

ผลของพอลิไทริน/ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนไฮบริดต่อสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาได
อีนนาโนคอมพอสิต



นายพีระพงศ์ โภคพันธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF POLYSTYRENE/TITANIUM DIOXIDE NANOHYBRIDS ON PROPERTIES OF
NATURAL RUBBER/STYRENE BUTADIENE RUBBER NANOCOMPOSITES

Mr. Peeraphong Pokphat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของพอลิไสไตรีน/ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนไฮบริดต่อสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต
โดย	นายพีระพงศ์ โภคพันธ์
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โภธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมทิทธิสุทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุษา สรวารี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พศวรรธน์ ชัยวุฒินันท์)

พีระพงษ์ โภคพันธ์ : ผลของพอลิสไตรีน/ไทเทเนียมไดออกไซด์นาโนไฮบริดต่อสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนนาโนคอมพอสิต (EFFECTS OF POLYSTYRENE/TITANIUM DIOXIDE NANOHYBRIDS ON PROPERTIES OF NATURAL RUBBER/ STYRENE BUTADIENE RUBBER NANOCOMPOSITES) อ. ที่ ป ร ี ก ข า
 วิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร. อัญญาพร บุญมทิตธิสุทธิ, อ. ที่ ป ร ี ก ข า วิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร, 70 หน้า.

นาโนคอมพอสิตของยางผสม 80/20 ยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน 2 ชุด ที่ใส่อนุภาคระดับนาโนเมตรของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนปริมาณต่างๆ (3, 5, 7 และ 9 ส่วนโดยน้ำหนักต่อยางร้อยละ) ถูกเตรียมด้วยการคอมพาวด์ในภาวะที่เป็นเลเท็กซ์ โดยนาโนเลเท็กซ์ของไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ ‘อินซิْتُ’ ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน โดยนาโนสเฟียร์ที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบคอร์-เชลล์ที่มีนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นส่วนคอร์ และพอลิสไตรีนเป็นเชลล์ และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 42.2 นาโนเมตร จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคเชิงพลวัตแบบกระเจิงแสง ตามลำดับ ซึ่งนาโนคอมพอสิตเลเท็กซ์ได้ถูกนำไปขึ้นรูปด้วยการหล่อเป็นแผ่นบางๆ บนแม่แบบที่ทำจากกระจก แล้วทำให้แห้งและบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลาที่หาได้จากเครื่องรีโอมิเตอร์ จากนั้นตรวจสอบพฤติกรรมการบ่ม สมบัติเชิงกล (สมบัติด้านแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด และความแข็ง) และเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ และเปรียบเทียบสมบัติเหล่านี้กับของยางผสม 80/20 ยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เวลาเริ่มการบ่มและเวลาการบ่มของนาโนคอมพอสิตที่ใส่นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีเวลายาวที่สุด ตามด้วยนาโนคอมพอสิตที่ใส่นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน และยางผสม 80/20 ยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน จากนั้น พบว่า การใส่นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์หรือนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนในยางผสมได้ปรับปรุงความทนแรงดึง (ทุกอัตราส่วน แต่ที่ใส่ 5 และ 3 ส่วนมีค่ามากที่สุด ตามลำดับ) มอดูลัสที่ความเครียด 300% (ทุกอัตราส่วน แต่ที่ใส่ 9 ส่วนมีค่ามากที่สุด) ความทนแรงฉีกขาด (ทุกอัตราส่วน แต่ที่ใส่ 5 และ 3 ส่วนมีค่ามากที่สุด ตามลำดับ) ความแข็ง (ทุกอัตราส่วน แต่ที่ใส่ 9 ส่วนมีค่ามากที่สุด) และเสถียรภาพทางความร้อน (ทุกอัตราส่วน แต่ที่ใส่ 7 ส่วนมีค่ามากที่สุด) ขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าลดลง แต่ก็ยังคงรักษาสมบัติการยืดตัวที่ดี

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5772087523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: NATURAL RUBBER, STYRENE BUTADIENE RUBBER, NANOTITANIUM DIOXIDE, POLYSTYRENE ENCAPSULATED NANOTITANIUM DIOXIDE, DIFFERENTIAL MICROEMULSION POLYMERIZATION

PEERAPHONG POKPHAT: EFFECTS OF POLYSTYRENE/ TITANIUM DIOXIDE NANOHYBRIDS ON PROPERTIES OF NATURAL RUBBER/STYRENE BUTADIENE RUBBER NANOCOMPOSITES. ADVISOR: ANYAPORN BOONMAHITTHISUD, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. SAOWAROJ CHAUYJULJIT, 70 pp.

Two series of 80/20 natural rubber (NR)/styrene butadiene rubber (SBR) blend nanocomposites incorporating with a small amount of nanosized titanium dioxide ($n\text{TiO}_2$) and polystyrene-encapsulated $n\text{TiO}_2$ (PS- $n\text{TiO}_2$) (3, 5, 7 and 9 parts by weight per hundred of rubber, phr) were prepared by latex compounding. The nanolatex of PS- $n\text{TiO}_2$ was synthesized by 'in situ' differential microemulsion polymerization. The obtained nanospheres of PS- $n\text{TiO}_2$ had a core-shell structure with $n\text{TiO}_2$ particles as a core and PS as a shell and an average particle size of 42.2 nm as characterized by a dynamic light scattering analyzer and a transmission electron microscope, respectively. The nanocomposite latex was cast into sheets on glass molds, air dried and cured in an oven at 110°C according to the t_{90} obtained from the rheometer. The curing characteristics, mechanical properties (tensile properties, tear strength and hardness) and thermal stability of the prepared nanocomposites were investigated and compared with the neat 80/20 NR/SBR blend. The results showed that the scorch and cure times of $n\text{TiO}_2$ -nanocomposites were the longest followed by PS- $n\text{TiO}_2$ -nanocomposites and 80/20 NR/SBR blend. The incorporation of either $n\text{TiO}_2$ or PS- $n\text{TiO}_2$ into the 80/20 NR/SBR blend was found to improve the tensile strength (all, but 5 and 3 phr optimal, respectively), modulus at 300% strain (all, but 9 phr optimal), tear strength (all, but 5 and 3 phr optimal, respectively), hardness (all, but 9 phr optimal) and thermal stability (all, but 7 phr optimal), whereas the elongation at break deteriorated but still largely retained.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Student's Signature

Science Advisor's Signature

Academic Year: 2015

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ เพราะได้รับความเอื้อเฟื้อด้านเครื่องมือ วัสดุติบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความช่วยเหลือและคำแนะนำทางวิชาการอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิหลายท่าน ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังรายนาม ต่อไปนี้

1. อาจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ เสาวรจันท์ ช่วยจุลจิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้โอกาสผู้วิจัยในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และคอยสนับสนุนในการจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ และการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์เป็นอย่างดี

2. กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้คำปรึกษาแนะนำทางวิชาการในการทำวิจัย

3. ดร.ธนัชฐา ภูถาวรธณ จากกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน

4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

5. หลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6. บริษัท สยามเลเท็กซ์สังเคราะห์ จำกัด

7. บริษัท คอกนิส จำกัด

8. บริษัท ดาวเคมีคัล จำกัด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา ที่คอยให้การสนับสนุน และคอยให้กำลังใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงผ่านไปได้อย่างดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถเขียนและสร้างสรรค์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR).....	3
2.1.1 น้ำยางธรรมชาติ (Natural rubber latex).....	3
2.1.2 น้ำยางข้น (Concentrated latex).....	4
2.2 ข้อดีและข้อเสียของน้ำยางข้น	4
2.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ	5
2.4 การใช้งานของยางธรรมชาติ.....	6
2.5 ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR).....	7
2.5.1 สมบัติทั่วไปของยางสไตรีนบิวทาไดอีน	7
2.5.2 การใช้งานของน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน	8
2.6 ยางผสม (Rubber blend)	8
2.7 สารตัวเติม (Fillers).....	9
2.7.1 ชนิดของสารตัวเติม.....	9
2.8 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO ₂).....	10
2.9 พอลิสไตรีน (Polystyrene).....	11

2.9.1 การใช้งานของพอลิस्टาเร็น	12
2.10. กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน(Differential microemulsion polymerization).....	13
2.10.1 กลไกการของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน	14
2.11 การห่อหุ้มอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยพอลิเมอร์	15
2.12 สารคู่ควบประเภทซิลเลน (Silane coupling agent)	15
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	19
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	19
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	20
3.3 วิธีการทดลอง.....	22
3.3.1 การตัดแปรผิวอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยสารคู่ควบซิลเลน	22
3.3.2 การสังเคราะห์นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิस्टาเร็น (PS-nTiO ₂)	22
3.3.3 การแยก (PS-nTiO ₂) ออกจากนาโนเลเท็กซ์	24
3.3.4 การวิเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของ (PS-nTiO ₂)	25
3.3.4.1 ร้อยละผลได้ (% yield) และร้อยละของแข็ง (%solid).....	25
3.3.4.2 วิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของ (PS-nTiO ₂).....	26
3.3.4.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาค nTiO ₂ , MPTMS-nTiO ₂ และ PS-nTiO ₂	26
3.3.4.4 สันฐานวิทยาของอนุภาค nTiO ₂ , และ PS-nTiO ₂	27
3.3.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมการบ่มด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer).....	27
3.3.6 การเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางผสม 80/20 ยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (80/20 NR/SBR) ด้วย nTiO ₂ หรือ PS-nTiO ₂	29
3.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิต	31
3.3.7.1 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)	31

3.3.7.2 สมบัติความทนแรงฉีกขาด (Tear strength).....	32
3.3.7.3 สมบัติความแข็ง (Hardness)	33
3.3.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต	33
3.3.8.1 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability).....	33
3.3.9 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	35
4.1 การสังเคราะห์นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน (PS-nTiO ₂).....	35
4.1.1 ร้อยละผลได้ ร้อยละของแข็ง และขนาดอนุภาคของ PS-nTiO ₂	35
4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ nTiO ₂ , MPTMS-nTiO ₂ และ PS-nTiO ₂	36
4.1.3 สัณฐานวิทยาของอนุภาค nTiO ₂ และ PS-nTiO ₂	38
4.2 การตรวจสอบพฤติกรรมการบ่ม	38
4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties).....	41
4.3.1 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties).....	41
4.3.2 สมบัติความทนแรงฉีกขาด (Tear strength)	44
4.3.3 สมบัติความแข็ง (Hardness).....	45
4.4 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability).....	47
4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
รายการอ้างอิง	53
ภาคผนวก ก ร้อยละผลได้ ร้อยละของแข็ง และขนาดอนุภาคของ PS-nTiO ₂	58
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ด้วย FT-IR	59

ภาคผนวก ค ผลการตรวจสอบพฤติกรรมการบ่ม.....	61
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	62
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบความแข็ง.....	64
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบทางความร้อน.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	70



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆ ของพอลิไสไตรีน	12
ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ PS-nTiO ₂	23
ตารางที่ 3.2 ปริมาณของนาโนคอมพอสิตของยางผสม 80/20 NR/SBR, nTiO ₂ -นาโนคอมพอสิต และ PS-nTiO ₂ -นาโนคอมพอสิต.....	30
ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันของอนุภาค nTiO ₂ , MPTMS-nTiO ₂ และ PS-nTiO ₂	37
ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมการบ่มของยางผสม 80/20 NR/SBR, nTiO ₂ -นาโนคอมพอสิต และ PS-nTiO ₂ -นาโนคอมพอสิต.....	40
ตารางที่ 4.3 สมบัติด้านแรงดึงของชิ้นทดสอบ	41
ตารางที่ 4.4 ความทนแรงฉีกขาดของชิ้นทดสอบ	44
ตารางที่ 4.5 ความแข็งของชิ้นทดสอบ	46
ตารางที่ 4.6 T _{onset} , T _{50%} , T _{end set} และ %char ของชิ้นทดสอบ	48

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่ 2.1	สูตรโครงสร้างทางเคมีของ cis-1,4 polyisoprene	3
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของยางสไตรีนบิวทาไดอีน	7
รูปที่ 2.3	ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของสไตรีนมอนอเมอร์เป็นพอลิสไตรีน	11
รูปที่ 2.4	กลไกการเกิดพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน ...	14
รูปที่ 2.5	การปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิลิโคน	16
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของ PS-nTiO ₂	22
รูปที่ 3.2	การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องควบแน่น และท่อนำแก๊ส	23
รูปที่ 3.3	การตกตะกอน PS-nTiO ₂ ด้วยเมทานอลปริมาณมากเกินไป	24
รูปที่ 3.4	ตะกอนของ PS-nTiO ₂ ก่อนนำไปอบ	24
รูปที่ 3.5	เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค.....	26
รูปที่ 3.6	เครื่องฟูเรียร์แทรนสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์.....	26
รูปที่ 3.7	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	27
รูปที่ 3.8	ตัวอย่างกราฟที่ได้จากเครื่องรีโอมิเตอร์	28
รูปที่ 3.9	เครื่องรีโอมิเตอร์.....	28
รูปที่ 3.10	ขั้นตอนการเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางผสม (80/20 NR/SBR)	29
รูปที่ 3.11	เครื่องปั่นกวนเชิงกล.....	30
รูปที่ 3.12	แม่แบบที่ทำจากกระจกขนาด 20 x 20 x 0.15 เซนติเมตร.....	31
รูปที่ 3.13	เครื่อง Instron testing machine.....	31
รูปที่ 3.14	ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412	32
รูปที่ 3.15	เครื่องตัดชิ้นงาน.....	32
รูปที่ 3.16	ชิ้นงานทดสอบแบบ angle ตามมาตรฐาน ASTM D624	33
รูปที่ 3.17	เครื่องทดสอบ Durometer แบบ Shore A	33

รูปที่ 3.18 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน	34
รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	34
รูปที่ 4.1 นาโนเลเท็กซ์ของ PS-nTiO ₂	35
รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของ PS-nTiO ₂	35
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของ (a) nTiO ₂ , (b) MPTMS-nTiO ₂ และ (c) PS-nTiO ₂	36
รูปที่ 4.4 การดัดแปรพื้นผิว nTiO ₂ ด้วย MPTMS	36
รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของอนุภาค (a) nTiO ₂ และ (b) PS-nTiO ₂	38
รูปที่ 4.6 สมบัติ: (a) ความทนแรงดึง, (b) มอดูลัสที่ความเครียด 300% และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด ...	42
รูปที่ 4.7 ความทนแรงฉีกขาดของชิ้นทดสอบ	45
รูปที่ 4.8 ความแข็งของยางที่บ่มแล้ว.....	46
รูปที่ 4.9 TGA เทอร์โมแกรมของชิ้นทดสอบ	47
รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของชิ้นทดสอบ.....	49

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกยางธรรมชาติ (natural rubber) รายใหญ่ที่สุดของโลก โดยยางธรรมชาติสามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมาย เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นหลายประการ ได้แก่ มีความทนแรงดึง (tensile strength) สูง ถึงแม้ไม่ได้ใส่สารเสริมแรง (reinforcing fillers) มีสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง มีความร้อนเกิดขึ้น (heat build-up) ขณะใช้งานต่ำ มีความทนแรงฉีกขาด (tear strength) สูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง และมีสมบัติการเหนียวติดกัน (tack) ที่ดี อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติมีข้อเสียที่สำคัญ คือ การเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งทำให้ยางธรรมชาติมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติจึงต้องใส่สารเคมีบางชนิดเพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความทนทานสารละลายไม่มีขี้ผึ้ง น้ำมัน และสารเคมีต่ำจึงทำให้ไม่สามารถผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีเหล่านี้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจแก้ไขโดยการดัดแปรโครงสร้างของยางธรรมชาติให้มีสภาพขี้ผึ้ง นอกจากนี้ การผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์อื่นๆ เพื่อที่จะนำสมบัติที่ดีของยางสังเคราะห์ เช่น ความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance) ของยางบิวทาไดอิน (butadiene rubber) ความต้านทานน้ำมัน (oil resistance) ของยางไนไตรล์ (nitrile rubber) ความทนความร้อนและโอโซนของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน (ethylene propylene diene rubber) และการมีสมบัติทางความร้อน และความต้านทานการขัดถูที่ดีของยางสไตรีนบิวทาไดอิน (styrene butadiene rubber) เป็นต้น เหล่านี้เข้าไว้ด้วยกันกับยางธรรมชาติ ซึ่งอาจทำให้สมบัติบางอย่างของยางธรรมชาติได้รับการปรับปรุง อย่างไรก็ตาม การผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ควรพิจารณาเลือกยางที่ไม่มีสภาพขี้ผึ้งเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ เพื่อให้ยางผสมที่ได้มีทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทดลองเตรียมยางผสม (rubber blend) ระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอินภายใต้ภาวะที่เป็นเลเท็กซ์ โดยยางสไตรีนบิวทาไดอินเป็นยางสังเคราะห์ที่มีการใช้งานแพร่หลายมากที่สุด และถูกผลิตออกจำหน่ายทางการค้าทั้งในรูปแบบที่เป็นยางแท่งและเลเท็กซ์เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ นอกจากนี้ ยังมีราคาไม่แพง และสามารถแปรรูปได้ง่าย จึงทำให้ประหยัดทั้งต้นทุนวัตถุดิบและแรงงานการผลิต นอกจากนี้ ยังมีข้อดีเหนือยางธรรมชาติ คือ มีคุณภาพสม่ำเสมอและมีสิ่งเจือปนน้อยกว่า เนื่องจากยางชนิดนี้ถูกสังเคราะห์ให้มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูง

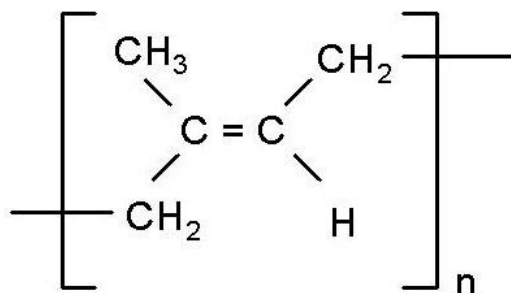
มากนัก จึงมีความหนืดที่เหมาะสมทำให้สารเคมีกระจายตัวได้ดี อย่างไรก็ตาม ยางสไตรีนบิวทาไดอีน มีความทนแรงดึงและความทนแรงฉีกขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากไม่สามารถเกิดผลึกได้ เมื่อยืดตัว (strain crystallization) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทดลองใส่สารเสริมแรงที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตรเพื่อเตรียมนาโนคอมพอสิต (nanocomposites) จากยางผสมดังกล่าวนี้ด้วยนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (nanotitanium dioxide) ซึ่งเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ได้ถูกนำมาใช้เตรียมวัสดุนาโนคอมพอสิตทั้งในอุตสาหกรรมพลาสติกและยาง เนื่องจากเป็นสารที่ไม่มีพิษ มีเสถียรภาพทางแสงและดัชนีการหักเหของแสงสูง สามารถดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดีมาก และช่วยให้ผลิตภัณฑ์ทึบแสง ซึ่งส่งผลให้ลดปริมาณการใช้ผงสีในผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังสามารถใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (ไม่เกินร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก) อย่างไรก็ตาม การที่นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) สูงมาก จึงทำให้มีอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคและเกิดการเกาะกลุ่ม (agglomerate) ของอนุภาคเหล่านี้ ทำให้กระจายตัวได้ไม่สม่ำเสมอในเนื้อยาง ซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิตลดลง แนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยการเตรียมอนุภาคไฮบริด (hybrid particles) ด้วยการห่อหุ้มอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยพอลิเมอร์เพื่อลดการเกาะกลุ่มและเพิ่มการกระจายตัวในเนื้อยาง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทดลองเตรียมเลเท็กซ์ของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน (polystyrene) ผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน ('*in situ*' differential microemulsion polymerization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ใช้สารลดแรงตึงผิว (surfactant) ปริมาณน้อย และให้ร้อยละผลได้ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง จากนั้นได้นำนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนไปผสมกับยางธรรมชาติผสมยางสไตรีนบิวทาไดอีนภายใต้ภาวะที่เป็นเลเท็กซ์ แล้วนำนาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสัณฐานวิทยาเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

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

ยางธรรมชาติเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่สำคัญของประเทศไทย ที่ได้มาจากต้นยางพารา ซึ่งมีชื่อเรียกทางพฤกษศาสตร์ว่า '*Hevea Brasiliensis*' มีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่ น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ลักษณะของน้ำยางที่ได้เป็นสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำมันมีกลิ่นหอมเล็กน้อย ประกอบด้วยหน่วยของ ไอโซพรีน (isoprene) ต่อกันแบบหัวต่อหาง (head-to-tail) โดยมีโครงสร้างเกือบทั้งหมด (ประมาณ 97%) เป็น cis-1,4 มีชื่อทางเคมีว่า cis-1,4 polyisoprene (รูปที่ 2.1) โดยยางธรรมชาติ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000-400,000 มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 กรัมต่อมิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของ cis-1,4 polyisoprene

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

น้ำยางมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่นคล้ายน้ำมันหรือสีครีมเล็กน้อย มีความหนาแน่นระหว่าง 0.975-0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 6.5-7.0 น้ำยางมีลักษณะเป็นสารละลายคอลลอยด์ (colloid solution) ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (hydrosol) แต่มีลักษณะพิเศษ คือ โมเลกุลของน้ำยางมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) แต่สมบัติส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะเด่นกว่า นอกจากนี้ น้ำยางประกอบด้วยสารที่ไม่ใช่ยาง ได้แก่ โปรตีน กรดอะมิโน คาร์โบไฮเดรต และอนุมูลของโลหะ เป็นต้น เนื่องจากน้ำยางมีเนื้อยางประมาณร้อยละ 30-40 นอกนั้นเป็นน้ำและสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง จึงทำให้มีการนำน้ำยางไปใช้ประโยชน์โดยตรงน้อยมากเนื่องจากมีปริมาณน้ำสูง และไม่สามารถเก็บรักษา น้ำยางสดเอาไว้ได้นาน เพราะเกิดการเน่าเสีย เนื่องจากเชื้อราและแบคทีเรีย และจับตัวเป็นก้อนก่อนส่งถึงโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนสิ้นเปลืองค่าขนส่ง

น้ำยางจากแหล่งต้นยางไปยังโรงงานผลิตวัตถุดิบสำเร็จรูป จึงจำเป็นต้องแปรสภาพน้ำยางสดให้เป็นน้ำยางข้นเสียก่อน

2.1.2 น้ำยางข้น (Concentrated latex)

น้ำยางข้น หมายถึง น้ำยางที่ผ่านการไล่น้ำออกไปบางส่วน เพื่อให้มีเนื้อยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 ของน้ำหนักน้ำยางทั้งหมด เพื่อให้ง่ายต่อการเก็บรักษาและขนส่ง ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ น้ำยางข้นเป็นวัตถุดิบ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์แบบจุ่ม (dipping) แบบหล่อ (casting) แบบพ่น (spraying) แบบใช้แม่แบบ (molding) และแบบทา (spreading) เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ได้แก่ ตุ๊กตา กาว สีทา ถูมือ ลูกโป่ง ยางพองน้ำ และที่นอน เป็นต้น

2.2 ข้อดีและข้อเสียของน้ำยางข้น [5, 6]

