



วัสดุผสมระหว่างยางผสม (ยางธรรมชาติ-ยางสไตรีนบิวทาไดอีน) และท่อนาโนคาร์บอน

Carbon Nanotubes – Rubber Blend

(Natural Rubber – Styrenebutadiene Rubber) Composite

พัชรี เพิ่มพูน

Phatcharee Phoempoon

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Materials Engineering

Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ วัสดุผสมระหว่างยางผสม (ยางธรรมชาติ - ยางสไตรีนบิวทาไดอิน) และ
ท่อนาโนคาร์บอน
ผู้เขียน นางสาวพัชรี เพิ่มพูน
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เล็ก สีคง)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรวรรณ สุทธิศรีปภ)

.....กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เล็ก สีคง)

.....

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรสา ภัทรไพบุญชัย)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรสา ภัทรไพบุญชัย)

.....

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

(รองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุฤกษ์ คงทอง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
สำหรับการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

| | |
|-----------------|---|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | วัสดุผสมระหว่างยางผสม (ยางธรรมชาติ - ยางสไตรีนบิวตาไดอิน) และ ท่อนาโนคาร์บอน |
| ผู้เขียน | นางสาวพัชรี เพิ่มพูน |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมวัสดุ |
| ปีการศึกษา | 2552 |

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของสารตัวเติมท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ที่ผสมลงไปในเรื่องยางคอมปอนด์ระหว่างธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวตาไดอิน ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล สมบัติเคมี สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัตของยางคอมปอนด์ ยางคอมปอนด์จะถูกเตรียมจากยางแผ่นรมควันชั้น 3 และยางสไตรีนบิวตาไดอิน SBR 1502 โดยการเติมและไม่เติม CNTs ตัวแปรที่ศึกษาคืออัตราส่วนผสมของยางธรรมชาติและสไตรีนบิวตาไดอิน และปริมาณของ CNTs ช่วง 0-10 phr จากการทดลองพบว่า ยางสไตรีนบิวตาไดอินมีผลต่อการเพิ่มระยะเวลาสกอรัซและการผสมยางสไตรีนบิวตาไดอินในปริมาณที่เหมาะสมจะเพิ่มค่าดัชนีอัตราคงรูปได้ซึ่งได้แก่ ยางคอมปอนด์ที่มียางสไตรีนบิวตาไดอิน 15 และ 25 phr สำหรับยางคอมปอนด์ที่มีส่วนผสมของยางธรรมชาติมากกว่า 50 phr และเติม CNTs 1-5 phr จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุด ในยางคอมปอนด์ที่มียางสไตรีนบิวตาไดอินมากกว่า 75 phr ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ CNTs นอกจากนี้ยังพบว่า ค่ามอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง การทนต่อความร้อน ค่าการเสียรูปหลังการกด การทนต่อน้ำมันและโทลูอินของยางผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ CNTs ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดของยางผสมจะลดลง

การปรับผิว CNTs ด้วยกรดและไซเลนก่อนการเสริมแรงในยางคอมปอนด์ และปริมาณกำมะถันที่เหมาะสม พบว่ามีผลต่อการเพิ่มดัชนีอัตราคงรูป การปรับผิวดังกล่าวทำให้ยางผสมมีสมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันหรือโทลูอินดีกว่ายางที่ผสมด้วย CNTs ที่ไม่ปรับผิว ในขณะที่การปรับผิว CNTs ด้วยไซเลนในปริมาณ 1:1 มีผลทำให้สมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันหรือโทลูอินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณกำมะถันที่สูงขึ้น ให้ค่ามอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง และการทนต่อน้ำมันหรือโทลูอินเพิ่มขึ้น แต่ความทนต่อแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง จากการวิจัยสรุปว่า การเสริมแรงด้วย CNTs 1~3 phr ในยางผสม สามารถเพิ่มดัชนีอัตราคงรูป ความทนต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

มากกว่ายางผสมที่เสริมแรงด้วย carbon black 40-50 phr ในขณะที่ค่ามอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความแข็ง ค่อนข้างต่ำกว่า ส่วนสมบัติอื่นๆ เช่น การเสีรูปลงหลังการกด การทนต่อน้ำมันหรือโทลูอิน และความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางผสมทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

| | |
|----------------------|--|
| Thesis Title | Carbon Nanotubes – Rubber Blend (Natural Rubber – Styrenebutadiene Rubber) Composite |
| Author | Miss Phatcharee Phoempoon |
| Major Program | Materials Engineering |
| Academic Year | 2009 |

Abstract

This study focused on the investigation of the effect of carbon nanotubes filled in rubber blend between natural rubber (NR) and styrene butadiene rubber (SBR) on rubber vulcanization, mechanical property, chemical property, thermal property and dynamic mechanical thermal property of rubber composites. Rubber blend was prepared from ribbed smoked sheet #3 and styrene butadiene, by melt mixing method in an absence and presence of multi-walled carbon nanotubes (CNTs). The main variables were the ratios of NR/SBR and a dosage of CNTs in the range of 0-10 phr. It was found from experimental investigation that SBR exhibits a long scorch time and a suitable amount of SBR as 15 and 25 phr in the blend enhances the cure rate index (CRI) of the rubber composite. For rubber blend with NR > 50 phr, CNTs of 1-5 phr exhibits the optimum tensile strength of rubber composite. At SBR > 75 phr, tensile strength increases with an increase in CNTs content. Furthermore, modulus, tear strength, hardness, compression set, thermal resistance, oil and toluene resistance increase with an increase in CNTs filling. However, CNTs affects on a reduction of elongation at break of rubber composite.

Surface modification of CNTs with acid and silane before reinforcing in rubber compound, and suitable amount of sulphur enhance the curing rate index (CRI). Acid modified CNTs-rubber composite exhibits poorer mechanical property and oil or toluene resistance than that of unmodified one. While silane-modified CNTs-rubber composite shows an increase in such properties. Furthermore, higher amount of sulphur added results in the improvement of modulus, tear resistance, hardness and oil or toluene resistance decrease in tensile strength and elongation at break. From this research, it concludes that CNTs 1-3 phr reinforced in rubber compound enhances the curing rate index, tensile strength and elongation at break more than that reinforced with carbon black 40-50 phr. While modulus, tear resistance and hardness with of the rubber

composite filled with CNTs are less than those filled with carbon black. Other properties such as compression set, oil or toluene resistance and crosslink density of both rubber composites are not much different.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เล็ก สีคง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรสา ภัทรไพบุญชัย และรองศาสตราจารย์ กัลยาณี คุปตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาแนะนำแนวทางในการทำวิจัยและคอยให้คำปรึกษาที่ดีตลอดมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์มีความถูกต้องและสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยี และสาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการปฏิบัติงาน และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุฤกษ์ คงทอง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรวรรณ สุทธิศรีปภ กรรมการสอบ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนโครงการทุนวิจัย ขนาดเล็กเรื่องยางพารา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านนาโนเทคโนโลยีของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ใช้งบประมาณอุดหนุนในการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ โครงการทุนก้นกู่ระดับนักศึกษาปริญญาโทของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนค่าลงทะเบียนเรียนและค่าครองชีพตลอดระยะเวลาในการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุน

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องชายที่เป็นกำลังใจ และขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุที่คอยเอื้อเฟื้อช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดี ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้ตั้งแต่เริ่มเรียนจนถึงปัจจุบันนี้

ขอบคุณพระเจ้าที่ประทานกำลังและสติปัญญาจนทำวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

พัชรี เพิ่มพูน

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| สารบัญ | (8) |
| รายการตาราง | (10) |
| รายการรูป | (13) |
| สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ | (18) |
| บทที่ | 1 |
| 1. บทนำ | 1 |
| 1.1 บทนำตั้งเรื่อง | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 4 |
| 2.1 ขงธรรมชาติ | 4 |
| 2.2 ขงเอสปีอาร์ | 7 |
| 2.3 ท่อนาโนคาร์บอน | 10 |
| 2.4 พอลิเมอร์ผสม | 13 |
| 2.5 กระบวนการบดผสมขง | 16 |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 19 |
| 3.วิธีการวิจัย | 25 |
| 3.1 สารเคมี | 25 |
| 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย | 26 |
| 3.3 วิธีดำเนินการทดลอง | 27 |
| 3.3.1 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของขงคอมเปานด์ | 27 |
| 3.3.2 การเตรียมขงคอมเปานด์ (rubber compound) | 28 |
| 3.3.2 การทดสอบสมบัติต่างๆ | 29 |
| 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ | 40 |
| 4.1 ผลของสัดส่วนระหว่างขงธรรมชาติกับขงเอสปีอาร์ในขงคอมเปานด์โดย ไม่เติม CNTs (ใช้ซัลเฟอร์ 2 phr) | 40 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.2 ผลของชนิดสารเสริมแรง (ใช้ซิลเฟอร์ 2 phr) | 47 |
| 4.2.1 การใช้ CNTs เป็นสารเสริมแรง | 47 |
| 4.2.1.1 CNTs ที่ไม่ปรับผิว | 47 |
| 4.2.1.2 CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด | 60 |
| 4.2.1.3 CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน | 65 |
| 4.2.2 การใช้ carbon black เป็นสารเสริมแรง | 72 |
| 4.3 ผลของปริมาณกำมะถันต่อการขึ้นรูป | 77 |
| 4.4 สมบัติทางความร้อนของยาง | 82 |
| 4.5 การวิเคราะห์ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (conductivity) | 83 |
| 4.6 การวิเคราะห์ด้วย SEM | 84 |
| 5. สรุปผลการทดลอง | 88 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง | 88 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 89 |
| บรรณานุกรม | 90 |
| ภาคผนวก | 95 |
| ก. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางคอมปอนด์ | 97 |
| ข. ผลการทดสอบสมบัติอื่นๆของยางคอมปอนด์ | 120 |
| ค. ผลการวิเคราะห์ ANOVA | 133 |
| ประวัติผู้เขียน | 140 |

รายการตาราง

| ตาราง | | หน้า |
|-------|--|------|
| 2.1 | สมบัติของ CNTs | 11 |
| 2.2 | สมบัติของ SWNTs และ MWNTs | 12 |
| 2.3 | สรุปกระบวนการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก | 12 |
| 3.1 | กระบวนการศึกษาวิจัย | 28 |
| 3.2 | สูตรยางคอมปอนด์ | 28 |
| 3.3 | ขั้นตอนการผสมและลำดับการใส่สารเคมี ในการผสมยางคอมปอนด์ | 29 |
| 4.1 | ค่าความแตกต่างของค่าทอร์กสูงสุดและต่ำสุดในสูตรยางคอมปอนด์ | 40 |
| 4.2 | ผลของการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางคอมปอนด์ด้วยเครื่อง TGA | 53 |
| 4.3 | อุณหภูมิ T_g ที่ได้มาจากผลการวิเคราะห์ค่าสูงสุดของค่า $\tan \delta$ ด้วยเครื่อง DMTA | 57 |
| 4.4 | ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของยางคอมปอนด์สูตรต่างๆ | 83 |
| ก.1 | Without CNTs | 97 |
| ก.2 | Unmodified CNTs | 100 |
| ก.3 | Acid-modified CNTs | 112 |
| ก.4 | Silane-modified CNTs (CNTs:Silane , 1:1) | 117 |
| ก.5 | Silane-modified CNTs (CNTs:Silane , 1:3) | 118 |
| ก.6 | Silane-modified CNTs (CNTs:Silane , 1:1) Sulphur 3 phr | 119 |
| ก.7 | Silane-modified CNTs (CNTs:Silane , 1:1) Sulphur 5 phr | 119 |
| ข.1 | การบวมตัวของยางคอมปอนด์ในน้ำมันและในน้ำ(CNTs ที่ไม่ปรับผิว) | 121 |
| ข.2 | การบวมตัวของยางคอมปอนด์ในน้ำมันและในน้ำ(CNTs ที่ปรับผิวกรด) | 122 |
| ข.3 | การบวมตัวของยางคอมปอนด์ในน้ำมันและในน้ำ(CNTs ที่ปรับผิวด้วยโซเลน) | 123 |
| ข.4 | การเสียรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C และอุณหภูมิ 70°C (CNTs ที่ไม่ปรับผิว) | 124 |
| ข.5 | การเสียรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C และอุณหภูมิ 70°C (CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด) | 125 |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง | | หน้า |
|-------|--|------|
| ข.6 | การเสียรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C และอุณหภูมิ 70°C (CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน) | 126 |
| ข.7 | ความแข็ง (CNTs ที่ไม่ปรับผิว) | 127 |
| ข.8 | ความแข็ง (CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด) | 128 |
| ข.9 | ความแข็ง (CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน) | 129 |
| ข.10 | ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (CNTs ที่ไม่ปรับผิว) | 130 |
| ข.11 | ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด) | 131 |
| ข.12 | ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน) | 132 |
| ค.1 | การวิเคราะห์ค่าการบวมตัวในโทลูอินด้วย ANOVA ในสูตรยาง 100/0 และ 75/25 | 134 |
| ค.2 | การวิเคราะห์ค่าการบวมตัวในโทลูอินด้วย ANOVA ในสูตรยาง 100/0 และ 50/50 | 134 |
| ค.3 | การวิเคราะห์ค่าการบวมตัวในโทลูอินด้วย ANOVA ในสูตรยาง 100/0 และ 25/75 | 134 |
| ค.4 | การวิเคราะห์ค่าการบวมตัวในโทลูอินด้วย ANOVA ในสูตรยาง 100/0 และ 0/100 | 135 |
| ค.5 | การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 0 phr และ 1 phr | 135 |
| ค.6 | การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 0 phr และ 3 phr | 135 |
| ค.7 | การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 0 phr และ 5 phr | 135 |
| ค.8 | การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 0 phr และ 10 phr | 136 |
| ค.9 | การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และไม่ปรับผิว | 136 |

รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง | | หน้า |
|-------|---|------|
| ก.10 | การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:3 และไม่ปรับผิว | 136 |
| ก.11 | การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 | 137 |
| ก.12 | การวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และไม่ปรับผิว | 137 |
| ก.13 | การวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:3 และไม่ปรับผิว | 137 |
| ก.14 | การวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 | 138 |
| ก.15 | การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางเอสบีอาร์ที่เติม CNTs 1 phr เปรียบเทียบกับการเติม carbon black 40 phr | 138 |
| ก.16 | การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางเอสบีอาร์ที่เติม CNTs 3 phr เปรียบเทียบกับการเติม carbon black 40 phr | 138 |
| ก.17 | การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางเอสบีอาร์ที่เติม CNTs 5 phr เปรียบเทียบกับการเติม carbon black 40 phr | 139 |
| ก.18 | การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางเอสบีอาร์ที่เติม CNTs 10 phr เปรียบเทียบกับการเติม carbon black 40 phr | 139 |

รายการรูป

| รูป | หน้า | |
|-----|--|----|
| 2.1 | สูตร โครงสร้างยางธรรมชาติ | 4 |
| 2.2 | โครงสร้างทางเคมีของยางเอสบีอาร์ | 7 |
| 2.3 | โครงสร้างต่างๆของคาร์บอน | 10 |
| 2.4 | ชนิดของ CNTs | 11 |
| 2.5 | การจับยึดกันระหว่างโซ่เล่นกับ CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด | 23 |
| 3.1 | ห้วกคแบบต่างๆ สำหรับการวัดค่าความแข็ง | 32 |
| 3.2 | เครื่องมือทดสอบการเสีขรูปหลังการกด | 33 |
| 3.3 | ลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบและเกิดสะท้อนกับผิวหน้าของวัตถุตามกฎของแบรค | 35 |
| 3.4 | เครื่องมือทดสอบสภาพการนำไฟฟ้า | 39 |
| 4.1 | เวลาในการคงรูปและเวลาสกอ์ชของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ ผสมกันในส่วนต่างๆ | 41 |
| 4.2 | ดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันในส่วนต่างๆ | 41 |
| 4.3 | สมบัติเชิงกลของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันในส่วนต่างๆ | 42 |
| 4.4 | สมบัติต่างๆของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันในส่วนต่างๆ | 43 |
| 4.5 | เทอร์โมแกรมการสลายตัวด้วยความร้อนของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันในส่วนต่างๆ | 45 |
| 4.6 | ค่า E' ของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันในส่วนต่างๆ | 46 |
| 4.7 | ค่า $\tan \delta$ ของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันในส่วนต่างๆ | 46 |
| 4.8 | เวลาในการคงรูปและเวลาสกอ์ชในยางธรรมชาติที่มี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 47 |
| 4.9 | เวลาสกอ์ชในยางธรรมชาติที่มี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 48 |

รายการรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.10 | ดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมเพานด์ในยางธรรมชาติที่มี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 48 |
| 4.11 | เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมเพานด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสปีอาร์ โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 50 |
| 4.12 | สมบัติเชิงต่างๆ ของยางคอมเพานด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสปีอาร์ โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 52 |
| 4.13 | ค่า E' ของยางธรรมชาติ โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 54 |
| 4.14 | ค่า E' ของยางคอมเพานด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสปีอาร์ ในสัดส่วน 75/25 โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 55 |
| 4.15 | ค่า E' ของยางคอมเพานด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสปีอาร์ ในสัดส่วน 50/50 โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 55 |
| 4.16 | ค่า E' ของยางคอมเพานด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสปีอาร์ ในสัดส่วน 25/75 โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 56 |
| 4.17 | ค่า E' ของยางเอสปีอาร์ โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 56 |
| 4.18 | ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของยางคอมเพานด์ที่เติม CNTs ในปริมาณต่างๆ | 58 |
| 4.19 | ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม CNTs | 59 |
| 4.20 | ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของยางคอมเพานด์ที่มีสัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางเอสปีอาร์ (75/25) ที่เติมและไม่เติม CNTs | 59 |
| 4.21 | ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของยางเอสปีอาร์ที่เติมและไม่เติม CNTs | 60 |
| 4.22 | เปรียบเทียบเวลาในการคงรูปของยางคอมเพานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ ผสมกันใน โดยมี CNTs ที่ไม่ปรับผิว และปรับผิวด้วยกรด เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 61 |
| 4.23 | เปรียบเทียบเวลาสกอร์ชของยางคอมเพานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ ผสมกัน โดยมี CNTs ที่ไม่ปรับผิว และปรับผิวด้วยกรด เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 61 |

รายการรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.24 | เปรียบเทียบดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันใน โดยมี CNTs ที่ไม่ปรับผิว และปรับผิวด้วยกรด เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 62 |
| 4.25 | เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันใน โดยมี CNTs ที่ไม่ปรับผิวและปรับผิวด้วยกรด เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 63 |
| 4.26 | เปรียบเทียบสมบัติต่างๆของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันใน โดยมี CNTs ที่ไม่ปรับผิว และปรับผิวด้วยกรด เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 64 |
| 4.27 | เวลาในการคงรูปของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 66 |
| 4.28 | เวลาสกอร์ชของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ปรับผิวด้วยไซเลนที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 66 |
| 4.29 | ดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ปรับผิวด้วยไซเลนที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 67 |
| 4.30 | สมบัติเชิงกลของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 68 |
| 4.31 | สมบัติต่างๆของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 69 |
| 4.32 | การวิเคราะห์ FT-IR ของ CNTs ชนิดต่างๆ | 70 |
| 4.33 | ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ชนิดต่างๆ เป็นสารเสริมแรงในปริมาณ 3 phr | 71 |
| 4.34 | ผลการวิเคราะห์ TGA ของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ชนิดต่างๆ เป็นสารเสริมแรงในปริมาณ 1 และ 3 phr | 71 |
| 4.35 | เปรียบเทียบเวลาคงรูปของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันใน โดยมี carbon black และ unmodified-CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 73 |

รายการรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.36 | เวลาสกอร์ชของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกัน โดยมี carbon black และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 73 |
| 4.37 | ดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกัน โดยมี carbon black และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 74 |
| 4.38 | เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกัน โดยมี carbon black และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 75 |
| 4.39 | เปรียบเทียบสมบัติต่างๆของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกัน โดยมี carbon black และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 76 |
| 4.40 | ผลการวิเคราะห์ TGA ของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกัน โดยมี carbon black และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ | 77 |
| 4.41 | เวลาในการคงรูปและเวลาสกอร์ชในยางธรรมชาติที่มี CNTs:Silane (1:1) ปริมาณ 1 phr เป็นสารเสริมแรง โดยมีปริมาณกำมะถันในปริมาณต่างๆ | 79 |
| 4.42 | ดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมเปานด์ในยางธรรมชาติที่มี CNTs:Silane (1:1) ปริมาณ 1 phr เป็นสารเสริมแรง โดยมีปริมาณกำมะถันในปริมาณต่างๆ | 79 |
| 4.43 | สมบัติเชิงกลของยางคอมเปานด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน CNTs:Silane เท่ากับ1:3 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณ 1 phr โดยเติมกำมะถันในปริมาณต่างๆ | 80 |
| 4.44 | สมบัติต่างๆ ของยางคอมเปานด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน CNTs:Silane เท่ากับ1:3 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณ 1 phr โดยเติมกำมะถันในปริมาณต่างๆ | 81 |
| 4.45 | เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสบีอาร์ในสัดส่วนต่างๆ โดยปราศจากสารเสริมแรง | 82 |
| 4.46 | เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางคอมเปานด์ในยางธรรมชาติที่เติม CNTs ชนิดไม่ปรับผิวและ carbon black ในปริมาณต่างๆ | 83 |
| 4.47 | ภาพ SEM ของ CNTs ชนิด MWNTs | 84 |
| 4.48 | ภาพ SEM ของยางคอมเปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ในสัดส่วน 75/25 โดยเสริมแรงด้วย CNTs ที่ปรับผิวไซเลนในอัตราส่วน (1:1) ปริมาณ 1 phr | 85 |

รายการรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 4.49 | ภาพ SEM ของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ในสัดส่วน 75/25 โดย เสริมแรงด้วย CNTs ที่ไม่ปรับผิว 3 phr | 86 |
| 4.50 | ภาพ SEM ของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ในสัดส่วน 75/25 โดยเสริมแรงด้วย carbon black ปริมาณ 45 phr | 87 |

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

| ตัวย่อ | ชื่อภาษาอังกฤษ | ชื่อภาษาไทย |
|--------|---|--|
| BR | Butadiene Rubber | ยางบิวตาไดอิน |
| CNTs | Carbon nanotube | ท่อนาโนคาร์บอน |
| CRI | Cure Rate Index | ดัชนีอัตราการคงรูป |
| DMTA | Dynamic Mechanical Thermal Analysis | วิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต |
| E' | Storage modulus | พลังงานสะสม |
| E'' | Loss modulus | พลังงานสูญเสีย |
| FTIR | Fourier Transform Infrared Spectroscopy | วิเคราะห์โครงสร้างด้วยรังสีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี |
| IR | Isoprene Rubber | ยางพอลิไอโซพรีน |
| MF | Multiplying factor | ผลคูณแฟกเตอร์ |
| MWNTs | multi-walled carbon nanotubes | ชนิดที่มีผนังซ้อนกัน |
| SBR | Styrene-butadiene rubber | ยางสไตรีนบิวตาไดอิน |
| SEM | Scanning Electron Microscope | เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด |
| T | Temperature | อุณหภูมิ |
| TGA | Thermogravimetric Analysis | เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก |
| XRD | X-Ray Diffraction | เครื่องตรวจสอบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ |
| Ø | Diameter | เส้นผ่าศูนย์กลาง |

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

| สัญลักษณ์ | สัญลักษณ์ | ชื่อภาษาอังกฤษ | ชื่อภาษาไทย |
|-------------------|-----------|------------------------------|-------------------------|
| °C | | Degree celsius | องศาเซลเซียส |
| MPa | | Mega Pascal | เมกกะปาสคาล |
| g/cm ² | | Gram per centimeter square | กรัมต่อตารางเซนติเมตร |
| GPa | | Giga Pascal | กิกะปาสคาล |
| m ² /g | | Meter square per gram | ตารางเมตรต่อกรัม |
| nm | | Nanometer | นาโนเมตร |
| mm | | Millimeter | มิลลิเมตร |
| cm | | centimeter | เซนติเมตร |
| mm/min | | Millimeter per minute | มิลลิเมตรต่อนาที |
| N/mm ² | | Newton per millimeter square | นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร |
| N | | Newton | นิวตัน |
| mm ² | | Millimeter square | ตารางมิลลิเมตร |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำสั้นเรื่อง

ยางธรรมชาติจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีการนำยางธรรมชาติไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย สมบัติที่เด่นของยางธรรมชาติได้แก่ ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและมีความยืดหยุ่นสูงมาก มีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง ในขณะที่มีความร้อนภายใน (heat build-up) ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกัน (tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) สูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง (พงษ์ธร, 2548)

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความชื้น เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความชื้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ผึ้ง น้ำมันและสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีต่างๆ ดังกล่าว (http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rtu/information3_6.htm, 2551)

ยางเอสปีอาร์ถือว่าเป็นยางสังเคราะห์ที่สำคัญและใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในวงการอุตสาหกรรมยางเนื่องจากยางชนิดนี้ราคาไม่แพงอีกทั้งสามารถแปรรูปได้ง่ายจึงทำให้ประหยัดทั้งต้นทุนวัตถุดิบและแรงงานการผลิต และมีข้อดีกว่ายางธรรมชาติคือ มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่า มีสิ่งเจือปนน้อยกว่า ไม่ต้องบดยางให้ نرم ก่อนทำการผสมเคมียางเนื่องจากยางชนิดนี้ถูกสังเคราะห์มาให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่สูงมากนัก จึงมีความหนืดที่เหมาะสมทำให้สารเคมีกระจายตัวได้ดี ไหลได้ง่ายในระหว่างการขึ้นรูป มีแนวโน้มที่จะเกิดการสกรอรัชในระหว่างกระบวนการผลิตน้อยกว่า มีอัตราเร็วในการคงรูปช้ากว่าและถูกออกซิไดซ์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติ ทำให้สามารถผสมยางในเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูงกว่าได้ และยางชนิดนี้มีความเป็นฉนวนสูง มีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานตั้งแต่ -50°C ถึง 100°C (<http://th.wikipedia.org/wiki>, 2551)

ยางเอสบีอาร์จะมีสมบัติด้อยในด้านการเหนียวติด จึงจำเป็นต้องใช้สารเพิ่มความเหนียวติดในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ยางรถยนต์ ความยืดหยุ่นจะขึ้นอยู่กับปริมาณสไตรีนในโครงสร้างโดยถ้าปริมาณสไตรีนสูงขึ้นความยืดหยุ่นก็จะลดลง และการกระเด็นตัวต่ำกว่ายางธรรมชาติ

นอกจากนี้ยางเอสบีอาร์มีค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อถูกยืด เวลาใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) เข้าช่วย ก็จะทำได้สมบัติเทียบเท่ากับยางธรรมชาติได้ เช่น การเติมเขม่าดำจะทำให้ยางมีความทนทานต่อการขัดสี ยางเอสบีอาร์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น การผลิตสายพานลำเลียง ท่อยาง พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เป็นต้น (http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rtu/information3_6.htm, 2551)

ปัจจุบันมีการผลิตวัสดุผสมที่มีส่วนผสมของพอลิเมอร์และท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube, CNTs) อาทิเช่น CNTs เสริมใน ethylene tetrafluoroethylene หรือ polyvinylidene fluoride เพื่อนำมาใช้ในรถยนต์ ใช้เป็นชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้วยคุณสมบัติที่ทนต่อสารเคมี ทนต่อการหลุดลอก รวมถึงป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการสร้างจรวดอย่างแบน และเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells) ได้อีกด้วย (<http://www.navy.mi.th/science/Webpage/newdocument/carbonnanotube.ppt>)

เพื่อที่จะพัฒนาการผลิตวัสดุผสมและลดปัญหาในกระบวนการการผสมและการขึ้นรูปยางคอมพอนด์ที่ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์จึงได้ก่อให้เกิดงานวิจัยนี้ โดยศึกษาและพัฒนากระบวนการในการผสมและการขึ้นรูปยางคอมพอนด์ โดยการใช้ CNTs เป็นสารเสริมแรง เพื่อนำไปใช้การผลิตเป็นชิ้นส่วนต่างๆ อีกทั้งเป็นการนำยางธรรมชาติซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่ภายในประเทศอย่างมากมาแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพดีในการใช้งานด้านต่างๆ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติ อีกทั้งยังไม่มีงานวิจัยในเรื่องนี้อย่างชัดเจนและเจาะจง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์
- 1.2.2 ศึกษาถึงอิทธิพลของการเติม CNTs ที่ปรับผิวและไม่ปรับผิวต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล และสมบัติอื่นๆในยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลของการใช้ CNTs เป็นสารเสริมแรงในยางคอมปอนด์ที่ผสมกันระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆดังนี้

- ปริมาณสัดส่วนในการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์
- ชนิดและปริมาณของ CNTs
- ปริมาณกำมะถันที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยาง

1.3.2 ศึกษาผลของการใช้เขม่าดำเป็นสารเสริมแรงในยางคอมปอนด์ที่ผสมกันระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้ CNTs เป็นสารเสริมแรง

1.3.3 ทดสอบสมบัติต่างๆของยางคอมปอนด์ได้แก่

- การทนทานต่อแรงดึง
- การต้านทานต่อการฉีกขาด
- การทนต่อสารละลายและน้ำมัน
- วิเคราะห์สมบัติต่างๆด้วย TGA, FTIR, DSC, XRD, DMTA และ SEM เป็นต้น

1.3.4 วิเคราะห์และสรุปผลการทำวิจัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

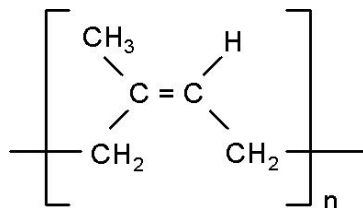
พัฒนากระบวนการในการผสมยางคอมปอนด์ที่ผสมกันระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ ก่อให้เกิดองค์ความรู้ในการผสมยางและผลิตวัสดุผสมให้มีสมบัติที่ดี เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการขึ้นรูปยางและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับงานที่ต้องการสมรรถนะสูงๆ เช่น ทนต่อการกดอัด ความดัน อุณหภูมิและสารเคมีได้ เป็นต้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) กล่าวคือในโมเลกุลยาง 1 โมเลกุลจะประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน (C_5H_8) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบเส้นตรง) ดังสูตรโครงสร้างทางเคมีที่แสดงในรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก ยางธรรมชาติมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93g/cm^3 ที่อุณหภูมิ 20°C และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72°C สมบัติของยางธรรมชาติจะเปลี่ยนจากที่เคຍยืดหยุ่นไปเป็นของแข็งเปราะเช่นเดียวกับแก้ว เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีนและเฮกเซน เป็นต้นโดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวก่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึกได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเอง (พงษ์ธร, 2548)



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ

(<http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=rubber-Chemist&month=12-2006&date=30&group=4&gblog=1>, 2008)

2.1.1 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

2.1.1.1 ความยืดหยุ่น (elasticity) เป็นลักษณะเด่นอีกประการหนึ่งของยางธรรมชาติกล่าวคือยางธรรมชาติที่คงรูปแล้วจะมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับยางหมดไป ยางจะกลับสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) ได้อย่างรวดเร็ว

2.1.1.2 ความเหนียวติดกัน (tack) ของยางธรรมชาติ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน ซึ่งเป็นสมบัติของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถยนต์ เป็นต้น

2.1.1.3 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และ ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูงจึงทำให้ยางสามารถแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกยืด ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงมาก โดยที่ไม่ต้องใช้สารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย (~ 20 MPa หรือสูงกว่านั้น) และมีความทนทานต่อการฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง

2.1.1.4 สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ของยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงพลวัตที่ดี มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำในระหว่างการใช้งานและมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมาก

2.1.1.5 ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ของยางธรรมชาติมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง แต่ยังคงน้อยกว่ายางเอสบีอาร์เล็กน้อย

