

ผลของสารตัวเติมที่มีอนุภาคนาโนเมตรต่อสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน
และยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

นางสาวอัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์ 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.

EFFECTS OF NANOFILLERS ON PROPERTIES OF
NATURAL RUBBER/STYRENE BUTADIENE RUBBER AND
NATURAL RUBBER/CARBOXYLATED STYRENE BUTADIENE RUBBER
NANOCOMPOSITES

MISS ANYAPORN BOONMAHITTHISUD

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Materials Science

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรต่อสมบัติ
ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนและยางธรรมชาติ/
ยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต
โดย นางสาวอัญญาพร บุญมณีพิสุทธิ
สาขาวิชา วัสดุศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตรี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุษษา แสงวัฒนาโรจน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตรี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ชัยวัฒน์ นรกันต์กร)

อัญญพร บุญมณีพิสุทธิ: ผลของสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรต่อสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนและยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต. (EFFECTS OF NANOFILLERS ON PROPERTIES OF NATURAL RUBBER/STYRENE BUTADIENE RUBBER AND NATURAL RUBBER/CARBOXYLATED STYRENE BUTADIENE NANOCOMPOSITES). อ. ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. เสาวรจณ์ ช่างจุลจิตร์, 154 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน และยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนด้วยสารตัวเติมอินทรีย์และอินทรีย์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรชนิดต่างๆ โดยยางผสมแต่ละชนิดถูกผสมกับคาร์บอนแบล็ก คาร์บอนนาโนทิวบ์ นาโนซิลิกา พอลิสไตรีน พอลิเมทิลเมทาคริเลต นาโนซิลิกา ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตในภาวะที่เป็นเลเท็กซ์ นาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน ขณะที่นาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนและพอลิเมทิลเมทาคริเลตถูกเตรียมด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อินซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันโดยนาโนซิลิกาได้ผ่านการดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบซีเลน 3-เมทาคริลอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีซีเลน นาโนคอมพอสิตเลเท็กซ์ของทั้งยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน และยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนถูกหล่อให้เป็นแผ่นในแม่แบบที่ทำจากกระจก แล้วทำให้แห้งในอากาศ ตามด้วยการบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นชิ้นงานได้ถูกตรวจสอบสมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติเชิงกลพลวัต พฤติกรรมทางความร้อนและสัญญาณวิทยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติเชิงกลพลวัต และเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตของยางผสมได้ถูกปรับปรุงด้วยการเติมสารตัวเติมที่มีขนาดนาโนเมตรในปริมาณที่เหมาะสม

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

สาขาวิชา.....วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2554.....

#5273871923: MAJOR MATERIALS SCIENCE

KEY WORD: NATURAL RUBBER / STYRENE BUTADIENE RUBBER / CARBOXYLATED
STYRENE BUTADIENE RUBBER / CARBON BLACK / CARBON NANOTUBE / NANOSILICA /
POLYSTYRENE / POLYSTYRENE-ENCAPSULATED SILICA / POLY (METHYL) METHACRYLATE /
POLY (METHYL) METHACRYLATE-ENCAPSULATED SILICA / NANOLATEX

ANYAPORN BOONMAHITTHISUD: EFFECTS OF NANOFILLERS ON PROPERTIES OF
NATURAL RUBBER/STYRENE BUTADIENE RUBBER AND NATURAL/CARBOXYLATED
STYRENE BUTADIENE RUBBER NANOCOMPOSITES. THESIS ADVISOR: ASSOC.
PROF. SAOWAROJ CHUAYJULJIT., 154 pp.

The aim of this research is to prepare the rubber blend nanocomposites of natural rubber/styrene butadiene rubber (NR/SBR) and natural rubber/carboxylated styrene butadiene rubber (NR/XSBR) filled with different kinds of inorganic and organic nanofillers. Each rubber blend was blended with carbon black, carbon nanotubes, nanosilica, polystyrene (nPS) and poly(methyl methacrylate) (nPMMA) nanoparticles, PS-encapsulated nanosilica (PS-nSiO₂) and PMMA-encapsulated nanosilica (PMMA-nSiO₂) by latex compounding method. The nanolatices of nPS and nPMMA were synthesized by differential microemulsion polymerization, whilst the nanolatices of PS-nSiO₂ and PMMA-nSiO₂ were prepared via *'in situ'* differential microemulsion polymerization in the presence of nanosized silica pretreated with 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane coupling agent. The nanocomposite latices of NR/SBR and NR/XSBR were cast into sheets on a glass mold, air dried and then cured in an oven at 80°C for 3 h. After that, the specimens were examined for their tensile properties, dynamic mechanical properties, thermal stability and morphology. The results show that the tensile properties, dynamic mechanical properties and thermal stability of the rubber blend nanocomposites were improved by the addition of the appropriate amount of the nanofillers.

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

Field of study: Materials Science..... Advisor's signature.....

Academic Year: 2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เพราะได้รับความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนาม ต่อไปนี้

1. รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ การแก้ไขปัญหา การสนับสนุนทุนในการวิจัย รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. อาจารย์ในภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่านที่ให้ทั้งความรู้ทางด้านวิชาการและจริยธรรมในการดำเนินชีวิต
3. ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูงที่ได้ให้ทุนสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัย
4. ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภชที่ได้ให้ทุนสนับสนุนด้านงานวิจัย
5. ดร.ชัยวัฒน์ นรกานต์กร และคุณดัชชณี ไกรศิริ ที่ให้คำแนะนำและการแก้ปัญหาอย่างดียิ่งโดยเสมอมา
6. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
7. บริษัท คอกนิส (ประเทศไทย) จำกัด
8. บริษัท ดาวเคมีคัล จำกัด
9. บริษัท ไทย เอ็มเอ็มเอ จำกัด
10. บริษัท สยามเคมีคัล จำกัด
11. บริษัท ไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
12. บริษัท สยามเลเท็กซ์สังเคราะห์ จำกัด
13. บริษัท สยาม ซินเทติก ลาเท็กซ์ จำกัด
14. บริษัท ไทย เอ็มเอ็มเอ จำกัด

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาว รวมไปถึง คุณวรวิทย์ ธิมากุล ที่ให้การสนับสนุนในด้านกำลังใจและด้านทุนทรัพย์ในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนี้ขอขอบคุณมิตรภาพที่ดีจากพี่น้องชาววัสดุศาสตร์ทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

| | |
|-------------------------|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ซ |
| สารบัญภาพ..... | ณ |

บทที่

| | |
|---|----|
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 ยางธรรมชาติ..... | 3 |
| 2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ..... | 3 |
| 2.1.2 น้ำยางข้น..... | 4 |
| 2.2 ข้อดีและข้อเสียของน้ำยางข้น..... | 4 |
| 2.3 การวัลคาไนเซชันของยาง..... | 5 |
| 2.3.1 การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน..... | 6 |
| 2.3.2 โครงสร้างการเชื่อมขวางโมเลกุล..... | 7 |
| 2.4 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ..... | 8 |
| 2.5 การใช้งานของยางธรรมชาติ..... | 10 |
| 2.6 ยางสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 10 |
| 2.6.1 กระบวนการผลิตน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 11 |
| 2.6.2 สมบัติทั่วไปของยางสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 12 |
| 2.6.3 การใช้งานของน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 12 |
| 2.7 ยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 12 |
| 2.7.1 กระบวนการผลิตน้ำยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 13 |

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.7.2 การใช้งานของน้ำยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอิน | 14 |
| 2.8 ยางผสม | 15 |
| 2.9 สารตัวเติม | 16 |
| 2.9.1 ชนิดของสารตัวเติม | 16 |
| 2.10 คาร์บอนแบล็ก | 17 |
| 2.10.1 การสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนแบล็ก | 18 |
| 2.11 คาร์บอนนาโนทิวป์ | 19 |
| 2.11.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวป์ | 20 |
| 2.12 นาโนซิลิกา | 22 |
| 2.12.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา | 22 |
| 2.12.2 ปัญหาของการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารตัวเติม | 25 |
| 2.13 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน | 27 |
| 2.14 สารคู่ควบประเภทซิลเลน | 32 |
| 3. วิธีดำเนินการวิจัย | 34 |
| 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี | 34 |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง | 35 |
| 3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมสารดิสเพอร์สชัน | 35 |
| 3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมนาโนเลเท็กซ์ | 35 |
| 3.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมขึ้นทดสอบ | 36 |
| 3.2.4 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ | 36 |
| 3.3 วิธีการทดลอง | 37 |
| 3.3.1 การเตรียมสารดิสเพอร์สชันของสารตัวเติมที่มีอนุภาคนาโนเมตร | 37 |
| 3.3.2 การดัดแปรผิวอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลเลน | 38 |
| 3.3.3 การสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมอร์ | 38 |
| 3.3.4 การสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ | 41 |
| 3.3.5 การแยกพอลิเมอร์และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์จากนาโนเลเท็กซ์ | 42 |

| | | |
|----------|---|----|
| 3.3.6 | วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของนาโนซิลิกาที่ดัดแปรด้วยสารคู่ควบซิลีนพอลิเมอร์และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์จากนาโนเลเท็กซ์..... | 43 |
| 3.3.7 | การวิเคราะห์นาโนเลเท็กซ์..... | 44 |
| 3.3.7.1 | ร้อยละผลได้ และร้อยละของแข็ง..... | 44 |
| 3.3.7.2 | ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค..... | 45 |
| 3.3.7.3 | สัณฐานวิทยาของอนุภาคที่มีขนาดนาโนเมตร..... | 46 |
| 3.3.8 | การเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 47 |
| 3.3.9 | การเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 49 |
| 3.3.10 | การทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต..... | 51 |
| 3.3.10.1 | สมบัติด้านความทนแรงดึง..... | 51 |
| 3.3.10.2 | สมบัติทางความร้อน..... | 53 |
| 3.3.10.3 | สมบัติเชิงกลพลวัต..... | 54 |
| 3.3.11 | การตรวจสอบสัณฐานวิทยา..... | 54 |
| 4. | ผลของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อสมบัติของนาโนคอมพอสิต..... | 55 |
| 4.1 | สัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์..... | 55 |
| 4.2 | สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์..... | 55 |
| 4.2.1 | ความทนแรงดึง..... | 55 |
| 4.2.2 | มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300..... | 57 |
| 4.2.3 | ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด..... | 57 |
| 4.3 | สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์..... | 58 |
| 4.3.1 | ความทนแรงดึง..... | 58 |
| 4.3.2 | มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300..... | 59 |
| 4.3.3 | ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด..... | 60 |

| | |
|---|----|
| 4.4 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต ที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์..... | 61 |
| 4.4.1 สมบัติเชิงกลพลวัต..... | 61 |
| 4.4.2 เสถียรภาพทางความร้อน..... | 63 |
| 4.5 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโน- คอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์..... | 65 |
| 4.5.1 สมบัติเชิงกลพลวัต..... | 65 |
| 4.5.2 เสถียรภาพทางความร้อน..... | 67 |
| 4.6 สันฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติม คาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์..... | 69 |
| 4.7 สันฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโน- คอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์..... | 71 |
| 4.8 สรุปผลการทดสอบ..... | 73 |
| 5. ผลของนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไอสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ต่อสมบัติของนาโนคอมพอสิต.. | 75 |
| 5.1 นาโนเลเท็กซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไอสไตรีน..... | 75 |
| 5.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน..... | 76 |
| 5.1.2 สันฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาและอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วย พอลิไอสไตรีน..... | 78 |
| 5.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติม นาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไอสไตรีนนาโนเลเท็กซ์..... | 79 |
| 5.2.1 ความทนแรงดึง..... | 79 |
| 5.2.2 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300..... | 81 |
| 5.2.3 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด..... | 81 |
| 5.3 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติม นาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไอสไตรีนนาโนเลเท็กซ์..... | 82 |
| 5.3.1 สมบัติเชิงกลพลวัต..... | 82 |

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.3.2 เสถียรภาพทางความร้อน..... | 85 |
| 5.4 สันฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนานาซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์..... | 86 |
| 5.5 สรุปผลการทดลอง..... | 89 |
| 6. ผลของพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ต่อสมบัติของนาโนคอมพอสิต.. | 90 |
| 6.1 นาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน..... | 90 |
| 6.1.1 ร้อยละผลได้และขนาดอนุภาคในนาโนเลเท็กซ์..... | 90 |
| 6.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน..... | 92 |
| 6.1.3 สันฐานวิทยาของอนุภาคพอลิสไตรีนและอนุภาคนานาซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน..... | 94 |
| 6.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนานาซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์..... | 95 |
| 6.2.1 ความทนแรงดึง..... | 95 |
| 6.2.2 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300..... | 97 |
| 6.2.3 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด..... | 97 |
| 6.3 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนานาซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์..... | 98 |
| 6.3.1 สมบัติเชิงกลพลวัต..... | 98 |
| 6.3.2 เสถียรภาพทางความร้อน..... | 100 |
| 6.4 สันฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนานาซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์..... | 102 |
| 6.5 สรุปผลการทดลอง..... | 104 |
| 7. ผลของนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ต่อสมบัติของนาโนคอมพอสิต..... | 106 |
| 7.1 นาโนเลเท็กซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... | 106 |
| 7.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน..... | 107 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 7.1.2 | พื้นฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาและอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วย พอลิเมทิลเมทาคริเลต..... | 109 |
| 7.2 | สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต ที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์..... | 110 |
| 7.2.1 | ความทนแรงดึง..... | 110 |
| 7.2.2 | มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300..... | 112 |
| 7.2.3 | ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด..... | 112 |
| 7.3 | สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโน- คอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์..... | 113 |
| 7.3.1 | สมบัติเชิงกลพลวัต..... | 113 |
| 7.3.2 | เสถียรภาพทางความร้อน..... | 116 |
| 7.4 | พื้นฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต ที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์..... | 117 |
| 7.5 | สรุปผลการทดลอง..... | 119 |
| 8. | ผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ต่อสมบัติของ นาโนคอมพอสิต..... | 121 |
| 8.1 | นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... | 121 |
| 8.1.1 | ร้อยละผลได้และขนาดอนุภาคในนาโนเลเท็กซ์..... | 121 |
| 8.1.2 | การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน..... | 122 |
| 8.1.3 | พื้นฐานวิทยาของอนุภาคพอลิเมทิลเมทาคริเลตและอนุภาคนาโนซิลิกา ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... | 125 |
| 8.2 | สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต ที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์..... | 126 |
| 8.2.1 | ความทนแรงดึง..... | 126 |
| 8.2.2 | มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300..... | 127 |
| 8.2.3 | ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด..... | 128 |

บทที่

| | |
|--|-----|
| 8.3 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไทรินบิวทาไดอินนาโน-คอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ | 129 |
| 8.3.1 สมบัติเชิงกลพลวัต | 129 |
| 8.3.2 เสถียรภาพทางความร้อน | 132 |
| 8.4 สันฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไทรินบิวทาไดอินนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ | 133 |
| 8.5 สรุปผลการทดลอง | 135 |
| 9. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 137 |
| 9.1 สรุปผลการทดลอง | 137 |
| 9.2 ข้อเสนอแนะ | 138 |
| รายการอ้างอิง | 139 |
| ภาคผนวก | 145 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 154 |

สารบัญตาราง

หน้า

| | | |
|--------------|--|----|
| ตารางที่ 2.1 | สารเคมีในกระบวนการสังเคราะห์นาโนซิลิกาโดยวิธี Flame aerosol process | 22 |
| ตารางที่ 2.2 | ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ของออกซิเจน | 23 |
| ตารางที่ 3.1 | ปริมาณสารที่ใช้เตรียมสารดิสเพอร์ชันของคาร์บอนแบล็ค คาร์บอนนาโนทิวบ์ และนาโนซิลิกา | 37 |
| ตารางที่ 3.2 | ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์พอลิเมอร์นาโนเลเท็กซ์ | 39 |
| ตารางที่ 3.3 | ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ | 42 |
| ตารางที่ 3.4 | องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนคอมพอสิต (โดยน้ำหนักแห้ง) | 47 |
| ตารางที่ 3.5 | ปริมาณสารที่ใช้เตรียมน้ำยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต | 47 |
| ตารางที่ 3.6 | องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนคอมพอสิต (โดยน้ำหนักแห้ง) | 50 |
| ตารางที่ 3.7 | ปริมาณสารที่ใช้เตรียมน้ำยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต | 50 |
| ตารางที่ 4.1 | ค่า storage modulus และ Tg ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน | 63 |
| ตารางที่ 4.2 | อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน | 65 |
| ตารางที่ 4.3 | ค่า storage modulus และ Tg ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน | 67 |
| ตารางที่ 4.4 | อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็คและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน | 69 |
| ตารางที่ 5.1 | เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกา MPTMS และพอลิสไตรีน | 77 |
| ตารางที่ 5.2 | ค่า storage modulus และ Tg ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน | 84 |

| | |
|---|-----|
| ตารางที่ 5.3 อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าซาร์ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 86 |
| ตารางที่ 6.1 ร้อยละผลได้ของพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์..... | 90 |
| ตารางที่ 6.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกา MPTMS และพอลิสไตรีน..... | 93 |
| ตารางที่ 6.3 ค่า storage modulus และ Tg ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 100 |
| ตารางที่ 6.4 อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าซาร์ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 102 |
| ตารางที่ 7.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกา MPTMS และพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... | 108 |
| ตารางที่ 7.2 ค่า storage modulus และ Tg ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 115 |
| ตารางที่ 7.3 อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าซาร์ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 117 |
| ตารางที่ 8.1 ร้อยละผลได้ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์..... | 121 |
| ตารางที่ 8.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกา MPTMS และพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... | 124 |
| ตารางที่ 8.3 ค่า storage modulus และ Tg ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 131 |
| ตารางที่ 8.3 อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าซาร์ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 133 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของไอโซพรีน และ <i>cis-1,4 polyisoprene</i> | 3 |
| รูปที่ 2.2 การเชื่อมขวางโมเลกุลของยางด้วยกัมมะถันรูปแบบต่างๆ..... | 7 |
| รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของยางสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 10 |
| รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาการสังเคราะห์น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 12 |
| รูปที่ 2.5 โครงสร้างของทางเคมีของยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 13 |
| รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาการสังเคราะห์คาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน..... | 13 |
| รูปที่ 2.7 ปฏิกริยา Diel-Alder..... | 13 |
| รูปที่ 2.8 หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของคาร์บอนแบล็ก..... | 18 |
| รูปที่ 2.9 โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ (a) คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว (b) คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังซ้อน..... | 20 |
| รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตนาโนซิลิกาโดยวิธี Flame aerosol process..... | 23 |
| รูปที่ 2.11 การเตรียมนาโนซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจล..... | 24 |
| รูปที่ 2.10 โมเดลแสดงลักษณะโครงสร้างของซิลิกา..... | 22 |
| รูปที่ 2.12 กระบวนการผลิตนาโนซิลิกาโดยวิธีโซล-เจล..... | 25 |
| รูปที่ 2.13 การเกาะกลุ่มของนาโนซิลิกา..... | 25 |
| รูปที่ 2.14 ลักษณะของหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา..... | 25 |
| รูปที่ 2.15 สันฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิตที่ใส่ซิลิกา (a) ร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก และ (b) ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก..... | 27 |
| รูปที่ 2.16 ค่า CMC และสมบัติทางกายภาพของสารละลายสารลดแรงตึงผิว..... | 29 |
| รูปที่ 2.17 กลไกการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการเกิดแบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน.. | 30 |
| รูปที่ 2.18 กลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน..... | 31 |
| รูปที่ 2.19 สันฐานวิทยาของอิมัลชันที่เสริมแรงด้วยซิลิกาโดย (a) ไม่ใช้สารคู่ควบซิลิโคน (b) ใช้สารคู่ควบซิลิโคน..... | 32 |
| รูปที่ 2.20 การดัดแปรผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลิโคน..... | 33 |
| รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารดีสเพอร์ชันของสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตร..... | 37 |

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 3.2 | เครื่องควบคุมรางบดและหม้ออบ | 38 |
| รูปที่ 3.3 | ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมอร์ | 39 |
| รูปที่ 3.4 | การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องควบแน่น และท่อฆ่าแก๊ส | 40 |
| รูปที่ 3.5 | การติดตั้งกรวยสำหรับหยดมอนอเมอร์ | 40 |
| รูปที่ 3.6 | ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ | 41 |
| รูปที่ 3.7 | การตกตะกอนพอลิเมอร์ด้วยเมทานอลปริมาณมากเกินไป | 42 |
| รูปที่ 3.8 | การล้างและกรองอนุภาคระดับนาโนที่เตรียมได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ | 43 |
| รูปที่ 3.9 | ตะกอนของพอลิเมอร์ก่อนนำไปอบ | 43 |
| รูปที่ 3.10 | เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ | 44 |
| รูปที่ 3.11 | เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคกระเจิงแสงแบบพลวัต | 46 |
| รูปที่ 3.12 | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน | 46 |
| รูปที่ 3.13 | ขั้นตอนการเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน | 48 |
| รูปที่ 3.14 | เครื่องปั่นกวนเชิงกลความเร็วสูง | 48 |
| รูปที่ 3.15 | เครื่องปั่นกวนเชิงกล | 49 |
| รูปที่ 3.16 | แม่พิมพ์ที่ทำจากแผ่นกระจกขนาด 20 × 20 × 0.15 เซนติเมตร | 49 |
| รูปที่ 3.17 | ขั้นตอนการเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน | 51 |
| รูปที่ 3.18 | เครื่อง Instron Testing Machine | 52 |
| รูปที่ 3.19 | ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ของนาโนคอมพอสิต | 52 |
| รูปที่ 3.20 | เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์ | 53 |
| รูปที่ 3.21 | เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) | 53 |
| รูปที่ 3.22 | เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต | 54 |
| รูปที่ 3.23 | กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด | 54 |
| รูปที่ 4.1 | สัณฐานวิทยาของ (a) คาร์บอนแบล็ก และ (b) คาร์บอนนาโนทิวป์ | 55 |

| | | |
|-------------|--|----|
| รูปที่ 4.2 | ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณต่างๆ กัน..... | 56 |
| รูปที่ 4.3 | มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน.... | 57 |
| รูปที่ 4.4 | ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน.... | 58 |
| รูปที่ 4.5 | ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณต่างๆ กัน..... | 59 |
| รูปที่ 4.6 | มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน... | 60 |
| รูปที่ 4.7 | ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน... | 61 |
| รูปที่ 4.8 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent..... | 62 |
| รูปที่ 4.9 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent.... | 62 |
| รูปที่ 4.10 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 64 |
| รูปที่ 4.11 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 64 |
| รูปที่ 4.12 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent... | 66 |

รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต
ที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent..... 66

รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต
ที่เติมคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณต่างๆ กัน..... 68

รูปที่ 4.15 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต
ที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... 68

รูปที่ 4.16 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโน-
คอมพอสิตที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... 70

รูปที่ 4.17 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน
นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... 72

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์..... 75

รูปที่ 5.2 การกระจายขนาดอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน..... 75

รูปที่ 5.3 FT-IR สเปกตรัมของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา (b) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปร
ด้วย MPTMS (c) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน..... 76

รูปที่ 5.4 การดัดแปรผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิเลน MPTMS..... 77

รูปที่ 5.5 สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา และ (b) อนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้ม
ด้วยพอลิสไตรีน..... 78

รูปที่ 5.6 กลไกการห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยพอลิสไตรีนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ
'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน..... 79

รูปที่ 5.7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกา
และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ในปริมาณต่างๆ กัน..... 80

รูปที่ 5.8 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโน-
คอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่
ปริมาณต่างๆ กัน..... 81

| | | |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 5.9 | ร้อยละของการยึดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 82 |
| รูปที่ 5.10 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent..... | 83 |
| รูปที่ 5.11 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent..... | 83 |
| รูปที่ 5.12 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 85 |
| รูปที่ 5.13 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 85 |
| รูปที่ 5.14 | ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 87 |
| รูปที่ 6.1 | ตัวอย่างของพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์..... | 90 |
| รูปที่ 6.2 | การกระจายขนาดอนุภาคนาโนของ (a) พอลิสไตรีนและ (b) นาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน..... | 91 |
| รูปที่ 6.3 | FT-IR สเปกตรัมของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา (b) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วย MPTMS (c) อนุภาคพอลิสไตรีน และ (d) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน..... | 92 |
| รูปที่ 6.4 | การดัดแปรผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิเลน MPTMS..... | 94 |
| รูปที่ 6.5 | สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคพอลิสไตรีนและ (b) อนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน..... | 94 |
| รูปที่ 6.6 | กลไกการห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยพอลิสไตรีนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิตู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน..... | 95 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| รูปที่ 6.7 | ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติม พอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ในปริมาณต่างๆ กัน..... | 96 |
| รูปที่ 6.8 | มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโน- คอมพอสิตที่เติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ ปริมาณต่างๆ กัน..... | 97 |
| รูปที่ 6.9 | ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน นาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 98 |
| รูปที่ 6.10 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติม พอลิสไตรีนที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent..... | 99 |
| รูปที่ 6.11 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกา ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent..... | 99 |
| รูปที่ 6.12 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติม พอลิสไตรีนที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 101 |
| รูปที่ 6.13 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกา ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 101 |
| รูปที่ 6.14 | ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต ที่ปริมาณพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน... | 103 |
| รูปที่ 7.1 | ตัวอย่างของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์..... | 106 |
| รูปที่ 7.2 | การกระจายขนาดอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... | 106 |
| รูปที่ 7.3 | FT-IR สเปกตรัมของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา (b) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปร ด้วย MPTMS (c) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... | 107 |
| รูปที่ 7.4 | การดัดแปรผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิเลน MPTMS..... | 108 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| รูปที่ 7.5 | สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา และ (b) อนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... | 109 |
| รูปที่ 7.6 | กลไกการห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน..... | 110 |
| รูปที่ 7.7 | ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลทีกซ์ในปริมาณต่างๆกัน..... | 111 |
| รูปที่ 7.8 | มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลทีกซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 112 |
| รูปที่ 7.9 | ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลทีกซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 113 |
| รูปที่ 7.10 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent..... | 114 |
| รูปที่ 7.11 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลทีกซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent..... | 114 |
| รูปที่ 7.12 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 116 |
| รูปที่ 7.13 | เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลทีกซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 116 |
| รูปที่ 7.14 | ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลทีกซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 118 |

รูปที่ 8.1 ตัวอย่างของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ 121

รูปที่ 8.2 การกระจายขนาดอนุภาคนาโนของ (a) พอลิเมทิลเมทาคริเลต และ (b) นาโน-ซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... 122

รูปที่ 8.3 FT-IR สเปกตรัมของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา (b) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วย MPTMS (c) อนุภาคพอลิเมทิลเมทาคริเลต และ (d) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... 123

รูปที่ 8.4 การดัดแปรผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซีเลน MPTMS..... 124

รูปที่ 8.5 สันฐานวิทยาของ (a) อนุภาคพอลิเมทิลเมทาคริเลตและ (b) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต..... 125

รูปที่ 8.6 กลไกการห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ ‘อิน ซิทู’ ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน..... 126

รูปที่ 8.7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไทรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ในปริมาณต่างๆกัน..... 127

รูปที่ 8.8 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไทรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... 128

รูปที่ 8.9 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไทรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... 129

รูปที่ 8.10 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไทรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent_ 130

| | |
|--|-----|
| รูปที่ 8.11 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต ที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent..... | 130 |
| รูปที่ 8.12 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต ที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 132 |
| รูปที่ 8.13 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต ที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 132 |
| รูปที่ 8.14 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโน- คอมพอสิตที่ปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน..... | 134 |

บทที่ 1

บทนำ

ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญของประเทศไทย โดยเป็นวัตถุดิบที่มีเป็นจำนวนมาก และหาได้ง่ายภายในประเทศ ดังนั้น การพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปจากยางธรรมชาติจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติให้เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณการนำเข้าผลิตภัณฑ์ยางสำเร็จรูปจากต่างประเทศได้อีกด้วย ปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตยางผสมและยางคอมพอสิตกำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยาง ปรับปรุงประสิทธิภาพในการขึ้นรูป หรือลดต้นทุน ซึ่งการเลือกยางผสมจะพิจารณาจากความสามารถในการเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันของยางผสม ปัจจุบันได้มีการนำยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene butadiene rubber, SBR) มาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมรถยนต์ รองเท้า ยาง ยางซีล ประเก็น และสายพานลำเลียง เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีการนำยางคาร์บอกซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน (carboxylated styrene butadiene rubber, XSBR) ซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติต้านทานน้ำมันและการยึดติดที่ดีมาผสมกับยางธรรมชาติ ถึงแม้ยางทั้งสองชนิดนี้มีความไม่เข้ากันทางเทอร์โมไดนามิกส์ เนื่องจากความแตกต่างของสภาพมีขั้ว หากแต่การผสมในภาวะที่เป็นเลเท็กซ์จะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ทางกายภาพโดยไม่เกิดการแยกเฟสหรือตกตะกอน อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่ายางแห้ง เพราะขึ้นรูปโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการแมสตีเคชัน (mastication) อย่างไรก็ตาม การผลิตผลิตภัณฑ์ยางในทางอุตสาหกรรมยังจำเป็นต้องมีการใส่สารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน

การใช้สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรกำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยาง สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ ซิลิกา ไททาเนียมไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรจะมีพื้นที่ผิวสูง จึงมีความสามารถในการเสริมแรงที่ดี อีกทั้งยังสามารถใช้ในปริมาณน้อยกว่าสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดไมโครเมตรอีกด้วย (ไม่เกิน 10 ส่วน โดยน้ำหนักของยาง 100 ส่วน) ดังนั้น จึงไม่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้

งานวิจัยนี้พิจารณาการใช้สารตัวเติมที่มีขนาดนาโนเมตรชนิดคาร์บอนแบล็ก คาร์บอนนาโนทิวบ์ และนาโนซิลิกา อย่างไรก็ตาม การใช้นาโนซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร

ย่อมจะมีพื้นที่ผิวที่สูงมาก และมีผลทำให้อนุภาคของนาโนซิลิกาเหล่านี้จับตัวเป็นกลุ่มก้อนได้ง่าย ส่งผลให้การกระจายตัวในเนื้อเยื่อทำได้ยาก จึงทำให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงลดลง แนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าว ได้แก่ การห่อหุ้มอนุภาคของนาโนซิลิกาด้วยชั้นบางๆ ของพอลิเมอร์บางชนิด ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาคริเลต และพอลิสไตรีน เป็นต้น โดยอนุภาคของนาโนซิลิกาที่ถูกห่อหุ้มยังคงมีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรเช่นเดิม นอกจากนี้ การห่อหุ้มนาโนซิลิกาด้วย พอลิเมอร์นอกจากช่วยเพิ่มการกระจายตัวและความสามารถในการเข้าร่วมตัวกับยางธรรมชาติแล้วยังเพิ่มเสถียรภาพของนาโนซิลิกา และลดความเป็นพิษของสารอนินทรีย์อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้ทดลองเตรียมนาโนเลทเท็กซ์ของพอลิสไตรีน พอลิเมทิลเมทาคริเลต นาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน (differential microemulsion polymerization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่น้อยกว่ากระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันที่ใช้กันทั่วไป เพราะการใช้สารลดแรงตึงผิวปริมาณมากมีผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวมีราคาแพง อีกทั้งยังต้องกำจัดสารลดแรงตึงผิวหลังปฏิกิริยาสิ้นสุดลง นอกจากนี้ ยังให้ร้อยละผลได้ของพอลิเมอร์มากกว่าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม ก่อนห่อหุ้มอนุภาคของนาโนซิลิกาด้วยพอลิสไตรีนหรือพอลิเมทิลเมทาคริเลต จำเป็นต้องดัดแปรผิวของนาโนซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลิโคน (silane coupling agent) เพื่อให้หมู่ซิลานอลบนอนุภาคของนาโนซิลิกาทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบซิลิโคนผ่านพันธะโควาเลนต์ของ Si-O ทำให้เกิดพันธะคู่บนผิวของนาโนซิลิกาและสามารถเป็นโคมอนอเมอร์ที่เข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์เกิดเป็นพอลิเมอร์กราฟต์อยู่บนอนุภาคของนาโนซิลิกา แล้วจึงนำนาโนคอมพอสิตเลทเท็กซ์ที่เตรียมได้ไปผสมกับน้ำยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน และยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงสมบัติของยางผสมด้วยการทดสอบและวิเคราะห์สมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติเชิงกลพลวัต สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่เตรียมได้

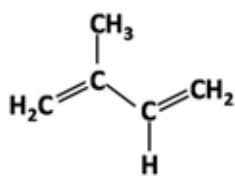
ซึ่งงานวิจัยนี้จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่เตรียมจากน้ำยางผสม เช่น ถุงมือยาง ตุ๊กตายาง และยางรองใต้พรม เป็นต้น มีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น และช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติซึ่งเป็นทรัพยากรที่สำคัญของประเทศไทยได้อีกด้วย

บทที่ 2

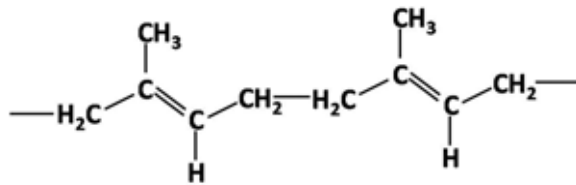
วารสารปริทัศน์

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) [1, 2]

ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศไทย ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติเป็นอันดับหนึ่งของโลก ยางธรรมชาติที่ถูกนำไปใช้ในทางการค้าได้มาจากต้นยางพารา ซึ่งมีชื่อเรียกทางพฤกษศาสตร์ว่า '*Hevea Brasiliensis*' ประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (isoprene) ต่อกันแบบหัวต่อหาง (head-to-tail) โดยมีโครงสร้างเกือบทั้งหมด (ประมาณ 97%) เป็น *cis-1,4* ดังนั้น ชื่อเคมีที่แท้จริง คือ *cis-1,4 polyisoprene* (รูปที่ 2.1) จึงทำให้มีความสม่ำเสมอของโครงสร้างสูง ซึ่งเมื่อนำไปดึงให้ยืดออกจะสามารถเกิดผลึก (strain crystallization) ทำให้ความทนแรงดึงของยางดิบ (green tensile strength) มีค่าสูง โดยยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000-400,000 มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก และมีความหนาแน่น 0.93 กรัม/มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -70 องศาเซลเซียส



Isoprene



cis-1,4-polyisoprene

รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของไอโซพรีน และ *cis-1,4 polyisoprene*

2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex) [3, 4]

น้ำยางที่กรีตได้จากต้นยางพารามีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำนม มีความหนาแน่นประมาณ 0.975-0.980 กรัม/มิลลิลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 6.5-7.0 น้ำยางธรรมชาติเป็นสารแขวนลอยชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดต่างๆ กัน ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมครอน แขนงลอยอย่างกระจัดกระจายอยู่ในของเหลวที่เรียกว่า "เซรัม" (serum) อนุภาคเหล่านี้มีประจุเป็นลบซึ่งผลักกันตลอดเวลาจึงทำให้อนุภาคเหล่านี้แขวนลอยและคงสภาพเป็นยางเหลวอยู่ได้นานจนกว่าจะมีสภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ มารบกวนจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ ยังมีสารที่ไม่ใช่ยาง (non-rubber substances) ได้แก่ โปรตีน

ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และอนุมูลของโลหะอื่นๆ เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก สังกะสี ทองแดง และแมงกานีส เป็นต้น ปริมาณเนื้อยางในน้ำยางธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงร้อยละ 30–40 ขึ้นกับชนิดของต้นยาง วิธีการกรีดยาง คุณภาพของดินที่ใช้ปลูก สภาพภูมิอากาศ และภูมิประเทศที่ใช้ปลูกยาง เป็นต้น เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติมีเนื้อยางเพียงร้อยละ 30–40 นอกนั้นเป็นน้ำ และสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง จึงมีการนำน้ำยางธรรมชาติไปใช้ประโยชน์โดยตรงน้อยมาก เนื่องจากมีปริมาณน้ำสูง และไม่สามารถเก็บรักษาน้ำยางสดเอาไว้ได้นานเพราะเกิดการเน่าเสีย เนื่องจากเชื้อราและแบคทีเรีย และจับตัวเป็นก้อนก่อนส่งถึงโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนสิ้นเปลืองค่าขนส่งน้ำยางจากแหล่งต้นยางไปยังโรงงาน ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป จึงจำเป็นต้องแปลงสภาพน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางข้นเสียก่อน

2.1.2 น้ำยางข้น (Concentrated latex)

น้ำยางข้น หมายถึง น้ำยางที่ได้ผ่านกระบวนการกำจัดน้ำออกไปบางส่วน เพื่อให้มีเนื้อยางเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 ของน้ำหนักน้ำยางข้น เพื่อให้ง่ายต่อการเก็บรักษาและขนส่ง อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ใช้น้ำยางข้นเป็นวัตถุดิบจะมีเสถียรภาพมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ใช้น้ำยางข้นเป็นวัตถุดิบ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม (dipping) แบบหล่อ (casting) แบบพ่น (spraying) แบบใช้แม่แบบ (molding) และแบบทา (spreading) เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ได้แก่ ตุ๊กตาที่กลวง กาว สีทา ถู่มือ ลูกโป่ง ยางพองน้ำ และที่นอน เป็นต้น

2.2 ข้อดีและข้อเสียของน้ำยางข้น [5, 6]

ข้อดีของน้ำยางข้น

- ผลิตภัณฑ์บางอย่างไม่สามารถขึ้นรูปจากยางแห้ง แต่จะขึ้นรูปได้ง่ายและสะดวกเมื่อใช้น้ำยางข้น เช่น ผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตด้วยเทคนิคการจุ่ม (dipping process)
- น้ำยางข้นเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ จึงสามารถผสมกับสารตัวเติมของยางได้ง่าย สามารถใช้สารตัวเติมในรูปของเหลว และใช้พลังงานในการผสมต่ำ โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องผสมราคาแพงที่มีขนาดใหญ่เหมือนการขึ้นรูปยางแห้ง
- การผลิตยางผสมในภาวะที่เป็นเลเท็กซ์จะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ทางกายภาพ โดยไม่เกิดการแยกเฟสหรือตกตะกอน
- ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางข้นมีสมบัติเชิงกลที่ดี เนื่องจากน้ำยางข้นมีความหนืดต่ำใช้เวลาในการผลิตน้อย เพราะไม่ต้องทำการบดย่อย (mastication) ให้น้ำยางนิ่มตัวก่อนทำการผสม

เหมือนยางแห้ง ซึ่งการบดย่อยมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางขาดออก หรือน้ำหนักโมเลกุลลดลง ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่ำลงซึ่งน้ำหนักโมเลกุลของยางมีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติเชิงกล กล่าวคือ ยางในน้ำยางข้นมีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงเกิดการพันกันของสายโซ่ (chain entanglement) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรง การยืดตัว ณ จุดขาด เป็นต้น

- มีความปลอดภัยในการผลิตมากกว่าใช้ยางแห้ง เนื่องจากน้ำยางข้นมีน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงไม่ติดไฟได้ง่าย

ข้อเสียของน้ำยางข้น

- น้ำยางข้นไม่เหมาะกับการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นมาก เนื่องจากในน้ำยางจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก (มีน้ำประมาณร้อยละ 40 และมีเนื้อยางร้อยละ 60) ถ้าทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา จะหดตัวมากเมื่อยางแห้ง ทำให้เสียรูปหรือไม่คงขนาด

- กระบวนการผลิตจากน้ำยางข้นต้องดูแลการผลิตที่พิถีพิถันมากกว่ายางแห้ง เนื่องจากน้ำยางข้นมีเสถียรภาพต่ำ อาจเกิดการจับตัวแยกวัฏภาค หรือตกตะกอนเสียสภาพได้ถ้าขาดการควบคุมการผลิต เช่น สูตรผสม ลักษณะของสารตัวเติม และความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นต้น

2.3 การวัลคาไนเซชันของยาง (Rubber vulcanization) [7, 8]

การวัลคาไนเซชันของยาง หมายถึง กระบวนการเปลี่ยนยางซึ่งมีสภาพไม่คงตัวให้เป็นยางที่มีสภาพคงตัว โดยใช้สารเคมีต่างๆ ที่เรียกว่า “สารวัลคาไนซ์” (vulcanizing agent) ในการทำให้เกิดโครงสร้างเชื่อมขวาง (crosslink) ระหว่างโมเลกุลของยางตรงตำแหน่งที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา แม้ว่าจะประกอบด้วยสารเพียงร้อยละ 0.5–5 โดยน้ำหนักของยางผสม แต่จะมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์และต่อต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ ยังมีระบบการวัลคาไนซ์แบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่กำมะถันหรือใช้สารที่สลายตัวให้กำมะถันน้อย ได้แก่ ยูรีเทน (urethane) เปอร์ออกไซด์ (peroxide) โลหะออกไซด์ (metal oxide) และเรซิน เป็นต้น การทำให้ยางคงรูปจะทำให้ยางมีสมบัติบางอย่างเปลี่ยนแปลงไป คือ

1. โครงสร้างของยางเปลี่ยนจากแบบเชิงเส้นเป็นแบบร่างแห โดยการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุล ทำให้ยางมีความเป็นอีลาสติกสูงขึ้น
2. โครงสร้างแบบร่างแหมีผลทำให้ยางธรรมชาติไม่หลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อนไม่แข็งตัวเมื่อได้รับความเย็น ความสามารถในการละลายลดลง อาจเพียงบวมตัว (swell) เท่านั้น

3. ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ เช่น ความทนแรงดึง (tensile strength) ความต้านทานการสึกกร่อน (wear resistance) ความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance) ความแข็ง (hardness) และความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility)

4. มีความทนทานต่อความร้อน และแสงเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำที่กว้างมากขึ้น อีกทั้งป้องกันแก๊สซึมผ่านได้ดีขึ้น

2.3.1 การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน (Sulphur vulcanization)

กำมะถันเป็นสารชนิดแรกที่ใช้ในเชิงการค้าเพื่อทำให้ยางคงรูป โดยเริ่มจากการใช้กำมะถันและความร้อนเท่านั้น ซึ่งปฏิกิริยาเกิดได้ช้ามากในการทำให้ยางคงตัว ต้องใช้เวลาถึง 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ยิ่งไปกว่านั้นยังต้องใช้กำมะถันเป็นจำนวนมากถึง 8 ส่วน โดยน้ำหนักต่อยาง 100 ส่วน (parts by weight per hundred of rubber, phr) ซึ่งส่วนใหญ่จะสูญเสียไปโดยกำมะถันจะมาเชื่อมต่อกันเองเป็นสายยาว หรือออกมาในรูปของกำมะถันเสรี (free sulphur) อยู่ในเนื้อยางหรือซึมมาอยู่บนผิวของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้จึงต้องใช้สารเร่งวัลคาไนซ์ (accelerator) ร่วมกับสารวัลคาไนซ์เพื่อลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ โดยทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และลดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาลง รวมทั้งลดปริมาณการใช้กำมะถันให้น้อยลง เพื่อลดการซึมของกำมะถันมาบนผิวผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ ยังต้องเติมสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ (activator) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งวัลคาไนซ์อีกด้วย ปัจจุบันปริมาณการใช้สารกำมะถันในระบบวัลคาไนซ์เริ่มลดลงและเพิ่มปริมาณสารเร่งวัลคาไนซ์ หรือการใช้ระบบของสารประกอบที่สลายตัวให้กำมะถัน (sulphur donor) เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านเสถียรภาพทางความร้อนและต่อการออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์ การเติมโลหะออกไซด์ (ซิงก์ออกไซด์ 5 phr) กรดไขมันและสารตัวเร่งอินทรีย์ (0.5–2.0 phr) สามารถทำให้ยางวัลคาไนซ์ภายในเวลาอันสั้น (2–5 นาที) และการใช้สารที่สลายตัวให้กำมะถัน (2–3 phr) สามารถทำให้ยางที่วัลคาไนซ์แล้วมีสมบัติทางกายภาพและการใช้งานดีขึ้น

ข้อดีของกำมะถัน

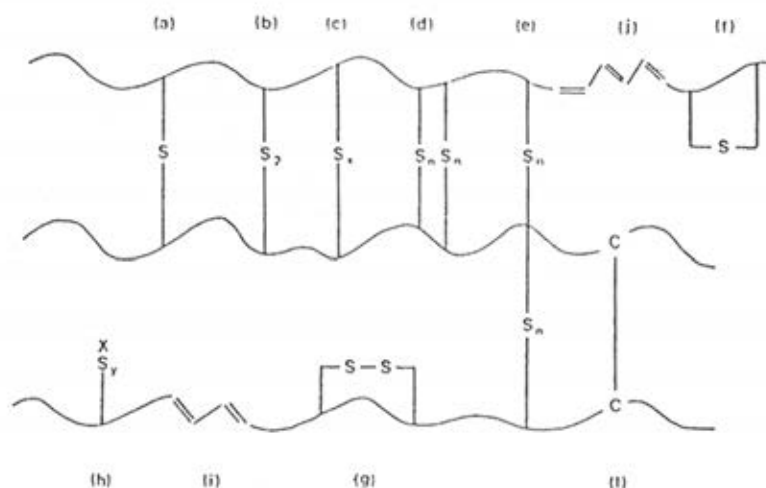
1. มีราคาถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ
2. สามารถกระจายตัวได้ดีในยาง
3. ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
4. มีผลโดยตรงต่อสารเร่งวัลคาไนซ์ จึงเป็นตัวควบคุมอัตราการคงรูป

ข้อเสียของกำมะถัน

1. อาจเกิดการแยกตัวของกำมะถันมาอยู่ที่ผิวหน้าของยาง
2. มีการติดสีของซัลไฟด์
3. ใช้ได้เฉพาะยางไม่อิ่มตัว

2.3.2 โครงสร้างการเชื่อมขวางโมเลกุล (Molecular crosslinking structure)

สมบัติของยางที่วัลคาไนซ์แล้วขึ้นกับจำนวนหรือความหนาแน่นและรูปแบบของการเชื่อมขวาง ซึ่งการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยกำมะถันมีรูปแบบของการเชื่อมขวางแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเชื่อมขวางโมเลกุลของยางด้วยกำมะถันรูปแบบต่างๆ [7]

โครงสร้าง (a)–(e) เป็นโครงสร้างที่ส่งเสริมสมบัติต่างๆ ของยางที่วัลคาไนซ์แล้ว ส่วนโครงสร้าง (f)–(h) เป็นรูปแบบของการดัดแปรสายโมเลกุลหลักของยาง (main-chain modification) ซึ่งเชื่อว่าเป็นส่วนที่มีผลต่อการเชื่อมสภาพเช่นเดียวกับโครงสร้าง (i) และ (j) (conjugated dienes and trienes) การเลือกชนิดและปริมาณของสารเร่งวัลคาไนซ์และกำมะถัน จะมีผลต่อการใช้กำมะถันอย่างมีประสิทธิภาพในปฏิกิริยาทำให้ยางคงรูป ระบบวัลคาไนเซชันที่มีประสิทธิภาพ (efficient vulcanization, EV) ควรมีค่า x ประมาณ 1 หรือ 2 และไม่มีโครงสร้างเป็นวง (cyclic) หรือน้อยมาก ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (thermal aging) แต่ถ้าเป็นระบบวัลคาไนเซชันที่ไม่มีประสิทธิภาพ เช่น ระบบที่มีปริมาณกำมะถันมากกว่าสารเร่งวัลคาไนซ์ ที่เรียกว่า 'conventional vulcanization' (CV)

x อาจมีค่าสูงถึง 8 และมีโครงสร้างเป็นวงเกิดขึ้นมาก ซึ่งส่งผลให้ยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลลดลง และการทนต่อความร้อนไม่ดี ส่วนยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ semi-EV (มีส่วนผสมของซัลเฟอร์และสารเร่งวัลคาไนซ์ในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน) จะมีสมบัติทนทานการล้าที่ดีทั้งก่อนและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อน

2.4 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [2]

ความทนแรงดึง (tensile strength): ยางธรรมชาติเป็นสารประกอบของไอโซพรีนมาต่อกันอย่างเป็นระเบียบ โมเลกุลจึงมีความเป็นระเบียบสูง และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางธรรมชาติแตกหักได้ง่ายเมื่อทำการยืด ผลึกที่เกิดขึ้นนี้เป็นตัวเสริมความแข็งแรงของยาง

ความทนแรงฉีกขาด (tear strength): เนื่องจากการแตกหักของยางธรรมชาติ จึงทำให้ยางธรรมชาติมีความทนแรงฉีกขาดได้สูงมาก โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง เช่นการทำกระเป๋าน้ำร้อน จำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติเนื่องจากกระบวนการขึ้นรูปกระเป๋าน้ำร้อนจำเป็นต้องทำการยืดยางออกจากแกนกลางในขณะที่แกะออกจากแม่แบบที่ร้อน

ความยืดหยุ่น (elasticity): ความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นของยางธรรมชาติ โดยยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งเมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะคืนกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

ความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance): ยางธรรมชาติมีความต้านทานการขัดถูได้ดีปานกลาง (น้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย) อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์อื่นๆ พบว่ายางธรรมชาติมีความต้านทานการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่ดีมาก

ความเหนียวติดกัน (tack): ยางธรรมชาติที่ยังไม่คงรูป มีสมบัติความเหนียวติดกันเองดีเยี่ยม ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

ความคงรูปจากการกดอัด (compression set): ยางธรรมชาติมีสมบัติความคงรูปจากการกดอัดค่อนข้างต่ำ ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงปานกลาง ที่อุณหภูมิต่ำเกิดการแตกหักทำให้ยางมีการคงรูปจากการกดอัดสูง ขณะที่อุณหภูมิสูงยางมีการคงรูปจากการกดอัดต่ำ เนื่องจากยางจะเกิดการเสื่อมสภาพได้

สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties): ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี เนื่องจากยางมีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความต้านทานการล้าตัว (fatigue resistance) สูงมาก

การกระดอน (rebound resilience): ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระดอนสูง (สูงกว่ายางชนิดอื่นๆ ทั้งหมด ยกเว้นยางบิวทาไดอีน) และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะสูญเสียพลังงานความร้อนน้อย (มี hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต จึงเหมาะที่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางรถบรรทุก หรือยางล้อเครื่องบิน ซึ่งต้องรับงานหนักเกิดความร้อนสูงได้ง่ายถ้ายางไม่ดีพออาจเกิดการระเบิดได้

ความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility): ยางธรรมชาติรักษาสสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งยางที่มีสมบัติดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียง 2 ชนิด คือ ยางบิวทาไดอีน และยางซิลิโคน

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation): ยางธรรมชาติมีสภาพต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm เหมาะที่จะใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

ความต้านทานของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance): ยางธรรมชาติสามารถละลายในตัวทำละลายไม่มีขั้ว เช่น โทลูอีน เบนซีน และเฮกซัน เป็นต้น เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการทำให้ยางเกิดการคงรูปจะลดการละลายในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วลงให้น้อยลง เนื่องจากการเชื่อมขวางโมเลกุลเกิดโครงสร้างร่างแห โดยจะบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านี้ ซึ่งมีผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลง แต่ยางธรรมชาติมีความต้านทานของเหลวที่มีขั้ว เช่น แอซีโตน และแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ ยังทนกรดและด่างเจือจางได้ดี หากแต่ไม่ทนกรดไนตริก และกรดกำมะถันเข้มข้น

