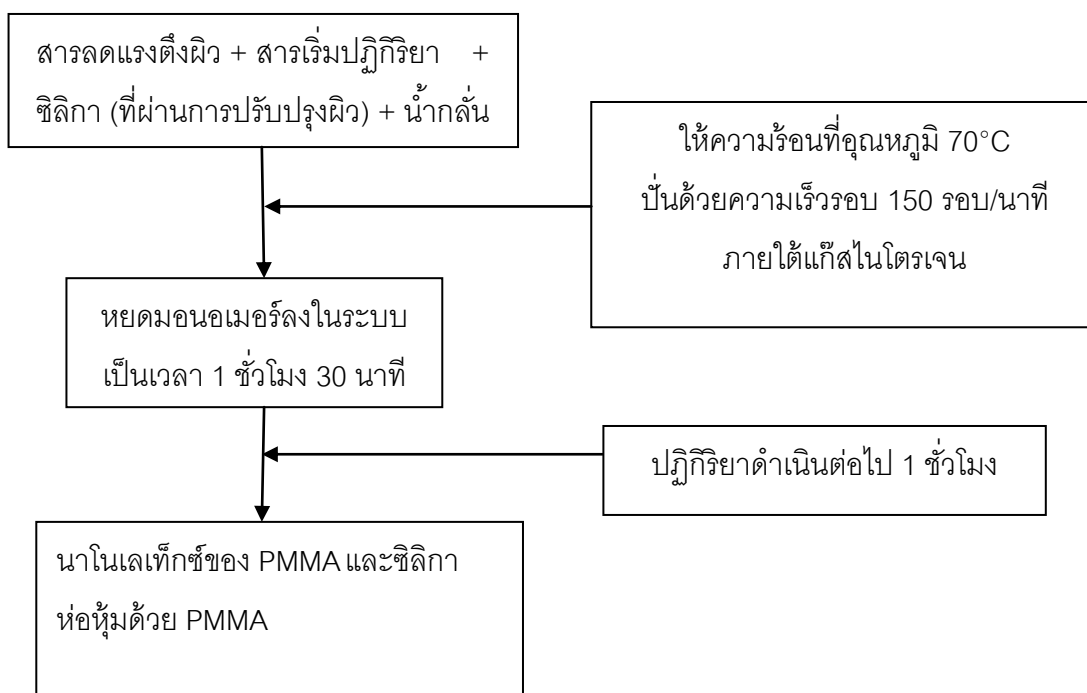
ภาพที่ 3.4 การล้างและกรองอนุภาคระดับนาโนที่เตรียมได้

3.3.3 การปรับปรุงผิวอนุภาคของนาโนซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลเลน

นำน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆ เติมกรดแอสซีติกลงไปจนมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 4.5 จากนั้นเติมสารละลายเจือจางของ MPTMS (ความเข้มข้น 0.5%) ปริมาณ 4 กรัม ในสารละลายกรดแอสซีติกที่เตรียมได้ โดยกวนส่วนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กไปพร้อมๆ กัน เมื่อเติมสารละลายเจือจางของสารคู่ควบซิลเลนจนหมด ทำการกวนส่วนผสมต่อไปอีก 30 นาที จนได้สารละลายใสเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงค่อยๆ เติมอนุภาคนาโนซิลิกา (ขนาด 10-20 นาโนเมตร) ปริมาณ 13.33 กรัม (ปริมาณของ MPTMS/ซิลิกาเท่ากับ 0.3/1) ในส่วนผสมแล้วกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง นำส่วนผสมที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง (การปรับปรุงผิวอนุภาคของซิลิกาใช้วิธีของบริษัทดาวคอร์นิ่ง จำกัด)

3.3.4 การสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ขั้นตอนการสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันแสดงไว้ในภาพที่ 3.5 และปริมาณสารที่ใช้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 (สูตรที่ 2 และ 3)



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของ PMMA และซิลิกาห่อหุ้มด้วย PMMA

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์

สูตร	SDS (g)	MMA (ml)	AIBN (g)	ซิลิกาที่ปรับปรุงผิว (g)	น้ำกลั่น (ml)
1	8	22.5	0.12	-	60
2	8	22.5	0.12	0.4	60
3	8	22.5	0.12	4.5	60

การเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต เริ่มจากนำสารลดแรงตึงผิว (SDS) สารเริ่มปฏิกิริยา (AIBN) ซิลิกาที่ปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบซีเลน (MPTMS) และน้ำกลั่นใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แก้ว โดยใช้อัตราส่วนตามที่กำหนดในตารางที่ 3.1 (สูตรที่ 2 และ 3) จากนั้นให้ความร้อนพร้อมการกวนด้วยแท่งแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอที่อัตราเร็ว 150 รอบต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนโดยส่งแก๊สไนโตรเจนผ่านหลอดนำแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แก้วซึ่งต่อกับอุปกรณ์ควบแน่นแบบสองชั้นและควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องให้ความร้อนที่ระดับกึ่งกลางความสูงของสารละลายทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 70 องศาเซลเซียส จึงเริ่มหยดเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ที่ละลายอย่างสม่ำเสมอด้วยกรวยหยดสารเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จนหมด จากนั้นให้คงปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสต่ออีก 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง

3.3.5 การแยกพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต ออกจากนาโนเลเท็กซ์

นำนาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.3.4 ซึ่งบรรจุอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ไปทำให้ตกตะกอนด้วยเมทานอลปริมาณมากเกินไป ตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ตกตะกอนประมาณ 5-10 นาที แล้วกรองด้วยเครื่องกรองระบบสุญญากาศ และล้างสารลดแรงตึงผิวและโอลิโกเมอร์ด้วยน้ำกลั่นและเมทานอลอย่างละ 1 ลิตร นำตะกอนของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่แยกได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

3.3.6 การวิเคราะห์นาโนเลเท็กซ์

3.3.6.1 ร้อยละผลได้ (% yield) และ ร้อยละของแข็ง (%solid) ของพอลิ-เมทิลเมทาคริเลตในนาโนเลเท็กซ์

ร้อยละผลได้ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในนาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิล-เมทาคริเลตที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.3.1 คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

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

โดยร้อยละของแข็งหาได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในนาโนเลเท็กซ์}}{\text{น้ำหนักของนาโนเลเท็กซ์ (กรัม)}} \times 100 \quad (3.2)$$

และร้อยละของมอนอเมอร์หาได้จากสมการที่ 3.3

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

หมายเหตุ :

1. น้ำหนักของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในนาโนเลเท็กซ์ หาได้จากการตกตะกอนนาโนเลเท็กซ์ ในข้อ 3.3.2
2. น้ำหนักของมอนอเมอร์หาได้จากความหนาแน่นของเมทิลเมทาคริเลต (0.904) × ปริมาตรของเมทิลเมทาคริเลต
3. น้ำหนักของของผสมได้จากน้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ + SDS + AIBN + น้ำกลั่น

ร้อยละผลได้ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตในนาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกา ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.4 คำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$\text{ร้อยละผลได้} = \frac{\text{ร้อยละของแข็ง}}{\text{ร้อยละของมอนอเมอร์}} \times 100 \quad (3.4)$$

โดยร้อยละของแข็งหาได้จากสมการที่ 3.5

$$\text{ร้อยละของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมทิลเมทาคริเลตและ SiO}_2 \text{ ในนาโนเลเท็กซ์ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของนาโนเลเท็กซ์ (กรัม)}} \times 100 \quad (3.5)$$

และร้อยละของมอนอเมอร์หาได้จากสมการที่ 3.6

$$\text{ร้อยละของมอนอเมอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของมอนอเมอร์ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของของผสม (กรัม)}} \times 100 \quad (3.6)$$

หมายเหตุ :

1. น้ำหนักพอลิเมทิลเมทาคริเลตและ SiO₂ ในนาโนเลเท็กซ์ หาได้จากการตกตะกอนนาโนเลเท็กซ์ในข้อ 3.3.5
2. น้ำหนักของของผสมได้จากน้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ + SDS + AIBN + SiO₂ + น้ำกลั่น

3.3.6.2 ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค

นาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1 และ 3.3.4 ไปวิเคราะห์หา number-average diameter (D_n) และ intensity-average diameter (D_z) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (DLS) (ภาพที่ 3.6) ของอนุภาคต่างๆ ที่อยู่ในนาโนเลเท็กซ์ ซึ่งวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคระดับนาโนได้ในช่วง 0.6-6000 นาโนเมตร



ภาพที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต

3.3.6.3 สัณฐานวิทยาของอนุภาคระดับนาโนของซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลต และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคระดับนาโนของซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) (ภาพที่ 3.7) ซึ่งดำเนินการที่ 80 kV โดยทำการเจือจางนาโนเลเท็กซ์ด้วยน้ำกลั่นจนมีความเข้มข้นประมาณ 0.1-0.5 wt% ก่อนวางตัวอย่างลงบนคอปเปอร์กริด แล้วจึงแต้มด้วยยูรานิลแอซีเตต (uranyl acetate) ทับลงไป เพื่อให้พอลิเมอร์สามารถเกิดปฏิกิริยากับแสงอิเล็กตรอนได้



ภาพที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.3.7 การเตรียมนาโนคอมพอสิตของพีวีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลต/ซิลิกา

ขั้นตอนและสูตรการเตรียมนาโนคอมพอสิตของพีวีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลต/ซิลิกา แสดงไว้ในภาพที่ 3.8 และตารางที่ 3.2-3.4

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมพลาสติกไฮสปีซี/ซิลิกาในคอมพอสิต

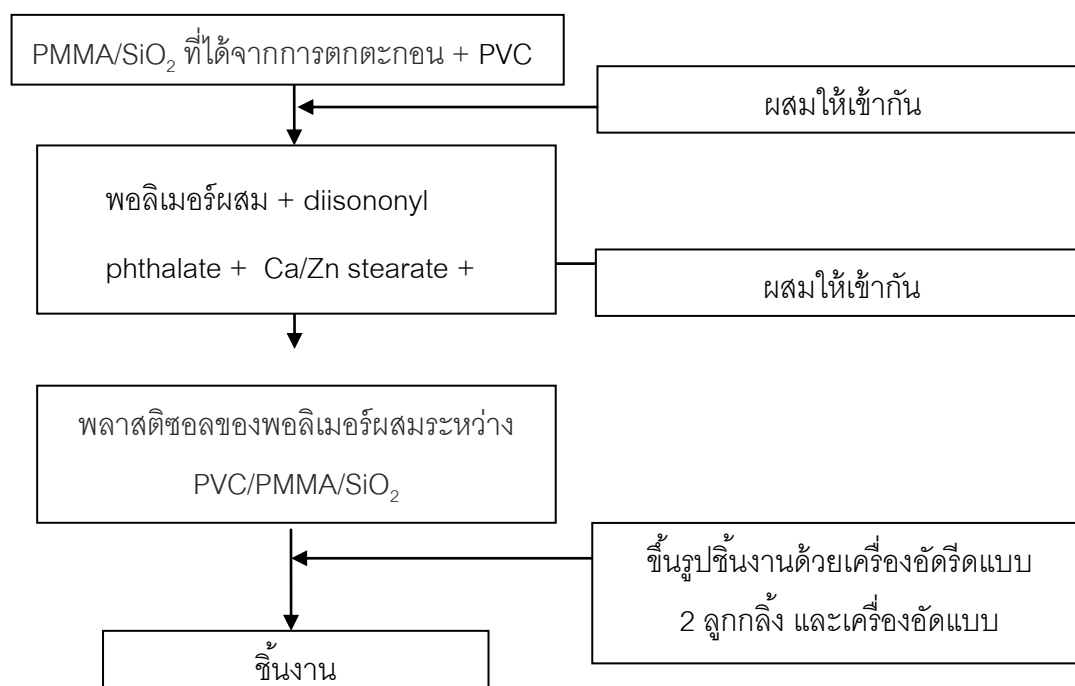
สูตร	PVC Resin (phr)	DINP (phr)	Silica (phr)	Ca/Zn sterate (phr)	Steric Acid (phr)
Plasticized PVC	100	40	0	2	0.2
Plasticized PVC/Silica 3 phr	100	40	3	2	0.2
Plasticized PVC/Silica 5 phr	100	40	5	2	0.2
Plasticized PVC/Silica 7 phr	100	40	7	2	0.2
Plasticized PVC/Silica 9 phr	100	40	9	2	0.2

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมพลาสติกไฮสปีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนคอมพอสิต

สูตร	PVC Resin (phr)	DINP (phr)	PMMA (phr)	Ca/Zn sterate (phr)	Steric Acid (phr)
Plasticized PVC	100	40	0	2	0.2
Plasticized PVC/PMMA 3 phr	100	40	3	2	0.2
Plasticized PVC/PMMA 5 phr	100	40	5	2	0.2
Plasticized PVC/PMMA 7 phr	100	40	7	2	0.2
Plasticized PVC/PMMA 9 phr	100	40	9	2	0.2