2.1.1.6 ความเป็นฉนวน (insulation) ของยางธรรมชาติมีความเป็นฉนวนมากเช่นเดียว โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) สูงถึง $10^{15} - 10^{16}$ ohm.cm

2.1.1.7 ความทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance) เนื่องจากองค์ประกอบของยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้น ยางดิบจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน และโทลูอีน ยางธรรมชาติจึงไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ แต่ยางจะทนทานต่อของเหลวที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน หรือแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังทนต่อกรดและด่างเจือจางได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น

2.1.1.8 การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โดยมีแสงแดดหรือความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้น ยางธรรมชาติจึงถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย

2.1.1.9 การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility) ของยางธรรมชาติยังคงรักษาสมบัติความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการหักงอได้แม้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ๆ

2.1.1.10 การเสีรูปลหลังการกด (compression set) ยางธรรมชาติมีการเสีรูปลหลังการกดค่อนข้างต่ำทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามการเสีรูปลหลังการกดที่อุณหภูมิต่ำของยางธรรมชาติจะสูงขึ้นเนื่องจากยางอาจเกิดการตกผลึกทำให้ความยืดหยุ่นของยางเริ่มสูญเสียไป ในขณะที่ค่าการเสีรูปลหลังการกดที่อุณหภูมิสูงของยางธรรมชาติจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากยางธรรมชาติไม่ทนต่อความร้อน ยางจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งจะส่งผลทำให้สมบัติการเสีรูปลหลังการกดด้อยลง

2.1.1.11 การกระเด็นกระดอน (rebound resilience) ยางธรรมชาติมีสมบัติการกระเด็นกระดอนสูง และในระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ยางจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนน้อย ยางธรรมชาติจึงมีความร้อนสะสมต่ำเมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต

2.1.1.12 อุณหภูมิของการใช้งาน (service temperature) ยางธรรมชาติสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -55°C ถึง 70°C หากเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิต่ำนานๆยางอาจเกิดการตกผลึกซึ่งจะทำให้ยางแข็งขึ้นและเสียความยืดหยุ่น แต่เมื่ออุณหภูมิการใช้งานสูงเกินไป สมบัติเชิงกลต่างๆก็จะด้อยลงเนื่องจากความร้อนจะให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ (พงษ์ธร, 2548)

2.1.2 การใช้งาน

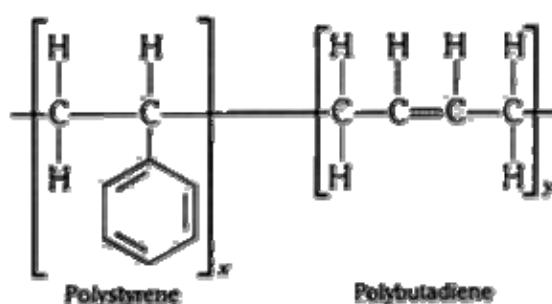
แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและ โอโซน โดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด (สารในกลุ่มของ antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขั้ว น้ำมันและสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับสารเคมีต่างๆ ดังกล่าว (พงษ์ธร, 2548)

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่ไม่มีขั้ว จึงสามารถผสมให้เข้ากันได้ดีกับยางที่ไม่มีขั้วชนิดต่างๆได้ดี เช่น ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) ยางพอลิไอโซพรีน (IR) และยางบิวตาไดอีน (BR) การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์จะเป็นการรวมเอาสมบัติที่ดีของทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ไว้ด้วยกัน กล่าวคือ สมบัติที่ดีของยางธรรมชาติที่จะถูกส่งผ่านไปให้ยางสังเคราะห์ ได้แก่ ความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี ความเหนียวติดกัน สมบัติเชิงพลวัต รวมถึงความร้อนสะสมที่ต่ำในระหว่างการใช้งาน ในทำนองเดียวกันสมบัติที่ดีของยางสังเคราะห์บางประการก็จะถูกถ่ายเทให้ยางธรรมชาติ เช่น ความต้านทานต่อการขีดถู ความทนทานต่อความร้อน ความทนทานต่อน้ำมัน ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากโอโซน

(http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rtu/information3_6.htm, 2008)

2.2 ยางสไตรีนบิวตาไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) หรือ ยางเอสบีอาร์

ยางเอสบีอาร์เป็นโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ของสไตรีน (styrene monomer) และมอนอเมอร์ของบิวตาไดอีน (butadiene monomer) ดังสูตรโครงสร้างทางเคมีที่แสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีปริมาณของสไตรีนอยู่ในช่วง 23-40% มอนอเมอร์ทั้งสองชนิดมีการจัดเรียงตัวไม่มีแบบแผน (random copolymer) นอกจากนี้ สายโมเลกุลของยางเอสบีอาร์ยังมีการจัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ทำให้ไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ยางจึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ เวลาใช้งานจึงจำเป็นต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงเข้าช่วย



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางเอสบีอาร์

(<http://www.ayt-rubber.com/material.html>)

ยางเอสบีอาร์ที่ใช้กันโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในรูปแบบของอิมัลชัน (emulsion polymerization) และยางที่ได้จะใช้ชื่อว่า E-SBR แต่ในบางกรณียางเอสบีอาร์ก็อาจผลิตได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในรูปของสารละลาย (solution polymerization) ได้เช่นกันและเรียกยางที่ได้ว่า L-SBR

ยาง E-SBR ยังแบ่งย่อยได้อีกเป็น 2 กลุ่มตามอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ ได้แก่ ยาง E-SBR แบบเย็น (cold rubber) ซึ่งใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ประมาณ 5°C และยาง E-SBR แบบร้อน (hot rubber) ซึ่งใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ประมาณ 50°C หรือสูงกว่านี้ (พงษ์ธร, 2548)

2.2.1 สมบัติทั่วไปของยางเอสบีอาร์

ยางเอสบีอาร์มีค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 0.93 g/cm³ เมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์มีคุณภาพเสมอกว่า การนำไปใช้งานและสมบัติของยางคงรูปจึงสม่ำเสมอ นอกจากนี้ ยางเอสบีอาร์ยังมีสิ่งเจือปนน้อยกว่า และที่สำคัญไม่ต้องบดขยี้ให้นุ่มก่อนทำการผสมยางเนื่องจากยางชนิดนี้ถูกสังเคราะห์มาให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่มาสสูงนัก ยางจึงมี

ความหนืดเหมาะสมที่ทำให้สารเคมีกระจายตัวได้ดีและยางสามารถไหลได้ง่ายในระหว่างการขึ้นรูปแบบต่างๆยิ่งกว่านั้น ยางเอสบีอาร์ยังมีแนวโน้มที่จะเกิดการสกอ์ชในระหว่างกระบวนการผลิตน้อยกว่ายางธรรมชาติ (less tendency to scorch in processing) เพราะยางเอสบีอาร์มีอัตราเร็วในการคงรูปช้ากว่า และถูกออกซิไดซ์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติ (ทนต่อความร้อนได้ดีกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย) ด้วยเหตุนี้ ยางเอสบีอาร์จึงมีข้อดีเหนือกว่ายางธรรมชาติโดยมีการกระบวนการแปรรูปที่ง่ายกว่า ประหยัดทั้งกำลังงานและเวลาตลอดจนต้นทุนการผลิต

2.2.1.1 ความเหนียวติดกัน (tack) ยางเอสบีอาร์มีสมบัติความเหนียวติดกัน ดังนั้นในการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภท เช่น ยางล้อรถยนต์ จึงจำเป็นต้องใช้ยางธรรมชาติที่มีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดีเข้าช่วย เช่น เรซินชนิดต่างๆลงไป

2.2.1.2 ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางเอสบีอาร์มีความยืดหยุ่นต่ำกว่ายางธรรมชาติ และค่าความยืดหยุ่นของยางจะลดลงหากยางมีปริมาณของสไตรีนสูงขึ้น

2.2.1.3 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และ ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) เนื่องจากยางเอสบีอาร์ไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อถูกยืด ยางชนิดนี้จึงมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำ (ต่ำกว่ายางธรรมชาติประมาณ 7-10 เท่าในสภาพที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมเสริมแรง)

2.2.1.4 ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ยางเอสบีอาร์ที่เสริมแรงด้วยสารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำ จะมีความต้านทานต่อการขัดถูสูงกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย (ประมาณ 10-20%)

2.2.1.5 ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (aging resistance) เนื่องจากยางเอสบีอาร์มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ดังนั้นยางเอสบีอาร์จึงเสื่อมสภาพเร็วในภาวะที่มีออกซิเจน โอโซน แสงแดด หรือความร้อนเช่นเดียวกับยางธรรมชาติแต่การเสื่อมสภาพของยางเอสบีอาร์จะแตกต่างจากยางธรรมชาติ กล่าวคือ เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน โอโซน หรือแสงแดด ยางจะมีลักษณะแข็งมากขึ้นเพราะเกิดการเชื่อมโยงของสายโมเลกุลและแตกร้า (chain scission)

2.2.1.6 ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี (oil and chemical resistance) ยางเอสบีอาร์จัดเป็นยางที่ไม่ขั้วเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ดังนั้นยางชนิดนี้จึงมีความทนทานต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายในไฮโดรคาร์บอนต่ำ

2.2.1.7 ความเป็นฉนวน (insulation) ยางเอสบีอาร์เป็นยางที่ไม่มีขั้วจึงมีความเป็นฉนวนสูงเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ โดยมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะอยู่ในช่วง $10^{14} - 10^{15}$ ohm.cm

2.2.1.8 การกระด้างกระดอน (rebound resilience) ยางเอสบีอาร์มีการกระด้างกระดอนต่ำกว่ายางธรรมชาติ กล่าวคือในระหว่างการเปลี่ยนรูปร่าง ยางจะมีการสูญเสียพลังงานใน

รูปของความร้อนสูง (มี hysteresis สูง) ดังนั้น เมื่อถูกใช้งานในเชิงพลวัต ยางเอสปีอาร์จึงมีความร้อนสะสมสูงกว่ายางธรรมชาติจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการผลิตยางล้อรถยนต์หรือยางล้อรถบรรทุกที่มีขนาดใหญ่ได้ เพราะความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นอาจสูงมากพอที่จะทำให้ยางเกิดการระเบิดได้

2.2.1.9 อุณหภูมิของการทำงาน (service temperature) โดยทั่วไปยางเอสปีอาร์สามารถนำไปใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -50°C ถึง 100°C และเนื่องจากยางเอสปีอาร์ไม่สามารถตกผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหายางแข็งตัวเมื่อเก็บไว้หรือเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลานานๆ (พงษ์ธร, 2548)

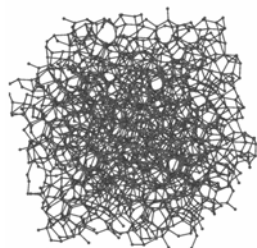
2.2.2 การใช้งาน

ยางเอสปีอาร์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายและสามารถใช้แทนยางธรรมชาติ ดังนั้น ยางเอสปีอาร์จึงถูกนำไปใช้ในการผลิตสายพาน พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อ ยาง ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ บรรจุก๊าซอาหาร และที่สำคัญคือยางชนิดนี้ส่วนมากจะถูกนำไปใช้อุตสาหกรรมผลิตยางล้อของยานพาหนะขนาดเล็กโดยใช้ผสมกับยางชนิดอื่นๆ (พงษ์ธร, 2548)

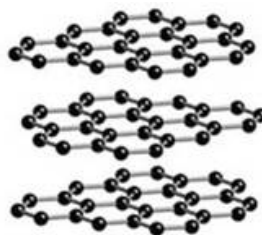
โดยทั่วไป องค์ประกอบของการผสมสารเคมีของยางเอสปีอาร์ก็เหมือนกับยางธรรมชาติอย่างไรก็ตาม เนื่องจากยางเอสปีอาร์ มีอัตราเร็วในการคงรูปช้ากว่ายางธรรมชาติ ดังนั้น จึงต้องทำการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูงกว่าหรืออาจจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น ยางเอสปีอาร์เป็นยางที่มีความเป็นขี้ตำ ดังนั้น จึงสามารถนำไปผสมกับยางที่ไม่มีขี้ตำชนิดต่างๆ ได้โดยง่าย เช่น ยางธรรมชาติ ยางบิวตาไดอิน (BR)

2.3 ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes, CNTs)

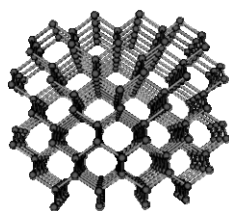
คาร์บอนมีโครงสร้างสี่แบบ ดังแสดงรูปที่ 2.3 ได้แก่ แบบอสัณฐาน (amorphous carbon) แบบกราไฟต์ (graphite) แบบเพชร (diamond) และ แบบบัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน (buckminster fullerene)



โครงสร้างของอสัณฐาน



โครงสร้างของกราไฟต์



โครงสร้างของเพชร



โครงสร้างของฟูลเลอร์ีน : C 60

รูปที่ 2.3 โครงสร้างต่างๆของคาร์บอน

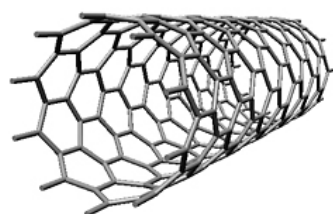
(<http://www.navy.mi.th/science/Webpage/newdocument/carbonnanotube.ppt>, 2008)

CNTs เพิ่งค้นพบในปี ค.ศ. 1991 กล่าวคือ มีลักษณะคล้ายกับ ฟูลเลอร์ีน ต่างกันที่ ฟูลเลอร์ีนมีโครงสร้างเป็นทรงกลม (spherical shape) แต่ CNTs มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก (cylindrical shape) ชื่อของ CNTs มาจากขนาดของมัน ซึ่งมีขนาดระดับนาโน (10^{-9} เมตร) หรือมีความกว้างประมาณ 1 ใน 10,000 ของความกว้างของเส้นผมมนุษย์ มีความยาวประมาณ 1 ล้านเท่า จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่า CNTs มีสมบัติเด่นคือ มีความแข็งแรงสูง ขนาดเล็ก มีการนำไฟฟ้าดีกว่า ทองแดง ตลอดจนมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าเพชรและกราไฟต์ CNTs มีด้วยกัน 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คือ ชนิดที่มีผนังซ้อนกัน 2 – 50 ชั้น เรียกว่า multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) และชนิดที่มีผนังชั้นเดียวหรือเป็นท่อเดี่ยว เรียกว่า single-walled carbon nanotubes (SWNTs) (<http://www.navy.mi.th/science/Webpage/newdocument/carbonnanotube.ppt>, 2008) ซึ่งมีสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สมบัติของ CNTs (<http://www.Digital Library.htm>, 2008)

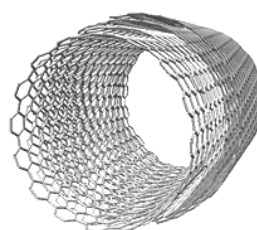
(<http://www.nsr.u.ac.th/science/article/showarticle.asp?id=0000000012>, 2008)

| สมบัติ | รายละเอียด |
|--------------------|--|
| ความแข็งแรง | มีความแข็งแรงมากกว่าเพชรเพราะว่า CNTs มีพันธะระหว่างระนาบ และพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนที่แข็งแรง |
| ค่ามอดูลัส | CNTs มีค่าสูงถึง 1 เทอราปาสคาล (TPa) หรือ 1000 กิกะปาสคาล (GPa) |
| ความทนทานต่อแรงดึง | ความแข็งแรง ของ CNTs มีค่าอยู่ระหว่าง 11-63 GPa ขณะที่ค่าความแข็งแรงของเหล็กกล้าอัลลอยมีเพียง 2 GPa |
| การยืดตัวก่อนขาด | SWNTs สามารถยืดตัวได้ถึง 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ก่อนที่จะขาดออกจากกัน |
| ความหนาแน่น | SWNTs มีพื้นที่ผิวได้ถึง $1500 \text{ m}^2/\text{g}$ โดยมีความหนาแน่น $1.33\text{-}1.40 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมที่มีความหนาแน่นสูงถึง 2.7 g/cm^3 |
| การนำไฟฟ้า | การนำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดง มัดหนึ่งของ CNTs สามารถนำไฟฟ้าได้ถึง 10^9 A/cm^2 ขณะที่ทองแดงได้สูงสุดเพียง 10^6 A/cm^2 |
| การนำความร้อน | MWNTs > 3,000 W/m.K, SWNTs ~ 6,000 W/m.K (มากกว่าเพชรและกราฟไฟต์ 2,000 W/m.K) |
| การทนความร้อน | ในสุญญากาศ : ~ 2,800 °C และ ในอากาศปกติ : ~ 750 °C |



single-walled carbon nanotubes

(SWNTs)



multi-walled carbon nanotubes

(MWNTs)