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (ageing properties): เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ยางว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยมีแสงหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ ยางธรรมชาติไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกดึงยืดและได้รับโอโซนเป็นเวลานานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่พื้นผิวในทิศตั้งฉากกับทิศทางการยืดตัวของยาง ดังนั้น ในระหว่างการผลิตจึงต้องเติมสารบางชนิด ได้แก่ สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants) และไข (wax) ลงไปเพื่อยืดอายุการใช้งานของยางธรรมชาติ

อุณหภูมิการใช้งาน (service temperature): ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -55 ถึง 70 องศาเซลเซียส แต่หากเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆ ยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งทำให้ยางแข็งขึ้นและสูญเสียความยืดหยุ่นหรือถ้าใช้งานที่อุณหภูมิสูงเกินไป สมบัติเชิงกลจะลดลงเนื่องจากความร้อนทำให้ยางเสื่อมสภาพ และถ้าออกสูตรยางผสมสารเคมีที่เหมาะสม (ใส่สารป้องกันการเสื่อมสภาพ) อาจนำไปใช้งานได้อย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงถึง 90 องศาเซลเซียสหรืออาจสูงถึง 100 องศาเซลเซียสในกรณีที่ยางได้รับอุณหภูมิสูงเป็นช่วงๆ เท่านั้น

2.5 การใช้งานของยางธรรมชาติ [2]

ยางธรรมชาติสามารถนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมาย เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลและเชิงกลพลวัตที่ดี อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติมีข้อด้อย คือ ไม่ทนความร้อน สภาพอากาศ น้ำมัน และสารเคมีอื่นๆ แต่ผลิตภัณฑ์บางประเภทยังใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเนื่องจาก

1. ยางธรรมชาติมีความทนแรงดึงดีเยี่ยม ถึงแม้ไม่ได้ใส่สารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะใช้ทำผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถูมือยาง ถูยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น

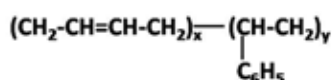
2. ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง และมีความร้อนสะสมที่เกิดขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะใช้ทำผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน ฝายยาง ยางกันกระแทกท่าเรือ หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น

3. ยางธรรมชาติมีความทนแรงฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิสูง จึงเหมาะสำหรับทำกระเปาะน้ำร้อนยาง เนื่องจากการแกะชิ้นงานออกจากแม่แบบในระหว่างกระบวนการผลิตต้องดึงชิ้นงานออกจากแม่แบบในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องมีความทนแรงฉีกขาดขณะร้อนสูง

2.6 ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) [8-10]

ยาง SBR เป็นยางสังเคราะห์ที่มีความสำคัญและถูกนำไปใช้งานมากกว่ายางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ และจัดเป็น “general purpose rubber” เพราะสามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในการทำยางรถยนต์ ยาง SBR เป็นโคพอลิเมอร์ของบิวทาไดอีนและสไตรีน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ปริมาณสไตรีนอยู่ในช่วงร้อยละ 23-40) โดยมีมอนอเมอร์ทั้งสองอยู่คละกันอย่างไม่เป็น

ระเบียบ (random copolymer) ทำให้มีลักษณะคล้ายยาง (rubberlike) และจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้าง จึงไม่สามารถเกิดผลึกได้เมื่อนำไปดึงให้ยืดออก ดังนั้น ความทนแรงดึงของยาง SBR จะไม่สูงมาก จึงจำเป็นต้องใส่สารเสริมแรง เช่น คาร์บอนแบล็ก หรือซิลิกา เข้าไปเพิ่มความทนแรงดึง

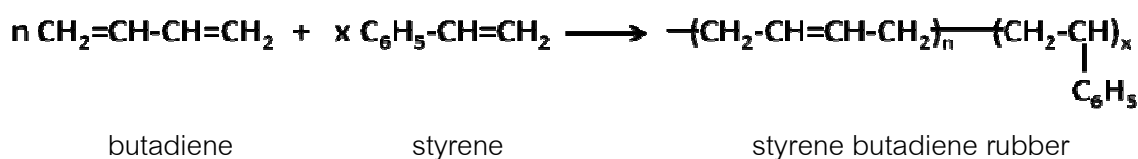


รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของยางสไตรีนบิวทาไดอิน

2.6.1 กระบวนการผลิตน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอิน

การผลิตน้ำยาง SBR กระทำโดยนำสไตรีนมอนอเมอร์ (styrene monomer) มาทำปฏิกิริยากับบิวทาไดอินมอนอเมอร์ (butadiene monomer) ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน ได้เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีนและบิวทาไดอิน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เริ่มแรกเป็นการผลิต SBR ที่ใช้คุณภาพสูง สมบัติที่ได้ต่ำกว่ายางธรรมชาติจึงมีการพัฒนาการผลิต SBR โดยใช้คุณภาพต่ำในการสังเคราะห์ (ประมาณ 5 องศาเซลเซียส) ทำให้ได้ยาง SBR แบบเย็น (cold rubber) ซึ่งมีสมบัติดีกว่ายาง SBR ที่เตรียมจากการใช้คุณภาพสูง ยาง SBR สามารถแบ่งเกรดจากกระบวนการผลิตได้ดังนี้

1. SBR 1000: ยางสไตรีนบิวทาไดอินแบบ (อิมัลชัน) ร้อน
2. SBR 1100: ยางสไตรีนบิวทาไดอินแบบ (อิมัลชัน) ร้อน ที่มีการเติมน้ำมันและคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบทช์ในปริมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 14 phr
3. SBR 1500: ยางสไตรีนบิวทาไดอินแบบ (อิมัลชัน) เย็น
4. SBR 1600: ยางสไตรีนบิวทาไดอินแบบ (อิมัลชัน) เย็น ที่มีการเติมน้ำมันและคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบทช์ในปริมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 14 phr
5. SBR 1700: ยางสไตรีนบิวทาไดอินแบบ (อิมัลชัน) เย็นที่มีน้ำมันมาสเตอร์แบทช์
6. SBR 1800: ยางสไตรีนบิวทาไดอินแบบ (อิมัลชัน) เย็น ที่มีการเติมน้ำมันและคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบทช์ในปริมาณมากกว่า 14 phr
7. SBR 1900 ยางสไตรีนบิวทาไดอินแบบเรซิน (อิมัลชัน) มาสเตอร์แบทช์
8. SBR 2000 ยางสไตรีนบิวทาไดอินเลเท็กซ์แบบ (อิมัลชัน) ร้อน
9. SBR 2100 ยางสไตรีนบิวทาไดอินเลเท็กซ์แบบ (อิมัลชัน) เย็น



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR)

2.6.2 สมบัติทั่วไปของยางสไตรีนบิวทาไดอีน [11]

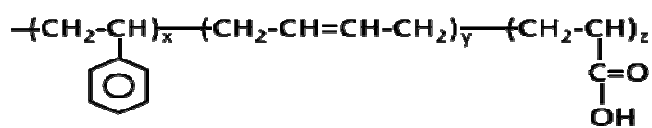
ยาง SBR เป็นยางที่มีความทนแรงดึง และความทนแรงฉีกขาดต่ำ จึงจำเป็นต้องใส่สารเสริมแรงต่างๆ เช่น คาร์บอนแบล็ก หรือซิลิกา เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่างๆ ให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม ยาง SBR มีความต้านทานการขัดถูสูงกว่ายางธรรมชาติ จึงนิยมใช้ทำส่วนที่เป็นดอกยางของยางรถยนต์ขนาดเล็ก เนื่องจากยาง SBR มีพฤติกรรมย้อนรอย (hysteresis) สูง ซึ่งสามารถเกิดความร้อนสะสมได้สูง จึงไม่เหมาะกับการใช้สำหรับยางรถบรรทุก เนื่องจากมีดอกยางที่หนากว่า ทำให้ไม่สามารถระบายความร้อนได้ทัน ยางอาจเกิดการระเบิดได้ อย่างไรก็ตาม ยาง SBR มีสมบัติในการเหนียวติดกันต่ำ ดังนั้น เมื่อต้องการประกอบยางเข้าด้วยกันจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติทำหน้าที่เสมือนกาวทาลงบนผิวของยาง SBR เพื่อให้ยางติดกันได้ นอกจากนี้ ยาง SBR ยังมีสมบัติความทนทานต่อสารเคมี แสงแดด และโอโซนและสมบัติทางไฟฟ้าใกล้เคียงยางธรรมชาติ อุณหภูมิการใช้งานอยู่ระหว่าง -60 ถึง 70 องศาเซลเซียส

2.6.3 การใช้งานของน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน

การใช้งานของน้ำยาง SBR มีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพคล้ายยางธรรมชาติ และสามารถทนต่อการสึกกร่อนจากการขัดถูสูง การใช้งานของน้ำยาง SBR ได้แก่ แผ่นยางรองพรม ฟองน้ำยาง ถุงมือทางการแพทย์ ถุงยางอนามัย เป็นต้น

2.7 ยางคาร์บอกซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน (Carboxylated styrene butadiene rubber latex, XSBR) [12-14]

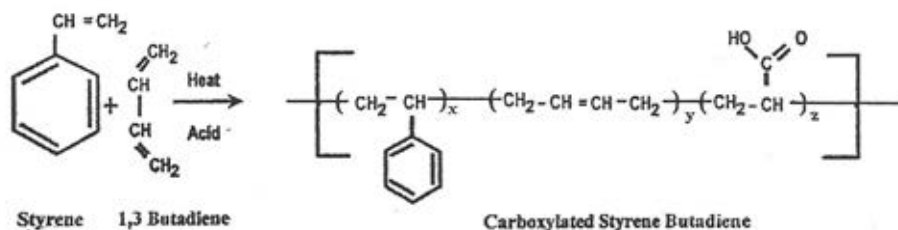
ยาง XSBR เป็นยางสังเคราะห์ที่มีลักษณะเฉพาะในการใช้งาน โดยทำการดัดแปรโครงสร้างของยาง SBR ให้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว โดยการเติมกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) ลงในโคพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีนและบิวทาไดอีนเพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชัน คือ หมู่คาร์บอกซีเลต (carboxylated group, -COOH) ในโครงสร้างของยาง ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอิน

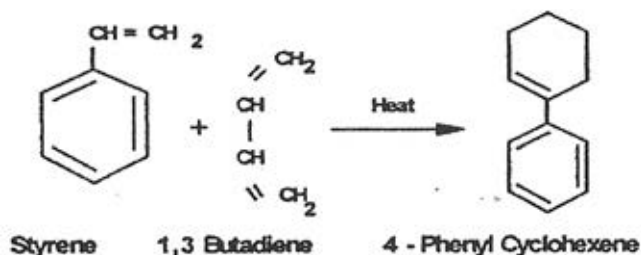
2.7.1 กระบวนการผลิตน้ำยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอิน

ยาง XSBR สังเคราะห์ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสไตรีนมอนอเมอร์และบิวทาไดอินมอนอเมอร์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้ได้โคพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีนและบิวทาไดอิน ซึ่งในระหว่างดำเนินการปฏิกิริยาจะทำการเติมกรดคาร์บอซิลิกเพื่อให้เกิดหมู่คาร์บอซีเลต พร้อมทั้งเติมสารต่างๆ เพื่อช่วยในการดำเนินการปฏิกิริยา ดังนี้ สารลดแรงตึงผิว (surfactant) เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพของพอลิเมอร์เลเท็กซ์ สารดัดแปร (modifier) เพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุล และตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysts) เพื่อให้เกิดการเริ่มต้นและการดำเนินปฏิกิริยาไปด้วยดี ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งอาจเป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบแบทช์ (batch) คือ การเติมมอนอเมอร์ลงในปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง (continuous monomer addition) หรือการเกิดปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์แบบต่อเนื่อง (continuous polymerization)



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์คาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอิน [13]

ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะมีปฏิกิริยา Diels-Alder เกิดขึ้นควบคู่กัน จะได้ผลิตภัณฑ์คือ 4-phenyl cyclohexene ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งควรควบคุมให้เกิดน้อยกว่า 50 ส่วนในร้อยส่วนของพอลิเมอร์อิมัลชัน (ppm) หรือร้อยละ 0.1 ของพอลิเมอร์อิมัลชัน



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยา Diel-Alder [13]

หลังจากที่มีการป้องกันการเกิดและกำจัด 4-phenyl cyclohexane ออกจากปฏิกิริยาในขั้นตอนสุดท้ายจะเติมสารเคมีอื่นๆ ลงไปเพื่อให้เลเท็กซ์มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน เรียกกระบวนการนี้ว่า “post-adds” ซึ่งสารเคมีที่เติมได้แก่ สารทำให้เป็นกลาง (neutralizing agent) สารแอนติออกซิแดนต์ (antioxidant) สารช่วยในการกระจายตัว (dispersing agent) และสารก่อผลึก (nucleating agent) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีการระบุถึงสมบัติทางกายภาพต่างๆ เช่น ปริมาณของแข็ง (solid content) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความหนืด (viscosity) และขนาดอนุภาค (particle size) เป็นต้น

2.7.2 การใช้งานของน้ำยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีน [7,15]

น้ำยาง XSBR ถูกสังเคราะห์เพื่อให้สามารถใช้งานได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น โดยการเพิ่มหมู่คาร์บอซิลเลตเพื่อเพิ่มความมีขี้วให้กับยาง ซึ่งทำให้ง่ายมีความต้านทานสารเคมี ความร้อน และแสงยูวีได้ดี น้ำยาง XSBR ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมพรม กระดาษ รองเท้า และหนังเทียม เป็นต้น

อุตสาหกรรมพรม: มีการนำน้ำยาง XSBR ไปใช้เป็นวัสดุเคลือบหลังพรม โดยสมบัติของน้ำยาง XSBR ที่ดีในการทำวัสดุเคลือบหลังพรมควรมีความหนืดที่สูง มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช้า และควรมีแรงดึงดูระหว่างผิวหน้าต่ำ ซึ่งในการใช้งานมีการเติมสารตัวเติมๆ เช่น น้ำแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และสารลดแรงดึงผิว เป็นต้น สามารถใช้ได้ทั้งพรมอัด (needle punch) พรมขนห่วง (loop carpet) และพรมขนสัตว์ (woolen carpet)

อุตสาหกรรมกระดาษ: มีการใช้น้ำยาง XSBR เคลือบกระดาษ เพื่อเพิ่มความขาว (whiteness) ความเงางาม (glossiness) และความราบเรียบ (smoothness) โดยใช้ร่วมกับสารเคลือบผิวต่างๆ ซึ่งน้ำยาง XSBR จะถูกเคลือบเป็นฟิล์มที่บางและแข็งแรง มีการยึดติดกับกระดาษได้ดี สามารถนำไปใช้กับกระดาษอาร์ต (art paper) บอร์ดมะนิลา (Manila board) และกระดาษเงา (glazed paper)

อุตสาหกรรมรองเท้า: มีการใช้น้ำยาง XSBR เป็นกาวทาภายใน เนื่องจากเส้นใยสามารถดูดซับน้ำยาง XSBR ได้ดี เพื่อช่วยเพิ่มการเชื่อมติดกันของวัสดุ สมบัติความทนทานต่อการลอก และ ความคงทนของพื้นผิวต่อการใช้งานของรองเท้า

อุตสาหกรรมหนังเทียม: มีการใช้น้ำยาง XSBR ในการผลิตหนังเทียมที่สามารถเกิดการเชื่อมขวางได้ด้วยตัวเอง (self-crosslinking) หรือผสมกับน้ำยางธรรมชาติ (natural rubber) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและความสวยงามให้กับหนังเทียม

2.8 ยางผสม (Rubber blends) [6,16-18]

ยางผสม หมายถึง การนำยางสองชนิดขึ้นไปมาผสมรวมกันเพื่อให้ได้สมบัติตามต้องการ โดยปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตยางผสมกำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากสาเหตุสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุเดิม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการขึ้นรูปให้ง่ายขึ้น หรือเพื่อลดต้นทุน ซึ่งการเลือกยางผสมจะพิจารณาจากความสามารถในการเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกันของยางผสม ปัจจุบันได้มีการนำยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน มาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ รองเท้ายาง ยางซีล ประเก็น และสายพานลำเลียง เป็นต้น

โดยงานวิจัยของ Findik และคณะ [17] ได้แสดงถึงความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน เนื่องจากลักษณะโครงสร้างทางเคมี สมบัติความไม่มีขั้ว และความสามารถในการละลายในตัวทำละลายที่ใกล้เคียงกัน

งานวิจัยของ Popovic และคณะ [18] พบว่า การผสมยางสไตรีนบิวทาไดอีนในยางธรรมชาติ ช่วยให้ยางธรรมชาติมีความแข็ง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด และพฤติกรรมย้อนรอยเพิ่มขึ้น และการผสมยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก จะทำให้ได้สมบัติความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุด

นอกจากนี้ ปัจจุบันได้มีการนำยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนซึ่งเป็นยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติความต้านทานน้ำมันและการยึดติดที่ดีมาผสมกับยางธรรมชาติ ถึงแม้ยางทั้งสองชนิดนี้มีความไม่เข้ากันทางเทอร์โมไดนามิกส์ เนื่องจากความแตกต่างของสภาพมีขั้ว หากแต่การผสมในภาวะที่เป็นเลเท็กซ์จะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ทางกายภาพโดยไม่เกิดการแยกเฟสหรือตกตะกอน อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ได้ดีกว่ายางแห้ง เพราะขึ้นรูปโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการแมสตีเคชัน (mastication) [6]

จากงานวิจัยของ Stephen และคณะ [6] ได้ทำการผสมยางธรรมชาติและยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนในภาวะที่เป็นเลเท็กซ์ พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของยางผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ทางกายภาพของ

ยางทั้งสองชนิด นอกจากนี้ ยางสไตรีนบิวทาไดอีนและยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนสามารถทำการบ่มด้วยซัลเฟอร์ได้เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้น จึงสามารถบ่มยางผสมเหล่านี้ด้วยซัลเฟอร์ได้

อย่างไรก็ตาม การผลิตผลิตภัณฑ์ยางในทางอุตสาหกรรมยังจำเป็นต้องมีการใส่สารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน โดยสารตัวเติมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก และซิลิกา

2.9 สารตัวเติม (Fillers) [9,19]

สารตัวเติม หมายถึง สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง เช่น คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา มอนต์มอริลโลไนต์ และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น ที่ใส่ลงไปนยางเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ดังนี้

- เพื่อลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากสารเหล่านี้มีราคาถูกลงกว่ายาง
- เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง เช่น สมบัติความทนแรงดึง ความทนไฟ เป็นต้น
- เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต เช่น การช่วยควบคุมความหนาในการทำยางแผ่น
- เพื่อช่วยลดการพองตัวของยางในน้ำมัน
- เพื่อช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของยาง เช่น ป้องกันแสงไม่ให้ส่องผ่านเข้าไปในยาง

2.9.1 ชนิดของสารตัวเติม

ชนิดของสารตัวเติมสามารถแบ่งตามลักษณะพื้นฐานวิทยาได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (particulated fillers) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- สารเสริมแรง (reinforcing fillers) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น คือ มีความทนแรงดึง ความต้านทานการสึกหรอ และความทนแรงฉีกขาดสูง เป็นต้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้นจะทำให้ยางมีการกระดอนลดลง สารตัวเติมประเภทนี้ส่วนใหญ่มีอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 180-600 อังสตรอม สารเหล่านี้ ได้แก่ คาร์บอนแบล็ก และซิลิกา เป็นต้น

- สารกึ่งเสริมแรง (semi-reinforcing fillers) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของยางได้บ้าง สารตัวเติมเหล่านี้มีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และดินขาวคาโอลิน เป็นต้น

- สารช่วยลดต้นทุนการผลิต (diluent fillers) สารตัวเติมประเภทนี้ไม่เสริมประสิทธิภาพความแข็งแรงให้กับยาง มีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่ตั้งแต่ 100 อังสตรอมขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แบ็งทอลล์ และแบเรียมซัลเฟต เป็นต้น สารตัวเติมประเภทนี้จะทำให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างลดลง เช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด และความต้านทานการขีดถูแต่ปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น ความแข็ง และมอดุลัส ทำให้กระบวนการแปรรูปง่าย ลดการพองของยาง และลดต้นทุนการผลิตเพราะมีราคาถูก

2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous fillers) อาทิเช่น

- แอสเบสตอส (asbestos) เป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ ช่วยเพิ่มสมบัติในด้านความทนทานต่อเปลวไฟ หรือความร้อนของยาง

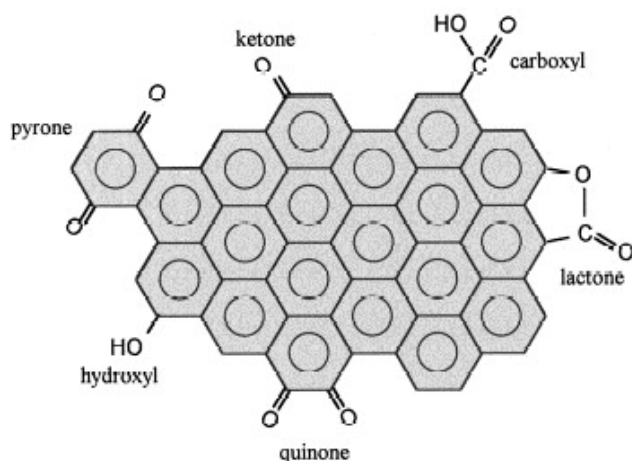
- ผงเยื่อไม้ (wood flour) ได้จากการบดไม้ให้มีขนาดเล็ก มักใช้เป็นสารตัวเติมในยางประเภทเกรดต่ำ สารตัวเติมประเภทนี้ไม่มีผลต่อการคงรูปของยาง ถ้าใช้ในปริมาณมากจะทำให้ยางแข็งขึ้น และช่วยลดอัตราการหดตัวของยาง โดยการแผ่ออกเพื่อรักษารูปร่างของยาง เช่นการใช้กับพื้นรองเท้า เป็นต้น

3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (resinous fillers)

เรซินที่ใส่เข้าไปในยางจะทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำให้ยางแข็งขึ้น มักใช้สารตัวเติมที่เป็นผง เช่น คาร์บอนแบล็ก และซิลิกา แต่สารเคมีที่เป็นผงนี้สามารถผสมเข้าไปในยางได้ในปริมาณจำกัด ถ้ามากเกินไปจะทำให้ผสมเข้ากับยางได้ยาก ยางจะแห้งและมีความร้อนเกิดขึ้นในขณะผสม จึงมีการเลือกใช้เรซินเติมลงไป ในยาง สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน ได้แก่ สไตรีนเรซิน และฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น

2.10 คาร์บอนแบล็ก (carbon black) [2, 20-24]

คาร์บอนแบล็กเป็นสารตัวเติมที่มีสีดำ องค์ประกอบทางเคมีประกอบไปด้วยคาร์บอนร้อยละ 90-99 ออกซิเจนร้อยละ 0.1-10 ไฮโดรเจนร้อยละ 0.2-1 ซัลเฟอร์และซีลีเนียมอีกประมาณเล็กน้อย ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวคาร์บอนแบล็กค่อนข้างแตกต่างกันมากเพราะพื้นผิวของคาร์บอนแบล็กประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คาร์บอนแบล็กถูกนำมาใช้เสริมแรงในยางตั้งแต่ปี ค.ศ. 1912 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นสารเสริมแรงที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยางมากที่สุด (ประมาณร้อยละ 90) นอกจากนี้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก หมึกพิมพ์ สารเคลือบผิว กระจก และอุตสาหกรรมอื่นๆ



รูปที่ 2.8 หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของคาร์บอนแบล็ก [22]

2.10.1 การสังเคราะห์อนุภาคคาร์บอนแบล็ก

คาร์บอนแบล็กเตรียมได้จากการเผาแก๊สธรรมชาติหรือน้ำมัน ที่นิยมใช้มีอยู่ 3 ชนิด

1. แชนเนลแบล็ก (channel black) เป็นคาร์บอนแบล็กที่ได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์โดยผ่านแก๊สธรรมชาติไปยังช่องเปลวไฟ (burner channel) เขม่าที่เกิดขึ้นจะไปเกาะบนฝาเหล็กด้านบน คาร์บอนแบล็กชนิดนี้มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กมาก ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9-30 นาโนเมตร แต่เนื่องจากมีความเป็นกรดสูง จึงทำให้คาร์บอนแบล็กกลุ่มนี้สามารถลดอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยา คงรูปของยางในระบบกัมมะถันได้

2. เฟอร์เนซแบล็ก (furnace black) เป็นคาร์บอนแบล็กที่ได้จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของน้ำมันที่พ่นออกมาเป็นฝอย (atomized mineral oils) ในเตาอิฐ โดยควบคุมปริมาณอากาศที่ผ่านเข้าไปในเตาให้น้อยที่สุด ซึ่งมีโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นแบบวงแหวน (highly aromatic oil) ซึ่งขนาดอนุภาคค่อนข้างเล็ก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-80 นาโนเมตร คาร์บอนแบล็กกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่นำไปใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางปัจจุบัน

3. เทอร์มอลแบล็ก (thermal black) เป็นคาร์บอนแบล็กที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง ประมาณ 1300 องศาเซลเซียส ในภาวะที่ไม่มีแก๊สธรรมชาติ ซึ่งคาร์บอนแบล็กกลุ่มนี้จะมีอนุภาคปฐมภูมิต่ออนุภาคค่อนข้างใหญ่ประมาณ 120-500 นาโนเมตร และไม่มีรูพรุนที่ผิวของอนุภาค จึงทำให้คาร์บอนแบล็กชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงต่ำ อย่างไรก็ตาม คาร์บอนแบล็กชนิดนี้สามารถช่วยในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังเพิ่มสมบัติกระดองและเชิงกลพลวัตมากกว่าคาร์บอนแบล็กชนิดเฟอร์เนซแบล็ก

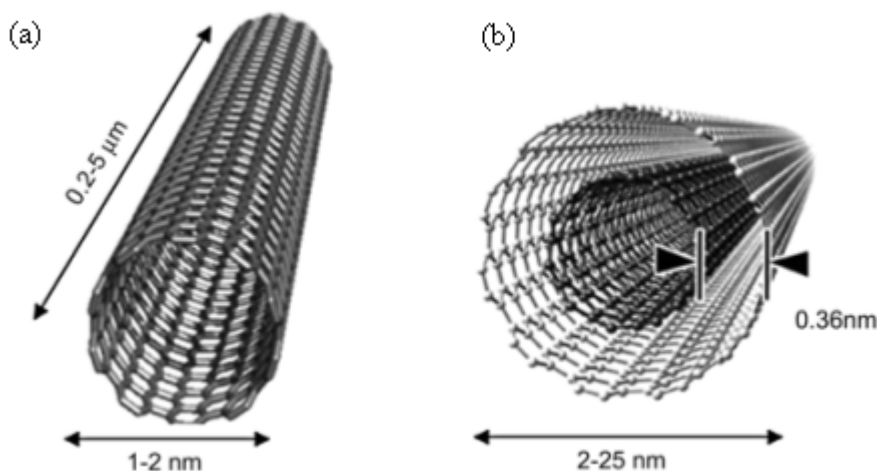
คาร์บอนแบล็กแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมี ขนาดอนุภาค พื้นที่ผิวหน้า เคมีที่ผิวหน้า ความพรุน และความแรงของสี ไม่เท่ากัน โดยขนาดอนุภาคยิ่งเล็ก ส่งผลให้คาร์บอนแบล็กยิ่งมีสีดำ

สมบัติเด่นของคาร์บอนแบล็ก คือ เป็นวัสดุกึ่งตัวนำ (semiconductor material) ดังนั้น นอกจากคาร์บอนแบล็กจะสามารถช่วยเสริมแรงให้กับยางแล้ว ยังสามารถเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าให้กับยางได้อีกด้วย โดยคาร์บอนแบล็กชนิดที่มีขนาดอนุภาคที่ละเอียด จะช่วยเพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าได้ดีกว่าคาร์บอนแบล็กชนิดที่มีขนาดอนุภาคที่หยาบ นอกจากนี้ คาร์บอนแบล็กยังมีความสามารถในการดูดกลืนรังสียูวีได้ดี ดังนั้น จึงช่วยป้องกันการสลายตัวของยางจากแสงยูวีได้

ถึงแม้สารตัวเติมที่นิยมใช้ในยาง คือ คาร์บอนแบล็ก อย่างไรก็ตาม คาร์บอนแบล็กเหมาะที่จะใช้เป็นสารตัวเติมในผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยางแข็ง แต่จะไม่มีผลในการเสริมแรงสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากน้ำยาง [23, 24] ปัจจุบันสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรกำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยาง ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตร จะมีพื้นที่ผิวสูง จึงมีความสามารถในการเสริมแรงที่ดี อีกทั้งยังสามารถใช้ในปริมาณน้อยกว่าสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดไมโครเมตรมาก (ส่วนใหญ่ใช้ไม่เกิน 10 phr) จึงทำให้นาโน-คอมพอสิตมีความหนาแน่นต่ำ และน้ำหนักเบา สารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ คาร์บอนนาโนทิวบ์ นาโนซิลิกา และมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นต้น

2.11 คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotube) [25-29]

คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นท่อกลวงที่มีขนาดเล็กมากมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.4-4.0 นาโนเมตร และยาวถึง 10 ไมโครเมตร โดยผนังของคาร์บอนนาโนทิวบ์ประกอบด้วยวงแหวนหกเหลี่ยมเชื่อมต่อกันคล้ายกับโครงสร้างของแกรไฟต์ คาร์บอนนาโนทิวบ์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังชั้นเดียวหรือผนังเดี่ยว (single wall carbon nanotubes, SWCNTs) และคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้นหรือผนังซ้อน (multi-wall carbon nanotubes, MWCNTs) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างคาร์บอนนาโนทิวบ์ (a) คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว

(b) คาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังซ้อน [27]

2.11.1 การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์

การสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์มีหลายกระบวนการขึ้นกับสมบัติของคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ต้องการ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 กระบวนการ ดังนี้

1. กระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง: การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการนี้จะใช้การยิงแผ่นแกรไฟต์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส เพื่อให้อะตอมของคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการแตกตัว โดยความหนาแน่นของอะตอมทั้งสองนี้เป็นตัวแปรสำคัญต่อการสร้างพันธะของคาร์บอนจนได้เป็นนาโนทิวบ์ ซึ่งการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยกระบวนการนี้มี 2 วิธี คือ

- วิธียิงด้วยอิเล็กตรอน (electron arc discharge) เป็นวิธีแรกที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงที่ระหว่างขั้วของคาร์บอน และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ 2000-3000 องศาเซลเซียส ทำให้คาร์บอนเกิดการแตกตัวกลายเป็นพลาสมาร้อน และก่อเกิดการควบแน่น ก่อตัวใหม่เป็นท่อนาโนที่ขั้วแคโทด โดยถ้าใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้สังเคราะห์ได้เป็นคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังเดี่ยว วิธีสังเคราะห์วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก อย่างไรก็ตาม คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ได้จะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปน เช่น ซีเถ้า และออสซิลลูมของคาร์บอนมาก

- วิธียิงด้วยเลเซอร์ (laser ablation) วิธีนี้จะใช้เลเซอร์ที่มีพลังงานสูงยิงกระทบเข้ากับแท่งคาร์บอนที่ผสมโลหะในเตาเผาที่มีอุณหภูมิประมาณ 1200-1500 องศาเซลเซียส

ทำให้ได้อะตอมคาร์บอนและแก๊สคาร์บอน จากนั้นใช้แก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน หรือไนโตรเจนในการกวาดท่อนาโนที่เกิดขึ้น และนำไปหล่อเย็นที่ตัวกักเก็บทองแดง การสังเคราะห์วิธีนี้ทำให้ได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ในขณะที่ค่าใช้จ่ายก็ค่อนข้างสูงเช่นกัน

2. กระบวนการที่ใช้อุณหภูมิปานกลาง: การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการนี้จะใช้การแยกแก๊สไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นแหล่งให้อะตอมคาร์บอน เช่น มีเทน และอะเซทิลีน เป็นต้น บนโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น นิกเกิล เหล็ก และโคบอลต์ เป็นต้น โดยใช้ความร้อนและพลาสมาเข้ามาช่วย โดยจะใช้อุณหภูมิในการสลายตัวของแก๊สไฮโดรคาร์บอนไม่เกิน 900 องศาเซลเซียส เรียกว่าวิธี chemical vapor deposition (CVD) ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ วิธี CVD ด้วยความร้อน จะได้คาร์บอนนาโนทิวบ์ทั้งชนิดผนังเดี่ยวและผนังซ้อน ข้อดีของกระบวนการสังเคราะห์ที่ใช้อุณหภูมิปานกลาง คือ สามารถควบคุมขนาดและความยาวของคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้

คาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงสูง โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์เพียงเส้นเดียวมีความแข็งแรงมากถึง 100 เท่า และมีความเบาเป็น 6 เท่า ของเหล็ก อีกทั้งยังมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง (aspect ratio) สูงประมาณ 1000 จึงทำให้มีสมบัติทนความร้อน และมีความยืดหยุ่นที่ดี นอกจากนี้ ยังสามารถใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือสารกึ่งตัวนำได้ จึงได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากงานวิจัยของ Bokobza [28] ซึ่งได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนนาโนทิวบ์ในยางสไตรีนบิวทาไดอีน พบว่า การเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้ดีกว่าการใช้คาร์บอนแบล็ก อีกทั้งยังใช้ปริมาณน้อยกว่าคาร์บอนแบล็กในการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า

จากงานวิจัยของ Fakhru'l-Razi และคณะ [29] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติและคาร์บอนนาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้นในปริมาณ 1-10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการผสมแบบสารละลาย และจากการศึกษาสมบัติเชิงกล พบว่า การเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์มีผลทำให้ค่าความต้านแรงดึงเพิ่มขึ้น 9 เท่า และมอดุลัสเพิ่มขึ้น 12 เท่า ของยางธรรมชาติ เมื่อได้เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และจากการทดสอบล้าฐานวิทยา พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์มีการกระจายตัวที่ดีในยางธรรมชาติ

2.12 นาโนซิลิกา (Silica) [30-36]

ซิลิกามีชื่อทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO₂) และอาจมีน้ำในผลึกอยู่ด้วยซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ (nonblack filler) ที่ดีที่สุดและนิยมใช้กันมาก เพราะเป็นสารตัวเติมชนิดที่เสริมความแข็งแรงให้กับยาง มักใช้กับผลิตภัณฑ์ยางพวกที่มีสีขาวหรือสีต่างๆ

2.12.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกา [30, 31]

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

การตกตะกอน

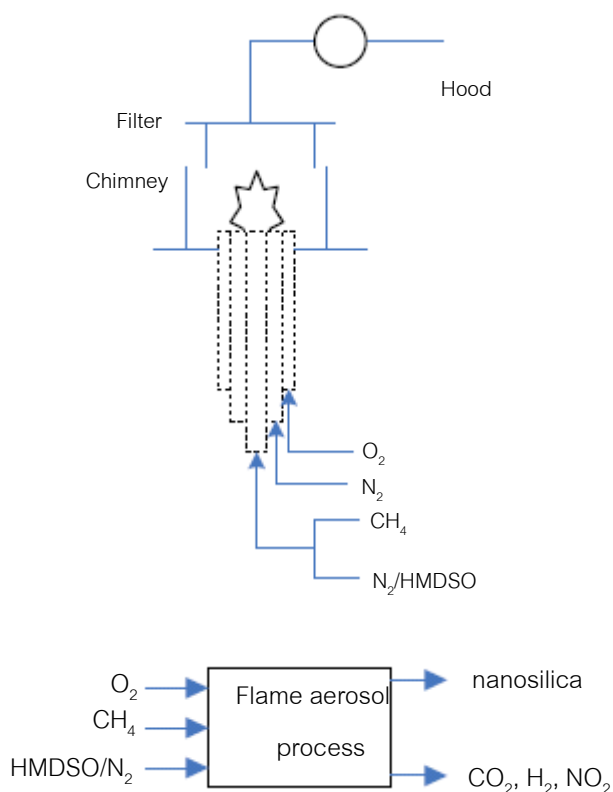
การสังเคราะห์อนุภาคนาโนซิลิกาที่ได้จากการตกตะกอนเริ่มจากการนำพหุมาละลายในด่างให้กลายเป็นสารประกอบซิลิเกต จากนั้นจึงตกตะกอนเอาซิลิกาออกมาล้างและทำให้แห้งจะได้ซิลิกาผง ซึ่งมีน้ำอยู่ในอนุภาค ซิลิกาที่ได้มีขนาดตั้งแต่ 100-400 อังสตรอม ซิลิกาชนิดนี้เป็นสารตัวเติมที่เสริมความแข็งแรงให้กับยางที่นิยมใช้มากที่สุด โดยทำให้ยางมีความทนแรงดึง การฉีกขาด และการสึกหรอ นอกจากนี้ยังทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปมักใช้กับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลักษณะโปร่งแสงและมีสีสวย

วิธี Flame aerosol process

การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถผลิตนาโนซิลิกาได้ในทางการค้า ซึ่งได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงของเฮกซะเมทิลไดซิลอกเซน (hexamethyldisiloxane, HMDSO) โดยใช้ HMDSO เป็นสารตั้งต้นในการผลิต ส่วนไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพาในกระบวนการ ใช้มีเทนเป็นเชื้อเพลิง และแก๊สออกซิเจนเป็นตัวออกซิเดนต์ โดยสารเคมีที่ป้อนและกระบวนการผลิตแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.10 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 สารเคมีในกระบวนการสังเคราะห์นาโนซิลิกาโดยวิธี Flame aerosol process

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



รูปที่ 2.10 กระบวนการผลิตนาโนซิลิกาโดยวิธี Flame aerosol process [31]

ผลการผลิตนาโนซิลิกาด้วยวิธี Flame aerosol process สามารถผลิตนาโนซิลิกาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10–100 นาโนเมตร และอัตราการผลิตที่ได้ คือ 17 กรัม/ชั่วโมง นอกจากนี้ พบว่าวิธีนี้สามารถควบคุมขนาดของอนุภาคที่เกิดขึ้นได้โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของออกซิเจนดังแสดงในตารางที่ 2.2

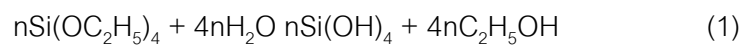
ตารางที่ 2.2 ขนาดอนุภาคของนาโนซิลิกาที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของออกซิเจน

| อัตราการไหลของออกซิเจน (ลิตร/นาที) | ขนาดอนุภาคนาโนซิลิกา (นาโนเมตร) |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| 2.5 | 44 nm |
| 4.7 | 78 nm |
| 8.5 | 55 nm |
| 13.3 | 41 nm |
| 24 | 23 nm |

วิธีโซล-เจล (Sol-gel process)

วิธีโซล-เจลเป็นการใช้สารละลายต่างๆ ทำปฏิกิริยากันซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเป็นเจล จากเจลที่ได้นำไปทำให้แห้งหรือเผาที่อุณหภูมิต่ำจะได้นาโนซิลิกา ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis) และปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ ดังสมการต่อไปนี้

ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส

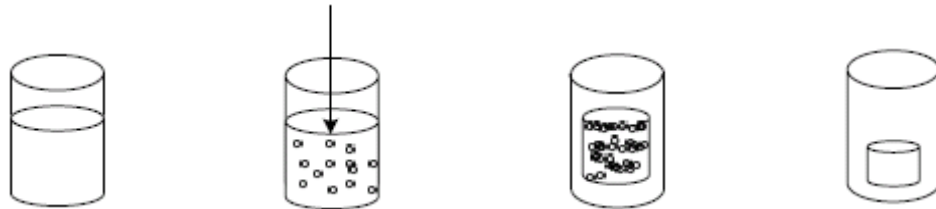


ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์



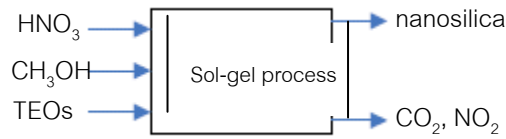
โดยวิธีโซล-เจลประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือ (1) การเตรียมเจล (preparation of gel) (2) การทำให้เกิดเจล (aging of gel) และ (3) การทำเจลให้แห้ง (drying of gel) โดยการเกิดซิลิกาเจลแสดงไว้ในรูปที่ 2.11

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



รูปที่ 2.11 การเตรียมนาโนซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจล [31]

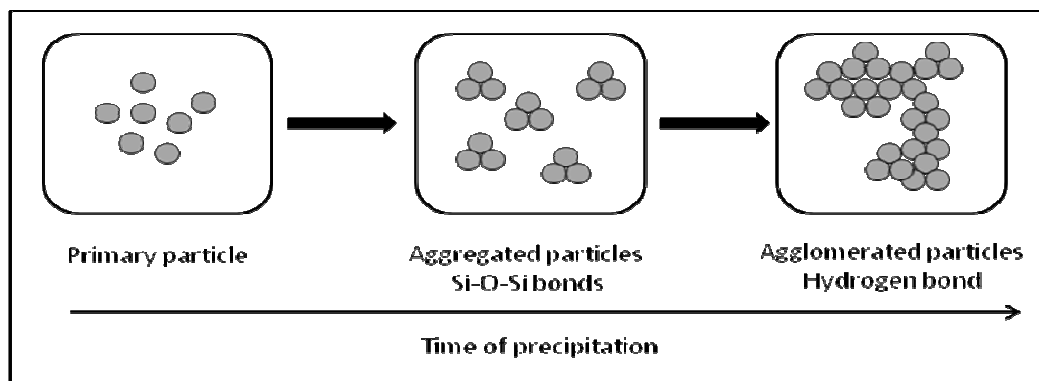
การสังเคราะห์ซิลิกาด้วยวิธีนี้จะทำการเตรียมแอโรเจลซึ่งจะใช้สารละลายเททระเอทิลออร์โทซิลิเกต (tetraethylortho-silicate, TEOS) ในแอลกอฮอล์ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้กรดไนตริกลงไป 2-3 หยด ทิ้งไว้ประมาณ 14-16 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดเป็นเจล จากนั้นนำไปทำให้แห้งภายใต้ภาวะจุดวิกฤติของคาร์บอนไดออกไซด์ นาโนซิลิกาที่เตรียมจากวิธีโซล-เจลจะมีคุณลักษณะทางกายภาพ คือ ขนาดอนุภาค 5-50 นาโนเมตร พื้นที่ผิว 935-1150 ตารางเมตร/กรัม ความหนาแน่น 0.043-0.089 กรัม/ตารางเซนติเมตร และปริมาตรรูพรุนทั้งหมด 8.6-10.9 ตารางเซนติเมตร/กรัม ซึ่งกระบวนการผลิตแสดงไว้ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กระบวนการผลิตนาโนซิลิกาโดยวิธีโซล-เจล [31]

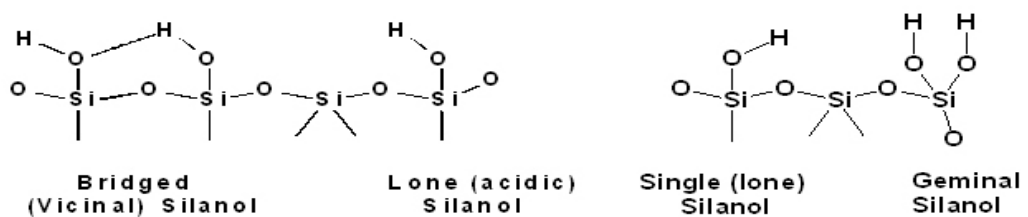
2.12.2 ปัญหาของการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารตัวเติม [32-36]

เนื่องจากซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางมีขนาดอนุภาค 10-40 นาโนเมตร ซิลิกาจะไม่สามารถอยู่อย่างเดี่ยวๆ แต่จะจับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่า “แอกกรีเกต” (aggregate) เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม นอกจากนี้ แอกรีเกตของซิลิกายังชอบจับกลุ่มกันเป็นก้อนใหญ่มากขึ้น เรียกว่า “แอกโกลเมอเรต” (agglomerate) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเกาะกลุ่มของนาโนซิลิกา

การจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของซิลิกานี้จะทำให้การกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์เกิดได้ยาก เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของการเป็นสารเสริมแรงลดลง นอกจากนี้ โครงสร้างบนพื้นผิวของซิลิกาประกอบด้วยหมู่ซิลานอลปกคลุมอยู่อย่างหนาแน่น (4-5 หมู่ต่อ 100 อังสตรอม) ซึ่งหมู่ซิลานอล บนพื้นผิวของซิลิกานี้จะเกาะอยู่ในหลายลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.14

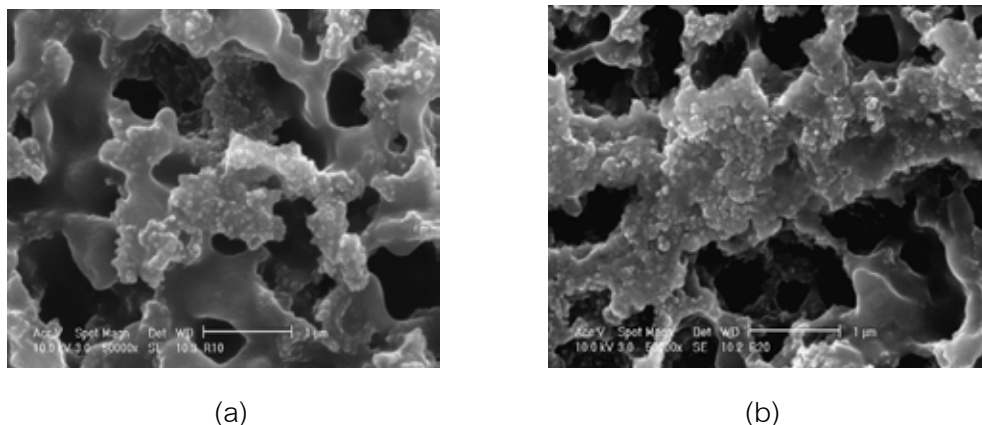


รูปที่ 2.14 ลักษณะของหมู่ซิลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา [34]

หมู่ซิลิโคนอลจะทำให้อนุภาคของซิลิกาที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน (filler-filler interaction) ซิลิกา จึงอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า ‘แอกไกลเมอเรต’ เพราะอันตรกิริยาที่ยึดซิลิกาเข้าด้วยกัน ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน (H-bonds) ซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงแตกตัว (disperse) และกระจายตัว (distribute) ในยางได้ยาก สำหรับในกรณีที่เติมซิลิกาเข้าไปในยาง ในปริมาณค่อนข้างมากกลุ่มก้อนของซิลิกาจะเข้ามาอยู่ใกล้กันมากจนทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกลุ่มก้อนของซิลิกาด้วยกันเองเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายที่เรียกว่า “โครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม” (filler-filler network) ซึ่งโครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติมนี้อาจจะทำให้ยางคอมพาวนด์มีความหนืดสูงขึ้น ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ยาก และทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตมากยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ หมู่ซิลิโคนอลบนพื้นผิวซิลิกายังสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี โดยในสภาพการเก็บรักษาทั่วไปแล้ว ซิลิกาจะมีความชื้นร้อยละ 4-7 (ปริมาณความชื้นเปลี่ยนแปลงไปตามความชื้นของสิ่ง แวดล้อม) ความชื้นที่จับอยู่กับหมู่ซิลิโคนอลบนพื้นผิวซิลิกานอกจากทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยากขึ้นเล็กน้อยแล้ว ยังส่งผลต่อปฏิกิริยาคงรูปของยางได้อีกด้วย ถ้าปริมาณความชื้นในซิลิกาสูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางในระบบที่ใช้กำมะถันจะยาวขึ้นเพราะซิลิกาที่อึดตัวด้วยน้ำจะหน่วงปฏิกิริยาคงรูป นอกจากนี้ หมู่ซิลิโคนอลเหล่านี้สามารถดูดซับสารเร่งวัลคาไนซ์ที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น DPG รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zn complex) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นวัลคาไนซ์ การดูดซับดังกล่าวทำให้สารเร่งวัลคาไนซ์ หรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีมีปริมาณลดลง ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีระดับของการคงรูปลดลงด้วย

Peng และคณะ [35] ได้เตรียมนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาด้วยการผสมภายใต้ภาวะที่เป็นเลเท็กซ์ โดยใช้ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 14 นาโนเมตร และมีพื้นที่ผิว 200 ± 25 ตารางเมตร/กรัม ผสมกับยางธรรมชาติในปริมาณร้อยละ 0.5-8.5 โดยน้ำหนัก และใช้พอลิ-ไดแอลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ [poly(diallyldimethylammonium chloride), PDDA] เป็นสารเชื่อมประสาน จากผลการทดลอง พบว่า สมบัติความทนแรงดึง มอดุลัส และความทนแรงฉีกขาด ได้รับการปรับปรุงเมื่อเติมนาโนซิลิกาเข้าไปที่ปริมาณต่ำกว่าร้อยละ 4 และที่ปริมาณนาโนซิลิกาสูงกว่าร้อยละ 4 ซิลิกาเริ่มจับกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น (รูปที่ 2.15) ส่งผลให้สมบัติต่างๆ ลดลง ทั้งนี้ขึ้นกับการกระจายตัวของอนุภาคซิลิกาในยางธรรมชาติ กล่าวคือ การกระจายตัวที่ดีมีผลทำให้การปรับปรุงทั้งสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.15 สัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิตที่ใส่ซิลิกา (a) ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักและ (b) ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก [35]

ปัจจุบันเทคนิคการห่อหุ้มอนุภาคของสารอินทรีย์ด้วยพอลิเมอร์กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของวัสดุที่ถูกห่อหุ้ม เพิ่มการกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ ลดความเป็นพิษของสารอินทรีย์ และสามารถเก็บและขนส่งได้สะดวก [36] ด้วยเหตุนี้การห่อหุ้มซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนด้วยพอลิเมอร์ เช่น พอลิสไตรีน (polystyrene) พอลิเมทิลเมทาคริเลต [poly(methyl methacrylate)] สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเตรียม พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต ซึ่งการสังเคราะห์นาโนคอมพอสิตสามารถสังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน

ในปัจจุบันนี้สามารถพัฒนาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ให้มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน (differential microemulsion polymerization)

2.13 กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน (Differential microemulsion polymerization) [37-42]

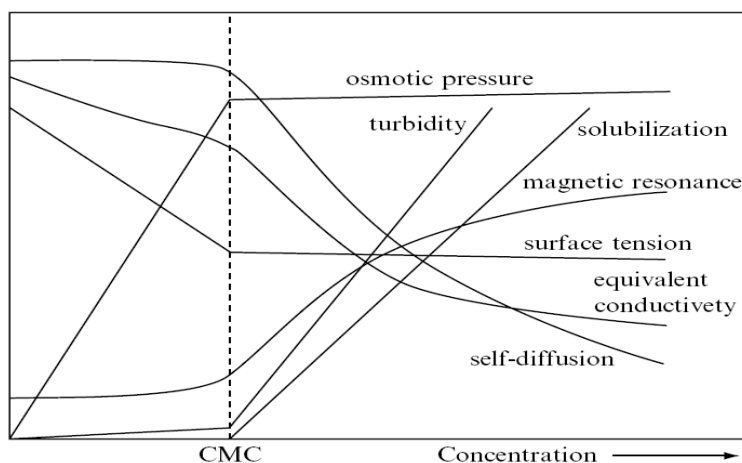
การเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันเป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบฟรีเรดิคัล (free radical polymerization) สามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ได้ เช่น พอลิสไตรีน พอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเกิดพอลิเมอร์นี้เป็นการปรับปรุงกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน และไมโครอิมัลชัน โดยสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 50 นาโนเมตรและสามารถควบคุมขนาดของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย นอกจากนี้