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมพลาสติกไฮสปีวี่ซี/ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนคอมพอสิต

สูตร	PVC Resin (phr)	DINP (phr)	PMMA-encaped silica (phr)	Ca/Zn sterate (phr)	Steric Acid (phr)
Plasticized PVC	100	40	0	2	0.2
Plasticized PVC/PMMA-encaped silica 3 phr	100	40	3	2	0.2
Plasticized PVC/PMMA-encaped silica 5 phr	100	40	5	2	0.2
Plasticized PVC/PMMA-encaped silica 7 phr	100	40	7	2	0.2
Plasticized PVC/PMMA-encaped silica 9 phr	100	40	9	2	0.2



ภาพที่ 3.8 ขั้นตอนการเตรียมนาโนคอมพอสิตของพีวีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลต/ซิลิกา

การเตรียมนาโนคอมพอสิตของพีวีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลต/ซิลิกา เริ่มจากการนำพีวีซีและตะกอนที่ได้จากนาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้มาผสมกันในอัตราส่วนตามตารางที่ 3.2-3.4 จากนั้นทำการขึ้นรูปของผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบสองลูกกลิ้ง (ภาพที่ 3.9) ภายใต้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงนำไปอัดแบบให้ความร้อนด้วยเครื่องขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแบบ (ภาพที่ 3.10) โดยใช้แม่พิมพ์ที่ทำจากแผ่นเหล็กขนาด $14 \times 10 \times 0.3$ เซนติเมตร ภายใต้อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที และทำให้เย็น (cooling) เป็นเวลา 6 นาที จึงได้ขึ้นงานสำหรับการวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ต่อไป



ภาพที่ 3.9 เครื่องอัดรีดแบบสองลูกกลิ้ง



ภาพที่ 3.10 เครื่องอัดแบบ

3.3.8 การวิเคราะห์และทดสอบนาโนคอมพอสิตของพีวีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลต/ซิลิกา

3.3.8.1 สมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile properties)

การทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 638-03 เพื่อหาค่าความทนแรงดึง (tensile strength) ยั่งส์มอดุลัส (Young's modulus) และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (% elongation at break) โดยนำชิ้นงานที่เตรียมได้มาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ด้วยเครื่อง compress air sample cutter (ภาพที่ 3.12) และใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (ภาพที่ 3.13) ในการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง



ภาพที่ 3.11 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ของนาโนคอมพอสิตของพีวีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลต/ซิลิกา



ภาพที่ 3.12 เครื่องตัด compress air sample cutter



ภาพที่ 3.13 เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล

3.3.8.2 สมบัติความทนแรงฉีกขาด (Tear strength)

การทดสอบสมบัติความทนแรงฉีกขาดของนาโนคอมพอสิตเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 624 เพื่อหาค่าความทนแรงฉีกขาดโดยใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซลเช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง

3.3.8.3 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (ภาพที่ 3.14) เพื่อหาเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงาน ทำโดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงมวลเทียบกับอุณหภูมิ สมบัติสำคัญที่สามารถหาได้จากผลการทดลองนี้คือ อุณหภูมิในการสลายตัว (degradation temperature) และปริมาณเถ้าที่เกิดขึ้น (% char) ของชิ้นงาน โดยนำชิ้นงานที่มีน้ำหนักประมาณ 5-20 มิลลิกรัม บรรจุลงในภาชนะที่ทำจากอะลูมินาแล้วนำไปทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-1000 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหลของแก๊ส (gas flow rate) เท่ากับ 20 มิลลิลิตร/นาที



ภาพที่ 3.14 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ)

3.3.8.4 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาพื้นผิวของชิ้นงานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ภาพที่ 3.15) ดำเนินการที่ 15 kV เคลือบตัวอย่างด้วยทองคำก่อนส่องด้วยกล้อง



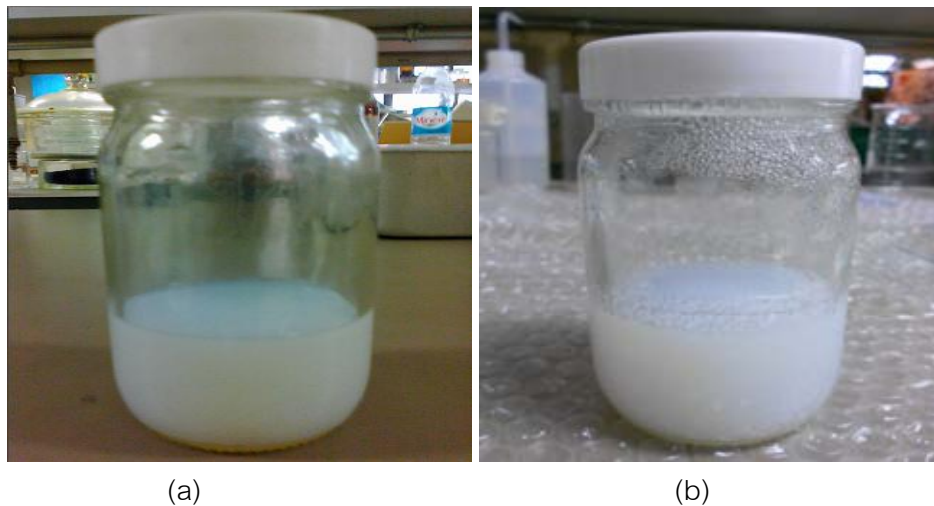
ภาพที่ 3.15 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะนาโนเลเท็กซ์

ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะของนาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันพบว่านาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้มีสีขาวขุ่น และยอมให้แสงผ่านได้บ้าง



ภาพที่ 4.1 นาโนเลเท็กซ์ของ (a) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (b) ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

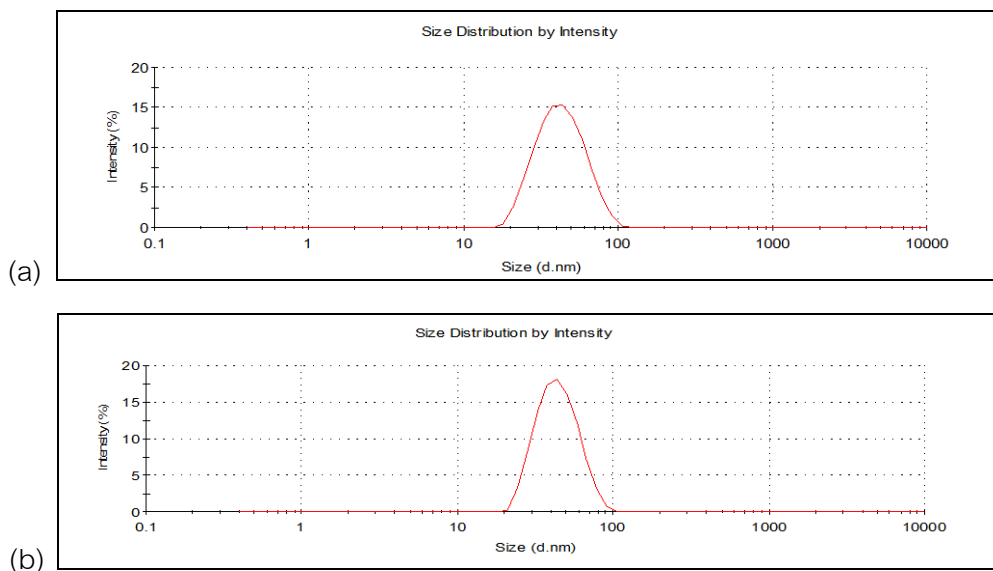
4.2 ปริมาณร้อยละผลได้และร้อยละของแข็งในนาโนเลเท็กซ์

นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมจากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันมีปริมาณร้อยละผลได้โดยเฉลี่ยเท่ากับ 94.96 และ 97.82 ตามลำดับ และร้อยละของแข็งโดยเฉลี่ยเท่ากับ 23.57 และ 24.18 ตามลำดับ

4.3 ขนาดอนุภาคของแข็งในนาโนเลเท็กซ์

จากการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (DLS) พบว่า อนุภาคที่เตรียมได้มีขนาดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 59 และ 63 นาโนเมตร ตามลำดับ ดังแสดงการกระจายขนาดอนุภาคไว้ในภาพที่ 4.2

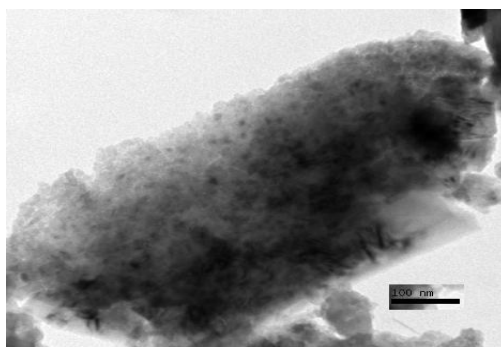


ภาพที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของ (a) พอลิเมทิลเมทาคริเลต และ (b) นาโนซิลิกา

ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต ผ่านการทดสอบด้วยเทคนิค DLS

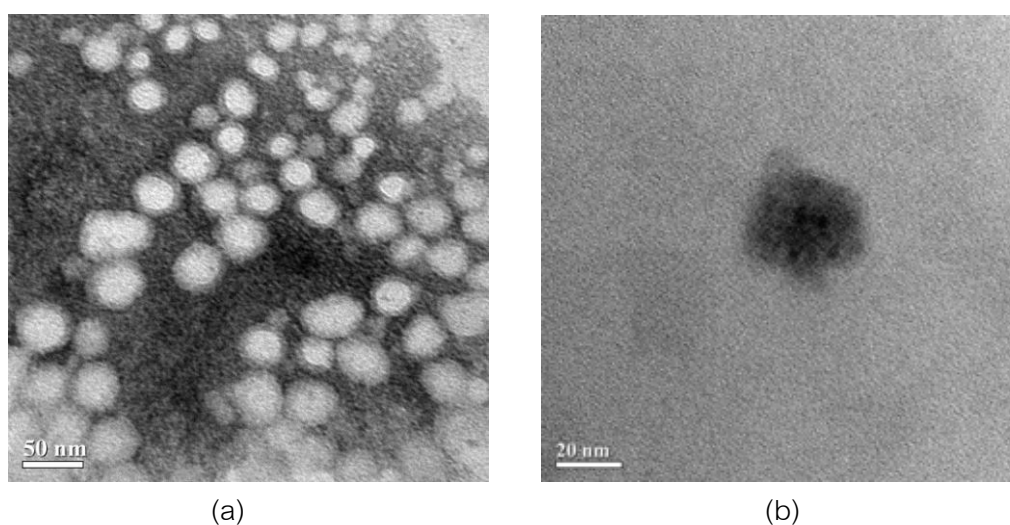
4.4 สันฐานวิทยาของนาโนซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลต และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

ภาพที่ 4.3 แสดงสันฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาที่เกาะกลุ่มกัน เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงมาก อีกทั้งหมู่ซิลานอล (Si-OH) ที่อยู่บนผิวของนาโนซิลิกาเป็นหมู่ที่มีขั้วจึงสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิว รวมทั้งความชื้นในบรรยากาศได้ง่ายอีกด้วย



ภาพที่ 4.3 การเกาะกลุ่มของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการทดสอบด้วยเทคนิค TEM

ภาพที่ 4.4 แสดงสัณฐานวิทยาของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เตรียมได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อินซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน โดยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรมีสัณฐานวิทยาเป็นทรงกลม และนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีลักษณะเป็นทรงกลมเช่นเดียวกัน และมีสัณฐานวิทยาเป็นแบบ 'คอร์-เชลล์' (core-shell) โดยมีอนุภาคนาโนซิลิกา (สีเข้ม) เป็นแก่นที่ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (สีอ่อน)

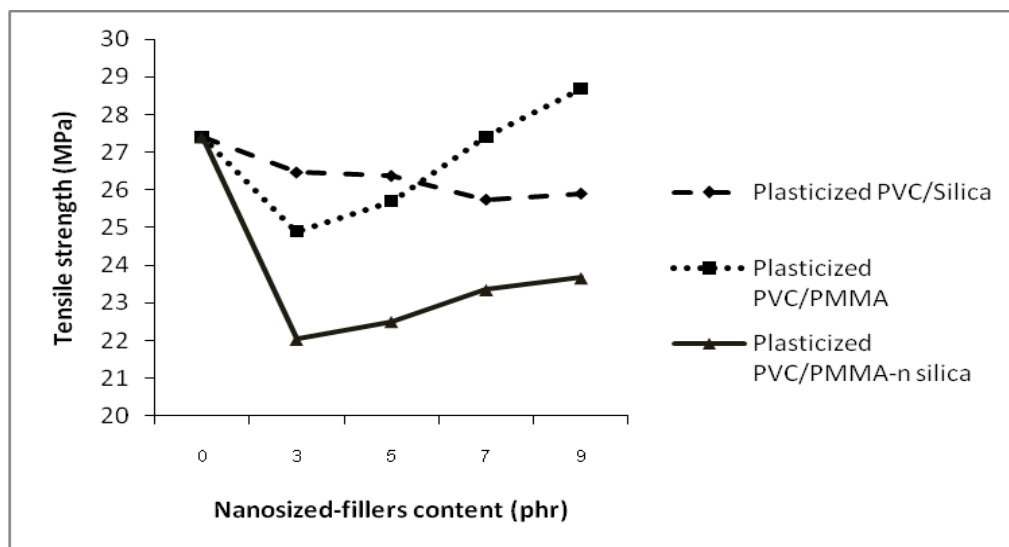


ภาพที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ (a) พอลิเมทิลเมทาคริเลต และ (b) นาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่ผ่านการทดสอบด้วยเทคนิค TEM