ข้อดีของน้ำยางข้น

-ผลิตภัณฑ์บางอย่างไม่สามารถขึ้นรูปจากยางแห้ง แต่ขึ้นรูปได้ง่ายและสะดวกเมื่อใช้น้ำยางข้น เช่น ผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตด้วยเทคนิคการจุ่ม (dipping process)

-น้ำยางข้นเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ จึงสามารถผสมกับสารตัวเติมของยางได้ง่าย สามารถใช้สารตัวเติมในรูปของเหลว และใช้พลังงานในการผสมต่ำ โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องผสมที่มีขนาดใหญ่เหมือนกับการขึ้นรูปยางแห้ง

การผลิตยางผสมในภาวะที่เป็นเลเท็กซ์จะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ทางกายภาพ โดยไม่เกิดการแยกเฟสหรือตกตะกอน

ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากน้ำยางข้นมีสมบัติเชิงกลที่ดี เนื่องจากน้ำยางข้นมีความหนืดต่ำใช้เวลาในการผลิตน้อย เพราะไม่ต้องทำการบดย่อย (mastication) ให้นิ่มตัวก่อนการผสมเหมือนยางแห้ง ซึ่งการบดย่อยมีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางขาดออก หรือน้ำหนักโมเลกุลลดลง ทำให้น้ำยางมีสมบัติเชิงกลต่ำลง

-มีความปลอดภัยในการผลิตมากกว่าใช้ยางแห้ง เนื่องจากน้ำยางข้นมีน้ำเป็นองค์ประกอบ จึงไม่ติดไฟได้ง่าย

ข้อเสียของน้ำยางข้น

-น้ำยางข้นไม่เหมาะสมกับการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา เนื่องจากในน้ำยางมีน้ำเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก (มีน้ำประมาณร้อยละ 40 และมีเนื้อยางประมาณร้อยละ 60) ถ้าทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความหนา จะหดตัวมากเมื่อแห้ง ทำให้เสียรูปหรือไม่คงขนาด

-กระบวนการผลิตจากน้ำยางชั้นต้องดูแลการผลิตที่พิถีพิถันมากกว่ายางแห้ง เนื่องจากน้ำยางชั้นมีเสถียรภาพต่ำ อาจเกิดการจับตัวแยกวัฏภาค หรือตะกอนเสียสภาพได้ถ้าขาดการควบคุมการผลิต เช่น สูตรการผสม ลักษณะของสารตัวเติม และความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นต้น

2.3 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ [2]

ความยืดหยุ่น (elasticity) สมบัติความยืดหยุ่นเป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติ คือ ยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิมได้อย่างรวดเร็ว

ความทนแรงดึง (tensile strength) เนื่องจาก โมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางธรรมชาติสามารถทนตึงได้งายเมื่อถูกยืด ซึ่งการเกิดผลึกจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติมีค่าความทนแรงดึงสูงมากโดยที่ไม่ต้องใส่สารตัวเติมเสริมแรง

ความทนแรงฉีกขาด (tear strength) เนื่องจาก ยางธรรมชาติสามารถทนตึงได้เมื่อถูกยืด ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีความทนแรงฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง การเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปก็จะช่วยทำให้ค่าความทนแรงฉีกขาดของยางสูงขึ้น

ความต้านทานการขัดถู (abrasion resistance) ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานการขัดถูสูง แต่ยังคงน้อยกว่ายาง SBR เล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่นๆ พบว่า ยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานการขัดถูอยู่ในกลุ่มที่สูง

ความเหนียวติดกัน (tack) ยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกันซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

การคงรูปจากการกดอัด (compression set) ยางธรรมชาติมีค่า compression set ค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามค่า compression set ที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่า compression set ที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดเสื่อมสภาพ ซึ่งส่งผลทำให้ค่า compression set ค่อยลง

การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) ยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ในอุณหภูมิต่ำมากๆ ซึ่งยางที่มีสมบัติดีกว่ายางธรรมชาติมีเพียง 2 ชนิด คือ ยางบิวทาไดอีน (BR) และยาซิลิโคน (Q)

การกระด้างกระดอน (rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย (มี hysteresis ต่ำ) ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต

ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ความสามารถในการละลายนี้ลดลงถ้ายางเกิดการคงรูปเนื่องจากการเชื่อมโยงทางเคมีของโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างร่างแห ยางคงรูปจึงเพียงแต่เกิดการบวมตัวในตัวทำละลายเหล่านั้น อย่างไรก็ตาม การบวมตัวของยางดังกล่าวทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลงด้วยเหตุนี้ ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว แต่ยางทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว

การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดส์ได้ง่าย นอกจากนี้ยางธรรมชาติไม่ทนต่อโอโซนเพราะเมื่อยางถูกยึดและได้รับโอโซนนานๆ จะเกิดรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมากที่บริเวณพื้นผิวในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการยึดตัวของยาง

ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation) ยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูงมาก โดยมีค่าความต้านทานจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง 10^{15} หรือ 10^{16} ohm.cm

2.4 การใช้งานของยางธรรมชาติ [2]

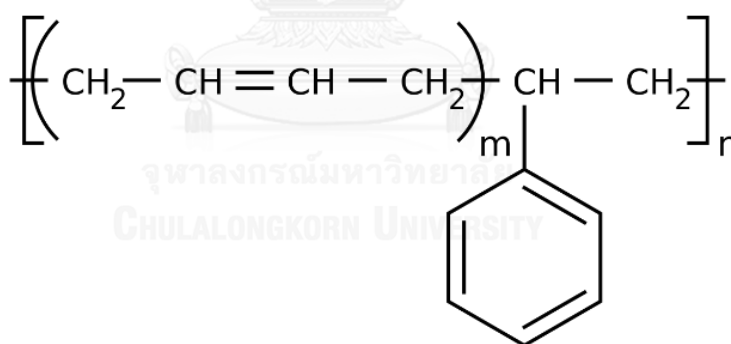
ยางธรรมชาติเป็นยางเอนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้มากมาย เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี แต่อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติก็มีข้อด้อยหลัก คือ ไม่ทนต่อความร้อน สภาพอากาศ น้ำมัน และสารเคมีอื่นๆ แต่ผลิตภัณฑ์บางประเภทยังคงจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต เนื่องจาก

1. ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนแรงดึงและความยืดหยุ่นสูงมาก จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถังมือยาง ถังยางอนามัย ลูกโป่ง และยางรัดของ เป็นต้น
2. ยางธรรมชาติมีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี มีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่มีความร้อนสะสมที่เกิดขณะใช้งานต่ำและมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ฝ่ายยาง เป็นต้น

3. ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงทั้งที่อุณหภูมิต่ำและสูง จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางกระเปาะน้ำร้อน เนื่องจากในการแกะชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในระหว่างกระบวนการผลิตจะต้องดึงชิ้นงานออกจากเบ้าพิมพ์ในขณะที่ร้อน ยางที่ใช้จึงต้องใช้ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูง

2.5 ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene butadiene rubber, SBR) [7-9]

ยาง SBR เป็นยางสังเคราะห์ที่สำคัญและใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม การสังเคราะห์และผลิตยาง SBR ในเชิงการค้าได้ถูกริเริ่มในประเทศเยอรมันในช่วงสงครามโลก (ในช่วงปี ค.ศ. 1930) โดยการเตรียมโคพอลิเมอร์ระหว่างสไตรีนและบิวทาไดอีนด้วยวิธีการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) ได้เป็นยาง SBR ซึ่งมีชื่อเรียกในสมัยนั้นว่า ยาง Buna-S ดังแสดงในรูป 2.2 (ปริมาณสไตรีนอยู่ในช่วง 23-40 %) โดยมอนอเมอร์ทั้งสองอยู่รวมกันอย่างไม่เป็นระเบียบ จึงทำให้ไม่สามารถเกิดผลึกเมื่อมีการดึงยืดออก ดังนั้น ความทนแรงดึงของยาง SBR จึงไม่สูงมากนัก จำเป็นต้องใส่สารเสริมแรง เช่น คาร์บอนแบล็ก หรือซิลิกา เข้าไปเพิ่มความทนแรงดึง



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางสไตรีนบิวทาไดอีน

2.5.1 สมบัติทั่วไปของยางสไตรีนบิวทาไดอีน [8]

ยาง SBR เป็นยางประเภทใช้งานได้ทั่วไปเช่นเดียวกับยางธรรมชาติและยาง IR เพราะสามารถใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง ยาง SBR มีความต้านทานการขัดถูสูงกว่ายางธรรมชาติ จึงนิยมใช้ทำส่วนที่เป็นดอกยางของยางรถยนต์ขนาดเล็ก เนื่องจากยาง SBR มีพฤติกรรมย้อนรอย (hysteresis) สูง ซึ่งสามารถเกิดความร้อนสะสมได้สูง จึงไม่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมยางรถบรรทุก เนื่องจากมีดอกยางที่หนากว่าทำให้ไม่สามารถระบายความร้อนได้ทัน

ยางอาจเกิดการระเบิดได้ นอกจากนี้ยาง SBR ยังมีแนวโน้มที่จะเกิดยางตายในระหว่างกระบวนการผลิตน้อยกว่ายางธรรมชาติ (less tendency to scorch in processing) เพราะยาง SBR มีอัตราเร็วในการคงรูปช้ากว่าและยาง SBR ถูกออกซิไดซ์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติ (ทนต่อความร้อนได้ดีกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย) ดังนั้น จึงทำให้สามารถผสมยางในเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูงกว่าได้ ด้วยเหตุนี้ ยาง SBR จึงมีข้อดีเหนือกว่ายางธรรมชาติโดยมีกระบวนการแปรรูปที่ง่ายกว่าประหยัดทั้งกำลังงานและเวลาตลอดจนต้นทุนการผลิต

2.5.2 การใช้งานของน้ำยางสไตรีนบิวทาไดอิน

ยาง SBR จัดเป็นยางสังเคราะห์ที่สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายและสามารถใช้แทนยางธรรมชาติได้ การใช้งานน้ำยาง SBR มีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี เนื่องจากมีสมบัติทางกายภาพคล้ายยางธรรมชาติ และสามารถทนต่อการสึกกร่อนจากการขีดถู ดังนั้น ยางชนิดนี้จึงถูกนำไปใช้งานในการผลิตสายพาน พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อยาง เป็นต้น

2.6 ยางผสม (Rubber blend) [6, 10]

ยางผสม คือ การนำยางตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมรวมกัน เพื่อให้ได้ยางผสมใหม่ที่มีสมบัติตรงตามความต้องการ เทคโนโลยียางผสมมีการใช้งานและได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยางโดยมีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้

1. ให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติตรงตามความต้องการโดยได้สมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดมารวมกัน ซึ่งสมบัติเหล่านี้ไม่สามารถหาได้จากยางเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง เช่น การผสมยางธรรมชาติ (NR) ที่มีสมบัติไม่ทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนและโอโซนกับยางสังเคราะห์ เช่น ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอิน (EPDM) ที่ทนต่อการเสื่อมสภาพได้ดีเพื่อให้ได้ยางธรรมชาติที่สามารถทนการเสื่อมสภาพได้ดีขึ้น

2. เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตโดยการใช้วัสดุที่มีราคาถูกผสมเข้าไปเพื่อลดปริมาณการใช้วัสดุที่มีราคาแพงลง

3. ปรับปรุงสมบัติการแปรรูป (processing properties) ของยางเพื่อให้กระบวนการผลิตสามารถทำได้ง่ายขึ้น

อย่างไรก็ตาม การผลิตผลิตภัณฑ์ยางในทางอุตสาหกรรมยังจำเป็นต้องมีการใส่สารตัวเติมเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลให้เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน

2.7 สารตัวเติม (Fillers) [7, 11]

สารตัวเติม คือ สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยางซึ่งเป็นของแข็ง เช่น คาร์บอนแบล็ก ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น ใส่ลงไปในยางเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

- เพื่อลดต้นทุนการผลิต
- เพื่อปรับปรุงสมบัติของยาง เช่น ความทนแรงดึง ความทนไฟ เป็นต้น
- เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต เช่น การควบคุมความหนาในการทำแผ่นยาง
- เพื่อช่วยลดการพองตัวของยางในน้ำมัน
- เพื่อช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของยาง

2.7.1 ชนิดของสารตัวเติม

ชนิดของสารตัวเติมสามารถแบ่งออกตามลักษณะสัณฐานวิทยาได้ 3 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (particulated fillers) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- สารเสริมแรง (reinforcing fillers) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น คือ มีความทนแรงดึง ความต้านทานการสึกหรอ และความทนแรงฉีกขาดสูง เป็นต้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมที่สูงขึ้นทำให้ยางมีการกระดอนลดลง สารตัวเติมประเภทนี้ส่วนใหญ่มีอนุภาคขนาดเล็กประมาณ 180-600 อังสตรอม เช่น คาร์บอนแบล็ก และซิลิกา เป็นต้น

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

- สารช่วยลดต้นทุนการผลิต (diluent fillers) สารตัวเติมประเภทนี้ไม่เสริมประสิทธิภาพความแข็งแรงให้กับยาง มีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่ตั้งแต่ 100 อังสตรอม ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลค์ และแบเรียมซัลเฟต เป็นต้น สารตัวเติมประเภทนี้ทำให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างลดลง เช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด และความต้านทานการขัดถูแต่ปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น ความแข็ง และมอดุลัส ทำให้กระบวนการแปรรูปยางลดการพองของยาง และลดต้นทุนการผลิตเพราะมีราคาถูก

2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous fillers) เช่น

- แอสเบสทอส (asbestos) เป็นเส้นใยจากธรรมชาติ ช่วยเพิ่มสมบัติในด้านความทนทานต่อเปลวไฟ หรือความร้อนของยาง

- ผงเยื่อไม้ (wood flour) ได้จากการบดไม้ให้มีขนาดเล็ก มักใช้เป็นสารตัวเติมในยางประเภทเกรดต่ำ สารตัวเติมประเภทนี้ไม่มีผลต่อการคงรูปของยาง ถ้าใช้ในปริมาณมากจะทำให้ยางแข็งแรง และช่วยลดอัตราการหดตัวของยาง โดยการแผ่ออกเพื่อรักษารูปร่างของยาง เช่น การใช้กับพื้นรองเท้า เป็นต้น

3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (resinous fillers)

เรซินที่ใส่เข้าไปในยางทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำให้ยางแข็งขึ้น มักใช้สารตัวเติมที่เป็นผง เช่น คาร์บอนแบล็ก และซิลิกา แต่สารเคมีที่เป็นผงนี้สามารถผสมเข้าไปในยางได้ในปริมาณจำกัด ถ้ามากเกินไปจะทำให้ผสมเข้ากับยางได้ยาก ยางจะแข็งและมีความร้อนเกิดขึ้นในขณะผสม จึงมีการเลือกใช้เรซินเติมลงไป ในยาง สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน ได้แก่ สไตรีนเรซิน และฟีนอลิกเรซิน เป็นต้น

2.8 ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) [12-15]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไทเทเนียม นำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีชื่อทางการค้า คือ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) ไทเทนิคแอนไฮไดร (titanic anhydride) และไทเทเนีย (titania) เป็นสารที่เกิดเองตามธรรมชาติมี 2 รูปแบบ ใหญ่ คือ รูไทล์และอานาเทส ทั้ง 2 รูปแบบมีไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์อยู่กับสารปนเปื้อนต้องผ่านกระบวนการทางเคมีจึงจะนำสารปนเปื้อนออกได้เหลือไว้แต่ไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ลักษณะทั่วไปไม่มีสีขาวทึบแสงและไม่เป็นพิษพบอยู่ในรูปของแร่ เป็นสารโพโตคาทาลิส มีความสามารถในการสลายสารประกอบอินทรีย์เมื่ออยู่ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตหรือภายใต้แสงจากดวงอาทิตย์ ซึ่งใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำ อากาศและก๊าซพิษ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการดูดซับและเป็นตัวป้องกันแสงแดด ทำให้ไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นหนึ่งในสารที่มีการผลิตมากที่สุดในโลก

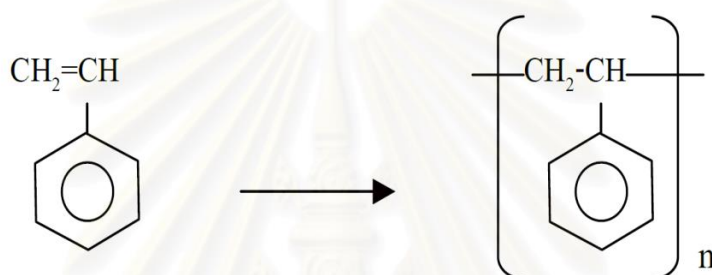
ไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นสารที่มีความปลอดภัยต่อมนุษย์สูงมาก ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของสารสีที่ปลอดภัยไม่ก่อให้เกิดโรคมะเร็ง การกลายพันธุ์หรือส่งผลกระทบต่อตัวอ่อนในครรภ์ จึงเป็นสารที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์สิ่งแวดล้อมและสุขภาพ ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นโดยอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ของไทเทเนียมไดออกไซด์ ได้แก่ เสื้อผ้าที่สามารถทำความสะอาดตัวเองได้

กระเบื้องปราคาจากเชื้อโรค โดยเฉพาะสีทาผนังบ้านหรืออาคารด้านนอก ซึ่งช่วยให้สีทาบ้านมีสมบัติในการปิดบังผิวหน้าที่ดีและสามารถทำลายสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหรือฝุ่นละอองต่างๆ ที่ติดอยู่ตามฝาผนังซึ่งจะถูกชะล้างออกมากับฝนทำให้ผนังดูใหม่และสะอาด นอกจากนี้ ยังช่วยลดหรือสลายไนโตรเจนไดออกไซด์ในอากาศเพื่อลดการเกิดฝนกรดและยังถูกนำมาใช้เคลือบเส้นด้ายหรือสิ่งทอ เช่น เสื้อผ้า เบาะรถยนต์ เพื่อกำจัดกลิ่นเหม็นอันไม่พึงประสงค์จากเชื้อโรคและสารต่างๆ บนสิ่งทอ

ในปัจจุบันสามารถเตรียมไทเทเนียมไดออกไซด์ได้จากกรรมวิธีที่เรียกว่า กรรมวิธีคลอไรด์ซึ่งถูกค้นพบโดยบริษัทดูปองต์ โดยการนำแร่โอลิเมไนต์มาทำปฏิกิริยากับคลอรีนในภาวะที่เหมาะสมจะได้สารผลิตภัณฑ์คือไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ จากนั้นนำไปกลั่นเพื่อให้บริสุทธิ์แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงต่อที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสโดยประมาณ จะได้ไทเทเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์

2.9 พอลิสไตรีน (Polystyrene) [16-19]

พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ชนิดเทอร์โมพลาสติก (thermoplastics) ที่มีลักษณะแบบอสัณฐาน เกิดจากปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของสไตรีนมอนอเมอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) ผลิตภัณฑ์พอลิสไตรีนมีลักษณะใส ไม่มีสี มีความแข็งตึงสูง นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีราคาถูก ง่ายต่อการขึ้นรูป จะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและกลับสู่สภาพเดิมเมื่อเย็นตัวลง ที่อุณหภูมิห้อง โดยในตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติต่างๆ ของพอลิสไตรีน



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของสไตรีนมอนอเมอร์เป็นพอลิสไตรีน

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆ ของพอลิสไตรีน

ความหนาแน่น (lb/in ³)	0.0376-0.0387
ความถ่วงจำเพาะ	1.04-1.10
มวลโมเลกุลเฉลี่ย (M _w)	200000-300000
ดัชนีการหลอมไหล (g/10 min)	1.2-2.8
ความทนแรงดึง (MPa)	10.34-82.73
อุณหภูมิคล้ายแก้ว (°C)	100
ความสามารถในการทนกรด	ทนกรดอ่อนและกรดแก่ได้ ถูกทำลายโดยกรดออกซิไดซ์
ความสามารถในการทนด่าง	ทนด่างอ่อนและด่างแก่ได้
ความสามารถในการละลาย	ละลายได้ในตัวทำละลายแอโรมาติก และคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน

2.9.1 การใช้งานของพอลิสไตรีน

ผลิตภัณฑ์คริสตัลของพอลิสไตรีน มีลักษณะโปร่งใสสามารถนำมาฉีดใส่แม่แบบหรือนำมาดัดขึ้นรูป โดยพอลิสไตรีนที่นำมาฉีดใส่แม่แบบจะนำไปใช้ในการทำเครื่องเสียง เทป กล่องใส่แผ่นดิสก์ เครื่องใช้ในสำนักงาน ของเล่น เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์อิมแพคพอลิสไตรีน (impact polystyrene) มีลักษณะทึบแสงแต่มีค่าทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าเมื่อเทียบกับคริสตัลพอลิสไตรีน โดยมีการเติมยางเพิ่มค่าทนแรงกระแทกและค่าการยึดตัว แต่ทำให้ความใสและความตึงลดลง อิมแพคและคริสตัลพอลิสไตรีนจะเสื่อมสลายลงอย่างรวดเร็วเมื่อโดนแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้งานกลางแจ้ง นำไปใช้ในการทำชั้นวางเครื่องเสียง เครื่องใช้ภายในบ้าน เทปวีดีโอ และสามารถนำมาขึ้นรูป เพื่อใช้ในการทำกระเป๋าดูหนัง ภาชนะใส่อาหาร เป็นต้น

แผ่นพอลิสไตรีนประเภท extruded non-foam ถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบเงากระจก และแผงควบคุม พอลิสไตรีนประเภทนี้อาจอยู่ในรูปฟิล์มหรือแผ่นนำมาใช้ในการบรรจุอาหาร เช่น ถาดคุกกี้ แผ่นฟิล์มถนอมอาหาร แผ่นกันกระแทก เป็นต้น

พอลิสไตรีนอีกชนิดที่นำมาเป็นผลิตภัณฑ์ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ โฟม PS เกิดจากการนำเม็ดพอลิสไตรีนเรซินมาผ่านการเป่าให้ขยายตัว ในโครงสร้างของโฟมมีสี่ขาธรรมชาติ โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1. Expandable polystyrene หรือ EPS ใช้บรรจุสินค้า เช่น โทรทซ์คัน์ ตู้เย็น เครื่องใช้ไฟฟ้า หมวกกันน็อค โฟมกล่องน้ำแข็ง โฟมแผ่น เป็นต้น
2. Polystyrene paper หรือ PSP หรือที่เรียกว่า Polystyrene/XPS ใช้สำหรับทำ ถาดหรือกล่องโฟมบรรจุอาหาร เป็นต้น