ยังใช้สารลดแรงตึงผิวที่น้อย และมีร้อยละผลได้ของพอลิเมอร์ในอิมัลชันมากกว่าร้อยละผลได้ของพอลิเมอร์จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน

กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันจะมีส่วนประกอบในระบบคล้ายคลึงกับกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน คือ

1. มอนอเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ (water-insoluble monomer) หรือละลายน้ำได้น้อยมาก เช่น บิวทาไดอีน สไตรีน อะคริโลไนไตรล์ ไวนิลเอซีเตต และไวนิลคลอไรด์
2. ตัวกลางสำหรับการกระจาย โดยส่วนมากใช้น้ำเป็นตัวกลาง
3. สารลดแรงตึงผิว (surfactant)
4. สารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายในน้ำ (water soluble initiator) (เช่น โซเดียมเปอร์ซัลเฟต, NaPS) หรือสารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายในน้ำมัน (oil-soluble initiator) (เช่น 2,2'-อะโซบิสไอโซบิวทิโรไนไทรล์, AIBN)

สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทสำคัญมากในกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวที่ชอบน้ำ (hydrophilic head) และส่วนหางซึ่งเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนยาวที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic tail) สารลดแรงตึงผิวที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นชนิดแอนไอออนิก (anionic surfactants) เช่น โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) โดยเมื่อละลายสารลดแรงตึงผิวในน้ำ สมบัติทางกายภาพของสารละลายที่ได้ เช่น ความดันออสโมติก (osmotic pressure) สภาพการนำ (conductivity) ความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) และแรงตึงผิว (surface tension) จะเปลี่ยนแปลงไปจากสมบัติเดิมของน้ำ โดยรูปที่ 2.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นเชิงโมลาร์ของสารลดแรงตึงผิวที่ละลายในน้ำ พบว่าที่ระดับความเข้มข้นหนึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงความชันของสมบัติต่างๆ อย่างทันทีทันใด ซึ่งความเข้มข้นนี้ เรียกว่า ความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤต (Critical micelle concentration, CMC) (ความเข้มข้นต่ำสุดของสารลดแรงตึงผิวที่อยู่ในรูปไมเซลล์)

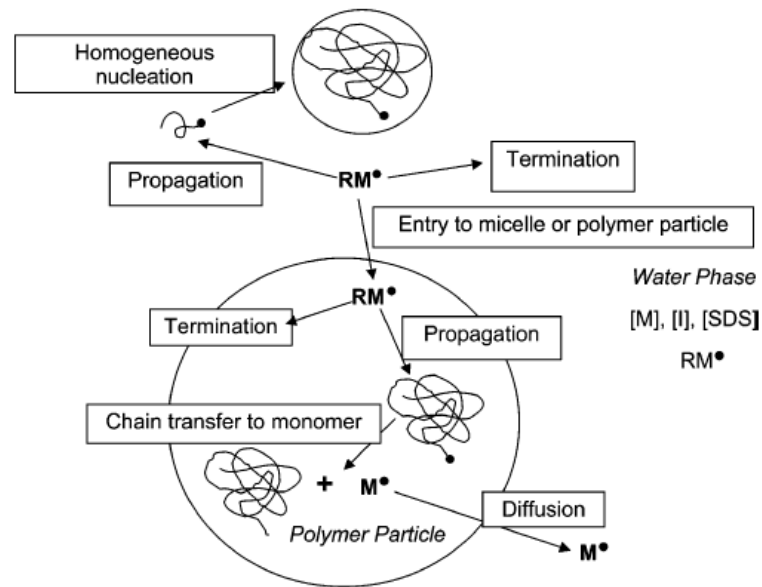


รูปที่ 2.16 ค่า CMC และสมบัติทางกายภาพของสารละลายสารลดแรงตึงผิว [41]

เมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเล็กน้อยในน้ำ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะกระจายไปทั่วอย่างอิสระ และเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นสูงกว่า CMC โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะรวมตัวกันในลักษณะเป็นกลุ่มคอลลอยด์เล็กๆ เรียกว่า ไมเซลล์ (micelles) โดยค่า CMC ของสารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 0.001-0.1 โมลต่อลิตร ไมเซลล์ทั่วไปมีขนาด 2-10 นาโนเมตร ซึ่งประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิว 50-150 โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่จัดตัวในรูปไมเซลล์อยู่ในลักษณะที่หันปลายไม่ชอบน้ำเข้าด้านในของไมเซลล์และหันปลายไฮอพนิกออกทางตัวกลางที่เป็นน้ำ

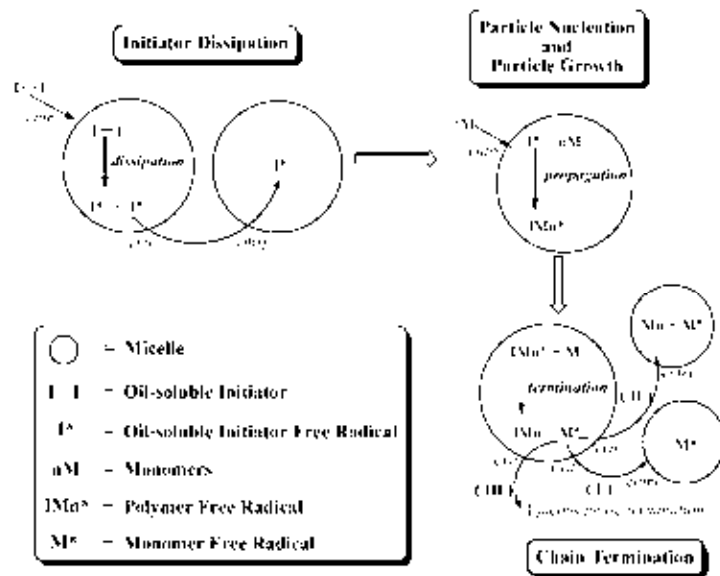
หลักการการเกิดพอลิเมอร์ของเทคนิคนี้ คือ เริ่มแรกในระบบจะประกอบด้วยน้ำ สารลดแรงตึงผิว และสารเริ่มปฏิกิริยา ผสมอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อให้ความร้อนแก่ระบบจนถึงที่อุณหภูมิที่กำหนด จึงเริ่มหยดมอนอเมอร์ลงไปในระบบที่ละหยด ไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวจะแย่งกันดึงมอนอเมอร์เข้าไปอยู่ในไมเซลล์ได้ง่าย จึงทำให้เทคนิคนี้สามารถลดปริมาณความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่จำเป็นต้องใช้ให้มีค่าต่ำกว่าค่าความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤติได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย

รูปที่ 2.17 แสดงกลไกการเกิดพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันที่นำเสนอบนโดย He และคณะ [38] ซึ่งภายในระบบก่อนเกิดปฏิกิริยาประกอบด้วยสารเริ่มปฏิกิริยา และสารลดแรงตึงผิว



รูปที่ 2.17 กลไกการเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการเกิดแบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน [38]

โดยสารเริ่มปฏิกิริยาแตกตัวกลายเป็นเรดิคัลปฐมภูมิ ซึ่งแบ่งส่วนเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบด้วยการหยดอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นมอนอเมอร์เรดิคัล (RM) และขยายเป็นพอลิเมอร์เรดิคัล ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งพอลิเมอร์เรดิคัลเหล่านี้จะขยายขนาดในเฟสน้ำจนได้ความยาวสายโซ่วิกฤติ (critical chain length) และตกตะกอนโดยการเคลื่อนเข้าไปอยู่ในไมเซลล์เกิดเป็นอนุภาคของพอลิเมอร์ กลไกดังกล่าวนี้เรียกว่า การเกิดอนุภาคแบบเนื้อเดียวกัน (homogeneous nucleation) นอกจากนี้ RM[•] ยังสามารถเคลื่อนเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ในไมเซลล์ที่บวมตัวด้วยมอนอเมอร์เกิดเป็นอนุภาคพอลิเมอร์กลไกนี้เรียกว่าการเกิดอนุภาคแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous nucleation) ซึ่งอนุภาคพอลิเมอร์ฟรีเรดิคัลเหล่านี้จะขยายขนาดต่อไป และสายโซ่พอลิเมอร์จะสิ้นสุดการขยายภายหลังการเกิด chain transfer ไปยังมอนอเมอร์ และมอนอเมอร์เรดิคัลที่เกิดจาก chain transfer และมอนอเมอร์เรดิคัลที่เกิดจาก chain transfer (M[•]) สามารถเริ่มต้นเกิดพอลิเมอร์ต่อไปได้ หรือแพร่ออกสู่เฟสน้ำ เนื่องจากมีขนาดเล็กมาก [37]



รูปที่ 2.18 กลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน [42]

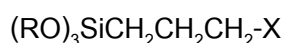
He และ Pan [40] ได้ทำการสังเคราะห์พอลิสไตรีนที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน โดยใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มปฏิกิริยา และโซเดียมไดเตลซัลเฟตเป็นสารลดแรงตึงผิว จากผลการทดลอง พบว่าการสังเคราะห์พอลิสไตรีนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน นอกจากได้พอลิสไตรีนที่มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 50 นาโนเมตร (ประมาณ 20 นาโนเมตร) ยังใช้สารลดแรงตึงผิวปริมาณน้อยกว่าวิธีการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันมาก

Norakankom และคณะ [42] ได้สังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน โดยใช้ AIBN เป็นสารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายในน้ำมัน (oil-soluble initiator) และใช้โซเดียมไดเตลซัลเฟตเป็นสารลดแรงตึงผิว พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 1-3 ล้าน และมีขนาดอนุภาคประมาณ 20-30 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังได้เลททิซของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีปริมาณของแข็งสูงถึงร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดแรงตึงผิวจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ (%conversion) สูงขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของมอนอเมอร์ต่อน้ำไม่มีนัยสำคัญใดๆ ต่อร้อยละการเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ ในงานวิจัยนี้สามารถลดปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวให้ต่ำลงได้ถึง 1/130 ของปริมาณมอนอเมอร์โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของสารลดแรงตึงผิวต่อน้ำก็ลดลงอยู่ที่ 1/600

สำหรับเทคนิคการห่อหุ้มนาโนซิลิกาด้วยพอลิเมอร์ จำเป็นต้องตัดแปรผิวของนาโนซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิเลนเพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาและพอลิเมอร์

2.14 สารคู่ควบประเภทซิลเลน (Silane coupling agent) [43, 44]

สารคู่ควบซิลเลน คือ สารเคมีที่ประกอบด้วยซิลิกอนเป็นโครงสร้างพื้นฐานและมีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาสองชนิดภายในโมเลกุลเดียว คือ หมู่ฟังก์ชันอินทรีย์และอินทรีย์ โครงสร้างโดยทั่วไปของสารคู่ควบซิลเลนเป็นดังนี้

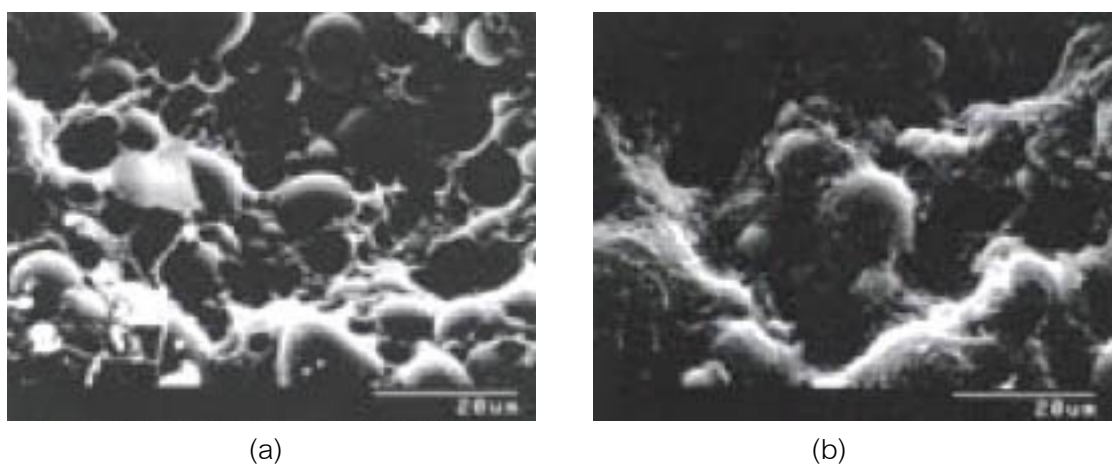


โดยที่ RO คือ หมู่ไฮโดรไลซ์ เช่น เมทอกซี เอทอกซี หรืออะซิโทกซี

X คือ หมู่ออร์แกนอฟังก์ชัน เช่น อะมิโน เมทาคริลอกซี และอีพอกซี เป็นต้น

สารคู่ควบซิลเลนจะทำปฏิกิริยาที่ผิวหน้าระหว่างสารอนินทรีย์ (เช่น แก้ว เหล็ก หรือแร่) และสารอินทรีย์ (เช่น พอลิเมอร์อินทรีย์ หรือสารยึดติดระหว่างผิว) เพื่อสร้างพันธะระหว่างสารสองชนิดที่ไม่เหมือนกัน

เมื่อพอลิเมอร์ถูกเสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วหรือแร่ธาตุอนินทรีย์อื่นๆ พื้นที่ที่อยู่ระหว่างผิวหน้าของพอลิเมอร์และสารอนินทรีย์จะยึดติดกันด้วยแรงทางกายภาพและเคมี ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการยึดติด ความแข็งแรง สัมประสิทธิ์การขยายตัว และระยะเวลาการเก็บรักษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ เมื่อเกิดการเข้าทำปฏิกิริยาของน้ำต่อผิวที่ชอบน้ำของสารเสริมแรงที่เป็นสารอนินทรีย์ จะสามารถทำลายพันธะระหว่างพอลิเมอร์และสารเสริมแรงได้ แต่สารคู่ควบซิลเลนสามารถสร้างพันธะที่ทนทานต่อน้ำทำให้พันธะแข็งแรงขึ้นและสามารถป้องกันการแตกแยกของผิวหน้าวัสดุคอมพอสิตระหว่างการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 สัณฐานวิทยาของอีพอกซีเรซินที่เสริมแรงด้วยซิลิกาโดย

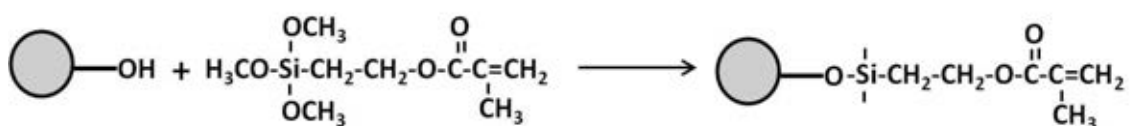
(a) ไม่ใช้สารคู่ควบซิลเลน (b) ใช้สารคู่ควบซิลเลน

จากรูปที่ 2.19(a) พบว่า อนุภาคของซิลิกาปรากฏให้เห็นบนอีพอกซี แต่เมื่อใช้สารคู่ควบซิลีน ดังรูปที่ 2.19(b) อีพอกซีสามารถเคลือบบนพื้นผิวของอนุภาคซิลิกาได้ดีขึ้นซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน

ในวัสดุคอมพอสิต สารคู่ควบซิลีนสามารถเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติด และทำให้วัสดุทนต่อความชื้น หรือสิ่งแวดล้อมทั่วไปได้ และยังมีประโยชน์อื่นๆ อีกหลายประการดังนี้

1. ทำให้การเปียกผิว (wetting) ของเมทริกซ์บนวัสดุอินทรีย์ดีขึ้น
2. ทำให้คอมพอสิตมีความเหนียวระหว่างการขึ้นรูป
3. ทำให้คอมพอสิตมีผิวเรียบ
4. ทำให้คอมพอสิตมีความใสเพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยของ Chuayjulit และ Boonmahitthisud [44] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไสตรีนนาโนคอมพอสิต ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อินซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน โดยใช้ SDS เป็นสารลดแรงตึงผิว และ AIBN เป็นสารเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งก่อนการห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาจำเป็นต้องดัดแปรผิวของนาโนซิลิกาด้วย 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane (MPTMS) ซึ่งเป็นสารคู่ควบซิลีนเพื่อให้หมู่ซิลินอลของซิลิกาทำปฏิกิริยากับสารคู่ควบซิลีนผ่านพันธะโควาเลนต์ของ O-Si ทำให้เกิดพันธะคู่บนผิวของซิลิกาและสามารถทำปฏิกิริยากับสไตรีน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 จากผลการทดลอง พบว่าอนุภาคนาโนคอมพอสิตที่สังเคราะห์นี้ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 40 นาโนเมตร และมีสัณฐานวิทยาโครงสร้างแบบ core-shell โดยมีซิลิกาเป็นแกนกลาง (core) และพอลิไสตรีนเป็นเปลือกหุ้ม (shell)



รูปที่ 2.20 การดัดแปรผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลีน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. น้ำยางธรรมชาติ (natural rubber latex) ที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์ คอร์ปอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) (Thai Rubber Latex Co., Ltd.)
2. น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene butadiene rubber latex) ที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 50.5 โดยน้ำหนัก ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเลเท็กซ์สังเคราะห์ จำกัด
3. น้ำยางคาร์บอกซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน (carboxylated styrene butadiene rubber latex) ที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 52 โดยน้ำหนัก ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยาม ซินเทติก ลาเท็กซ์ จำกัด (Siam Synthetic Latex Co., Ltd.)
4. สารละลายโปแตสเซียมโอเลเอต (potassium oleate) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
5. สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
6. สารดิซเพอร์ชันซัลเฟอร์ (sulphur) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
7. สารดิซเพอร์ชันซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
8. สารดิซเพอร์ชันวิงสเตย์แอลแอนติออกซิแดนต์ (wingstay L antioxidant) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
9. สารดิซเพอร์ชันซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
10. คาร์บอนแบล็ก (carbon black) ชนิด N330 ที่มีขนาดอนุภาค 28-36 นาโนเมตร จากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

11. คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotube) ชนิดผนังท่อหลายชั้น (multi-walled) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 10-15 นาโนเมตร จากบริษัท อี-เอ็ม พาวเวอร์ จำกัด (EM-Power Co., Ltd.)
12. ซิลิกา (silica) ที่มีขนาดอนุภาค 15-20 นาโนเมตร จากบริษัทซิกมา-อัลดริช จำกัด (Sigma-Aldrich Co., Ltd.)
13. วัลทามอล (vultamol) จากสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
14. เบนโทไนต์ (bentonite) จากสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
15. สไตรีนมอนอเมอร์ (styrene monomer) [มีสารยับยั้ง (inhibitor) 10-15 ส่วนในล้านส่วน (ppm)] ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทดาวเคมีคัล จำกัด (Dow Chemical Co., Ltd.)
16. เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (methyl methacrylate monomer) (มีสารยับยั้ง 10 ส่วนในล้านส่วน) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทไทย เอ็มเอ็มเอ จำกัด (Thai MMA Co., Ltd.)
17. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 97 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทคอกนิส (ประเทศไทย) จำกัด [Cognis (Thailand) Co., Ltd.]
18. 2,2'-อะโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (2,2'-azobisisobutyronitrile, AIBN) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเคมีคัล จำกัด (Siam Chemical Industry Co., Ltd.)
19. เมทานอล (methanol)
20. น้ำกลั่น (distilled water)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมสารดิสเพอร์สชัน

1. หม้ออบและลูกบิด
2. เครื่องควบคุมรางบิด

3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมนาโนเลเท็กซ์

1. เครื่องปฏิกรณ์แก้วไพเรกซ์ (Pyrex glass reactor) ขนาด 500 มิลลิลิตร
2. อุปกรณ์ควบแน่นแบบสองชั้น (double jacket condenser)
3. กรวยหยดสาร (dropping funnel)

4. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารแบบควบคุมด้วยระบบดิจิทัล

(stirring/temperature controlled digital hot plate)

5. แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic bar)

3.2.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมชิ้นทดสอบ

1. เครื่องกวนเชิงกลชนิดความเร็วสูง (high speed mechanical stirrer)

2. เครื่องกวนเชิงกล (mechanical stirrer)

3. แม่แบบทำจากแผ่นกระจกขนาด 20×20×0.15 เซนติเมตร

4. เตาอบสูญญากาศ (vacuum oven)

3.2.4 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

1. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคกระเจิงแสงแบบพลวัต (dynamic light scattering analyzer, DLS) รุ่น Nano-series ZX (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

2. พูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) รุ่น Nicolet6700 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) รุ่น Jeol JEM-2100 (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น Jeol JSM-5410 LV (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

5. เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (tensile testing machine) รุ่น Instron 5843 (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

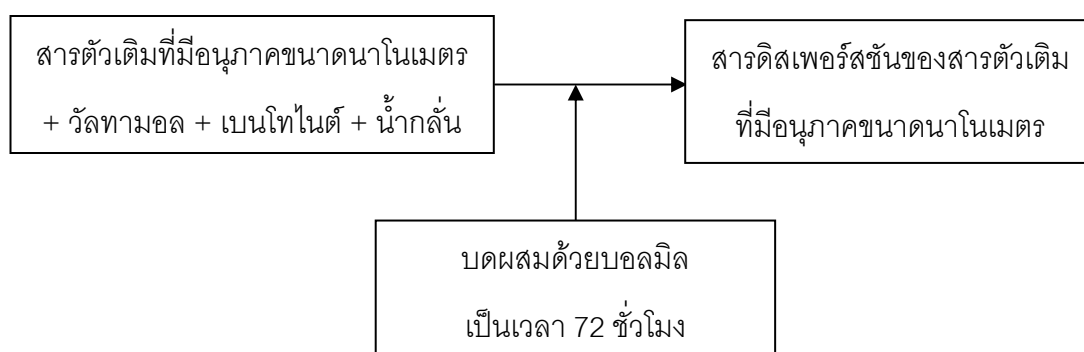
6. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Mettler Toledo TGA/SDTA 851° (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

7. เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical analyzer, DMA) รุ่น Mettler Toledo DMA/SDTA 861° (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารดิสเพอร์ชันของสารตัวเต็มที่มีอนุภาคนาโนเมตร

รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารดิสเพอร์ชันของสารตัวเต็มที่มีอนุภาคนาโนเมตร



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารดิสเพอร์ชันของสารตัวเต็มที่มีอนุภาคนาโนเมตร

การเตรียมสารดิสเพอร์ชันของสารตัวเต็มที่มีอนุภาคนาโนเมตรเริ่มจากนำสารตัวเต็มที่มีอนุภาคนาโนเมตรผสมกับสารช่วยกระจายตัว (วัลทามอล และเบนโทไนด์) และน้ำกลั่นในปริมาณที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ใส่ในบอลมิลที่บรรจุลูกบดอะลูมินาภายในประมาณครึ่งหนึ่งของบอลมิล ทำการปั่นหมุนบอลมิลด้วยความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที (รูปที่ 3.2) เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้เตรียมสารดิสเพอร์ชันของคาร์บอนแบล็ก คาร์บอนนาโนทิวบ์ และนาโนซิลิกา

| สารดิสเพอร์ชัน | คาร์บอนแบล็ก ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก | คาร์บอนนาโนทิวบ์ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก | นาโนซิลิกา ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก |
|------------------|--------------------------------------|---|-----------------------------------|
| ปริมาณสาร (กรัม) | 20 | 2 | 2 |
| วัลทามอล (กรัม) | 2 | 2 | 2 |
| เบนโทไนด์ (กรัม) | 1 | 1 | 1 |
| น้ำกลั่น (กรัม) | 77 | 95 | 95 |



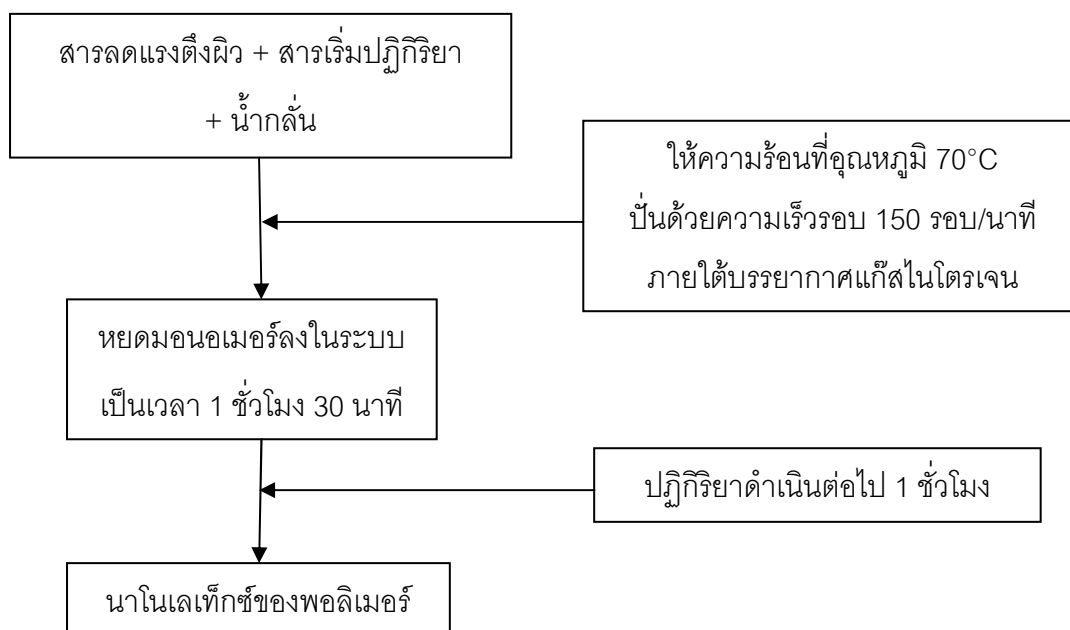
รูปที่ 3.2 เครื่องควบคุมขนาดและบอลมิล

3.3.2 การดัดแปรผิวอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยสารคู่ควบซีเลน

การดัดแปรผิวอนุภาคนาโนซิลิกาใช้วิธีของบริษัท ดาว คอร์นิ่ง จำกัด โดยเริ่มจากนำ น้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร มาปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้เท่ากับ 4.5 ด้วยกรดแอสติก จากนั้นเติมสารละลายเจือจางของสารคู่ควบซีเลน MPTMS (ความเข้มข้นร้อยละ 0.5) ปริมาณ 4 กรัม ในสารละลายกรดแอสติกที่เตรียมได้ โดยกวนส่วนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กไปพร้อมๆ กัน เมื่อเติมสารละลายเจือจางของสารคู่ควบซีเลนจนหมดทำการกวนส่วนผสมต่อไปอีก 30 นาทีจนได้สารละลายใสเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเติมนาโนซิลิกาปริมาณ 13.33 กรัม (สารคู่ควบซีเลน:นาโนซิลิกาเท่ากับ 0.3 : 1) ในส่วนผสม แล้วกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง นำส่วนผสมที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.3 การสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมอร์

รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลทเท็กซ์ของพอลิเมอร์

การเตรียมนาโนเลทเท็กซ์ของพอลิเมอร์ เริ่มจากนำสารลดแรงตึงผิว SDS สารเริ่มปฏิกิริยา AIBN และน้ำกลั่นใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ต่อกับอุปกรณ์ควบคุมแบบสองชั้นในปริมาณที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 และควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องให้ความร้อน (รูปที่ 3.4) และให้ความร้อนภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอที่อัตราเร็วในการหมุนของแท่งแม่เหล็ก 150 รอบ/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยทำการจ่ายแก๊สไนโตรเจนผ่านหลอดนำแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ และเมื่ออุณหภูมิของระบบสูงถึง 70 องศาเซลเซียส จึงเริ่มหยดมอนอเมอร์ที่ละลายอย่างสม่ำเสมอด้วยกรวยหยดสาร (รูปที่ 3.5) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จนหมด (22.5 มิลลิลิตร) จากนั้นให้คงอุณหภูมิไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส พร้อมการกวนอย่างต่อเนื่องอีก 1 ชั่วโมง เพื่อให้มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาเป็นพอลิเมอร์อย่างสมบูรณ์ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์พอลิเมอร์นาโนเลทเท็กซ์ [45]

| นาโนเลทเท็กซ์ | SDS (g) | AIBN (g) | monomer (ml) | น้ำกลั่น (ml) |
|---------------------|------------|-------------|-----------------|------------------|
| พอลิสไตรีน | 8 | 0.12 | 22.5 | 60 |
| พอลิเมทิลเมทาคริเลต | 8 | 0.12 | 22.5 | 60 |



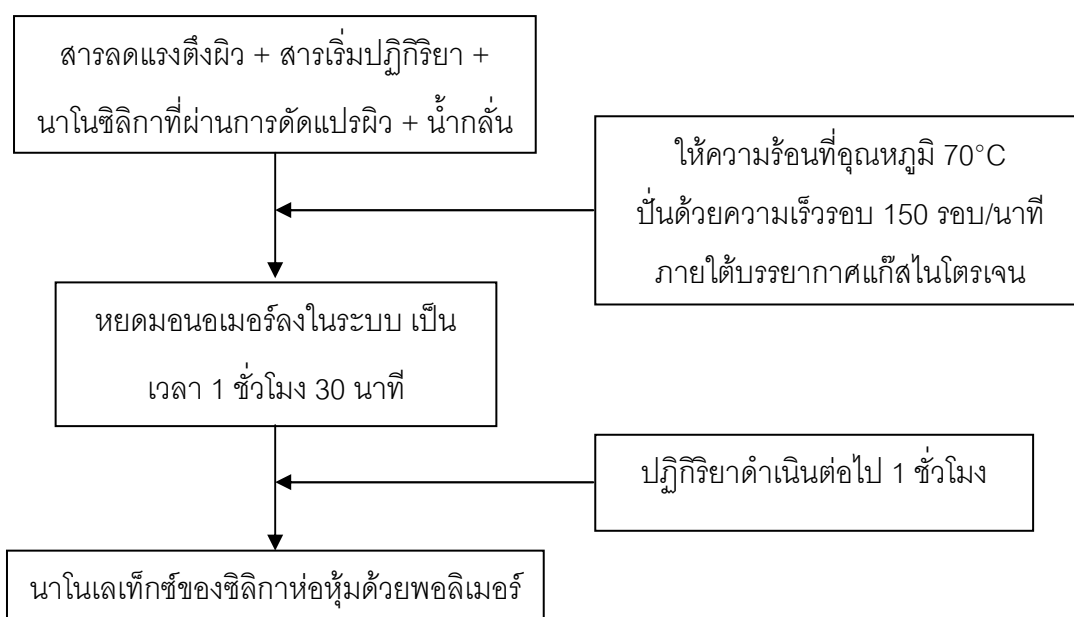
รูปที่ 3.4 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องควบคุม และท่อ นำแก๊ส



รูปที่ 3.5 การติดตั้งกรวยสำหรับหยดมอนอเมอร์

3.3.4 การสังเคราะห์นาโนเลทีกซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์

รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์นาโนเลทีกซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลทีกซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์

การเตรียมนาโนเลทีกซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ เริ่มจากนำสารลดแรงตึงผิว SDS สารเริ่มปฏิกิริยา AIBN นาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรผิวปริมาณ และน้ำกลั่น ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ต่อกับอุปกรณ์ควบคุมแบบสองชั้นในปริมาณที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องให้ความร้อน (รูปที่ 3.4) และให้ความร้อนภายใต้การกวนอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอที่อัตราเร็วในการหมุนของแท่งแม่เหล็ก 150 รอบ/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่จ่ายผ่านหลอดนำแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ และเมื่ออุณหภูมิของระบบสูงถึง 70 องศาเซลเซียสจึงเริ่มหยุดมอนอเมอร์ที่ละลายอย่างสม่ำเสมอผ่านกรวยหยดสาร (รูปที่ 3.5) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จนหมด (22.5 มิลลิลิตร) จากนั้นให้คงอุณหภูมิไว้ที่ 70 องศาเซลเซียส พร้อมการกวนอย่างต่อเนื่องอีก 1 ชั่วโมง เพื่อให้มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ [45]

| นาโนเลเท็กซ์ | SDS (g) | AIBN (g) | monomer (ml) | ซิลิกาที่ตัดแปรผิว (g) | น้ำกลั่น (ml) |
|---|------------|-------------|-----------------|---------------------------|------------------|
| ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน | 8 | 0.12 | 22.5 | 0.4 | 60 |
| ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิล- เมทาคริเลต | 8 | 0.12 | 22.5 | 0.4 | 60 |

3.3.5 การแยกพอลิเมอร์และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์จากนาโนเลเท็กซ์

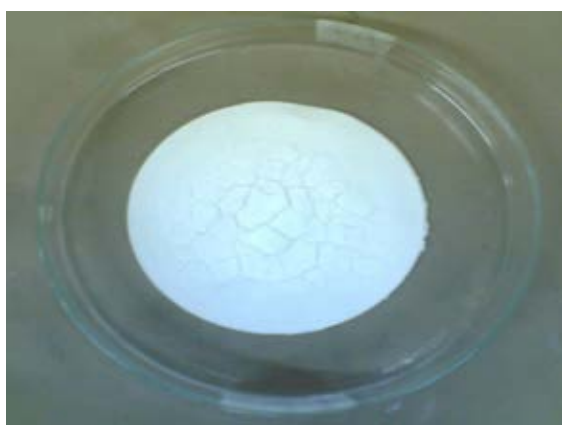
นำนาโนเลเท็กซ์ที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.3.3 และ 3.3.4 ไปตกตะกอนด้วยเมทานอลปริมาณมากเกินไป (รูปที่ 3.7) ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 10-15 นาที แล้วกรองด้วยเครื่องกรองระบบสุญญากาศ (รูปที่ 3.8) พร้อมทั้งล้างสารลดแรงตึงผิวด้วยน้ำกลั่น และโพลิโกเมอร์ด้วยเมทานอลอย่างละ 1 ลิตร นำตะกอนของพอลิเมอร์และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ที่แยกได้ (รูปที่ 3.9) ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ใช้สำหรับวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.7 การตกตะกอนพอลิเมอร์ด้วยเมทานอลปริมาณมากเกินไป



รูปที่ 3.8 การล้างและกรองอนุภาคระดับนาโนที่เตรียมได้ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ



รูปที่ 3.9 ตะกอนของพอลิเมอร์ก่อนนำไปอบ

3.3.6 วิเคราะห์หุ้มฟังก์ชันของนาโนซิลิกาที่ดัดแปรด้วยสารคู่ควบซีเลน พอลิเมอร์ และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์จากนาโนเลเท็กซ์

วิเคราะห์หาหุ้มฟังก์ชันบนผิวของนาโนซิลิกา นาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรผิวพอลิเมอร์ และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (รูปที่ 3.10)



รูปที่ 3.10 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Nicolet 6700)

3.3.7 การวิเคราะห์นาโนเลเท็กซ์

3.3.7.1 ร้อยละผลได้ (% yield) และร้อยละของแข็ง (% solid)

ร้อยละผลได้ของพอลิเมอร์ในนาโนเลเท็กซ์ที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.3.3 คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

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

โดยร้อยละของแข็งหาได้จากสมการที่ 3.2

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

และร้อยละของมอนอเมอร์หาได้จากสมการที่ 3.3

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

หมายเหตุ :

1. น้ำหนักของพอลิเมอร์ในนาโนเลเท็กซ์ หาได้จากการตกตะกอนนาโนเลเท็กซ์ในข้อ 3.3.2
2. น้ำหนักของมอนอเมอร์หาได้จากความหนาแน่นของมอนอเมอร์ \times ปริมาตรของมอนอเมอร์
3. น้ำหนักของของผสมได้จากน้ำหนักของมอนอเมอร์ + สารลดแรงตึงผิว + สารเริ่มปฏิกิริยา + น้ำกลั่น

ร้อยละผลได้ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ในนาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.4 คำนวณได้จากสมการที่ 3.4

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

โดยร้อยละของแข็งหาได้จากสมการที่ 3.5

$$\text{ร้อยละของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์และนาโนซิลิกาในนาโนเลเท็กซ์}}{\text{น้ำหนักของนาโนเลเท็กซ์ (กรัม)}} \times 100 \quad (3.5)$$

และร้อยละของมอนอเมอร์หาได้จากสมการที่ 3.6

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

หมายเหตุ :

1. น้ำหนักของพอลิเมอร์และนาโนซิลิกาในนาโนเลเท็กซ์หาได้จากการตกตะกอนนาโนเลเท็กซ์ในข้อ 3.3.6
2. น้ำหนักของของผสมได้จากน้ำหนักของมอนอเมอร์ + สารลดแรงตึงผิว + สารเริ่มปฏิกิริยา + นาโนซิลิกา + น้ำกลั่น

3.3.7.2 ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค

นำนาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.3 และ 3.3.4 ไปวิเคราะห์หา number-average diameter (D_n) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคกระเจิงแสงแบบพลวัต (รูปที่ 3.11) ของอนุภาคต่างๆ ที่อยู่ในนาโนเลเท็กซ์ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ขนาดและการกระจายขนาดอนุภาคได้ในช่วง 0.6-6000 นาโนเมตร



รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคกระเจิงแสงแบบพลวัต (Nano-series ZX)

3.3.7.3 สัณฐานวิทยาของอนุภาคที่มีขนาดนาโนเมตร

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาคที่มีขนาดนาโนเมตรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (รูปที่ 3.12) ซึ่งดำเนินการที่ 80 kV โดยทำการเจือจางนาโนเลทเท็กซ์ด้วยน้ำกลั่นจนมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.1-0.5 โดยน้ำหนักก่อนวางตัวอย่างลงบนคอปเปอร์กริด แล้วจึงเติมด้วยยูรานิลแอซีเตต (uranyl acetate) ทับลงไป เพื่อให้พอลิเมอร์สามารถเกิด ปฏิกิริยากับแสงอิเล็กตรอนได้



รูปที่ 3.12 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Jeol JEM-2100)

3.3.8 การเตรียมนานาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน

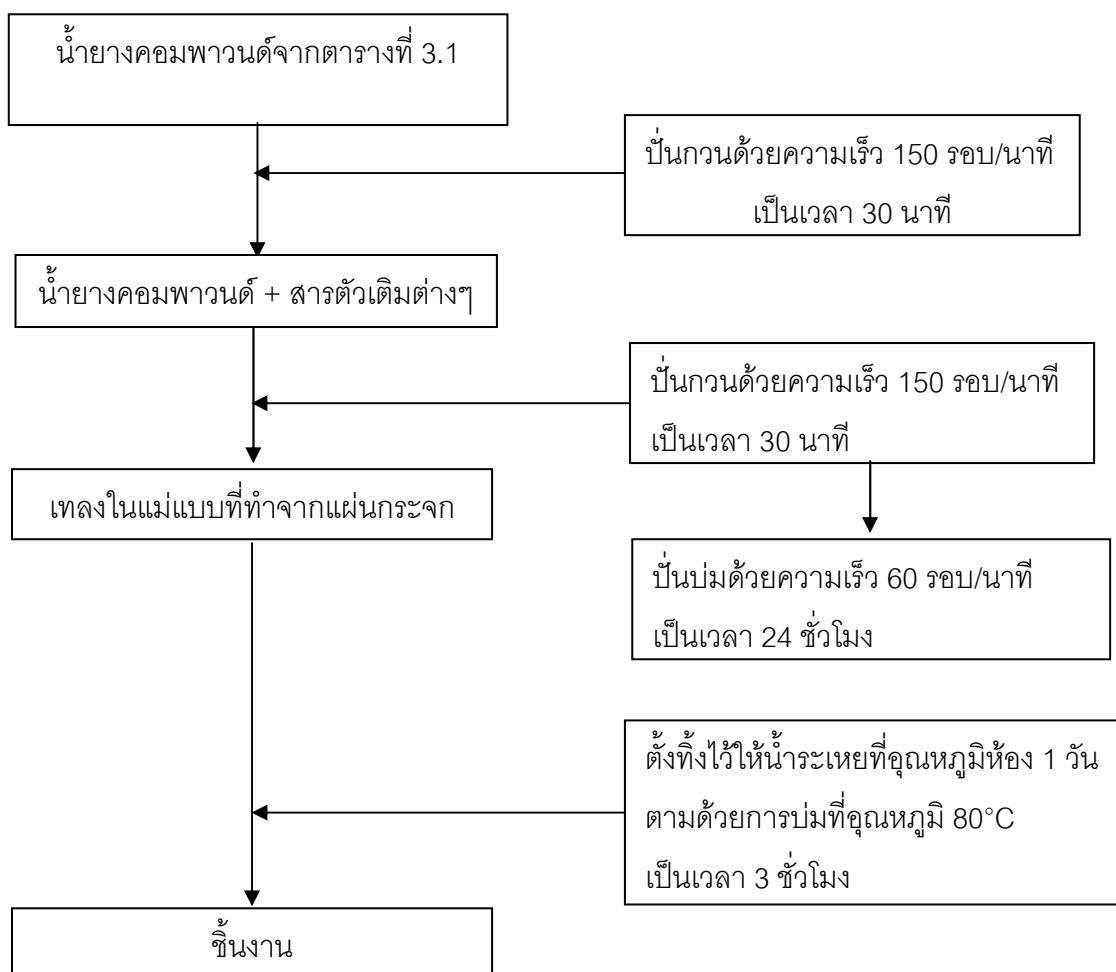
ตารางที่ 3.4 แสดงองค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนคอมพาวนด์ และรูปที่ 3.13 แสดงขั้นตอนการเตรียมนานาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน โดยการนำน้ำยางคอมพาวนด์ที่มีองค์ประกอบตามตารางที่ 3.4 มาปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกล ความเร็วสูง (รูปที่ 3.14) ที่ความเร็ว 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงเติมสารดิสเพอร์เซอร์ของสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรในปริมาณต่าง ๆ กัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.5 ลงไปปั่นกวนอีกเป็นเวลา 30 นาที ตามด้วยปั่นบ่มด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกล (รูปที่ 3.15) ที่ความเร็ว 60 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเทนาโนคอมพอสิตเลเท็กซ์ลงในแม่แบบที่มีขนาด $20 \times 20 \times 0.15$ เซนติเมตร (รูปที่ 3.16) และตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน แล้วทำการบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนคอมพาวนด์ (โดยน้ำหนักแห้ง)

| สารเคมี | ปริมาณ (phr) |
|---|--------------|
| น้ำยางธรรมชาติ (ความเข้มข้น 60%) | 80 |
| น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน (ความเข้มข้น 50.5%) | 20 |
| สารละลายโปแตสเซียมโอเลเอต (ความเข้มข้น 20%) | 0.2 |
| สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 10%) | 0.5 |
| สารดิสเพอร์เซอร์ซิลเฟออร์ (ความเข้มข้น 10%) | 1.5 |
| สารดิสเพอร์เซอร์ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (ความเข้มข้น 50%) | 1.0 |
| สารดิสเพอร์เซอร์สวิงเตย์แอลแอนติออกซิแดนต์ (ความเข้มข้น 50%) | 1.0 |
| สารดิสเพอร์เซอร์ซิงค์ออกไซด์ (ความเข้มข้น 50%) | 1.0 |

ตารางที่ 3.5 ปริมาณสารที่ใช้เตรียมน้ำยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

| สารตัวเติม | ปริมาณสารตัวเติม (ต่อยางแห้งร้อยละ) |
|-----------------------------|--|
| คาร์บอนแบล็ก | 3, 5, 7, 9 |
| คาร์บอนนาโนทิวบ์ | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 |
| นาโนซิลิกา | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 |
| พอลิสไตรีน | 1, 3, 5, 7 |
| ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน | 1, 3, 5, 7 |



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน



รูปที่ 3.14 เครื่องปั่นกวนเชิงกลความเร็วสูง



รูปที่ 3.15 เครื่องปั่นกวนเชิงกล



รูปที่ 3.16 แม่แบบที่ทำจากแผ่นกระจกขนาด $20 \times 20 \times 0.15$ เซนติเมตร

3.3.9 การเตรียมนานาคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซิเลตสไตรีน บิวทาไดอีน

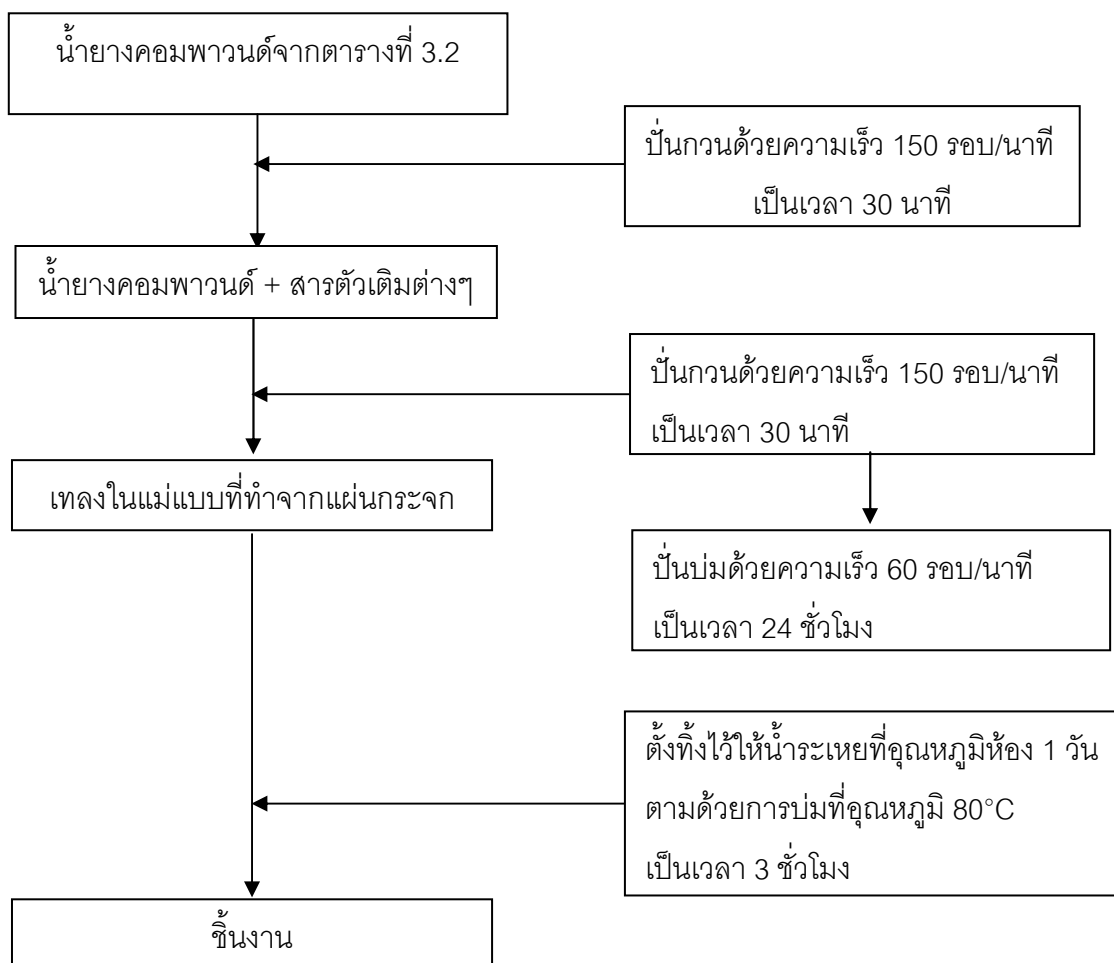
ตารางที่ 3.6 แสดงองค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซิเลตสไตรีนบิวทาไดอีนคอมพาวนด์ และรูปที่ 3.17 แสดงขั้นตอนการเตรียมนานาคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซิเลตสไตรีนบิวทาไดอีนโดยนำน้ำยางคอมพาวนด์ที่มีองค์ประกอบตามตารางที่ 3.6 มาปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกลความเร็วสูงที่ความเร็ว 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วเติมสารดิสเพอร์สของสารตัวเติมที่มีอนุภาคขนาดนาโนเมตรลงไป ปริมาณต่างๆกัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.7 ปั่นกวนอีกเป็นเวลา 30 นาที ตามด้วยปั่นบ่มด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกลที่ความเร็ว 60 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเทนาโนคอมพอสิต เลเท็กซ์ลงในแม่แบบ และตั้งทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน แล้วทำการบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.6 องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนคอมพาวนด์
(โดยน้ำหนักแห้ง)

| สารเคมี | ปริมาณ (phr) |
|--|--------------|
| น้ำยางธรรมชาติ (ความเข้มข้น 60%) | 80 |
| น้ำยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน (ความเข้มข้น 50.5%) | 20 |
| สารละลายโปแตสเซียมโอเลเอต (ความเข้มข้น 20%) | 0.2 |
| สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 10%) | 0.5 |
| สารดีสเพอร์ชันซิลิโคน (ความเข้มข้น 10%) | 1.5 |
| สารดีสเพอร์ชันซีดีไอเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (ความเข้มข้น 50%) | 1.0 |
| สารดีสเพอร์ชันสตีเรย์แอลแอนติออกซิแดนต์ (ความเข้มข้น 50%) | 1.0 |
| สารดีสเพอร์ชันซีดีออกไซด์ (ความเข้มข้น 50%) | 1.0 |

ตารางที่ 3.7 ปริมาณสารที่ใช้เตรียมน้ำยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโน-คอมพอสิต

| สารตัวเติม | ปริมาณสารตัวเติม (ส่วนต่ออย่างแห้งร้อยละ) |
|--------------------------------------|--|
| คาร์บอนแบล็ก | 3, 5, 7, 9 |
| คาร์บอนนาโนทิวบ์ | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 |
| นาโนซิลิกา | 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 |
| พอลิเมทิลเมทาคริเลต | 1, 3, 5, 7 |
| ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต | 1, 3, 5, 7 |



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีน

3.3.10 การทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต

3.3.10.1 สมบัติด้านความทนแรงดึง (Tensile properties)

การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 37 (type 2) ด้วยเครื่อง Instron testing machine (รูปที่ 3.18) เพื่อหาความทนแรงดึง (tensile strength) ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%elongation at break) และมอดุลัสที่ความเครียด 300% (modulus at 300% strain) โดยนำแผ่นยางที่เตรียมได้มาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (รูปที่ 3.19) ด้วยเครื่อง compress air sample cutter (รูปที่ 3.20) กำหนดภาวะในการทดสอบ คือ ระยะดึง (gauge length) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร ขนาดของ load cell เท่ากับ 1000 นิวตัน และทำการยืดดึงด้วยอัตราเร็วคงที่เท่ากับ 500 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.18 เครื่อง Instron testing machine (Instron 5843)



รูปที่ 3.19 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ของนาโนคอมพอสิต



รูปที่ 3.20 เครื่องตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์

3.3.10.2 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (รูปที่ 3.21) เพื่อหาเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงาน โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงมวลเทียบกับอุณหภูมิ สมบัติที่หาได้จากผลการทดลอง คือ อุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature) และปริมาณเถ้าสารที่เกิดขึ้น (% char) ของชิ้นงาน โดยนำชิ้นงานหนักประมาณ 5-20 มิลลิกรัม บรรจุในภาชนะที่ทำจากอะลูมินา แล้วทำการทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 50-1000 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (heating rate) เท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลด้วยอัตราเร็ว (gas flow rate) 20 มิลลิลิตร/นาที



รูปที่ 3.21 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (TGA/SDTA 851°)

3.3.10.3 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical properties)