รูปที่ 2.4 ชนิดของ CNTs

(<http://www.pharmacy.uwaterloo.ca/.../about/index.html>, 2008)

ตารางที่ 2.2 สมบัติของ SWNTs และ MWNTs (<http://www.thaiscience.com/lab.vol/p13cabon%20nanotubes.htm>, 2008)

| Single-walled CNTs (SWNTs) | Multi-walled CNTs (MWNTs) |
|--|--|
| มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อกลวง ซึ่งเหมือนการม้วนแผ่น กราเฟน (graphene sheet) ให้เป็นท่อทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางนั้นมีขนาดประมาณ 0.4-2.0 nm โครงสร้างของ SWNTs นั้นยังสามารถแบ่งออกเป็นอีก 3 ชนิดตามลักษณะการม้วน ซึ่งได้แก่ Armchair, Zigzag และ Chiral | เป็นการซ้อนกันของท่อหลายๆ ชั้น โดยที่แต่ละชั้นอยู่ห่างกันประมาณ 0.34 nm เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของ MWNTs นั้นมีขนาดประมาณ 1.5-15 nm ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกนั้นมีขนาดประมาณ 2.5-30 nm |

2.3.1 การสังเคราะห์ CNTs

จากการศึกษารายงานวิจัยพบว่าเทคนิคการสังเคราะห์ CNTs นั้นมีด้วยกันหลายวิธีขึ้นอยู่กับสมบัติของ CNTs ที่ต้องการ แต่สำหรับวิธีที่มีประสิทธิภาพนั้นมี 3 วิธี (สุรวุฒิ และคณะ, 2548; Bokobza, 2007; Merkoci, et al., 2006; Paradiseet, al., 2007; Yeetsorn, et al., 2004; www.thaiscience.com, 2008) โดยแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังสรุปในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปกระบวนการสังเคราะห์ CNTs 3 วิธีหลัก

(www.thaiscience.com/lab.vol/p13cabon%20nanotubes.htm, 2008)

| วิธี | Arc discharge | Laser ablation | CVD |
|-------------------|---|--|---|
| วิธีการสังเคราะห์ | ใช้กระแสไฟสูงประมาณ 100 แอมแปร์ระหว่างแท่งกราไฟต์ที่อยู่ห่างกันเพียง 2 mm เพื่อให้เกิดพลาสมา ร้อนขึ้น CNTs จะก่อตัวขึ้นจาก C ที่แตกตัว (ส่วนมากจะสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ ซีเลียม) | ใช้เลเซอร์พลังสูงยิงใส่แท่งคาร์บอนที่มีโลหะผสมทำให้เกิดการระเหยของ C จากนั้น CNTs ก็ก่อรูปขึ้น โดยส่วนมากสังเคราะห์ในบรรยากาศของก๊าซ Ar ที่อุณหภูมิ ~ 1,200 °C | เป็นการแยกก๊าซที่มี C เป็นส่วนผสม (เช่น มีเทน) โดยใช้ความร้อนหรือพลาสมา เข้าช่วยมีโลหะเป็นตัวเร่ง (อุณหภูมิ ~ 400-1,200 °C) |
| ประสิทธิภาพ | 30~90% | มากกว่า 70% | 20~90% |
| SWNTs | - ขนาดสั้น | - ขนาดยาว (5~20 nm) | - ขนาดยาวมาก |

| | | | |
|---------|---|---|--|
| | - เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6~1.4 nm | - เส้นผ่านศูนย์กลาง 1~2 nm | - เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6~4 nm |
| MWNTs | - ขนาดสั้น - เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1~3 nm - เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ~10 nm | ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์ MWNTs | - ยาวมาก (> 20 nm) - Ø: 10~200 nm |
| ข้อดี | - วิธีที่ง่าย ค่าใช้จ่ายถูก - มีรอยตำหนิน้อย - สามารถสังเคราะห์ MWNTs ได้โดยไม่ต้องใช้โลหะเป็นตัวเร่ง - สามารถทำได้ในความดันบรรยากาศห้อง | - ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่เป็น SWNTs - ความบริสุทธิ์สูง - ท่อที่ได้มีรอยตำหนิน้อย | - สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น - ขนาดของ SWNTs ยาว - กำหนดทิศทาง ตำแหน่งของท่อได้ง่าย - ความบริสุทธิ์ - สังเคราะห์ในเชิงอุตสาหกรรมได้ |
| ข้อเสีย | - ความยาวของท่อสั้น และขนาดไม่สม่ำเสมอ - มีสิ่งเจือปนค่อนข้างมาก | - เป็นวิธีที่แพงเนื่องจากต้องใช้เลเซอร์ที่มีกำลังสูง | - เมื่อเทียบกับวิธียิงด้วยเลเซอร์ ท่อที่ได้มีรอยตำหนิอยู่บ้าง แต่ไม่มาก |

2.4 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend)

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (solution) หรือ สารหลอมเหลว (molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติแล้วจะเป็นไปได้ยาก ดังนั้น พอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้น จะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (defects) ของผลิตภัณฑ์ และส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์ 2

ชนิดเข้ากันไม่ได้ นั่นคือ พลังงานที่ใช้ในการผสมผสาน โมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่ต่างกัน

2.4.1 กลไกสภาพเข้ากันได้ (Compatibility Mechanism)

พอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจาก แรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและความเค้นสะสม (stress concentration) จากคิสเพอร์สในเมทริกซ์ ดังนั้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสม จึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (in-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานวิทยาและสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม

2.4.2 วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of Compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความสามารถในการเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้น การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้คือ

2.4.2.1 การพิจารณาสภาพผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์

(Thermodynamic Miscibility)

ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นหลักการที่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางการค้า โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับสมมูลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

โดยที่

$$\Delta G = \text{การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม}$$

$$\Delta H = \text{การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม}$$

$$\Delta S = \text{การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม}$$

$$T = \text{อุณหภูมิ (K)}$$

2.4.2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of Block or Graft

Copolymers)

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคานานิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกัน

กับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของ พอลิเมอร์แต่ละชนิด โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์
2. ไคบล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าไตรบล็อกโคพอลิเมอร์
3. ไคบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมามี

ประสิทธิภาพสูงกว่าไคบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

2.4.2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา

(Addition of Functional/Reactive Polymers)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม บ่อยครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไอออนิก กับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือโดยผ่านกระบวนการอัดรีด ตัวอย่างเช่น มาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่กราฟต์บนสายโซ่ของพอลิโอฟีนีส โดยหมู่คาร์บอกซิลิกของมาเลอิกแอนไฮไดรด์มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับหมู่อะมิโนของพอลิเอไมด์ได้ ทั้งนี้พอลิโอฟีนีสกราฟต์มาเลอิกแอนไฮไดรด์จัดเป็นสารช่วยผสม ที่ได้รับความนิยมในทางการค้าและมีราคาไม่แพงนัก

2.2.5 การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไฮบริดในระหว่างการ

ผสม (In-situ Grafting Polymerization)

การทำให้เกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์หรือพอลิเมอร์ไฮบริดในระหว่างการผสม หรือ reactive blending เป็นวิธีใหม่ที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ให้เข้ากันได้ โดยต่างจากวิธีอื่นๆ คือ องค์ประกอบที่ทำการผสมจะถูกนำมาดัดแปรเพื่อให้อาจเกิดปฏิกิริยากับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยผสม ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอนเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการผสมแบบต่อเนื่องเช่น การอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว (single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจากดำเนินไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่ากลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการผสม อาจมีได้ดังนี้

1. เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่ม (initiator) ในระหว่างการผสม
2. เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น
3. เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละโมเลกุล เพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่แรงเฉือนสูง
4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

(http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_5_2548_polymer_blend.pdf, 2551)

2.5 กระบวนการบดผสมยาง

2.5.1 การบดยาง (Mastication of Rubber)

Mastication หมายถึง การทำให้ยางมีขนาดเล็กลงโดยการบด โดยปรกติยางแผ่นดิบ (ธรรมชาติ) มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย (Mw) สูงประมาณ 1 ล้าน ซึ่งสูงเกินไปที่จะนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ ยางดิบดังกล่าวนี้มีความยืดหยุ่นสูง เรียกว่ามี “nerve” ทำให้ยางไม่ไหลไปในทางที่ต้องการ เป็นเหตุให้แปรรูปได้ยาก จำเป็นต้องลด “nerve” ลง

การบดยางธรรมชาติจะให้โมเลกุลของยางเล็กลงจนนำไปแปรรูปได้ (Subramaniam, 1980) ส่วนยางสังเคราะห์เป็นยางที่ไม่ต้องทำการบดยางเพราะการสังเคราะห์นั้นได้ทำการควบคุมให้มีขนาดโมเลกุลตามต้องการอยู่แล้ว เช่นยางเอสปีอาร์ 1500 จะมี Mw ประมาณ 320,000 (Saltman, 1973)

การผสมยาง (rubber mixing) เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการแปรรูปยาง ทำให้ยางดิบเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งสมบัติทางฟิสิกส์และองค์ประกอบทางเคมี เริ่มต้นด้วยการบดยางให้นิ่มลงแล้วจึงทำการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไป โดยที่สารเคมีเหล่านี้จะช่วยทำให้ยางแปรรูปได้ง่ายขึ้นหรือเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในบับปลายมีสมบัติตามที่ต้องการ สารเคมีดังกล่าวอาจเป็นตัวเติม (filler) หรืออาจเป็นตัวทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) เป็นต้น

เครื่องมือหลักที่ใช้ในการผสมก็คือเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (two roll mill) กับเครื่องผสมยางแบบปิด (internal mixer) ยางที่ผสมสารเคมีเข้าไปแล้วเรียกว่า ยางผสมสารเคมี (rubber compound หรือ compound หรือ mix) แต่ยางที่ผสมสารเคมีเพียงตัวเดียวหรือสองตัวมีชื่อพิเศษว่า “masterbatch” ตัวอย่างเช่น 50% กำมะถัน masterbatch หมายถึง ยางดิบที่มีกำมะถันผสมอยู่ 50 ส่วนใน Compound 100 ส่วน เป็นต้น masterbatch จะใช้ในกรณีที่สารเคมีดังกล่าวอาจจะ

กระจายในยางได้ไม่ดี หรือใช้ในกรณีที่มีการใช้สารเคมีนั้นน้อยมาก อาจจะทำให้เกิดการผิดพลาดได้ง่าย ถ้าสารเคมีฟุ้งกระจายหายไป เป็นต้น

ยางและสารเคมีที่ใช้ในการผสมจะมีสัดส่วนที่แน่นอนตามสูตร (compound recipe) โดยทั่วไปปริมาณที่ใช้จะบอกเป็นน้ำหนักเมื่อเทียบกับยางหนัก 100 ส่วน เรียกว่า phr หรือ pphr (parts per hundred rubber) น้ำหนักขององค์ประกอบ phr นี้จะเป็นหน่วยน้ำหนักก็ได้ เช่น กรัม กิโลกรัม หรือปอนด์ เป็นต้น เช่นการใช้กรดสเตียริก 1 phr จะหมายถึงถ้ามียาง 100 กิโลกรัมก็จะใช้กรดสเตียริก 1 กิโลกรัม

ก่อนที่จะชั่งสารเคมีและยาง จะต้องคำนวณขนาดของ compound ทั้งหมด (batch size) ที่เหมาะสมกับเครื่องจักรที่จะใช้งานก่อน เพราะเครื่องแต่ละเครื่องมีความสามารถทำงานได้ไม่เท่ากัน เช่น เครื่องบดยางสองลูกกลิ้งขนาด 10X20 นิ้ว มีมอเตอร์ขับเคลื่อนขนาด 15-20 กำลังม้าจะสามารถผสมยางได้ครั้งละประมาณ 5-8 ปอนด์ (2.2-3.6 กิโลกรัม) เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้ สมมติให้เลือกขนาด batch เท่ากับ 2.9 กิโลกรัม จะได้ตัวคูณ (multiplying factor, MF) เพื่อบอกถึงจำนวนเท่าของสูตรที่จะต้องใช้อย่างจริง

นอกจากประเด็นเกี่ยวกับขนาด batch เวลาการบดยาง และเวลาการผสมยางแล้ว ประเด็นเกี่ยวกับความไม่สม่ำเสมอของสารเคมีที่กระจายอยู่ในยาง ก็มีความสำคัญอย่างมาก เพราะถ้าสารเคมีกระจายในยางอย่างสม่ำเสมอจนเป็นเนื้อเดียวกันตลอด (homogeneous compound) จะทำให้ได้ยางที่มีสมบัติทางฟิสิกส์สม่ำเสมอและดีที่สุดสำหรับสูตรหนึ่งๆ การที่จะให้สารเคมีกระจายอยู่ในยางได้สม่ำเสมอนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขพลาสติกซีดีของยาง ถ้ายางแข็งเกินไปสารเคมีก็ไม่อาจจะแทรกตัวกระจายในยางได้ แต่ถ้ายางนิ่มเกินไปสารเคมีที่เกาะตัวเป็นก้อน (aggregate) จะไม่เกิดการแตกกระจาย ดังนั้นลำดับการใส่สารเคมีตัวเดิมและน้ำมัน จะต้องทำให้ถูกต้องตามลำดับเพื่อไม่ให้ยางแข็งหรือนิ่มจนเกินไปในขณะผสมนั้น

อนึ่งถ้าหากการผสมสารเคมีนี้ได้หยุดลง ในขณะที่ยังมีสารเคมีที่เกาะตัวเป็นก้อนนี้ ยางก็จะห่อหุ้มสารเคมีที่เกาะตัวเป็นก้อนไว้แน่น ซึ่งไม่อาจแตกกระจายตัวออกไปได้ในการบดยางอีกในภายหลัง ดังนั้น การผสมทุกครั้งควรทำการบดให้ aggregate แตกจนหมดเทคนิคที่ทำให้สารเคมีกระจายในยางได้ดี ขึ้นอยู่กับการจัดให้มีแบงก์ (bank) การม้วนยาง การตัดยาง และระยะเวลาการผสม โดยมีรายละเอียดดังนี้ ในการผสมยางบนลูกกลิ้งนั้นจะต้องจัดระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งและระยะห่างระหว่าง ไกด์ (guide) ให้เหมาะสม เพื่อให้ยางเหลือเป็นแบงก์เล็กน้อยอยู่เสมอจากการศึกษากระบวนการผสมยางบนลูกกลิ้งพบว่า (Naunton, 1960) ถ้าไม่มีแบงก์แรงที่กระทำต่อยางที่ผ่านลูกกลิ้ง จะมีเพียงแรงอัดที่กระทำในทิศที่ตั้งฉากกับผิวของแผ่นยางเท่านั้น ดังนั้นการผสมจึงเกิดขึ้นเฉพาะตามผิวของแผ่นยาง แต่ไม่เกิดการผสมตามความหนาในระดับลึกลงไปเลย แต่ถ้าให้มีแบงก์อยู่จะทำให้ชั้นบนสุดของแผ่นยางม้วนตัวเกิดเป็นลอนขึ้น ทำให้สารเคมีแทรกเข้าไปใน