4.5 สมบัติของพลาสติกไฮสปีวีซีและพลาสติกไฮสปีวีซีนานาคอมพอสิต

4.5.1 ความทนแรงดึง (Tensile properties)

ความทนแรงดึงของพลาสติกไฮสปีวีซีและพลาสติกไฮสปีวีซีนานาคอมพอสิตต่างๆ ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ความทนแรงดึงของพลาสติกพีวีซีและพลาสติกพีวีซีนานोकอมพอสิตที่ปริมาณต่าง ๆ กันของสารเติมแต่งอนุภาคระดับนาโนเมตร

ภาพที่ 4.5 แสดงความทนแรงดึงของพลาสติกพีวีซีและพลาสติกพีวีซีนานोकอมพอสิตที่ใส่อนุภาคระดับนาโนเมตรประเภทต่างๆ (นาโนซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลต และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต) พบว่า พลาสติกพีวีซีมีความทนแรงดึงประมาณ 27.41 เมกะปาสคัล ซึ่งเมื่อเติมนาโนซิลิกาปริมาณต่างๆ กันเข้าไปในพลาสติกพีวีซีเมทริกซ์ ความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบมีค่าต่ำกว่าพลาสติกพีวีซีล้วน และความทนแรงดึงของพลาสติกพีวีซีนานोकอมพอสิตมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ การที่ใส่นาโนซิลิกาแล้วทำให้พลาสติกพีวีซีนานोकอมพอสิตมีความทนแรงดึงต่ำลงเนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกาเกิดการจับตัวเป็นกลุ่มได้ง่าย ดังแสดงในภาพที่ 4.2 จึงทำให้กระจายตัวไม่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทั้งนี้เพราะนาโนซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก

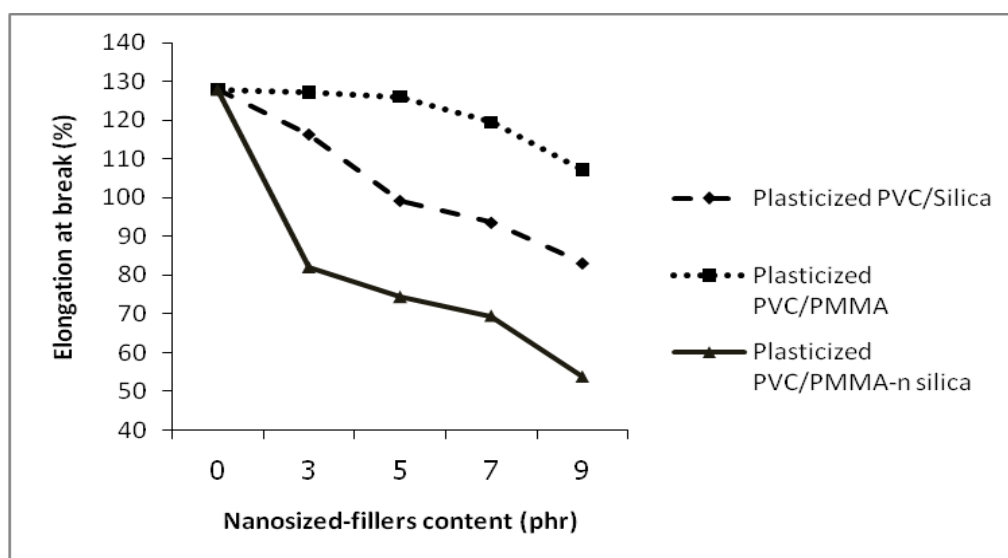
สำหรับพลาสติกพีวีซีนานोकอมพอสิตที่เตรียมได้จากการใส่พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรนั้น ความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบมีค่าต่ำกว่าพลาสติกพีวีซีล้วนเมื่อใส่พอลิเมทิลเมทาคริเลตปริมาณ 3 และ 5 phr ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตยังอาจน้อยเกินไปที่จะแสดงประสิทธิภาพการเสริมแรง เนื่องจากมีการกระจายตัวไม่ทั่วถึงและเกิดเป็นความบกพร่องในพอลิเมอร์เมทริกซ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อใส่พอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณ 7 และ 9 phr กลับทำให้ความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงและสูงกว่าพลาสติกพีวีซีล้วน เพราะพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถกระจายตัวได้ทั่วถึงและสม่ำเสมอในชิ้นทดสอบ นอกจากนี้พอลิเมอร์ทั้งสองยังสามารถเข้ากันได้ดีเนื่องจากมีอันตรกิริยาจำเพาะของพันธะไฮโดรเจนระหว่าง

หมู่คาร์บอนิล (C=O) ในพอลิเมทิลเมทาคริเลต และไฮโดรเจนจากหมู่ CHCl ของพีวีซี [38,39] ซึ่งความเข้ากันได้และการกระจายตัวที่สม่ำเสมอจะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

นอกจากนี้ พบว่า การใส่نانโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตในพลาสติกพีวีซีนาโนคอมพอสิตไม่ได้ปรับปรุงความทนแรงดึงของชิ้นทดสอบ กลับทำให้ความทนแรงดึงมีค่าต่ำกว่าการใส่อนุภาคระดับนาโนเมตรประเภทอื่นเมื่อใส่ในปริมาณเท่าๆ กัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคประเภทอื่น เมื่อเกาะกลุ่มกันจะทำให้อันตรกิริยาระหว่างพีวีซีและพอลิเมทิลเมทาคริเลตลดลง ดังนั้น การส่งผ่านความเค้นเมื่อได้รับแรงดึงจึงลดลงทำให้ความทนแรงดึงมีค่าลดต่ำลงมากกว่า

4.5.2 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break)

ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกพีวีซีและพลาสติกพีวีซีนาโนคอมพอสิตที่ใส่อนุภาคระดับนาโนเมตรประเภทต่างๆ (นาโนซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลต และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต) แสดงไว้ในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกพีวีซีและพลาสติกพีวีซีนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณต่างๆกันของสารเติมแต่งอนุภาคระดับนาโนเมตร

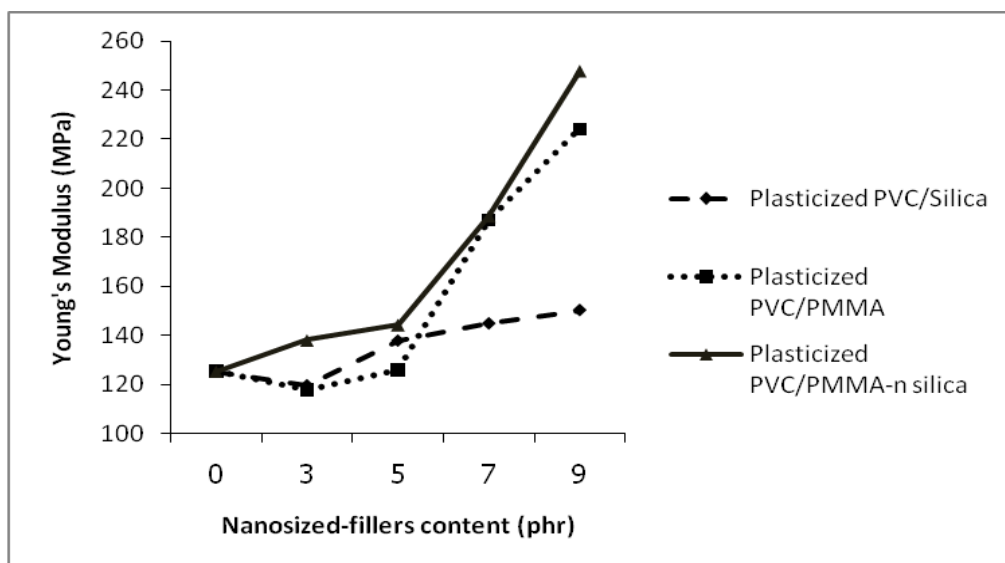
ภาพที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าพลาสติกพีวีซีมีร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดประมาณร้อยละ 127.91 ซึ่งพลาสติกพีวีซีนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จากการใส่นาโนซิลิกาและนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณนาโนซิลิกาและนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้เป็นไปตามที่คาดไว้ ทั้งนี้เนื่องจากการใส่

อนุภาคที่มีความแข็งตั้งในพอลิเมอร์เมทริกซ์มีผลไปขัดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่โมเลกุลของพีวีซี จึงทำให้ร้อยละการยืดตัวของพลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตลดลงอย่างเห็นได้ชัด

อย่างไรก็ตาม พลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตที่เตรียมจากการใส่พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรปริมาณ 3 และ 5 phr มีผลทำให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกไฮสปีวีซีเปลี่ยนแปลงไปอย่างไม่มีนัยสำคัญ กล่าวคือ ยังสามารถยืดตัวได้ในระดับเดียวกับพลาสติกไฮสปีวีซีล้วน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ใส่เข้าไปยังไม่มากพอที่จะขัดขวางการเคลื่อนตัวของสายโซ่พีวีซี แต่เมื่อปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นเป็น 7 และ 9 phr พบว่า ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตลดลงมากขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนตัวของสายโซ่พีวีซีถูกขัดขวางด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น จึงทำให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง หากแต่ยังมีความสามารถในการยืดตัวได้ค่อนข้างมาก ทั้งนี้เพราะพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรมีความยืดหยุ่นมากกว่านาโนซิลิกาและนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

4.5.3 ยั่งส์มอดุลัส (Young's Modulus)

ยั่งส์มอดุลัสของพลาสติกไฮสปีวีซีและพลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตที่ใส่อนุภาคระดับนาโนเมตรประเภทต่างๆ (นาโนซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลต และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต) แสดงไว้ในภาพที่ 4.7

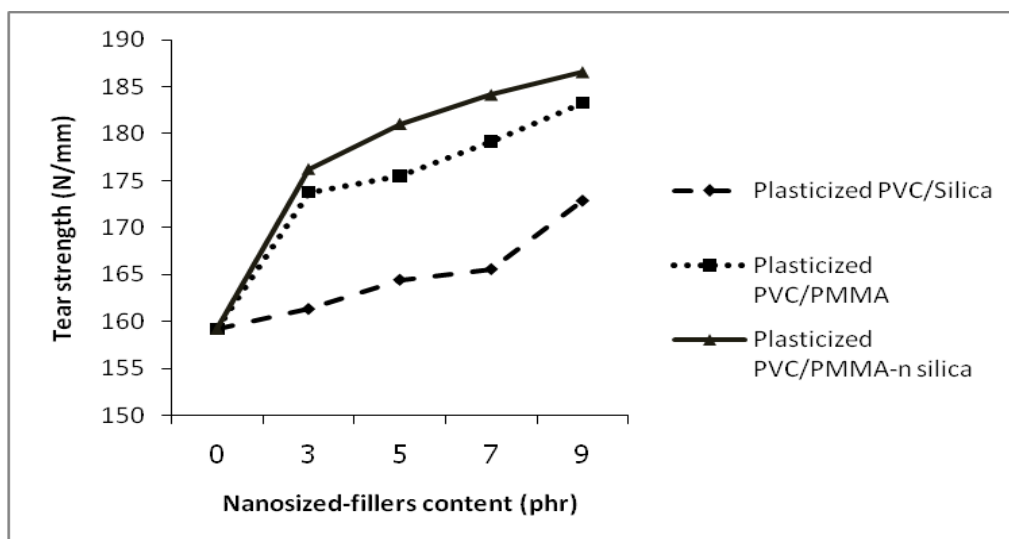


ภาพที่ 4.7 ยั่งส์มอดุลัสของของพลาสติกไฮสปีวีซีและพลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณต่างๆกันของสารเติมแต่งอนุภาคระดับนาโนเมตร

จากภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าพลาสติกไฮสปีซีมียังสัมมอดูลัสประมาณ 125.34 เมกะปาสคัล ซึ่ง ยังสัมมอดูลัสของพลาสติกไฮสปีซีนาโนคอมพอสิตมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของอนุภาคระดับนาโนเมตรที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนเมตรเหล่านี้มีความแข็งตึง จึงทำให้พอลิเมอร์เมทริกซ์มีความแข็งตึงเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะเมื่อใส่พอลิเมทิลเมทาคริเลต และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตในปริมาณ 7 และ 9 phr ซึ่งมีผลทำให้พลาสติกไฮสปีซีนาโนคอมพอสิตเปลี่ยนแปลงรูปร่างยากขึ้น เพราะพีวีซีมีแรงยึดเกาะกับพอลิเมทิลเมทาคริเลตได้ดี