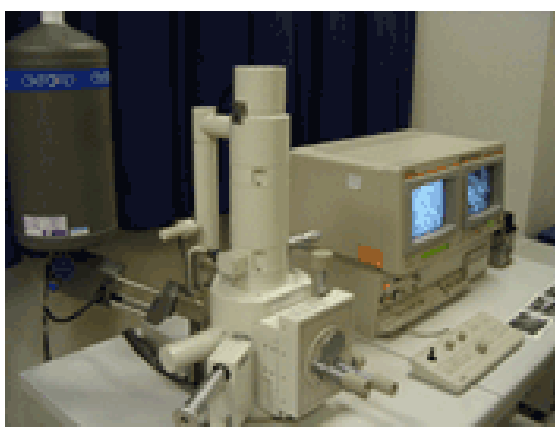
มอดุลัสสะสม (storage modulus) และอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) ของชิ้นงานสามารถหาได้จากโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (รูปที่ 3.22) โดยใช้ตัวจับแบบเฉือน (shear) เพื่อจับชิ้นงานที่มีขนาด $5 \times 5 \times 1$ มิลลิเมตร ทดสอบภายใต้ความถี่ 1 Hz ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -80 องศาเซลเซียส ถึง 140 องศาเซลเซียส โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเหลวในการลดอุณหภูมิในการทดสอบ



รูปที่ 3.22 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต (DMA/SDTA 861°)

3.3.11 การตรวจสอบสัณฐานวิทยา

ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.23) ดำเนินการที่ 15 kV โดยหักชิ้นงานในแก๊สไนโตรเจนเหลว และเคลือบผิวภาคตัดขวาง ด้วยทองคำก่อนทำการตรวจสอบ



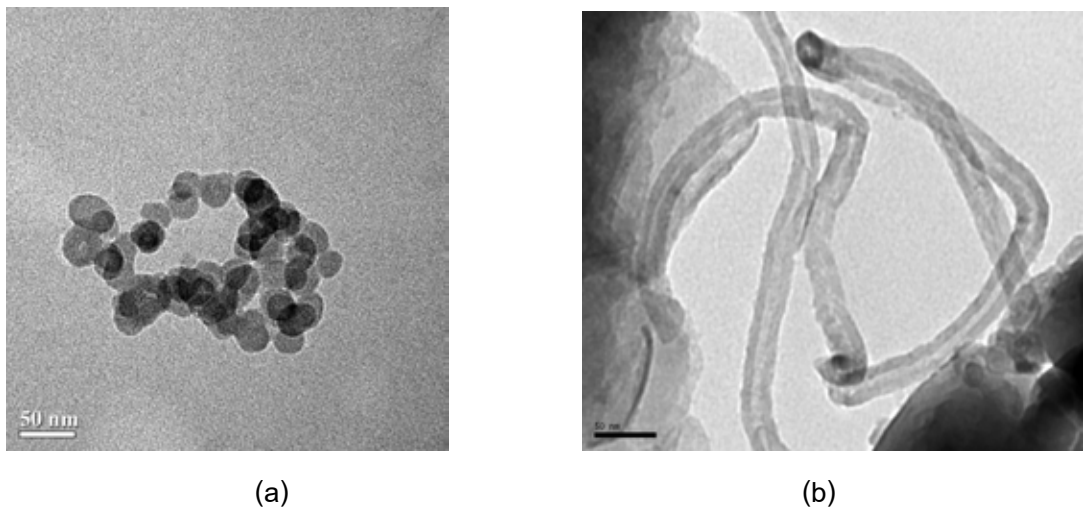
รูปที่ 3.23 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JSM-5410 LV)

บทที่ 4

ผลของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ต่อสมบัติของนาโนคอมพอสิต

4.1 สัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์

รูปที่ 4.1 แสดงสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM



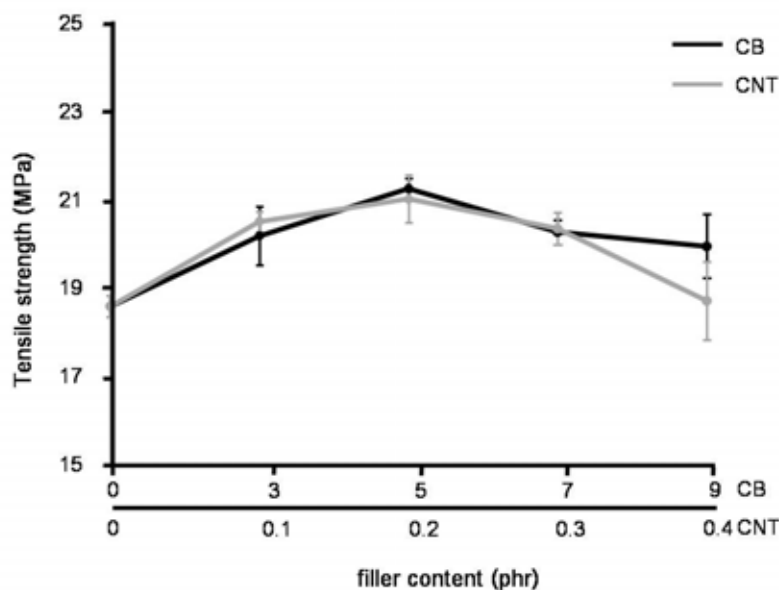
รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาของ (a) คาร์บอนแบล็ก และ (b) คาร์บอนนาโนทิวบ์

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของคาร์บอนแบล็กมีลักษณะเป็นทรงกลม โดยมีอนุภาคเฉลี่ย 26-30 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) เท่ากับ 76-80 ตร.ม./กรัม ส่วนคาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะเป็นท่อแบบผนังหลายชั้น (multi-walled structure) โดยมีอนุภาคเฉลี่ย 10-15 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 233 ตร.ม./กรัม

4.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์

4.2.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

รูปที่ 4.2 แสดงผลของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

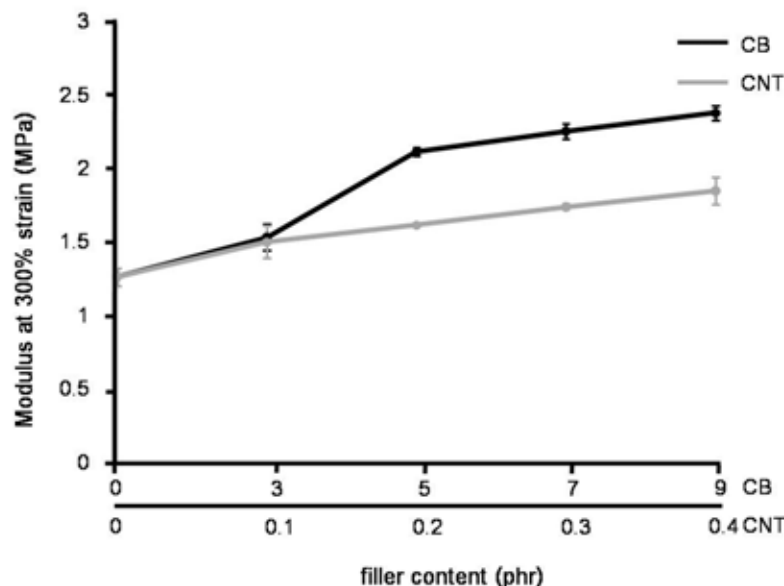


รูปที่ 4.2 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.2 พบว่าความทนแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเท่ากับ 18.6 MPa เมื่อเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์มีผลทำให้ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่คาร์บอนแบล็กปริมาณ 5 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 21.3 MPa ในขณะที่การเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ 0.2 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 21 MPa อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้มากขึ้นกว่าปริมาณ 5 phr และ 0.2 phr ตามลำดับ กลับพบว่าความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวไม่สมบูรณ์ของสารตัวเติมในน้ำยาง จึงทำให้คาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์บางส่วนเกิดการเกาะกลุ่มกันจนมี specific surface area ลดลง ซึ่งทำให้สารตัวเติมมีปฏิสัมพันธ์ (interaction) กับโมเลกุลของยางลดลง นอกจากนี้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถให้ความทนแรงดึงใกล้เคียงกับการเติมคาร์บอนแบล็กเมื่อเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณที่น้อยกว่าคาร์บอนแบล็ก 25 เท่า แสดงถึงประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่สูงกว่าคาร์บอนแบล็ก ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนนาโนทิวบ์มี aspect ratio และ specific surface area สูงกว่าคาร์บอนแบล็ก จึงทำให้คาร์บอนนาโนทิวบ์มี interaction กับโมเลกุลของยางที่ดีกว่าคาร์บอนแบล็ก

4.2.2 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 (modulus at 300% strain)

รูปที่ 4.3 แสดงผลของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อมอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

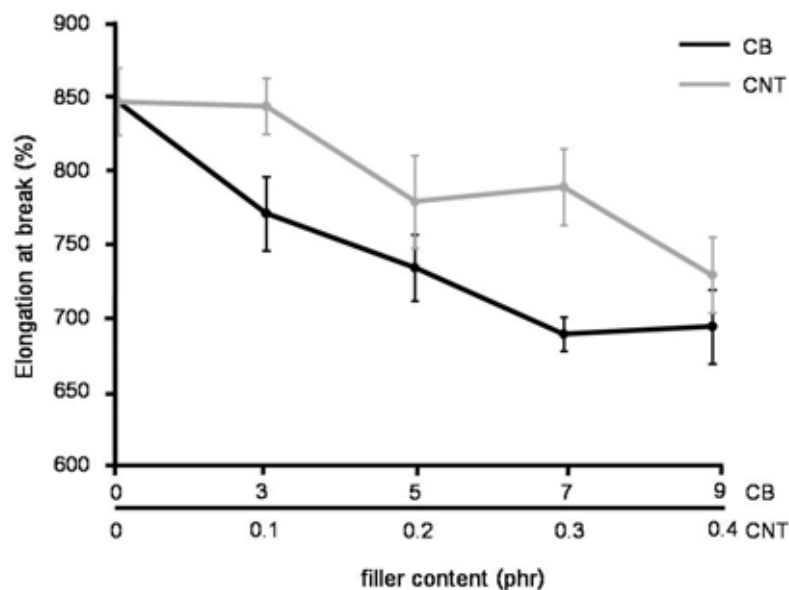


รูปที่ 4.3 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.3 พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิตสามารถปรับปรุงมอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของนาโนคอมพอสิตได้ เนื่องจากคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่มีความแข็งตึง (stiffness) กว่ายางซึ่งเป็นเมทริกซ์ จึงส่งผลให้มอดุลัสของนาโนคอมพอสิตมีค่าสูงขึ้น จากการไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยาง นอกจากนี้การเติมคาร์บอนแบล็กก็ผลทำให้นาโนคอมพอสิตมีมอดุลัสสูงกว่านาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ เนื่องจากคาร์บอนแบล็กมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์ อีกทั้งปริมาณที่เติมลงไปในนาโนคอมพอสิตมีมากกว่าปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์ จึงทำให้คาร์บอนแบล็กเกิดการขัดขวางสายโซ่โมเลกุลของยางได้มากกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์

4.2.3 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break)

รูปที่ 4.4 แสดงผลของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต



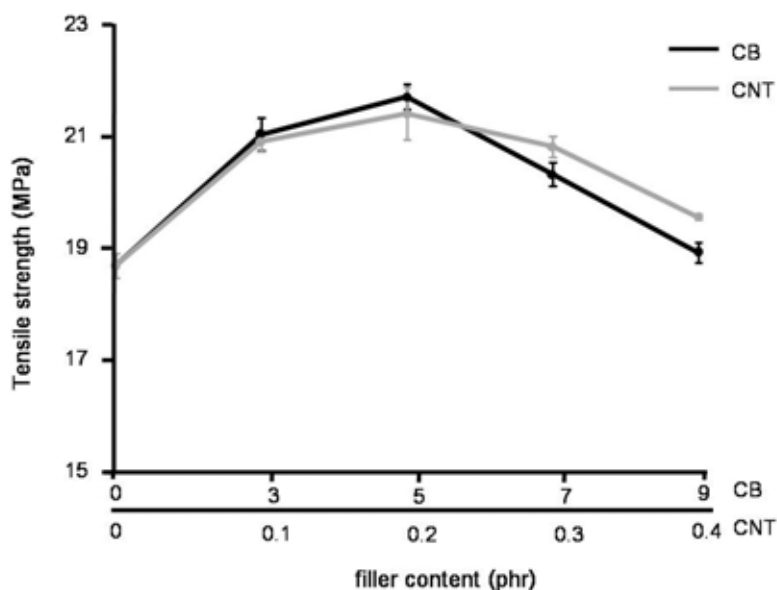
รูปที่ 4.4 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน นาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.4 พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิตทำให้ร้อยละการยืดตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง เนื่องจากยางเป็นวัสดุที่เหนียวและมีความยืดหยุ่น ในขณะที่คาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นวัสดุที่มีความแข็งตึง จึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลของยาง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์มากขึ้น ก่อให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติม ส่งผลให้นาโนคอมพอสิตมีร้อยละการยืดตัวที่ลดลง

4.3 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์

4.3.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

รูปที่ 4.5 แสดงผลของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

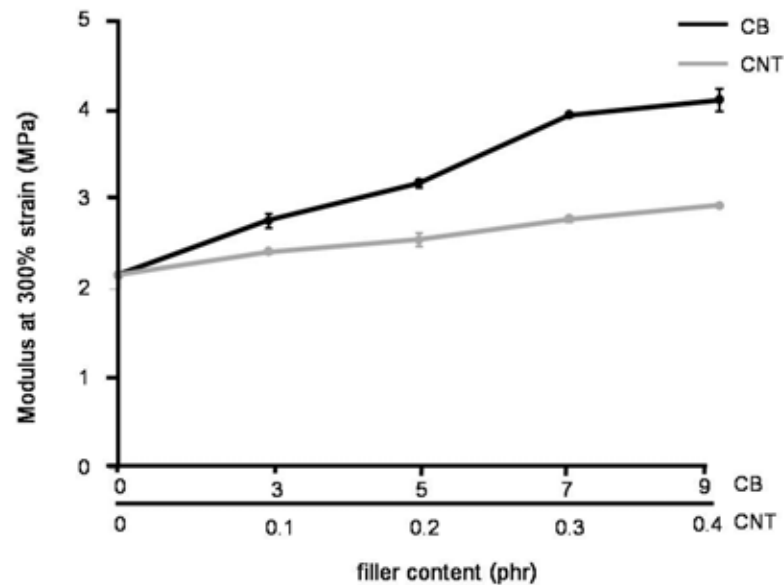


รูปที่ 4.5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.5 พบว่าความทนแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเท่ากับ 18.7 MPa เมื่อเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์มีผลทำให้ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยที่คาร์บอนแบล็กปริมาณ 5 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 21.7 MPa ในขณะที่การเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ 0.2 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 21.4 MPa อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ให้มากขึ้นกว่าปริมาณ 5 phr และ 0.2 phr ตามลำดับ กลับพบว่าความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง เช่นเดียวกับการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถให้ความทนแรงดึงใกล้เคียงกับการเติมคาร์บอนแบล็กเมื่อเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณที่น้อยกว่าคาร์บอนแบล็ก 25 เท่า แสดงถึงประสิทธิภาพในการเสริมที่ดีของคาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว

4.3.2 มอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 (modulus at 300% strain)

รูปที่ 4.6 แสดงผลของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

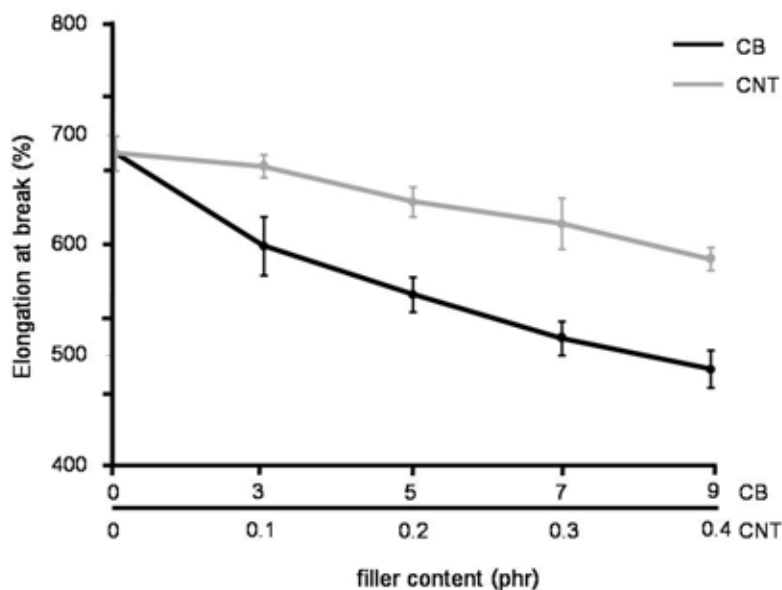


รูปที่ 4.6 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.6 พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิตสามารถปรับปรุงมอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของนาโนคอมพอสิตได้ นอกจากนี้การเติมคาร์บอนแบล็กส่งผลให้มีมอดุลัสสูงกว่าการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิต ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาแล้วในยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

4.3.3 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break)

รูปที่ 4.7 แสดงผลของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต



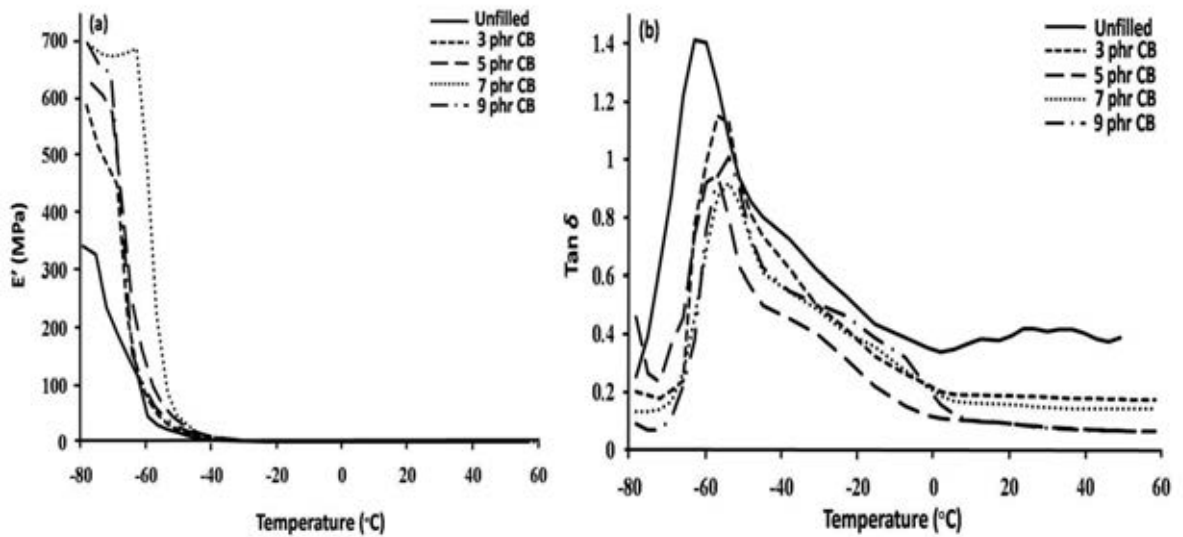
รูปที่ 4.7 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.7 พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิตทำให้ร้อยละของการยืดตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์มากขึ้น ส่งผลให้นาโนคอมพอสิตมีร้อยละการยืดตัวที่ลดลง ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาแล้วในยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

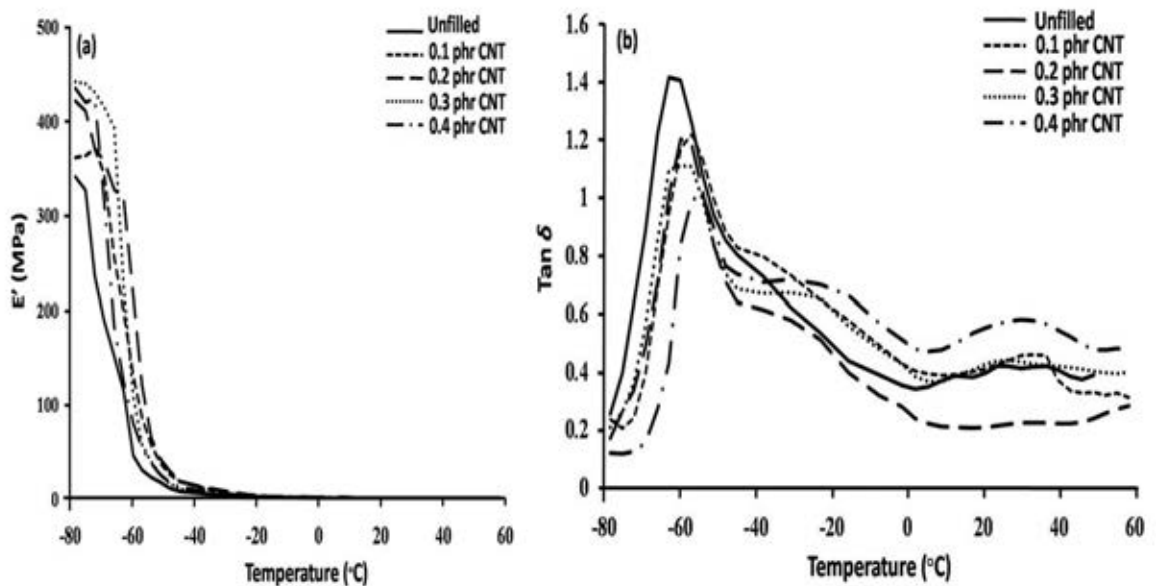
4.4 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์

4.4.1 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical property)

รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงเทอร์โมแกรมสมบัติเชิงกลพลวัตของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent



รูปที่ 4.9 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่อมอดุลัสสะสม (storage modulus, E') นอกจากนี้ยังปรากฏฟีกของกราฟ แทนเจนต์สูญเสีย (Loss tangent) 2 ฟีก ได้แก่ที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส และ -35 องศาเซลเซียส แสดง

ถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน ตามลำดับ โดยค่ามอดุลัส
 สะสม E' ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียสและค่า T_g ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

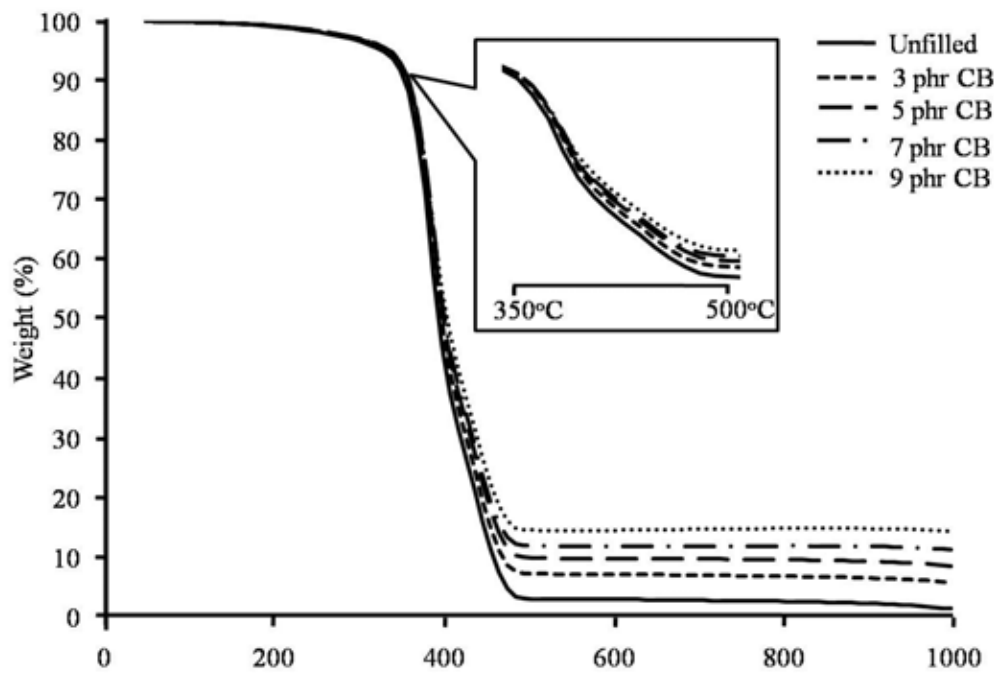
ตารางที่ 4.1 ค่า storage modulus และ T_g ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต
 ที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | Storage modulus (E' , MPa) at -80°C | T_g (°C) from $\tan \delta_{max}$ | |
|-------------|---|-------------------------------------|-----------|
| | | NR phase | SBR phase |
| Unfilled | 340.64 | -60 | -35 |
| 3 phr CB | 586.56 | -52 | -33 |
| 5 phr CB | 624.64 | -55 | -27 |
| 7 phr CB | 695.18 | -50 | -27 |
| 9 phr CB | 687.75 | -49 | -22 |
| 0.1 phr CNT | 361.05 | -53 | -34 |
| 0.2 phr CNT | 421.33 | -55 | -29 |
| 0.3 phr CNT | 434.41 | -57 | -23 |
| 0.4 phr CNT | 441.65 | -52 | -21 |

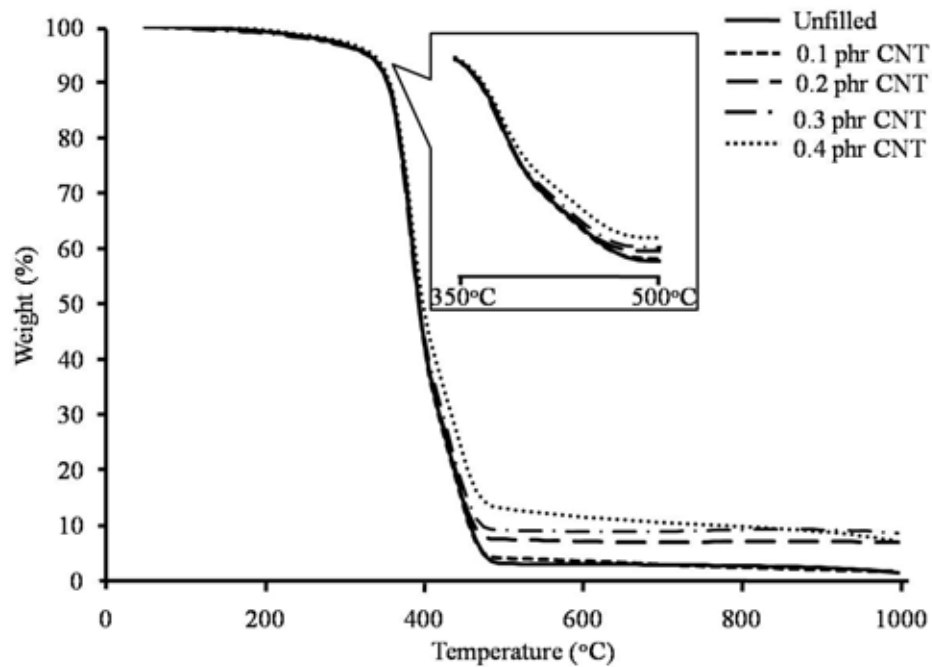
จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโน-
 คอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้ T_g ของยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเพิ่มมากขึ้น
 เนื่องจากการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยางถูกขัดขวางจากคาร์บอนแบล็กและคาร์บอน
 นาโนทิวบ์ โดยสังเกตจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ของยางธรรมชาติ พบว่า E' ของนาโนคอมพอสิตมี
 ค่าสูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งตึง
 ของสายโซ่โมเลกุลของยาง นอกจากนี้ค่า E' ของนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กมีค่าสูงกว่า
 ค่า E' ของนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนแบล็กมีขนาดอนุภาคที่
 ใหญ่และมีปริมาณที่สูงกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์จึงเป็นสาเหตุให้คาร์บอนแบล็กสามารถเข้าไป
 ขัดขวางสายโซ่โมเลกุลของยางได้มากกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์

4.4.2 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน
 นาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.10 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.11 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ โดยอุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

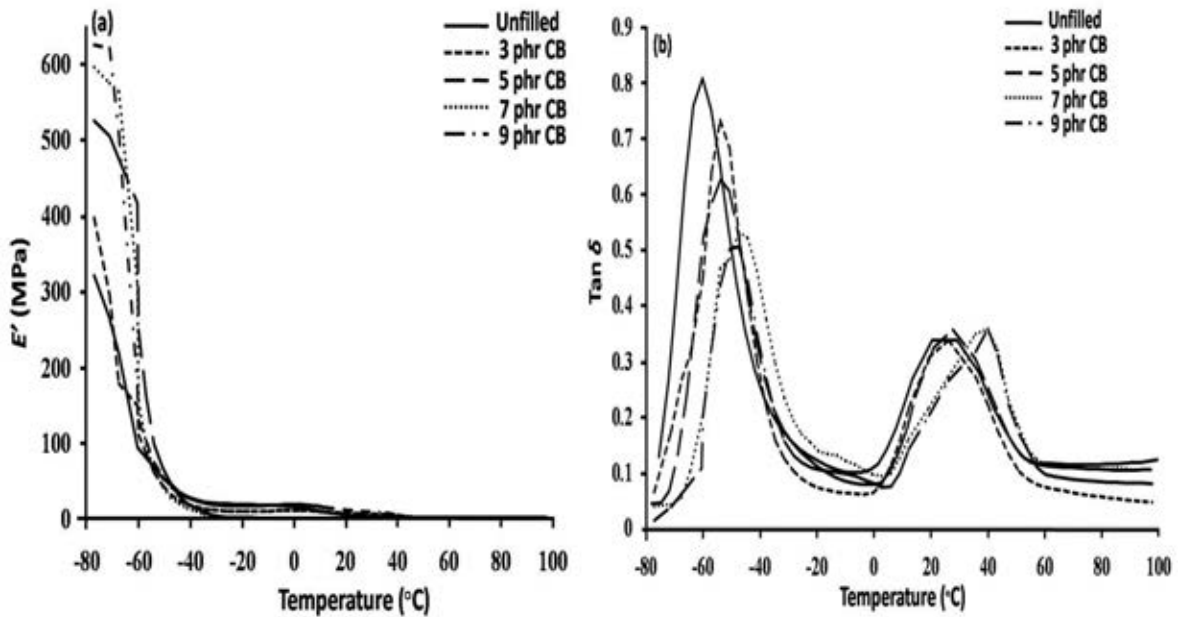
| Sample | T _{Onset} (°C) | T _{Endset} (°C) | Char (%) |
|-------------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Unfilled | 360.68 | 421.85 | 2.89 |
| 3 phr CB | 371.89 | 415.36 | 7.06 |
| 5 phr CB | 369.19 | 419.90 | 9.77 |
| 7 phr CB | 366.59 | 426.78 | 11.89 |
| 9 phr CB | 364.60 | 433.02 | 14.56 |
| 0.1 phr CNT | 361.87 | 421.61 | 3.38 |
| 0.2 phr CNT | 364.73 | 419.71 | 6.86 |
| 0.3 phr CNT | 362.24 | 423.12 | 8.74 |
| 0.4 phr CNT | 362.07 | 424.03 | 11.24 |

จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตเพิ่มมากขึ้น 4-12 องศาเซลเซียส และ 2-4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นสารอนินทรีย์ จึงสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดเถ้าชาร์ขึ้นมาปกคลุมผิวของชิ้นงาน กลายเป็นฉนวนความร้อน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณเถ้าชาร์ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณคาร์บอนแบล็กที่เติมลงไปมีมากกว่าปริมาณคาร์บอนนาโนทิวบ์

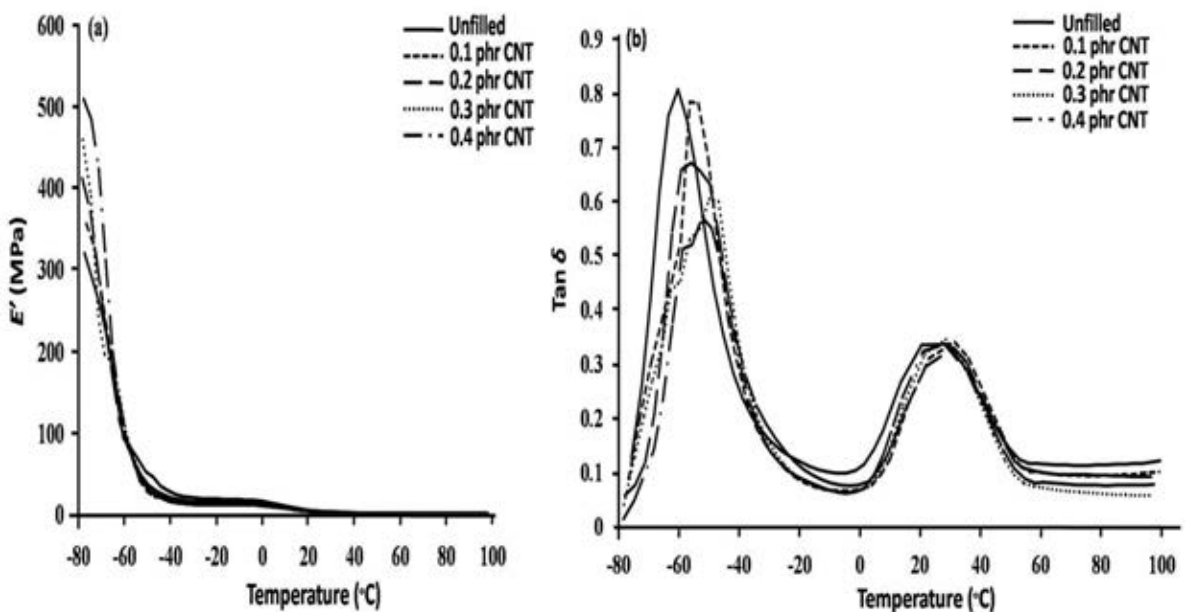
4.5 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์

4.5.1 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical property)

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงเทอร์โมแกรมสมบัติเชิงกลพลวัตของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent



รูปที่ 4.13 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวป์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวป์ในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่อมอดูลัสสะสม (storage modulus, E') นอกจากนี้ยังปรากฏฟีกของกราฟแทนเจนต์สูญเสีย (Loss tangent) 2 ฟีก ได้แก่ที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส และ 30 องศาเซลเซียส

แสดงถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของยางธรรมชาติและยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนตามลำดับ โดยค่ามอดุลัสสะสม E' ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียสและค่า T_g ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

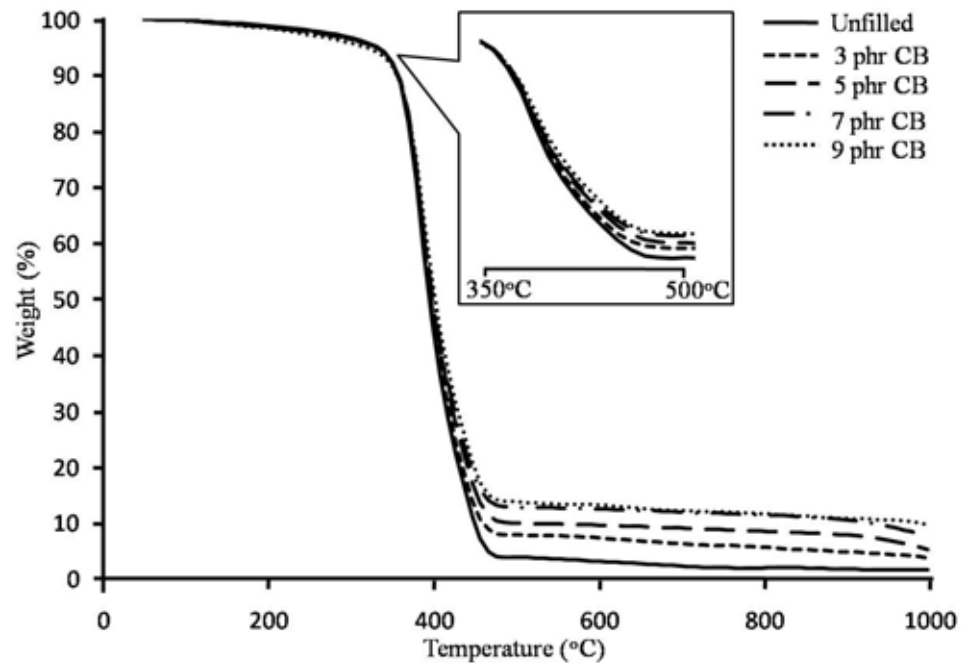
ตารางที่ 4.3 ค่า storage modulus และ T_g ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | Storage modulus (E' , MPa) at -80°C | T_g ($^\circ\text{C}$) from $\tan \delta_{\max}$ | |
|-------------|---|--|------------|
| | | NR phase | XSBR phase |
| Unfilled | 319.88 | -60 | 30 |
| 3 phr CB | 396.22 | -52 | 34.4 |
| 5 phr CB | 524.64 | -55 | 36.7 |
| 7 phr CB | 595.18 | -50 | 47.2 |
| 9 phr CB | 624.47 | -49 | 50.0 |
| 0.1 phr CNT | 355.77 | -53 | 30.5 |
| 0.2 phr CNT | 411.23 | -55 | 34.6 |
| 0.3 phr CNT | 458.82 | -57 | 35.3 |
| 0.4 phr CNT | 508.97 | -52 | 36 |

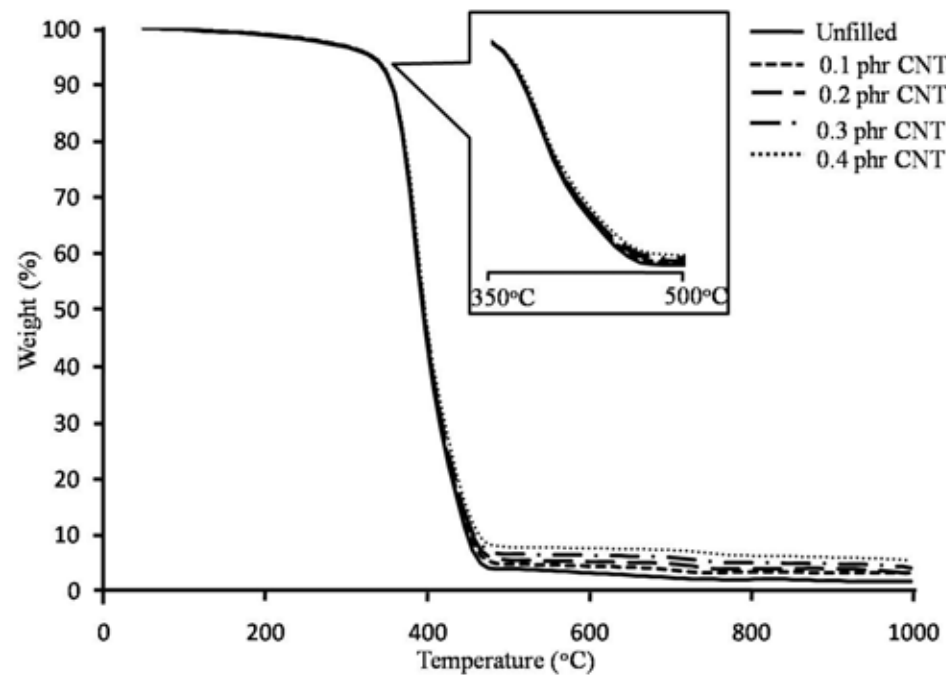
จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้ T_g ของยางธรรมชาติและยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความแข็งดึงของสายโซ่โมเลกุลของยางถูกขัดขวางด้วยสารตัวเติม โดยสังเกตจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ของยางธรรมชาติ พบว่า E' ของนาโนคอมพอสิตมีค่าสูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีน นอกจากนี้ค่า E' ของนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กมีค่าสูงกว่าค่า E' ของนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ เนื่องจากขนาดและปริมาณของคาร์บอนแบล็กที่สูงกว่า ดังที่กล่าวมาแล้วในยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

4.5.2 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

รูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.14 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กที่ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 4.15 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ โดยอุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

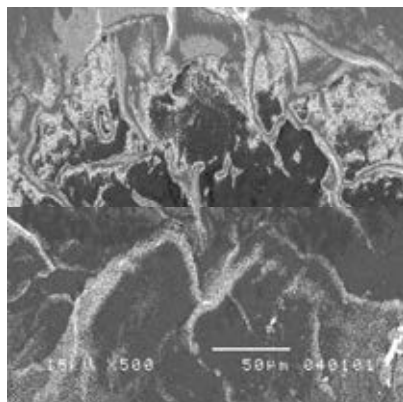
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | T _{Onset} (°C) | T _{Endset} (°C) | Char (%) |
|-------------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Unfilled | 350.44 | 454.57 | 3.45 |
| 3 phr CB | 354.26 | 455.02 | 7.76 |
| 5 phr CB | 357.70 | 460.00 | 9.89 |
| 7 phr CB | 360.40 | 461.92 | 12.60 |
| 9 phr CB | 363.05 | 462.36 | 13.29 |
| 0.1 phr CNT | 352.88 | 455.08 | 4.46 |
| 0.2 phr CNT | 355.54 | 458.26 | 5.37 |
| 0.3 phr CNT | 358.52 | 459.23 | 6.40 |
| 0.4 phr CNT | 360.40 | 460.31 | 7.66 |

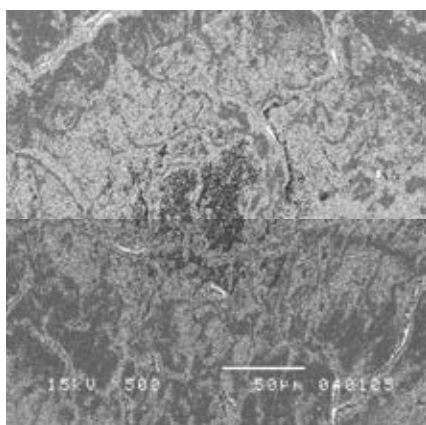
จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในนาโนคอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตเพิ่มมากขึ้น 4-13 องศาเซลเซียส และ 3-10 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากนาโนคอมพอสิตถูกเหนี่ยวนำให้เกิดเถ้าชาร์ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณเถ้าชาร์ที่เกิดขึ้น นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาแล้วในยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

4.6 สัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์

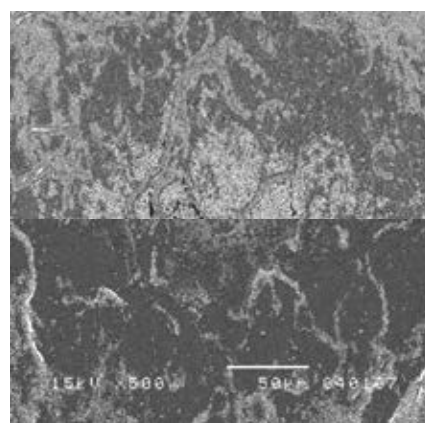
รูปที่ 4.16 แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 500 เท่า



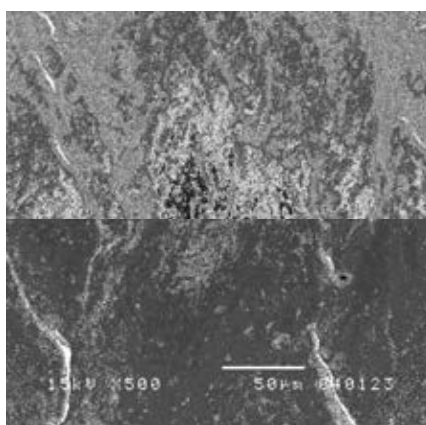
NR/SBR



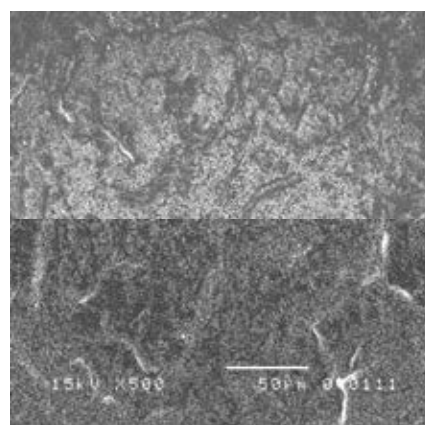
NR/SBR/3CB



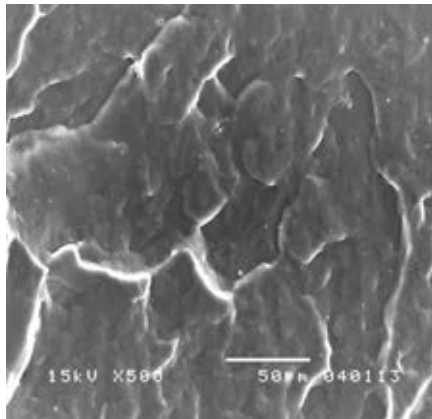
NR/SBR/5CB



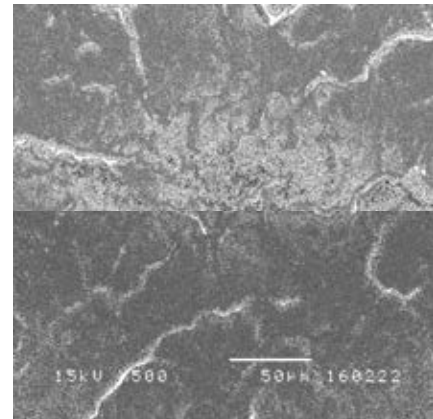
NR/SBR/7CB



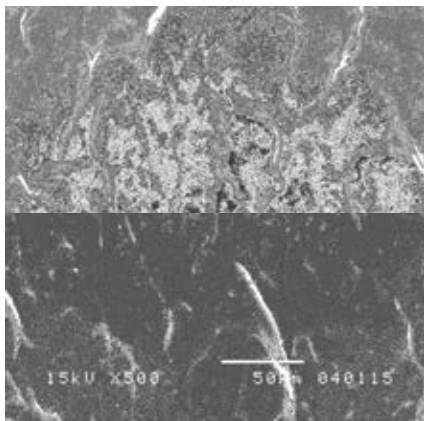
NR/SBR/9CB



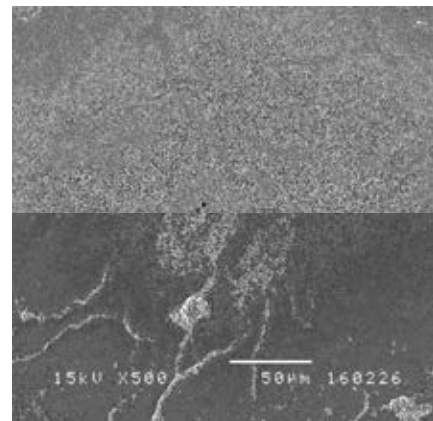
NR/SBR/0.1CNT



NR/SBR/0.2CNT



NR/SBR/0.3CNT



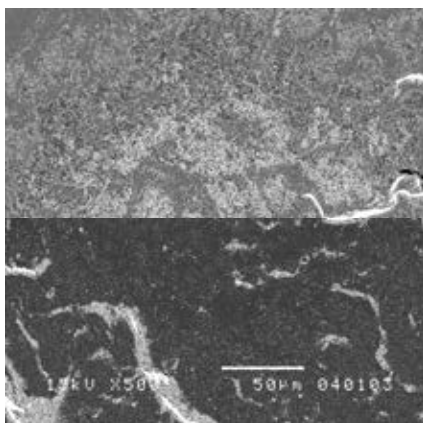
NR/SBR/0.4CNT

รูปที่ 4.16 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

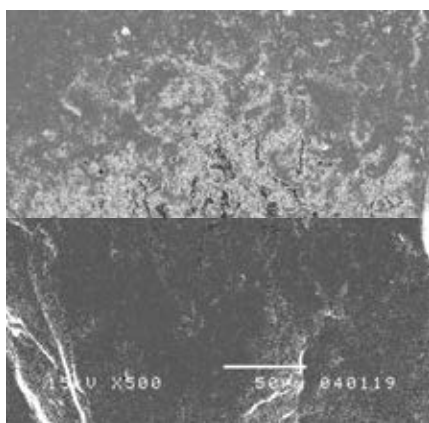
จากรูปที่ 4.16 พบว่าการเติมสารตัวเติมทั้งคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณตั้งแต่ 7 phr และ 0.3 phr ตามลำดับ มีผลทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนและมีการกระจายตัวไม่ดีในเมทริกซ์ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

4.7 สัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์

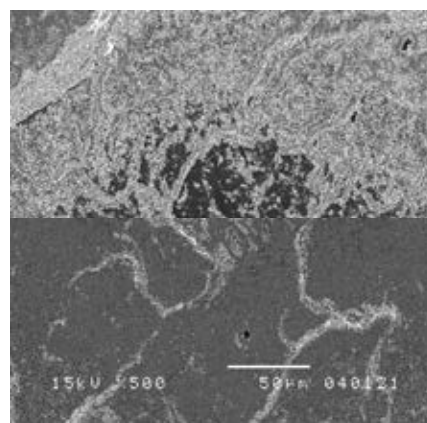
รูปที่ 4.17 แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 500 เท่า



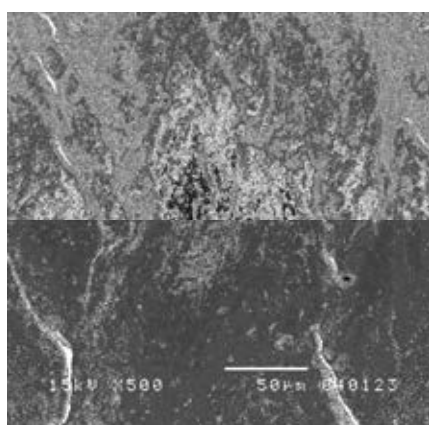
NR/XSBR



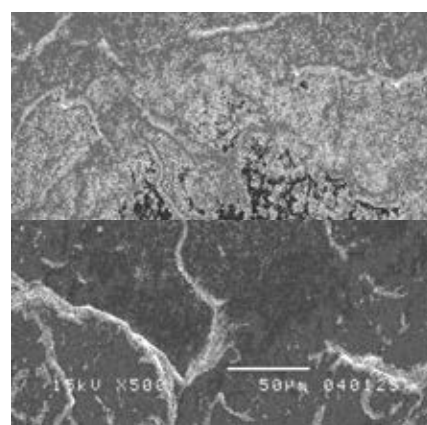
NR/XSBR/3CB



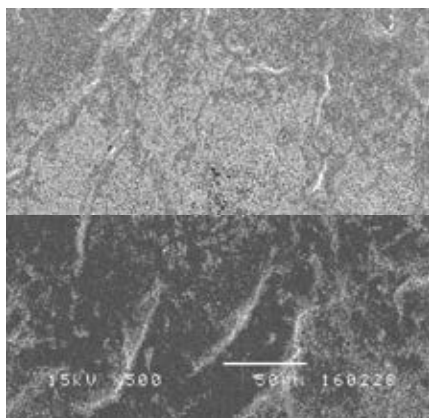
NR/XSBR/5CB



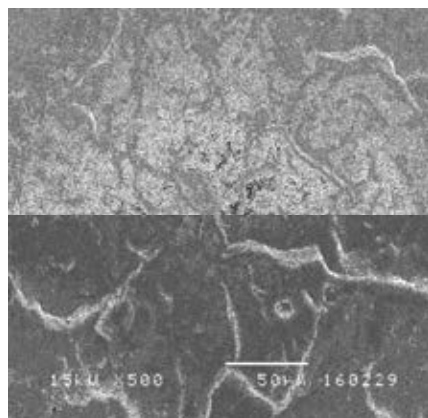
NR/XSBR/7CB



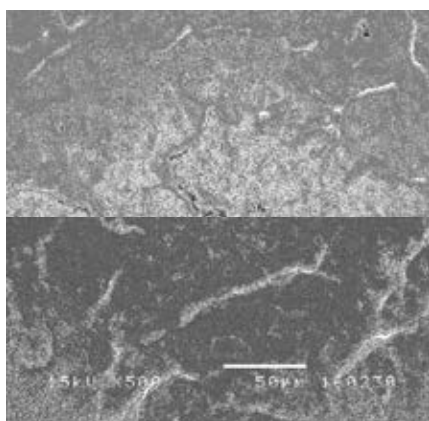
NR/XSBR/9CB



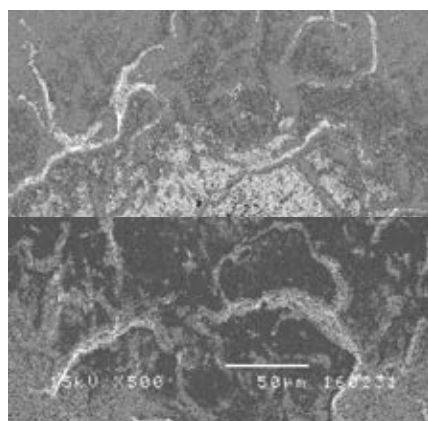
NR/XSBR/0.1CNT



NR/XSBR/0.2CNT



NR/XSBR/0.3CNT



NR/XSBR/0.4CNT

รูปที่ 4.17 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน นาโนคอมพอสิตที่ปริมาณคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.17 พบว่าการเติมสารตัวเติมทั้งคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ที่ ปริมาณตั้งแต่ 7 phr และ 0.3 phr ตามลำดับมีผลทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันและมีการกระจายตัว ไม่ดีในเมทริกซ์ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