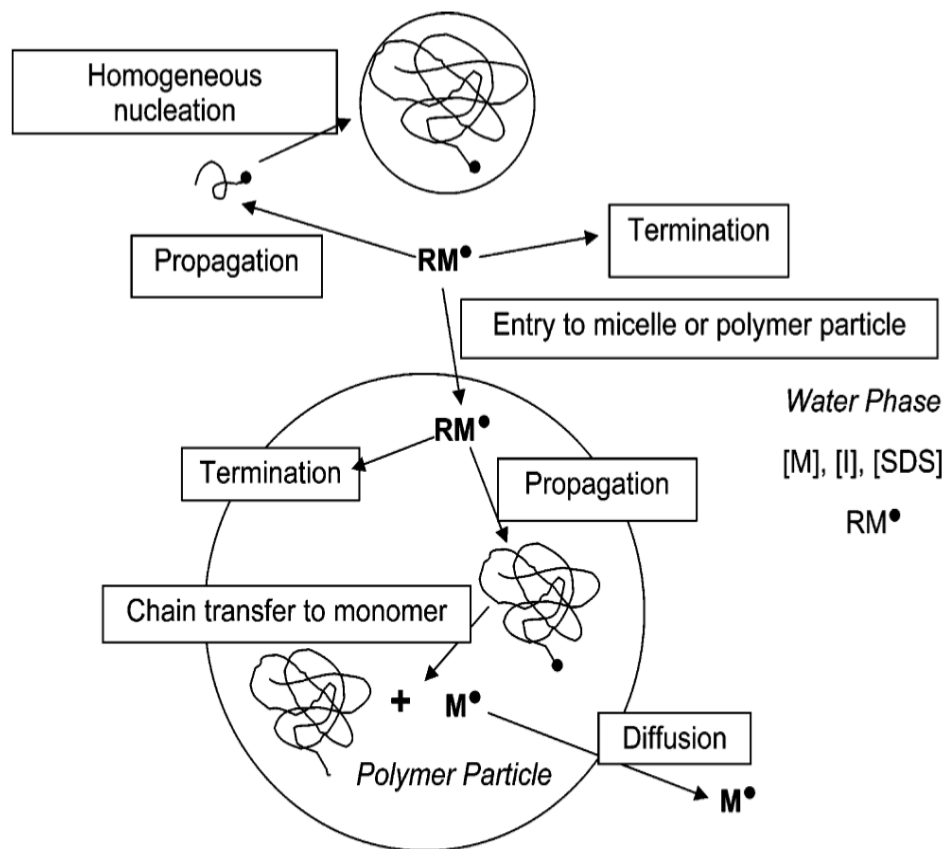
2.10. กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน (Differential microemulsion polymerization) [20-24]

ปัจจุบันมีการใช้งานและให้ความสนใจอนุภาคที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตรเป็นจำนวนมาก เนื่องจาก ขนาดของอนุภาคระดับนาโนเมตรมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงมาก และปริมาณโมเลกุลหรืออะตอมบนผิวอนุภาคที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งนำไปสู่การใช้งานหลายๆ ด้าน เช่น การแพทย์ (medical) สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) การเกษตร (agriculture) และสิ่งแวดล้อม (environment) เป็นต้น โดยเฉพาะพอลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรถูกใช้ในการนำส่งยา (drug delivery) ตัดแปรความทนแรงกระแทก (impact modifier) สำหรับพลาสติกและอื่นๆ

พอลิเมอร์ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรส่วนใหญ่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชันและไมโครอิมัลชัน (emulsion and microemulsion polymerization) โดยข้อเสียของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน คือใช้สารลดแรงตึงผิวจำนวนมากและให้ร้อยละผลได้ในปริมาณที่ไม่สูงมากนัก สำหรับกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันได้ถูกพัฒนามาจากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถลดปริมาณการใช้สารลดแรงตึงผิวในกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ อีกทั้งสามารถควบคุมขนาดอนุภาคของพอลิเมอร์และมีร้อยละผลได้ของพอลิเมอร์อิมัลชันมากกว่าร้อยละผลได้ของพอลิเมอร์จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชันได้อีกด้วย ซึ่งหลักการของเทคนิคนี้คล้ายกระบวนการแบบไมโครอิมัลชัน กล่าวคือ ในระบบแรกเริ่มประกอบด้วยน้ำ สารลดแรงตึงผิว และสารเริ่มปฏิกิริยาผสมอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งเมื่อให้ความร้อนแก่ระบบจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด จึงเริ่มหยดมอนอเมอร์ลงไปทีละหยด จึงทำให้ไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวเกิดการตั้งมอนอเมอร์เข้าไปอยู่ในไมเซลล์ได้ง่ายกว่ากระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบไมโครอิมัลชัน จึงสามารถลดปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่จำเป็นต้องใช้ให้มีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤติ (critical micelle concentration, CMC) ได้ ซึ่งเป็นข้อดีของกระบวนการนี้ เพราะสารลดแรงตึงผิวมีราคาแพง อีกทั้งไม่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดสารลดแรงตึงผิวภายหลังกระบวนการเกิดพอลิเมอร์

2.10.1 กลไกการของกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน [21]

โดยสารเริ่มปฏิกิริยาแตกตัวในวัฏภาคน้ำกลายเป็นแรดิคัลปฐมภูมิ ซึ่งแบ่งส่วนเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบด้วยการหยดอย่างต่อเนื่องเกิดเป็นมอนอเมอร์แรดิคัล (RM^\bullet) และขยายเป็นพอลิเมอร์แรดิคัล ซึ่งพอลิเมอร์แรดิคัลเหล่านี้ขยายขนาดในวัฏภาคน้ำจนได้ความยาวสายโซ่วิกฤติ (critical chain length) และตกตะกอนโดยการเคลื่อนเข้าไปอยู่ในไมเซลล์ เกิดเป็นอนุภาคของพอลิเมอร์ นอกจากนี้ RM^\bullet ยังสามารถเคลื่อนเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ในไมเซลล์ที่บวมตัวด้วยมอนอเมอร์เกิดเป็นอนุภาคพอลิเมอร์ ซึ่งอนุภาคพอลิเมอร์ฟรีแรดิคัลเหล่านี้จะขยายขนาดต่อไป สายโซ่พอลิเมอร์จะสิ้นสุดการขยายภายหลังการเกิด chain transfer ไปยังมอนอเมอร์ และมอนอเมอร์แรดิคัลที่เกิดจาก chain transfer (M^\bullet) สามารถเริ่มต้นเกิดพอลิเมอร์ต่อไปได้ หรือแพร่ออกสู่วัฏภาคน้ำเนื่องจากมีขนาดเล็กมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการเกิดพอลิเมอร์ผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน [21]

2.11 การห่อหุ้มอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยพอลิเมอร์ [25]

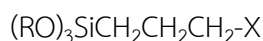
ปัจจุบันเทคนิคการห่อหุ้มอนุภาคของสารอนินทรีย์ด้วยพอลิเมอร์เป็นอนุภาคนาโนไฮบริด (nanohybrid particles) กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากสามารถปรับปรุงเสถียรภาพของวัสดุที่ถูกห่อหุ้ม โดยเพิ่มความสามารถในการกระจายตัว ลดความเป็นพิษของสารอนินทรีย์ และสามารถเก็บและขนส่งได้สะดวก ดังนั้น การห่อหุ้มอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดระดับนาโนเมตรด้วยพอลิเมอร์ เช่น พอลิस्टาไดรีน และพอลิเมทิลเมทาคริเลต เป็นต้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการเตรียมพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต

ปัญหาในการห่อหุ้มอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยพอลิเมอร์ คือ การแยกเฟสระหว่างอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และพอลิเมอร์ ซึ่งวิธีเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาคอนินทรีย์และพอลิเมอร์อาจทำได้ 5 วิธี คือ

1. การใช้พอลิเมอร์ที่มีอันตรกิริยา (พันธะแวนเดอร์วาลส์ พันธะไดโพล และพันธะไฮโดรเจน) กับอนุภาคอนินทรีย์
2. การยึดติดด้วยพันธะโควาเลนต์ของชั้นอินทรีย์บนผิวของอนุภาคอนินทรีย์ ซึ่ง ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (compatibilizer) ของพื้นผิวอนุภาค/พอลิเมอร์
3. ทำการห่อหุ้มอนุภาคด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์เทคนิคพิเศษ เช่น กระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบอิมัลชัน
4. การยึดติดของหมู่ฟังก์ชันบนอนุภาคที่สามารถเกิดพันธะโควาเลนต์กับพอลิเมอร์
5. การยึดติดของหมู่เริ่มปฏิกิริยาบนผิวอนุภาคสำหรับการกราฟต์สายโซ่พอลิเมอร์

2.12 สารคู่ควบประเภทซิลเลน (Silane coupling agent) [26, 27]

สารคู่ควบซิลเลน คือ สารประกอบเคมีที่มีซิลิกอนเป็นโครงสร้างพื้นฐานและมีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาสองชนิดภายในโมเลกุลเดียว คือ หมู่ฟังก์ชันอนินทรีย์และอินทรีย์ โครงสร้างโดยทั่วไปของสารคู่ควบซิลเลนเป็นดังนี้



โดย RO คือ หมู่ไฮโดรไลซ์ เช่น เมทอกซี เอทอกซี หรืออะซิโทกซี

X คือ หมู่ออร์กาโนฟังก์ชัน เช่น กรดอะมิโน เมทาคริลอกซี และอีพอกซี เป็นต้น

สารคู่ควบซิลเลนจะทำหน้าที่เป็นสะพานหรือตัวกลางเชื่อมระหว่างพอลิเมอร์กับฟิลเลอร์ โดยการสร้างพันธะที่แข็งแรงกับเฟสทั้งสอง ทำให้มีการยึดเกาะระหว่างเฟสดีขึ้น

ในวัสดุคอมพอสิต สารคู่ควบซิเลนสามารถเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติด และทำให้วัสดุทนต่อความชื้น หรือสิ่งแวดล้อมทั่วไปได้ และยังมีประโยชน์อื่นๆอีกหลายประการดังนี้

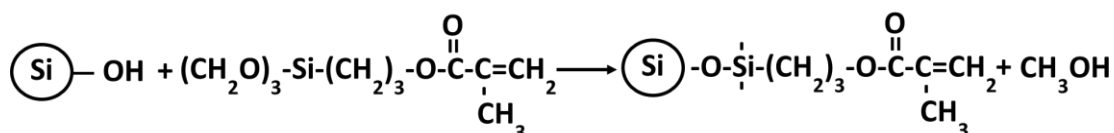
1. ทำให้การเปียกผิว (wetting) ของเมทริกซ์บนวัสดุอินทรีย์ดีขึ้น
2. ทำให้คอมพอสิตมีความหนืดต่ำระหว่างการขึ้นรูป
3. ทำให้คอมพอสิตมีผิวเรียบ
4. ทำให้คอมพอสิตมีความใสเพิ่มขึ้น

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Varkey และคณะ [28] ได้ผสมยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอินในภาวะการผสมที่เป็นเลเท็กซ์ พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางสไตรีนบิวทาไดอินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความเข้ากันได้ทางกายภาพของยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอิน

Popovic และคณะ [29] พบว่า การผสมยางสไตรีนบิวทาไดอินในยางธรรมชาติช่วยทำให้ยางธรรมชาติ มีความแข็งแรง เปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาด และพฤติกรรมย้อนรอยเพิ่มขึ้น และการผสมยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอินในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้สมบัติความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การยึดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุด

Yu และคณะ [25, 30] ได้สังเคราะห์อนุภาคซิลิกา/พอลิสไตรีนนาโนคอมพอสิตด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ ‘อินซิทู’ ไมโครอิมัลชัน โดยใช้ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาค 10 ± 5 นาโนเมตร พบว่า ซิลิกาที่ไม่ผ่านการดัดแปรผิวไม่มีพอลิสไตรีนมากกราฟต์บนผิวของซิลิกาเลย ขณะที่ซิลิกาที่ผ่านการดัดแปรมีพันธะคู่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับพอลิสไตรีน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และได้โครงสร้างแบบเปลือกแก่น (core-shell) ที่มีซิลิกาเป็นแก่นกลาง (core) และพอลิสไตรีนเป็นเปลือกหุ้ม (shell) อย่างหนาแน่น โดยมีประสิทธิภาพในการห่อหุ้ม (encapsulating efficiency) มากกว่าร้อยละ 80 และอนุภาคนาโนคอมพอสิตที่ได้มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 45 นาโนเมตร



รูปที่ 2.5 การปรับปรุงผิวซิลิกาด้วยสารคู่ควบซิเลน [30]

Norakankorn และคณะ [31] ได้สังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลตผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน โดยใช้ AIBN เป็นสารเริ่มปฏิกิริยาที่ละลายในน้ำมัน (oil-soluble initiator) และใช้โซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟตเป็นสารลดแรงตึงผิว พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประมาณ 1-3 ล้าน และมีขนาดอนุภาค 20-30 นาโนเมตร นอกจากนี้ ยังได้นาโนเลเท็กซ์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีปริมาณของแข็งสูงถึงร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดแรงตึงผิวทำให้ได้ร้อยละของการเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์สูงขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของมอนอเมอร์ต่อน้ำไม่มีนัยสำคัญใดๆ ต่อร้อยละของการเปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ และสามารถลดอัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิว/มอนอเมอร์ เท่ากับ 1/130 และ อัตราส่วนระหว่างสารลดแรงตึงผิว/น้ำ เท่ากับ 1/600

Meera และคณะ [32] ได้ศึกษาการเติมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และนาโนซิลิกาเป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติ ซึ่งทำให้สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติม นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และนาโนซิลิกา นอกจากนี้ พบว่าขนาดอนุภาคและการเกาะกลุ่มกันของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และนาโนซิลิกาเมื่อมีการเติมในปริมาณสูงขึ้นไปทำให้สมบัติทางความร้อนและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาตินั้นลดลง

Chuayjulit และคณะ [33] ได้ทำการเตรียมวัสดุนาโนไฮบริดโดยห่อหุ้มอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA-nTiO₂) ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ ‘อิน ซิทู’ ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน แล้วนำไปผสมกับ p-PVC พบว่าอนุภาคนาโนไฮบริด PMMA-nTiO₂ ที่เตรียมได้ มีอนุภาคขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 46.2 นาโนเมตร โดยมีร้อยละของผลได้เท่ากับ 90.25 และร้อยละของแข็งเท่ากับ 23.03 และมีสัณฐานวิทยาเป็นแบบ core-shell อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความทนแรงดึง สมบัติทางความร้อน และสมบัติด้านความแข็งของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

Boonmahitthisud และ Chuayjulit [34] ได้ทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีนและอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ ‘อิน ซิทู’ ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน แล้วนำไปเสริมแรงให้กับยางผสมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีนที่อัตราส่วน 80:20 (โดยน้ำหนักยางแห้ง) ภายใต้ภาวะการผสมที่เป็นเลเท็กซ์โดยทำการตัดแปรรูปร่างของนาโนซิลิกาด้วยสารควบคู่ซิลิโคน MPTMS ก่อนนำไปห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน ใช้ SDS เป็นสารลดแรงตึงผิว และ AIBN เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา จากการทดลอง พบว่าอนุภาคนาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีนและอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 34 และ 38 นาโนเมตร ตามลำดับ และมีสัณฐานวิทยาเป็นแบบ core-shell

ซึ่งช่วยปรับปรุงการกระจายตัวของนาโนซิลิกาในยางผสมของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน อีกทั้งยังช่วยปรับปรุงสมบัติความทนแรงดึง สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลพลวัตของผลิตภัณฑ์อีกด้วย โดยการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีนให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงและมอดูลัสที่ดีกว่าการเติมอนุภาคนาโนเลเท็กซ์ของพอลิสไตรีน เนื่องจากการทำงานร่วมกันในการเสริมแรงของพอลิสไตรีนและอนุภาคนาโนซิลิกา



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

1. น้ำยางธรรมชาติ (natural rubber latex) ที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
2. น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene butadiene rubber latex) ที่มีปริมาณของแข็งร้อยละ 50.5 โดยน้ำหนัก จากบริษัทสยามเลเท็กซ์สังเคราะห์ จำกัด
3. สารละลายโปแตสเซียมโอเลเอต (potassium oleate) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
4. สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
5. สารดิสเพอร์สชันซัลเฟอร์ (sulphur) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
6. สารดิสเพอร์สชันซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
7. สารดิสเพอร์สชันวิงสเตย์แอลแอนติออกซิแดนต์ (wingstay L antioxidant) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
8. สารดิสเพอร์สชันซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide) มีความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จากสถาบันวิจัยยางกรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
9. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (sodium dodecyl sulfate, SDS) ชนิดเกล็ด ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 97 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทคอกนิส (ประเทศไทย) จำกัด [Cognis (Thailand) Co., Ltd.]
10. 2,2'-อะโซบิสไอโซบิวทิโรไนไตรล์ (2,2'-azobisisobutyronitrile, AIBN) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทสยามเคมีคัล จำกัด (Siam Chemical Industry Co., Ltd.)
11. นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (nanotitanium dioxide, nTiO₂) ที่มีขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทเจ็บบ์เซ็นแอนด์เจ็สเซ็น (ประเทศไทย) จำกัด [Jebesen & Jessen Technology (Thailand) Co., Ltd.]

12. สไตรีนมอนอเมอร์ (styrene monomer) มีสารยับยั้ง (inhibitor) 10-15 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทดาวเคมีคัล จำกัด (Dow Chemical Co.,Ltd)

13. เมทานอล (methanol)

14. น้ำกลั่น (distilled water)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เตรียมสารดีสเพอร์สชัน

1. หม้ออบและลูกบิด
2. เครื่องควบคุมรางบด

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. เครื่องตัดชิ้นงาน (compression air sample cutter) (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. แม่แบบทำจากแผ่นกระจกขนาด 20 x 20 x 0.15 เซนติเมตร
5. เตาอบ (oven)

3.2.4 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

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

2. 푸리에 변환 적외선 분광기 (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR) รุ่น Nicolet 6700 (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) รุ่น Jeol JEM-2100 (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. เครื่องวัดการคืบรูป (moving die rheometer, MDR) ของ Techpro รุ่น A0225-rheo TECH MD⁺ (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
5. เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (tensile testing machine) รุ่น Instron 5843 (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
6. เครื่องทดสอบความแข็ง (hardness tester) แบบ Shore A รุ่น durometer hardness system shore A (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
7. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermogravimetric analyzer, TGA) รุ่น Perkin Elmer Pyris 1 TGA (กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น Jeol JSM-6480LV (คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

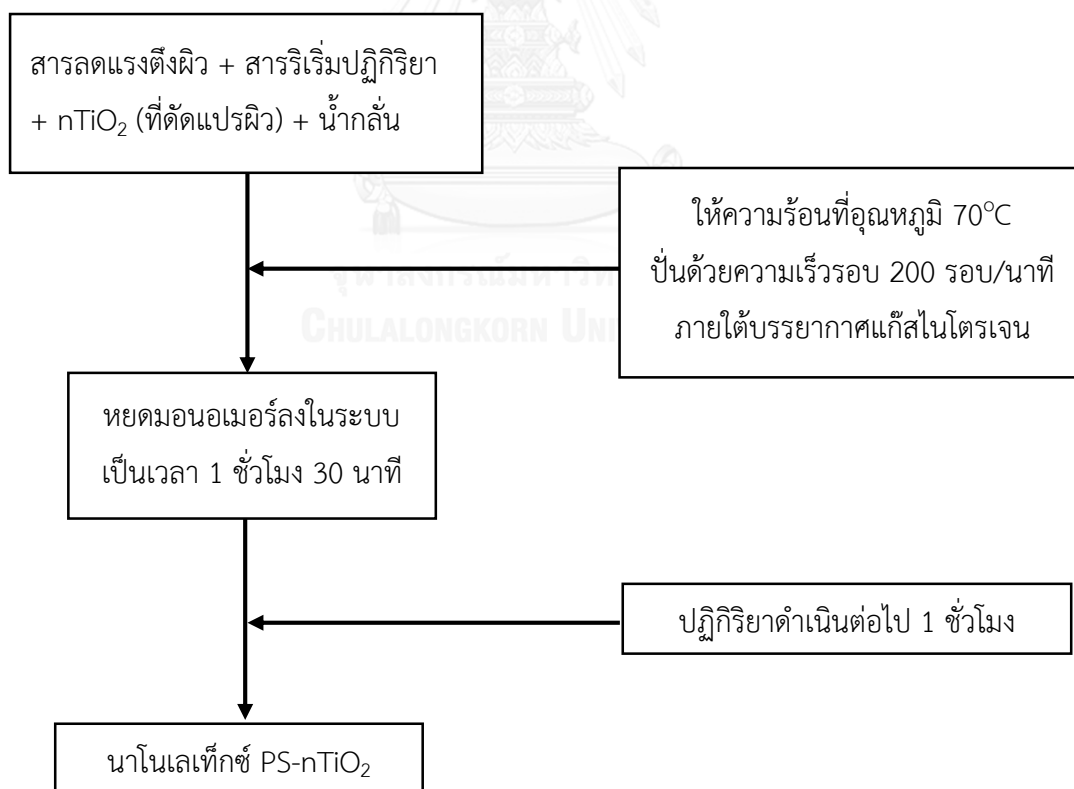
3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การดัดแปรผิวอนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยสารคู่ควบซิเลน

นำน้ำกลั่น 800 มิลลิลิตร มาปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้เท่ากับ 4.5 จากนั้นเติมสารคู่ควบซิเลน MPTMS (ความเข้มข้น 0.5%) ปริมาณ 4 กรัม โดยกวนส่วนผสมด้วยแท่งแม่เหล็กไปพร้อมๆ กัน เมื่อเติมสารคู่ควบซิเลนจนหมด ทำการกวนส่วนผสมต่อไปอีก 30 นาที จนได้สารละลายใสเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงค่อยๆ เติมนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 13.33 กรัม (ปริมาณของสารคู่ควบซิเลน : นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์เท่ากับ 0.3 : 1) ในส่วนผสม แล้วกวนต่ออีก 1 ชั่วโมง นำส่วนผสมที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.3.2 การสังเคราะห์นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน (PS-nTiO₂)

ขั้นตอนการสังเคราะห์นาโนเลทีกซ์ของ PS-nTiO₂ ผ่านกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 และปริมาณสารที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.1

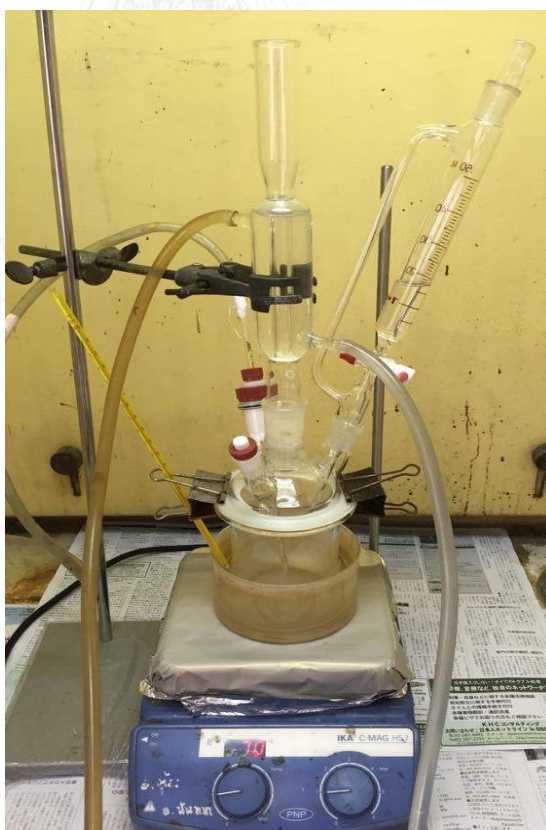


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมนาโนเลทีกซ์ของ PS-nTiO₂

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ PS-nTiO₂

SDS (g)	styrene monomer (ml)	AIBN (g)	modified nTiO ₂ (g)	Distilled water (ml)
8	22.5	0.12	0.4	60