ระหว่างลอนนี้ได้ แล้วจึงถูกดึงโดยแรงเฉือนเข้าไปอยู่ภายในยางเมื่อผ่านลูกกลิ้ง ดังนั้นการเกิดแบงก์จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการผสมตามแนวรัศมีหรือตามความหนาของแผ่นยางได้ อย่างไรก็ตามการม้วนตัวของยางบนแบงก์ก็ไม่สามารถทำให้สารเคมีเข้าไปผสมได้ตลอดความหนาของยาง จำเป็นจะต้องมีการตัดพลิกหน้ายาง และต้องมีการตัดยางม้วนเป็นแท่ง แล้วใส่เข้าไปในลูกกลิ้งใหม่ ประกอบไปด้วย การผสมจึงจะเกิดได้อย่างสม่ำเสมอทั่วถึงทั้งก้อน (บุญธรรม และ ปรีชา, 2534)

2.5.2 กลไกการผสมยาง

จุดประสงค์หลักของการผสมเคมียางก็เพื่อให้สารเคมีที่เป็นองค์ประกอบต่างๆ ผสมเข้าไปในยางได้อย่างทั่วถึง (กระจายตัวในยางได้ดี) อย่างไรก็ตามเนื่องจากองค์ประกอบของการผสมเคมียางมีหลากหลายชนิด บางชนิดก็สามารถละลายเข้าไปในยางได้ง่ายโดยเฉพาะเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงในระหว่างการผสม แต่องค์ประกอบบางชนิดก็ไม่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อยาง ตัวอย่างที่สำคัญขององค์ประกอบที่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อยาง ได้แก่ กำมะถัน สารตัวเร่งปฏิกิริยา สารป้องกันการเสื่อมสภาพ รวมถึงสารกระตุ้นปฏิกิริยาของรูป เช่น ซิงก์สเตียเรต เป็นต้น แม้ว่าซิงก์ออกไซด์จะไม่สามารถละลายในเนื้อยางได้ แต่ถ้ามีการใช้ซิงก์ออกไซด์ร่วมกับกรดสเตียริก สารเคมีทั้ง 2 ชนิดจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นเกลือซิงก์สเตียเรตที่สามารถละลายในยางได้ โดยทั่วไประดับความสามารถในการละลายขององค์ประกอบเหล่านี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิของการผสมสูงขึ้น ระดับหรือความสามารถในการละลายของสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบเหล่านี้จะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น การผสมองค์ประกอบเหล่านี้เข้าไปในเนื้อยางจึงเป็นไปได้ง่ายและไม่มีปัญหาในเรื่องของการกระจายตัวมากนัก แต่สำหรับองค์ประกอบอื่นๆที่ไม่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อยาง เช่น สารตัวเติมชนิดต่างๆ การผสมองค์ประกอบเหล่านี้เข้าไปในเนื้อยางจะเป็นไปด้วยความยากลำบากเพราะทั้งยางและองค์ประกอบเหล่านี้ต่างก็อยู่ในสถานะของแข็งที่ไม่สามารถละลายในกันและกันได้ ด้วยเหตุนี้ การผสมยางส่วนใหญ่จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะทำให้สารตัวเติมแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ดี โดยเฉพาะสารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำ และซิลิกา เพราะสารตัวเติมเหล่านี้มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวที่จำเพาะสูง) ทำให้แตกและกระจายตัวในยางได้ยากเนื่องจากสารตัวเติมเสริมแรงชอบอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่าแอกโกลเมอเรต (agglomerate) และในแต่ละแอกโกลเมอเรตยังประกอบไปด้วยกลุ่มก้อนขนาดเล็กหลายๆก้อนมาเกาะกันอยู่อย่างหลวมๆด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (van der waal's) หรือพันธะไฮโดรเจน (H-bond) เรียกกลุ่มก้อนขนาดเล็กเหล่านี้ว่า (aggregate) โคนที่แอกกรีเกต 1 ก้อนจะเกิดจากอนุภาคปฐมภูมิหลายๆอนุภาคมาอยู่รวมกันด้วยพันธะทางเคมีที่แข็งแรงหรือเกิดการหลอมรวมกันที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคมาอยู่รวมกันด้วยพันธะทางเคมีที่แข็งแรงหรือเกิดการหลอมรวมกันที่บริเวณพื้นผิวของ

อนุภาคพลาสมา ด้วยเหตุนี้ กลไกของการผสมเข้ากับสารตัวเติมเสริมแรงจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักๆ ได้แก่

1. การเข้าเนื้อของสารตัวเติม (incorporation หรือ wetting)
2. การกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง (distribution)
3. การแตกตัวของสารตัวเติม (dispersion)

2.5.3 การเข้าไปในเนื้อของสารตัวเติม

หลังจากที่ยางถูกบดขยี้ด้วยกระบวนการบดจนมีค่าความหนืดต่ำเพียงพอที่จะรับสารตัวเติมแล้ว ผู้ผสมก็จะทำการเติมสารตัวเติมลงไป โดยที่สารตัวเติมที่เติมลงไปนี้จะเข้าไปรวม (incorporate) กับเนื้อยางโดยผ่านกลไก 2 แบบดังนี้ ในกลไกแรก ยางที่ได้รับแรงเฉือน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงเฉือน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางดังกล่าวจะทำให้ยางมีพื้นที่ที่จะสัมผัสกับสารตัวเติมสูงขึ้น และเมื่อแรงเฉือนที่มากระทำกับยางหมดไปยางก็จะคลายตัวกลับคืนสู่สภาพที่ไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโอบล้อมเอาสารตัวเติมไว้ภายในยาง ส่วนในกลไกที่สอง ยางขึ้นขนาดใหญ่ที่ได้รับแรงเฉือนสูงๆ จะเกิดการฉีกขาดได้เป็นยางที่มีขนาดเล็กลงจากนั้นยางชิ้นเล็กๆ เหล่านี้ก็จะเข้าไปโอบล้อมเอาสารตัวเติมไว้ภายในยางเช่นกัน กลไกแบบแรกเป็นกลไกในระดับมหภาคจึงสามารถสังเกตเห็นได้ง่าย แต่กลไกแบบหลังเป็นกลไกในระดับจุลภาคจึงไม่สามารถเห็นได้

ขั้นตอนการเข้ารวมกันระหว่างยางและสารตัวเติมเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “wetting” โดยทั่วไปแล้ว ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเข้ารวมตัวกันระหว่างยางกับสารตัวเติมคือระดับความชื้นของสารตัวเติม กล่าวคือยางที่ไม่มีชื้นจะเข้ากันได้ดีกับสารตัวเติมที่ไม่มีชื้นหรือสารตัวเติมที่มีชื้นต่ำ ในทำนองเดียวกันยางที่มีชื้นสูงก็จะเข้ากันได้ดีกับสารตัวเติมที่มีชื้นสูง (บุญธรรม และ ปรีชา, 2534)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากสมบัติที่ดีเยี่ยมในหลายด้านของ CNTs ทั้งสองชนิด (SWNTs และ MWNTs) จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย เช่น การเสริมแรงในวัสดุผสมเพื่อใช้เป็นถังบรรจุไฮโดรเจน Field emission sources ซุปเปอร์แคปาซิเตอร์ และเครื่องรับรบกวนระดับโมเลกุล มีงานวิจัยจำนวนมากที่นำ CNTs มาเป็นตัวเสริมแรงในวัสดุ และที่นักวิทยาศาสตร์ดำเนินงานวิจัยกันอย่างต่อเนื่องก็คือ การนำมาประยุกต์เป็นตัวเสริมแรงในวัสดุกลุ่มพอลิเมอร์ (Chen et al., 2006; Guo et al., 2005; Kim et al., 2006; Kueseng et al., 2006; Lu et al., 2006; Shanmugaraj et al., 2007; Xiao et al., 2007; Yue et al., 2006)

กระบวนการเตรียมวัสดุผสมพอลิเมอร์-CNTs (Moniruzzaman et al, 2006) นั้นมีวิธีการเตรียมหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมมี 3 วิธี ก็คือ การทำเป็นสารละลาย (solution) การหลอม (melt) และ In situ polymerization โดยแต่ละวิธีมีรายละเอียดพอสรุปดังนี้

1) การทำเป็นสารละลาย เป็นวิธีที่นิยมกันเพราะว่าตัวอย่างที่ใช้เตรียมจะมีขนาดเล็กและเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการของวิธีนี้สามารถสรุปได้ดังนี้ ขั้นแรกทำให้ CNTs กระจายตัวในสารละลายและนำมาผสมกับพอลิเมอร์ โดยการผสมกันนั้นอาจจะผสมที่อุณหภูมิห้องหรือสูงกว่าก็ได้ จากนั้นก็นำมาหล่อเป็นฟิล์มบางก็จะได้เป็นชิ้นงานตามต้องการ (การทำให้ CNTs กระจายตัวนั้นอาจจะใช้เครื่องกวนผสมหรืออัลตราโซนิกช่วย)

2) การหลอม เป็นวิธีการที่ต้องใช้แรงเฉือนที่สูงเพื่อทำให้ CNTs เกิดการกระจายตัวในพอลิเมอร์ แต่หากเปรียบเทียบกับกระบวนการทำเป็นสารละลาย พบว่ากระบวนการนี้มีประสิทธิภาพน้อยกว่า เพราะว่าเมื่อผสม CNTs ลงไปจะส่งผลให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการกระจายตัวเป็นไปได้ยากกว่า

3) In Situ Polymerization เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาในระดับโมโนเมอร์ (monomer) ส่งผลให้มีการกระจายตัวที่ดีเยี่ยมของ CNTs แต่กระบวนการโดยสรุปแล้วจะค่อนข้างยุ่งยาก โดยพอสรุปได้ดังนี้ ขั้นแรกเริ่มโดยการทำให้ CNTs กระจายตัวใน โมโนเมอร์ แล้วทำให้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ด้วยกระบวนการควบแน่น (condensation reaction)

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุผสมพอลิเมอร์-CNTs ดังนั้นจึงขอยกตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปดังนี้ เช่น

การเติม CNTs ชนิดผนังหลายชั้นลงในไนลอน 6 (nylon 6) (Chen et al., 2006) โดยใช้กระบวนการหลอม ซึ่ง CNTs ก่อนนำมาผสมนั้นได้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยกรด และปรับสภาพผิว (functionalization) มาก่อน เมื่อเตรียมชิ้นงานแล้วได้ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าการผสม CNTs 2 % โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้ค่าการทนทานต่อแรงดึง โมดูลัส และความแข็งแรงสูงสุด

การใช้ CNTs ชนิดผนังหลายชั้นเป็นตัวเสริมแรงในพอลิแอนิไลน์ (polyaniline, PANI) (Gua et al, 2005) โดยกระบวนการในการเตรียมวัสดุผสมนั้นใช้กระบวนการ In situ polymerization และปริมาณ CNTs ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ได้แก่ 0, 2, 4 และ 8 % โดยน้ำหนัก เมื่อเตรียมชิ้นงานแล้วก็นำมาศึกษาสมบัติที่สนใจ และตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุผสมโดยเปรียบเทียบกับ PANI ที่ไม่มีการเติม CNTs พบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าให้เพิ่มขึ้นได้ ที่เป็นเช่นนี้เพราะเนื่องมาจากการกระจายตัวที่ดีของ CNTs ใน PANI และปฏิกิริยาที่ติระหว่าง CNTs กับ PANI

Kim และคณะ (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติกายภาพเชิงความร้อนของพอลิโพรพิลีน (polypropylene, PP) ที่มี CNTs ชนิดผนังหลายชั้นเป็นตัวเสริมแรง ซึ่งในการเตรียมวัสดุผสมได้ใช้กระบวนการหลอมเป็นกระบวนการเตรียมชิ้นงาน และ CNTs ที่ใช้ในการทดลองมี 3 ประเภท ได้แก่ CNTs ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยกรดไนตริก โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และ CNTs ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว โดยปริมาณ CNTs ที่ใช้คือ 0.1, 0.5, และ 2 % โดยน้ำหนัก หลังจากนำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติตามที่สนใจพบว่า ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ CNTs ทั้ง 3 ประเภท และ CNTs ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยกรดไนตริก จะให้ค่า สภาพการนำความร้อนสูงสุด เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่ดีระหว่าง CNTs กับ PP นั่นเอง

Xiao และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเชิงกล และสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) ที่มี CNTs ชนิดผนังหลายชั้นเป็นตัวเสริมแรง ซึ่งในการเตรียมวัสดุผสมได้ใช้กระบวนการหลอมโดยใช้เครื่องผสมเพื่อผสม CNTs LDPE และสารเคมี โดยปริมาณ CNTs ที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ 0, 1, 3, 5 และ 10 % โดยน้ำหนัก ผลของการทดลองพบว่าเมื่อผสม CNTs 10 % โดยน้ำหนัก ลงใน LDPE จะเป็นปริมาณที่ดีที่สุดที่จะส่งผลให้สมบัติต่างๆ มีค่าสูงสุด เช่น ค่ามอดูลัส และค่าความทนทานต่อแรงดึง โดยเพิ่มขึ้นเท่ากับ 85% และ 46% ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะเนื่องมาจากสมบัติที่ดีเยี่ยมของ CNTs และการทำปฏิกิริยาที่ดีระหว่าง CNTs กับ LDPE

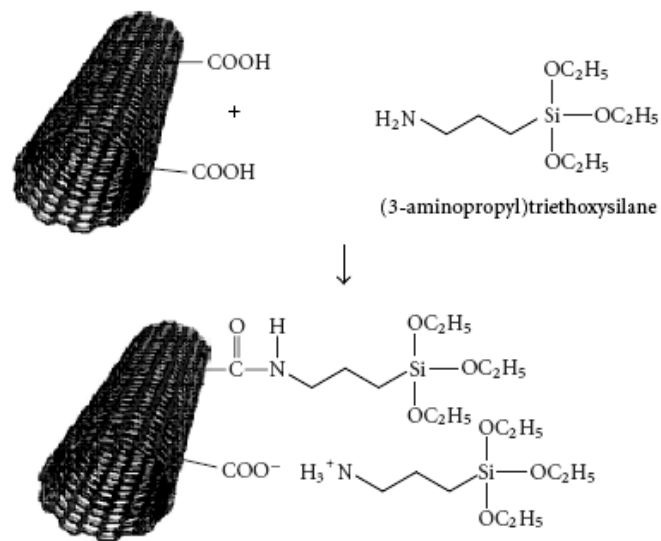
จากตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุผสมระหว่างพอลิเมอร์-CNTs ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อผสม CNTs ชนิดผนังหลายชั้น ลงไปในพอลิเมอร์นั้น สามารถเพิ่มสมบัติต่างๆ ของวัสดุผสมได้ เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาที่ดีระหว่าง CNTs กับพอลิเมอร์ และการกระจายตัวของ CNTs

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมระหว่างยาง-CNTs จากการสืบค้นนั้นพบว่ามิงงานวิจัยไม่มากนักที่จะนำเสนอเกี่ยวกับเรื่องนี้ ดังนั้นจึงเป็นงานวิจัยที่ยังใหม่อยู่ ตัวอย่างงานของวิจัยด้านนี้ได้แก่ Yue และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมและสมบัติของยางที่ใช้ CNTs เป็นตัวเสริมแรง ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ได้เตรียมวัสดุผสมจาก 2 กระบวนการคือ กระบวนการแรกเป็นกระบวนการหลอม โดยการผสม CNTs ลงไปในยางไนไตรล์ (HNBR) และสารเคมีสำหรับยางด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง หลังจากนั้นก็นำไปทำการวัลคาไนเซชันที่อุณหภูมิ 170°C จากนั้นก็นำชิ้นงานไปทดสอบสมบัติต่างๆ ตามต้องการ และกระบวนการที่สองคือกระบวนการทำเป็นสารละลาย โดยขั้นแรกนำยาง HNBR มาละลายในอะซิโตน แล้วนำมาผสมกับ CNTs จากนั้นก็นำไปทำให้เกิดการกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิก แล้วทำให้แห้ง หลังจากนั้นก็นำไปผสมสารเคมีบนเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง และกระบวนการอื่นเหมือนกระบวนการแรก โดยปริมาณ CNTs ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เท่ากับ 2, 7, 15 และ 25 phr