4.8 สรุปผลการทดลอง

4.8.1 จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่อง TEM พบว่าคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์มีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยคาร์บอนนาโนทิวบ์ มี aspect ratio และ specific surface area ที่สูงกว่าคาร์บอนแบล็ก

4.8.2 การเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงความทนแรงดึง และมอดูลัสของนาโนคอมพอสิตได้ โดยการเติมคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณที่น้อยกว่าปริมาณคาร์บอนแบล็ก 25 เท่า สามารถให้สมบัติความทนแรงดึงที่เทียบเคียงกัน

4.8.3 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลพลวัตของนาโนคอมพอสิตได้ โดยการเติมคาร์บอนแบล็กส่งผลต่อสมบัติเชิงกลพลวัตมากกว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์

4.8.4 จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต โดยอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นประมาณ 4-13 องศาเซลเซียสและ 2-10 องศาเซลเซียสตามลำดับ

4.8.5 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่าคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์มีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของยางเมื่อทำการเติมในปริมาณที่เหมาะสม แต่เมื่อมีการเติมคาร์บอนแบล็กและคาร์บอนนาโนทิวบ์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะพบการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองสมบัติเชิงกล

บทที่ 5

ผลของนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์

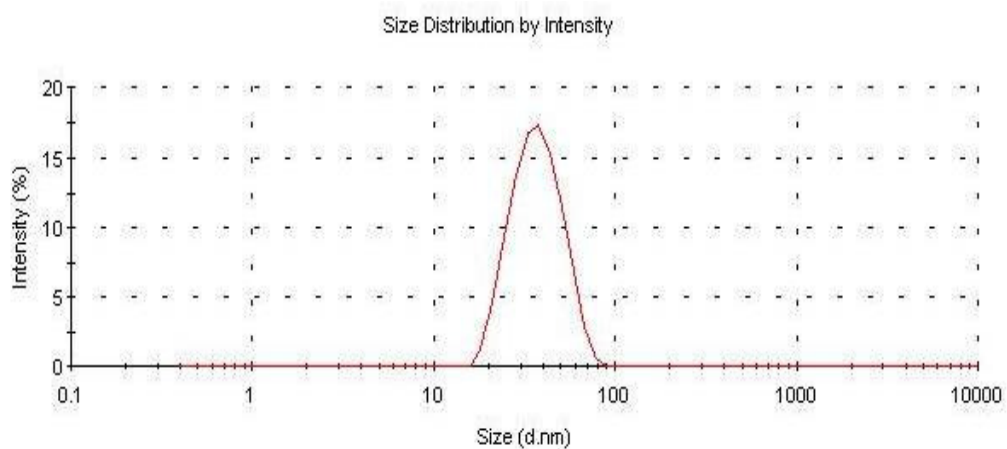
ต่อสมบัติของนาโนคอมพอสิต

5.1 นาโนเลเท็กซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน

ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 5.1 โดยร้อยละผลได้ (% yield) มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 95.7 และขนาดอนุภาคเฉลี่ย (particle size) มีค่าเท่ากับ 38 นาโนเมตร มีการกระจายขนาดดังแสดงในรูปที่ 5.2



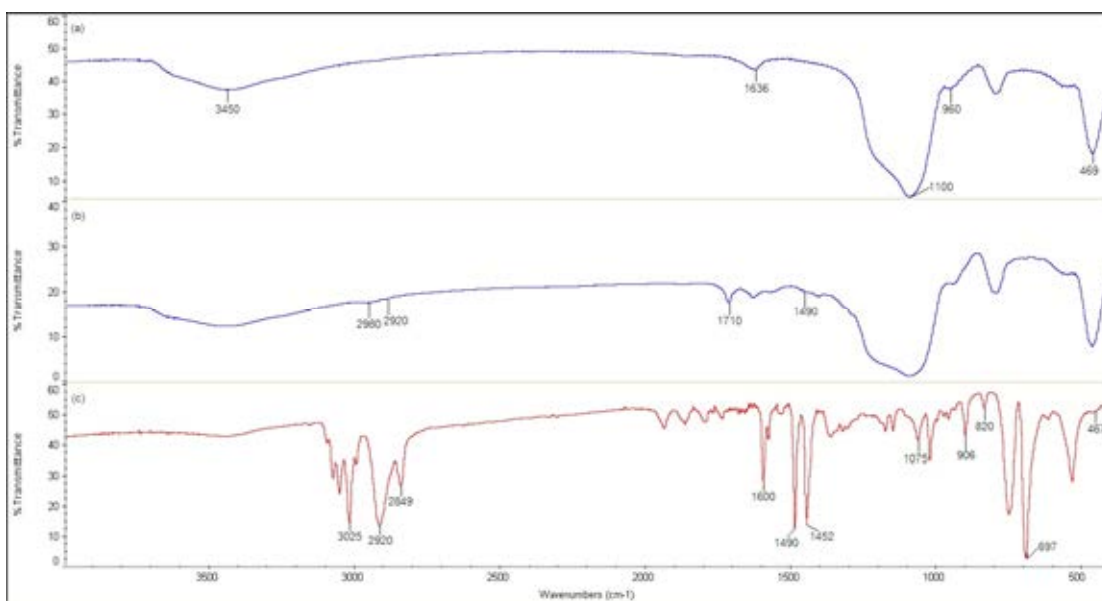
รูปที่ 5.1 ตัวอย่างของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์



รูปที่ 5.2 การกระจายขนาดอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน

5.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

รูปที่ 5.3 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนซิลิกา อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วย MPTMS และอนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน ด้วยเทคนิค FT-IR โดยตารางที่ 5.1 แสดงค่าเลขคลื่น (wave number) ของหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 5.3 FT-IR สเปกตรัมของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา (b) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วย MPTMS (c) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน

จากรูปที่ 5.3(a) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลิกา ตรวจพบพีกของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ที่เลขคลื่น 1100 และ 469 cm^{-1} พีกหมู่ฟังก์ชัน Si-OH บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาที่เลขคลื่น 960 cm^{-1} และพีกของหมู่ฟังก์ชัน -OH group ที่เลขคลื่น 3450 cm^{-1}

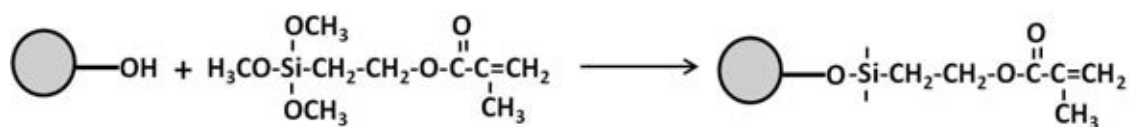
จากรูปที่ 5.3(b) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วย MPTMS ตรวจพบพีกของหมู่ฟังก์ชัน $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$, C=O และ C=C เกิดเพิ่มขึ้นที่เลขคลื่น 2980, 2920, 1710 และ 1490 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของสารคู่ควบ MPTMS เข้าทำปฏิกิริยากันหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา ดังแสดงในรูปที่ 5.4 จึงเป็นการยืนยันการเกาะติดของ MPTMS บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา

จากรูปที่ 5.3(c) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน ตรวจพบพีกหมู่ฟังก์ชันที่แสดงสเปกตรัมของพอลิสไตรีน ได้แก่ พีกของ C-H arom ที่เลขคลื่น 3025 cm^{-1} , พีกของ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2$ ที่เลขคลื่น 2920 cm^{-1} และ 2849 cm^{-1} , พีกของ C=C arom ที่เลข

คลื่น 1600 cm^{-1} , พีคของ $-\text{C}_6\text{H}_5$ ที่เลขคลื่น 1490 cm^{-1} และ 1452 cm^{-1} และพีคของ $-\text{CH}=\text{arom}$ in plane ที่เลขคลื่น 906 cm^{-1} และ 697 cm^{-1} นอกจากนี้ยังตรวจพบพีคของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ที่เลขคลื่น 1075 cm^{-1} และ 467 cm^{-1} และพีคของ Si-O-C ที่เลขคลื่น 820 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการเกาะติดของพอลิไตรีนบนพื้นผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีสารคู่ควบ MPTMS เป็นสารเชื่อมประสาน [46]

ตารางที่ 5.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกา MPTMS และพอลิไตรีน [46]

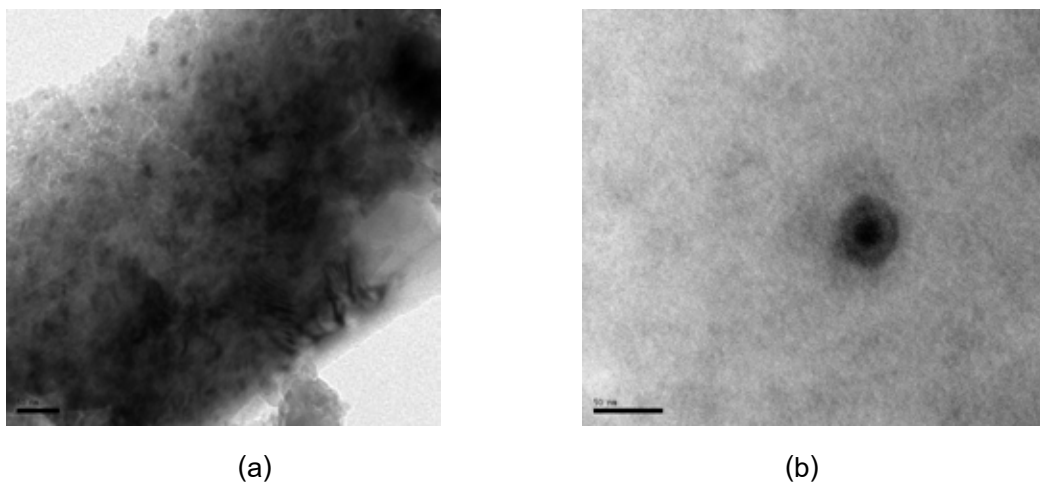
| Wavenumber (cm^{-1}) | ซิลิกา | MPTMS | MPTMS |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|--|
| 3049 | -OH | | |
| 1100 | Si-O-Si stretching | | |
| 956 | Si-OH stretching | | |
| 471 | Si-O-Si bending | | |
| 2982 | | $-\text{CH}_3$ | |
| 2926 | | $-\text{CH}_2$ | |
| 1710 | | $\text{C}=\text{O}$ | |
| 1640 | | $\text{C}=\text{C}$ | |
| 1100 | | Si-O-Si asym | |
| 821 | | Si-O-C | |
| 3024 | | | $-\text{CH}=\text{aromatic}$ |
| 2921, 2847 | | | $-\text{CH}_2-\text{CH}_2$ |
| 1601 | | | $-\text{C}=\text{C aromatic}$ |
| 1492, 1452 | | | $-\text{C}_6\text{H}_5$ |
| 1200 | | | $-\text{CH}=\text{aromatic, out of plane}$ |
| 906, 697 | | | $-\text{CH}=\text{aromatic, in of plane}$ |



รูปที่ 5.4 การดัดแปรผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลีน MPTMS

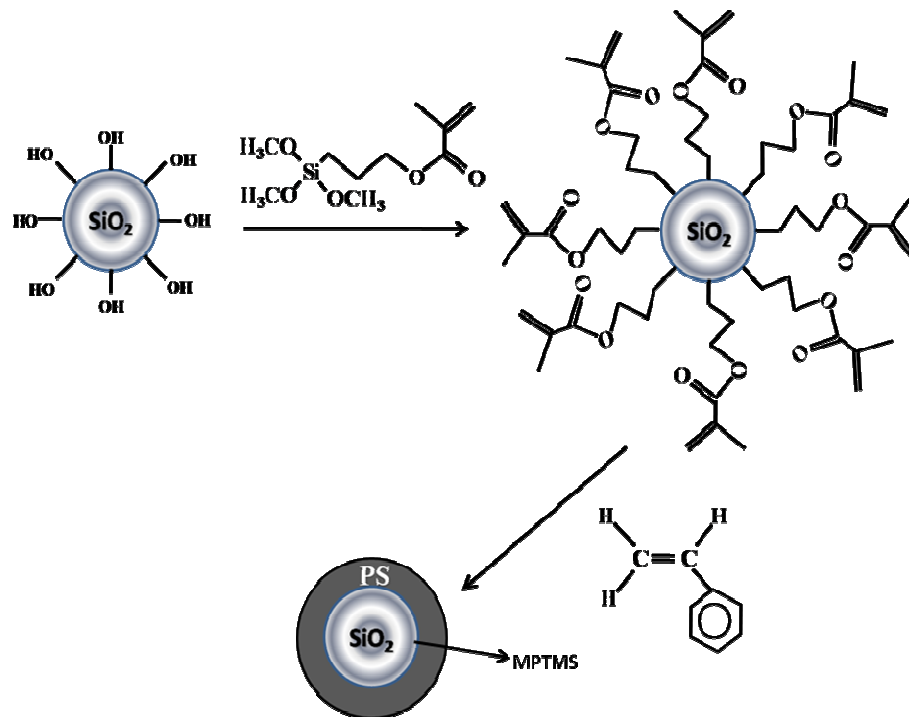
5.1.2 สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาและอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน

รูปที่ 5.5 แสดงสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาและอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM



รูปที่ 5.5 สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา และ (b) อนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน

จากรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของนาโนซิลิกามีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็กที่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ โดยมีอนุภาคเฉลี่ย 10-20 นาโนเมตร ส่วนอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนมีลักษณะเป็น 'คอร์-เชลล์' (core-shell structure) โดยมีอนุภาคนาโนซิลิกา (สีดำ) เป็นแก่น (core) และถูกล้อมรอบด้วยชั้น (shell) ของพอลิสไตรีน (สีเทา) บางๆ ซึ่งมีกลไกการห่อหุ้ม ดังแสดงรูปที่ 5.6



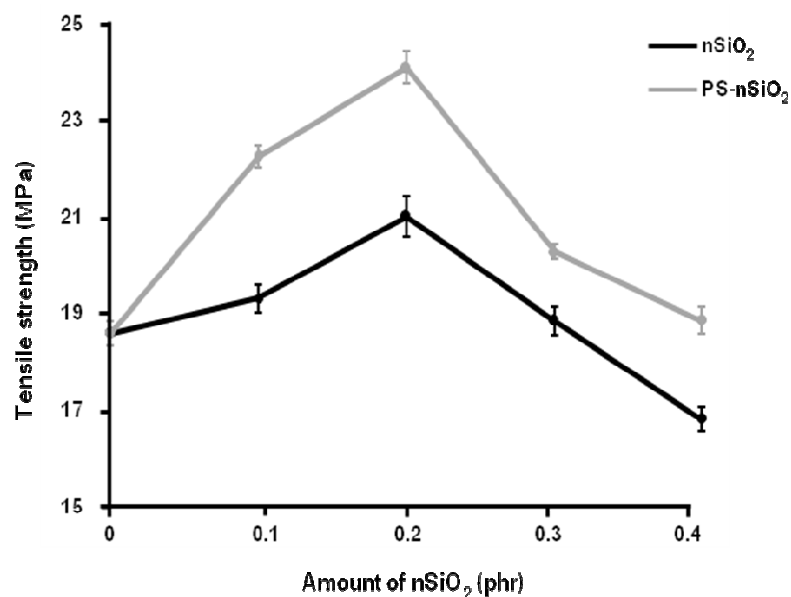
รูปที่ 5.6 กลไกการห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยพอลิสไตรีนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ

'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

5.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกา และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์

5.2.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

รูปที่ 5.7 แสดงผลของนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณ ต่างๆ ต่อความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

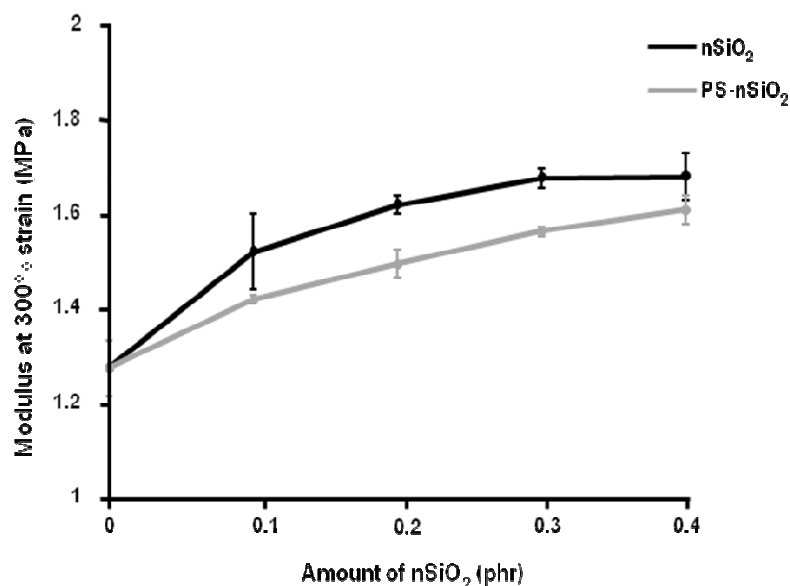


รูปที่ 5.7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ในปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.7 พบว่าความทนแรงดึงของยางผลระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเท่ากับ 18.6 MPa เมื่อเติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์มีผลทำให้ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยการเติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณ 0.2 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 21 MPa ในขณะที่การเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่มีปริมาณนาโนซิลิกา 0.2 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 24.1 MPa อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ให้มากขึ้น กลับพบว่าความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวไม่สมบูรณ์ของสารตัวเติมในน้ำยาง จึงทำให้นาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์บางส่วนเกิดการเกาะกลุ่มกันจนมี specific surface area ลดลง ซึ่งทำให้สารตัวเติมมี interaction กับโมเลกุลของยางลดลง นอกจากนี้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ในปริมาณที่มีนาโนซิลิกาเท่ากัน พบว่าสามารถให้ความทนแรงดึงสูงกว่า เมื่อเทียบกับการเติมนาโนซิลิกาที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้ม โดยซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนแสดงประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ดี เนื่องจากโมเลกุลของพอลิสไตรีนสามารถป้องกันการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) ของอนุภาคนาโนซิลิกา จึงส่งผลให้มีการกระจายตัวได้สม่ำเสมอมากขึ้น นอกจากนี้พอลิสไตรีนที่ห่อหุ้มบนอนุภาคนาโนซิลิกาทำให้เกิด interaction กับโมเลกุลของยางที่ดีขึ้น เนื่องจากมีเมทริกซ์ยางบางส่วนเป็นยางสไตรีนบิวทาไดอีน

5.2.2 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 (modulus at 300% strain)

รูปที่ 5.8 แสดงผลของนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टไทรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อมอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

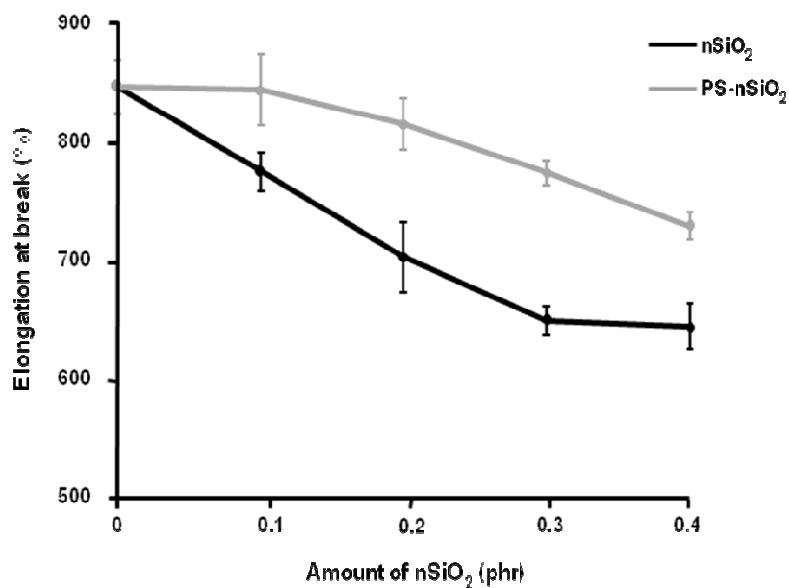


รูปที่ 5.8 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टไทรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.8 พบว่าการเติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टไทรีนนาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิต สามารถปรับปรุงมอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของนาโนคอมพอสิตได้ เนื่องจากความแข็งตัวของสารตัวเติม นอกจากนี้ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टไทรีนนาโนเลเท็กซ์ทำให้นาโนคอมพอสิตมีมอดุลัสต่ำกว่าการเติมนาโนซิลิกาที่ไม่ได้ห่อหุ้ม เนื่องจากสายโซ่ของพอลิस्टไทรีนที่ห่อหุมนาโนซิลิกาสามารถช่วยให้เกิดปริมาตรอิสระ (free volume) ภายในเมทริกซ์ของยางเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น จึงทำให้นาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टไทรีนนาโนเลเท็กซ์มีความยืดหยุ่น และมอดุลัสที่ต่ำกว่า

5.2.3 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break)

รูปที่ 5.9 แสดงผลของนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टไทรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต



รูปที่ 5.9 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน

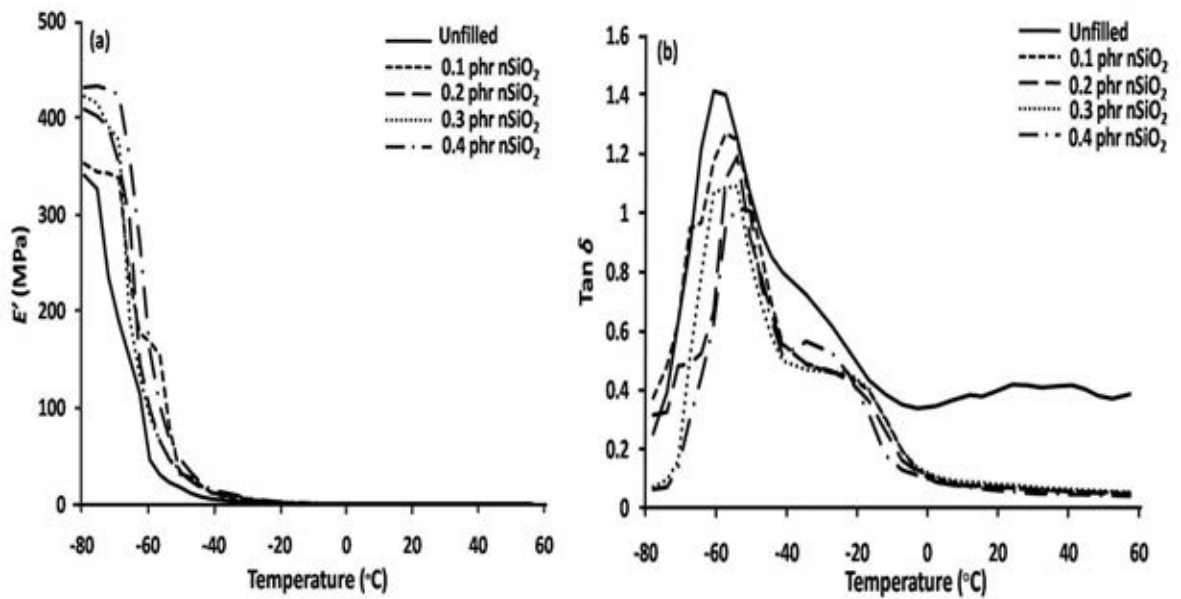
นาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์
ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.9 พบว่าการเติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ใน
นาโนคอมพอสิต ทำให้ร้อยละการยืดตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง เนื่องจากความแข็งตึงของ
สารตัวเติม นอกจากนี้ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโน-
เลเท็กซ์ทำให้นาโนคอมพอสิตมีร้อยละการยืดตัวที่สูงกว่าการเติมนาโนซิลิกาที่ไม่ถูกห่อหุ้ม
เนื่องจากเกิดการเพิ่ม free volume ในสายโซ่โมเลกุลของยาง โดยสายโซ่โมเลกุลของพอลิสไตรีนที่
ห่อหุ้มนาโนซิลิกา ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบมอดุลัส

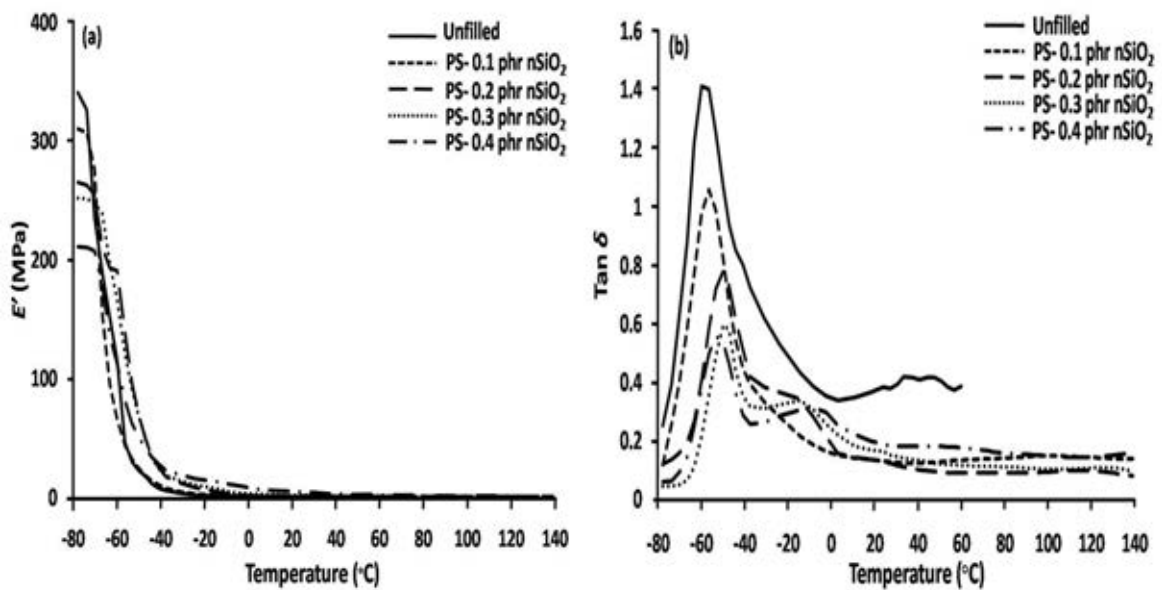
5.3 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์

5.3.1 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical property)

รูปที่ 5.10 และ 5.11 แสดงเทอร์โมแกรมสมบัติเชิงกลพลวัตของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีน
บิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่
ปริมาณต่างๆ ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent



รูปที่ 5.11 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาหล่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลทเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent

จากรูปที่ 5.10 และ 5.11 พบว่าการเติมนาโนซิลิกาและซิลิกาหล่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลทเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่อมอดุลัสสะสม (storage modulus, E') นอกจากนี้ยัง

ปรากฏพีกของกราฟ แทนเจนต์สูญเสีย (Loss tangent) 2 พีก ได้แก่ที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส และ -35 องศาเซลเซียส แสดงถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนตามลำดับ โดยค่ามอดุลัสสะสม E' ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียสและค่า T_g ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2

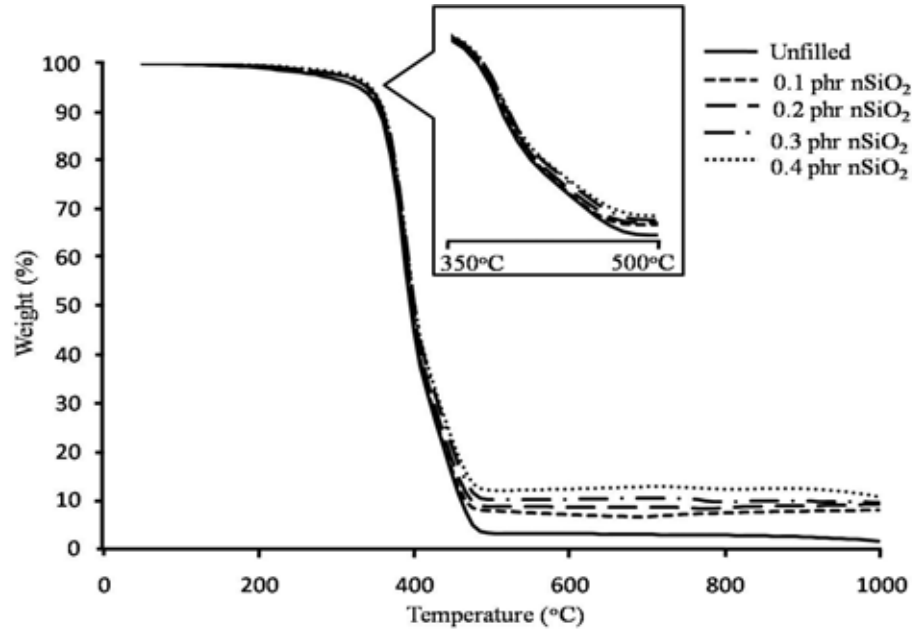
ตารางที่ 5.2 ค่า storage modulus และ T_g ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | Storage modulus (E' , MPa) at -80°C | T_g (°C) from $\tan \delta_{max}$ | |
|-------------------------------|---|-------------------------------------|-----------|
| | | NR phase | SBR phase |
| Unfilled | 340.64 | -60 | -35 |
| 0.1 phr nSiO ₂ | 352.62 | -58.9 | -23 |
| 0.2 phr nSiO ₂ | 408.38 | -55.3 | -21 |
| 0.3 phr nSiO ₂ | 422.24 | -53.4 | -20 |
| 0.4 phr nSiO ₂ | 431.39 | -51.8 | -24 |
| PS- 0.1 phr nSiO ₂ | 309.76 | -56.3 | -23.9 |
| PS- 0.2 phr nSiO ₂ | 264.75 | -52.6 | -15.5 |
| PS- 0.3 phr nSiO ₂ | 251.93 | -51.7 | -14.1 |
| PS- 0.4 phr nSiO ₂ | 210.64 | -52.5 | -12.2 |

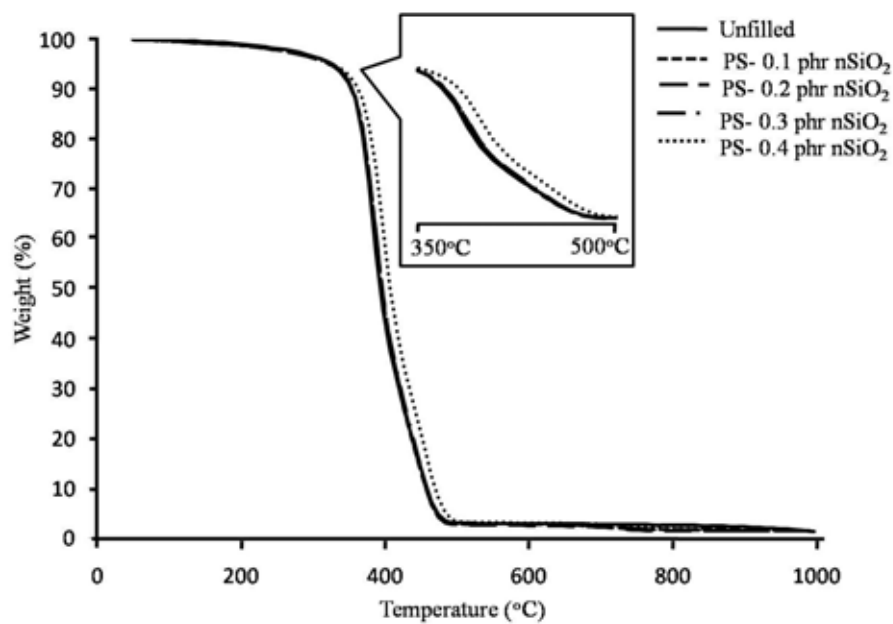
จากตารางที่ 5.2 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกานาโนคอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้ T_g ของยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยางถูกขัดขวางจากอนุภาคนาโนซิลิกา โดยสังเกตจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ของยางธรรมชาติ พบว่า E' ของนาโนคอมพอสิตมีค่าสูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งตึงของสายโซ่โมเลกุลของยาง แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์จะทำให้ T_g ของยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการขัดขวางสายโซ่โมเลกุลของยาง แต่ E' ของนาโนคอมพอสิตกลับมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนเลเท็กซ์ เนื่องจากโดยทั่วไปยางสไตรีนบิวทาไดอีนมี E' ที่ต่ำกว่ายางธรรมชาติ [47] อีกทั้งพอลิสไตรีนที่ห่อหุ้มอยู่บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกามีความเข้ากันได้ดีกับยางสไตรีนบิวทาไดอีน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการไม่ปรากฏค่า T_g ของพอลิสไตรีนนาโนคอมพอสิต จึงส่งผลให้นาโนคอมพอสิตมี E' ลดลงเมื่อทำการเติมนาโนเลเท็กซ์เพิ่มมากขึ้น

5.3.2 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

รูปที่ 5.12 และ 5.13 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลทเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 5.12 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 5.13 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลทเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.12 และ 5.13 พบว่าการเติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโน-เลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ โดยอุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์แสดงไว้ในตารางที่ 5.3

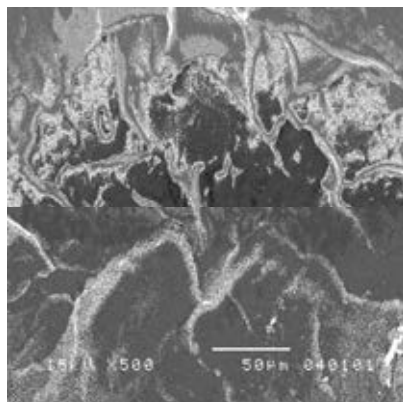
ตารางที่ 5.3 อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | T _{Onset} (°C) | T _{Endset} (°C) | Char (%) |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Unfilled | 360.68 | 421.85 | 2.89 |
| 0.1 phr nSiO ₂ | 360.88 | 422.30 | 6.66 |
| 0.2 phr nSiO ₂ | 362.67 | 425.48 | 8.46 |
| 0.3 phr nSiO ₂ | 363.83 | 426.27 | 10.08 |
| 0.4 phr nSiO ₂ | 364.52 | 427.43 | 12.24 |
| PS- 0.1 phr nSiO ₂ | 363.10 | 426.93 | 2.76 |
| PS- 0.2 phr nSiO ₂ | 364.16 | 428.18 | 2.82 |
| PS- 0.3 phr nSiO ₂ | 364.68 | 430.37 | 2.96 |
| PS- 0.4 phr nSiO ₂ | 366.15 | 429.95 | 3.00 |

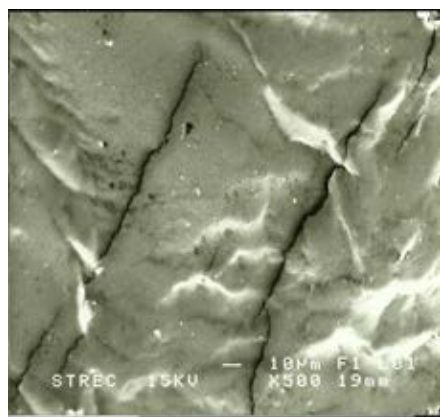
จากตารางที่ 5.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโน-เลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 1-5 องศาเซลเซียส และ 3-6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของสารตัวเติมที่เติมลงในนาโนคอมพอสิตมีเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณเถ้าชาร์ที่เกิดขึ้น

5.4 สัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์

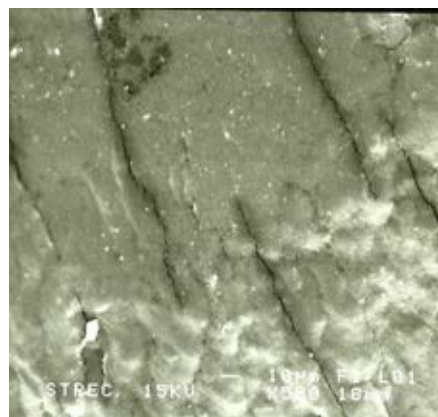
รูปที่ 5.14 แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งตรวจจอบด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 500 เท่า



NR/SBR



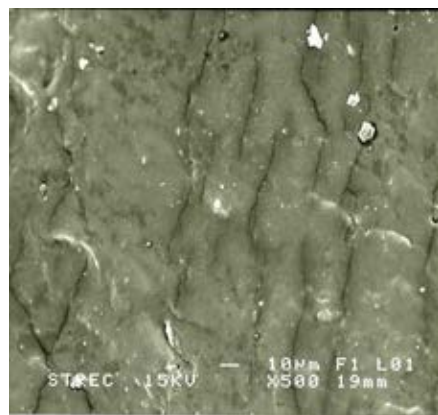
NR/SBR/0.1nSiO₂



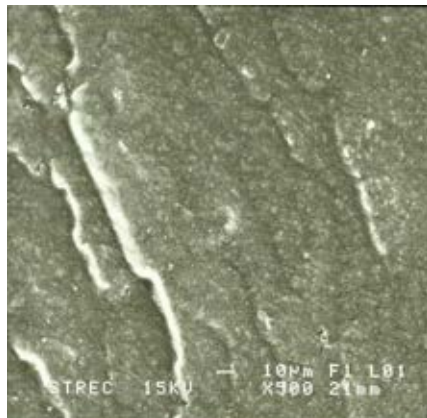
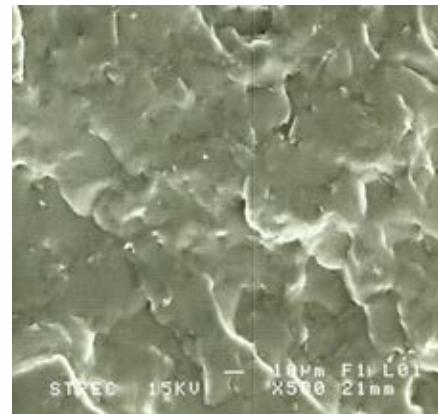
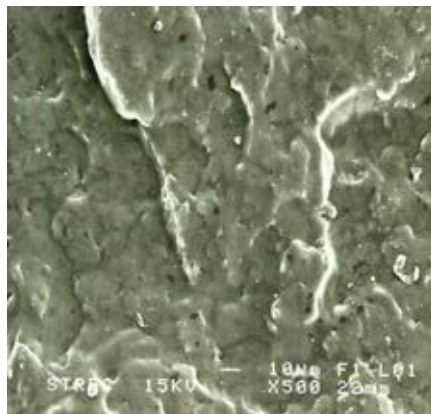
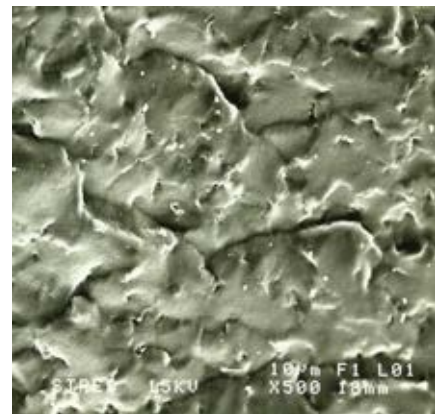
NR/SBR/0.2nSiO₂



NR/SBR/0.3nSiO₂



NR/SBR/0.4nSiO₂

NR/SBR/PS-0.1nSiO₂NR/SBR/PS-0.2nSiO₂NR/SBR/PS-0.3nSiO₂NR/SBR/PS-0.4nSiO₂

รูปที่ 5.14 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต
ที่ปริมาณนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 5.14 พบว่าการเติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณตั้งแต่ 0.3 phr มีผลทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนและมีการกระจายตัวไม่ดีในเมทริกซ์ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ การเติมนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น พบว่าพื้นผิวรอยหักของนาโนคอมพอสิตมีความขรุขระมากขึ้น แสดงถึงความยืดหยุ่นของนาโนคอมพอสิตที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยเกิดจากการหักขึ้นทดสอบภายใต้ไนโตรเจนเหลว จึงทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิลดต่ำลงประมาณ -60 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต

5.5 สรุปผลการทดลอง

5.5.1 สามารถเตรียมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่มีขนาดอนุภาค 38 นาโนเมตร และมีร้อยละผลได้เท่ากับ ร้อยละ 95.7 ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิตู' ดิฟเฟอเรนเชียลดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

5.5.2 จากการศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาและนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไตรีนด้วยเครื่อง TEM พบว่าอนุภาคนาโนซิลิกามีลักษณะเป็นทรงกลมที่เกาะกลุ่มกัน และอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไตรีนมีลักษณะเป็นทรงกลม โครงสร้างแบบ 'คอร์-เชลล์' โดยอนุภาคนาโนซิลิกาเป็นแก่นกลางและล้อมรอบด้วยชั้นบางๆของพอลิไตรีน

5.5.3 การเติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไตรีนนาโนเลเท็กซ์ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงความทนแรงดึง และมอดุลัสของนาโนคอมพอสิตได้ โดยการเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไตรีนนาโนเลเท็กซ์ให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงที่ดีกว่าการเติมนาโนซิลิกา ในขณะที่การเติมนาโนซิลิกาให้มอดุลัสที่สูงกว่าซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไตรีนนาโนเลเท็กซ์นาโนคอมพอสิต

5.5.4 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าการเติมนาโนซิลิกาสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลพลวัตของนาโนคอมพอสิตได้ ในขณะที่การเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไตรีนนาโนเลเท็กซ์จะส่งผลให้นาโนคอมพอสิตมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำๆ นอกจากนี้พบว่าการห่อหุ้มนาโนซิลิกาด้วยพอลิไตรีนช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างอนุภาคนาโนซิลิกาและเมทริกซ์ยาง

5.5.5 จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าการเติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไตรีนนาโนเลเท็กซ์สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตได้เพียงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นประมาณ 1-5 องศาเซลเซียส และ 3-5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

5.5.6 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่า นาโนซิลิกามีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของยางเมื่อทำการเติมในปริมาณที่เหมาะสม แต่เมื่อมีการเติมนาโนซิลิกาในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะพบการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองสมบัติเชิงกล นอกจากนี้การเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณเพิ่มขึ้น พบว่ามีพื้นผิวรอยหักที่ขรุขระ ซึ่งแสดงถึงความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำๆ

บทที่ 6

ผลของพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ ต่อสมบัติของนาโนคอมพอสิต

6.1 นาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน

พอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ตัวอย่างของพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์

6.1.1 ร้อยละผลได้ (%yield) และขนาดอนุภาคในนาโนเลเท็กซ์

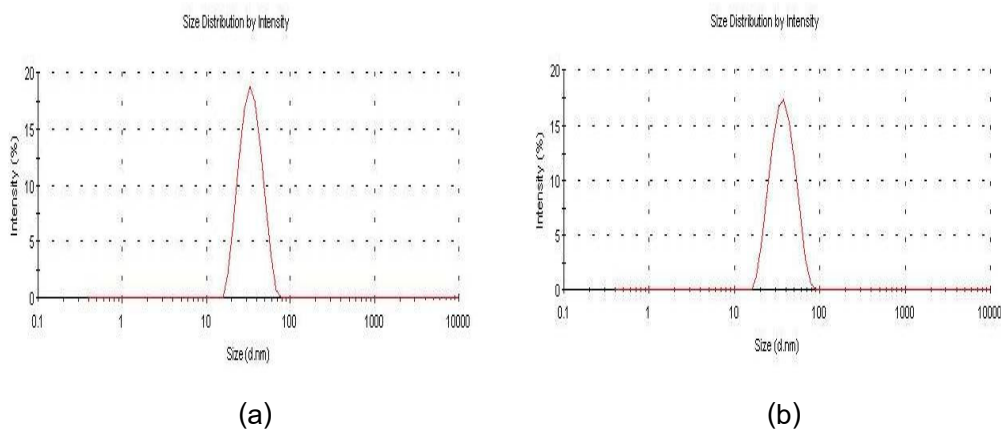
ตารางที่ 6.1 แสดงร้อยละผลได้และขนาดอนุภาคของพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนในนาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้

ตารางที่ 6.1 ร้อยละผลได้ของพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์

| Sample | %yield | Average diameter (nm) |
|----------------------|--------|-----------------------|
| nPS | 90.5 | 34 |
| PS-nSiO ₂ | 95.7 | 38 |

จากตารางที่ 6.1 แสดงร้อยละผลได้ของพอลิซิสไตรีนและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิซิสไตรีนในนาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้ พบว่าร้อยละผลได้ของพอลิซิสไตรีนและซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิซิสไตรีนมีค่าเท่ากับร้อยละ 90.5 และ 95.7 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าร้อยละผลได้ของซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิซิสไตรีนมีค่าสูงกว่าพอลิซิสไตรีน เนื่องจากไมเซลล์ที่เกิดขึ้นมีนาโนซิลิกาบรรจุอยู่ภายในซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสและช่วยให้สไตรีนมอนอเมอร์ สามารถเกิดการพอลิเมอไรซ์เป็นพอลิซิสไตรีนอยู่โดยรอบนาโนซิลิกาได้ นอกจากนี้พื้นผิวของนาโนซิลิกาที่เติมเข้าสู่ระบบมีชั้นบางๆ ของสารคู่ควบ MPTMS ซึ่งมีโครงสร้างพันธะคู่ (double bond) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับสไตรีนมอนอเมอร์ และเกิดการพอลิเมอไรซ์ต่อไปเป็นพอลิซิสไตรีนได้

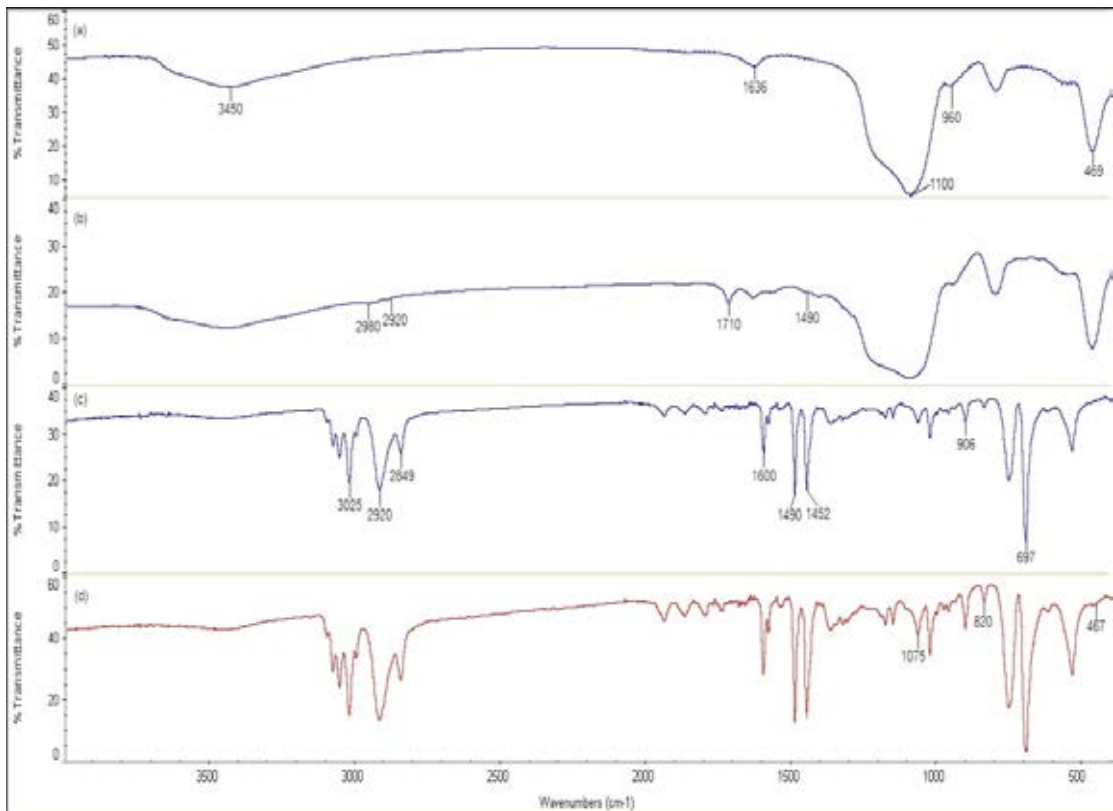
นอกจากนี้พบว่าด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอไรซ์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันสามารถเตรียมพอลิเมอไรท์ที่มีขนาดต่ำกว่า 50 นาโนเมตร โดยที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาคพอลิซิสไตรีนมีค่าเท่ากับ 34 นาโนเมตร และอนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิซิสไตรีนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 38 นาโนเมตร เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกาที่ใช้ในการทดลองนี้มีขนาด 15-20 นาโนเมตร และยังถูกเคลือบไว้ด้วยชั้นบางๆ ของ MPTMS ก่อนนำไปห่อหุ้มด้วยพอลิซิสไตรีน จึงทำให้อนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิซิสไตรีนมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคพอลิซิสไตรีน ดังแสดงการกระจายขนาดอนุภาคในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 การกระจายขนาดอนุภาคนาโนของ (a) พอลิซิสไตรีน และ (b) นาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิซิสไตรีน

6.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

รูปที่ 6.3 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนซิลิกา อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วย MPTMS อนุภาคพอลิस्टาไรีน และอนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไรีน ด้วยเทคนิค FT-IR โดยตารางที่ 6.2 แสดงค่าเลขคลื่น (wave number) ของหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 6.3 FT-IR สเปกตรัมของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา (b) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วย MPTMS (c) อนุภาคพอลิस्टาไรีน และ (d) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไรีน

จากรูปที่ 6.3(a) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลิกา ตรวจพบพีคของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ที่เลขคลื่น 1100 และ 469 cm^{-1} พีคหมู่ฟังก์ชัน Si-OH บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาที่เลขคลื่น 960 cm^{-1} และพีคของหมู่ฟังก์ชัน -OH group ที่เลขคลื่น 3450 cm^{-1}

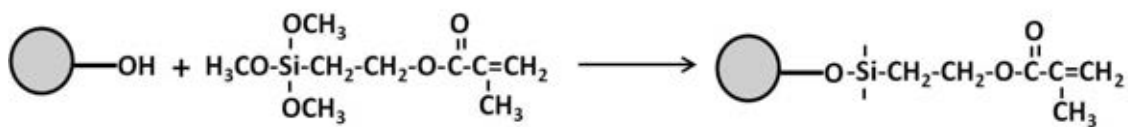
จากรูปที่ 6.3(b) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วย MPTMS ตรวจพบพีคของหมู่ฟังก์ชัน $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$, C=O และ C=C เกิดเพิ่มขึ้นที่เลขคลื่น 2980, 2920, 1710 และ 1490 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของสารคู่ควบ MPTMS เข้าทำปฏิกิริยากันหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอนุภาคนาโนซิลิกา ดังแสดงในรูปที่ 6.4 จึงเป็นการยืนยันการเกาะติดของ MPTMS บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา