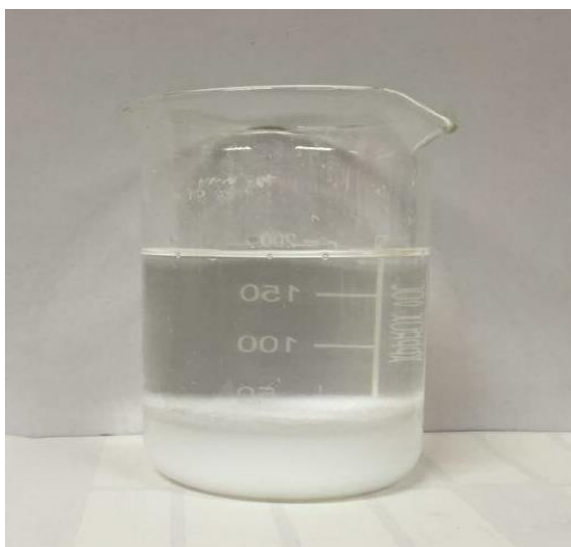
การเตรียมนาโนเลเท็กซ์ของ PS-nTiO₂ เริ่มจากนำสารลดแรงตึงผิว (SDS), สารริเริ่มปฏิกิริยา (AIBN), nTiO₂ ที่ดัดแปรผิวด้วยสารคู่ควบซิลเลน MPTMS (MPTMS-nTiO₂) และน้ำกลั่นใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้อัตราส่วนตามที่กำหนดในตารางที่ 3.1 จากนั้นให้ความร้อนพร้อมการกวนด้วยแท่งแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอที่อัตราเร็ว 200 รอบ/นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนโดยส่งแก๊สไนโตรเจนผ่านหลอดนำแก๊สเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ซึ่งต่อกับอุปกรณ์ควบแน่นแบบสองชั้นและควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องให้ความร้อน (รูปที่ 3.2) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 70 องศาเซลเซียส จึงเริ่มหยดมอนอเมอร์ (styrene monomer) ที่ละลายอย่างสม่ำเสมอด้วยกรวยหยดสารเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จนหมด จากนั้นให้คงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสต่ออีก 1 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงมาที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.2 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องควบแน่น และท่อ นำแก๊ส

3.3.3 การแยก (PS-nTiO₂) ออกจากนาโนเลเท็กซ์

นำนาโนเลเท็กซ์ของ PS-nTiO₂ ที่สังเคราะห์ได้จากข้อ 3.3.2 ไปทำให้ตกตะกอนด้วยเมทานอลปริมาณมากเกินไป (รูปที่ 3.3) ตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ตกตะกอนเป็นเวลาประมาณ 5-10 นาที แล้วกรองด้วยเครื่องกรองระบบสุญญากาศ และล้างสารลดแรงตึงผิวด้วยน้ำกลั่นและโอลิโกเมอร์ด้วยเมทานอลอย่างละ 1 ลิตร นำตะกอนของ PS-nTiO₂ ที่แยกได้ (รูปที่ 3.4) ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.3 การตกตะกอน PS-nTiO₂ ด้วยเมทานอลปริมาณมากเกินไป



รูปที่ 3.4 ตะกอนของ PS-nTiO₂ ก่อนนำไปอบ

3.3.4 การวิเคราะห์นาโนเลเท็กซ์ของ (PS-nTiO₂)

3.3.4.1 ร้อยละผลได้ (% yield) และร้อยละของแข็ง (%solid)

คำนวณหาร้อยละผลได้ของนาโนเลเท็กซ์ PS-nTiO₂ ที่สังเคราะห์ได้ จากสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละผลได้} = \frac{\text{ร้อยละของแข็ง}}{\text{ร้อยละของมอนอเมอร์}} \times 100$$

โดยร้อยละของแข็งหาได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักของ PS-nTiO}_2 \text{ (กรัม)}}{\text{น้ำหนักของนาโนเลเท็กซ์ (กรัม)}} \times 100$$

และร้อยละของมอนอเมอร์หาได้จากสมการที่ 3.3

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

หมายเหตุ :

1. น้ำหนักของ PS-nTiO₂ หาได้จากการตกตะกอนนาโนเลเท็กซ์ในข้อ 3.3.3
2. น้ำหนักของมอนอเมอร์หาได้จากความหนาแน่นของสไตรีนมอนอเมอร์ (0.904) × ปริมาตรของสไตรีนมอนอเมอร์
3. น้ำหนักของของผสมได้จากน้ำหนักของสไตรีนมอนอเมอร์ + SDS + AIBN + nTiO₂ + น้ำกลั่น

3.3.4.2 วิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของ (PS-nTiO₂)

นำนาโนเลเท็กซ์ของ PS-nTiO₂ ที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2 ไปวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคเฉลี่ย (average diameter) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (particle size analyzer) (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค

3.3.4.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาค nTiO₂, MPTMS-nTiO₂ และ PS-nTiO₂

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของอนุภาค nTiO₂, MPTMS-nTiO₂ และ PS-nTiO₂ ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

3.3.4.4 สัณฐานวิทยาของอนุภาค $n\text{TiO}_2$, และ $\text{PS-}n\text{TiO}_2$

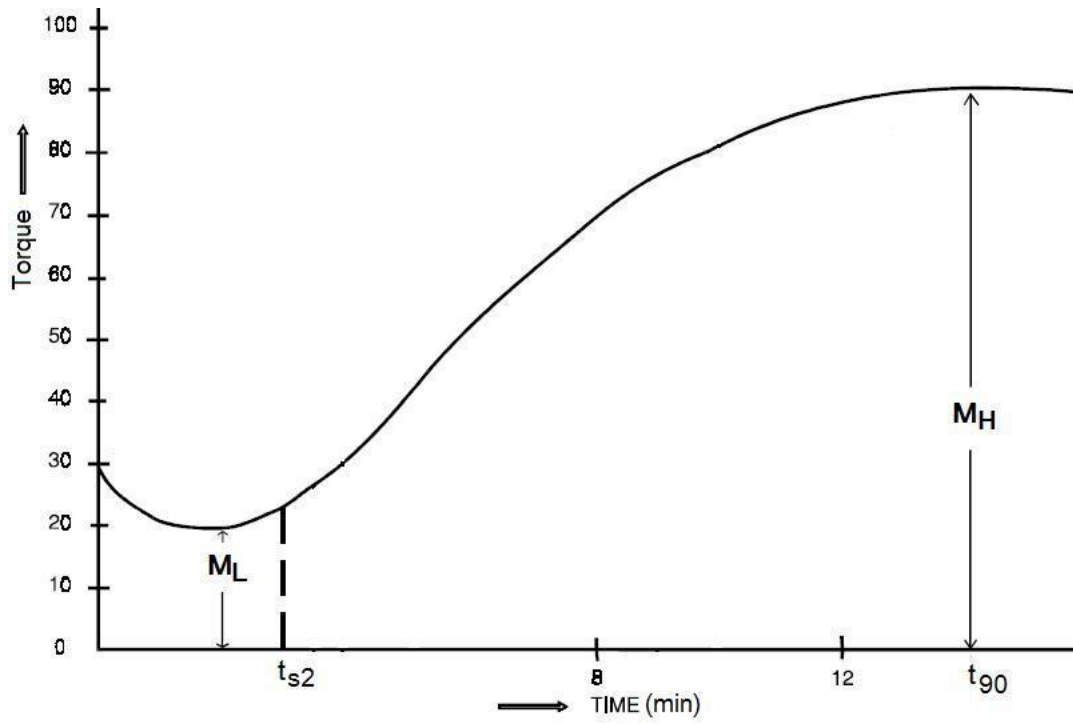
วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของอนุภาค $n\text{TiO}_2$, และ $\text{PS-}n\text{TiO}_2$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) (รูปที่ 3.7) ซึ่งดำเนินการที่ 200 kV โดยทำการเจือจางนาโนเลทเท็กซ์ด้วยน้ำกลั่นจนมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 0.1-0.5 โดยน้ำหนัก ก่อนวางตัวอย่างบนคอปเปอร์กริด แล้วแต้มด้วยยูรานิลแอซิเตต (uranyl acetate) ทับลงไป เพื่อให้พอลิเมอร์สามารถเกิดปฏิกิริยากับแสงอิเล็กตรอนได้



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

3.3.5 การวิเคราะห์พฤติกรรมการบ่มด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer)

การวิเคราะห์หาพฤติกรรมการบ่ม (cure characteristics) ได้แก่ เวลาสคอร์ช (scorch time, t_{s2}) เวลาการบ่ม (cure time, t_{90}) อัตราการบ่ม (cure rate index, CRI) ทอร์คต่ำสุด (minimum torque, M_L) ทอร์คสูงสุด (maximum torque, M_H) และผลต่างของทอร์ค ($M_H - M_L$, ΔT) ของชิ้นงาน จากกราฟที่ได้จากเครื่องรีโอมิเตอร์ (รูปที่ 3.8) โดยก่อนการทดสอบต้องนำยางผสมกับสารเคมีต่างๆ ตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.2 และตามขั้นตอนการเตรียมดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากนั้นจึงนำยางที่เตรียมได้ไปทดสอบหาพฤติกรรมการบ่มด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (รูปที่ 3.9) โดยใช้ชิ้นยางหนักไม่เกิน 5 กรัม ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ตาม ASTM D2084 หลังจากนั้นนำเวลาการบ่ม (t_{90}) ที่ได้จากการทดสอบไปใช้ในขั้นตอนการขึ้นรูปขึ้นทดสอบ



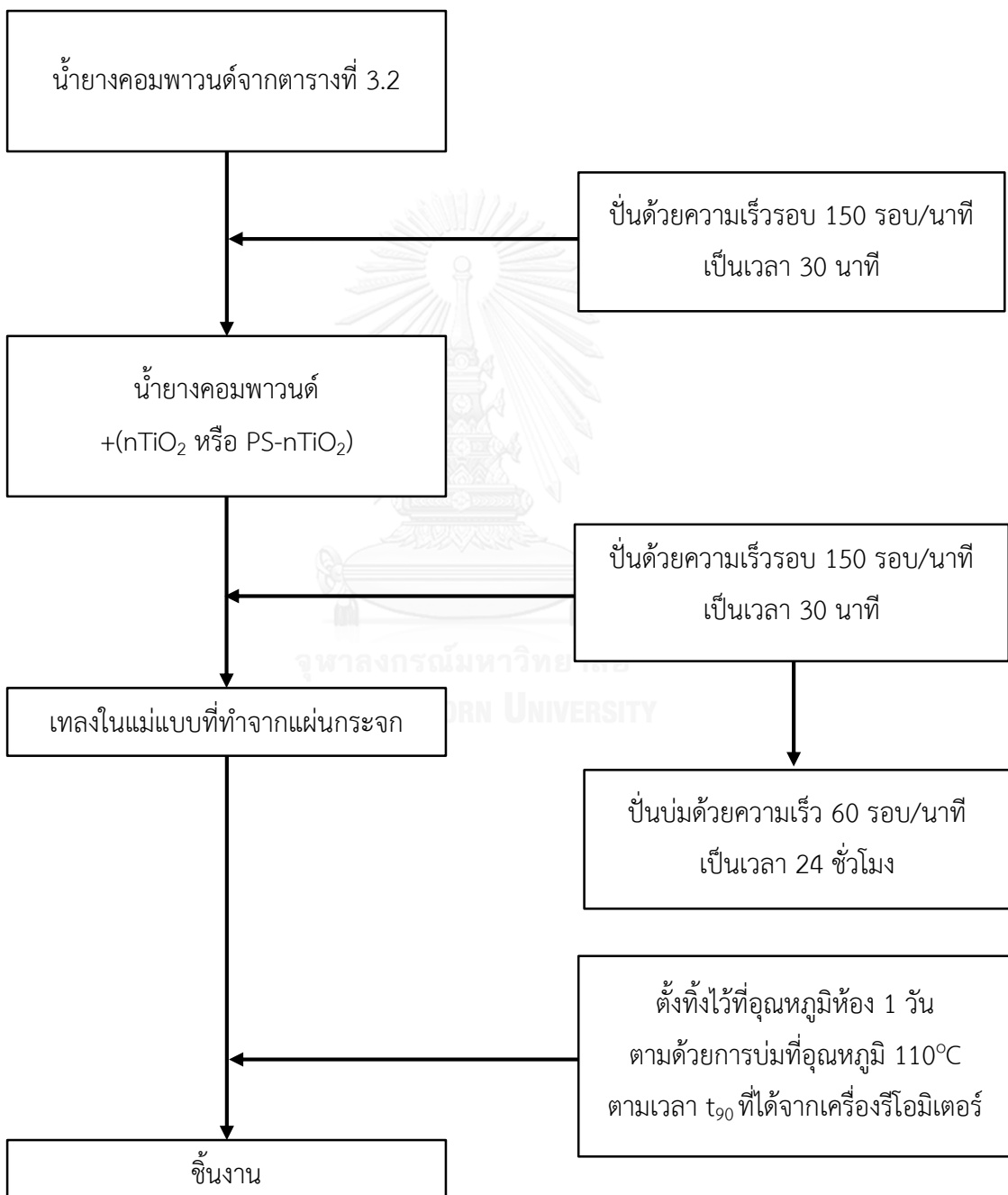
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากเครื่องรีโอมิเตอร์



รูปที่ 3.9 เครื่องรีโอมิเตอร์

3.3.6 การเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางผสม 80/20 ยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (80/20 NR/SBR) ด้วย $n\text{TiO}_2$ หรือ $\text{PS-}n\text{TiO}_2$

ขั้นตอนการเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางผสม (80/20 NR/SBR) และนาโนคอมพอสิตของยางผสม 80/20 NR/SBR เติมด้วย $n\text{TiO}_2$ ($n\text{TiO}_2$ -นาโนคอมพอสิต) หรือ $\text{PS-}n\text{TiO}_2$ ($\text{PS-}n\text{TiO}_2$ -นาโนคอมพอสิต) แสดงในรูปที่ 3.10 โดยปริมาณของสารที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการเตรียมนาโนคอมพอสิตของยางผสม (80/20 NR/SBR)

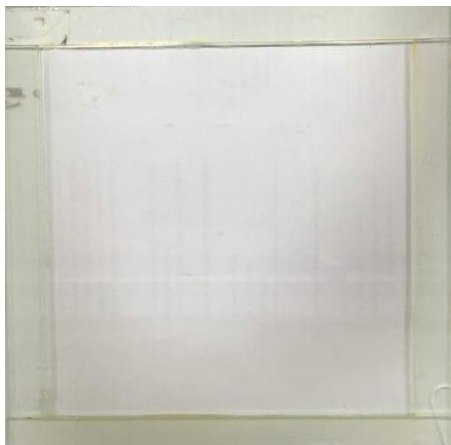
ตารางที่ 3.2 ปริมาณของนาโนคอมพอสิตของยางผสม 80/20 NR/SBR, nTiO₂-นาโนคอมพอสิต และ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต

สารเคมี	ปริมาณ (phr)
น้ำยางธรรมชาติ (ความเข้มข้น 60%)	80
น้ำยางสไตรีนบิวทาไดอีน (ความเข้มข้น 50.5%)	20
สารละลายโปแตสเซียมโอเลต (ความเข้มข้น 10%)	0.2
สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 10%)	0.5
สารดิสเพอร์สซัลเฟอร์ (ความเข้มข้น 50%)	1.5
สารดิสเพอร์สซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (ความเข้มข้น 50%)	1.0
สารดิสเพอร์สซิงค์วิงสเตย์แอลแอนติออกซิแดนต์ (ความเข้มข้น 50%)	1.0
สารดิสเพอร์สซิงค์ออกไซด์ (ความเข้มข้น 50%)	1.0
นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์	0, 3, 5, 7, 9
นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน	0, 3, 5, 7, 9

นำน้ำยางคอมพาวนด์ที่มีองค์ประกอบตามตารางที่ 3.2 มาปั่นกวนด้วยเครื่องกลเชิงกล (รูปที่ 3.11) ที่ความเร็วที่ 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงเติมสารตัวเติมของ nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ ในปริมาณต่างๆ กัน ที่แสดงในตารางที่ 3.2 ลงไปกวนอีกเป็นเวลา 30 นาที ตามด้วยการปั่นบ่มด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกลที่ความเร็ว 60 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเทนาโนคอมพอสิตเลเท็กซ์ลงในแม่แบบที่มีขนาด 20 x 20 x 0.15 เซนติเมตร (รูปที่ 3.12) และตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน แล้วทำการบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ตามเวลา t_{90} ที่ได้จากเครื่องรีโอมิเตอร์



รูปที่ 3.11 เครื่องปั่นกวนเชิงกล



รูปที่ 3.12 แม่แบบที่ทำจากกระจกขนาด 20 x 20 x 0.15 เซนติเมตร

3.3.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลของนาโนคอมพอสิต

3.3.7.1 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)

การทดสอบสมบัติด้านแรงดึงของชิ้นงานเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D412 ด้วยเครื่อง Instron testing machine รุ่น Instron 5843 (รูปที่ 3.13) เพื่อหาความทนแรงดึง (tensile strength, TS) การยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB) และมอดุลัสที่ความเครียด 300% (modulus at 300% strain, M300) โดยนำแผ่นยางที่เตรียมได้มาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (รูปที่ 3.14) ด้วยเครื่อง compress air sample cutter (รูปที่ 3.15) กำหนดภาวะในการทดสอบ คือ ระยะดึง (gauge length) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร ขนาดของ load cell เท่ากับ 1000 นิวตัน และทำการยืดดึงด้วยอัตราเร็วที่คงที่เท่ากับ 500 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.13 เครื่อง Instron testing machine



รูปที่ 3.14 ชิ้นงานทดสอบรูปดัมเบลล์ตามมาตรฐาน ASTM D412



รูปที่ 3.15 เครื่องตัดชิ้นงาน

3.3.7.2 สมบัติความทนแรงฉีกขาด (Tear strength)

การทดสอบความทนแรงฉีกขาดของชิ้นงานเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D624 (Die C) ด้วยเครื่อง Instron testing machine รุ่น Instron 5843 (รูปที่ 3.13) เพื่อหาความทนแรงฉีกขาด (tear strength) โดยนำแผ่นยางที่เตรียมได้มาตัดแบบ angle (รูปที่ 3.16) ด้วยเครื่อง compress air sample cutter ขนาดของ load cell เท่ากับ 1000 นิวตัน และทำการยึดตั้งด้วยอัตราเร็วที่คงที่เท่ากับ 500 มิลลิเมตร/นาที



รูปที่ 3.16 ชิ้นงานทดสอบแบบ angle ตามมาตรฐาน ASTM D624

3.3.7.3 สมบัติความแข็ง (Hardness)

การทดสอบความแข็งของชิ้นงานเป็นตามมาตรฐาน ASTM D2240 ด้วยเครื่อง Durometer hardness system Shore A (รูปที่ 3.17) ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบควรมีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร นอกจากนี้ ชิ้นงานต้องมีพื้นผิวเรียบและขนานกับพื้นผิวสัมผัสของเข็มที่กดลงบนชิ้นงาน



รูปที่ 3.17 เครื่องทดสอบ Durometer แบบ Shore A

3.3.8 การทดสอบสมบัติทางความร้อนของนาโนคอมพอสิต

3.3.8.1 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงานด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (รูปที่ 3.18) เพื่อหาเสถียรภาพทางความร้อนของชิ้นงาน โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงมวลเทียบกับอุณหภูมิ สมบัติที่หาได้จากผลการทดลอง คือ อุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature) และปริมาณเถ้าชาร์ที่เกิดขึ้น (% char) ของชิ้นงาน โดยชิ้นงานหนัก

ประมาณ 5-20 มิลลิกรัม ทำในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบระหว่าง 50-800 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (heating rate) เท่ากับ 20 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ไหลด้วยอัตราเร็ว (gas flow rate) 20 มิลลิตร/นาที



รูปที่ 3.18 เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน

3.3.9 การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของนาโนคอมพอสิต

การตรวจสอบสัณฐานวิทยาของชิ้นงาน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 3.19) โดยหักชิ้นงานภายใต้แก๊สไนโตรเจนเหลว และเคลือบผิวภาคตัดขวางด้วยทองเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับชิ้นงานและป้องกันการเกิดประจุอิเล็กตรอนบนผิวของชิ้นงาน โดยทำการตรวจสอบที่กัลังขยาย 500 เท่าและกัลังไฟฟ้า 15 kV



รูปที่ 3.19 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

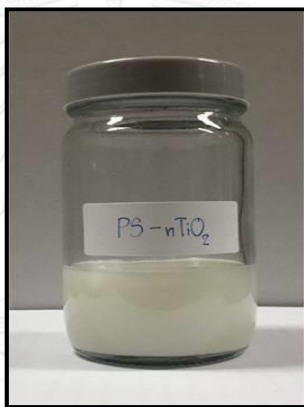
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

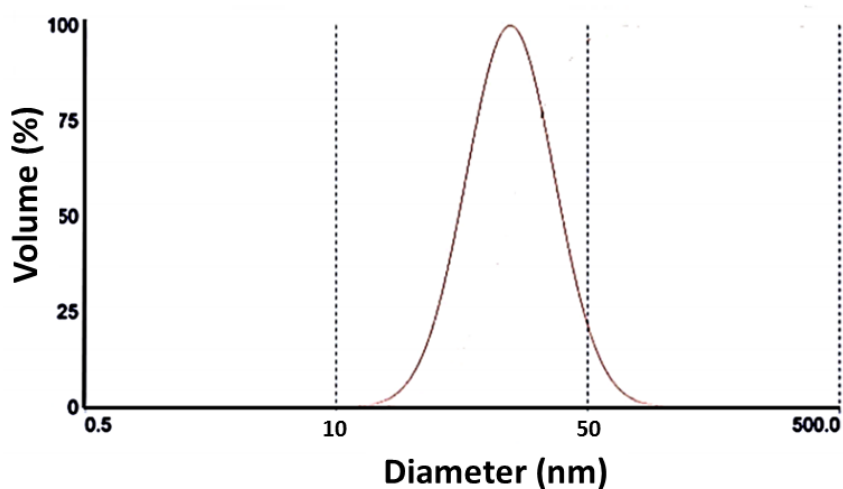
4.1 การสังเคราะห์นาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ห่อหุ้มด้วยพอลิสไตรีน (PS-nTiO₂)

4.1.1 ร้อยละผลได้ ร้อยละของแข็ง และขนาดอนุภาคของ PS-nTiO₂

นาโนเลเท็กซ์ของ PS-nTiO₂ ที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ 'อิน ซิทู' ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชันมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยร้อยละผลได้ (%yield) และร้อยละของแข็ง (%solid) มีค่าเท่ากับ 95.9% และ 22.3% ตามลำดับ และขนาดอนุภาคเฉลี่ย (average particle size) มีค่าเท่ากับ 42.2 นาโนเมตร และมีการกระจายขนาดอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 4.2