4.5.4 ความทนแรงฉีกขาด (Tear strength)

ความทนแรงฉีกขาดของพลาสติกไฮสปีซีและพลาสติกไฮสปีซีนาโนคอมพอสิตที่ใส่อนุภาคระดับนาโนเมตรประเภทต่างๆ (นาโนซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลต และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต) แสดงไว้ในภาพที่ 4.8

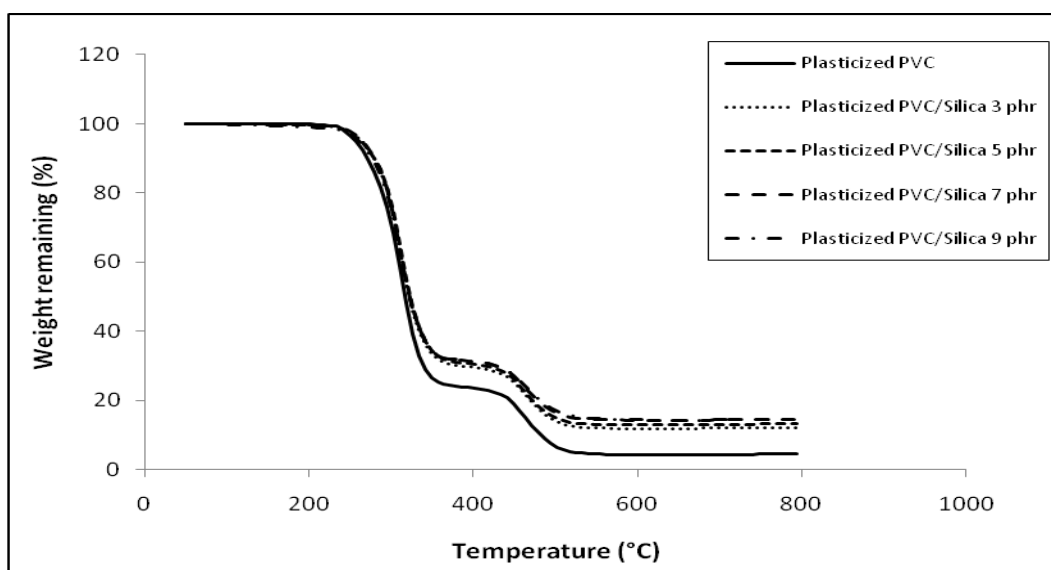


ภาพที่ 4.8 ความทนแรงฉีกขาดของพลาสติกไฮสปีซีและพลาสติกไฮสปีซีนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณต่างๆกันของสารเติมแต่งอนุภาคระดับนาโนเมตร

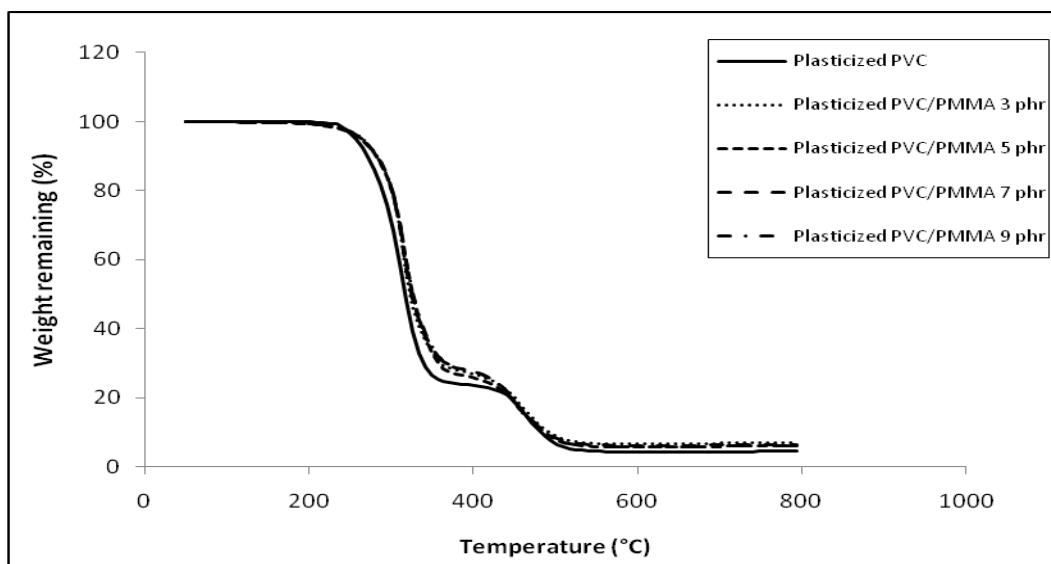
จากภาพที่ 4.8 พบว่า ความทนแรงฉีกขาดของพลาสติกไฮสปีซีมีค่าประมาณ 159.19 N/mm ซึ่งเมื่อใส่อนุภาคระดับนาโนเมตรประเภทต่างๆ ล้วนมีผลทำให้ความทนแรงฉีกขาดของชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาคเหล่านี้ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อใส่อนุภาคของพอลิเมทิลเมทาคริเลต และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีผลทำให้ความทนแรงฉีกขาดของพลาสติกไฮสปีซีนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนเมตรที่กระจายตัวอยู่ในพีวีซีเมทริกซ์สามารถขัดขวางการขยายตัวของรอยแยกในการฉีกขาด ทั้งนี้เพราะพีวีซีมีอันตรกิริยากับพอลิเมทิลเมทาคริเลตผ่านพันธะไฮโดรเจนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.5.6 เสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกไพล์พีวีซีและพลาสติกไพล์พีวีซีนานोकอมพอลสิต

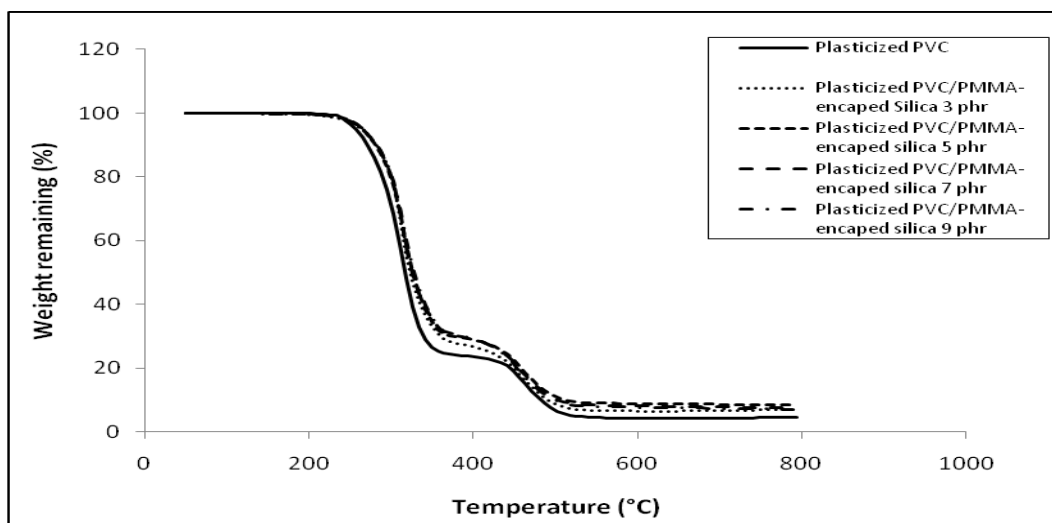
เสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกไพล์พีวีซีและพลาสติกไพล์พีวีซีนานोकอมพอลสิตที่ได้ อนุภาคระดับนาโนเมตรประเภทต่างๆ (นาโนซิลิกาพอลิเมทิลเมทาคริเลต และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วย พอลิเมทิลเมทาคริเลต) ที่ตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) แสดงไว้ใน ภาพที่ 4.9-4.11 และตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.9 ทีจีเอเทอร์โมแกรมของพลาสติกไพล์พีวีซีและพลาสติกไพล์พีวีซี/ซิลิกานานोकอมพอลสิต



ภาพที่ 4.10 ทีจีเอเทอร์โมแกรมของพลาสติกไพล์พีวีซี และพลาสติกไพล์พีวีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลต นานोकอมพอลสิต



ภาพที่ 4.11 ทีจีเอเทอร์โมแกรมของพลาสติกไพล์วีซี และพลาสติกไพล์วีซี/ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) ของพลาสติกไพล์วีซี และพลาสติกไพล์วีซีนานาโนคอมพอสิต

สูตร	T _{onset 1} (°C)	T _{onset 2} (°C)	T _{end set} (°C)	T _{50%} (°C)	Char (%)
Neat plasticized PVC	280.3	440.9	469.1	317.3	4.2
Plasticized PVC/ 3 SiO ₂	284.9	442.9	466.2	325.2	11.8
Plasticized PVC/5 SiO ₂	284.4	440.9	470.8	325.5	12.9
Plasticized PVC/7 SiO ₂	284.2	444.1	465.4	325.7	14.2
Plasticized PVC/9 SiO ₂	283.5	439.2	468.1	324.6	14.3
Plasticized PVC/3 PMMA	292.7	434.5	459.0	324.4	6.5
Plasticized PVC/5 PMMA	292.1	430.0	460.9	324.6	5.6
Plasticized PVC/7 PMMA	292.9	435.6	456.6	324.9	6.1
Plasticized PVC/9 PMMA	289.3	427.2	455.1	325.1	5.7
Plasticized PVC/3 PMMA-nSiO ₂	291.5	433.1	454.9	325.1	6.4
Plasticized PVC/5 PMMA-nSiO ₂	287.9	433.3	458.0	324.3	8.3
Plasticized PVC/7 PMMA-nSiO ₂	291.2	428.9	454.9	324.3	7.4
Plasticized PVC/9 PMMA-nSiO ₂	289.0	428.0	455.5	324.6	7.0

จากที่จีเอเทอร์โมแกรม และตารางที่ 4.1 พบว่าพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิลมีอุณหภูมิการสลายตัว 2 ช่วง คือ $T_{onset 1}$ เท่ากับ 280.3 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของพลาสติกไฮดรอกซีตามด้วยการหลุดของไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) จากสายโซ่โมเลกุลของฟีนิลที่เกิดโครงสร้างพอลิอิน (polyene) ที่ไม่อิ่มตัวแบบคอนจูเกต ซึ่งมีเสถียรภาพมากกว่าฟีนิล การมีโครงสร้างพอลิอินจะทำให้ฟีนิลเกิดสีและสมบัติเชิงกลลดลง สำหรับการสลายตัวช่วงที่สอง ($T_{onset 2}$) มีค่าเท่ากับ 440.9 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนของสายโซ่พอลิอิน [40] และอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัว (T_{endset}) ที่อุณหภูมิ 469.1 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังมีอุณหภูมิการสลายตัวร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ($T_{50\%}$) ประมาณ 317.3 องศาเซลเซียส และการเกิดชาร์ (% char) ร้อยละ 4.2

จากภาพที่ 4.9 และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการใส่นาโนซิลิกาในพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิลมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิลเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจาก $T_{onset 1}$, $T_{50\%}$ และ %char ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมี $T_{onset 1}$ อยู่ในช่วง 283.5-284.9 องศาเซลเซียส, $T_{50\%}$ อยู่ในช่วง 325.2-325.7 องศาเซลเซียส และ %char อยู่ในช่วงร้อยละ 11.8-14.3 ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณนาโนซิลิกาที่ใส่เข้าไปในพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิล เนื่องจากนาโนซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง และสามารถเหนี่ยวนำให้พอลิเมอร์เกิดชาร์ได้มากขึ้น [42] อย่างไรก็ตาม $T_{onset 2}$ และ T_{endset} ของพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิลที่ใส่นาโนซิลิกามีค่าใกล้เคียงกับพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิลที่ไม่ได้ใส่นาโนซิลิกา

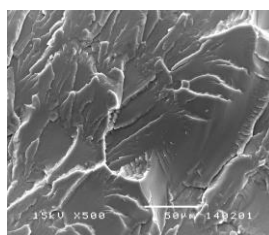
จากภาพที่ 4.10 และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการใส่พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิลเพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจาก $T_{onset 1}$, $T_{50\%}$ และ %char ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยมี $T_{onset 1}$ อยู่ในช่วง 289.3-292.9 องศาเซลเซียส, $T_{50\%}$ อยู่ในช่วง 324.4-325.1 องศาเซลเซียส และ %char อยู่ในช่วงร้อยละ 5.6-6.5 ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตในพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิล อย่างไรก็ตาม $T_{onset 2}$ และ T_{endset} ของพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิลที่ใส่พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีค่าลดลง เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตมี T_{endset} ที่ต่ำกว่าฟีนิล