จากรูปที่ 6.3 (c) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคพอลิस्टาไทรีนตรวจพบพีกหมู่ฟังก์ชันที่แสดงสเปกตรัมของพอลิस्टาไทรีน ได้แก่ พีกของ C-H arom ที่เลขคลื่น 3025 cm^{-1} , พีกของ $-\text{CH}_2-\text{CH}_2$ ที่เลขคลื่น 2920 cm^{-1} และ 2849 cm^{-1} , พีกของ C=C arom ที่เลขคลื่น 1600 cm^{-1} , พีกของ $-\text{C}_6\text{H}_5$ ที่เลขคลื่น 1490 cm^{-1} และ 1452 cm^{-1} และพีกของ $-\text{CH}=\text{arom in plane}$ ที่เลขคลื่น 906 cm^{-1} และ 697 cm^{-1}

จากรูปที่ 6.3(d) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไทรีน ตรวจพบพีกของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ที่เลขคลื่น 1075 cm^{-1} และ 467 cm^{-1} และพีกของ Si-O-C ที่เลขคลื่น 820 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการเกาะติดของพอลิस्टาไทรีนบนพื้นผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีสารคู่ควบ MPTMS เป็นสารเชื่อมประสาน [46]

ตารางที่ 6.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกา MPTMS และพอลิस्टาไทรีน [46]

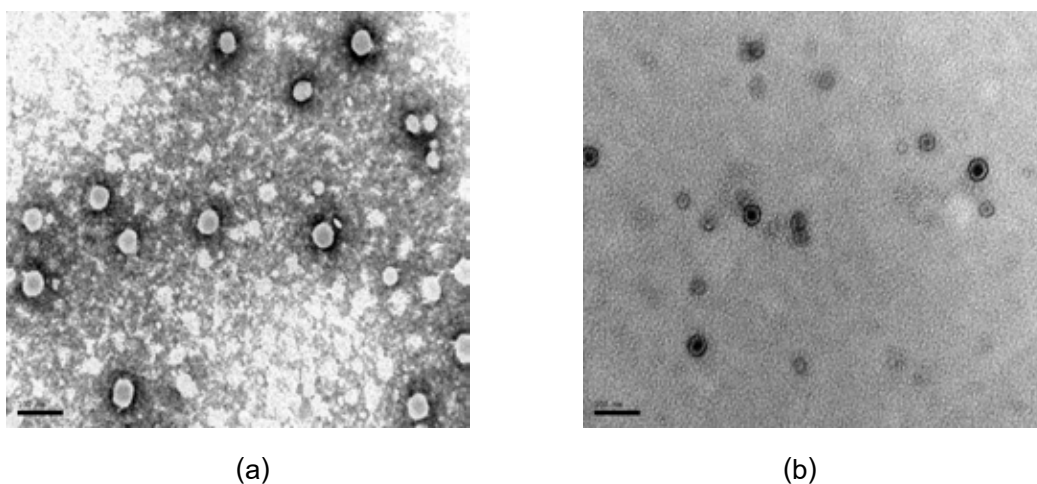
| Wavenumber (cm^{-1}) | ซิลิกา | MPTMS | MPTMS |
|---------------------------------|--------------------|----------------|--|
| 3049 | -OH | | |
| 1100 | Si-O-Si stretching | | |
| 956 | Si-OH stretching | | |
| 471 | Si-O-Si bending | | |
| 2982 | | $-\text{CH}_3$ | |
| 2926 | | $-\text{CH}_2$ | |
| 1710 | | C=O | |
| 1640 | | C=C | |
| 1100 | | Si-O-Si asym | |
| 821 | | Si-O-C | |
| 3024 | | | $-\text{CH}=\text{aromatic}$ |
| 2921, 2847 | | | $-\text{CH}_2-\text{CH}_2$ |
| 1601 | | | $-\text{C}=\text{C aromatic}$ |
| 1492, 1452 | | | $-\text{C}_6\text{H}_5$ |
| 1200 | | | $-\text{CH}=\text{aromatic, out of plane}$ |
| 906, 697 | | | $-\text{CH}=\text{aromatic, in of plane}$ |



รูปที่ 6.4 การดัดแปรผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลีน MPTMS

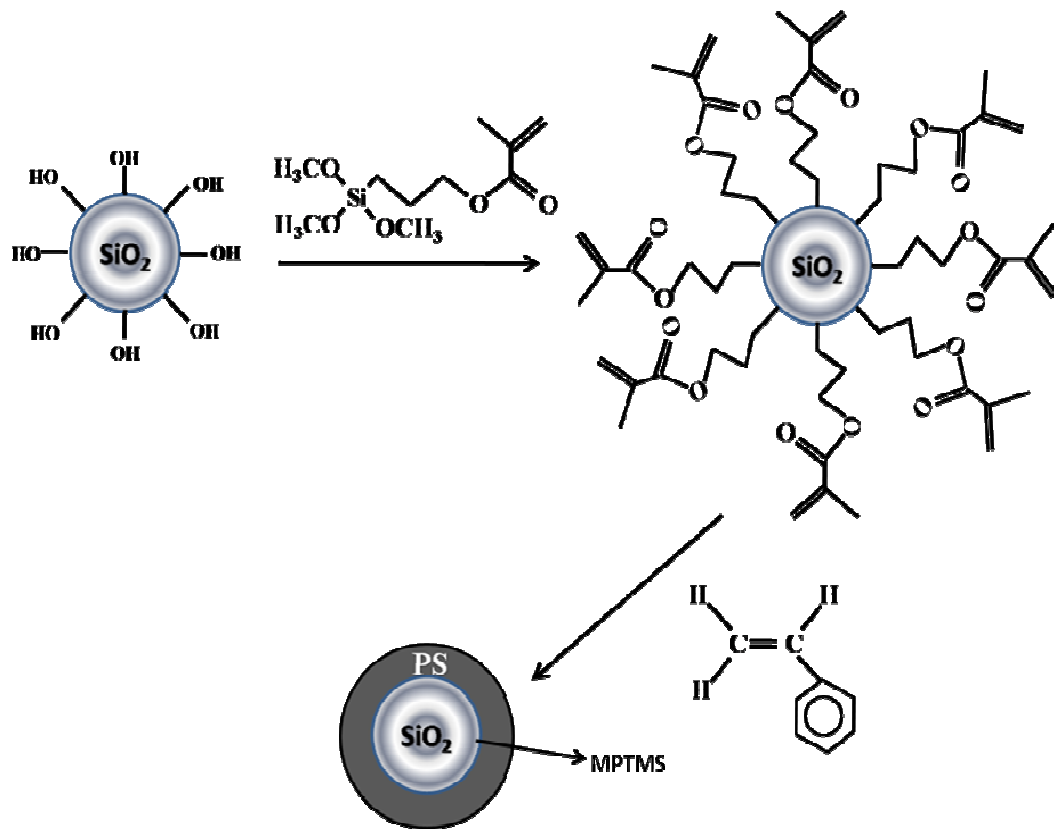
6.1.3 สัณฐานวิทยาของอนุภาคพอลิस्टาไทรินและอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไทริน

รูปที่ 6.5 แสดงสัณฐานวิทยาของอนุภาคพอลิस्टาไทรินและอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไทรินที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM



รูปที่ 6.5 สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคพอลิस्टาไทริน และ (b) อนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไทริน

จากรูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของพอลิस्टาไทรินมีลักษณะเป็นทรงกลม ส่วนอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไทรินมีลักษณะเป็น 'คอร์-เชลล์' (core-shell structure) โดยมีอนุภาคนาโนซิลิกา (สีดำ) เป็นแก่น (core) และถูกล้อมรอบด้วยชั้น (shell) ของพอลิस्टาไทริน (สีเทา) บางๆ ซึ่งมีกลไกการห่อหุ้มดังแสดงรูปที่ 6.6



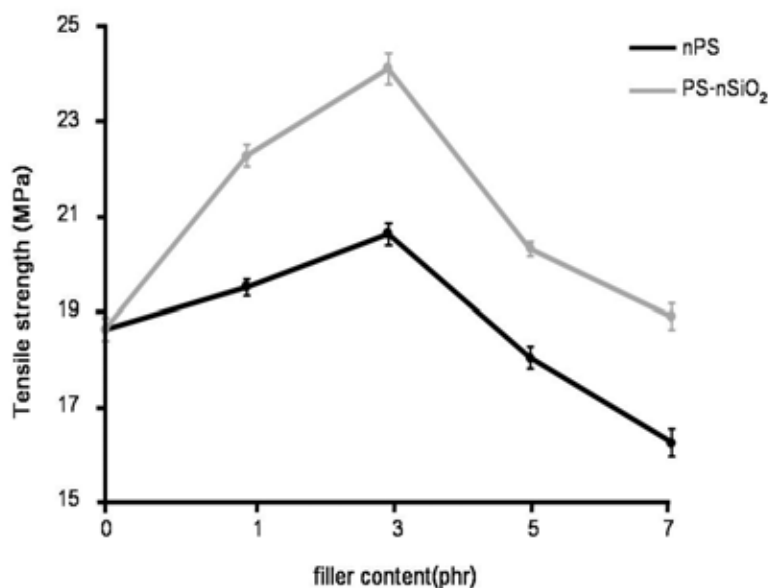
รูปที่ 6.6 กลไกการห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยพอลิस्टาไรีนด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ

'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

6.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิस्टาไรีน และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไรีนนาโนเลเท็กซ์

6.2.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

รูปที่ 6.7 แสดงผลของพอลิस्टาไรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

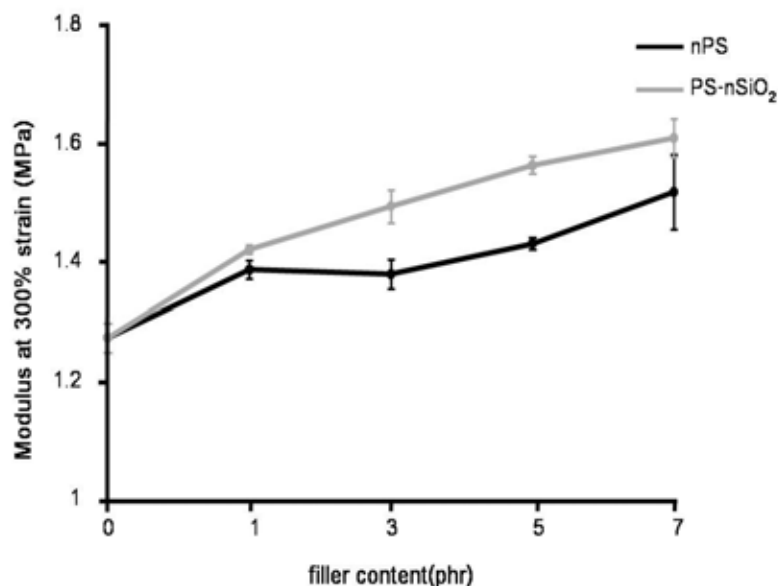


รูปที่ 6.7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอลิที่เติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ในปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 6.7 พบว่าความทนแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเท่ากับ 18.6 MPa เมื่อเติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์มีผลทำให้ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอลิที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยการเติมพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณ 3 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 20.6 MPa ในขณะที่การเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่มีปริมาณนาโนซิลิกา 3 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 24.1 MPa อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ให้มากขึ้น กลับพบว่าความทนแรงดึงของนาโนคอมพอลิที่มีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวไม่สมบูรณ์ของสารตัวเติมในน้ำยาง จึงทำให้พอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์บางส่วนเกิดการเกาะกลุ่มกันจนมี specific surface area ลดลงซึ่งทำให้สารตัวเติมมี interaction กับโมเลกุลของยางลดลง นอกจากนี้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์สามารถให้ความทนแรงดึงสูงกว่าการเติมพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ โดยซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนแสดงประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ดีเนื่องจากการทำงานร่วมกัน (synergistic) ในการเสริมแรงของพอลิสไตรีน และอนุภาคนาโนซิลิกา

6.2.2 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 (modulus at 300% strain)

รูปที่ 6.8 แสดงผลของพอลิไทรินและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไทรินนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อมอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

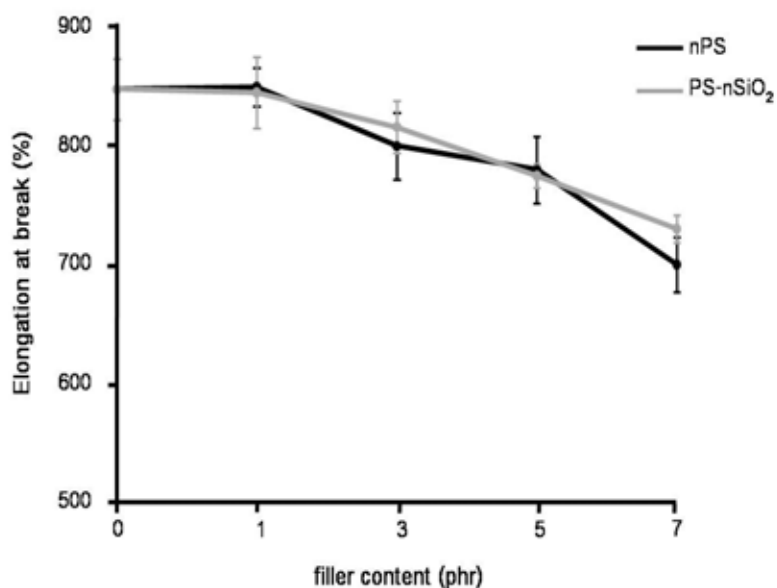


รูปที่ 6.8 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิไทรินและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไทรินนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 6.8 พบว่าการเติมพอลิไทรินและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไทรินนาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิต สามารถปรับปรุงมอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของนาโนคอมพอสิตได้ เนื่องจากความแข็งตัวของสารตัวเติม นอกจากนี้ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไทรินนาโนเลเท็กซ์ทำให้นาโนคอมพอสิตมีมอดุลัสสูงกว่าการเติมพอลิไทริน เนื่องจากนาโนซิลิกาในนาโนเลเท็กซ์ช่วยส่งเสริมให้เกิดความแข็งตึงในนาโนคอมพอสิต

6.2.3 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break)

รูปที่ 6.9 แสดงผลของพอลิไทรินและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิไทรินนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต



รูปที่ 6.9 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน

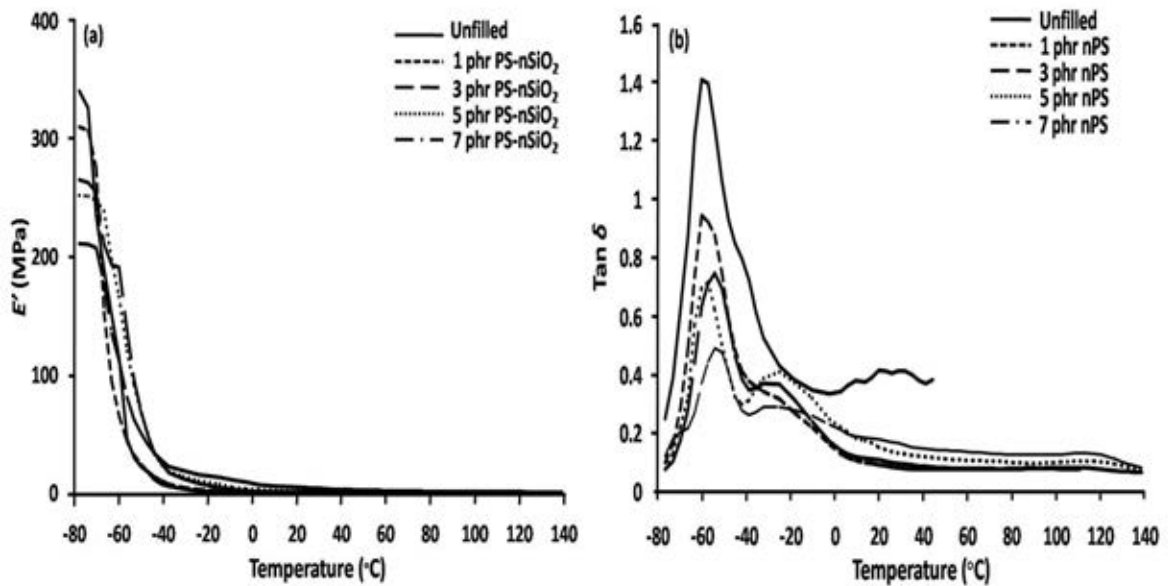
นาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 6.9 พบว่าการเติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิต ทำให้ร้อยละการยืดตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง เนื่องจากความแข็งตึงของสารตัวเติม นอกจากนี้ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ทำให้นาโนคอมพอสิตมีร้อยละการยืดตัวที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

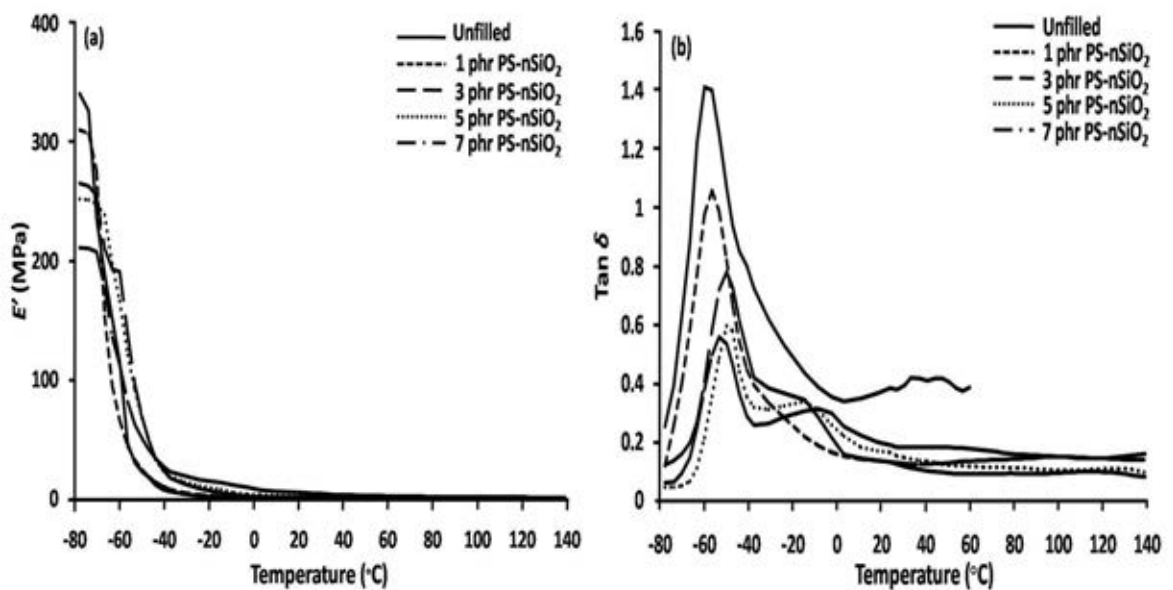
6.3 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์

6.3.1 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical property)

รูปที่ 6.10 และ 6.11 แสดงเทอร์โมแกรมสมบัติเชิงกลพลวัตของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ตามลำดับ



รูปที่ 6.10 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent



รูปที่ 6.11 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาหล่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent

จากรูปที่ 6.10 และ 6.11 พบว่าการเติมพอลิสไตรีนและซิลิกาหล่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่อมอดุลัสสะสม (storage modulus, E') นอกจากนี้ยัง

ปรากฏพีกของกราฟ แทนเจนต์สูญเสีย (Loss tangent) 2 พีก ได้แก่ที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส และ -35 องศาเซลเซียส แสดงถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีน ตามลำดับ โดยค่ามอดุลัสสะสม E' ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียสและค่า T_g ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.3

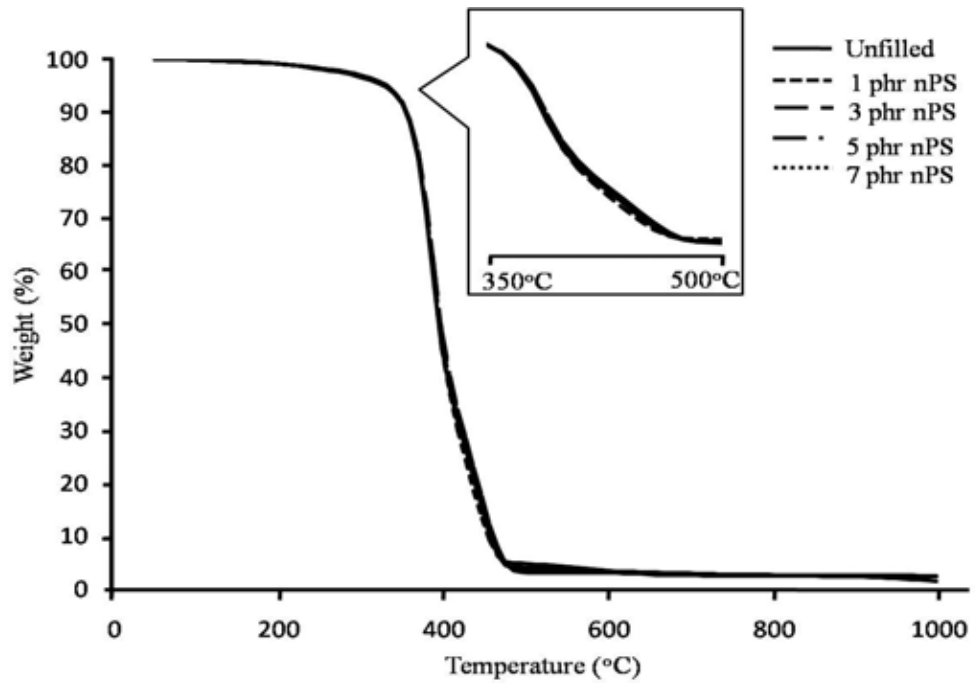
ตารางที่ 6.3 ค่า storage modulus และ T_g ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอลิตที่เติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | Storage modulus (E' , MPa) at -80°C | T_g (°C) from $\tan \delta_{\max}$ | |
|----------------------------|---|--------------------------------------|-----------|
| | | NR phase | SBR phase |
| Unfilled | 340.64 | -60 | -35 |
| 1 phr nPS | 329.15 | -58.6 | -24.1 |
| 3 phr nPS | 295.89 | -54.3 | -23.2 |
| 5 phr nPS | 257.59 | -57.2 | -20.0 |
| 7 phr nPS | 227.12 | -52.5 | -20.5 |
| 1 phr PS-nSiO ₂ | 309.76 | -56.3 | -23.9 |
| 3 phr PS-nSiO ₂ | 264.75 | -52.6 | -15.5 |
| 5 phr PS-nSiO ₂ | 251.93 | -51.7 | -14.1 |
| 7 phr PS-nSiO ₂ | 210.64 | -52.5 | -12.2 |

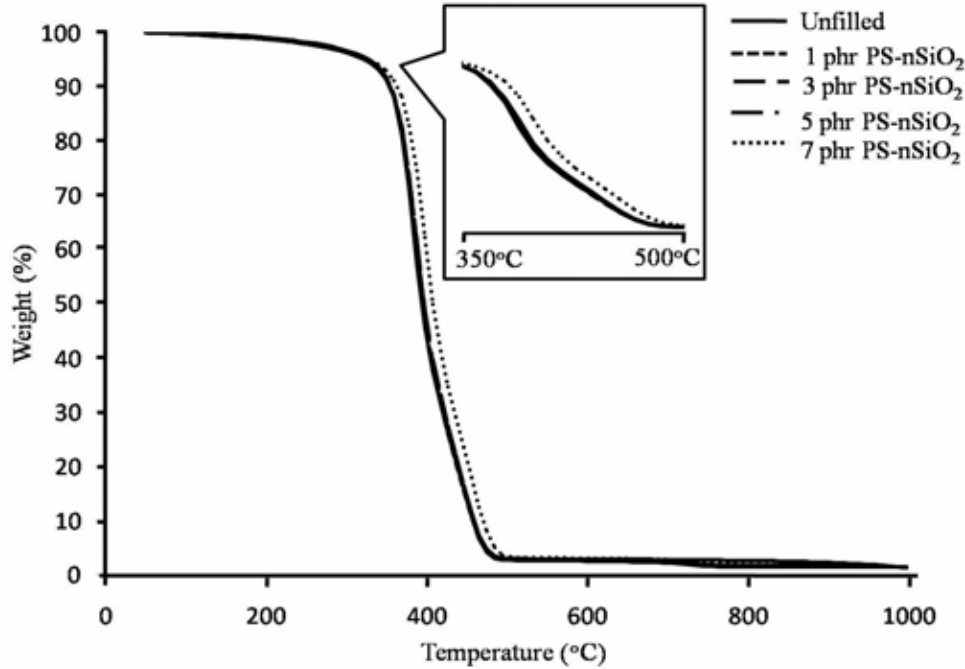
จากตารางที่ 6.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอลิตให้มากขึ้น ทำให้ T_g ของยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยางถูกขัดขวางจากอนุภาคของสารตัวเติม แต่อย่างไรก็ตาม E' ของนาโนคอมพอลิตกลับมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนเลเท็กซ์ เนื่องจากโดยทั่วไปยางสไตรีนบิวทาไดอีนมี E' ที่ต่ำกว่ายางธรรมชาติ [47] อีกทั้งพอลิสไตรีนมีความเข้ากันได้ดีกับยางสไตรีนบิวทาไดอีน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการไม่ปรากฏค่า T_g ของพอลิสไตรีนในนาโนคอมพอลิต จึงส่งผลให้นาโนคอมพอลิตมี E' ลดลงเมื่อทำการเติมนาโนเลเท็กซ์เพิ่มมากขึ้น

6.3.2 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

รูปที่ 6.12 และ 6.13 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอลิตที่เติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 6.12 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 6.13 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 6.12 และ 6.13 พบว่าการเติมพอลิस्टาไร์นและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไร์นนาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ โดยอุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์แสดงไว้ในตารางที่ 6.4

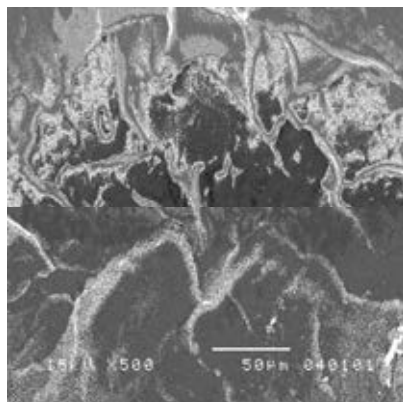
ตารางที่ 6.4 อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิस्टาไร์นและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไร์นนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | T _{Onset} (°C) | T _{Endset} (°C) | Char (%) |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Unfilled | 360.68 | 421.85 | 2.89 |
| 1 phr nPS | 362.20 | 424.47 | 2.64 |
| 3 phr nPS | 362.79 | 426.33 | 2.68 |
| 5 phr nPS | 363.84 | 425.98 | 2.73 |
| 7 phr nPS | 364.10 | 429.37 | 2.75 |
| 1 phr PS-nSiO ₂ | 363.10 | 426.93 | 2.82 |
| 3 phr nPS-SiO ₂ | 364.16 | 428.18 | 2.74 |
| 5 phr PS-nSiO ₂ | 364.68 | 430.37 | 2.96 |
| 7 phr PS-nSiO ₂ | 366.15 | 429.95 | 3.00 |

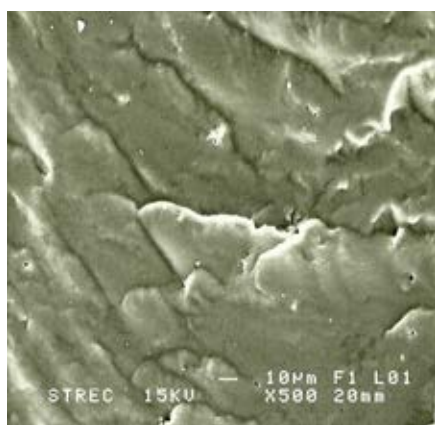
จากตารางที่ 6.4 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิस्टาไร์นและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไร์นนาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 2-4 องศาเซลเซียส และ 3-6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของสารตัวเติมที่เติมลงในนาโนคอมพอสิตมีเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณเถ้าชาร์ที่เกิดขึ้น

6.4 สัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิस्टาไร์นและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไร์นนาโนเลเท็กซ์

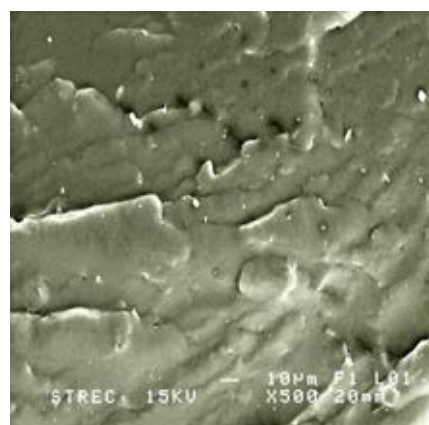
รูปที่ 6.14 แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิस्टาไร์นและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาไร์นนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 500 เท่า



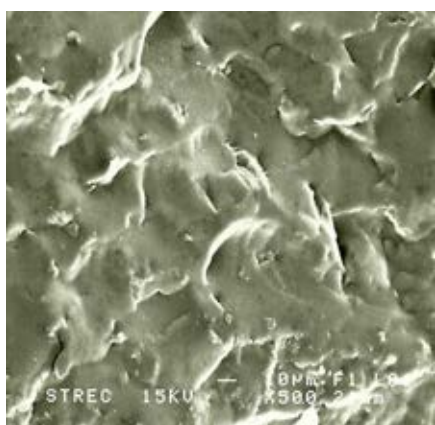
NR/SBR



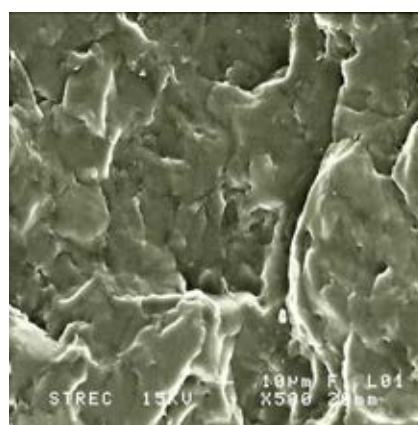
NR/SBR/1nPS



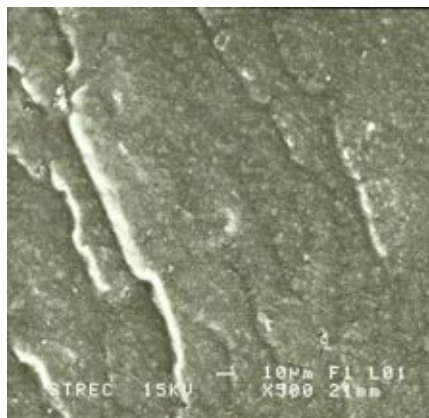
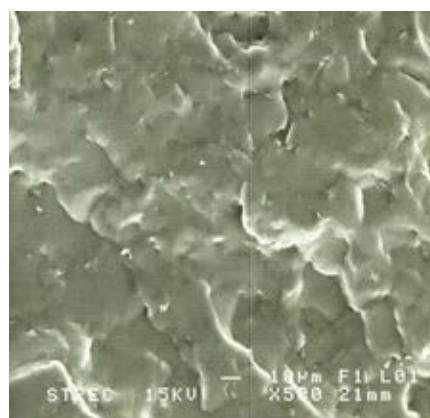
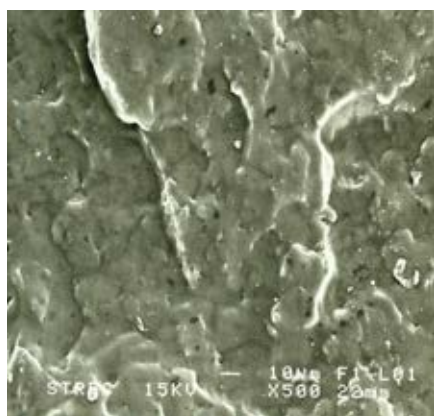
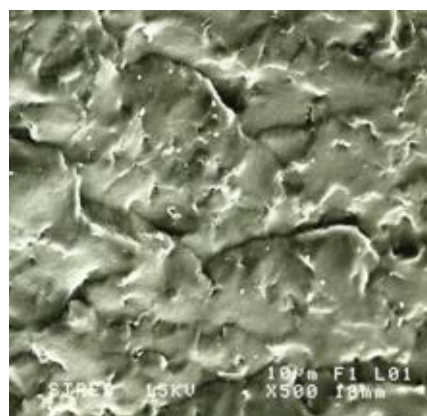
NR/SBR/3nPS



NR/SBR/5nPS



NR/SBR/7nPS

NR/SBR/1PS-nSiO₂NR/SBR/3PS-nSiO₂NR/SBR/5PS-nSiO₂NR/SBR/7PS-nSiO₂

รูปที่ 6.14 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลทีกซ์ที่มีปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 6.14 พบว่า การเติมพอลิสไตรีนและนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น พบว่าพื้นผิวรอยหักของนาโนคอมพอสิตมีความขรุขระมากขึ้น แสดงถึงความยืดหยุ่นของนาโนคอมพอสิตที่อุณหภูมิต่ำๆ โดยเกิดจากการหักขึ้นทดสอบภายใต้ไนโตรเจนเหลว จึงทำให้ชิ้นงานมีอุณหภูมิลดต่ำลงประมาณ -60 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต

6.5 สรุปผลการทดลอง

6.5.1 สามารถเตรียมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลทีกซ์ที่มีขนาดอนุภาค 34 และ 38 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีร้อยละผลได้เท่ากับ ร้อยละ 90.5 และ 95.7

ตามลำดับ ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลดิฟเฟอเรนเชียลไมโคร-อิมัลชัน

6.5.2 จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาของอนุภาคพอลิสไตรีนและนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนด้วยเครื่อง TEM พบว่าอนุภาคพอลิสไตรีนมีลักษณะเป็นทรงกลม และอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนมีลักษณะเป็นทรงกลม โครงสร้างแบบ 'คอร์-เชลล์' โดยอนุภาคนาโนซิลิกาเป็นแกนกลางและล้อมรอบด้วยชั้นบางๆของพอลิสไตรีน

6.5.3 การเติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงความทนแรงดึง และมอดุลัสของนาโนคอมพอสิตได้ โดยการเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ให้ประสิทธิภาพการเสริมแรง และมอดุลัสที่ดีกว่าการเติมพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์

6.5.4 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าเติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์จะส่งผลให้นาโนคอมพอสิตมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำๆ นอกจากนี้พบว่าพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์มีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์ยาง

6.5.5 จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าการเติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตได้เพียงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นประมาณ 2-4 องศาเซลเซียส และ 3-6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

6.5.6 จากการตรวจสอบพื้นฐานวิทยา พบว่า การเติมพอลิสไตรีนและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณเพิ่มขึ้น พบว่ามีพื้นผิวรอยหักที่ขรุขระ ซึ่งแสดงถึงความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำๆ

บทที่ 7

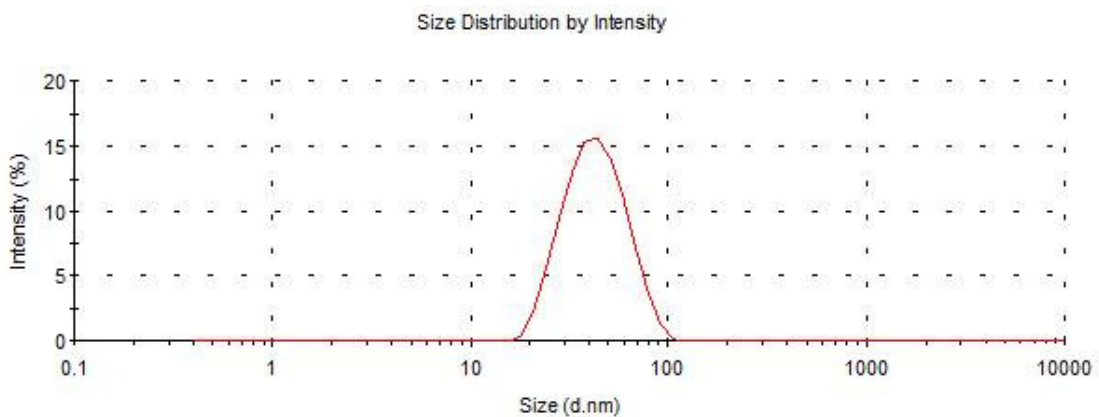
ผลของนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ ต่อสมบัติของนาโนคอมพอสิต

7.1 นาโนเลเท็กซ์ของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA-nSiO₂)

PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 7.1 โดยร้อยละผลได้ (% yield) มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 88.4 และขนาดอนุภาคเฉลี่ย (particle size) มีค่าเท่ากับ 40 นาโนเมตร มีการกระจายขนาดดังแสดงในรูปที่ 7.2



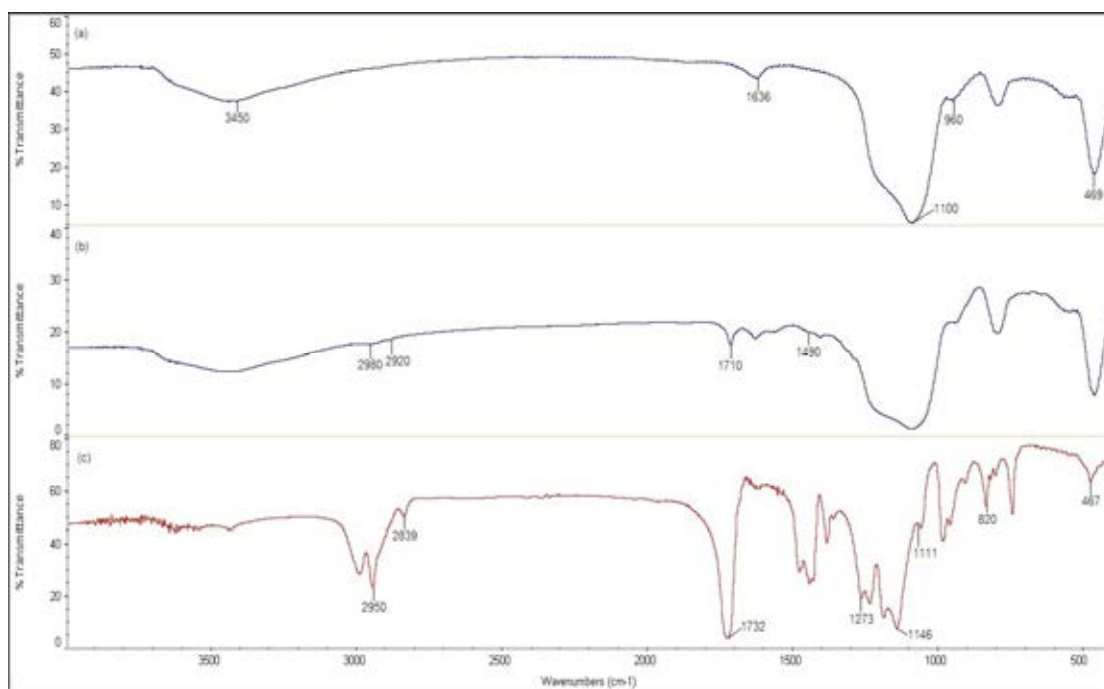
รูปที่ 7.1 ตัวอย่างของซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์



รูปที่ 7.2 การกระจายขนาดอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

7.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

รูปที่ 7.3 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนซิลิกา อนุภาคนาโนซิลิกา ที่ผ่านการ ดัดแปรผิวด้วย MPTMS และอนุภาค PMMA-nSiO₂ ด้วยเทคนิค FT-IR โดยตารางที่ 7.1 แสดงค่าเลขคลื่น (wave number) ของหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 7.3 FT-IR สเปกตรัมของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา (b) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วย MPTMS (c) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริลเลต

จากรูปที่ 7.3(a) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลิกา ตรวจพบพีคของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ที่เลขคลื่น 1100 และ 469 cm⁻¹ พีคหมู่ฟังก์ชัน Si-OH บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาที่เลขคลื่น 960 cm⁻¹ และพีคของหมู่ฟังก์ชัน -OH group ที่เลขคลื่น 3450 cm⁻¹

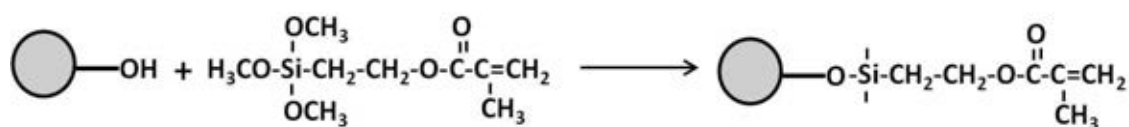
จากรูปที่ 7.3(b) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วย MPTMS ตรวจพบพีคของหมู่ฟังก์ชัน -CH₃, -CH₂, C=O และ C=C เกิดเพิ่มขึ้นที่เลขคลื่น 2980, 2920, 1710 และ 1490 cm⁻¹ ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของสารคู่ควบ MPTMS เข้าทำปฏิกิริยากันหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอนุภาคนาโนซิลิกา ดังแสดงในรูปที่ 7.4 จึงเป็นการยืนยันการเกาะติดของ MPTMS บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา

จากรูปที่ 7.3(c) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาค PMMA-nSiO₂ ตรวจพบพีคหมู่ฟังก์ชันที่แสดงสเปกตรัมของ PMMA ได้แก่ พีคของ -CH₃ และ -CH₂ ที่เลขคลื่น 2950 cm⁻¹ และ

2839 cm^{-1} , พีคของ C=O ที่เลขคลื่น 1732 cm^{-1} , และพีคของ C-O-C ที่เลขคลื่น 1273 cm^{-1} และ 1146 cm^{-1} นอกจากนี้ยังตรวจพบพีคของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ที่เลขคลื่น 1111 cm^{-1} และ 467 cm^{-1} และพีคของ Si-O-C ที่เลขคลื่น 820 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการเกาะติดของ PMMA บนพื้นผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีสารคู่ควบ MPTMS เป็นสารเชื่อมประสาน [48]

ตารางที่ 7.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันของซิลิกา MPTMS และพอลิเมทิลเมทาคริเลต [48]

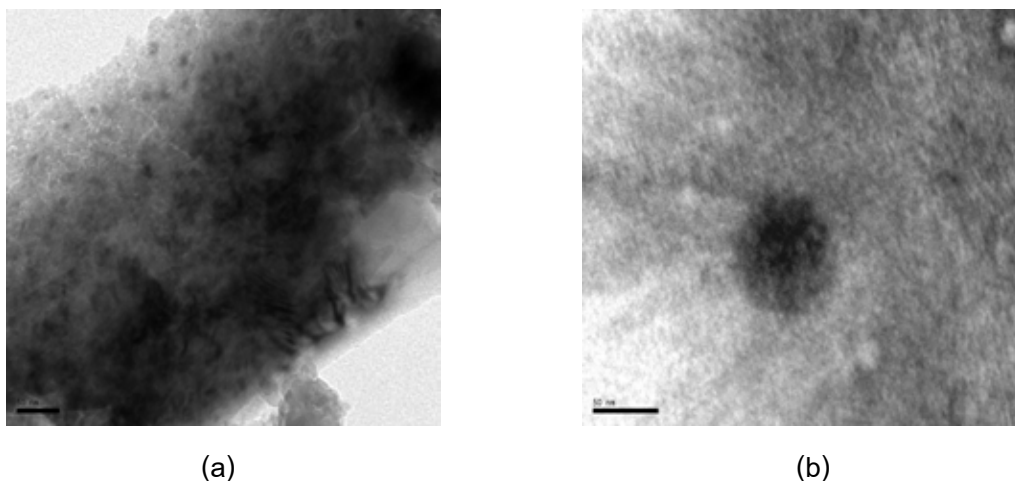
| Wavenumber (cm^{-1}) | ซิลิกา | MPTMS | PMMA |
|---------------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| 3049 | -OH | | |
| 1100 | Si-O-Si stretching | | |
| 956 | Si-OH stretching | | |
| 471 | Si-O-Si bending | | |
| 2982 | | -CH ₃ | |
| 2926 | | -CH ₂ | |
| 1710 | | C=O | |
| 1640 | | C=C | |
| 1100 | | Si-O-Si asym | |
| 821 | | Si-O-C | |
| 2955 | | | -CH ₃ |
| 2879 | | | -CH ₂ |
| >1700 | | | C=O |
| 1300, 1050 | | | C-O-C |



รูปที่ 7.4 การดัดแปรผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลีน MPTMS

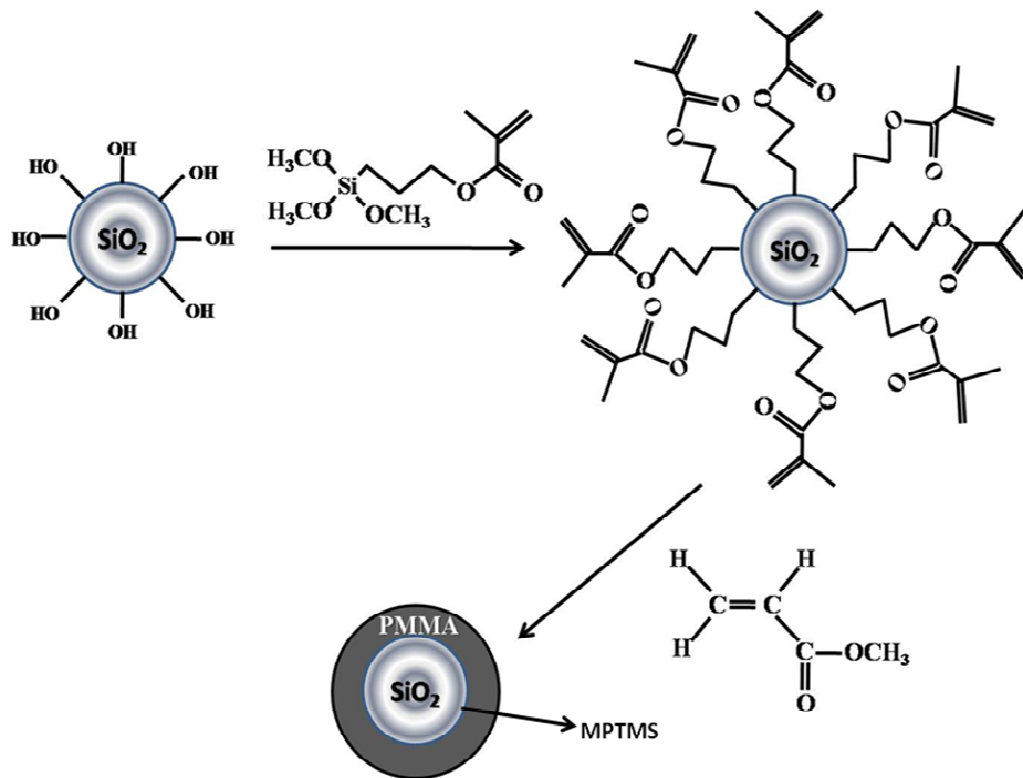
7.1.2 สัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาและอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วย พอลิเมทิลเมทาคริเลต

รูปที่ 7.5 แสดงสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาและอนุภาค PMMA-nSiO₂ ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM



รูปที่ 7.5 สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา และ (b) อนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

จากรูปที่ 7.5 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของนาโนซิลิกามีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็กที่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ โดยมีอนุภาคเฉลี่ย 10-20 นาโนเมตร ส่วนอนุภาค PMMA-nSiO₂ มีลักษณะเป็น 'คอร์-เชลล์' (core-shell structure) โดยมีอนุภาคนาโนซิลิกา (สีดำ) เป็นแก่น (core) และถูกล้อมรอบด้วยชั้น (shell) ของ PMMA (สีเทา) บางๆ ซึ่งมีกลไกการห่อหุ้มดังแสดงรูปที่ 7.6

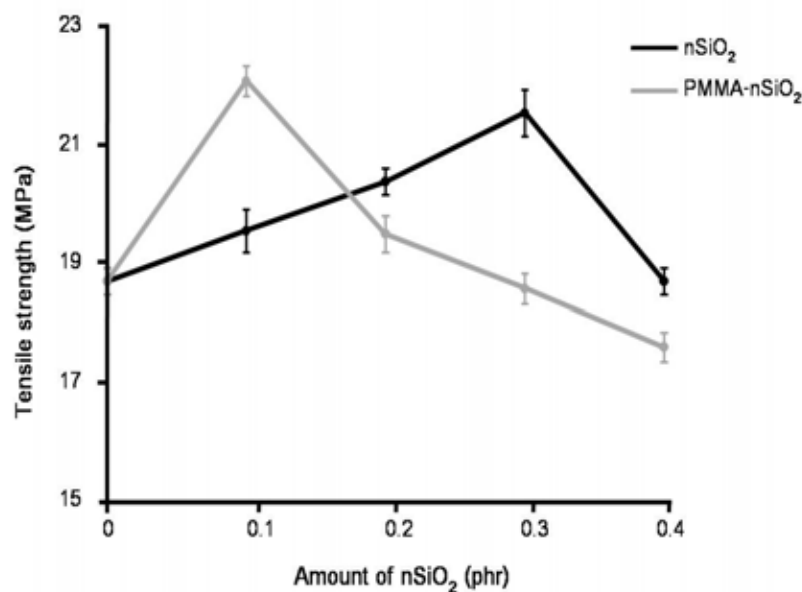


รูปที่ 7.6 กลไกการห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

7.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลทีกซ์

7.2.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

รูปที่ 7.7 แสดงผลของนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกซ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

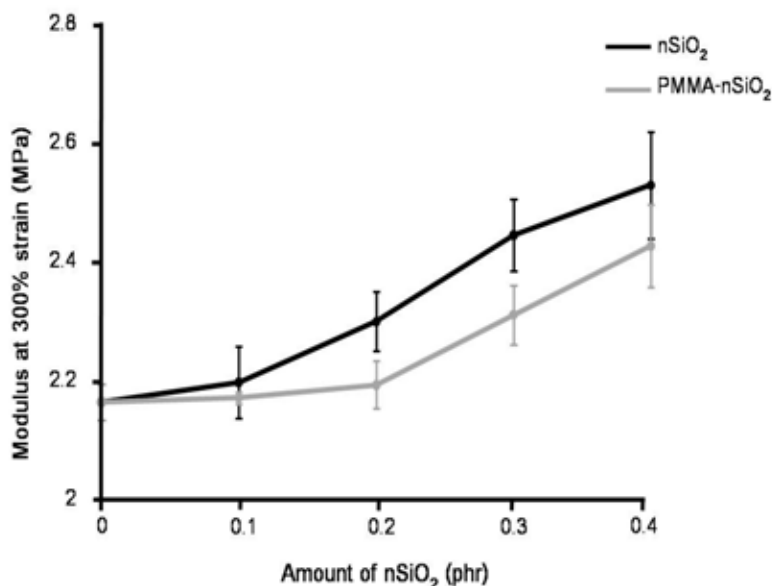


รูปที่ 7.7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ในปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 7.7 พบว่าความทนแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเท่ากับ 18.7 MPa เมื่อเติมนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์มีผลทำให้ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยการเติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณ 0.3 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 21.5 MPa ในขณะที่การเติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่มีปริมาณนาโนซิลิกา 0.1 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 22.1 MPa อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ให้มากขึ้น กลับพบว่าความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวไม่สมบูรณ์ของสารตัวเติมในน้ำยาง จึงทำให้นาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์บางส่วนเกิดการเกาะกลุ่มกันจนมี specific surface area ลดลง ซึ่งทำให้อาณัติมี interaction กับโมเลกุลของยางลดลง นอกจากนี้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ในปริมาณนาโนซิลิกา 0.1 phr สามารถให้ความทนแรงดึงสูงกว่า เมื่อเทียบกับการเติมนาโนซิลิกาที่ไม่ได้ถูกห่อหุ้มในปริมาณนาโนซิลิกาเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ ส่งผลให้ความทนแรงดึงลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก PMMA ที่ห่อหุ้มอยู่บนพื้นผิวนาโนซิลิกาไม่มีความเข้ากันกับเมทริกซ์ยาง จึงเกิดเป็นข้อบกพร่อง (defect) แทนการเสริมแรงในนาโนคอมพอสิต