ผลจากการทดลองครั้งนี้พบว่า กระบวนการที่สองเป็นกระบวนการที่ให้ค่าสมบัติเชิงกลที่สูงกว่า กระบวนการแรกเพราะเนื่องมาจาก CNTs มีการกระจายตัวที่ดีกว่าจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงกว่า และจากการทดลองยังพบอีกว่า เมื่อมีการผสม CNTs ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่าความแข็งค่าทนทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด และค่าการเสียรูปหลังการกดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากการกระจายตัวของ CNTs ในยางดี และมีเกาะกันที่ดีระหว่าง CNTs กับยาง

งานวิจัยของ Shanmugharaj และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของ CNTs ชนิดผนังหลายชั้นที่มีผลต่อสมบัติของยางธรรมชาติ ซึ่ง CNTs ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มี 2 ประเภทได้แก่ CNTs ที่ไม่มีการปรับปรุงผิว กับ CNTs ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยไซเลน (silane) โดยปริมาณ CNTs ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 1 กรัม ซึ่งกระบวนการในการเตรียมวัสดุผสมในการทดลองนี้ได้ใช้กระบวนการหลอม โดยการผสม CNTs ลงไปในยาง และสารเคมีสำหรับยางด้วย เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง หลังจากนั้นก็นำไปทำการวัลคาไนเซชัน ผลการทดลองพบว่าการใช้ CNTs ที่ผ่านการปรับปรุงผิวนั้นจะเพิ่มสมบัติต่างๆ ที่ทดสอบในการทดลองครั้งนี้สูงกว่า CNTs ที่ไม่ปรับปรุงผิวเพราะว่าเกิดการเกาะที่ดีกว่าระหว่าง CNTs กับยาง ขั้นตอนการปรับปรุงผิว CNTs ด้วยไซเลนมีวิธีการดังนี้

- 1) ชั่ง Acid-Modified CNTs : Silane (w/w)
- 2) เตรียม อะซีโตน 200 ml ใส่บีกเกอร์
- 3) ใส่ CNTs และ Silane ที่ชั่งไว้ลงในอะซีโตน
- 4) นำไปวางบน Hotplate ให้ความร้อน 80°C เป็นเวลา 30 นาที (กวนสารละลายตลอดเวลา)
- 5) นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง
- 6) นำ CNTs ที่อยู่ในกระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 7) ชั่งน้ำหนัก CNTs ที่ได้



รูปที่ 2.5 การจับยึดกันระหว่างไซเลนกับ CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด
(Siu-Ming Yuen et al., 2008)

Falco และคณะ (2007) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ CNTs ชนิดผนังหลายชั้นเป็นตัวเสริมแรงในยางเอสปีอาร์ซึ่งใช้กระบวนการทำเป็นสารละลายในการเตรียมวัสดุผสม โดยเริ่มต้นนำยาง SBR มาละลายในโทลูอิน แล้วนำมาผสมกับ CNTs และสารเคมีสำหรับยาง (CNTs ที่ใช้นั้น 15 มิลลิกรัม และผ่านการทำให้เกิดการกระจายตัวในเอทานอล และอบแห้งมาแล้ว) ซึ่งพบว่าสามารถปรับปรุงค่ามอดูลัส และค่าทนทานต่อแรงดึงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผสม CNTs และยางที่ผสมกับเขม่าดำ (carbon black) เพราะ CNTs มีขนาดเล็กจึงเกิดการกระจายตัวที่ดี และเข้ากันได้ดีในเนื้อยาง

จะเห็นว่าการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติโดยการเติมสารตัวเติมลงไป ในยางคอมพอนด์ ที่ใช้สารตัวเติมระดับนาโน เช่น CNTs นั้นไม่ว่าจะเป็นชนิด SWNTs หรือชนิด MWNTs เมื่อนำมาผสมในยาง ด้วยกระบวนการแบบนำมาละลายในสารละลายโทลูอิน หรือกระบวนการหลอมก็ตาม ส่งผลก็คือ ค่าความทนทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อผสม CNTs เพิ่มขึ้น เพราะว่าตัวเติมระดับนาโนช่วยทำให้มีพื้นที่รอยต่อ (interface) ระหว่างเนื้อยาง (matrix) กับตัวเติมเพิ่มมากขึ้น (Kim et al, 2006) เช่นเดียวกับค่ามอดูลัสและสภาพการนำความร้อนก็เพิ่มขึ้นเมื่อผสม CNTs เพิ่มขึ้น (Frogley et al, 2003; Zhuo et al, 2006; Kim et al, 2006)

นอกจากนั้นยังมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการจัดเรียงทิศทางของ CNTs ในแนวแกน X และ Z แต่หลังจากการนำไปทดสอบเปรียบเทียบพบว่าการจัดเรียงทิศทางของ CNTs ให้ผลไม่แตกต่างกันทั้งแกน X และแกน Z (Kim et al, 2006) จากการเติม MWNTs ในยาง

ธรรมชาติมีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางคอมพอนด์โดย ปริมาณการเติม CNTs ที่ช่วยเสริมแรงในยางได้ดี อยู่ในช่วง 1-10 wt% เมื่อเพิ่มปริมาณ CNTs มากเกินไปจะส่งผลทำให้ยางมีความเปราะ

จากตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวข้องทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าเมื่อผสม CNTs ชนิดหนึ่งหลายชั้นลงไปในพอลิเมอร์หรือยางสามารถเพิ่มสมบัติของวัสดุผสมได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การทำปฏิกิริยาที่ดีระหว่าง CNTs กับพอลิเมอร์และการกระจายตัวของ CNTs

การเสริมแรงยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยสารตัวเติมระดับนาโนได้มีผู้ศึกษาไว้บ้าง (Findik et al, 2004) ได้แก่ การใช้เขม่าดำ ชนิด ISAF และ HAF เป็นสารตัวเติม จากผลการวิจัยพบว่า ยาง NR/SBR ที่เติม ISAF จะให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าการเติม HAF การเพิ่มอัตราส่วนของยางเอสปีอาร์ส่งผลให้ค่ามอดูลัส และความทนทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตามการวิจัยที่เสริมแรงยางคอมพอนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ด้วย MWNTs ยังไม่มีผู้ศึกษามาก่อน ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจผลของสารเติมชนิดนี้ต่อกระบวนการขึ้นรูปยางคอมพอนด์ สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ จึงได้ดำเนินการศึกษาในงานวิจัยนี้

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) ยางธรรมชาติที่ใช้ในการทดลอง คือ ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (rib smoke sheet no. 3, RSS No.3) จากตลาดกลางยางพารา อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

2. ยางเอสบีอาร์ (styrene butadiene rubber, SBR) ยางเอสบีอาร์ที่ใช้ในการทดลอง คือ ยาง เอสบีอาร์ เกรด 1502 จำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

3. กรดสเตียริก (stearic acid) มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวอมเหลือง ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (activator) ช่วยให้การตัวเร่งทำงานดีขึ้น จำหน่ายโดยห้างหุ้นส่วน กิจไพบูลย์เคมี จำกัด

4. ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) ชนิด white seal ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นโดยใช้ร่วมกับกรดสเตียริก เพื่อให้การทำงานของสารตัวเร่งมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด จำหน่ายโดยบริษัท Univenture Public Co., Ltd.

5. ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) ชนิด multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) มีลักษณะเป็นผงสีดำ ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (reinforcing fillers) ผลิตและจำหน่ายโดยบริษัท Chengdu Organic Chemicals Co., Ltd

6. ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) ชนิด multi-walled carbon nanotubes (MWNTs)

7. เขม่าดำ (carbon black) ชนิดที่ได้จากการเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันเตา หรือที่เรียกว่า “furnace black” เกรด N-330 ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (reinforcing filler) จำหน่ายโดยบริษัท พอลิเมอร์อิน โนวชัน จำกัด

8. เมอร์แคปโทเบนโซไทอาโซล ฟีนามาไมด์ (mercaptobenzothiazole sulphenamide, MBTS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งเพื่อช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางให้เกิดขึ้นเร็วขึ้น

9. ไดฟีนิลกวานิดีน (diphenyl guanidin, DPG) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งร่วมกับ MBTS ในการเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยาง จำหน่ายโดยบริษัท พอลิเมอร์อิน โนวชัน จำกัด

10. 6PPD (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine)) ทำหน้าที่เป็น สารแอนติออกซิแดนซ์ จำหน่ายโดยบริษัท เบเออร์ (ประเทศไทย) จำกัด Bayer Thai Co., Ltd

11. กำมะถัน (sulphur) มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง ขนาดอนุภาค 325 เมช ใช้เป็น สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agent) สำหรับทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางที่มีพันธะคู่ที่ ว่องไวหรือเกิดการเชื่อมขวางตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา จำหน่ายโดยบริษัทสยามเคมี จำกัด

12. ไซเลน (3-aminopropyltriethoxysilane) จำหน่ายโดยบริษัท โซนัล แสตน การ์ด จำกัด

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

1. เบ้าพิมพ์สแตนเลส ความกว้าง 14 cm ความยาว 14 cm ความหนา 2 mm ใช้ สำหรับเป็นแม่พิมพ์ในการขึ้นรูปขึ้นทดสอบด้วยวิธีการอัดเป่าโดยใช้ความดัน

2. มีดสำหรับกรีดยางบนเครื่องบดสองลูกกลิ้ง ใช้สำหรับกรีดเพื่อผลิตตัดหน้ายาง ขณะผสมสารเคมีกับยาง

3. เครื่องวัดความหนา ความหนาละเอียด 0.01 mm ใช้สำหรับวัดความหนาของชิ้น ทดสอบยางวัลคาไนซ์ก่อนทำการทดสอบสมบัติเชิงกล

4. นาฬิกาจับเวลา ใช้สำหรับจับเวลาขณะผสมยางคอมเปานด์

5. เครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill) รุ่น YFM 160B ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว ยาว 15 นิ้ว โดยมีอัตราความเร็วลูกกลิ้งต่อหน้าลูกกลิ้ง (friction ratio) เท่ากับ 1: 1.22 ใช้สำหรับบดยาง (mastication) เพื่อลดความหนืดของยางก่อนการผสมสารเคมี ผลิตโดย บริษัทยงฟง แมชชีนเนอรี จำกัด

6. เครื่องอัดเป่าโดยใช้ความดัน (compression moulding) รุ่น LCC 140 ความดัน สูงสุด 200kg/cm^2 ประกอบด้วยที่อัดเป่าพิมพ์ขนาด 18x18 นิ้ว ใช้สำหรับขึ้นรูปยางคอมเปานด์ (rubber compound) ในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดันด้วยวิธีการอัดยางเข้าเป่าโดยใช้ระบบ ไฮโดรลิก ผลิตโดยบริษัทถังมาสเตอร์ จำกัด

7. เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง ใช้สำหรับชั่งสารเคมีและยางสำหรับสำหรับการคอมเปานด์ ใช้ชั่งยางในการทดสอบการบวมตัวในน้ำมันและโทลูอิน

8. เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างรูปดัมเบลล์ แบบไดน์ C (Die C) ตามมาตรฐาน ASTM D412 ใช้สำหรับตัดชิ้นตัวอย่างยางวัลคาไนซ์เพื่อทดสอบความทนต่อแรงดึง โมดูลัสที่ 300% และการยืด ณ จุดขาด

9. เครื่องตัดชิ้นตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดแบบมุม (angle) ตามมาตรฐาน ASTM D624

10. เครื่องทดสอบการวัลคาไนซ์ของยาง (moving die rheometer; MDR 2000) รุ่น 36 AIG 2953 ใช้สำหรับวิเคราะห์หาเวลาในการวัลคาไนซ์ (vulcanization time) และระยะเวลาการสุกก่อนกำหนด (scorch time) ของยางคอมพอนันต์ ผลิตโดยบริษัท Alpha Technologies Services Inc.

11. เครื่องทดสอบแรงดึง (tensometer) ผลิตโดย LLOYD instrument รุ่น LR10K ใช้สำหรับทดสอบความทนต่อแรงดึง โมดูลัสที่ 300% และการยืดตัว ณ จุดขาดของตัวอย่างยางวัลคาไนซ์ผลิตโดยบริษัทอินโทรเอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด

12. เวอร์เนียร์

13. เครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffraction, XRD) ผลิตโดย PHILIPS X'Pert MPD

14. เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ผลิตโดย JEOL รุ่น JSM-5800 LV

15. เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ผลิตโดย JEOL รุ่น JEM-2010

16. การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยรังสีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (fourier transforms infrared spectroscopy, FTIR)

17. การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analyzer, TGA) ผลิตโดย Perkin Elmer รุ่น TGA 7

18. เครื่องทดสอบการเสียรูปหลังการกด (compression set)

3.3 วิธีการดำเนินการทดลอง

3.3.1 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของยางคอมพอนันต์

ในการทำงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 กระบวนการศึกษาวิจัย

| ตัวแปรที่ศึกษา | ปริมาณสารเสริมแรง | สัดส่วน NR/SBR |
|------------------------------------|--|--|
| สัดส่วนของยางธรรมชาติ/ยางเอสปีอาร์ | - | 100/0, 85/15, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 |
| ชนิดของสารเสริมแรง | CNTs ที่ไม่ปรับผิว 1, 3, 5, 10 phr | 100/0, 85/15, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 |
| | CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด 1, 3 phr | 100/0 |
| | CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน 1, 3 phr | CNTs:silane (1:1) 100/0 |
| | | CNTs:silane (1:3) 100/0 |
| Carbon black 40, 45, 50 phr | 100/0, 85/15, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 | |
| ปริมาณกำมะถัน (2, 3, 5 phr) | CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน CNTs:silane (1:1) ปริมาณ 1 phr | 100/0 |

3.3.2 การเตรียมยางคอมปอนด์ (rubber compound)

3.3.2.1 เตรียมสารเคมีเพื่อใช้ในสูตรยางคอมปอนด์โดยใช้สูตรพื้นฐาน ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สูตรยางคอมปอนด์

| สารเคมี | ปริมาณ (phr) |
|--------------------|--------------|
| RSS No.3 | vary |
| SBR | vary |
| zinc oxide | 3 |
| Stearic acid | 1 |
| MBTS | 0.75 |
| DPG | 0.75 |
| 6PPD | 1 |
| Reinforcing filler | vary |
| sulphur | 2 |

3.3.2.2 ผสมยางกับสารเคมีตามขั้นตอนการผสมจากตารางที่ 3.2 ด้วยเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง ตามมาตรฐาน ASTM D 3184 – 80

ตารางที่ 3.3 ขั้นตอนการผสมและลำดับการใส่สารเคมี ในการผสมยางคอมพอนัด

| เวลา (นาที) | ขั้นตอนการผสม |
|-------------|--|
| 0 | บดยางจนพื้นลูกกลิ้งและมีผิวเรียบสม่ำเสมอ |
| 2.0 | เติม ZnO |
| 4.0 | ใส่ Stearic Acid |
| 14.0 | ใส่ สาร reinforce filler |
| 15.0 | ใส่ 6PPD |
| 17.0 | ใส่ DPG |
| 18.0 | เติม MBTS |
| 19.0 | เติมกำมะถัน |
| 20.0 | ม้วนยางผ่านลูกกลิ้ง 10 ครั้ง |

3.3.2.3 หาเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) ของยางคอมพอนัดด้วย MDR 2000 ที่ 160°C ตามมาตรฐาน ASTM D 5289-95

3.3.2.4 ขึ้นรูปยางคอมพอนัดแต่ละสูตรด้วยวิธีการอัดเบ้าโดยใช้ความดันตามเวลาในการวัลคาไนซ์ที่หาได้จากเครื่อง MDR 2000 ที่ 160°C โดยทำการขึ้นรูปยางคอมพอนัดให้มีความหนา 2 mm กว้าง 14 cm ยาว 14 cm ตามมาตรฐาน ASTM D 5289-95

3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.3.1 ลักษณะการคงรูปของยาง

ระยะเวลาของการคงรูป (cure time) คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางคงรูปไปใช้สัญลักษณ์เป็น $t_{c,x}$ เมื่อ x คือ ร้อยละของยางส่วนที่คงรูปไป โดยทั่วไปค่า $t_{c,90}$ จัดเป็นค่า “ระยะเวลาการคงรูปที่เหมาะสม (optimum curing time)”

ระยะเวลาสกอร์ช (scorch time) เป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้นๆ