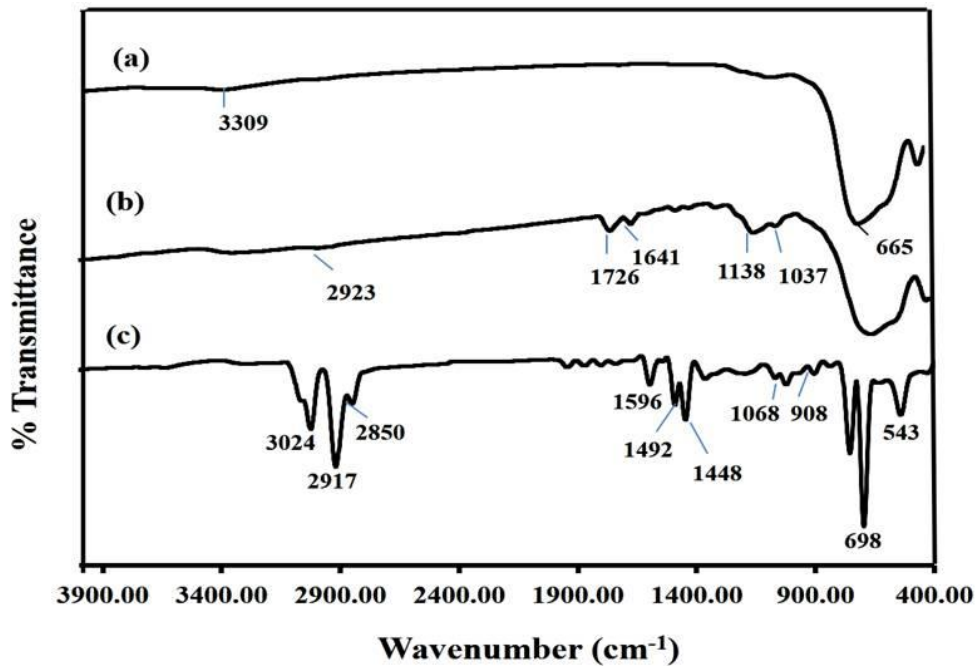
รูปที่ 4.1 นาโนเลเท็กซ์ของ PS-nTiO₂



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคของ PS-nTiO₂

4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ nTiO₂, MPTMS-nTiO₂ และ PS-nTiO₂

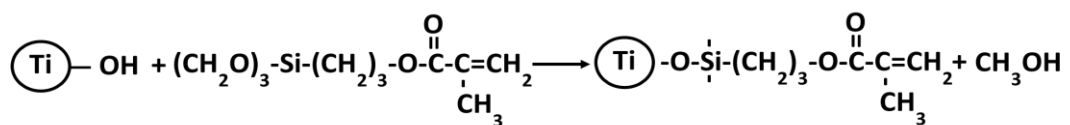
รูปที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของอนุภาค nTiO₂, MPTMS-nTiO₂ และ PS-nTiO₂ ด้วยเทคนิค FT-IR และตารางที่ 4.1 แสดงค่าเลขคลื่น (wave number) ของหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของ (a) nTiO₂, (b) MPTMS-nTiO₂ และ (c) PS-nTiO₂

จากรูปที่ 4.3 (a) แสดง FT-IR สเปกตรัมของ nTiO₂ ซึ่งแสดงพีกเอกลักษณ์ของ Ti-O-Ti ที่เลขคลื่น 665 cm⁻¹ (ระหว่าง 500-800cm⁻¹) และพีกของหมู่ -OH บนผิวของ nTiO₂ ที่เลขคลื่น 3309 cm⁻¹ [33]

จากรูปที่ 4.3 (b) แสดง FT-IR สเปกตรัมของ MPTMS-nTiO₂ ซึ่งแสดงพีกเอกลักษณ์ของ C-H, C=O, C=C และ Si-O ที่เลขคลื่น 2923, 1726, 1641 และ 1138 cm⁻¹ ตามลำดับ นอกจากนี้ยังปรากฏพีกของพันธะ Ti-O-Si ที่เลขคลื่น 1037 cm⁻¹ [33] ซึ่งเป็นการยืนยันการยึดติดระหว่างหมู่เมทอกซีใน MPTMS กับหมู่ -OH บนผิวของอนุภาค nTiO₂ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จึงส่งผลให้มีหมู่ไวนิล (หมู่เมทาคริเลต) ยึดติดกับพื้นผิวของ nTiO₂ ด้วยพันธะเคมี



รูปที่ 4.4 การดัดแปรพื้นผิว nTiO₂ ด้วย MPTMS

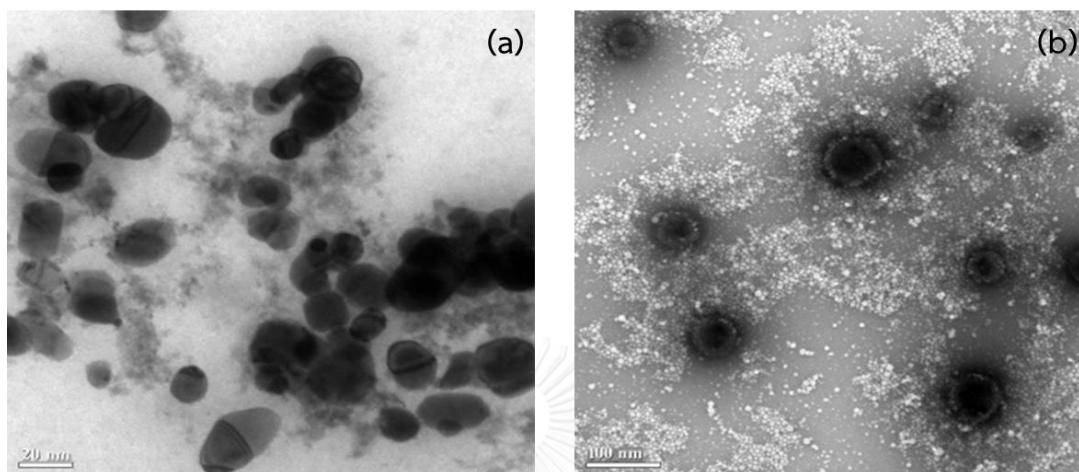
จากรูปที่ 4.3 (c) แสดง FT-IR สเปกตรัมของ PS-nTiO₂ ซึ่งแสดงพีกเอกลักษณ์ของ C-H arom, -CH₃, -CH₂ และ C=C arom ที่เลขคลื่น 3024, 2917, 2850 และ 1596 cm⁻¹ ตามลำดับ และพีกของ -C₆H₅ ที่เลขคลื่น 1492 และ 1448 cm⁻¹, พีกของ -CH= aromatic in plane ที่เลขคลื่น 908 และ 698 cm⁻¹ และพีกของ Ti-O-Si และ Ti-O-Ti ที่เลขคลื่น 1068 และ 543 cm⁻¹ ซึ่งเป็นการยืนยันการเกาะติดของพอลิस्टาไร์บนพื้นผิวอนุภาคของ nTiO₂ ที่มีสารคู่ควบ MPTMS เป็นสารเชื่อมประสาน [33]

ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันของอนุภาค nTiO₂, MPTMS-nTiO₂ และ PS-nTiO₂

Wave number (cm ⁻¹)	nTiO ₂	MPTMS-nTiO ₂	PS-nTiO ₂
3309	-OH		
665	Ti-O-Ti		
2923		-CH ₂	
1726		C=O	
1641		C=C	
1138		Si-O	
1037		Ti-O-Si	
3024			-CH aromatic
2917			-CH ₃
2850			-CH ₂
1596			C=C aromatic
1492, 1448			-C ₆ H ₅
908, 698			-CH= aromatic in plane
1068			Ti-O-Si
543			Ti-O-Ti

4.1.3 สัณฐานวิทยาของอนุภาค $n\text{TiO}_2$ และ $\text{PS-}n\text{TiO}_2$

รูปที่ 4.5 แสดงสัณฐานวิทยาของอนุภาค $n\text{TiO}_2$ และ $\text{PS-}n\text{TiO}_2$ ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน



รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของอนุภาค (a) $n\text{TiO}_2$ และ (b) $\text{PS-}n\text{TiO}_2$

จากรูปที่ 4.5 (a) แสดงให้เห็นว่าอนุภาค $n\text{TiO}_2$ มีลักษณะเป็นทรงกลมที่เกาะกลุ่มกัน (agglomerate) เนื่องจากอนุภาค $n\text{TiO}_2$ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) สูงมาก อีกทั้งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH group) ซึ่งเป็นหมู่มีขั้วบนผิวของอนุภาค จึงสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้ ส่วนอนุภาค $\text{PS-}n\text{TiO}_2$ (รูปที่ 4.5 (b)) มีลักษณะเป็น 'คอร์-เชลล์' (core-shell) โดยมีอนุภาค $n\text{TiO}_2$ เป็นแก่น (core) และถูกล้อมรอบด้วยเปลือก (shell) ของพอลิสไตรีนบางๆ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสัณฐานวิทยาของอนุภาค $n\text{TiO}_2$ แสดงให้เห็นว่าการห่อหุ้มอนุภาค $n\text{TiO}_2$ ด้วยพอลิสไตรีนสามารถลดปัญหาการเกาะกลุ่มกันเองของอนุภาค $n\text{TiO}_2$ ได้

4.2 การตรวจสอบพฤติกรรมการบ่ม

ผลการตรวจสอบพฤติกรรมการบ่มของยางผสม 80/20 ยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (80/20 NR/SBR) และนาโนคอมพอสิตของยางผสม 80/20 NR/SBR ที่เติมด้วย $n\text{TiO}_2$ หรือ $\text{PS-}n\text{TiO}_2$ ปริมาณต่างๆ กัน ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และจากตาราง พบว่า นาโนคอมพอสิตที่เติม $n\text{TiO}_2$ หรือ $\text{PS-}n\text{TiO}_2$ ทุกอัตราส่วนมีเวลาที่ยางเริ่มบ่ม (t_{s2}) และเวลาการบ่ม (t_{90}) มากกว่ายางผสม 80/20 NR/SBR โดย t_{s2} และ t_{90} ของ $n\text{TiO}_2$ -นาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ $n\text{TiO}_2$ ที่เพิ่มขึ้นไปจนถึง 5 phr เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของ $n\text{TiO}_2$ ได้ดูดซับสารเร่งวัลคาไนซ์ (accelerator) ที่มีความเป็นต่างไว ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการเป็น

สารเร่งวัลคาไนซ์ลดลง และเมื่อปริมาณ nTiO₂ เพิ่มขึ้นเป็น 7 และ 9 phr กลับทำให้ทั้ง t_{s2} และ t₉₀ ลดลง เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของ nTiO₂ จึงทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับสารเร่งวัลคาไนซ์ลดลง นอกจากนี้ t_{s2} และ t₉₀ ของ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของ PS-nTiO₂ เท่ากับ 3 phr และลดลงเมื่อปริมาณ PS-nTiO₂ เพิ่มขึ้นเป็น 5, 7 และ 9 phr อย่างไรก็ตาม t_{s2} และ t₉₀ ของ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีค่าต่ำกว่าของ nTiO₂-นาโนคอมพอสิต เมื่อใส่สารตัวเติมปริมาณเท่าๆ กัน ซึ่งเป็นผลจากพอลิไทรินที่ห่อหุ้ม nTiO₂ ไปขัดขวางหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของ nTiO₂ ทำให้ดูดซับสารเร่งวัลคาไนซ์ลดลง ซึ่งทำให้ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิตใช้เวลาในการบ่มเร็วกว่า nTiO₂-นาโนคอมพอสิต

นอกจากนี้ ดรรชนีอัตราการบ่ม (cure rate index, CRI) ของยางสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 และผลที่ได้จากการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

$$CRI = 100/(t_{90}-t_{s2}) \quad (4.1)$$

จากผลการทดสอบ พบว่า นาโนคอมพอสิตที่เติม PS-nTiO₂ หรือ nTiO₂ ทุกอัตราส่วน มีค่า CRI ต่ำกว่ายางผสม NR/SBR เนื่องจาก PS-nTiO₂ และ nTiO₂ ได้ดูดซับสารเร่งวัลคาไนซ์ แต่เมื่อปริมาณ PS-nTiO₂ และ nTiO₂ ในนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้นเป็น 5 และ 7 phr กลับทำให้ CRI มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกาะกลุ่มของอนุภาค PS-nTiO₂ และ nTiO₂

สำหรับค่าทอร์คต่ำสุด (M_L) ที่อ่านได้จากรีโอกราฟ (rheograph) สามารถบอกถึงความหนืด (viscosity) และ/หรืออีลาสติคโมดูลัสของสารประกอบที่ยังไม่ผ่านการบ่ม ขณะที่ค่าทอร์คสูงสุด (M_H) มีความสัมพันธ์กับความแข็ง และ/หรือโมดูลัสของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแล้ว ส่วนค่าความต่างของทอร์ค (M_H-M_L, Δ torque) ใช้ในการวัดโมดูลัสแรงเฉือนพลวัต (dynamic shear modulus) และมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (crosslinking density) ของสารประกอบยางในทางอ้อม ซึ่งจากตารางที่ 4.2 พบว่า ทั้ง M_L, M_H และ M_H-M_L ของนาโนคอมพอสิตที่เติม PS-nTiO₂ และ nTiO₂ มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใส่สารตัวเติมระดับนาโนเมตรมีผลทำให้โมดูลัสและความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับยางผสม 80/20 NR/SBR

ตารางที่ 4.2 พฤติกรรมการบ่มของยางผสม 80/20 NR/SBR, nTiO₂-นาโนคอมพอสิต และ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต

Sample	t _{s2} (min)	t ₉₀ (min)	CRI (%min ⁻¹)	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	M _H -M _L (dN.m)
80/20 NR/SBR	1.12	23.63	4.44	0.91	1.83	0.92
80/20 NR/SBR_3 nTiO ₂	1.22	26.78	3.91	1.65	2.58	0.93
80/20 NR/SBR_5 nTiO ₂	1.52	27.15	3.90	1.55	2.48	0.93
80/20 NR/SBR_7 nTiO ₂	1.50	26.33	4.03	0.82	1.83	1.01
80/20 NR/SBR_9 nTiO ₂	1.25	25.53	4.12	1.16	2.08	0.92
80/20 NR/SBR_3 PS-nTiO ₂	1.20	26.54	3.95	1.37	2.31	0.94
80/20 NR/SBR_5 PS-nTiO ₂	1.16	26.02	4.02	1.31	2.27	0.96
80/20 NR/SBR_7 PS-nTiO ₂	1.15	25.87	4.05	1.36	2.39	1.03
80/20 NR/SBR_9 PS-nTiO ₂	1.15	25.27	4.15	0.96	1.95	0.99



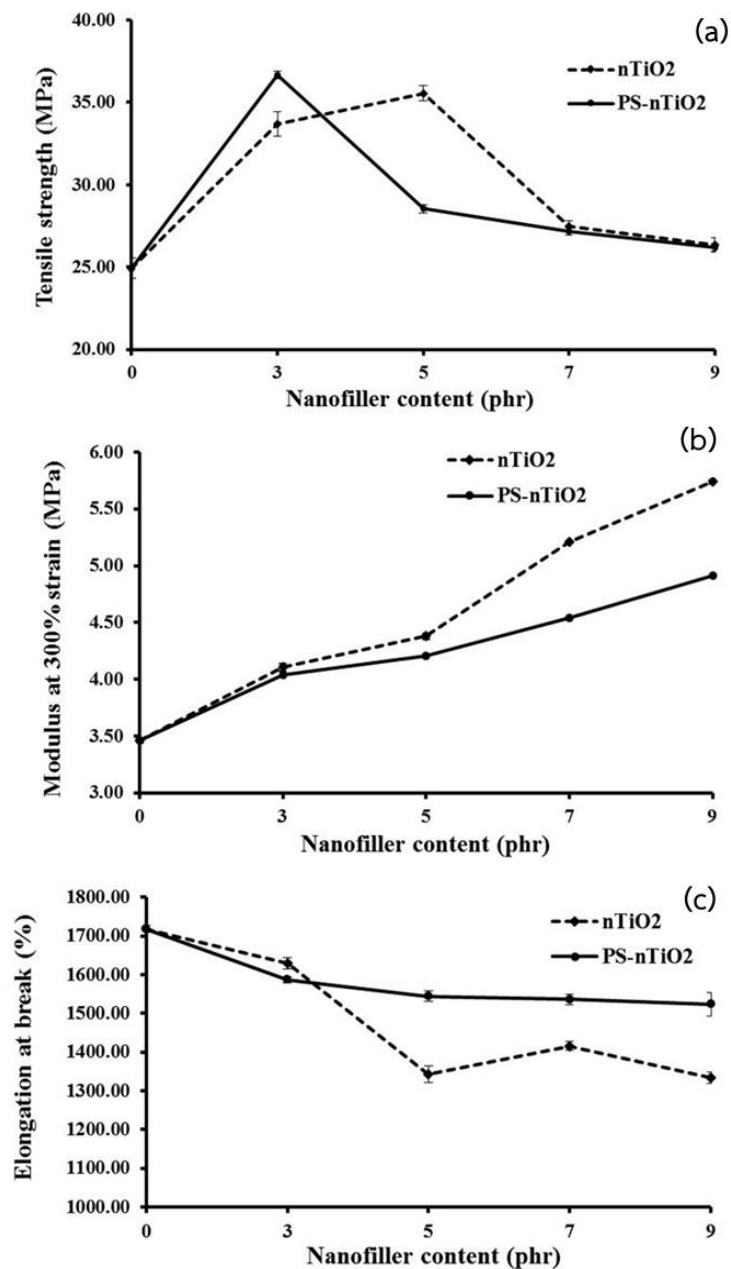
4.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

4.3.1 สมบัติด้านแรงดึง (Tensile properties)

ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง ซึ่งได้แก่ ความทนแรงดึง (tensile strength, TS) โมดูลัสที่ความเครียด 300% (modulus at 300% strain, M300) และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break, EB) ของชิ้นทดสอบ

ตารางที่ 4.3 สมบัติด้านแรงดึงของชิ้นทดสอบ

Sample	TS (MPa)	M300 (MPa)	EB (%)
80/20 NR/SBR	24.9 ± 0.6	3.5 ± 0.02	1717.6 ± 9.4
80/20 NR/SBR_3 nTiO ₂	33.7 ± 0.7	4.1 ± 0.04	1629.4 ± 14.6
80/20 NR/SBR_5 nTiO ₂	35.5 ± 0.5	4.4 ± 0.02	1342.8 ± 22.5
80/20 NR/SBR_7 nTiO ₂	27.5 ± 0.3	5.2 ± 0.01	1416.5 ± 12.0
80/20 NR/SBR_9 nTiO ₂	26.3 ± 0.4	5.7 ± 0.02	1333.2 ± 14.2
80/20 NR/SBR_3 PS-nTiO ₂	36.7 ± 0.2	4.0 ± 0.03	1586.4 ± 8.4
80/20 NR/SBR_5 PS-nTiO ₂	28.5 ± 0.3	4.2 ± 0.01	1544.6 ± 12.9
80/20 NR/SBR_7 PS-nTiO ₂	27.2 ± 0.2	4.5 ± 0.02	1535.9 ± 13.2
80/20 NR/SBR_9 PS-nTiO ₂	26.2 ± 0.2	4.9 ± 0.02	1523.6 ± 31.1



รูปที่ 4.6 สมบัติ: (a) ความทนแรงดึง, (b) โมดูลัสที่ความเครียด 300% และ (c) การยืดตัว ณ จุดขาด

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 (a) พบว่า ความทนแรงดึงของยางผสม 80/20 NR/SBR มีค่าเท่ากับ 24.9 MPa ซึ่งเมื่อเติม nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ มีผลทำให้ความทนแรงดึงของนาโนคอมพอสิตมีค่ามากกว่ายางผสมล้วน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 26.2–36.7 MPa การที่ความทนแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงประสิทธิภาพการเสริมแรงของอนุภาคระดับนาโนเมตร อย่างไรก็ตาม PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีความทนแรงดึงสูงที่สุดเมื่อใส่ PS-nTiO₂ ปริมาณ 3 phr โดยมีค่าเท่ากับ

36.7 MPa และมีค่ามากกว่าความทนแรงดึงของยางผสม 80/20 NR/SBR ประมาณ 47.4% ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวและการมีแรงยึดเกาะที่ดีระหว่างพอลิस्टาไทรินที่กราฟต์อยู่บนผิวของนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์กับยางสไตรีนบิวทาไดอินในยางผสม รวมทั้งมีการถ่ายโอนความเค้น (stress transfer) ที่ดีระหว่างผิวของ PS-nTiO₂ และยางสไตรีนบิวทาไดอิน ทั้งนี้คาดว่าอนุภาคของ PS-nTiO₂ ส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในเฟสของยางสไตรีนบิวทาไดอิน อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณของ PS-nTiO₂ เพิ่มขึ้นเป็น 5, 7 และ 9 phr ความทนแรงดึงของ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีค่าลดลงตามปริมาณ PS-nTiO₂ ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจาก PS-nTiO₂ ที่มากเกินไปจะสะสมอยู่บริเวณขอบเฟส (phase boundary) ระหว่างยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอิน ซึ่งทำให้นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้มีโครงสร้างร่างแหที่ไม่สมบูรณ์ โดยการเชื่อมขวางบริเวณขอบเฟสเกิดได้ไม่ดี หรืออาจเกาะกลุ่มกันอยู่ในเฟสของยางสไตรีนบิวทาไดอิน จึงมีผลให้ค่าความทนแรงดึงของ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่อพิจารณาความทนแรงดึงของ nTiO₂-นาโนคอมพอสิต พบว่า ความทนแรงดึงมีค่าต่ำกว่า PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต เมื่อใส่สารตัวเติมในปริมาณเท่ากัน (3 phr) ทั้งนี้อาจเนื่องจาก nTiO₂ กระจายตัวในเมทริกซ์ของยางได้ไม่ดีเท่า PS-nTiO₂ อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ nTiO₂ เพิ่มขึ้นเป็น 5 phr ทำให้ nTiO₂ กระจายตัวได้ดีขึ้น จึงส่งผลให้ความทนแรงดึงของ nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีค่าเพิ่มขึ้นต่อไปอีก และมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 35.5 MPa โดยมีค่ามากกว่ายางผสม 80/20 NR/SBR ประมาณ 42.6% จากนั้นความทนแรงดึงของ nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ nTiO₂ ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเกาะกลุ่มของอนุภาค nTiO₂ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และยังมีค่าเข้าใกล้ความทนแรงดึงของ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต เมื่อใส่สารตัวเติมในปริมาณเท่ากัน

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 (b) พบว่า มอดูลัสที่ความเครียด 300% ของยางผสม 80/20 NR/SBR มีค่าประมาณ 3.5 MPa ซึ่งเมื่อเติม nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ มีผลทำให้มอดูลัสที่ความเครียด 300% มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณสารตัวเติมแต่ละชนิดที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 4.1–5.7 MPa ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมมีความแข็งดึง (stiffness) มากกว่ายาง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยาง และลดความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางอีกด้วย อย่างไรก็ตาม มอดูลัสที่ความเครียด 300% ของ nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีค่ามากกว่าของ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต เมื่อใส่สารตัวเติมในลำดับเดียวกัน และเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น พบว่า มอดูลัสที่ความเครียด 300% ของ nTiO₂-นาโนคอมพอสิตจะแตกต่างจาก PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิตมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะอนุภาค nTiO₂ ที่เกาะกลุ่มกันมีความแข็งดึงมากกว่าอนุภาคของ PS-nTiO₂ นอกจากนี้ พอลิस्टาไทรินที่ห่อหุ้ม nTiO₂ ทำให้เกิดปริมาตรอิสระ (free volume) ภายใน