7.2.2 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 (modulus at 300% strain)

รูปที่ 7.8 แสดงผลของนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกส์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อ มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตส์ไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

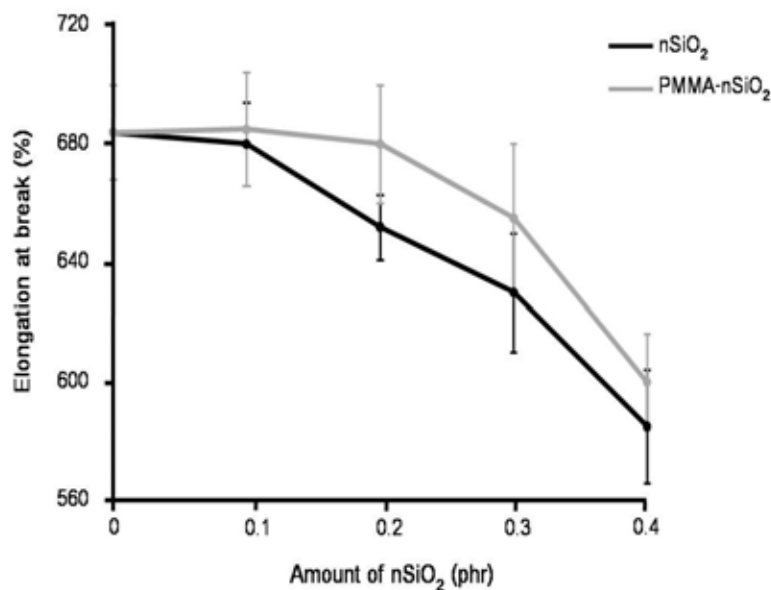


รูปที่ 7.8 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตส์ไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลทีกส์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 7.8 พบว่าการเติมนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกส์ในนาโนคอมพอสิตสามารถปรับปรุงมอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของนาโนคอมพอสิตได้ เนื่องจากความแข็งตัวของสารตัวเติม นอกจากนี้ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกส์ทำให้นาโนคอมพอสิตมีมอดุลัสต่ำกว่าการเติมนาโนซิลิกาที่ไม่ได้ห่อหุ้ม เนื่องจากสายโซ่ของ PMMA ที่ห่อหุ้มนาโนซิลิกาสามารถช่วยให้เกิดปริมาตรอิสระ (free volume) ภายในเมทริกซ์ของยางเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น จึงทำให้นาโนคอมพอสิตที่เติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกส์มีความยืดหยุ่น และมอดุลัสที่ต่ำกว่า

7.2.3 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break)

รูปที่ 7.9 แสดงผลของนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกส์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อ ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตส์ไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต



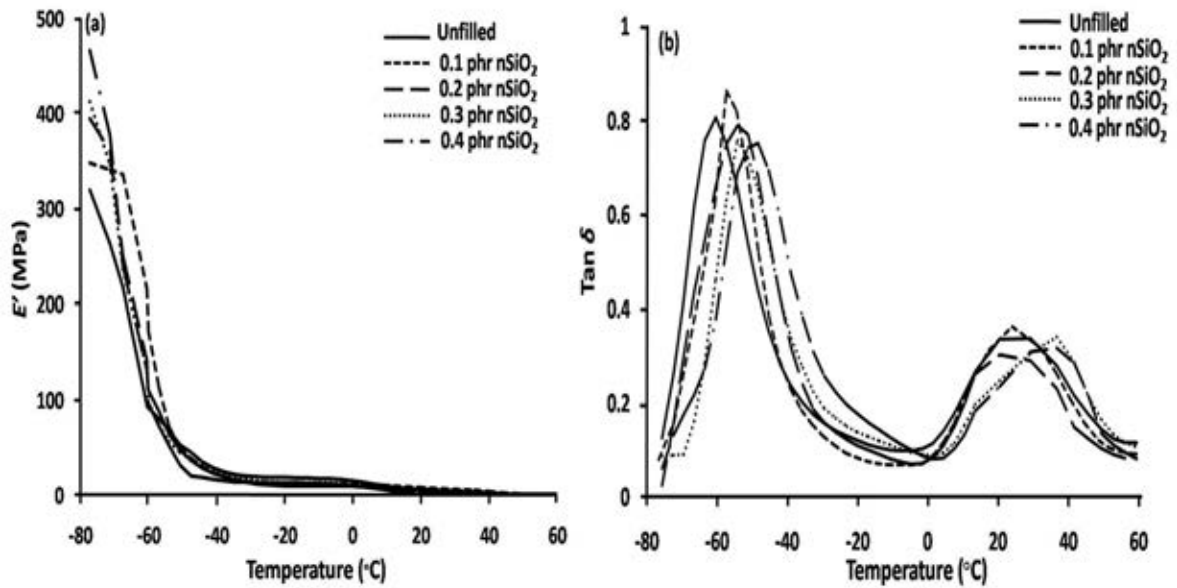
รูปที่ 7.9 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซิลิเกตไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 7.9 พบว่าการเติมนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตทำให้ร้อยละการยืดตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง เนื่องจากความแข็งตึงของสารตัวเติมนอกจากนี้ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ ทำให้นาโนคอมพอสิตมีร้อยละการยืดตัวที่สูงกว่าการเติมนาโนซิลิกาที่ไม่ถูกห่อหุ้ม เนื่องจากเกิดการเพิ่ม free volume ในสายโซ่โมเลกุลของยาง โดยสายโซ่โมเลกุลของ PMMA ที่ห่อหุ้มนาโนซิลิกา ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบมอดุลัส

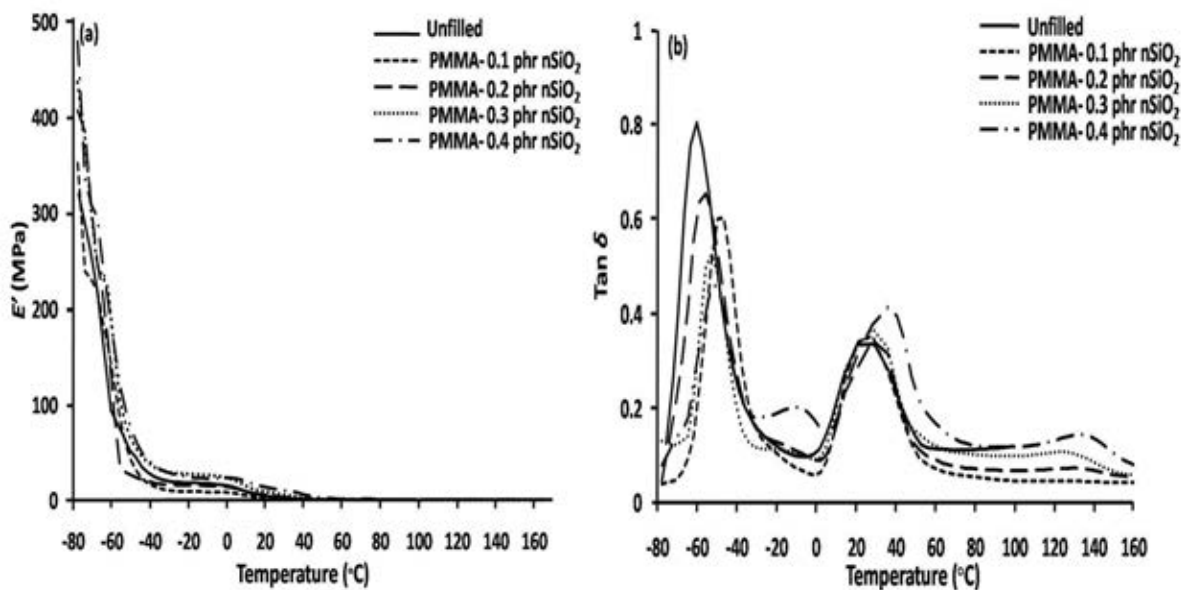
7.3 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซิลิเกตไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์

7.3.1 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical property)

รูปที่ 7.10 และ 7.11 แสดงเทอร์โมแกรมสมบัติเชิงกลพลวัตของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซิลิเกตไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ตามลำดับ



รูปที่ 7.10 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนานซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent



รูปที่ 7.11 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริลเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent

จากรูปที่ 7.10 และ 7.11 พบว่าการเติมนานซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่อมอดูลัสสะสม (storage modulus, E') นอกจากนี้ยังปรากฏพีกของกราฟ

แทนเจนต์สูญเสีย (Loss tangent) 2 พีก ได้แก่ที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส และ 30 องศาเซลเซียส แสดงถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของยางธรรมชาติและยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนตามลำดับ นอกจากนี้นาโนคอมพอสิตที่เติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ตรวจพบ T_g ของ PMMA ที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส โดยค่ามอดุลัสสะสม E' ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียสและค่า T_g ได้แสดงไว้ในตารางที่ 7.2

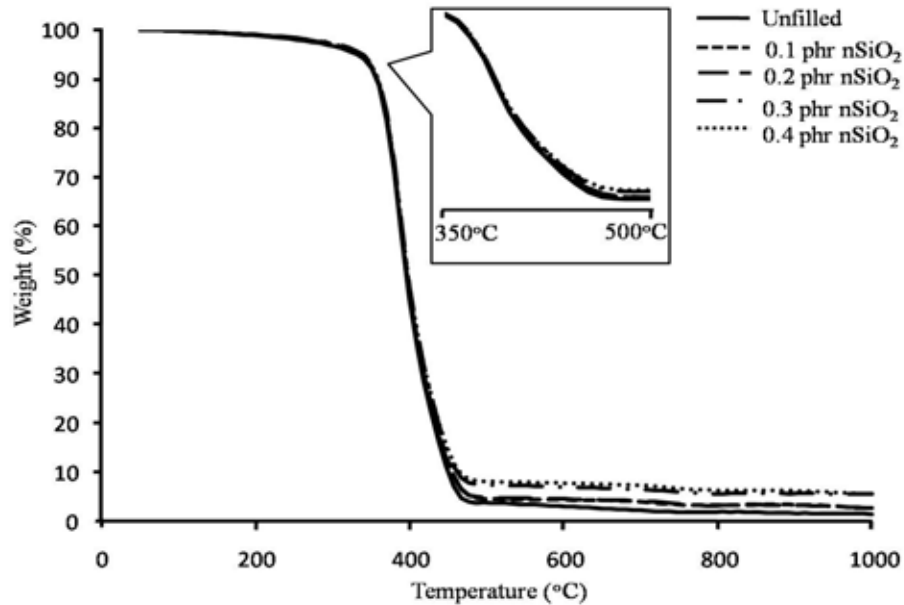
ตารางที่ 7.2 ค่า storage modulus และ T_g ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | Storage modulus (E' , MPa) at -80°C | T_g (°C) from $\tan \delta_{max}$ | | |
|---------------------------------|---|-------------------------------------|------------|------------|
| | | NR phase | XSBR phase | PMMA phase |
| Unfilled | 319.88 | -60 | 30 | - |
| 0.1 phr nSiO ₂ | 348.04 | -57.2 | 29.7 | - |
| 0.2 phr nSiO ₂ | 395.31 | -52.7 | 29.2 | - |
| 0.3 phr nSiO ₂ | 412.43 | -52.4 | 36.1 | - |
| 0.4 phr nSiO ₂ | 466.49 | -49.0 | 35.9 | - |
| PMMA- 0.1 phr nSiO ₂ | 352.41 | -49.6 | 30.4 | 130.0 |
| PMMA- 0.2 phr nSiO ₂ | 407.25 | -55.7 | 30.6 | 132.9 |
| PMMA- 0.3 phr nSiO ₂ | 436.89 | -52.3 | 33.0 | 135.6 |
| PMMA- 0.4 phr nSiO ₂ | 480.08 | -51.7 | 36.4 | 137.3 |

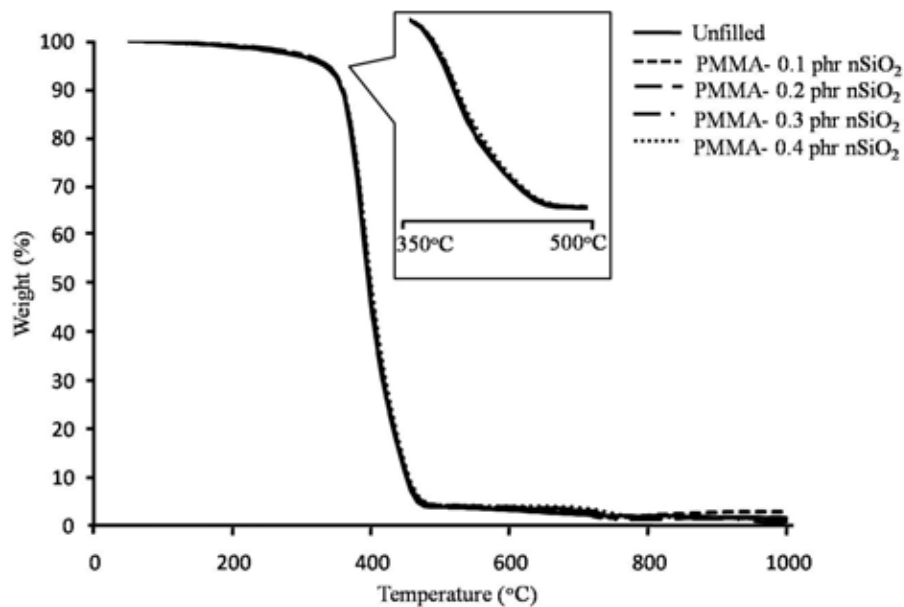
จากตารางที่ 7.2 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้ T_g ของยางธรรมชาติและยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีน มีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยางถูกขัดขวางจากอนุภาคของสารตัวเติม โดยสังเกตจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ของยางธรรมชาติ พบว่า E' ของนาโนคอมพอสิตมีค่าสูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งตัวของสายโซ่โมเลกุลของยาง นอกจากนี้จากผลการทดสอบ พบว่าการเติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์มีผลทำให้ E' ของนาโนคอมพอสิตมีค่าสูงกว่าการเติมนาโนซิลิกา เนื่องจาก PMMA ที่ห่อหุ้มอยู่บนพื้นผิวนาโนซิลิกาไม่มีความเข้ากันกับเมทริกซ์ยาง จึงทำให้ E' ของนาโนคอมพอสิตมีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณนาโนเลเท็กซ์

7.3.2 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

รูปที่ 7.12 และ 7.13 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีน บิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 7.12 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 7.13 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 7.12 และ 7.13 พบว่าการเติมนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกซีในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ โดยอุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์แสดงไว้ในตารางที่ 7.3

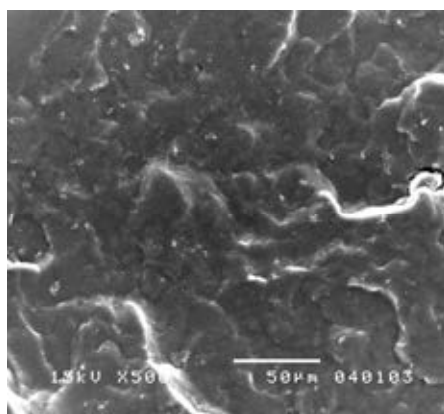
ตารางที่ 7.3 อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซิลิเกตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลทีกซีที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | T _{Onset} (°C) | T _{Endset} (°C) | Char (%) |
|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Unfilled | 350.44 | 454.57 | 3.45 |
| 0.1 phr nSiO ₂ | 353.16 | 458.77 | 4.38 |
| 0.2 phr nSiO ₂ | 354.89 | 460.70 | 4.62 |
| 0.3 phr nSiO ₂ | 355.29 | 461.08 | 6.79 |
| 0.4 phr nSiO ₂ | 355.88 | 461.69 | 7.74 |
| PMMA- 0.1 phr nSiO ₂ | 353.87 | 461.08 | 3.81 |
| PMMA- 0.2 phr nSiO ₂ | 354.63 | 461.91 | 4.09 |
| PMMA- 0.3 phr nSiO ₂ | 355.83 | 462.61 | 3.66 |
| PMMA- 0.4 phr nSiO ₂ | 356.43 | 463.20 | 4.15 |

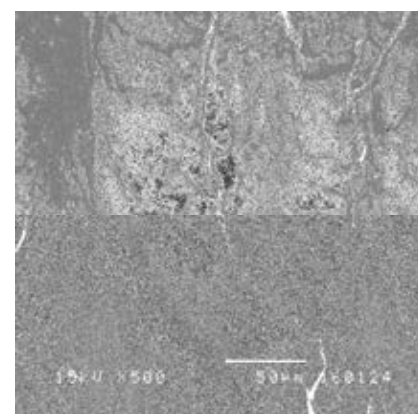
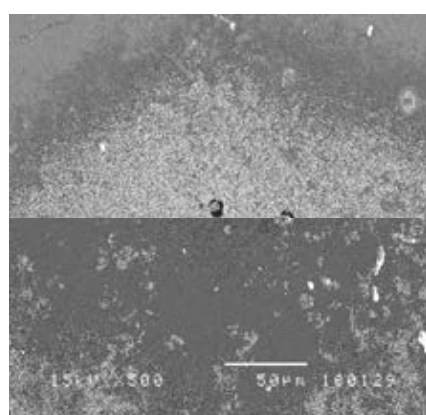
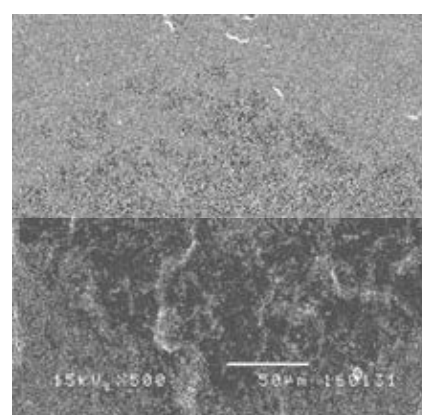
จากตารางที่ 7.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกซีในนาโนคอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยประมาณ 3-5 องศาเซลเซียส และ 3-6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของสารตัวเติมที่เติมลงในนาโนคอมพอสิตมีเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณเถ้าชาร์ที่เกิดขึ้น

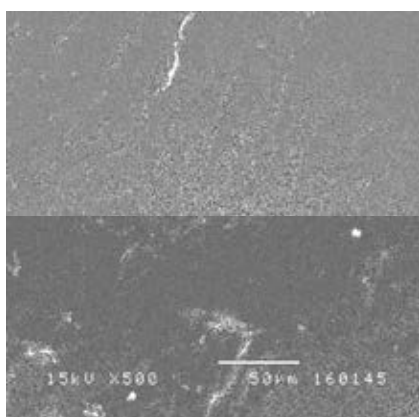
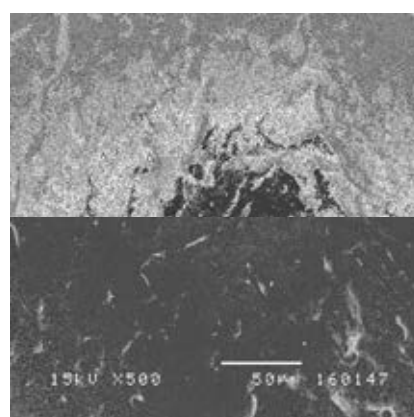
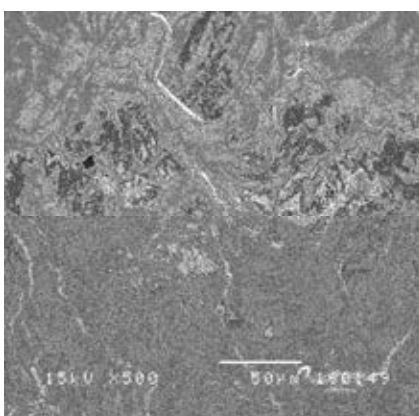
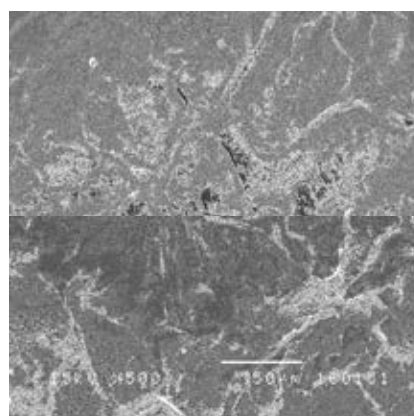
7.4 สัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซิลิเกตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลทีกซี

รูปที่ 7.14 แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซิลิเกตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต ที่เติมนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกซีที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 500 เท่า



NR/XSBR

NR/XSBR/0.1nSiO₂NR/XSBR/0.2nSiO₂NR/XSBR/0.3nSiO₂NR/XSBR/0.4nSiO₂

NR/XSBR/PMMA-0.1nSiO₂NR/XSBR/PMMA-0.2nSiO₂NR/XSBR/PMMA-0.3nSiO₂NR/XSBR/PMMA-0.4nSiO₂

รูปที่ 7.14 ภาพ SEM แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณนาโนซิลิกาและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 7.14 พบว่าการเติมนาโนซิลิกาที่ปริมาณ 0.4 phr มีผลทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนและมีการกระจายตัวไม่ดีในเมทริกซ์ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ การเติม PMMA-nSiO₂ ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น พบว่าพื้นผิวรอยหักเกิดการแยกเฟส ซึ่งเกิดจากความไม่เข้ากันของ PMMA ที่ห่อหุ้มบนผิวของนาโนซิลิกากับเมทริกซ์ยาง

7.5 สรุปผลการทดลอง

7.5.1 สามารถเตรียม PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่มีขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร และมีร้อยละผลได้เท่ากับ ร้อยละ 88.4 ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

7.5.2 จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาคนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ ด้วยเครื่อง TEM พบว่าอนุภาคนาโนซิลิกามีลักษณะเป็นทรงกลมที่เกาะกลุ่มกัน และอนุภาค PMMA-nSiO₂ มีลักษณะเป็นทรงกลม โครงสร้างแบบ 'คอร์-เชลล์' โดยอนุภาคนาโนซิลิกาเป็นแกนกลางและล้อมรอบด้วยชั้นบางๆของ PMMA

7.5.3 การเติมนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงความทนแรงดึง และมอดุลัสของนาโนคอมพอสิตได้ ในขณะที่การเติมนาโนซิลิกาให้มอดุลัสที่สูงกว่า PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์นาโนคอมพอสิต

7.5.4 จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าการเติมนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลพลวัตของนาโนคอมพอสิตได้ นอกจากนี้พบว่า PMMA ที่ห่อหุ้มบนพื้นผิวนาโนซิลิกาก่อให้เกิดความไม่เข้ากันกับเมทริกซ์ยาง

7.5.5 จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าการเติมนาโนซิลิกาและ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตได้เพียงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นประมาณ 3-5 องศาเซลเซียสและ 3-6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

7.5.6 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่า นาโนซิลิกามีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของยางเมื่อทำการเติมในปริมาณที่เหมาะสม แต่เมื่อมีการเติมนาโนซิลิกาในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะพบการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนทำให้เกิดการกระจายตัวที่ไม่ดี ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองสมบัติเชิงกล นอกจากนี้การเติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณเพิ่มขึ้น พบว่าพื้นผิวมีการแยกเฟส ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันของ PMMA ที่ห่อหุ้มบนพื้นผิวนาโนซิลิกากับเมทริกซ์ยาง

บทที่ 8

ผลของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต นาโนเลเท็กซ์ต่อสมบัติของนาโนคอมพอสิต

8.1 นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิล- เมทาคริเลต (PMMA-nSiO₂)

PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวโปร่งแสง ดังแสดงในรูปที่ 8.1



รูปที่ 8.1 ตัวอย่างของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์

8.1.1 ร้อยละผลได้ (%yield) และขนาดอนุภาคในนาโนเลเท็กซ์

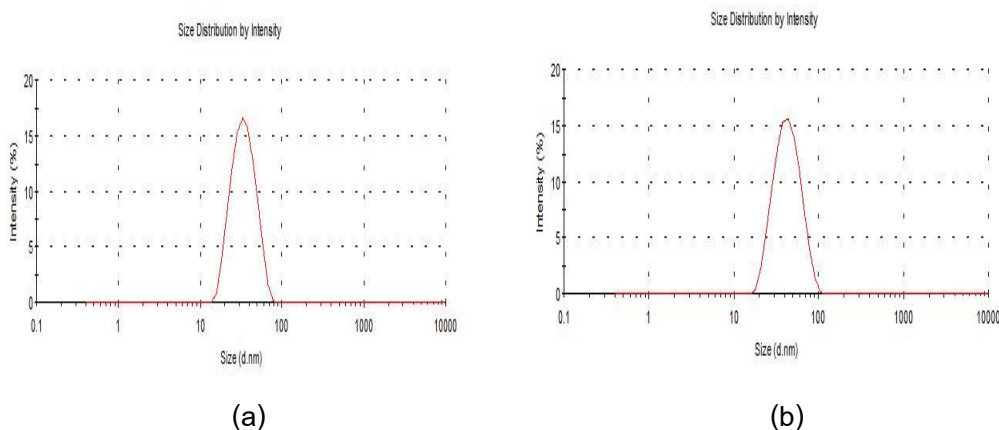
ตารางที่ 8.1 แสดงร้อยละผลได้และขนาดอนุภาคของ PMMA และซิลิกาห่อหุ้มด้วย PMMA ในนาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้

ตารางที่ 8.1 ร้อยละผลได้ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต
นาโนเลเท็กซ์

| Sample | %yield | Average diameter (nm) |
|------------------------|--------|-----------------------|
| nPMMA | 84.8 | 32 |
| PMMA-nSiO ₂ | 88.4 | 40 |

จากตารางที่ 8.1 แสดงร้อยละผลได้ของ PMMA และ PMMA-nSiO₂ ในนาโนเลเท็กซ์ที่เตรียมได้ พบว่าร้อยละผลได้ของ PMMA และ PMMA-nSiO₂ มีค่าเท่ากับร้อยละ 84.8 และ 88.4 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าร้อยละผลได้ของซิลิกาห่อหุ้มด้วย PMMA มีค่าสูงกว่า PMMA เนื่องจากโมเชลล์ที่เกิดขึ้นมีนาโนซิลิกาบรรจุอยู่ภายในซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นนิวเคลียสและช่วยให้เมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (MMA) สามารถเกิดการพอลิเมอไรซ์เป็น PMMA อยู่โดยรอบนาโนซิลิกาได้ นอกจากนี้พื้นผิวของนาโนซิลิกาที่เติมเข้าสู่ระบบมีชั้นบางๆ ของสารคู่ควบ MPTMS ซึ่งมีโครงสร้างพันธะคู่ (double bond) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับ MMA และเกิดการพอลิเมอไรซ์ต่อไปเป็น PMMA ได้

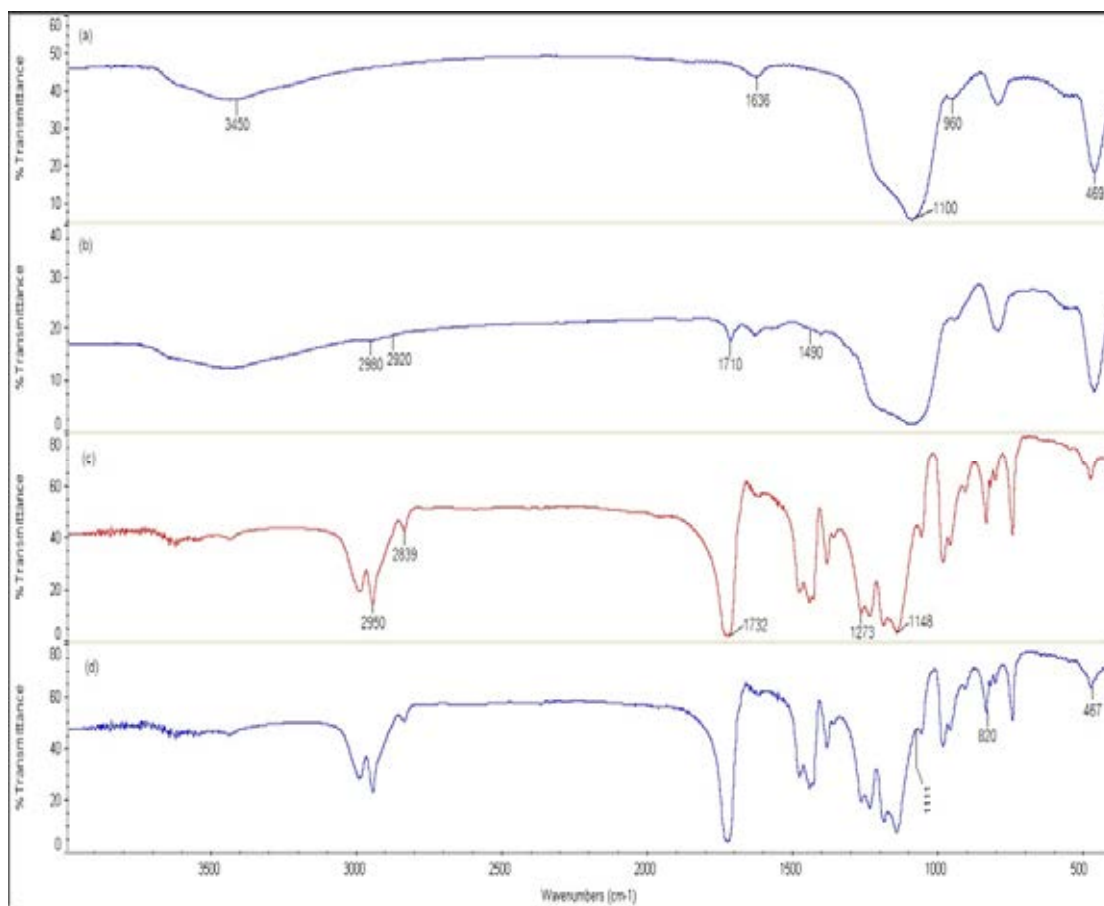
นอกจากนี้พบว่าด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันสามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่มีขนาดต่ำกว่า 50 นาโนเมตร โดยที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอนุภาค PMMA มีค่าเท่ากับ 32 นาโนเมตร และอนุภาค PMMA-nSiO₂ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 40 นาโนเมตร เนื่องจากอนุภาคนาโนซิลิกาที่ใช้ในการทดลองนี้มีขนาด 15-20 นาโนเมตร และยังคงเคลือบไว้ด้วยชั้นบางๆ ของ MPTMS ก่อนนำไปห่อหุ้มด้วย PMMA จึงทำให้อนุภาค PMMA-nSiO₂ มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาค PMMA ดังแสดงการกระจายขนาดอนุภาคในรูปที่ 8.2



รูปที่ 8.2 การกระจายขนาดอนุภาคนาโนของ (a) พอลิเมทิลเมทาคริเลต และ (b) นาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

8.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

รูปที่ 8.3 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนซิลิกา อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วย MPTMS อนุภาค PMMA และอนุภาค PMMA-nSiO₂ ด้วยเทคนิค FT-IR โดยตารางที่ 8.2 แสดงค่าเลขคลื่น (wave number) ของหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 8.3 FT-IR สเปกตรัมของ (a) อนุภาคนาโนซิลิกา (b) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรด้วย MPTMS (c) อนุภาคพอลิเมทิลเมทาคริเลต และ (d) อนุภาคนาโนซิลิกาที่ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

จากรูปที่ 8.3(a) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลิกา ตรวจพบพีคของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ที่เลขคลื่น 1100 และ 469 cm^{-1} พีคหมู่ฟังก์ชัน Si-OH บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกาที่เลขคลื่น 960 cm^{-1} และพีคของหมู่ฟังก์ชัน -OH group ที่เลขคลื่น 3450 cm^{-1}

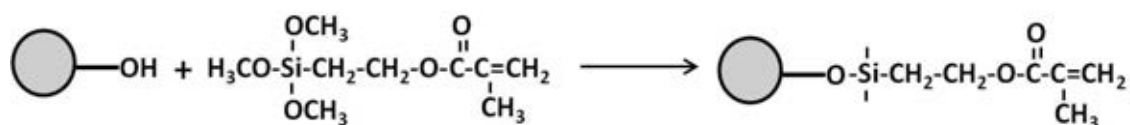
จากรูปที่ 8.3(b) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาคนาโนซิลิกาที่ดัดแปรผิวด้วย MPTMS ตรวจพบพีคของหมู่ฟังก์ชัน $-\text{CH}_3$, $-\text{CH}_2$, C=O และ C=C เกิดเพิ่มขึ้นที่เลขคลื่น 2980, 2920, 1710 และ 1490 cm^{-1} ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันของสารคู่ควบ MPTMS เข้าทำปฏิกิริยากันหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวอนุภาคนาโนซิลิกา ดังแสดงในรูปที่ 8.4 จึงเป็นการยืนยันการเกาะติดของ MPTMS บนพื้นผิวของอนุภาคนาโนซิลิกา

จากรูปที่ 8.3 (c) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาค PMMA ตรวจพบพีกหมู่ฟังก์ชันที่แสดงสเปกตรัมของ PMMA ได้แก่ พีกของ $-CH_3$ และ $-CH_2$ ที่เลขคลื่น 2950 cm^{-1} และ 2839 cm^{-1} , พีกของ $C=O$ ที่เลขคลื่น 1732 cm^{-1} , และพีกของ $C-O-C$ ที่เลขคลื่น 1273 cm^{-1} และ 1148 cm^{-1}

จากรูปที่ 8.3(d) แสดง FT-IR สเปกตรัมของอนุภาค PMMA- $nSiO_2$ ตรวจพบพีกของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ที่เลขคลื่น 1111 cm^{-1} และ 467 cm^{-1} และพีกของ Si-O-C ที่เลขคลื่น 820 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการเกาะติดของ PMMA บนพื้นผิวอนุภาคนาโนซิลิกาที่มีสารคู่ควบ MPTMS เป็นสารเชื่อมประสาน [48]

ตารางที่ 8.2 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันซิลิกา MPTMS และพอลิเมทิลเมทาคริเลต [48]

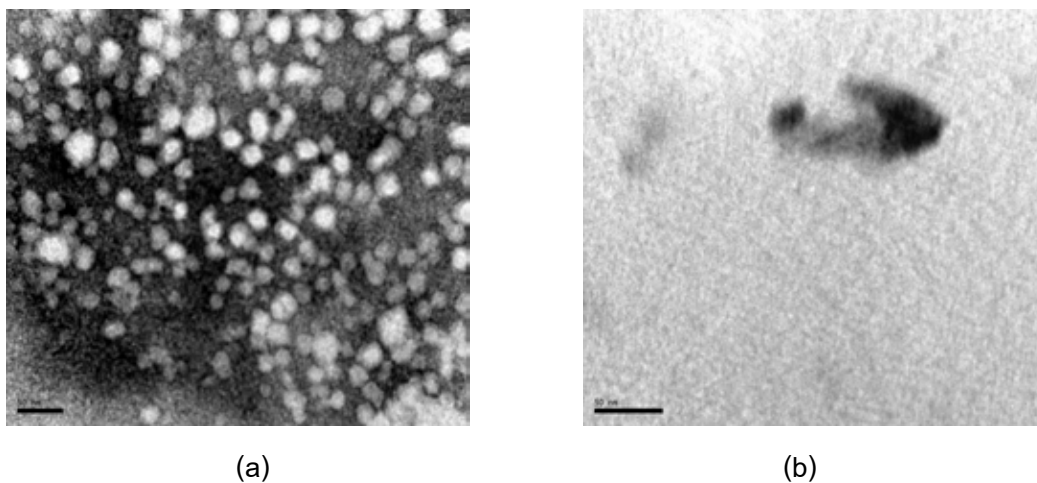
| Wavenumber (cm^{-1}) | ซิลิกา | MPTMS | PMMA |
|---------------------------------|--------------------|--------------|---------|
| 3049 | -OH | | |
| 1100 | Si-O-Si stretching | | |
| 956 | Si-OH stretching | | |
| 471 | Si-O-Si bending | | |
| 2982 | | $-CH_3$ | |
| 2926 | | $-CH_2$ | |
| 1710 | | $C=O$ | |
| 1640 | | $C=C$ | |
| 1100 | | Si-O-Si asym | |
| 821 | | Si-O-C | |
| 2955 | | | $-CH_3$ |
| 2879 | | | $-CH_2$ |
| >1700 | | | $C=O$ |
| 1300, 1050 | | | $C-O-C$ |



รูปที่ 8.4 การดัดแปรผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลิโคน MPTMS

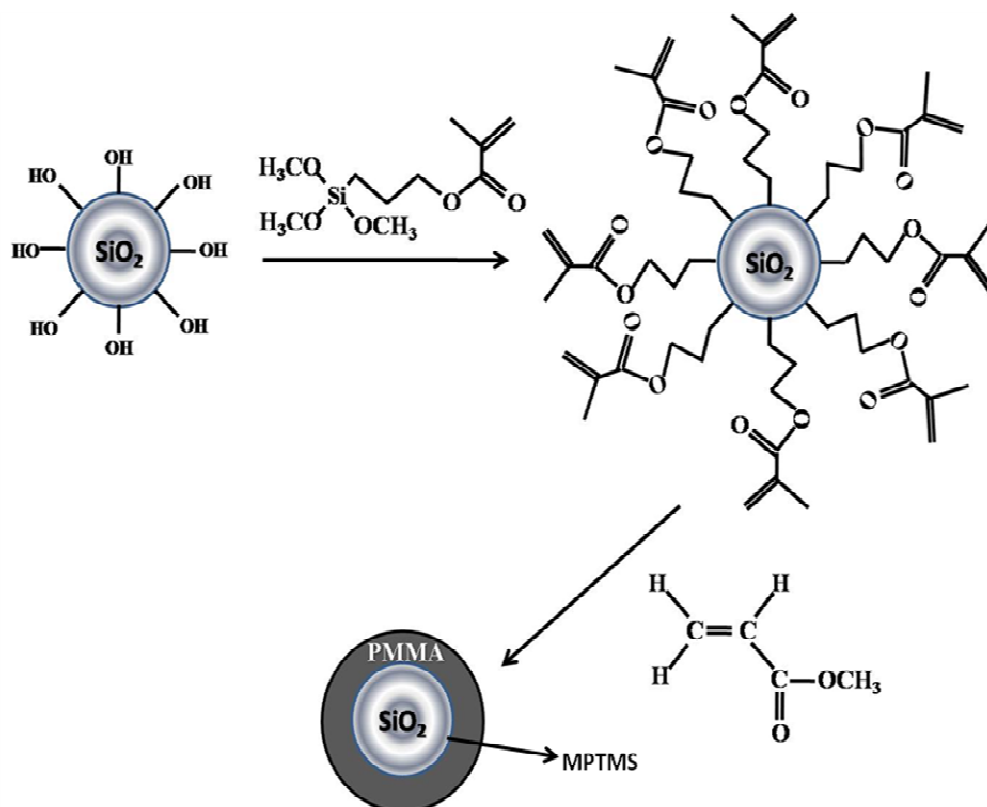
8.1.3 สัณฐานวิทยาของอนุภาคพอลิเมทิลเมทาคริเลตและอนุภาคนาโนซิลิกา ห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

รูปที่ 8.5 แสดงสัณฐานวิทยาของอนุภาค PMMA และอนุภาค PMMA-nSiO₂ ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค TEM



รูปที่ 8.5 สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคพอลิเมทิลเมทาคริเลต และ (b) อนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

จากรูปที่ 8.5 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของ PMMA มีลักษณะเป็นทรงกลม ส่วนอนุภาค PMMA-nSiO₂ มีลักษณะเป็น 'คอร์-เชลล์' (core-shell structure) โดยมีอนุภาคนาโนซิลิกา (สีดำ) เป็นแก่น (core) และถูกล้อมรอบด้วยชั้น (shell) ของ PMMA (สีเทา) บางๆ ซึ่งมีกลไกการห่อหุ้มดังแสดงรูปที่ 8.6

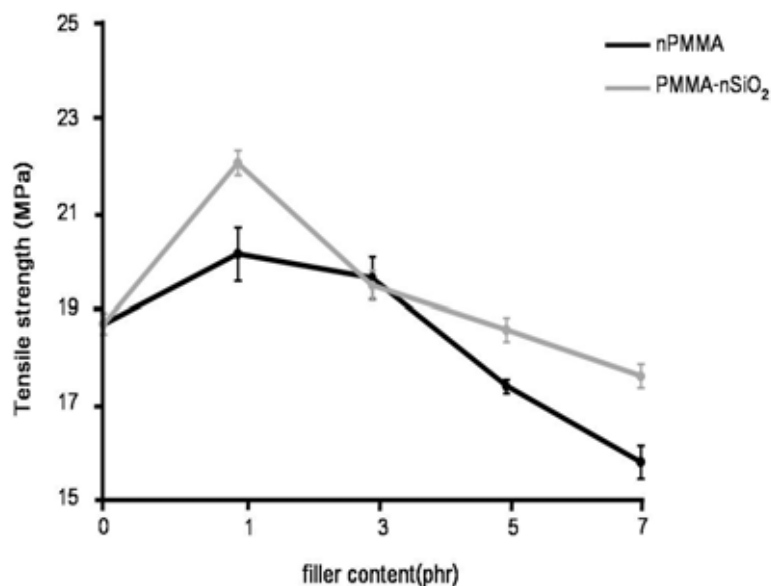


รูปที่ 8.6 กลไกการห่อหุ้มอนุภาคนาโนซิลิกาด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

8.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลต และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์

8.2.1 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

รูปที่ 8.7 แสดงผลของ PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

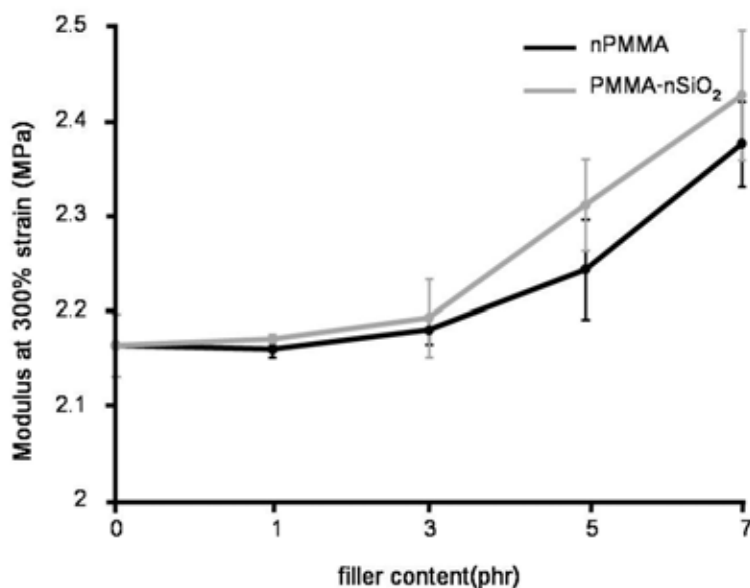


รูปที่ 8.7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ในปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 8.7 พบว่าความทนแรงดึงของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคาร์บอนิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเท่ากับ 18.7 MPa เมื่อเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์มีผลทำให้ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยการเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณ 1 phr จะทำให้ได้ความทนแรงดึงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 20.2 MPa และ 22.1 MPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณของ PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ให้มากขึ้น กลับพบว่าความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวไม่สมบูรณ์ของสารตัวเติมในน้ำยาง อีกทั้งความไม่เข้ากันของ PMMA กับเมทริกซ์ของยาง ซึ่งทำให้สารตัวเติมมี interaction กับโมเลกุลของยางลดลง นอกจากนี้ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์สามารถให้ความทนแรงดึงสูงกว่าการเติม PMMA นาโนเลเท็กซ์ โดย PMMA-nSiO₂ แสดงประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ดี เนื่องจากการทำงานร่วมกัน (synergistic) ในการเสริมแรงของ PMMA และอนุภาคนาโนซิลิกา

8.2.2 มอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 (modulus at 300% strain)

รูปที่ 8.8 แสดงผลของ PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อมอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต

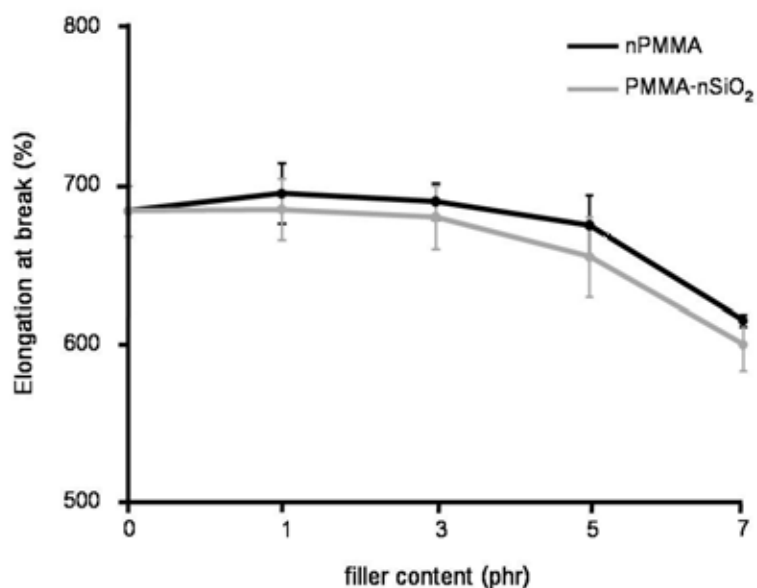


รูปที่ 8.8 มอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไตรีนบิวทาไดอินนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 8.8 พบว่าการเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิต สามารถปรับปรุงมอดุลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 ของนาโนคอมพอสิตได้ เนื่องจากความแข็งตึงของสารตัวเติมนอกจากนี้ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ทำให้นาโนคอมพอสิตมีมอดุลัสสูงกว่าการเติม PMMA เนื่องจากนาโนซิลิกาในนาโนเลเท็กซ์ช่วยส่งเสริมให้เกิดความแข็งตึงในนาโนคอมพอสิต

8.2.3 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาด (% Elongation at break)

รูปที่ 8.9 แสดงผลของ PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ต่อยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไตรีนบิวทาไดอินนาโนคอมพอสิต



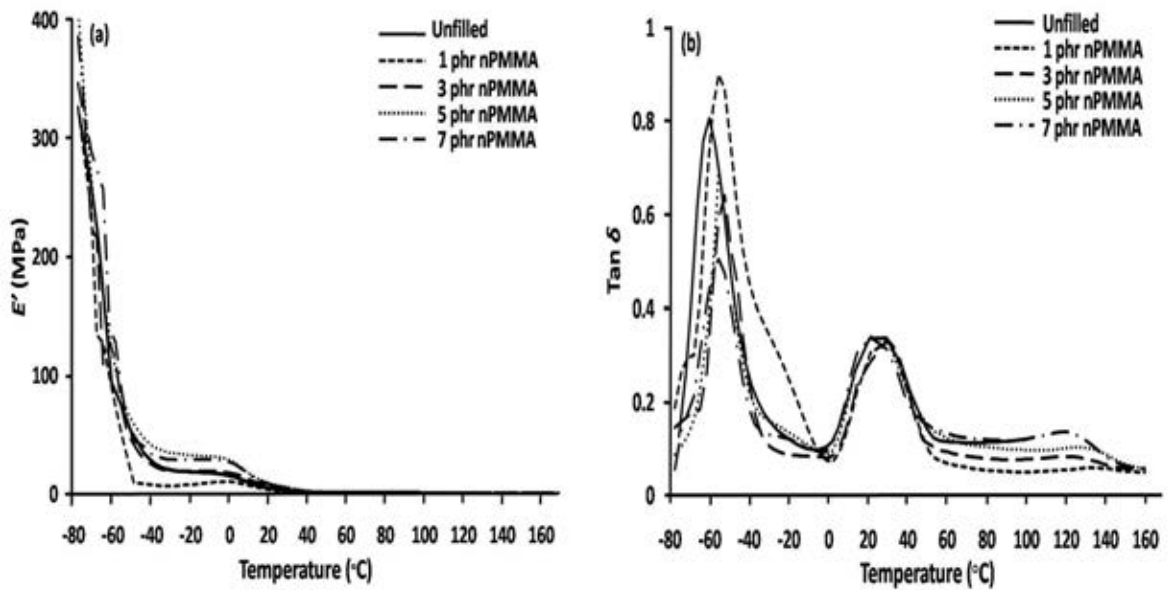
รูปที่ 8.9 ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีน นาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 8.9 พบว่าการเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิต ทำให้ร้อยละการยืดตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าลดลง เนื่องจากความแข็งตึงของสารตัวเติม นอกจากนี้ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ทำให้นาโนคอมพอสิต มีร้อยละการยืดตัวที่ต่ำกว่าการเติม PMMA นาโนเลเท็กซ์ เนื่องจากนาโนซิลิกาในนาโนเลเท็กซ์ ก่อให้เกิดความแข็งตึงในนาโนคอมพอสิตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการทดสอบมอดุลัส

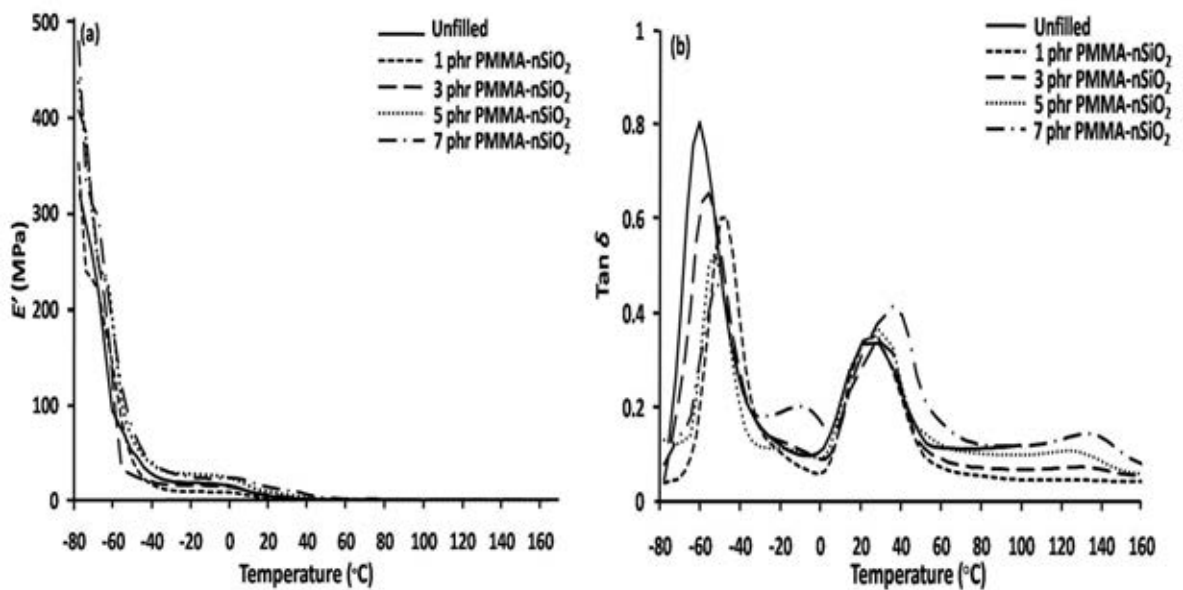
8.3 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์

8.3.1 สมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical property)