จากภาพที่ 4.11 และตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการใส่นาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีผลทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิลเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยพิจารณาจาก $T_{onset 1}$, $T_{50\%}$ และ %char ที่เพิ่มขึ้น โดยมี $T_{onset 1}$ อยู่ในช่วง 287.9-291.5 องศาเซลเซียส, $T_{50\%}$ อยู่ในช่วง 324.3-325.1 องศาเซลเซียส และ %char อยู่ในช่วงร้อยละ 6.4-8.3 ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตในพลาสติกไฮดรอกซีฟีนิล อย่างไรก็ตาม $T_{onset 2}$ และ

T_{endset} ของพลาสติกไฮสปีชีที่ใส่นาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีค่าลดลง เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตมี T_{endset} ต่ำกว่าพีวีซี ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.7 ลักษณะวิทยาของพลาสติกไฮสปีชีและพลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิต

ภาพที่ 4.12 แสดงลักษณะวิทยาของพลาสติกไฮสปีชีและพลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิตที่ใส่อนุภาคระดับนาโนเมตรประเภทต่างๆ (นาโนซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลต และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต) ที่ผ่านการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



พลาสติกไฮสปีชี

ประเภทนาโนคอมพอสิต	ปริมาณสารเติมแต่ง (phr)			
	3	5	7	9
PVC/SiO ₂				
PVC/PMMA				
PVC/PMMA-nSiO ₂				

ภาพที่ 4.12 ลักษณะวิทยาของพลาสติกไฮสปีชีและพลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิตที่ผ่านการทดสอบด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ภาพที่ 4.12 แสดงบริเวณผิวหน้าของรอยหักของชิ้นทดสอบที่นำไปจุ่มในไนโตรเจนเหลวก่อนนำไปหักด้วยมือ พบว่า สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยหักของพลาสติกพีวีซีและพลาสติกพีวีซีนานอ-คอมพอลิต์ไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก ชิ้นทดสอบแสดงให้เห็นคลื่นบนรอยแตกและขอบเป็นชั้นๆ ซึ่งเป็นลักษณะของรอยแตกที่อ่อนเหนียวไม่แข็งเปราะ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลาสติกพีวีซีนานอคอมพอลิต์ประเภทต่างๆ ยังคงสภาพความยืดหยุ่นของชิ้นงานไว้ได้ ถึงแม้ได้มีการใส่อนุภาคระดับนาโนเมตรที่มีความแข็งตึง หากแต่ใส่ในปริมาณไม่มากนักจึงไม่ทำให้ความอ่อนเหนียวของผลิตภัณฑ์เสียไป ในขณะที่มีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลอื่นๆ และเสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกพีวีซี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สามารถเตรียมอนุภาคพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีอนุภาคขนาด 59-63 นาโนเมตร โดยมีร้อยละของผลได้เท่ากับ 94.96-97.82 และร้อยละของแข็งเท่ากับ 23.57-24.18 ผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

5.1.2 จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยเครื่อง TEM พบว่า พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรมีสัณฐานวิทยาเป็นทรงกลมและนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีลักษณะเป็นทรงกลมเช่นเดียวกันและมีสัณฐานวิทยาเป็นแบบ 'คอร์-เชลล์' (core-shell) โดยมีอนุภาคนาโนซิลิกาเป็นแก่นที่ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของพอลิเมทิลเมทาคริเลต

5.1.3 จากการศึกษาความสามารถในการทนแรงดึงของพลาสติกไฮสปีชีและพลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิตพบว่า พลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิตที่ทำการเติมซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลต และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีค่าความทนแรงดึงต่ำกว่าพลาสติกไฮสปีชีล้วน ยกเว้นพลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 7 และ 9 phr มีค่าความทนแรงดึงใกล้เคียงกับพลาสติกไฮสปีชีล้วน

5.1.4 จากการศึกษาร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกไฮสปีชีและพลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิตพบว่า ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้จากการเติมซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณการเพิ่มของซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต และพลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตจะมีค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลงเมื่อเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ 7 และ 9 phr

5.1.5 จากการศึกษาค่ายังงัสมอดุลัสของพลาสติกไฮสปีชีและพลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิตพบว่า ค่ายังงัสมอดุลัสของพลาสติกไฮสปีชีนาโนคอมพอสิตมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของอนุภาคระดับนาโนเมตรที่สูงขึ้น

5.1.6 จากการศึกษาความทนแรงฉีกขาดของพลาสติกไฮสปีวีซีและพลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตพบว่า ค่าความทนแรงฉีกขาดของพลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณการเติมอนุภาคระดับนาโนเมตรที่สูงขึ้น

5.1.7 จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของพลาสติกไฮสปีวีซีและพลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตพบว่า การเติมซิลิกา พอลิเมทิลเมทาคริเลต และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีผลทำให้พลาสติกไฮสปีวีซีมีเสถียรภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้น และการเติมซิลิกามีผลทำให้เกิดเถ้าชาร์มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

5.1.8 จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของพลาสติกไฮสปีวีซีและพลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตพบว่า สัณฐานวิทยาของพื้นผิวรอยหักของพลาสติกไฮสปีวีซีและพลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก ซึ่งทดสอบแสดงให้เห็นคลื่นบนรอยแตกซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลาสติกไฮสปีวีซีนาโนคอมพอสิตประเภทต่างๆ ยังคงสภาพความยืดหยุ่นของชิ้นงานไว้ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทดลองใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นในการเตรียมนาโนคอมพอสิต

5.2.2 ทดลองการใช้สารเติมแต่งอนุภาคระดับนาโนเมตรชนิดอื่น

5.2.3 ทดลองปรับเปลี่ยนปริมาณสารเคมีที่ใช้ให้หลากหลายมากขึ้น

5.2.4 ทดลองใช้กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานแบบอื่น

รายการอ้างอิง

- [1] อรอุมา สันตวิธิ. ผลของโครงสร้างโมเลกุลและองค์ประกอบของความเป็นกิ่งของพอลิเอทีลีนที่มีต่อกลไกการสลายตัวของพอลิไวนิลคลอไรด์ในพอลิเมอร์ผสมของพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทีลีน. [ออนไลน์]. 2005. แหล่งที่มา:http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/Thesis/fulltext/snamcn/Onuma_Santawitee/fulltext.pdf [11 มกราคม 2555]
- [2] อาทิตา โยธารักษ์. ผลของสภาวะที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดที่มีต่อโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงของพอลิไวนิลคลอไรด์ในพอลิเมอร์ผสมแบบหลอม. [ออนไลน์]. 2006. แหล่งที่มา:
http://www.thapra.lib.su.ac.th/objects/thesis/fulltext/snamcn/Athicha_Yotharuk/fulltext.pdf [11 มกราคม 2555]
- [3] วุฒิ ลีลายุทธเลิศ, สิริชัย พิริยะศิริพันธ์ และสุชนัย ปริยานนท์. การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิไวนิลคลอไรด์ด้วยการทำเป็นพอลิเมอร์ผสมกับพอลิไวนิลบิวทิลรัล. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยี สิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2008.
- [4] อรอุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์. เล่ม 1, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2003.
- [5] ธนาวดี ลีจากภัย. บ้านพลาสติก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.vcharkarn.com/varticle/3824> [15 มกราคม 2555]
- [6] Silva, M., Vieira, M., Macumoto, A. and Beppu, M. Polyvinylchloride (PVC) and natural rubber films plasticized with a natural polymeric plasticizer obtained through polyesterification of rice fatty acid. Polymer Testing 30 (2011) : 478-484.
- [7] Pita, V.J.R.R., Sampaio, E.E.M. and Monteiro, E.E.C. Mechanical properties evaluation of PVC/plasticizers and PVC/thermoplastic polyurethane blends from extrusion processing. Polymer Testing 21 (2002) : 545-550.
- [8] Li, S., Yao, Y. Effect of thermal stabilizers composed of zinc barbiturate and calcium stearate for rigid poly(vinyl chloride). Polymer Degradation and Stability 96 (2011) : 637-641.

- [9] Zhu, A., Cai, A., Zhou, W. and Shi, Z. Effect of flexibility of grafted polymer on the morphology and property of nanosilica/PVC composites. Applied Surface Science 254 (2008) : 3745-3752.
- [10] Milioto, S., Lazzara, G. Dispersions of nanosilica in biocompatible copolymers. Polymer Degradation and Stability 95 (2010) : 610-617.
- [11] Katsikis, N., Zahradnik, F. and Helmschrott, A. Thermal stability of poly(methyl methacrylate)/silica nano- and microcomposites as investigated by dynamic-mechanical experiments. Polymer Degradation and Stability 92 (2007) : 1966-1976.
- [12] Liu, Y., Kontopoulou, M. Effect of filter partitioning on the mechanical properties of TPO/nanosilica composites. Journal of Vinyl and Additive Technology (2007) : 147-150.
- [13] Liu, Y., Kontopoulou, M. The structure and physical properties of polypropylene and thermoplastic olefin nanocomposites containing nanosilica. Polymer 47 (2006) : 7731-7739.
- [14] Xie, X., Li, R. and Liu, Q. Structure-property relationships of in-situ PMMA modified nano-sized antimony trioxide filled poly(vinyl chloride) nanocomposites. Polymer 45 (2004) : 2793-2802.
- [15] Xie, X., Liu, Q., Li, R., Zhou, X., Zhang, Q. and Yu, Z. Rheological and mechanical properties of PVC/CaCO₃ nanocomposites prepared by in-situ polymerization. Polymer 45 (2004) : 6665-6673.
- [16] Broza, G., Piszczek, K., Schulte, K. and Sterzynski, T. Nanocomposites of poly(vinyl chloride) with carbon nanotubes (CNT). Composites Science and Technology 67 (2007) : 890-894.
- [17] Liu, C., Luo, Y. F., Jia, Z. X. and Zhong, B. C. Enhancement of mechanical properties of poly(vinyl chloride) with polymethyl methacrylate-grafted halloysite nanotube. Express Polymer Letters 5 (2011) : 591-603.
- [18] Preston, W. Some correlating principles of detergent action. Journal of Physical Colloid Chemistry 52 (1948) : 84-97.

- [19] Capek, I. Radical polymerization of polar unsaturated monomer in direct microemulsion system. *Advances in Colloid and Interface Science* 80 (1999) : 85-149.
- [20] The Chemical Society of Japan. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://www.csj.jp/journals/bcsj/bc-cont/bc71-5.html> [20 มกราคม 2555]
- [21] Polymer Science Learning Center. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://www.pslc.ws/mactest/pmma.htm> [20 มกราคม 2555]
- [22] ประมวล ตั้บปฏิบัตินิร้ตน์. พอลิเมอร์คอลลอยด์. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: มารวยการพิมพ์, 2547.
- [23] Zhang, K., Chen, H., Chen, X., Chen, Z., Cui, Z. and Yang, B. Silica polymer core-shell microspheres via surface grafting and emulsion polymerization. *Macromolecular Materials and Engineering* 288 (2003) : 380-385.
- [24] จันทนา สหุณิล, ชัยฤทธิ สัตยาประเสริฐ และสุรเทพ เขียวหอม.การวิเคราะห์การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อขยายไปสู่การผลิตผลิตภัณฑ์ในด้านอุตสาหกรรมโดยการประเมินด้านสิ่งแวดล้อม. โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2006.
- [25] Elaissari, A. *Colloidal Polymers*. New York : Marcel Dekker.
- [26] Stoffer, J.O., Bone, T. Polymerization in water-in-oil microemulsion systems. *Journal of Polymer Science : Polymer Chemistry* 18 (1980) : 2641- 2648.
- [27] Dow Corning Corporation. *Silane Guide*. USA: 2005.
- [28] He, G., Pan, Q., and Rempel, G. L. Synthesis of poly(methyl methacrylate) nanosize particles by differential microemulsion polymerization. *Macromolecular Rapid Communications* 24 (2003) : 585-588.
- [29] He, G., Pan, Q., Rempel, G.L., Modeling of differential microemulsion polymerization for synthesizing nanosized poly(methyl methacrylate) particles. *Industrial Engineering and Chemistry Research* 46 (2007) : 1682-1689.