ดัชนีอัตราการคงรูป (cure rate index, CRI) เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$CRI = 100 / (\text{ระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม} - \text{ระยะเวลาสกอรัช}) \quad (1)$$

การศึกษาลักษณะการคงรูปของยางสามารถทดสอบได้ด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) โดยนำยางคอมพอนด์ที่ยังไม่ผ่านไประหว่างการอัดขึ้นรูป มาตัดเป็นชิ้นหนักประมาณ 4.0-4.5 กรัม ทดสอบที่อุณหภูมิ 160 °C ใช้เวลาประมาณ 5-20 นาที

3.3.3.2 การทนทานต่อแรงดึง (tensile strength)

คือค่าแรงดึงสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หรือค่าความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดึงขึ้นทดสอบมาตรฐาน โดยใช้ความเร็วในการดึงยึด 500 mm/min ซึ่งมีหน่วยเป็น MPa หรือ N/mm² ยางแต่ละชนิดจะมีค่าการทนทานต่อแรงดึงแตกต่างกัน ยางที่สามารถดกผลึกได้ในขณะที่ถูกดึงหรือได้รับความเครียด เช่น ยางธรรมชาติและยางนีโอพรีน จะมีค่าการทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางที่ไม่สามารถดกผลึกได้ อย่างไรก็ตาม การเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ รวมถึงระบบการคงรูปก็ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติแรงดึงของยาง โดยทั่วไป ค่าการทนทานต่อแรงดึงของยางจะอยู่ในช่วง 7 N/mm² ถึงมากกว่า 45 N/mm² ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสมเคมี

การคำนวณ

$$\text{Tensile strength} = \frac{\text{maximum load}}{A} \quad (2)$$

โดย

Maximum load คือ แรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)
A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (mm²)

3.3.3.3 การยืดตัว (elongation at break)

คือการยืดตัวของชิ้นทดสอบที่เกิดขึ้นจากแรงดึง ซึ่งจะแสดงในรูปร้อยละการยืดตัวเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้น เช่น การยืดตัวที่ 300 % หมายถึงชิ้นตัวอย่างถูกยืดออกไปจนมีความยาวเป็น 4 เท่าของความยาวเริ่มต้น ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด คือระดับการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ ซึ่งค่าความเค้น ณ จุดนี้ก็คือค่าการทนทานต่อแรงดึงนั่นเอง โดยทั่วไป การยืดตัว ณ จุดขาดของยางมีค่าอยู่ในช่วง 100% ถึงมากกว่า 1000% ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสมเคมี ส่วนค่าความเครียดก็สัมพันธ์กัน โดยตรงกับค่าการยืดตัวของยางเพราะค่าความเครียดคืออัตราส่วนของระยะที่ย่างยืดตัวต่อความยาวตั้งต้นของยาง ด้วยเหตุนี้ เมื่อย่างยืดตัวมากขึ้น ค่าความเครียดของยางก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

การคำนวณ

$$\text{elongation at break} = 100 \times \frac{(L - L_0)}{L_0} \quad (3)$$

โดย

L คือ ระยะที่ขึ้นทดสอบสามารถยึดตัวได้จนขาด (cm)

L₀ คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (cm)

3.3.3.4 มอดูลัส (modulus)

สำหรับยางแล้ว ค่ามอดูลัสจะหมายถึงความเค้น (ในหน่วย MPa หรือ N/mm²) ที่ต้องใช้ในการยืดยางให้ได้ค่าการยืดตัวตามที่กำหนดไว้ (โดยทั่วไปจะกำหนดการยืดตัวไว้ที่ 100% และ 300%) เช่น หากยางมีค่า 100% มอดูลัสเท่ากับ 5 N/mm² หมายถึงการที่จะดึงยางให้ได้ 100% ของการยืดตัวจะต้องใช้ความเค้นเท่ากับ 5 N/mm² เนื่องจากค่ามอดูลัสจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง ดังนั้นจึงนิยมใช้ค่ามอดูลัสของยางในการบ่งชี้สมบัติความแข็งแรง และระดับของการเชื่อมโยงของยาง โดยทั่วไป ค่า 100% มอดูลัสของยางอยู่ในช่วง 1 N/mm² ถึงมากกว่า 13 N/mm² ขึ้นอยู่กับสูตรการผสมเคมี (พงษ์ธร, 2550)

การคำนวณ

$$100 \text{ or } 300\% \text{ modulus} = \frac{F}{A} \quad (4)$$

โดย

F คือ แรงดึงที่ทำให้ขึ้นทดสอบยืด 100 หรือ 300% (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขึ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm²)

3.3.3.5 การศึกษาค่าการต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance)

การทดสอบค่าการต้านทานต่อการฉีกขาดของยางสามารถทำได้โดยการวัดแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานทดสอบขาดออกจากกัน โดยทั่วไปจะคล้ายคลึงกับการทดสอบการทนทานต่อแรงดึง ซึ่งค่าการต้านทานต่อการฉีกขาดจะแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนของแรงดึงที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการฉีกขาดต่อความหนาของชิ้นงานทดสอบ (มีหน่วยเป็น N/mm) (พงษ์ธร, 2550) สำหรับงานวิจัยครั้งนี้จะใช้บริการการทดสอบจากสถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร โดยการทดสอบ

อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 34 ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่อง Instron universal testing (รุ่น 5655) โดยชิ้นงานเป็นรูปคันทูลหนา 1 mm และทำการทดสอบชิ้นงานจำนวน 6 ชิ้นต่อสูตรการทดลอง

3.3.3.6 การศึกษาค่าความแข็ง (hardness)

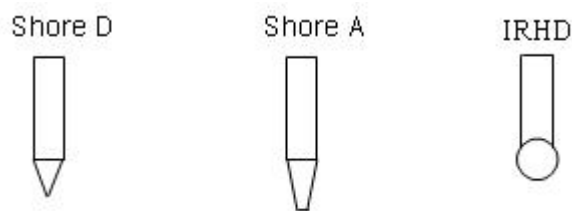
ความแข็งของยางหมายถึงความต้านทานของพื้นผิวต่อการทะลุทะลวงของตัวกด ที่มีขนาดเฉพาะและภายใต้แรงกดที่กำหนด เครื่องวัดความแข็งของยางมีหลายชนิดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกดและแรงที่ใช้กดลงบนพื้นผิว สเกลที่ใช้วัดจะเริ่มตั้งแต่ศูนย์ (สำหรับยางที่อ่อนมาก ๆ) จนถึง 100 (สำหรับยางที่แข็งมาก) แรงที่ใช้กดอาจมาจากน้ำหนักที่คงที่หรืออาจใช้สปริงแทนก็ได้ หน่วยที่ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางมีอยู่ 2 หน่วยคือ IRHD (International rubber hardness degrees) และชอร์ (Shore unit) ซึ่งการวัดความแข็งในหน่วย IRHD นั้นจะใช้ลูกกลมแข็งแทนตัวกดและแรงกดจะมาจากน้ำหนักที่คงที่ ส่วนเครื่องวัดความแข็งที่ให้หน่วยชอร์นั้น เรียกว่าเครื่องคูโรมิเตอร์ ซึ่งมี 2 แบบ คือแบบชอร์เอ (Shore A) และแบบชอร์ดี (Shore D)

1) เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์เอ

ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางที่อ่อนมาก ๆ จนถึงยางที่มีความแข็งค่อนข้างมาก (90 ชอร์เอ) ตัวกดของเครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์เอจะเป็นแท่งรูปโคนที่ทื่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

2) เครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ดี

ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางที่แข็งมาก ๆ (มากกว่า 90 ชอร์เอ) ตัวกดของเครื่องคูโรมิเตอร์แบบชอร์ดีจะเป็นแท่งรูปโคนที่แหลม ดังแสดงในรูป 3.1

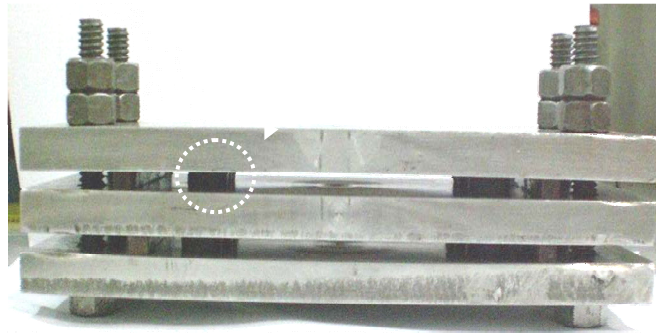


รูปที่ 3.1 หัวกดแบบต่างๆ สำหรับการวัดค่าความแข็ง (พงษ์ธร, 2550)

แม้ว่าหน่วยวัดความแข็งแบบชอร์เอจะคล้ายกับหน่วยแบบ IRHD แต่ก็ไม่ควรนำหน่วยชอร์เอไปเปลี่ยนให้เป็นหน่วย IRHD เพราะอาจทำให้เกิดความผิดพลาดได้ ผลลัพธ์บางส่วนใหญ่มักจะมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 40 ถึง 90 IRHD สำหรับยางที่มีค่าความแข็งที่ต่ำกว่า 40 IRHD สามารถผลิตได้โดยการเติมสารทำให้ยางนิ่มลงไปปริมาณที่มาก ๆ (พงษ์ธร, 2550) สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบชอร์เอ โดยทำการวัดความแข็งชิ้นงาน 5 จุดต่อสูตรการทดลอง

3.3.3.7 การศึกษาค่าการเสยรูปหลังการกด (compression set)

ค่านี้แสดงถึงความสามารถของยางในการคืนรูปร่างหลังจากที่มีแรงกระทำให้มันเปลี่ยนรูปไปในระยะเวลาหนึ่ง โดยทำการทดสอบที่ 25 °C และที่อุณหภูมิ 70°C ระยะเวลาในการทดสอบ 22 ชั่วโมง ซึ่งทดสอบชิ้นงาน 3 ชิ้นต่ออุณหภูมิต่อสูตรการทดลอง (พงษ์ธร, 2550) โดยใช้เครื่องมือตามรูปที่ 3.2 การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D471 (Method B) ทำการทดลองเก็บข้อมูลและทำการคำนวณค่าการเสยรูปหลังการกดตามสมการที่ (5)



รูปที่ 3.2 เครื่องมือทดสอบการเสยรูปหลังการกด

$$\% \text{ Compression set} = \frac{t_b - t_a}{t_b - t_n} \times 100 \quad (5)$$

โดย

t_b = ความหนาชิ้นทดสอบก่อนการทดลอง (mm)

t_a = ความหนาชิ้นทดสอบหลังการทดสอบ (mm)

t_n = ความหนาของแท่งเหล็กมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ (mm)

3.3.3.8 การศึกษาร้อยละการบวมตัว (% Swelling)

เป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของชิ้นงานหลังจากนำไปแช่ในน้ำมันและโทลูอีน ซึ่งการบวมตัวจะเกิดกับเนื้อยางอย่างเดี่ยว (Rakchonlatee et al, 2004) โดยนำชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm หนา 6 mm จำนวน 6 ชิ้นต่อ 1 สูตรการทดลองมาชั่งน้ำหนักและแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (ส่วนละ 3 ชิ้น) โดยส่วนแรกนำไปแช่ในน้ำมันเกรด SAE 15W-40 ที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรที่ใช้ 30 มิลลิลิตร เป็นเวลา 7 วัน และส่วนที่สองนำไปแช่ในโทลูอีนที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรที่ใช้ 30 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นเมื่อครบกำหนดก็นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณร้อยละการบวมตัวดังสมการที่ (6)

%Swelling

$$= \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

(6)

เมื่อ

m_0 คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่ (กรัม)

m_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่ (กรัม)

การนำชิ้นงานไปแช่ในโทลูอีนนอกจากจะสามารถคำนวณร้อยละการบวมตัวได้แล้ว ยังสามารถคำนวณความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (Crosslink density) ได้ด้วยตามสมการของ Flory-Rhener (Arroyo et al., 2006; Kumnuantip et al., 2003) ซึ่งสมการการคำนวณแสดงในสมการที่ (7) และ (8)

$$-\left[\ln(1 - \phi_r) + \phi_r + \chi\phi_r^2\right] = v_0 n \left[\phi_r^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{\phi_r}{2}\right) \right] \quad (7)$$

เมื่อ

ϕ_r คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของยางในมวลที่บวมตัว

v_0 คือ มวลโดยปริมาตรของตัวทำละลาย (106.2 cm³/mol)

χ คือ ค่าคงที่ Flory-Huggins ของยางในตัวทำละลาย (0.393)

n คือ ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (mol/cm³)

$$\frac{1}{\phi_r} = 1 + \frac{w_s * \rho_r}{w_i * \rho_s} \quad (8)$$

เมื่อ

w_r คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่ (กรัม)

w_i คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่ (กรัม)

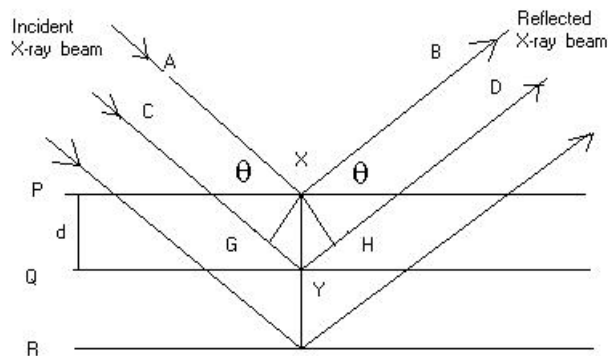
ρ_s คือ ความหนาแน่นของโทลูอีน (0.87 g/cm³)

ρ_r คือ ความหนาแน่นของยาง (g/cm³)

3.3.3.9 การตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffraction, XRD)

เครื่องตรวจสอบการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ คือ เทคนิคการตรวจวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อตกกระทบผิวหน้าของผลึกทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอ็กซ์เกิดการกระเจิงด้วย

ชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า ขั้นตอนการกระเจิงแสงของรังสีเอ็กซ์แสดงในรูปที่ 3.3 โดยการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ทำให้สามารถคำนวณขนาดของผลึกได้ โดยใช้สมการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในสมการที่ (9) สมการนี้เรียกว่า “สมการของแบรค (Bragg equation)” (ณัฐวุฒิ, 2549)



รูปที่ 3.3 ลำรังสีเอ็กซ์ตกกระทบและเกิดสะท้อนกับผิวหน้าของวัตถุตามกฎของแบรค

(http://www.geocities.com/soilsciences/soiltest_method/X-ray.pdf, 2551)

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (9)$$

โดย

n = ตัวเลขจำนวนเต็ม

λ = ความยาวคลื่น (nm)

d = ระยะห่างระหว่างชั้น (Å)

θ = มุมของการเลี้ยวเบน

ในงานวิจัยครั้งนี้ดำเนินการตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD รุ่น PHILIPS X'Pert MPD โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้

- ตัดแผ่นยางขนาดความกว้าง 2.5 cm และความยาว 2.5 cm วางทาบลงบนแผ่นกระจกขนาดเดียวกัน ตัดแผ่นยางให้แน่นบนแผ่นกระจกด้วยเทปกาวสองหน้า โดยไม่ให้มีฟองอากาศระหว่างแผ่นแผ่นยางกับกระจก

- นำแผ่นกระจกที่มีชิ้นงานมาวางลงในช่องใส่ตัวอย่าง นำช่องใส่ตัวอย่างเข้าสู่แท่นวางตัวอย่างภายในเครื่อง XRD

- ทำการทดสอบโดยใช้อัตรามุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ต่อเวลาเท่ากับ 0.01 องศาต่อ 10 วินาที เลือกมุมมองในการทดสอบตั้งแต่ 1 องศา ถึง 10 องศา ใช้กำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าในการทดสอบเท่ากับ 40 กิโลวัตต์ และ 30 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ

- สเปกตรัม XRD ของสารที่ตรวจสอบได้ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมมองที่รังสีเอ็กซ์เกิดการกระเจิงและผลึกของสารที่กำลังทดสอบ

- นำค่ามุมมองที่ได้จากการทดสอบจากเครื่อง XRD มาคำนวณค่าระยะห่างระหว่างชั้นของของสารที่สนใจดังสมการ (9)