รูปที่ 8.10 และ 8.11 แสดงเทอร์โมแกรมสมบัติเชิงกลพลวัตของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ตามลำดับ



รูปที่ 8.10 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริลเลตนาโนเลทีกซีที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent



รูปที่ 8.11 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริลเลตนาโนเลทีกซีที่ปริมาณต่างๆ กัน (a) Storage modulus (b) Loss tangent

จากรูปที่ 8.10 และ 8.11 พบว่าการเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกซีในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่อมอดุลัสสะสม (storage modulus, E') นอกจากนี้ยังปรากฏพีกของกราฟ

แทนเจนต์สูญเสีย (Loss tangent) 3 พิก ได้แก่ที่อุณหภูมิ -60 องศาเซลเซียส และ 30 องศาเซลเซียส และ 130 องศาเซลเซียส แสดงถึงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T_g) ของยางธรรมชาติ ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีน และ PMMA ตามลำดับ โดยค่ามอดุลัสสะสม E' ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียสและค่า T_g ได้แสดงไว้ในตารางที่ 8.3

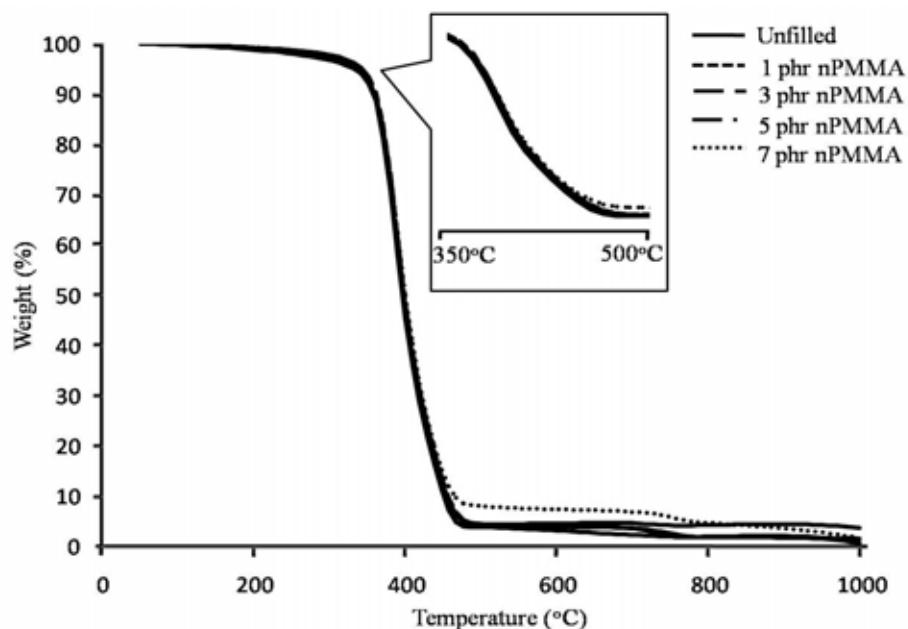
ตารางที่ 8.3 ค่า storage modulus และ T_g ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต นาโนเลทีกซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | Storage modulus (E' , MPa) at -80°C | T_g (°C) from $\tan \delta_{max}$ | | |
|------------------------------|---|-------------------------------------|------------|------------|
| | | NR phase | XSBR phase | PMMA phase |
| Unfilled | 319.88 | -60 | 30.0 | - |
| 1 phr nPMMA | 326.31 | -55.4 | 31.3 | 133.3 |
| 3 phr nPMMA | 346.25 | -51.2 | 31.1 | 134.5 |
| 5 phr nPMMA | 385.68 | -56.2 | 30.7 | 135.1 |
| 7 phr nPMMA | 411.71 | -52.5 | 30.5 | 136.8 |
| 1 phr PMMA-nSiO ₂ | 352.41 | -49.6 | 30.4 | 130.0 |
| 3 phr PMMA-nSiO ₂ | 407.25 | -55.7 | 30.6 | 132.9 |
| 5 phr PMMA-nSiO ₂ | 436.89 | -52.3 | 33.0 | 135.6 |
| 7 phr PMMA-nSiO ₂ | 480.08 | -51.7 | 36.4 | 137.3 |

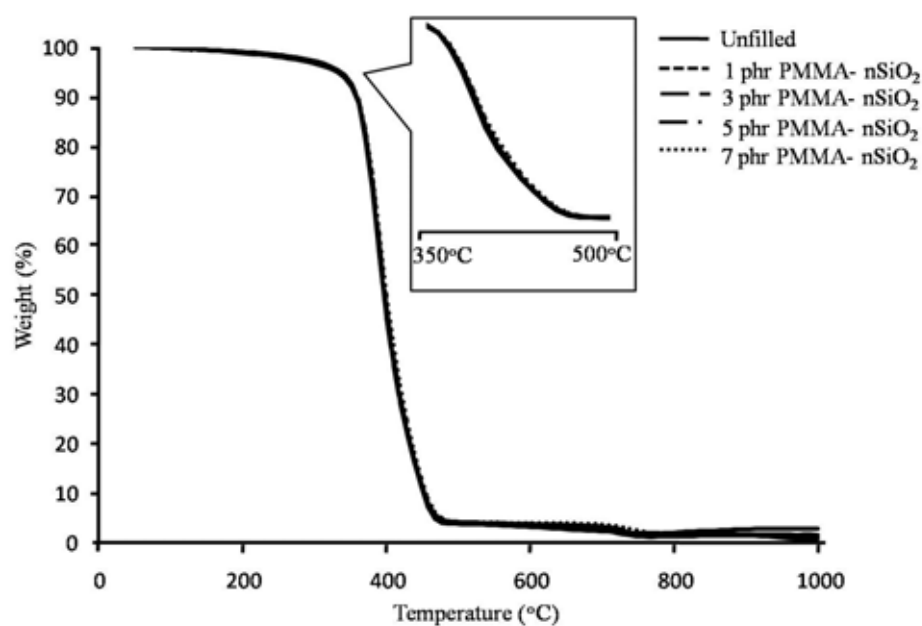
จากตารางที่ 8.3 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกซ์ในนาโนคอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้ T_g ของยางธรรมชาติและยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีนมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยางถูกขัดขวางจากอนุภาคของสารตัวเติม โดยสังเกตจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_g ของยางธรรมชาติ พบว่า E' ของนาโนคอมพอสิตมีค่าสูงกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางคาร์บอซิลเลตสไตรีนบิวทาไดอีน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแข็งตึงของสายโซ่โมเลกุลของยาง นอกจากนี้จากผลการทดสอบ พบว่าการเติม PMMA-nSiO₂ นาโนเลทีกซ์มีผลทำให้ E' ของนาโนคอมพอสิตมีค่าสูงกว่าการเติม PMMA นาโนเลทีกซ์ เนื่องจาก PMMA ที่ห่อหุ้มอยู่บนพื้นผิวนาโนซิลิกาไม่มีความเข้ากันกับเมทริกซ์ยาง อีกทั้งขนาดอนุภาค PMMA-nSiO₂ มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาค PMMA จึงทำให้เกิดการขัดขวางสายโซ่โมเลกุลของยางได้มากกว่า

8.3.2 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

รูปที่ 8.12 และ 8.13 แสดงเสถียรภาพทางความร้อนของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตส์ไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 8.12 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตส์ไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน



รูปที่ 6.13 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนิลเลตส์ไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิตที่เติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 8.12 และ 8.13 พบว่าการเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ โดยอุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์แสดงไว้ในตารางที่ 6.4

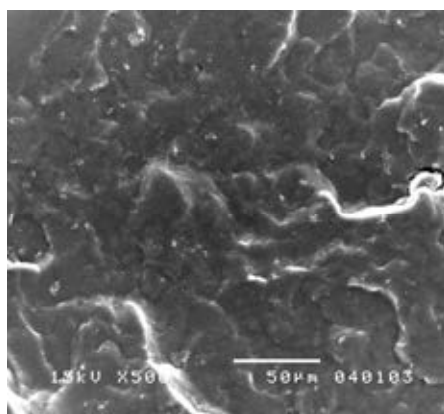
ตารางที่ 6.4 อุณหภูมิการสลายตัว และปริมาณเถ้าชาร์ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไตรีนบิวทาไดอินนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

| Sample | T _{Onset} (°C) | T _{Endset} (°C) | Char (%) |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------|
| Unfilled | 350.44 | 454.57 | 3.45 |
| 1 phr nPMMA | 352.96 | 460.81 | 4.72 |
| 3 phr nPMMA | 353.57 | 461.27 | 4.23 |
| 5 phr nPMMA | 354.49 | 462.71 | 4.10 |
| 7 phr nPMMA | 355.71 | 463.10 | 7.70 |
| 1 phr PMMA-nSiO ₂ | 353.87 | 461.08 | 3.81 |
| 3 phr nPMMA-SiO ₂ | 354.63 | 461.91 | 4.09 |
| 5 phr PMMA-nSiO ₂ | 355.83 | 462.61 | 3.66 |
| 7 phr PMMA-nSiO ₂ | 356.43 | 463.20 | 4.15 |

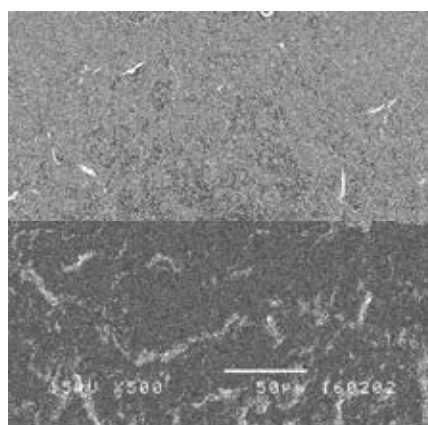
จากตารางที่ 8.4 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ในนาโนคอมพอสิตให้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ประมาณ 2-5 องศาเซลเซียส และ 3-6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของสารตัวเติมที่เติมลงในนาโนคอมพอสิตมีเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณเถ้าชาร์ที่เกิดขึ้น

8.4 สัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไตรีนบิวทาไดอินนาโนคอมพอสิตที่เติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์

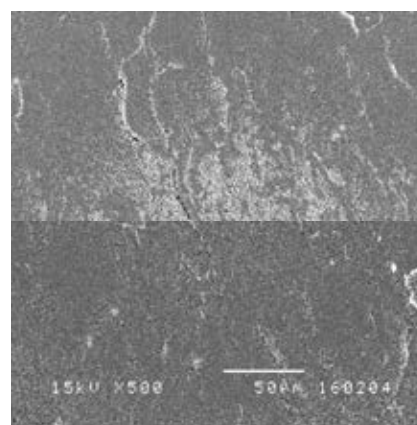
รูปที่ 8.14 แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซีเลตส์ไตรีนบิวทาไดอินนาโนคอมพอสิตที่เติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ ซึ่งตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM กำลังขยาย 500 เท่า



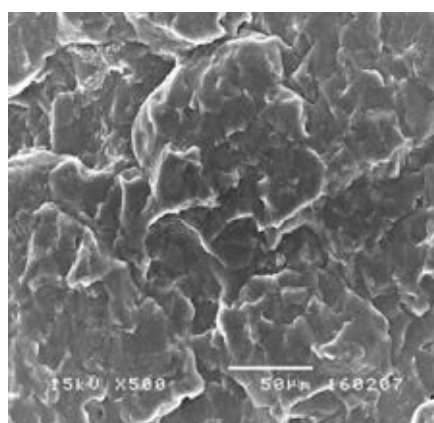
NR/XSBR



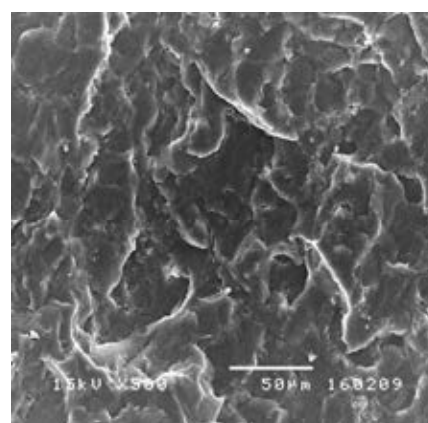
NR/XSBR/1nPMMA



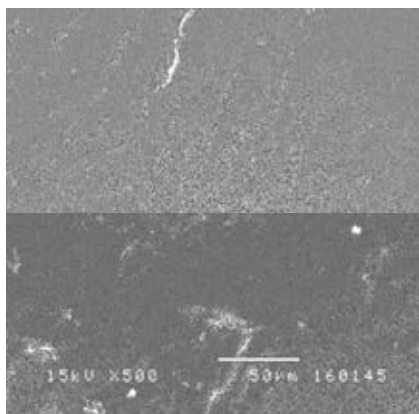
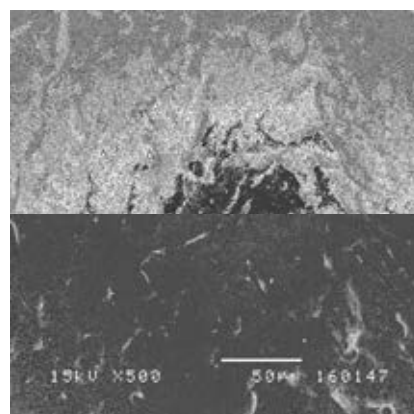
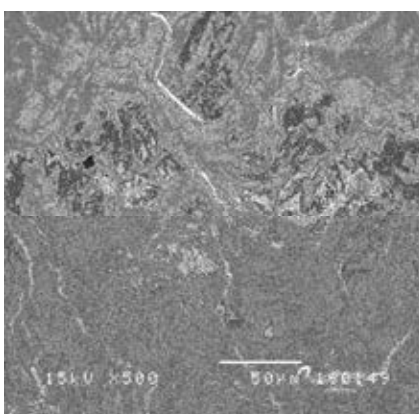
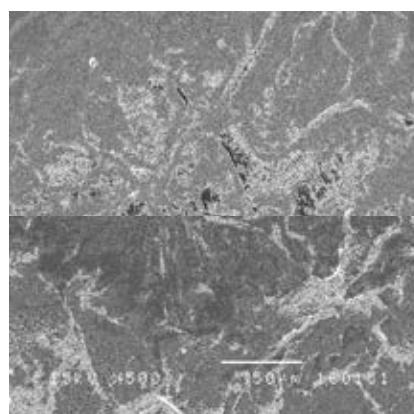
NR/XSBR/3nPMMA



NR/XSBR/5nPMMA



NR/XSBR/7nPMMA

NR/XSBR/1PMMA-nSiO₂NR/XSBR/3PMMA-nSiO₂NR/XSBR/5PMMA-nSiO₂NR/XSBR/7PMMA-nSiO₂

รูปที่ 7.14 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางคาร์บอนซิลิเกตไดรีนบิวทาไดอินนาโนคอมพอสิตที่ปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลต และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณต่างๆ กัน

จากรูปที่ 6.14 พบว่า การเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ ในปริมาณที่เหมาะสมมีการกระจายตัวที่ดีในเมทริกซ์ของยาง นอกจากนี้ เมื่อเติมปริมาณนาโนเลเท็กซ์เพิ่มมากขึ้น พบว่าพื้นผิวรอยหักเกิดการแยกเฟส ซึ่งเกิดจากความไม่เข้ากันกับเมทริกซ์ยาง

8.5 สรุปผลการทดลอง

8.5.1 สามารถเตรียม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่มีขนาดอนุภาค 32 และ 40 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีร้อยละผลได้เท่ากับ ร้อยละ 84.8 และ 88.4 ตามลำดับ ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ ‘อิน ซิทู’ ดิฟเฟอเรนเชียลดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

8.5.2 จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาค PMMA และ PMMA-nSiO₂ ด้วยเครื่อง TEM พบว่าอนุภาค PMMA มีลักษณะเป็นทรงกลม และอนุภาค PMMA-nSiO₂ มีลักษณะเป็นทรงกลม โครงสร้างแบบ 'คอร์-เชลล์' โดยอนุภาคนาโนซิลิกาเป็นแก่นกลางและล้อมรอบด้วยชั้นบางๆของ PMMA

8.5.3 การเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงความทนแรงดึง และมอดูลัสของนาโนคอมพอสิตได้ โดยการเติมซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนานาโนเลเท็กซ์ให้ประสิทธิภาพการเสริมแรง และมอดูลัสที่ดีกว่าการเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลตนานาโนเลเท็กซ์

8.5.4 จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าการเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลพลวัตของนาโนคอมพอสิตได้ นอกจากนี้พบว่า PMMA ก่อให้เกิดความไม่เข้ากันกับเมทริกซ์ยาง

8.5.5 จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าการเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตได้เพียงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิการสลายตัวของนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นประมาณ 2-5 องศาเซลเซียสและ 3-6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

8.5.6 จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่า การเติม PMMA และ PMMA-nSiO₂ นาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณเหมาะสมจะทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีในเมทริกซ์ของยาง นอกจากนี้ การเติมนาโนเลเท็กซ์ที่ปริมาณเพิ่มขึ้น พบว่าพื้นผิวมีการแยกเฟส ซึ่งแสดงถึงความไม่เข้ากันของ PMMA กับเมทริกซ์ยาง

บทที่ 9

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผลการทดลอง

9.1.1 สามารถเตรียมอนุภาคพอลิซิสไตรีน พอลิเมทิลเมทาคริเลต ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิซิสไตรีน และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ ที่มีอนุภาคขนาด 34-40 นาโนเมตร และมีร้อยละของผลได้เท่ากับ 85-96 ผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

9.1.2 จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของคาร์บอนนาโนทิวบ์ด้วยเครื่อง TEM พบว่ามีสัณฐานวิทยาเป็นท่อแบบผนังหลายชั้น ส่วนคาร์บอนแบล็ก นาโนซิลิกา พอลิซิสไตรีน และพอลิเมทิลเมทาคริเลตนาโนเลเท็กซ์ พบว่ามีสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคทรงกลม ในขณะที่ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิซิสไตรีน และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตมีสัณฐานวิทยาเป็นอนุภาคทรงกลมที่มีลักษณะเฉพาะแบบ 'คอร์-เชลล์' (core-shell) โดยมีอนุภาคนาโนซิลิกา (สีดำ) เป็นแก่น (core) และถูกล้อมรอบด้วยชั้น (shell) ของพอลิเมอร์ (สีเทา)

9.1.3 จากการศึกษาค่าความทนแรงดึง พบว่าคาร์บอนนาโนทิวบ์เป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงมากที่สุด โดยสามารถทำให้ค่าความทนแรงดึงเทียบเคียงกับสารตัวเติมชนิดอื่น ในปริมาณการเติมที่น้อยกว่าถึง 25 เท่า

9.1.4 จากการศึกษาค่ามอดูลัสที่ความเครียดร้อยละ 300 พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กสามารถช่วยปรับปรุงค่ามอดูลัสของนาโนคอมพอสิตได้สูงที่สุด

9.1.5 จากการศึกษาการยึดตัว ณ จุดขาด พบว่าการเติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ส่งผลให้ค่าการยึดตัวมีค่าลดลงต่ำกว่ายางผสมเมทริกซ์

9.1.6 จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัต พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กช่วยปรับปรุงค่ามอดูลัสสะสมของนาโนคอมพอสิตได้สูงที่สุด ในขณะที่การเติมสารตัวเติมประเภทพอลิซิสไตรีน และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิซิสไตรีนส่งผลให้นาโนคอมพอสิตมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำๆ

9.1.7 จากการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของยางผสมและนาโนคอมพอสิต พบว่าการเติมคาร์บอนแบล็กสามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตได้ดีที่สุด

9.1.8 จากทดสอบพื้นฐานวิทยาของยางผสมและนาโนคอมพอสิต พบการกระจายตัวและเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติมที่ให้ผลสอดคล้องกับค่าความทนแรงดึง นอกจากนี้ยังตรวจพบลักษณะผิวที่แสดงความยืดหยุ่นเมื่อทำการเติมสารตัวเติมประเภทพอลิสไตรีน และนาโนซิลิกา ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน ในขณะที่ตรวจพบความไม่เข้ากันของสารตัวเติมพอลิเมทิลเมทาคริเลต และนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตกับเมทริกซ์ยางผสม

9.2 ข้อเสนอแนะ

9.2.1 ปรับปรุงกระบวนการผสมระหว่างยางผสมกับสารตัวเติมที่มีขนาดนาโนเมตร โดยทดลองนำสารตัวเติมมาผสมกับยางแท่ง เพื่อเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของนาโนเลเท็กซ์

9.2.2 ศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัตของสารตัวเติมประเภทพอลิสไตรีน และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนที่ส่งผลต่อความยืดหยุ่นของสายโซ่โมเลกุลของยางผสมที่อุณหภูมิต่ำ ไกล่ อุณหภูมิ คล้ายแก้วของยางธรรมชาติ

รายการอ้างอิง

- [1] Barlow, F.W., (1993). Rubber Compounding: Principles, Materials and Techniques. 2nd ed. New York: Marcel Dekker.
- [2] พงษ์ธร ชาญชัย. (2548). ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [3] Robert, A.D., (1988). Natural Rubber Science and Technology. London: Oxford University Press.
- [4] Blacley, D.C., (1997). Polymer Lattices: Science and Technology. 2nd ed. Volume 2. Types of Lattices. New York: Chapman&Hall.
- [5] อธิพิณ แจ่มชัด, (2545). ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง.
- [6] Stephen, R., Jose, S., Joseph, K., Thomas, S. and Oommen, Z. (2006). Thermal Stability and Ageing Properties of Sulphur and Gamma Radiation Vulcanized Natural Rubber (NR) and Carboxylated Styrene Butadiene Rubber (XSBR) Lattices and Their Blends, Polymer Degradation and Stability, 91: 1717-1725.
- [7] วราภรณ์ ขจรไชยกูล. (2536). ระบบการคงรูปของยาง (Vulcanization System). ชาติใหญ่: งานอุตสาหกรรมยาง ศูนย์วิจัยยางชาติใหญ่.
- [8] พรพรรณ นิธิอุทัย. (2528). สารเคมีสำหรับยาง. ปัตตานี: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- [9] เสาวรจน์ ช้วยจุลจิตร (2537). เทคโนโลยียาง. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [10] Maurice, M., (1973). Rubber Technology. Ohio: Institute of Polymer Science, The University of Arkon.

- [11] บุญธรรม นิธิอุทัย. (2530). ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์และคุณสมบัติ. ปัตตานี: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- [12] Du, M., Guo, B., Lei, Y., Liu, M., and Jis, D. (2008). Carboxylated Butadiene-Styrene Rubber/Halloysite Nanotube Nanocomposites: Interfacial Interaction and Performance, Polymer, 49: 4871-4876.
- [13] Stamper, K. (1996). An overview of carpet laminates, Journal of industrial textiles, 25: 257-267.
- [14] Heibei JINLIJI Chemical Group. Carboxylated styrene-butadiene rubber latex [Online]. 2007. Available from <http://www.jinlijichem.com> [2012, March]
- [15] JW Latex Consultants. Carboxylated styrene butadiene rubber [Online]. 2006. Available from : <http://latexconsultants.blogspot.com/> [2012, March]
- [16] Pal, K., Rajasekar, R., Kang, D.J., Zhang, Z.X., Pal, S.K., Das, C.K. and Kim, J. K. (2010). Influence of Carbon Blacks on Butadiene Rubber/High Styrene Rubber/Natural Rubber with Nanosilica: Morphology and Wear, Materials and Design, 31: 1156-1164.
- [17] Findik, F., Yilmaz, R. and Koksall, T. (2004). Investigation of Mechanical and Physical Properties of Several Industrial Rubbers, Materials and Design, 25: 269-276.
- [18] Popovic, R., Milenkovic, D., Popovic, R. and Plavsic, M. (2005). Properties of Natural Rubber/Carboxilated Styrene-Butadiene Latices Blends, Scientific-Technical Review, 3-4: 66-70.
- [19] Gerard, K., (1965). Reinforcement of Elastomer. Interscience.

- [20] อรุษา สรวารี. (2546). สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [21] Research and Development Centre for Thai Rubber Industry. Carbon black [online]. 2010. Available from: <http://rubbercenter.org/> [2012, March]
- [22] Jean, L.L. (2002). Rubber-Filler Interactions and Rheological Properties in Filled Compounds, Progress in Polymer Science, 27: 627-687.
- [23] Peng, Z., Kong, L.X., Li, S.D., Chen, Y. and Huang, M.F. (2007). Self-assembled Natural Rubber/Silica Nanocomposites: Its Preparation and Characterization, Composites Science and Technology, 67: 3130-3139.
- [24] Cai, H.H., Li, S.D., Tian, G.R., Wang, H.B. and Wang, J.H. (2003). Reinforcement of Natural Rubber Latex Film by Ultrafine Calcium Carbonate, Journal of Applied Polymer Science, 87: 982-985.
- [25] Das, A., Stockelhuber, K. W., Jurk, R., Saphiannikova, M., Fritzsche, J., Lorenz, H., Kluppel, M. and Heinrich, G. (2008). Modified and Unmodified Multiwalled Carbon Nanotubes in High Performance Solution-Styrene-Butadiene and Butadiene Rubber Blends, Polymer, 49: 5276-5283.
- [26] พิชญ์ ศุภผล. Carbon nanotube [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://www.technologymedia.co.th/> [2555, มีนาคม]
- [27] Raymond, M.R. (2007). Potential Benefits and Risks of Nanotechnology in Nuclear Medicine, Journal of Nuclear Medicine, 48: 1039-1042.
- [28] Bokobza, L. (2009). Mechanical, Electrical and Spectroscopic Investigations of Carbon Nanotube reinforced Elastomers”, Vibrational Spectroscopy, 51: 52-59.

- [29] Fakhru'l-Razi, A., Atieh, M.A., Girun, N., Chuah, T.G., El-Sadig, M. and Biak, D.R.A. (2006). Effect of Multi-wall Carbon Nanotubes on the Mechanical Properties of Natural Rubber, Composite Structures, 75: 496-500.
- [30] Ralph, K., (1997). The Chemistry of Silica. John Wiley&Sons.
- [31] จันทนภา สหุณีล. การประมาณค่าผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม และการประยุกต์ใช้อนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ในระดับนาโน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [32] พงษ์ธร แซ่ฮุย. หน่วยเทคโนโลยี (ออนไลน์). 2554. แหล่งที่มา:
<http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rubbertech/rubbertech.htm> [2555, มีนาคม]
- [33] Ansarifar, A., Shiah, S.F., and Bennett, M. (2006). Optimising the Chemical Bonding between Silanised Silica Nanofiller and Assessing Its Effects on the Properties of the Rubber, International Journal of Adhesion&Adhesives, 26: 454-463.
- [34] LC GC's Chromacademy. Silanol group [Online]. Available from :
<http://www.chromacademy.com/> [2012, March]
- [35] Peng, Z., Kong, L.X., Li, S.D., Chen, Y. and Huang, M.F. (2007). Self-Assembled Natural Rubber/Silica Nanocomposites: Its Preparation and Characterization, Composites Science and Technology, 67: 3130-3139.
- [36] Ding, X., Zhao, J., Liu, Y., Zhang, H. and Wang, Z. (2004). Silica Nanoparticles Encapsulated by Polystyrene via Surface Grafting and in situ Emulsion Polymerization, Materials Letters, 58: 3126-3130.

- [37] He, G., Pan, Q., and Rempel, G.L. (2003). Synthesis of Poly(methyl methacrylate) Nanosize Particles by Differential Microemulsion Polymerization, Macromolecular Rapid Communications, 24: 585-588.
- [38] He, G., Pan, Q., and Rempel, G.L. (2007). Modeling of Differential Microemulsion Polymerization for Synthesizing Nanosized Poly(methyl methacrylate) Particles, Industrial Engineering and Chemistry Research, 46: 1682-1689.
- [39] He, G., Pan, Q., and Rempel, G.L. (2007). Differential Microemulsion Polymerization of Styrene: A Mathematical Kinetic Model, Journal of Applied Polymer Science, 105: 2129-2137.
- [40] He, G., and Pan, Q. (2004). Synthesis of Polystyrene and Polystyrene/Poly(methyl/methacrylate) Nanoparticles, Macromolecular Rapid Communications, 25: 1545-1548.
- [41] Preston, W., (1948). Some Correlating Principles of Detergent Action, Journal of Physical Colloid Chemistry, 52: 84-97.
- [42] Norakankorn, C., Pan, Q., Rempel, G.L. and Kiatkamjornwong, S. (2007). Synthesis of Poly(methyl methacrylate) Initiated by 2,2' Azobisisobutyronitrile via Differential Microemulsion Polymerization, Macromolecular Rapid Communications, 28: 1029-1033.
- [43] Scenic Route. Module 9.2.1 Addition Polmerization (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://discovery.kcpc.usyd.edu.au/9.2.1/9.2.1_FRP.html, [2012, March]

- [44] Chuayjuljit, S., and Boonmahitthisud, A. (2010). Natural Rubber Nanocomposites Using Polystyrene-encapsulated Nanosilica Prepared by Differential Microemulsion Polymerization, Applied Surface Science, 256: 7211-7216.
- [45] ศรีสุตา ศรีดาว. การเตรียมอนุภาคระดับนาโนของซิลิกา/พอลิเมทิลเมทาคริเลตคอมพอสิตผ่านการเกิดพอลิเมอร์แบบ ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชา วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [46] Zhang, K., Wu, W., Meng, H., Guo, K., Chen, J.F. Pickering Emulsion Polymerization: Preparation of Polystyrene/nano-SiO₂ Composite Microspheres with Core-shell Structure. Powder Technology 190 (2009): 393-400.
- [47] Soney, C.G., Ninan, K.N., Gabriel, G., and Sabu, T. (2000). Styrene-Butadiene Rubber/Natural Rubber Blends: Morphology, Transport Behavior, and Dynamic Mechanical and Mechanical Properties, Journal of Applied Polymer Science, 78: 1280-1303.
- [48] Wang, Y., Li, Y., Zhang, R., Huang, L., and He, W. (2006). Synthesis and Characterization of Nanosilica/Polyacrylate Composite Latex, Society of Plastics Engineers, 26: 282-288

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตาราง ก. ร้อยละผลได้ของพอลิสไตรีน พอลิเมทิลเมทาคริเลต ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต และซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลเท็กซ์

| สารตัวอย่าง | ร้อยละผลได้ | ร้อยละผลได้เฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|------------------------|-------------|-------------------|---------------------|
| nPS | 90.26 | 90.46 | 0.47 |
| | 90.12 | | |
| | 91.00 | | |
| PS_nSiO ₂ | 95.36 | 95.74 | 0.34 |
| | 95.74 | | |
| | 96.12 | | |
| nPMMA | 84.87 | 84.84 | 0.44 |
| | 85.27 | | |
| | 84.39 | | |
| PMMA-nSiO ₂ | 87.53 | 88.39 | 1.58 |
| | 90.42 | | |
| | 87.21 | | |

ภาคผนวก ข

ตาราง ข. ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของพอลิสไตรีน พอลิเมทิลเมทาคริเลต ซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิเมทิล-
เมทาคริเลตและซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนนาโนเลทเท็กซ์

| สารตัวอย่าง | ขนาดอนุภาค (นาโนเมตร) | ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (นาโนเมตร) | ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน |
|------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| nPS | 34 | 34.00 | 0.00 |
| | 34 | | |
| | 34 | | |
| PS-nSiO ₂ | 38 | 38.33 | 0.58 |
| | 38 | | |
| | 39 | | |
| nPMMA | 32 | 32.33 | 1.53 |
| | 34 | | |
| | 31 | | |
| PMMA-nSiO ₂ | 42 | 40.67 | 0.47 |
| | 40 | | |
| | 40 | | |

ภาคผนวก ค

ตาราง ค-1 ค่าความทนแรงดึงของยางผสมและนาโนคอมพอสิต

| สารตัวอย่าง | ความทนแรงดึง (MPa) | | | | | ค่าเฉลี่ย (MPa) | ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน |
|-----------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------|
| | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | ชั้นที่ 4 | ชั้นที่ 5 | | |
| NR/SBR | 18.55 | 18.72 | 18.22 | 18.80 | 18.81 | 18.62 | 0.25 |
| NR/XSBR | 18.89 | 18.78 | 18.79 | 18.73 | 18.30 | 18.70 | 0.22 |
| NR/SBR/3CB | 19.47 | 20.46 | 20.31 | 21.15 | 19.71 | 20.22 | 0.66 |
| NR/SBR/5CB | 21.41 | 21.06 | 21.16 | 21.56 | - | 21.30 | 0.23 |
| NR/SBR/7CB | 20.24 | 20.31 | 20.00 | 20.68 | - | 20.31 | 0.28 |
| NR/SBR/9CB | 19.91 | 18.99 | 20.46 | 20.59 | - | 0.72 | 0.08 |
| NR/XSBR/3CB | 20.74 | 21.26 | 20.70 | 21.16 | 21.38 | 21.05 | 0.29 |
| NR/XSBR/5CB | 21.70 | 21.61 | 21.81 | 22.07 | 21.41 | 21.72 | 0.23 |
| NR/XSBR/7CB | 20.40 | 20.35 | 20.10 | 20.65 | 20.13 | 20.33 | 0.21 |
| NR/XSBR/9CB | 18.65 | 19.05 | 18.83 | 19.14 | 18.99 | 18.93 | 0.18 |
| NR/SBR/0.1CNT | 20.50 | 20.82 | 20.62 | 20.26 | - | 20.55 | 0.23 |
| NR/SBR/0.2CNT | 20.45 | 21.45 | 21.70 | 21.10 | 20.59 | 21.06 | 0.54 |
| NR/SBR/0.3CNT | 19.95 | 20.31 | 20.45 | 20.85 | - | 20.39 | 0.37 |
| NR/SBR/0.4CNT | 18.57 | 20.06 | 18.18 | 18.18 | - | 18.75 | 0.89 |
| NR/XSBR/0.1CNT | 21.17 | 20.71 | 20.97 | 20.75 | 21.00 | 20.92 | 0.18 |
| NR/XSBR/0.2CNT | 20.78 | 22.17 | 21.36 | 21.42 | 21.34 | 21.41 | 0.47 |
| NR/XSBR/0.3CNT | 20.59 | 20.94 | 21.06 | 20.90 | 20.65 | 20.83 | 0.19 |
| NR/XSBR/0.4CNT | 19.56 | 19.50 | 19.61 | 19.55 | 19.63 | 19.57 | 0.05 |
| NR/SBR/0.1nSiO ₂ | 19.20 | 19.43 | 19.12 | 19.18 | 19.81 | 19.35 | 0.28 |
| NR/SBR/0.2nSiO ₂ | 20.91 | 21.58 | 20.79 | 20.59 | 21.34 | 21.04 | 0.41 |
| NR/SBR/0.3nSiO ₂ | 18.57 | 19.10 | 18.69 | 19.19 | - | 18.89 | 0.30 |
| NR/SBR/0.4nSiO ₂ | 17.19 | 16.59 | 16.87 | 16.75 | - | 16.85 | 0.25 |

| สารตัวอย่าง | ความทนแรงดึง (MPa) | | | | | ค่าเฉลี่ย (MPa) | ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน |
|---------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------|
| | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | ชั้นที่ 4 | ชั้นที่ 5 | | |
| NR/XSBR/0.1nSiO ₂ | 19.13 | 19.88 | 19.62 | 19.90 | 19.22 | 19.55 | 0.36 |
| NR/XSBR/0.2nSiO ₂ | 20.57 | 20.30 | 20.20 | 20.16 | 20.65 | 20.38 | 0.22 |
| NR/XSBR/0.3nSiO ₂ | 22.11 | 21.30 | 21.26 | 21.50 | - | 21.54 | 0.39 |
| NR/XSBR/0.4nSiO ₂ | 18.72 | 18.50 | 19.02 | 18.55 | - | 18.70 | 0.23 |
| NR/SBR/1nPS | 19.65 | 19.25 | 19.57 | 19.55 | - | 19.51 | 0.18 |
| NR/SBR/3nPS | 20.35 | 20.77 | 20.86 | 20.52 | - | 20.63 | 0.23 |
| NR/SBR/5nPS | 17.84 | 18.20 | 18.25 | 17.82 | - | 18.03 | 0.23 |
| NR/SBR/7nPS | 15.80 | 16.30 | 16.42 | 16.41 | - | 16.23 | 0.29 |
| NR/SBR/1PS-nSiO ₂ | 22.45 | 22.36 | 22.35 | 21.95 | - | 22.28 | 0.22 |
| NR/SBR/3PS-nSiO ₂ | 24.29 | 23.64 | 24.52 | 24.11 | 24.03 | 24.12 | 0.33 |
| NR/SBR/5PS-nSiO ₂ | 20.22 | 20.48 | 20.16 | 20.39 | - | 20.31 | 0.15 |
| NR/SBR/7PS-nSiO ₂ | 18.91 | 19.07 | 19.08 | 18.48 | - | 18.89 | 0.28 |
| NR/XSBR/1nPMMA | 20.56 | 19.46 | 19.97 | 20.67 | - | 20.17 | 0.56 |
| NR/XSBR/3nPMMA | 19.69 | 20.20 | 19.64 | 19.11 | - | 19.66 | 0.45 |
| NR/XSBR/5nPMMA | 17.26 | 17.33 | 17.34 | 17.60 | - | 17.38 | 0.15 |
| NR/XSBR/7nPMMA | 16.30 | 15.70 | 15.54 | 15.60 | - | 15.79 | 0.35 |
| NR/XSBR/1PMMA-nSiO ₂ | 21.87 | 21.88 | 22.42 | 22.16 | - | 22.08 | 0.26 |
| NR/XSBR/3PMMA-nSiO ₂ | 19.82 | 19.63 | 18.98 | 19.56 | 19.50 | 19.50 | 0.31 |
| NR/XSBR/5PMMA-nSiO ₂ | 18.44 | 18.34 | 18.62 | 18.91 | - | 18.58 | 0.25 |
| NR/XSBR/7PMMA-nSiO ₂ | 17.93 | 17.54 | 17.33 | 17.60 | - | 17.60 | 0.25 |

ตารางที่ ค-2 ค่ามอดูลัสที่ความเครียด 300% ของยางผสมและนาโนคอมพอลิเมอร์

| สารตัวอย่าง | มอดูลัสที่ความเครียด 300% (MPa) | | | | | ค่าเฉลี่ย (MPa) | ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------|
| | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | ชั้นที่ 4 | ชั้นที่ 5 | | |
| NR/SBR | 1.37 | 1.30 | 1.22 | 1.22 | 1.26 | 1.27 | 0.06 |
| NR/XSBR | 2.19 | 2.17 | 2.18 | 2.10 | 2.19 | 2.17 | 0.03 |
| NR/SBR/3CB | 1.67 | 1.51 | 1.43 | 1.58 | 1.53 | 1.54 | 0.09 |
| NR/SBR/5CB | 2.095 | 2.168 | 2.119 | 2.127 | - | 2.13 | 0.03 |
| NR/SBR/7CB | 2.331 | 2.285 | 2.204 | 2.242 | - | 2.27 | 0.05 |
| NR/SBR/9CB | 2.469 | 2.367 | 2.374 | 2.352 | - | 2.39 | 0.05 |
| NR/XSBR/3CB | 2.806 | 2.696 | 2.761 | 2.98 | 2.895 | 2.77 | 0.08 |
| NR/XSBR/5CB | 3.134 | 3.168 | 3.223 | 3.158 | 3.256 | 3.19 | 0.05 |
| NR/XSBR/7CB | 3.947 | 3.975 | 3.922 | 3.973 | 3.930 | 3.95 | 0.02 |
| NR/XSBR/9CB | 4.214 | 4.273 | 2.141 | 3.986 | 3.981 | 4.12 | 0.12 |
| NR/SBR/0.1CNT | 1.402 | 1.651 | 1.529 | 1.460 | - | 1.51 | 0.11 |
| NR/SBR/0.2CNT | 1.62 | 1.61 | 1.63 | 1.64 | 1.63 | 1.63 | 0.01 |
| NR/SBR/0.3CNT | 1.753 | 1.746 | 1.732 | 1.771 | - | 1.75 | 0.02 |
| NR/SBR/0.4CNT | 1.851 | 1.863 | 1.748 | 1.977 | - | 1.86 | 0.09 |
| NR/XSBR/0.1CNT | 2.413 | 2.430 | 2.393 | 2.436 | 2.419 | 2.42 | 0.02 |
| NR/XSBR/0.2CNT | 2.498 | 2.675 | 2.548 | 2.585 | 2.469 | 2.56 | 0.08 |
| NR/XSBR/0.3CNT | 2.798 | 2.723 | 2.807 | 2.805 | 2.793 | 2.79 | 0.03 |
| NR/XSBR/0.4CNT | 2.942 | 2.959 | 2.928 | 2.923 | 2.956 | 2.94 | 0.02 |
| NR/SBR/0.1nSiO ₂ | 1.444 | 1.436 | 1.584 | 1.587 | 1.556 | 1.52 | 0.08 |
| NR/SBR/0.2nSiO ₂ | 1.616 | 1.645 | 1.632 | 1.592 | 1.621 | 1.62 | 0.02 |
| NR/SBR/0.3nSiO ₂ | 1.691 | 1.655 | 1.700 | 1.670 | - | 1.68 | 0.02 |
| NR/SBR/0.4nSiO ₂ | 1.745 | 1.629 | 1.663 | 1.680 | - | 1.680 | 0.05 |

| สารตัวอย่าง | มอดุลัสที่ความเครียด 300% (MPa) | | | | | ค่าเฉลี่ย (MPa) | ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน |
|---------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------|
| | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | ชั้นที่ 4 | ชั้นที่ 5 | | |
| NR/XSBR/0.1nSiO ₂ | 2.25 | 2.15 | 2.12 | 2.25 | 2.22 | 2.20 | 0.06 |
| NR/XSBR/0.2nSiO ₂ | 2.31 | 2.27 | 2.37 | 2.28 | 2.26 | 2.30 | 0.05 |
| NR/XSBR/0.3nSiO ₂ | 2.43 | 2.53 | 2.38 | 2.44 | - | 2.45 | 0.06 |
| NR/XSBR/0.4nSiO ₂ | 2.43 | 2.56 | 2.59 | 2.55 | - | 2.53 | 0.09 |
| NR/SBR/1nPS | 1.40 | 1.40 | 1.35 | 1.40 | - | 1.39 | 0.02 |
| NR/SBR/3nPS | 1.36 | 1.38 | 1.38 | 1.40 | - | 1.38 | 0.01 |
| NR/SBR/5nPS | 1.42 | 1.43 | 1.41 | 1.47 | - | 1.43 | 0.02 |
| NR/SBR/7nPS | 1.52 | 1.50 | 1.53 | 1.52 | - | 1.52 | 0.01 |
| NR/SBR/1nPS-nSiO ₂ | 1.43 | 1.43 | 1.42 | 1.41 | - | 1.42 | 0.01 |
| NR/SBR/3nPS-nSiO ₂ | 1.50 | 1.52 | 1.48 | 1.52 | 1.45 | 1.49 | 0.03 |
| NR/SBR/5nPS-nSiO ₂ | 1.58 | 1.56 | 1.55 | 1.57 | - | 1.56 | 0.01 |
| NR/SBR/7nPS-nSiO ₂ | 1.0 | 1.60 | 1.66 | 1.58 | - | 1.61 | 0.03 |
| NR/XSBR/1nPMMA | 2.16 | 2.16 | 2.15 | 2.17 | - | 2.16 | 0.01 |
| NR/XSBR/3nPMMA | 2.16 | 2.18 | 2.18 | 2.20 | - | 2.18 | 0.01 |
| NR/XSBR/5nPMMA | 2.22 | 2.23 | 2.31 | 2.25 | - | 2.24 | 0.05 |
| NR/XSBR/7nPMMA | 2.32 | 2.40 | 2.36 | 2.25 | - | 2.24 | 0.05 |
| NR/XSBR/1PMMA-nSiO ₂ | 2.17 | 2.17 | 2.18 | 2.17 | - | 2.17 | 0.01 |
| NR/XSBR/3PMMA-nSiO ₂ | 2.19 | 2.17 | 2.17 | 2.17 | 2.27 | 2.19 | 0.04 |
| NR/XSBR/5PMMA-nSiO ₂ | 2.29 | 2.36 | 2.35 | 2.26 | - | 2.31 | 0.05 |
| NR/XSBR/7PMMA-nSiO ₂ | 2.50 | 2.48 | 2.36 | 2.38 | - | 2.43 | 0.07 |

ตารางที่ ค-3 ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางผสมและนาโนคอมพอสิต

| สารตัวอย่าง | ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%) | | | | | ค่าเฉลี่ย (MPa) | ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน |
|-----------------------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------|
| | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | ชั้นที่ 4 | ชั้นที่ 5 | | |
| NR/SBR | 820 | 840 | 840 | 880 | 860 | 848 | 22.80 |
| NR/XSBR | 660 | 680 | 700 | 700 | 680 | 684 | 15.78 |
| NR/SBR/3CB | 780 | 800 | 780 | 740 | 760 | 772 | 22.80 |
| NR/SBR/5CB | 740 | 700 | 740 | 760 | - | 735 | 25.17 |
| NR/SBR/7CB | 700 | 680 | 700 | 680 | - | 690 | 11.55 |
| NR/SBR/9CB | 700 | 660 | 700 | 720 | - | 695 | 25.17 |
| NR/XSBR/3CB | 620 | 580 | 580 | 580 | 640 | 600 | 26.67 |
| NR/XSBR/5CB | 560 | 540 | 540 | 560 | 580 | 556 | 15.78 |
| NR/XSBR/7CB | 500 | 500 | 520 | 520 | 540 | 516 | 15.78 |
| NR/XSBR/9CB | 500 | 500 | 460 | 500 | 480 | 488 | 16.87 |
| NR/SBR/0.1CNT | 840 | 860 | 820 | 860 | - | 845 | 19.15 |
| NR/SBR/0.2CNT | 780 | 800 | 820 | 740 | 760 | 780 | 31.62 |
| NR/SBR/0.3CNT | 800 | 780 | 820 | 760 | - | 790 | 25.82 |
| NR/SBR/0.4CNT | 760 | 700 | 740 | 720 | - | 730 | 25.82 |
| NR/XSBR/0.1CNT | 660 | 680 | 680 | 680 | 660 | 672 | 10.33 |
| NR/XSBR/0.2CNT | 640 | 620 | 640 | 640 | 660 | 640 | 13.33 |
| NR/XSBR/0.3CNT | 600 | 620 | 660 | 620 | 600 | 620 | 23.09 |
| NR/XSBR/0.4CNT | 580 | 580 | 600 | 580 | 600 | 588 | 10.33 |
| NR/SBR/0.1nSiO ₂ | 760 | 800 | 760 | 780 | 780 | 776 | 16.73 |
| NR/SBR/0.2nSiO ₂ | 660 | 720 | 700 | 740 | 700 | 704 | 29.66 |
| NR/SBR/0.3nSiO ₂ | 660 | 640 | 640 | 660 | - | 650 | 11.55 |
| NR/SBR/0.4nSiO ₂ | 620 | 660 | 640 | 660 | - | 645 | 19.15 |

| สารตัวอย่าง | ร้อยละการยึดตัว ณ จุดขาด (%) | | | | | ค่าเฉลี่ย (MPa) | ค่า เบี่ยงเบน มาตรฐาน |
|---------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-----------------------------|
| | ชั้นที่ 1 | ชั้นที่ 2 | ชั้นที่ 3 | ชั้นที่ 4 | ชั้นที่ 5 | | |
| NR/XSBR/0.1nSiO ₂ | 660 | 700 | 680 | 680 | 680 | 680 | 14.14 |
| NR/XSBR/0.2nSiO ₂ | 660 | 640 | 640 | 660 | 660 | 652 | 10.95 |
| NR/XSBR/0.3nSiO ₂ | 620 | 620 | 660 | 620 | - | 630 | 20.00 |
| NR/XSBR/0.4nSiO ₂ | 580 | 600 | 600 | 560 | - | 585 | 19.15 |
| NR/SBR/1nPS | 860 | 880 | 840 | 820 | - | 850 | 25.82 |
| NR/SBR/3nPS | 820 | 780 | 800 | 800 | - | 800 | 16.33 |
| NR/SBR/5nPS | 760 | 780 | 760 | 820 | - | 780 | 28.28 |
| NR/SBR/7nPS | 700 | 680 | 740 | 680 | - | 700 | 28.28 |
| NR/SBR/1PS-nSiO ₂ | 880 | 860 | 820 | 820 | - | 845 | 30.00 |
| NR/SBR/3PS-nSiO ₂ | 820 | 840 | 820 | 820 | 780 | 816 | 21.91 |
| NR/SBR/5PS-nSiO ₂ | 780 | 760 | 780 | 780 | - | 775 | 10.00 |
| NR/SBR/7PS-nSiO ₂ | 720 | 740 | 720 | 740 | - | 730 | 11.55 |
| NR/XSBR/1nPMMA | 680 | 700 | 720 | 680 | - | 695 | 19.15 |
| NR/XSBR/3nPMMA | 700 | 700 | 680 | 680 | - | 690 | 11.55 |
| NR/XSBR/5nPMMA | 680 | 660 | 700 | 660 | - | 675 | 19.15 |
| NR/XSBR/7nPMMA | 620 | 620 | 600 | 620 | - | 615 | 10.00 |
| NR/XSBR/1PMMA-nSiO ₂ | 660 | 700 | 680 | 700 | - | 685 | 19.15 |
| NR/XSBR/3PMMA-nSiO ₂ | 680 | 700 | 660 | 700 | 660 | 680 | 20.00 |
| NR/XSBR/5PMMA-nSiO ₂ | 660 | 680 | 660 | 620 | - | 655 | 25.17 |
| NR/XSBR/7PMMA-nSiO ₂ | 620 | 600 | 600 | 580 | - | 600 | 16.33 |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอัญญาพร บุญมหิตธิสุทธิ เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2527 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2554

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ (ระดับปริญญามหาบัณฑิต)

1. S, Chuayjuljit., and A, Boonmahitthisud. (2010). "Natural Rubber Blended with Polystyrene Nanoparticles Prepared by Differential Microemulsion Polymerization", Journal of Elastomers and Plastics, 42: 375-387.

2. S, Chuayjuljit., and A, Boonmahitthisud. (2010). "Natural Rubber Nanocomposites Using Polystyrene-encapsulated Nanosilica Prepared by Differential Microemulsion Polymerization", Applied Surface Science, 256: 7211-7216.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ (ระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต)

1. A, Boonmahitthisud., and S, Chuayjuljit. (2010). "Effect of Carbon Black and Carbon Nanotube on Mechanical and Thermal Properties of 80NR/20SBR Composites", Materials Science Forum, 654-656: 2783-2786.

2. A, Boonmahitthisud., and S, Chuayjuljit. (2011). "Rubber Blend of 80/20 NR/SBR Reinforced with Nanosilica and PS-encapsulated Nanosilica", Materials Science Forum, 695: 332-335.

3. A, Boonmahitthisud., and S, Chuayjuljit. (2012). "Effects of Carbon Nanotube on Tensile and Dynamic Mechanical Properties of NR/SBR and NR/XSBR Nanocomposites Prepared by Latex Compounding", Advanced Materials Research, 488-489: 612-616.

4. A, Boonmahitthisud., and S, Chuayjuljit. (2012). "Effects of Nanosized Polystyrene and Polystyrene-encapsulated Nanosilica on Properties of Natural Rubber/Styrene Butadiene Rubber Nanocomposites", Polymer-Plastics Technology and Engineering, 51: 311-316.

5. A, Boonmahitthisud., and S, Chuayjuljit. (2012). "Use of Carbon Nanotube and Nanosilica as Reinforcement Nanosillers in NR/SBR Blended Latex", Advanced Materials Research, 347-353: 3197-3200.