- [30] Norakankorn, C., Pan, Q., Rempel, G.L. and Kiatkamjornwong, S.
Synthesis of poly(methyl methacrylate) Initiated by 2,2' azobisisobutyronitrile
via differential microemulsion polymerization. Macromolecular Rapid
Communications 28 (2007) : 1029-1033.
- [31] Xu, P., Wang, H., Tong, R., Du, Q., Zhong, W. Preparation and morphology of
SiO₂/PMMA nanohybrids by microemulsion polymerization. Colloid Polymer
Science 284 (2006) : 755–762.
- [32] Yu, J., Yu, J., Guo, Y. and Gao, Z. Grafting of polystyrene onto a
nanometer silica surface by microemulsion polymerization. Chinese Journal of
Polymer Science 20 (2001) : 71-76.
- [33] Xavier, J., Lami, E. and Guyot, A. The role of initiation in the synthesis of silica/
poly(methyl methacrylate) nanocomposites latex particles through emulsion
polymerization. Colloid Polymer Science 279 (2011) : 947-958.
- [34] Yu, J., Gao, Y. F. and Guo, Z. F. Grafting of polystyrene onto a nanometer silica
surface by microemulsion polymerization. Polymer Science 20 (2001) : 71-76.
- [35] Zheng, J., Zhu, R., He, Z., Cheng, G., Wang, H. and Yao, K. Synthesis and
characterization of PMMA/SiO₂ nanocomposites by in-situ suspension
polymerization. Journal of Applied Polymer Science 115 (2010) :1975-1981.
- [36] Zhu, A., Shi, Z., Cai, A., Zhao, F. and Liao, T. Synthesis of core-shell PMMA-SiO₂
nanoparticles with suspension-dispersion-polymerization in an aqueous system
and its effect on mechanical properties of PVC composites. Polymer Testing 27
(2008) : 540-547.
- [37] Chuayjuljit, S., Boonmahitthisud, A. Natural rubber nanocomposites using
polystyrene-encapsulated nanosilica prepared by differential microemulsion
polymerization. Applied Surface Science 256 (2010) : 7211-7216.
- [38] Aouachria, K., Belhaneche, N. Miscibility of PVC/PMMA blends by vicat softening
temperature viscometry DSC and FTIR analysis. Polymer Testing 25 (2006) :
1101-1108.

- [39] Aouachria, K., Belhaneche, N. and Massardier, V. Viscoelastic properties Morphology and thermal stability of rigid and plasticized poly(vinyl chloride)/poly(methyl methacrylate) blends. Journal of Vinyl and Additive Technology (2011) : 156-163.
- [40] Shah, B.L., Shertukde, V.V. Effect of plasticizers on mechanical, electrical, permanence and thermal properties of poly(vinyl chloride). Journal of Applied Polymer Science 90 (2003) : 3278–3284.
- [41] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตรต์และศุภรัตน์ บุญฤทธิผล. การเตรียมนาโนคอมพอสิตเลเทกซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต/ซิลิกาผสมเอทิลีนไวนิลแอสซีเทตโคพอลิเมอร์อิมัลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2008.
- [42] Peng, Z., Kong, L.X., Li, S.D., Chen, Y. and Huang, M.F. Self-assembled natural rubber/silica nanocomposites: Its preparation and characterization. Composites Science and Technology 67 (2007) : 3130-3139.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 สมบัติของพลาสติกไฮสปีวีซีและพลาสติกไฮสปีวีซี/ซิลิกาในคอมพอลสิต

สูตร	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	ความทนแรงฉีกขาด (N/mm)
Plasticized PVC	27.41±0.70	127.91±9.72	125.34±16.79	159.19±0.85
Plasticized PVC/Silica 3 phr	26.47±0.35	116.34±6.82	119.57±21.44	161.32±0.98
Plasticized PVC/Silica 5 phr	26.37±0.12	99.27±22.77	137.70±22.37	164.44±0.93
Plasticized PVC/Silica 7 phr	25.74±0.35	93.63±9.30	144.69±12.11	165.58±1.25
Plasticized PVC/Silica 9 phr	25.90±0.49	83.18±2.08	150.12±12.85	172.89±0.50

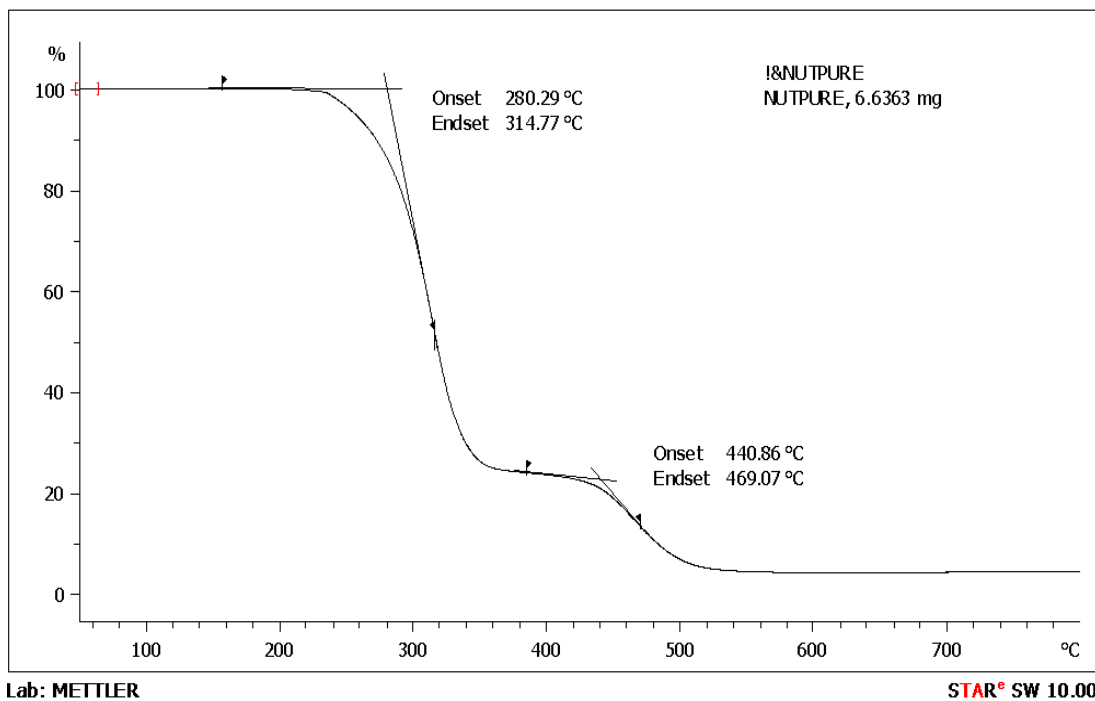
ตาราง ก-2 สมบัติของพลาสติกไฮสปีซีและพลาสติกไฮสปีซี/พอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโน
คอมพอสิต

สูตร	ความทนแรง ดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	ความทนแรง ฉีกขาด (N/mm)
Plasticized PVC	27.41±0.70	127.91±9.72	125.34±16.79	159.19±0.85
Plasticized PVC/PMMA 3 phr	24.89±0.76	127.25±13.19	117.63±12.93	173.74±6.15
Plasticized PVC/PMMA 3 phr	25.70±1.06	126.02±6.34	125.78±6.29	175.50±1.34
Plasticized PVC/PMMA 3 phr	27.41±0.67	119.44±11.31	187.02±66.88	179.17±4.33
Plasticized PVC/PMMA 3 phr	28.68±0.29	107.23±25.88	224.08±20.19	183.28±3.02

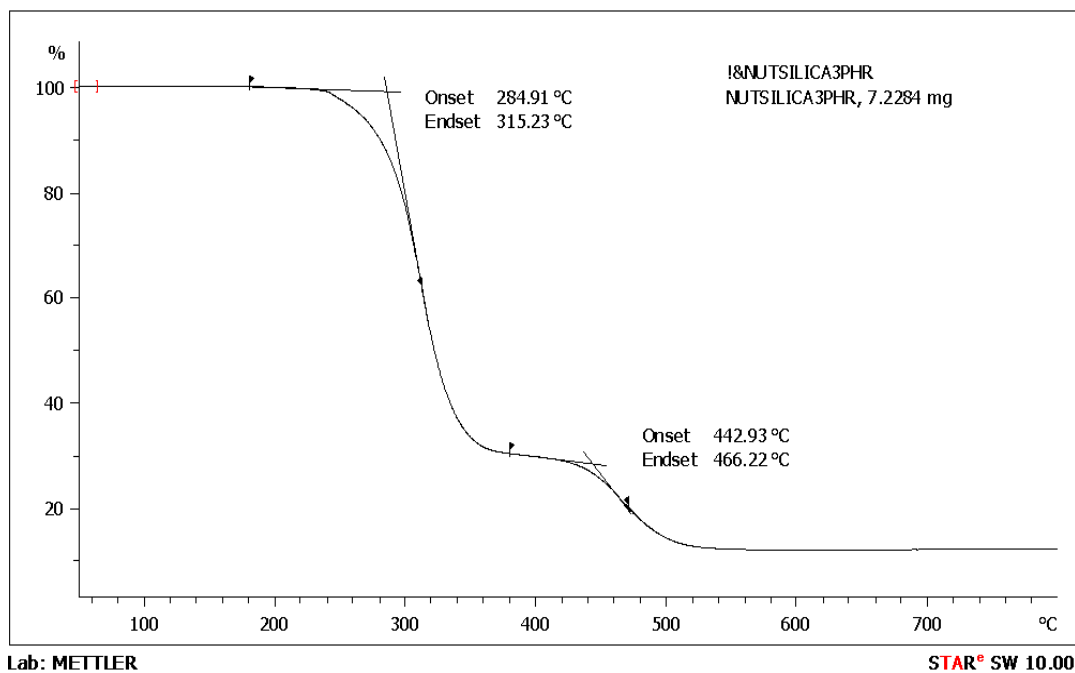
ตาราง ก-3 สมบัติของพลาสติกไฮสปีซีและพลาสติกไฮสปีซี/ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทา-
คริลิตนาโนคอมพอสิต

สูตร	ความทนแรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ยังส์มอดุลัส (MPa)	ความทนแรงฉีกขาด (N/mm)
Plasticized PVC	27.41±0.70	127.91±9.72	125.34±16.79	159.19±0.85
Plasticized PVC/PMMA-n silica 3 phr	22.03±0.93	82.01±4.61	138.03±6.39	176.24±1.69
Plasticized PVC/PMMA-n silica 5 phr	22.51±0.51	74.32±10.98	144.30±28.29	181.03±2.22
Plasticized PVC/PMMA-n silica 7 phr	23.36±0.42	69.43±2.21	188.71±15.97	184.13±3.84
Plasticized PVC/PMMA-n silica 9 phr	23.67±0.55	53.69±6.56	247.91±10.51	186.55±3.33