เมทริกซ์ของยางมากกว่า ซึ่งส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางสามารถเคลื่อนไหวได้มากขึ้น ดังนั้น PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต จึงมีมอดูลัสที่ความเครียด 300% ต่ำกว่า

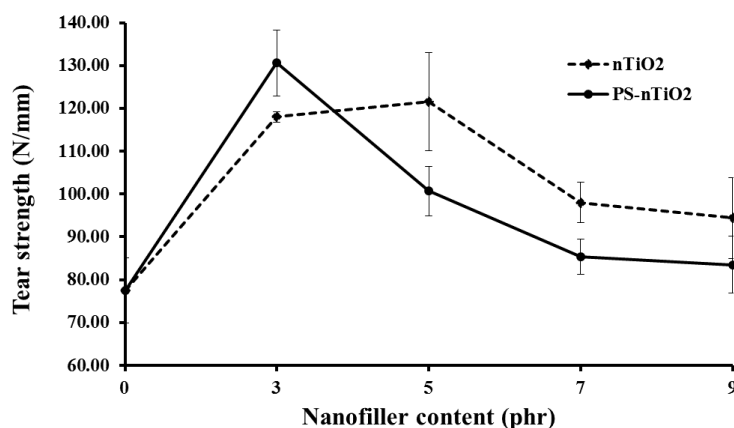
จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 (c) พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาดของยางผสม 80/20 NR/SBR มีค่าประมาณ 1717.6% ซึ่งเมื่อเติม nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ มีผลทำให้การยืดตัว ณ จุดขาดของยางผสมมีค่าลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1333.2–1629.4% ทั้งนี้เนื่องจากสารตัวเติมมีความแข็งดึง จึงขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยาง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ พบว่า การยืดตัว ณ จุดขาด ของ nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีการลดลงมากกว่าของ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต โดยเฉพาะเมื่อใส่สารตัวเติมในปริมาณมาก ทั้งนี้เป็นเพราะอนุภาค nTiO₂ ที่เกาะกลุ่มกันขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยางได้มากกว่า ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตาม นาโนคอมพอสิตที่เตรียมได้ยังมีการยืดตัว ณ จุดขาดที่ค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับยางผสม 80/20 NR/SBR

4.3.2 สมบัติความทนแรงฉีกขาด (Tear strength)

ตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความทนแรงฉีกขาด (tear strength) ของยางผสม 80/20 NR/SBR, nTiO₂-นาโนคอมพอสิต และ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.4 ความทนแรงฉีกขาดของชิ้นทดสอบ

Sample	Tear strength (N/mm)
80/20 NR/SBR	77.5 ± 7.5
80/20 NR/SBR_3 nTiO ₂	118.0 ± 1.2
80/20 NR/SBR_5 nTiO ₂	121.6 ± 11.5
80/20 NR/SBR_7 nTiO ₂	98.0 ± 4.8
80/20 NR/SBR_9 nTiO ₂	94.4 ± 6.8
80/20 NR/SBR_3 PS-nTiO ₂	130.6 ± 7.7
80/20 NR/SBR_5 PS-nTiO ₂	100.7 ± 5.8
80/20 NR/SBR_7 PS-nTiO ₂	85.3 ± 4.1
80/20 NR/SBR_9 PS-nTiO ₂	83.5 ± 6.6



รูปที่ 4.7 ความทนแรงฉีกขาดของซินทสอบ

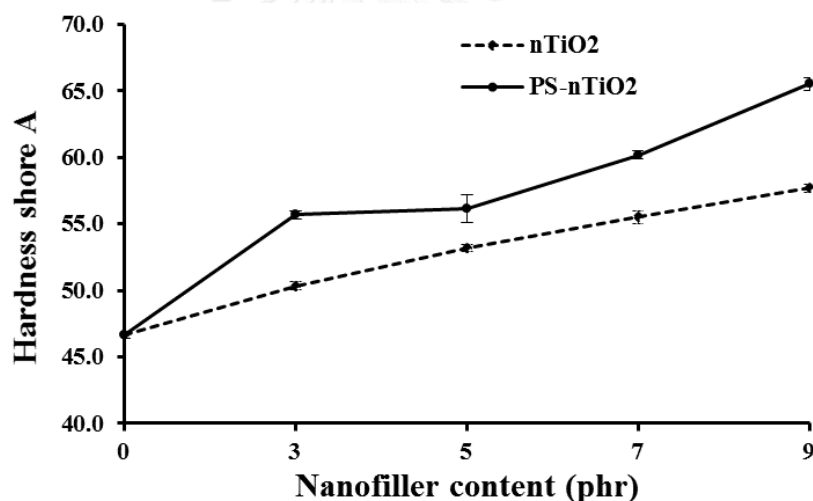
จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 พบว่า ความทนแรงฉีกขาดของยางผสม NR/SBR มีค่าเท่ากับ 77.5 N/mm ซึ่งเมื่อเติม nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ มีผลทำให้ความทนแรงฉีกขาดของนาโนคอมพอสิตมีค่ามากกว่ายางผสม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 83.5–130.6 N/mm ซึ่งการเพิ่มความทนแรงฉีกขาดเป็นไปในทำนองเดียวกับการเพิ่มความทนแรงดึงที่ได้กล่าวมาแล้ว โดย PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีความทนแรงฉีกขาดสูงที่สุดเมื่อใส่ PS-nTiO₂ ปริมาณ 3 phr โดยมีค่าเท่ากับ 130.6 N/mm และมีค่ามากกว่าความทนแรงฉีกขาดของยางผสมประมาณ 68.5% อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ PS-nTiO₂ เพิ่มขึ้นเป็น 5, 7 และ 9 phr ความทนแรงฉีกขาดของ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีค่าลดลงตามปริมาณ PS-nTiO₂ ที่เพิ่มขึ้น โดยมีเหตุผลเดียวกับการทดสอบความทนแรงดึงที่ได้กล่าวมาแล้ว และเมื่อพิจารณาความทนแรงฉีกขาดของ nTiO₂-นาโนคอมพอสิต พบว่า ความทนแรงฉีกขาดมีค่าที่ต่ำกว่า PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต เมื่อใส่สารตัวเติมในปริมาณเท่ากัน (3 phr) และเมื่อปริมาณ nTiO₂ เพิ่มขึ้นเป็น 5 phr ความทนแรงฉีกขาดของ nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 121.6 N/mm โดยมีค่ามากกว่ายางผสมประมาณ 56.9% จากนั้นความทนแรงฉีกขาดของ nTiO₂-นาโนคอมพอสิต มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ nTiO₂ ที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลเดียวกับผลการทดสอบความทนแรงดึงที่ได้กล่าวมาแล้ว

4.3.3 สมบัติความแข็ง (Hardness)

รูปที่ 4.8 และตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบความแข็งของยางผสม 80/20 NR/SBR, nTiO₂-นาโนคอมพอสิต และ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต

ตารางที่ 4.5 ความแข็งของชิ้นทดสอบ

Sample	Hardness (shore A)
80/20 NR/SBR	46.7 ± 0.3
80/20 NR/SBR_3 nTiO ₂	50.3 ± 0.3
80/20 NR/SBR_5 nTiO ₂	53.2 ± 0.3
80/20 NR/SBR_7 nTiO ₂	55.5 ± 0.5
80/20 NR/SBR_9 nTiO ₂	57.7 ± 0.3
80/20 NR/SBR_3 PS-nTiO ₂	55.7 ± 0.3
80/20 NR/SBR_5 PS-nTiO ₂	56.2 ± 1.0
80/20 NR/SBR_7 PS-nTiO ₂	60.2 ± 0.3
80/20 NR/SBR_9 PS-nTiO ₂	65.5 ± 0.5



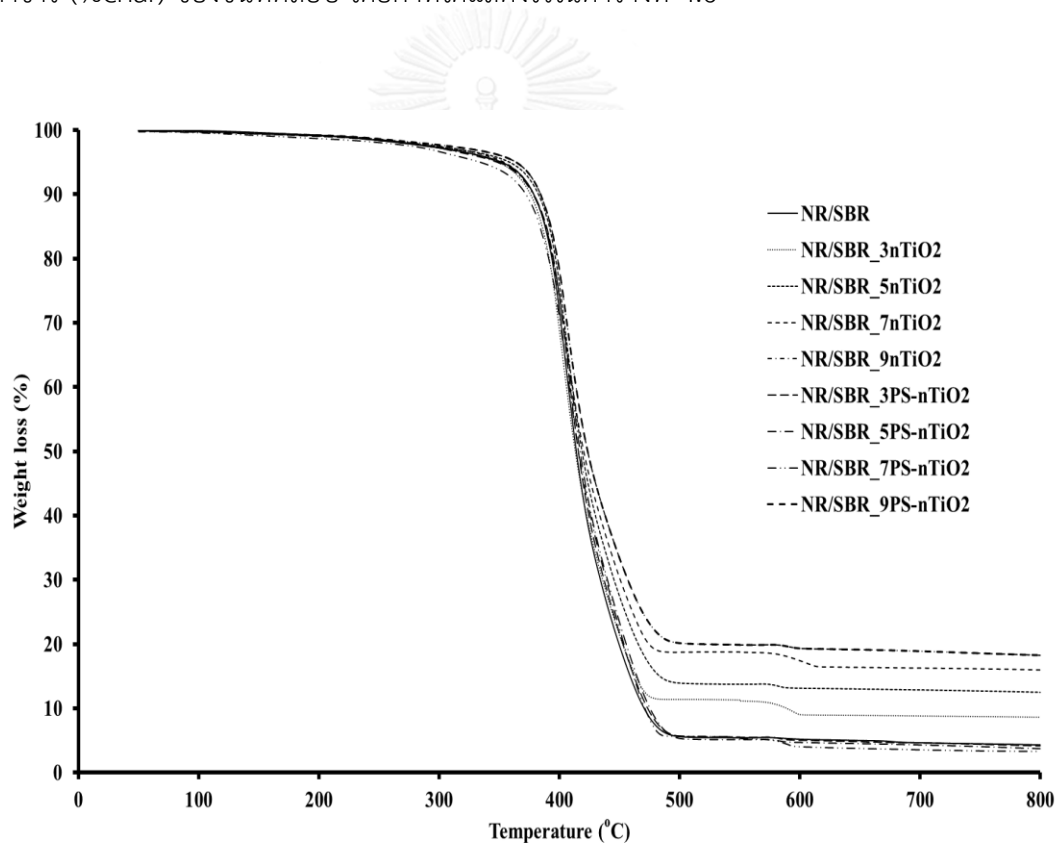
รูปที่ 4.8 ความแข็งของยางที่บ่มแล้ว

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 พบว่า ความแข็งของยางผสม 80/20 NR/SBR มีค่าประมาณ 46.7 Shore A ซึ่งเมื่อเติม nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ มีผลทำให้ความแข็งของชิ้นทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณของสารตัวเติมแต่ละชนิดที่ใส่เข้าไป และมีค่าอยู่ในช่วง 50.3–65.5 Shore A ซึ่งความแข็งของ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอลิทีตสูงที่สุดเมื่อใส่ PS-nTiO₂ ปริมาณ 9 phr มีค่าเท่ากับ 65.5 Shore A และมีค่ามากกว่าความแข็งของยางผสมประมาณ 23.6% และความแข็งของ nTiO₂-นาโนคอมพอลิทีตสูงที่สุดเมื่อใส่ nTiO₂ ปริมาณ 9 phr มีค่าเท่ากับ 57.7 Shore A และมีค่ามากกว่าความแข็งของยางผสมประมาณ 23.6% ทั้งนี้เนื่องจากความแข็งของสารตัวเติมส่งผลให้

พื้นผิวของยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ พบว่า การเติม PS-nTiO₂ ทำให้นาโนคอมพอสิตมีความแข็งแรงมากกว่าการเติม nTiO₂ ในลำดับเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากพอลิสไตรีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงบางส่วนเคลื่อนมาอยู่ที่พื้นผิวของชั้นทดสอบ จึงส่งผลให้ชั้นทดสอบมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

4.4 เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability)

รูปที่ 4.9 แสดง TGA เทอร์โมแกรมของยางผสม 80/20 NR/SBR, nTiO₂-นาโนคอมพอสิต และ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อน (ทีจีเอ) (จาก 50–800 องศาเซลเซียส) เพื่อวิเคราะห์หาเสถียรภาพทางความร้อนของชั้นทดสอบจากอุณหภูมิเริ่มสลายตัว (T_{onset}), อุณหภูมิสลายตัว 50% ($T_{50\%}$), อุณหภูมิสลายตัวสุดท้าย ($T_{end\ set}$) และเปอร์เซ็นต์ถ่าน (%char) ของชั้นทดสอบ โดยค่าที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.9 TGA เทอร์โมแกรมของชั้นทดสอบ

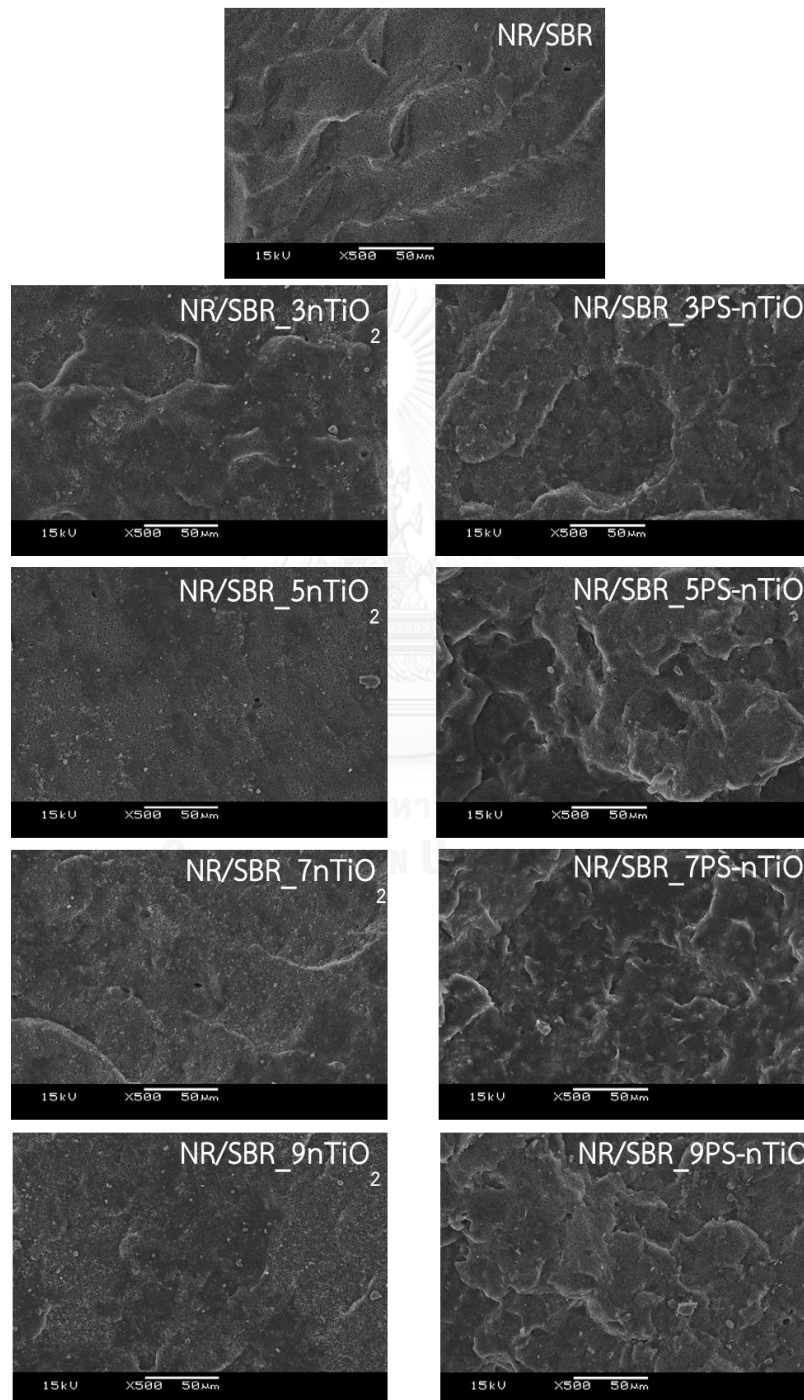
ตารางที่ 4.6 T_{onset} , $T_{50\%}$, $T_{\text{end set}}$ และ %char ของชิ้นทดสอบ

Sample	T_{onset} (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	$T_{\text{end set}}$ (°C)	Char (%)
80/20 NR/SBR	234.9	373.4	408.4	7.1
80/20 NR/SBR_3 nTiO ₂	290.0	374.9	412.8	13.9
80/20 NR/SBR_5 nTiO ₂	301.3	378.2	409.9	16.6
80/20 NR/SBR_7 nTiO ₂	318.9	378.6	410.5	21.9
80/20 NR/SBR_9 nTiO ₂	304.8	377.9	411.4	22.6
80/20 NR/SBR_3 PS-nTiO ₂	311.6	378.4	409.4	8.9
80/20 NR/SBR_5 PS-nTiO ₂	318.9	378.9	410.2	8.9
80/20 NR/SBR_7 PS-nTiO ₂	327.9	379.1	414.9	10.5
80/20 NR/SBR_9 PS-nTiO ₂	327.0	381.3	416.9	5.7

จากรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.6 พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของยางผสม NR/SBR ได้รับการปรับปรุงเมื่อเติมด้วย nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ เนื่องจากทั้ง T_{onset} , $T_{50\%}$ และ $T_{\text{end set}}$ มีค่าสูงขึ้น ตามปริมาณที่เพิ่มของ nTiO₂ และ PS-nTiO₂ ซึ่งเป็นผลจากการมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น และการเคลื่อนไหวนៃของสายโซ่โมเลกุลของยางที่ลดลง นอกจากนี้ การเติม nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ ลงไปในยางผสมมีผลให้เกิดเถ้าชาร์มากขึ้น โดยเถ้าชาร์ที่เกิดขึ้นอาจทำให้การสลายตัวทางความร้อนเกิดได้ช้าและลดลง ด้วยการไปปกคลุมที่ผิวหน้าของชิ้นงานเพื่อป้องกันออกซิเจนไม่ให้เข้าไปสัมผัสกับชิ้นงาน ทำให้การลุกลไหม้ลดลง

4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

รูปที่ 4.10 แสดงสัณฐานวิทยาของยางผสม 80/20 NR/SBR, nTiO₂-นาโนคอมพอสิต และ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต ซึ่งตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดภายใต้กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.10 สัณฐานวิทยาของชิ้นทดสอบ

จากรูปที่ 4.10 พบว่า พื้นผิวบริเวณรอยหักของยางผสม NR/SBR มีลักษณะขรุขระไม่เรียบ ซึ่งเป็นลักษณะของวัสดุที่มีความยืดหยุ่น และเมื่อเติม $n\text{TiO}_2$ พบว่าพื้นผิวรอยหักของชิ้นทดสอบ มีลักษณะเรียบมากขึ้น แสดงถึงความแข็งที่เพิ่มมากขึ้น ขณะที่เมื่อเติม PS- $n\text{TiO}_2$ พบว่า พื้นผิวรอยหักมีลักษณะขรุขระมากกว่ายางผสมนาโนคอมพอลิเมอร์ที่เติม $n\text{TiO}_2$ แสดงถึงความยืดหยุ่นของชิ้นทดสอบ เนื่องจากพอลิสไตรีนเข้าไปช่วยเพิ่ม free volume ให้กับโมเลกุลของยางเมทริกซ์ ดังที่กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ พบเห็นการเกาะกลุ่มกันชัดเจน (จุดสีขาว) ของอนุภาคเมื่อทำการเติม PS- $n\text{TiO}_2$ และ $n\text{TiO}_2$ ที่ปริมาณ 5 และ 7 phr ตามลำดับ



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 สามารถเตรียม PS-nTiO₂ ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 42.2 นาโนเมตร และมีร้อยละผลได้เท่ากับ ร้อยละ 95.9 ด้วยกระบวนการเกิดพอลิเมอร์แบบ ‘อิน ซิทู’ ดิฟเฟอเรนเชียลไมโครอิมัลชัน

5.1.2 จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของอนุภาค nTiO₂ และ PS-nTiO₂ ด้วยเทคนิค TEM พบว่าอนุภาค nTiO₂ มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเล็กที่มีการเกาะกลุ่มกัน ส่วนอนุภาคของ PS-nTiO₂ มีลักษณะเป็น “คอร์-เชลล์” โดยมีอนุภาค nTiO₂ เป็นแก่นกลาง และถูกล้อมรอบด้วยชั้นบางๆของพอลิสไตรีน

5.1.3 พฤติกรรมการบ่มของนาโนคอมพอสิตแสดง t_{s2} และ t_{90} มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมอนุภาค nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ ลงไปในยางผสม NR/SBR

5.1.4 การเติมอนุภาค nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ ในปริมาณที่เหมาะสมสามารถปรับปรุงความทนแรงดึง มอดูลัส ความทนแรงฉีกขาด และความแข็งของนาโนคอมพอสิตได้ โดยการเติม PS-nTiO₂ ให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงที่ดีกว่าการเติม nTiO₂ ในขณะที่การเติม nTiO₂ ให้มอดูลัสที่สูงกว่า PS-nTiO₂

5.1.5 จากการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าการเติมอนุภาค nTiO₂ หรือ PS-nTiO₂ สามารถปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนของนาโนคอมพอสิตได้ โดยการเติม PS-nTiO₂ จะปรับปรุงเสถียรภาพทางความร้อนได้ดีกว่า nTiO₂

5.1.5 จากการตรวจสอบสัณฐานวิทยา พบว่าการเติม nTiO₂ ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้พื้นผิวรอยหักของนาโนคอมพอสิตมีความเรียบ แสดงถึงความแข็งของวัสดุ ในขณะที่เดียวกันการเติม PS-nTiO₂ ในปริมาณที่มากขึ้น พบว่าพื้นผิวรอยหักของวัสดุมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเติม nTiO₂ ในอัตราเดียวกัน แสดงถึงความยืดหยุ่นที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังพบการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเมื่อทำการเติม PS-nTiO₂ และ nTiO₂ ที่ปริมาณ 5 และ 7 phr ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ทดลองใช้พอลิเมอร์ชนิดอื่นในการสังเคราะห์นาโนไฮบริด
- 5.2.2 ทดลองเตรียมยางนาโนคอมพอสิตด้วยสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคนาโนเมตรชนิดอื่น
- 5.2.3 ทดลองปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมให้หลากหลายมากขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] Barlow, F.W. Rubber Compounding : Principle, Materials and Technology. 2nd ed. New York : Marcel Dekker; 1993.
- [2] พงษ์ธร ชาญชัย. ยาง: ชนิดสมบัติและการใช้งาน. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค); 2548.
- [3] Robert, A.P. Natural Rubber Science and Technology. 2nd ed. London: Oxford University Press; 1988.
- [4] Blaclay, D.C. Polymer Lattices: Science and Technology. 2nd ed. Type of Lattices. New York: Chapman&Hall; 1997.
- [5] อิทธิพล แจ่มชัด. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยียาง. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; 2547.
- [6] Stephen, R., Jose, S., Joseph, K., Thomas, S., and Oommen, Z. Thermal stability and ageing properties of sulphur and gamma radiation vulcanized natural rubber (NR) and carboxylated styrene butadiene rubber (XSBR) latices and their blends. Polymer degradation and stability. 2006; 91: 1717-1725.
- [7] เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ เทคโนโลยียาง. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2537.
- [8] พรพรวรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. ปัตตานี: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี; 2528.
- [9] Maurice, M. Rubber Technology. Ohio: Tnstitute of Polymer Science, The University of Arkon; 1973.
- [10] ชญาภา นิมสุวรรณ. เทคโนโลยียางผสม: เทคนิค ปัญหา และวิธีการแก้ไข. [2016, Jun 2]. Available from: <http://www.rubbercenter.org/informationcenter/file/magazine-17.pdf>.
- [11] Gerard, K. Reinforcement of Elastomer. Interscience; 1965.
- [12] Dupont. Titanium Dioxide A brief overview of TiO₂ Pigments compared with TiO₂ Nanomaterials. [2016, Jun 2]. Available from: http://www.dtsc.ca.gov/Technology Development/Nanotechnology/upload/Whiting-_TiO2_Uses.pdf.