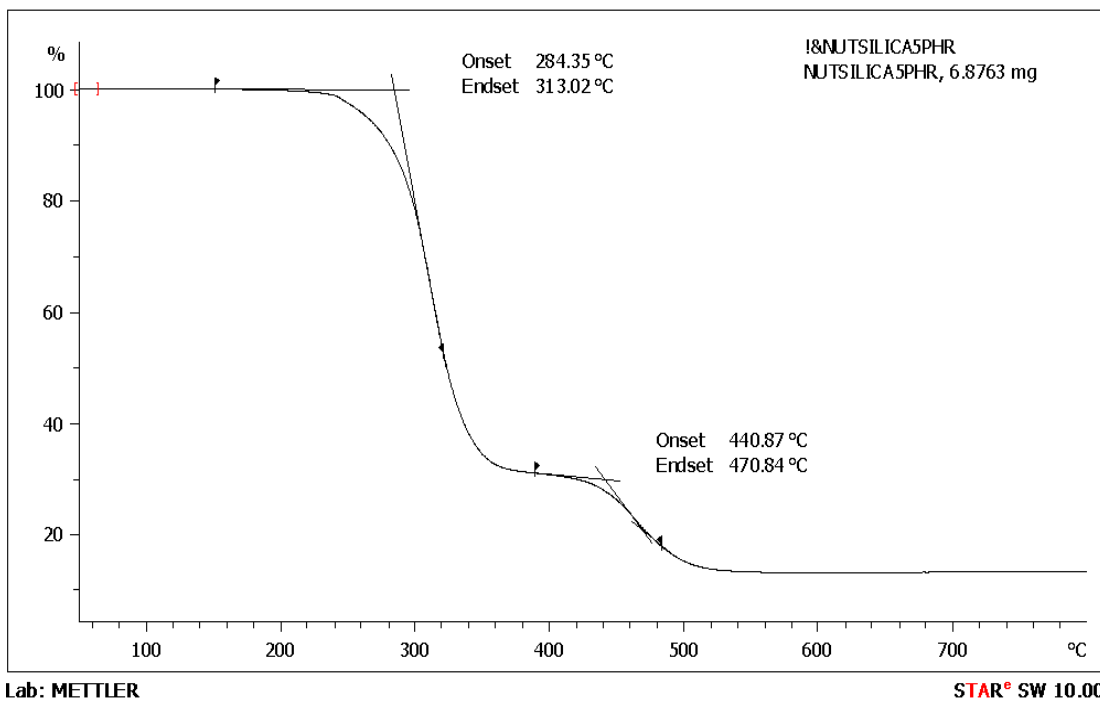
ภาคผนวก ข



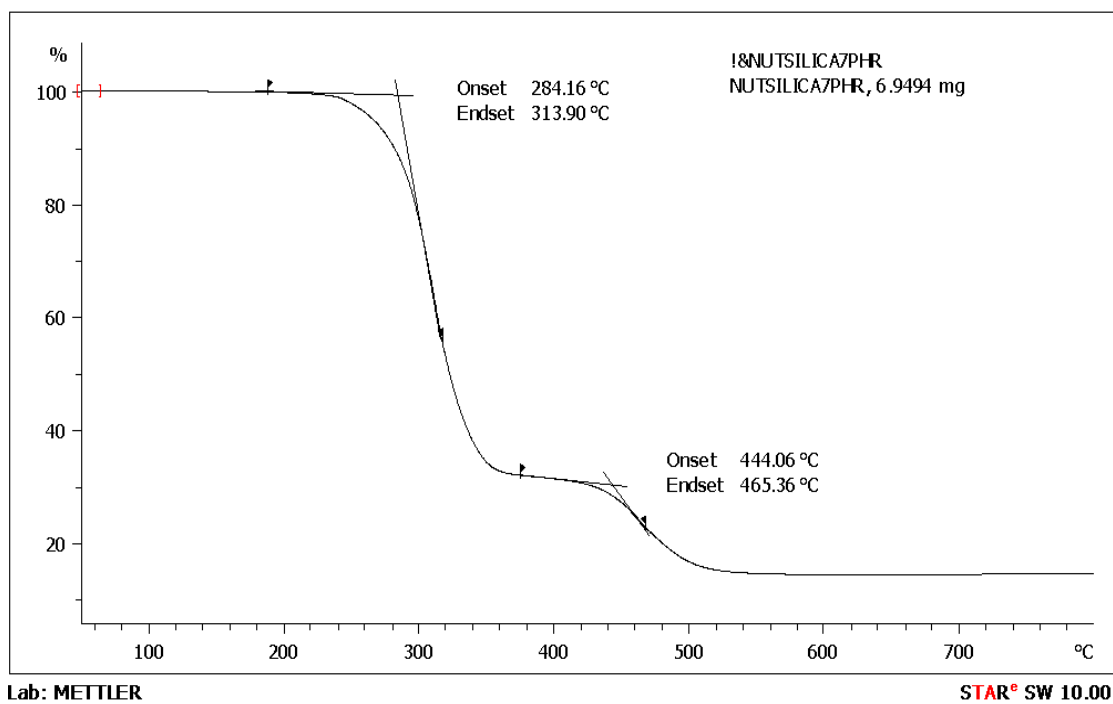
ภาพที่ ข-1 TGA เทอร์โมแกรมของ PVC



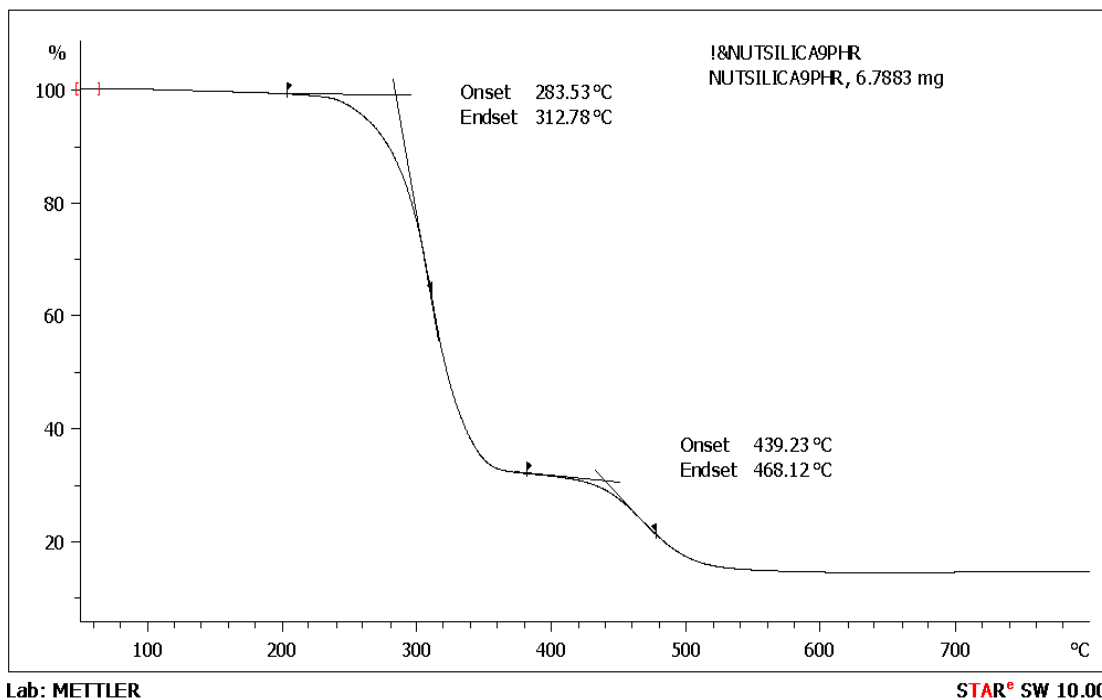
ภาพที่ ข-2 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/3Silica



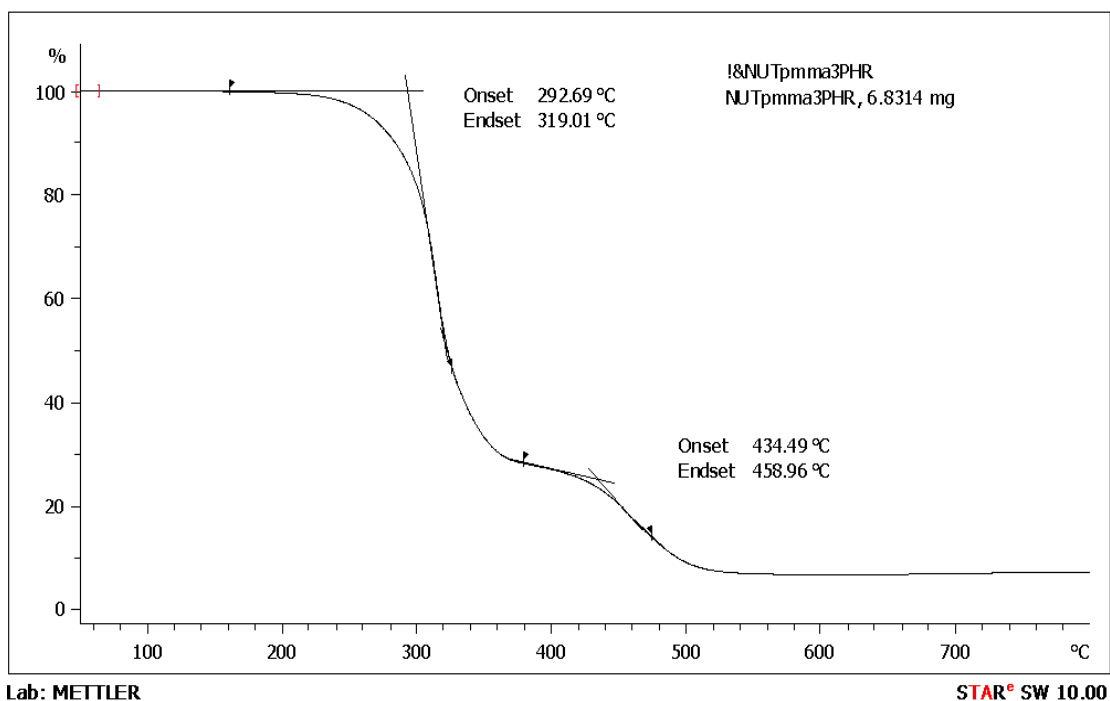
ภาพที่ ข-3 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/5Silica



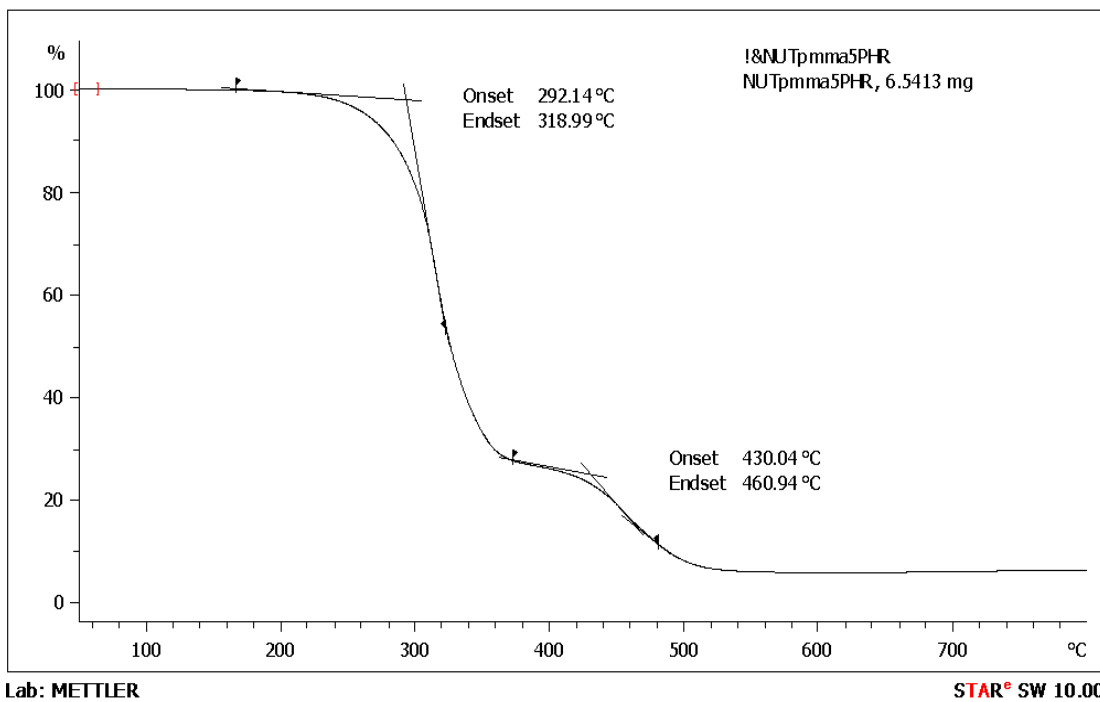
ภาพที่ ข-4 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/7Silica



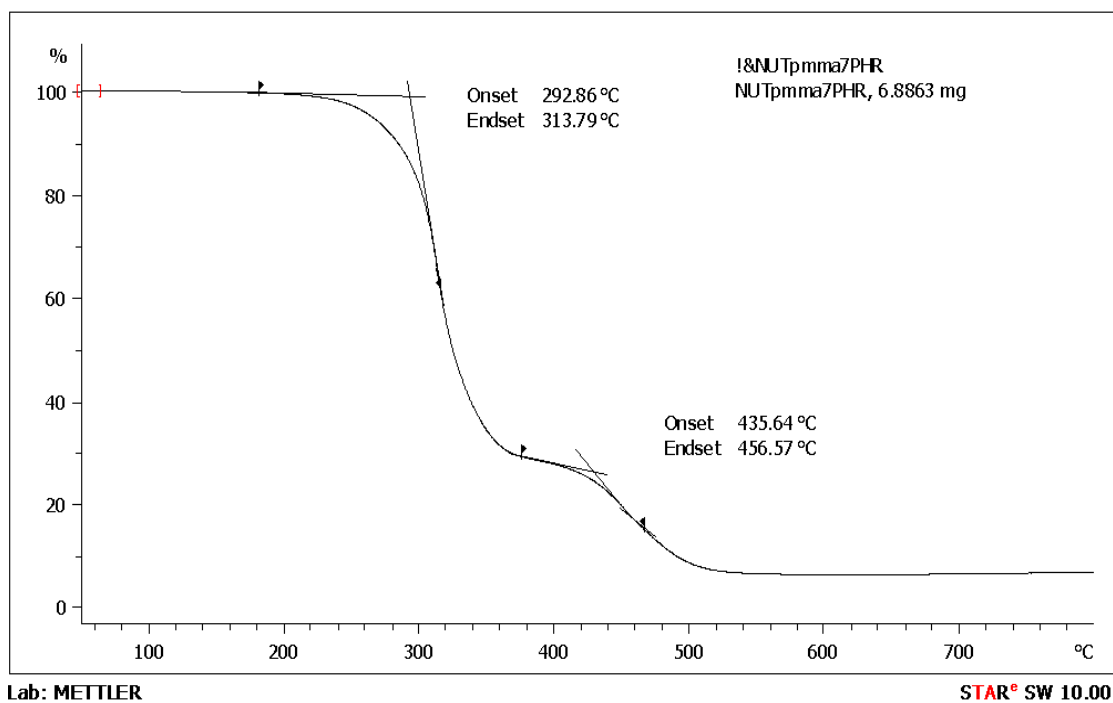
ภาพที่ ข-5 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/9Silica



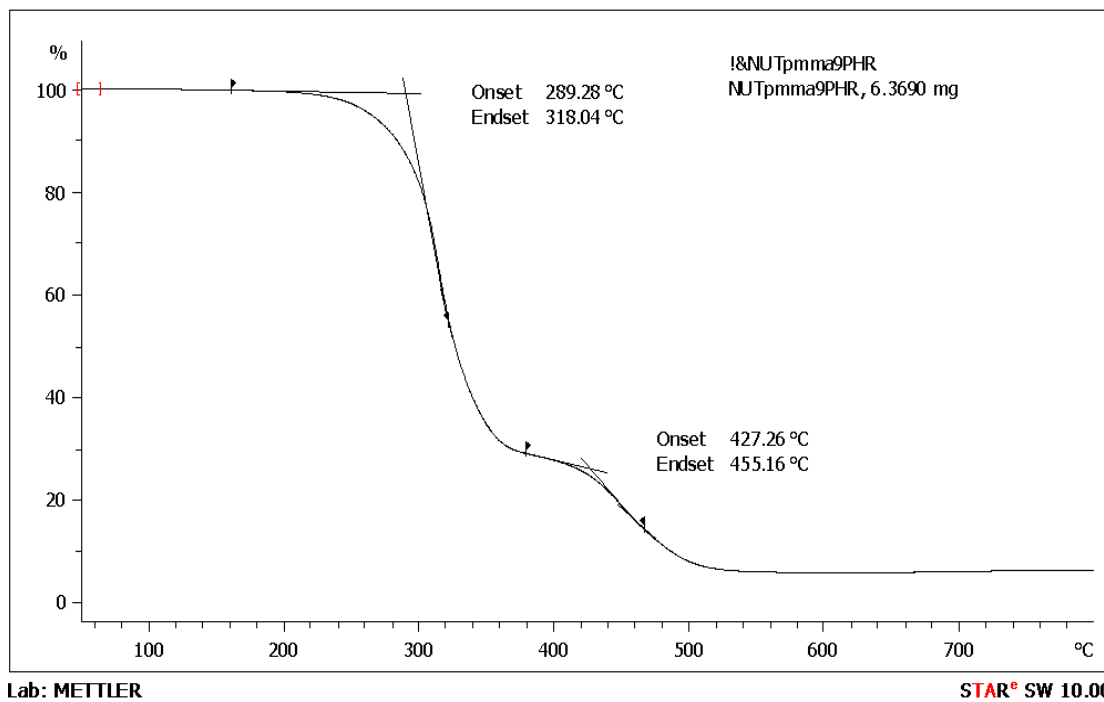
ภาพที่ ข-6 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/3PMMA



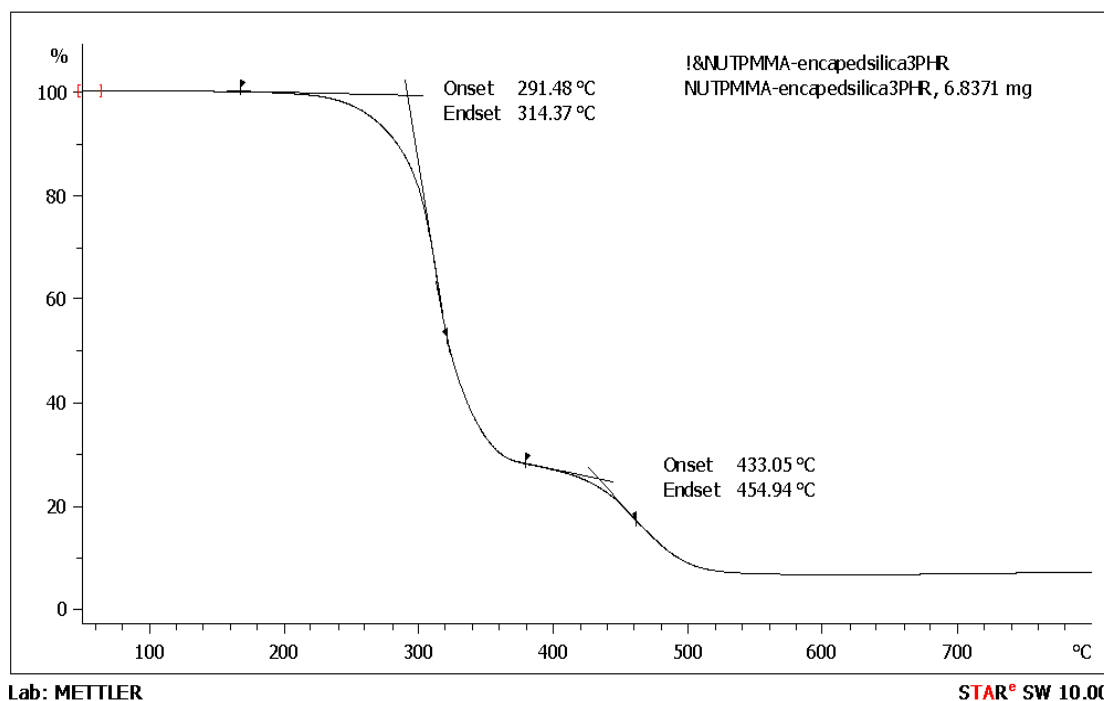
ภาพที่ ข-7 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/5PMMA



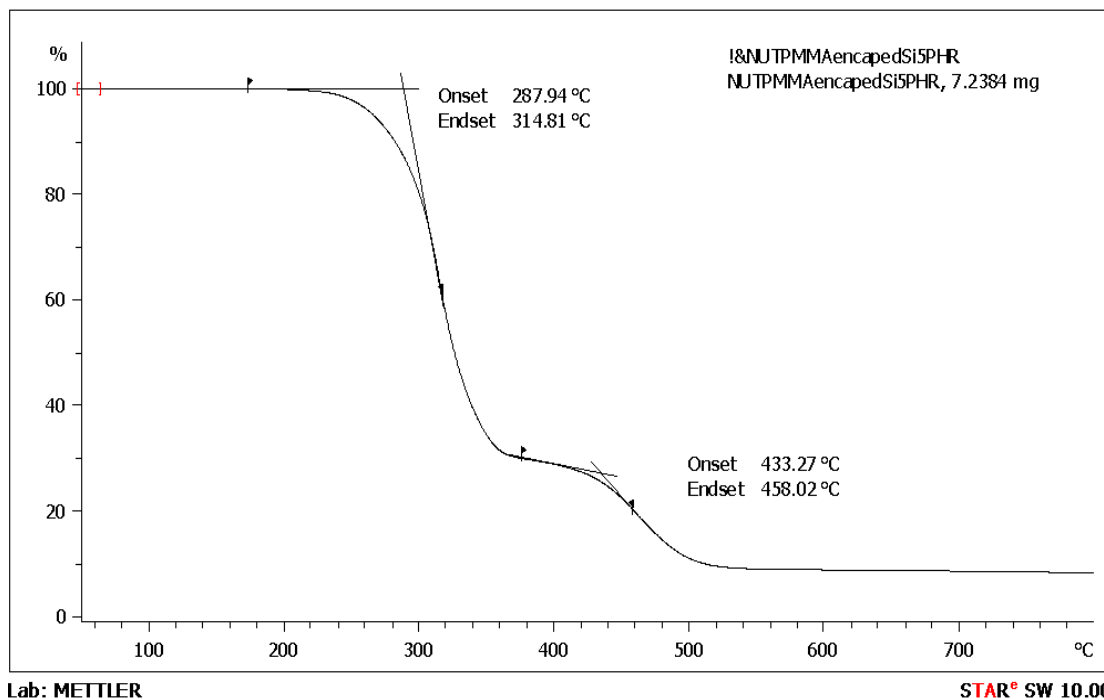
ภาพที่ ข-8 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/7PMMA



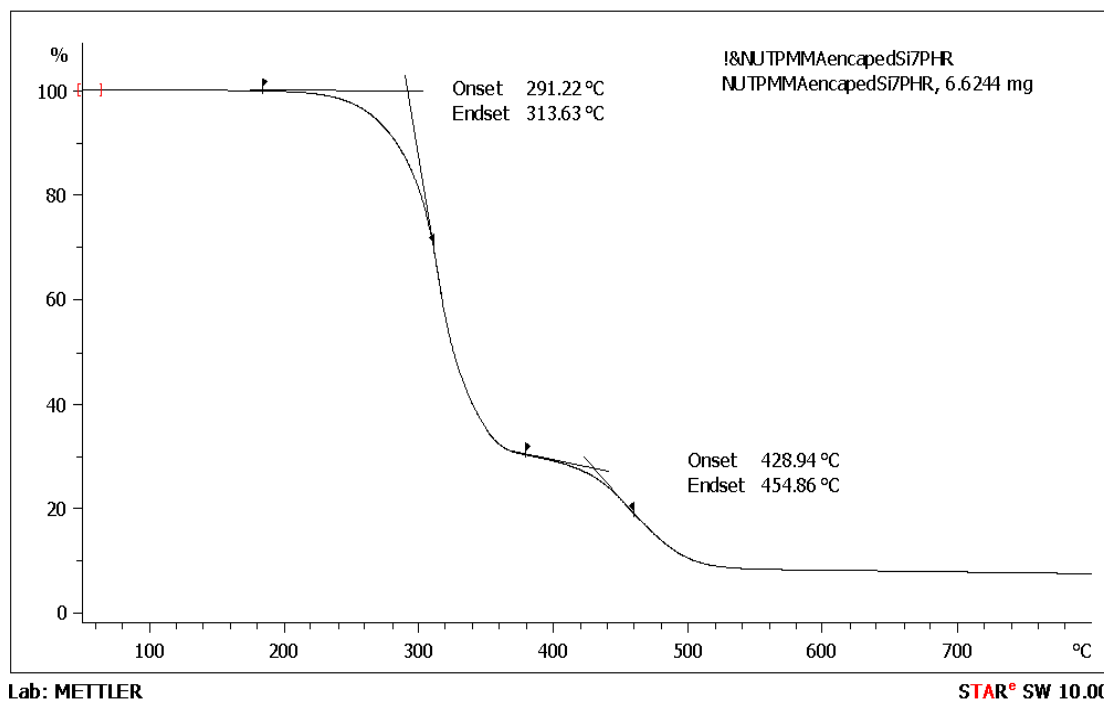
ภาพที่ ข-9 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/9PMMA



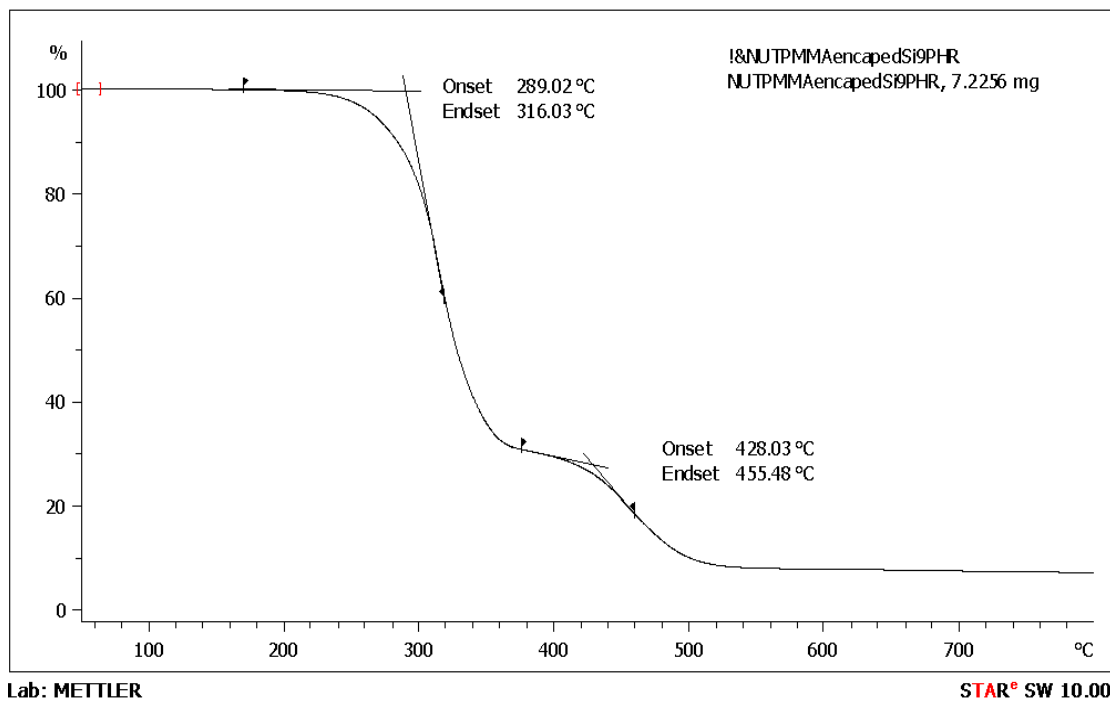
ภาพที่ ข-10 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/3PMMA-encapsulated silica



ภาพที่ ข-11 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/5PMMA-encapsulated silica



ภาพที่ ข-12 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/7PMMA-encapsulated silica



ภาพที่ ข-13 TGA เทอร์โมแกรมของ 100PVC/9PMMA-encapsulated silica

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพล สุขเกษม เกิดเมื่อวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2552 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2554