- [13] TDMA. About Titanium Dioxide. [2016, Jun 2]. Available from: http://www.cinkarna.si/si/files/default/tio2/tdma_about_tio2_final_29032012.pdf.
- [14] นวพันธ์ ชัยนกิจ. อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์และการประยุกต์ใช้งาน วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง [2016, Jun 1]. Available from: www.nano.kmitl.ac.th/04-วัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์.pdf.
- [15] Hayemasae, N., Rathnayake, W.G.I.U. and Ismail, H. Nano-sized TiO₂-reinforced natural rubber composites prepared by latex compounding method Journal of Vinyl and Additive Technology. Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/vnl.21497/abstract>.
- [16] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์ เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน. สงขลา: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2527.
- [17] เกษร พะลัง เคมีอินทรีย์พื้นฐาน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ; 2546.
- [18] Kenneth, H.C. Recycling Chemistry & Industry; 1989.
- [19] อราดา วงศ์ศุภลักษณ์ การแตกตัวพอลิस्टาไร์นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด. สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2547.
- [20] He, G., Pan, Q., and Rempel, G.L. Synthesis of Poly(methyl methacrylate) Nanosize Particles by Differential Microemulsion Polymerization. Macromolecular Rapid Communications. 2003; 24: 585-588.
- [21] He, G., Pan, Q., and Rempel, G.L. Modeling of Differential Microemulsion Polymerization for Synthesizing Nanosized Poly(methyl methacrylate) Particles. Industrial Engineering and Chemistry Research. 2007; 46: 1682-1689.
- [22] He, G., Pan, Q., and Rempel, G.L. Differential Microemulsion Polymerization of Styrene: A Mathematical Kinetic Model. Journal of Applied Polymer Science. 2007; 105: 2129-2137.
- [23] He, G., and Pan, Q. Synthesis of Polystyrene and Polystyrene/Poly(methyl/methacrylate) Nanoparticles. Macromolecular Rapid Communications. 2004; 25: 1545-1548.
- [24] Preston, W. Some Correlating Principles of Detergent Action. Journal of Physical Colloid Chemistry 1948; 52: 84-97.

- [25] Yu, J., Yu, J., Guo, Y., and Gao, Z. . Grafting of polystyrene onto a nanometer silica surface by microemulsion polymerization. *Chinese Journal of Polymer Science*. 2001; 20: 71-76.
- [26] Chuayjuljit, S., and Boonmahitthisud, A. Natural Rubber Nanocomposites Using Polystyrene-encapsulated Nanosilica Prepared by Differential Microemulsion Polymerization. *Applied Surface Science*. 2010; 256: 7211-7216.
- [27] อัญญพร บุญมหิตธิสุทธิ์. ผลของสารตัวเติมที่มีอนุภาคนาโนเมตรต่อสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางสไตรีนบิวทาไดอินและยาวธรรมชาติ/ยางคาร์บอซีเลตสไตรีนบิวทาไดอินนาโนคอมพอสิต: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2554.
- [28] Varkey, J.T. Augustine S. and Thomas S. Thermal degradation of natural rubber/styrene butadiene rubber latex blends by thermogravimetric method. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2000; 39: 415-35.
- [29] Popovic, R., Milonkovic, D., Popovic, R., and Plavsic, M. Properties of natural rubber/ Carboxilated styrene- butadiene lattices blends. *Scientific Technical Review*. 2005; 3-4: 66-70.
- [30] Zheng, J., Zhu, R., He, Z., Cheng, G., Wang, H., and Yao, K. Synthesis and characterization of PMMA/ SiO₂ nanocomposites by in- situ suspension polymerization. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010; 115: 1975-1981.
- [31] Norakankorn, C., Pan, Q., Rempel, G.L., and Kiatkamjornwong, S. Synthesis of Poly(methyl methacrylate) Initiated by 2,2' Azobisisobutyronitrile via Differential Microemulsion Polymerrization. *Macromolecular Rapid Communications*. 2007; 28: 1029-1033.
- [32] Meera, A.P., Tlili, R., Boudenne, A., Ibos, L., Poornima, V., Thomas, S., and Candau Y. Thermophysical and mechanical properties of TiO₂ and silica nanoparticle-filled natural rubber composites. *Journal of Elastomers and Plastics*. 2012; 44: 369-382.
- [33] Chuayjuljit, S., Neeranatmon, K., and Boonmahitthisud, A., Property Improvement of plasticized poly(vinyl chlorde) by nano-TiO₂ and poly(methyl methacrylate)-encapsulated nano-TiO₂ *Journal of Vinyl and Additive Technology*. [2016, Jan 1]. Available from: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/101002/vnl.21462/epdf>.

- [34] Boonmahitthisud, A., and Chuayjuljit, S. Effects of nanosized polystyrene and polystyrene- encapsulated nanosilica on physical properties of natural rubber/styrene butadiene rubber nanocomposites. *Polymer Plastics Technology and Engineering*. 2012; 51: 311-316.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ร้อยละผลได้ ร้อยละของแข็ง และขนาดอนุภาคของ PS-nTiO₂ตารางที่ ก-1 ร้อยละผลได้ของ PS-nTiO₂

Sample	%Yield	Average	SD
PS-nTiO ₂	94.84	95.86	1.22
	94.60		
	97.55		
	95.77		
	96.52		

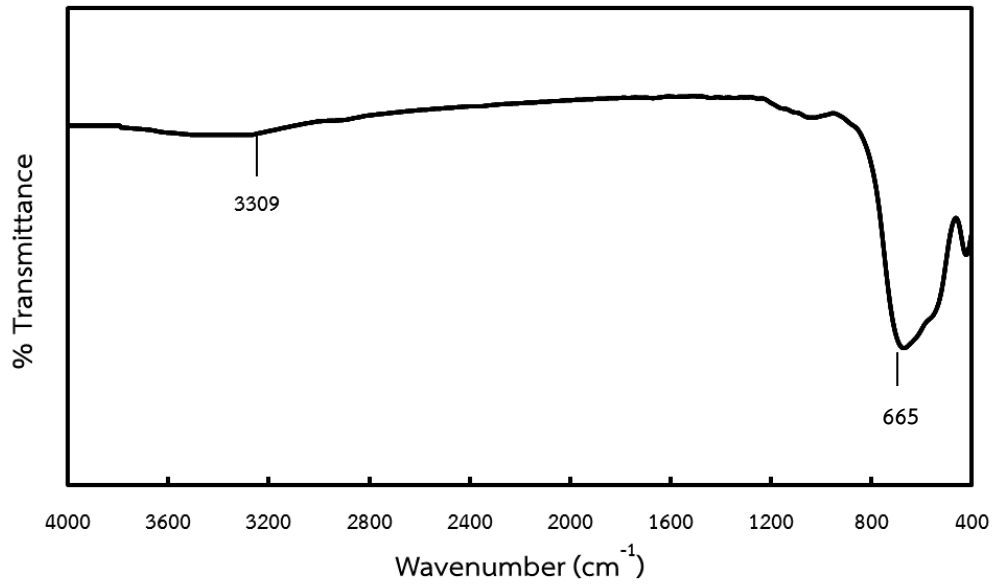
ตารางที่ ก-2 ร้อยละของแข็งของ PS-nTiO₂

Sample	%Solid	Average	SD
PS-nTiO ₂	22.05	22.29	0.28
	22.00		
	22.68		
	22.27		
	22.44		

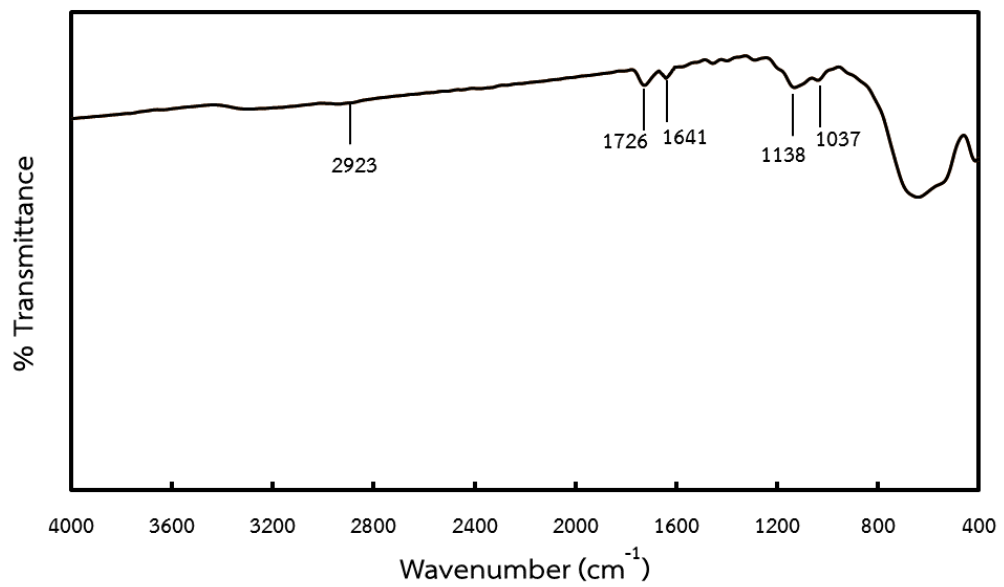
ตารางที่ ก-3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของ PS-nTiO₂

Sample	Particle size (nm)	Average (nm)	SD
PS-nTiO ₂	43.60	42.22	1.05
	44.74		
	36.94		
	42.62		
	43.22		

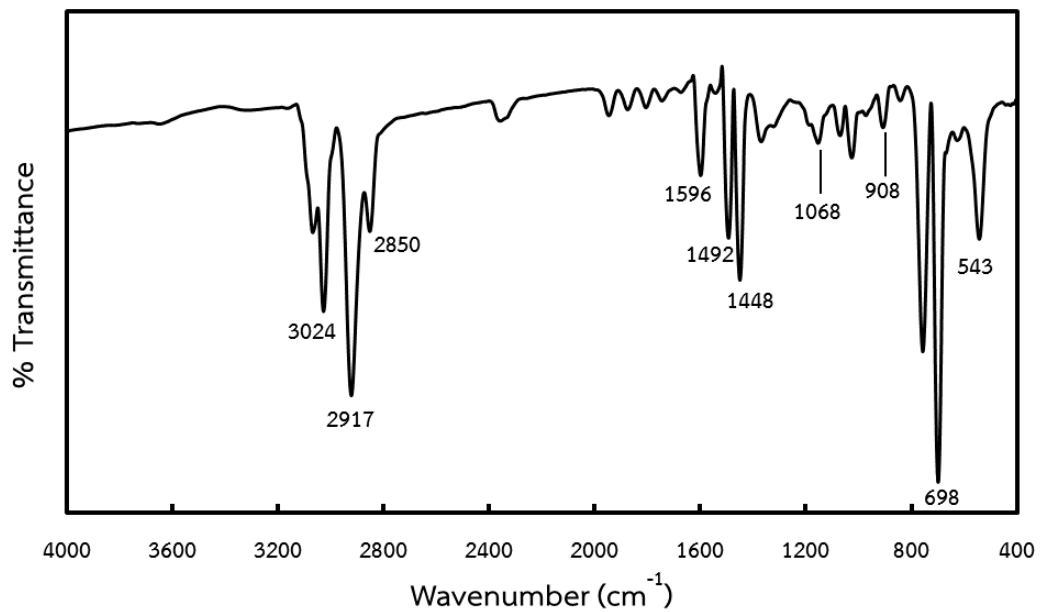
ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ด้วย FT-IR



รูปที่ ข-1 FT-IR สเปกตรัมของ nTiO₂



รูปที่ ข-2 FT-IR สเปกตรัมของ MPTMS-nTiO₂



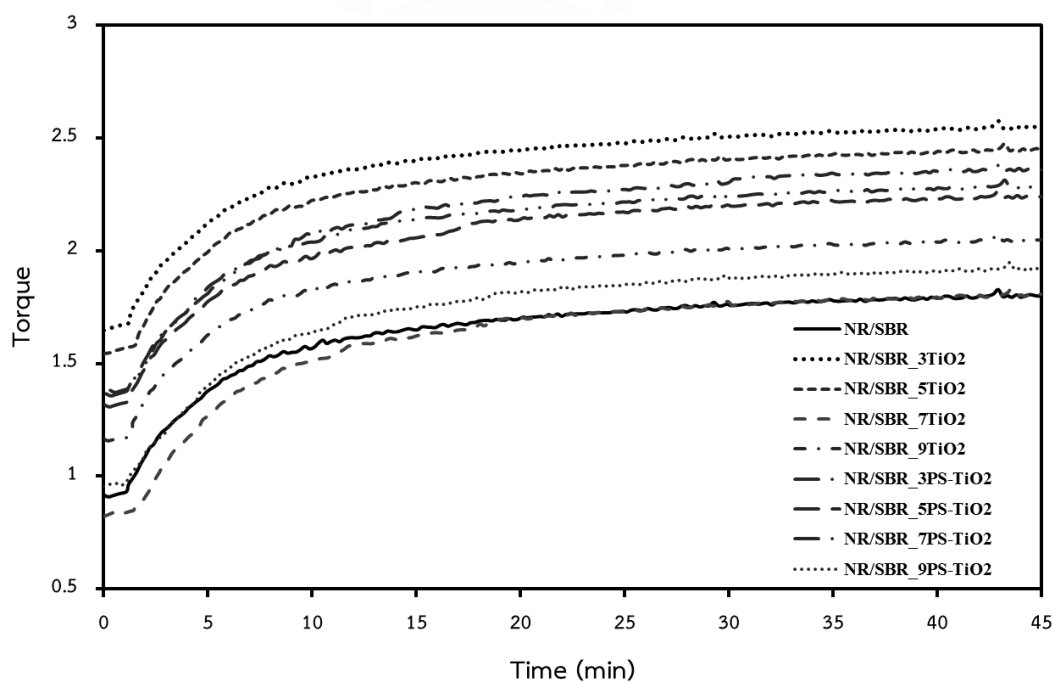
รูปที่ ข-3 FT-IR สเปกตรัมของ PS-nTiO₂

ภาคผนวก ค

ผลการตรวจสอบพฤติกรรมการบ่ม

ตารางที่ ค-1 พฤติกรรมการบ่มของยางผสม 80/20 NR/SBR, nTiO₂-นาโนคอมพอสิต และ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต

Sample	t _{s2} (min)	t ₉₀ (min)	CRI (%min ⁻¹)	M _L (dN.m)	M _H (dN.m)	M _H -M _L (dN.m)
80/20 NR/SBR	1.12	23.63	4.44	0.91	1.83	0.92
80/20 NR/SBR_3 nTiO ₂	1.22	26.78	3.91	1.65	2.58	0.93
80/20 NR/SBR_5 nTiO ₂	1.52	27.15	3.90	1.55	2.48	0.93
80/20 NR/SBR_7 nTiO ₂	1.50	26.33	4.03	0.82	1.83	1.01
80/20 NR/SBR_9 nTiO ₂	1.25	25.53	4.12	1.16	2.08	0.92
80/20 NR/SBR_3 PS-nTiO ₂	1.20	26.54	3.95	1.37	2.31	0.94
80/20 NR/SBR_5 PS-nTiO ₂	1.16	26.02	4.02	1.31	2.27	0.96
80/20 NR/SBR_7 PS-nTiO ₂	1.15	25.87	4.05	1.36	2.39	1.03
80/20 NR/SBR_9 PS-nTiO ₂	1.15	25.27	4.15	0.96	1.95	0.99



รูปที่ ค-1 MDR ยางผสม 80/20 NR/SBR, nTiO₂-นาโนคอมพอสิต และ PS-nTiO₂-นาโนคอมพอสิต

ภาคผนวก ง
ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

ตารางที่ ง-1 ค่าความทนแรงดึงของยางผสมและนาโนคอมพอสิต

Sample	TS (MPa)					Average	SD
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5		
80/20 NR/SBR	24.20	25.04	24.89	25.88	24.66	24.93	0.62
80/20 NR/SBR_3 nTiO ₂	34.89	33.89	33.03	33.27	33.36	33.68	0.74
80/20 NR/SBR_5 nTiO ₂	36.14	35.89	35.34	35.06	35.25	35.53	0.46
80/20 NR/SBR_7 nTiO ₂	27.20	27.24	27.54	27.87	27.66	27.50	0.28
80/20 NR/SBR_9 nTiO ₂	26.01	26.05	26.04	26.87	26.75	26.34	0.43
80/20 NR/SBR_3 PS-nTiO ₂	36.99	36.56	36.64	36.76	36.35	36.66	0.24
80/20 NR/SBR_5 PS-nTiO ₂	28.24	28.96	28.36	28.55	28.56	28.53	0.27
80/20 NR/SBR_7 PS-nTiO ₂	27.56	27.03	27.05	27.24	27.01	27.18	0.23
80/20 NR/SBR_9 PS-nTiO ₂	26.49	26.34	26.03	26.01	26.05	26.18	0.22

ตารางที่ ง-2 ค่ามอดุลัสที่ความเครียด 300% ของยางผสมและนาโนคอมพอสิต

Sample	M300 (MPa)					Average	SD
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5		
80/20 NR/SBR	3.44	3.50	3.46	3.46	3.47	3.46	0.02
80/20 NR/SBR_3 nTiO ₂	4.04	4.13	4.10	4.12	4.13	4.10	0.04
80/20 NR/SBR_5 nTiO ₂	4.38	4.36	4.35	4.41	4.40	4.38	0.02
80/20 NR/SBR_7 nTiO ₂	5.21	5.21	5.20	5.21	5.21	5.21	0.01
80/20 NR/SBR_9 nTiO ₂	5.72	5.76	5.72	5.77	5.73	5.74	0.02
80/20 NR/SBR_3 PS-nTiO ₂	4.07	4.02	4.00	4.08	4.03	4.04	0.03
80/20 NR/SBR_5 PS-nTiO ₂	4.21	4.21	4.20	4.20	4.21	4.21	0.01
80/20 NR/SBR_7 PS-nTiO ₂	4.51	4.57	4.53	4.57	4.53	4.54	0.02
80/20 NR/SBR_9 PS-nTiO ₂	4.90	4.90	4.92	4.94	4.91	4.91	0.02

ตารางที่ ง-3 การยืดตัว ณ จุดขาดของยางผสมและนาโนคอมพอสิต

Sample	EB (%)					Average	SD
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5		
NR/SBR	1730.97	1722.56	1706.55	1712.66	1715.24	1717.60	9.43
NR/SBR_3phr TiO ₂	1629.07	1650.24	1610.25	1623.70	1633.55	1629.36	14.58
NR/SBR_5phr TiO ₂	1366.74	1350.24	1344.25	1305.79	1346.85	1342.77	22.46
NR/SBR_7phr TiO ₂	1401.86	1415.57	1430.26	1425.66	1406.59	1415.99	12.09
NR/SBR_9phr TiO ₂	1345.04	1346.25	1336.60	1325.64	1312.46	1333.20	14.22
NR/SBR_3phr PS-TiO ₂	1572.54	1586.25	1589.37	1588.50	1595.24	1586.38	8.42
NR/SBR_5phr PS-TiO ₂	1560.94	1555.29	1540.27	1533.59	1532.68	1544.55	12.88
NR/SBR_7phr PS-TiO ₂	1535.01	1539.37	1556.24	1526.59	1522.37	1535.91	13.19
NR/SBR_9phr PS-TiO ₂	1578.63	1510.26	1502.59	1511.23	1515.46	1523.63	31.09

ตารางที่ ง-4 ค่าความทนแรงฉีกขาดของยางผสมและนาโนคอมพอสิต

Sample	Tear strength (N/mm)					Average (N/mm)	SD
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5		
NR/SBR	73.90	70.78	84.30	86.21	72.32	77.50	7.53
80/20 NR/SBR_3 TiO ₂	118.87	118.01	116.25	118.77	116.79	117.97	1.21
80/20 NR/SBR_5 TiO ₂	111.68	128.97	133.24	121.27	110.19	121.57	11.53
80/20 NR/SBR_7 TiO ₂	93.79	102.95	93.26	97.11	102.99	98.02	4.76
80/20 NR/SBR_9 TiO ₂	99.72	85.71	88.59	98.09	100.14	94.45	6.79
80/20 NR/SBR_3 PS-TiO ₂	138.89	127.55	121.88	138.61	125.96	130.57	7.74
80/20 NR/SBR_5 PS-TiO ₂	104.92	95.55	106.49	95.87	98.20	100.71	5.81
80/20 NR/SBR_7 PS-TiO ₂	88.55	83.48	88.32	87.26	79.01	85.32	4.07
80/20 NR/SBR_9 PS-TiO ₂	85.36	83.59	73.19	91.63	83.82	83.52	6.63

ภาคผนวก จ
ผลการทดสอบความแข็ง

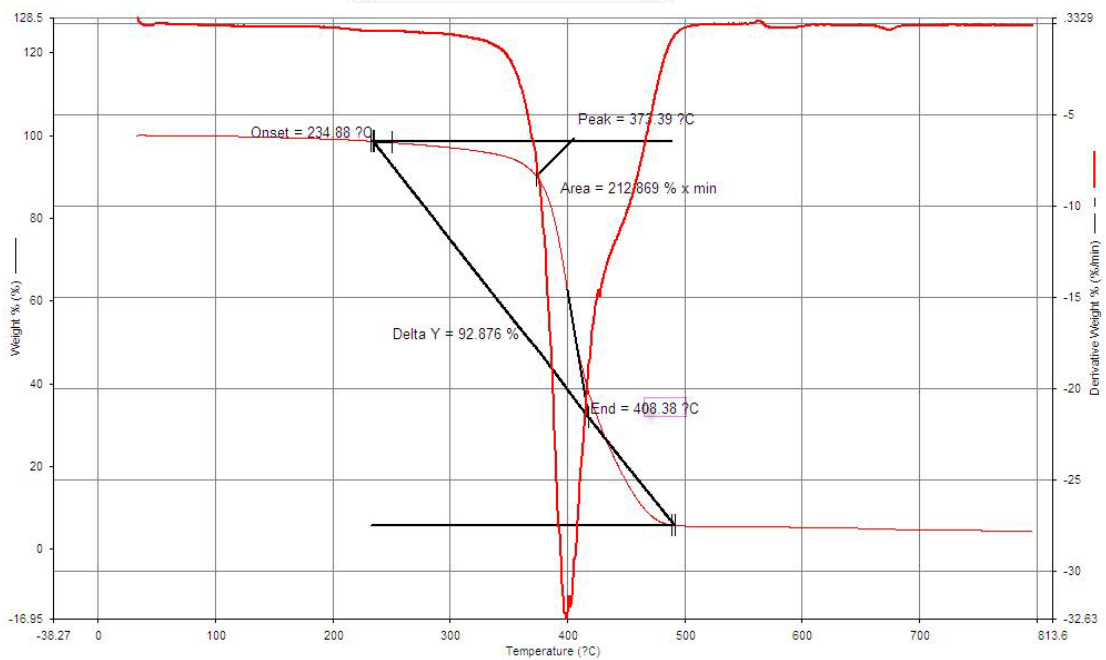
ตารางที่ จ-1 ค่าความแข็งของยางผสมและนาโนคอมพอสิต

Sample	Hardness (Shore A)			Average	SD
	No.1	No.2	No.3		
NR/SBR	46.5	46.5	47.0	46.7	0.29
80/20 NR/SBR_3 TiO ₂	50.5	50.0	50.5	50.3	0.29
80/20 NR/SBR_5 TiO ₂	53.5	53.0	53.0	53.2	0.29
80/20 NR/SBR_7 TiO ₂	55.5	55.0	56.0	55.5	0.50
80/20 NR/SBR_9 TiO ₂	57.5	58.0	57.5	57.7	0.29
80/20 NR/SBR_3 PS-TiO ₂	55.5	56.0	55.5	55.7	0.29
80/20 NR/SBR_5 PS-TiO ₂	55.0	57.0	56.5	56.2	1.04
80/20 NR/SBR_7 PS-TiO ₂	60.0	60.5	60.0	60.2	0.29
80/20 NR/SBR_9 PS-TiO ₂	65.0	66.0	65.5	65.5	0.50

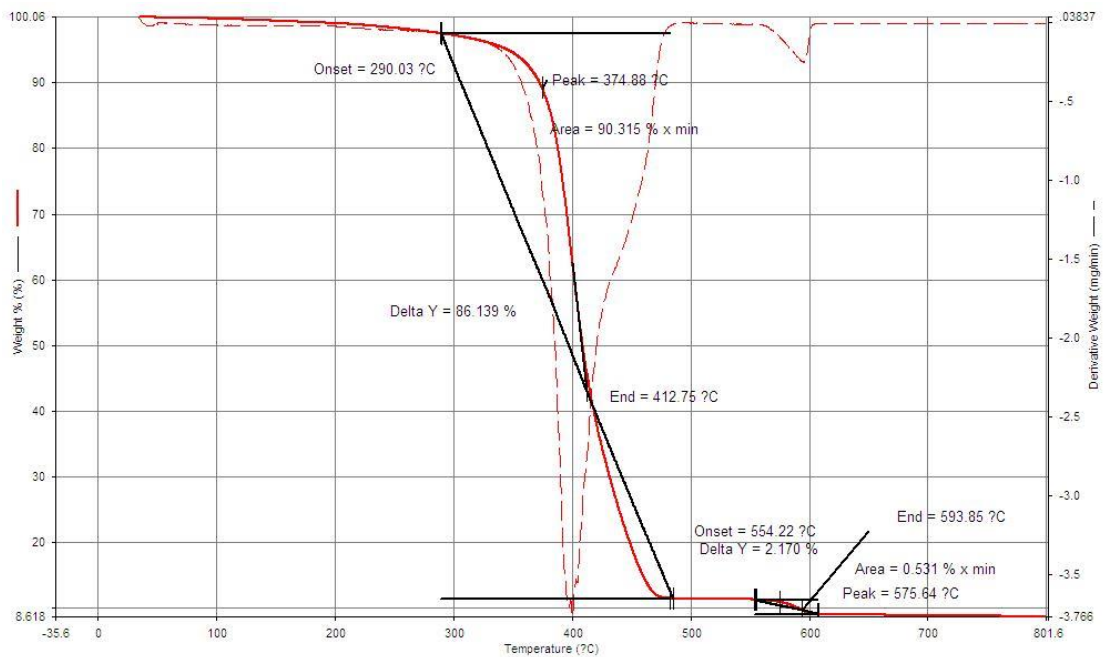
ภาคผนวก ฉ
ผลการทดสอบทางความร้อน

ตารางที่ ฉ-1 T_{onset} , $T_{50\%}$, $T_{end\ set}$ และ %char ของชิ้นทดสอบ

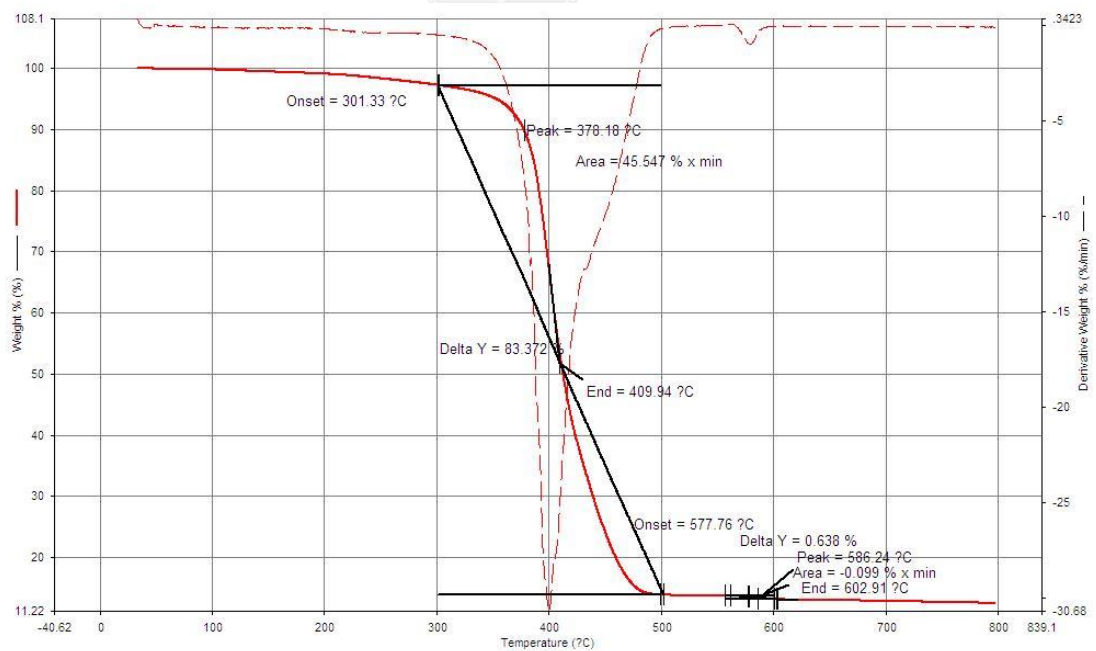
Sample	T_{onset} (°C)	$T_{50\%}$ (°C)	$T_{end\ set}$ (°C)	Char (%)
80/20 NR/SBR	234.9	373.4	408.4	7.1
80/20 NR/SBR_3 nTiO ₂	290.0	374.9	412.8	13.9
80/20 NR/SBR_5 nTiO ₂	301.3	378.2	409.9	16.6
80/20 NR/SBR_7 nTiO ₂	318.9	378.6	410.5	21.9
80/20 NR/SBR_9 nTiO ₂	304.8	377.9	411.4	22.6
80/20 NR/SBR_3 PS-nTiO ₂	311.6	378.4	409.4	8.9
80/20 NR/SBR_5 PS-nTiO ₂	318.9	378.9	410.2	8.9
80/20 NR/SBR_7 PS-nTiO ₂	327.9	379.1	414.9	10.5
80/20 NR/SBR_9 PS-nTiO ₂	327.0	381.3	416.9	5.7



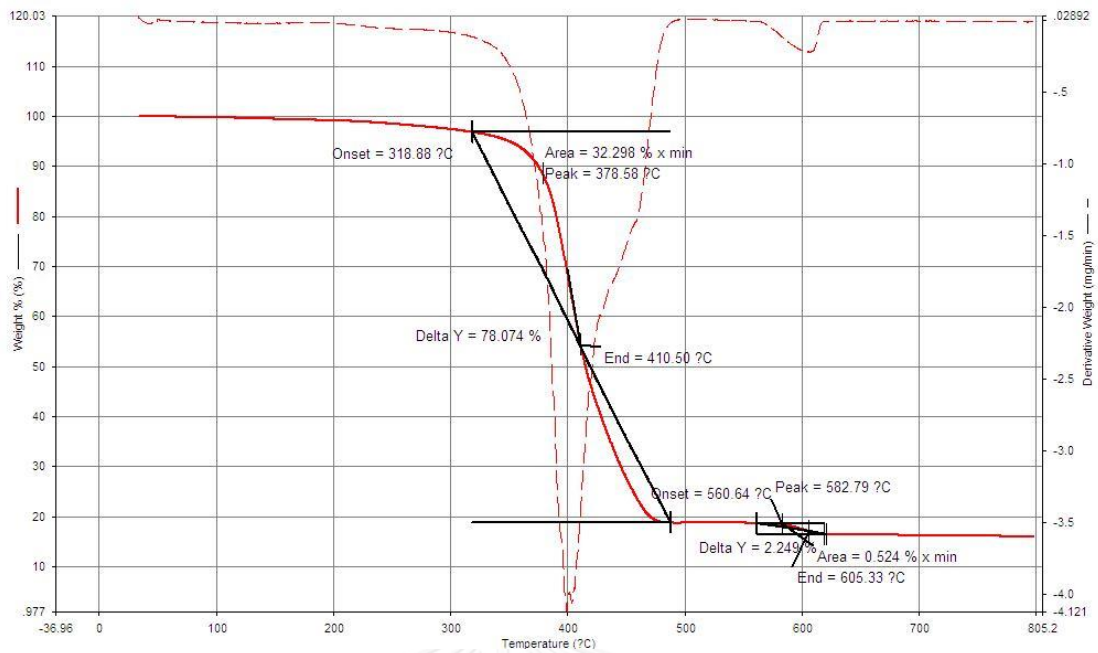
รูปที่ ฉ-1 TGA เทอร์โมแกรมของยางผสม NR/SBR



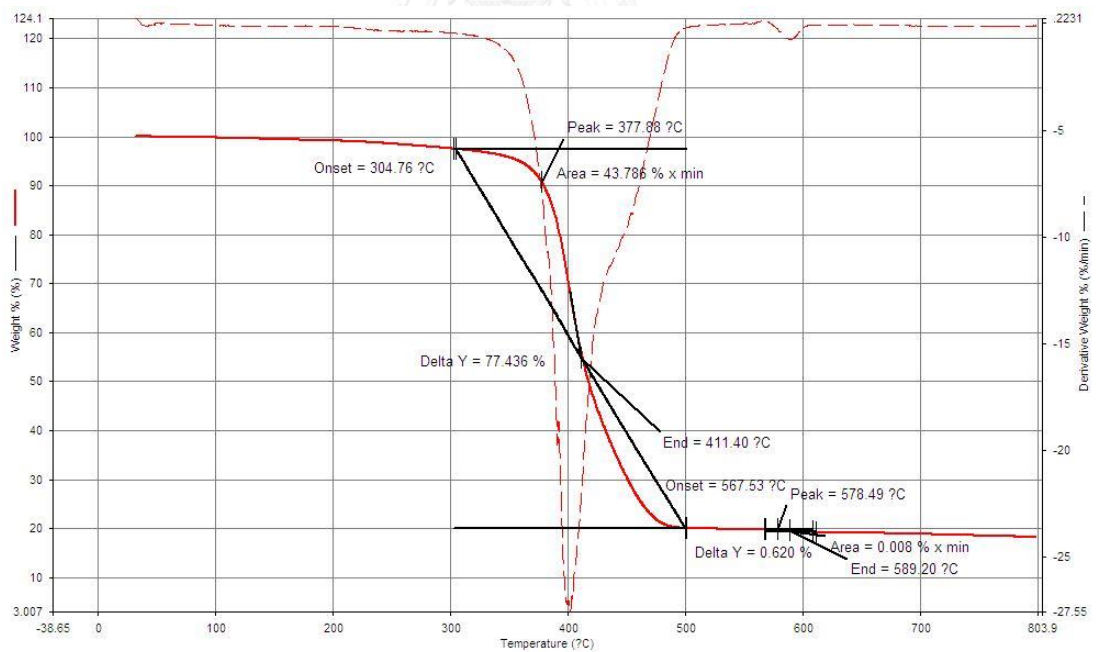
รูปที่ ฉ-2 TGA เทอร์โมแกรมของยางผสม NR/SBR_3nTiO₂



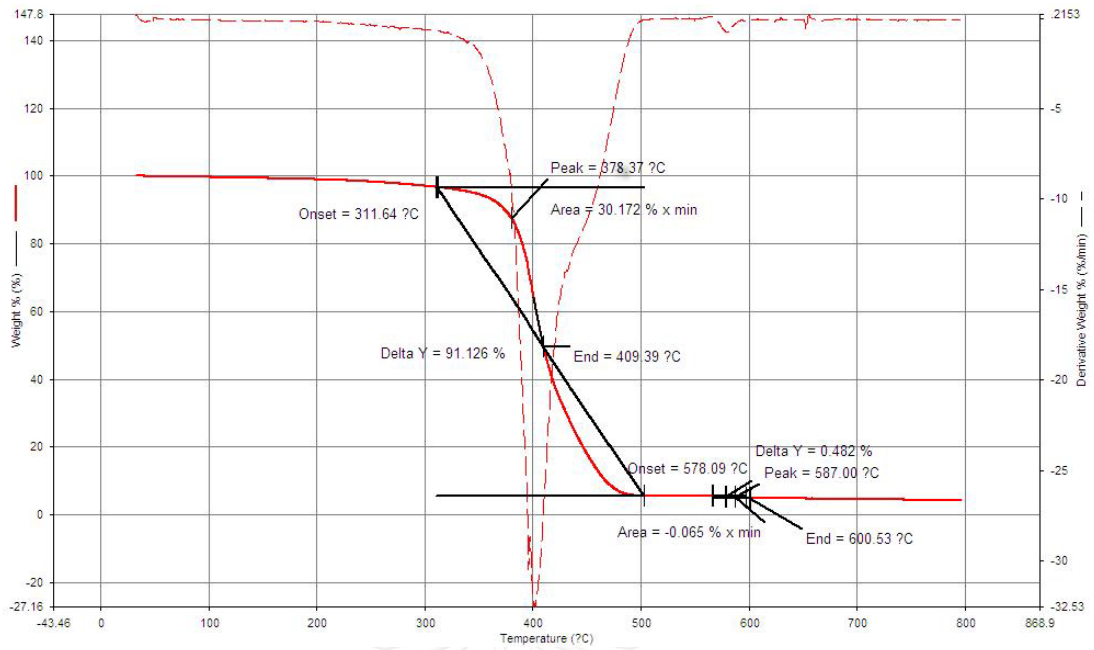
รูปที่ ฉ-3 TGA เทอร์โมแกรมของยางผสม NR/SBR_5nTiO₂



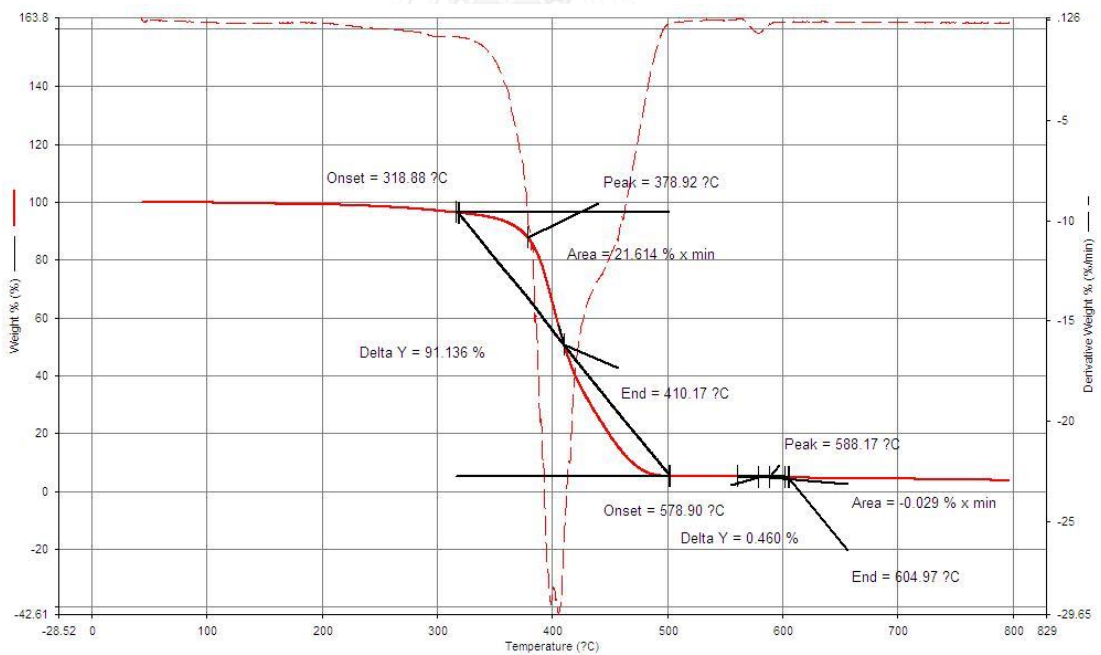
รูปที่ ๔-4 TGA เทอร์โมแกรมของยางผสม NR/SBR_7nTiO₂



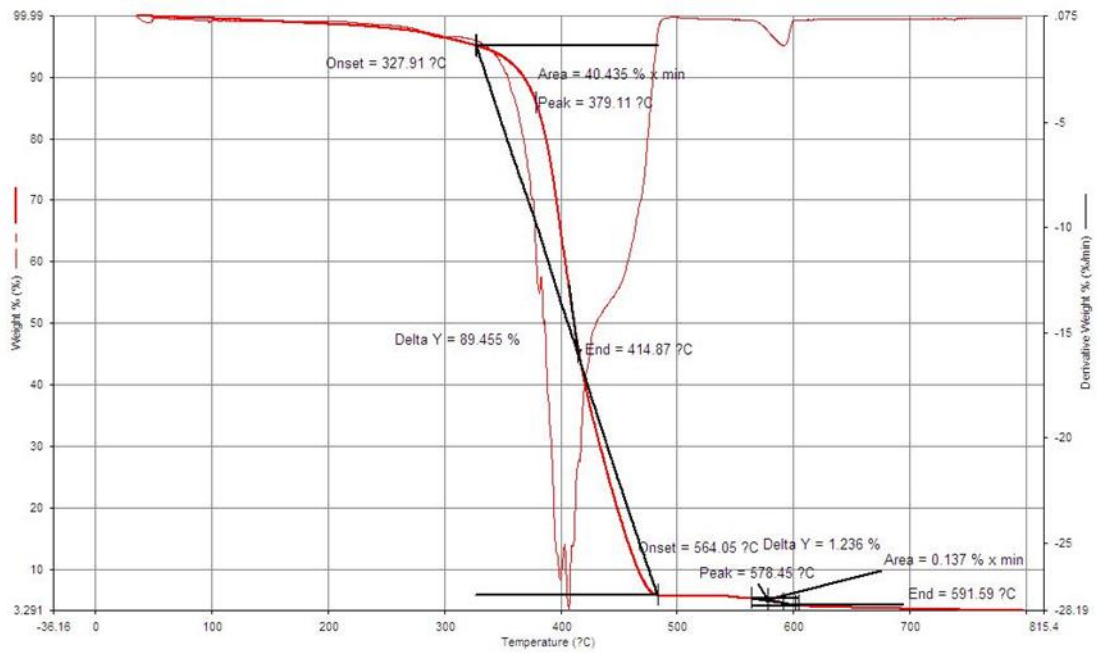
รูปที่ ๔-5 TGA เทอร์โมแกรมของยางผสม NR/SBR_9nTiO₂



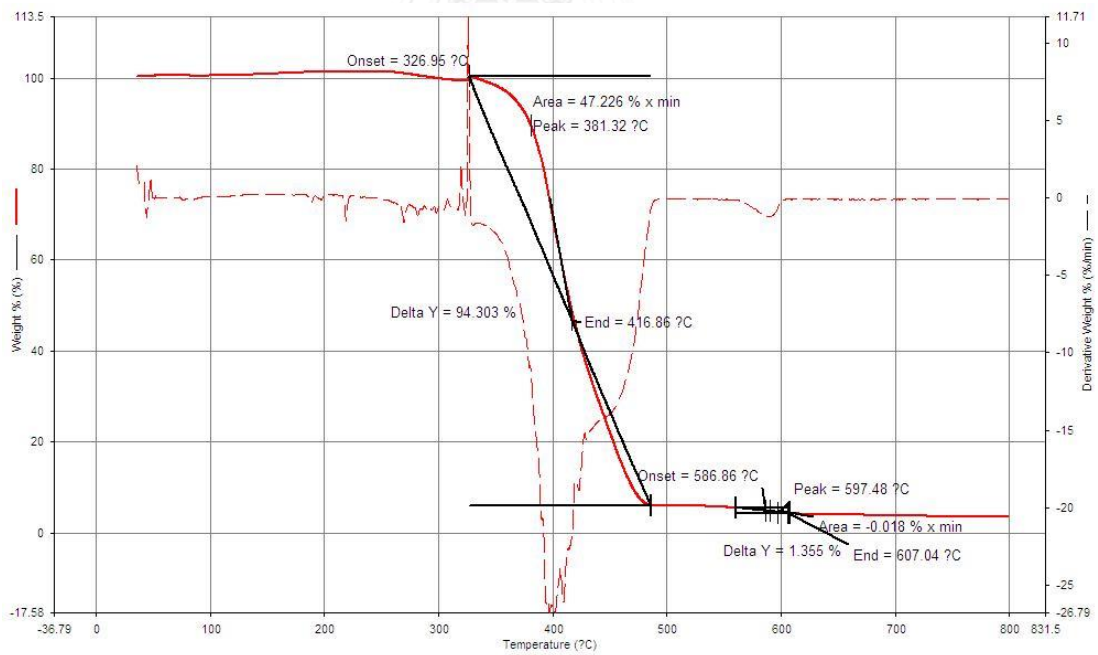
รูปที่ ๖-6 TGA เทอร์โมแกรมของยางผสม NR/SBR_3PS-nTiO₂



รูปที่ ๖-7 TGA เทอร์โมแกรมของยางผสม NR/SBR_5PS-nTiO₂



รูปที่ ๘-8 TGA เทอร์โมแกรมของยางผสม NR/SBR_7PS-nTiO₂



รูปที่ ๘-9 TGA เทอร์โมแกรมของยางผสม NR/SBR_9PS-nTiO₂

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพีระพงศ์ โภคพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 27 มิถุนายน พ.ศ.2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต จากภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระบุรี ในปีการศึกษา 2556 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา พ.ศ. 2557 และสำเร็จการศึกษาในภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2558