3.3.3.10 การศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติม (scanning electron microscope, SEM)

เป็นการศึกษาการกระจายตัวของสารต่างๆ ในรูปองค์ประกอบของธาตุ เพื่อตรวจสอบว่าการกระจายตัวเป็นไปในลักษณะใด โดยนำชิ้นงานเข้าในไนโตรเจนเหลวรอจนขึ้นทดสอบเปราะพอที่จะสามารถทำการหักได้ หลังจากนั้นทำการเคลือบทองบนชิ้นทดสอบเป็นเวลา 120 วินาที ทำการถ่ายภาพการกระจายตัวของสารตัวเติมในงานชิ้นตัวอย่างด้วยวิธีการ X-ray mapping โดยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดย JEOL รุ่น JSM-5800 LV

3.3.3.11 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของยาง

ยางมีสมบัติความเป็นวิสโคไอเปอร์อีลาสติกเมื่อเสีรูปร่างภายใต้แรงกระทำแบบพลวัต (Dynamics) ในลักษณะเป็นแบบวงรอบ (Cyclic Load Deformation) จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่กึ่งกลางของยาง เกิดการสะสมและมีการกระจายความร้อนออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอก เนื่องจากการสูญเสียพลังงานกล (Hysteresis) ทำให้เกิดความร้อนสะสมในยางและอาจทำให้ยางสูญเสียคุณสมบัติเดิม (สภาพและ คณะ, 2551) ข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยางคอมพอนด์ได้แก่ ค่าความจุความร้อนจำเพาะเฉลี่ย (C_p) ค่า thermal conductivity เป็นต้น

ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat capacity, C_p)

คือ ค่าปริมาณความร้อน ที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ ให้กับวัสดุ มีหน่วยเป็น แคลอรี ต่อโมล - องศาเซลเซียส ในบางครั้งรายงาน เป็นค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) มีหน่วยเป็น แคลอรี ต่อกรัม - องศาเซลเซียส นั่นคือ

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} \quad (10)$$

เมื่อสารมวล m มีอุณหภูมิเพิ่มจาก T_1 เป็น T_2 และความจุความร้อนจำเพาะมีค่าคงตัว ความร้อนที่สารได้รับคือ

$$\Delta Q = mc\Delta T \quad (11)$$

เมื่อทราบค่าความจุความร้อนจำเพาะ ก็สามารถคำนวณหาค่า Thermal conductivity ได้ จากสูตร

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (12)$$

เมื่อ

| | | |
|-----------|-----|--|
| a | คือ | thermal diffusivity ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) |
| ρ | คือ | density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) |
| λ | คือ | thermal conductivity ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) |
| C_p | คือ | specific heat capacity ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) |

3.3.3.12 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยรังสีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (fourier transforms infrared spectroscopy, FTIR)

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์และศึกษาโมเลกุลของสาร ซึ่งอาจจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ หลักการตรวจสอบด้วยเทคนิคนี้คือ ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการสั่นและการหมุนของโมเลกุล อินฟราเรดเป็นช่วงหนึ่งของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีเลขคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 12,800 ถึง 10 cm^{-1} หรือมีช่วงความยาวคลื่นจาก 0.78 ถึง 1000 μm การสั่นและการหมุนของโมเลกุล เกิดขึ้นเมื่อรังสีอินฟราเรดเข้าไปกระตุ้นทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน เกิดการดูดกลืนแสง ทำให้โมเลกุลถูกกระตุ้นจากสถานะพื้นไปสู่สถานะเร้า แต่ละหมู่ฟังก์ชันจะมีการดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่นแตกต่างกันทำให้สามารถหาหมู่ฟังก์ชันของสารได้ (แมนและคณะ, 2539; ณีรัฐติ, 2549) สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ทดสอบหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ผลิตโดย Bruker รุ่น EQUINOX 55 ทดสอบโดยใช้ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 4,000 – 400 cm^{-1} โดยนำชิ้นงานตัวอย่างวาง บนแท่นวางตัวอย่าง แนบตัวอย่างให้แน่นด้วยแถบแม่เหล็ก นำแท่นวางตัวอย่างเข้าสู่เครื่อง FTIR ทดสอบและรายงานผลในรูปของสเปกตรัมของสาร

3.3.3.13 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (thermogravimetric analyzer, TGA)

TGA เป็นการศึกษาสมบัติทางความร้อนเกี่ยวกับน้ำหนักที่หายไปของวัสดุเมื่อให้ความร้อนภายใต้การไหลเวียนของแก๊สเฉื่อย เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารเมื่ออุณหภูมิ

สูงชันและศึกษาอุณหภูมิการเสื่อมสลายของวัสดุเมื่ออุณหภูมิสูงชัน (ณัฐวุฒิ, 2549) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง TGA ผลิตโดย Perkin Elmer รุ่น TGA 7 ดำเนินการได้โดยนำชิ้นงานมาทดสอบ โดยเลือกช่วงอุณหภูมิการทดสอบตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิขณะทดสอบ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้การไหลเวียนของก๊าซไนโตรเจน (N_2) รายงานผลการทดสอบเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่หายไปเมื่ออุณหภูมิสูงชันและอุณหภูมิการเสื่อมสลายของสสาร (thermal degradation temperature, T_d) โดยรายงานผลการทดสอบในรูปของ T_5 , T_{10} และ T_{50} คือ อุณหภูมิเมื่อน้ำหนักหายไป 5%, 10% และ 50% ตามลำดับ

3.3.3.14 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต (dynamic mechanical thermal analysis, DMTA)

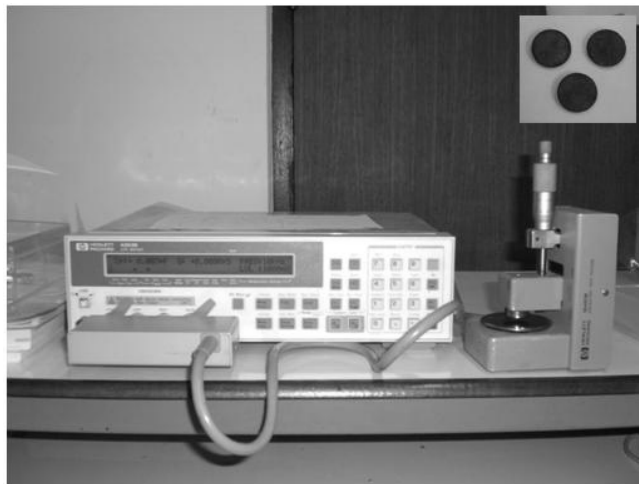
DMTA เป็นเครื่องมือที่ศึกษาลักษณะเฉพาะของวัสดุที่มีสมบัติเป็นวิสโคอีลาสติก ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความถี่ของวัสดุภายใต้แรงกระทำซ้ำๆ กัน (periodic stress) การตอบสนองของวัสดุสามารถแยกได้ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ยืดหยุ่น และส่วนที่เป็นของเหลวหนืด (viscous liquid) ส่วนที่ยืดหยุ่นเกี่ยวข้องกับพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในระบบ ในขณะที่ส่วนที่เป็นของเหลวหนืด เกี่ยวข้องกับพลังงานที่กระจายออกมาในรูปความร้อน (energy dissipated หรือ damping) รายงานผลการทดสอบในรูปของพลังงานที่เกิดสะสมภายในชิ้นตัวอย่าง (storage modulus, E') การสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการทดสอบ (loss modulus, E'') และอัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานที่เกิดการสูญเสียต่อพลังงานที่เก็บสะสมในชิ้นงานทดสอบ ($\tan \delta$) (ณัฐวุฒิ, 2549) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง DMTA ผลิตโดย Rheometric Scientific รุ่น DMTA V โดยวิธีการทำได้ดังนี้ ตัดชิ้นตัวอย่างให้มีความกว้าง 10 mm และความยาว 25 mm โดยความหนา 1 mm ทดสอบแบบดึง โดยใช้ความถี่ 1.0 เฮิรตซ์ (Hz) เปอร์เซนต์การยืด (strain) 0.1% ช่วงอุณหภูมิการทดสอบตั้งแต่ -100 °C ถึง 60 °C และอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 3 °C ต่อนาที รายงานผลการทดสอบในรูปของพลังงานที่เกิดสะสมภายในชิ้นตัวอย่างการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการทดสอบ และอัตราส่วนระหว่างค่า $\tan \delta$

โดยหากค่า E' มีค่าสูงชัน แสดงว่าการกระจายตัวของสารตัวเติมในชิ้นงานตัวอย่างยังไม่ดี ยังมีบางส่วนที่เกิดการรวมตัวเป็นก้อนอยู่กับ โมเลกุลของยางที่แทรกกระหว่างสารตัวเติมจึงถูกรั้งไว้ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ยาก ส่งผลให้ค่า E' สูงชัน

ส่วนค่า $\tan \delta$ หากมีค่าสูงชัน แสดงว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคที่เกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนที่ไม่แข็งแรงของสารตัวเติมในบางบริเวณ และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์บริเวณที่มีการเกาะกันไม่ดี (Nielsen and Landel, 1994) จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานไม่แข็งแรงเท่าที่ควร และอุณหภูมิที่ $\tan \delta$ มีค่าสูงสุด แสดงถึง อุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g)

3.3.3.15 การศึกษาค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity)

โดยปรกติแล้วยางมีค่าความต้านทานต่อกระแสไฟฟ้าสูงมาก ยางจึงจัดเป็นวัสดุที่มีความเป็นฉนวนไฟฟ้าสูง โดยเฉพาะยางที่ไม่มีขั้วซึ่งจะมีความเป็นฉนวนสูงกว่ายางมีขั้ว แม้ว่าสมบัติทางไฟฟ้าของยางจะขึ้นอยู่กับชนิดของยาง แต่องค์ประกอบต่าง ๆ ที่เติมลงไปก็ส่งผลกระทบอย่างมากต่อสมบัติทางไฟฟ้าของยางได้เช่นกัน โดยเฉพาะสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าได้ดี (พงษ์ธร, 2550) สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุผสม โดยการนำชิ้นงานหนา 1 มิลลิเมตร มาตัดเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร โดยใช้ชิ้นงานจำนวน 3 ชิ้นต่อสูตรการทดลอง นำมาดำเนินการวัดด้วยเครื่อง LCR Meter (รูปที่ 3.4) โดยใช้ความถี่ในการวัดเท่ากับ 1MHz หลังจากนั้นก็นำมาคำนวณหาค่าสภาพการนำไฟฟ้าตามสมการที่ (13)



รูปที่ 3.4 เครื่องมือทดสอบสภาพการนำไฟฟ้า

$$\sigma = \frac{Gl}{A} \quad (13)$$

โดย

σ = สภาพการนำไฟฟ้า (s/cm)

G = ค่า Conductance (μ s)

l = ความหนาของชิ้นงาน (cm)

$A = \text{พื้นที่ของชิ้นงาน (cm)}$

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลของสัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ในยางคอมปอนด์โดยไม่เติม CNTs (ใช้ ซัลเฟอร์ 2 phr)

4.1.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

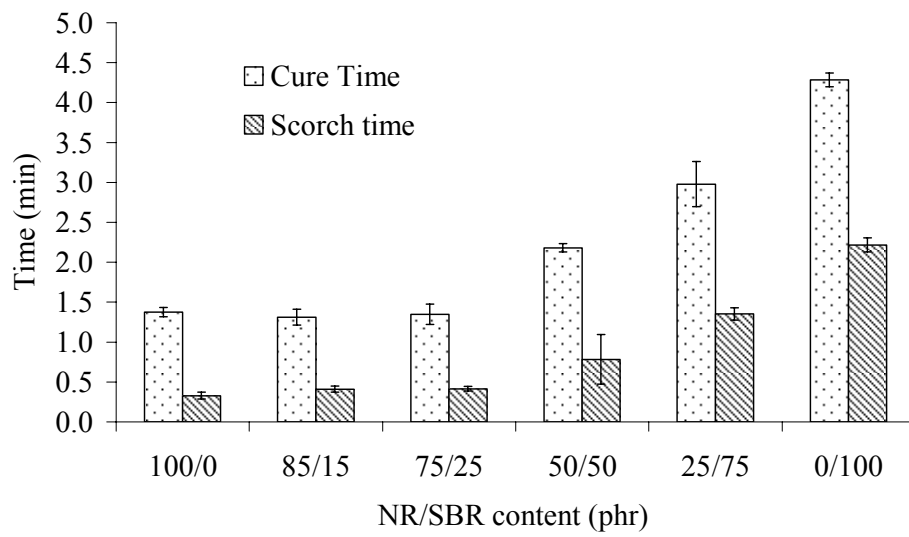
จากการนำยางคอมปอนด์ที่ผสมยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์เข้าด้วยกันในอัตราส่วนต่างๆไปทดสอบลักษณะการคงรูปของยางคอมปอนด์ด้วยเครื่อง MDR (moving die rheometer) พบว่าในทุกอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ค่าดัชนีอัตราคงรูปมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อมีปริมาณยางเอสบีอาร์อยู่มากกว่า 50 phr ในเนื้อยางคอมปอนด์ ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งยางเอสบีอาร์จะมีเวลาในการวัลคาไนซ์และเวลาสกอร์ช (ระยะเวลาการคงรูปของยาง)ที่ยาวนานกว่ายางธรรมชาติ (Basfar et al., 2002)

สมบัติในการวัลคาไนซ์ อาจพิจารณาในเทอมของความแตกต่างของค่าทอร์คสูงสุดและต่ำสุด $\Delta S = S_{max} - S_{min}$ จากตารางที่ 4.1 พบว่า ΔS ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณยางเอสบีอาร์ในยางคอมปอนด์ (Findik et al., 2003) โดยยางเอสบีอาร์จะแสดงการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่สูงกว่ายางธรรมชาติในระหว่างที่ผสมด้วยการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 160°C

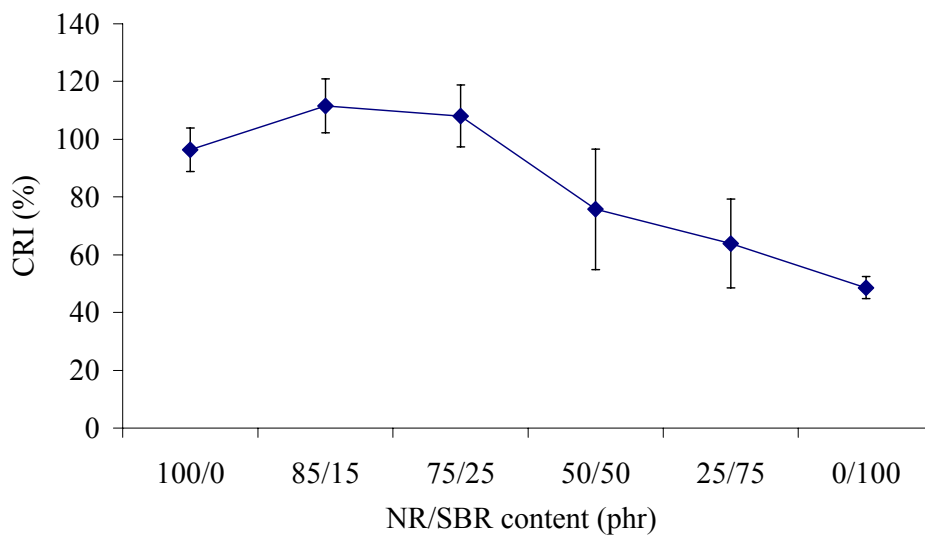
ตารางที่ 4.1 ค่าความแตกต่างของค่าทอร์คสูงสุดและต่ำสุดในสูตรยางคอมปอนด์

| NR/SBR | 100/0 | 85/15 | 75/25 | 50/50 | 25/75 | 0/100 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ΔS (Nm) | 4.76 | 4.77 | 4.23 | 4.11 | 3.17 | 3.09 |

ปริมาณยางเอสบีอาร์ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยยืดเวลาสกอร์ชของยางให้ยาวนานขึ้น เนื่องจากยางเอสบีอาร์ใช้เวลาในการคงรูปที่ช้า ซึ่งเวลาสกอร์ชที่ยาวจะส่งผลดีต่อการขึ้นรูปยาง



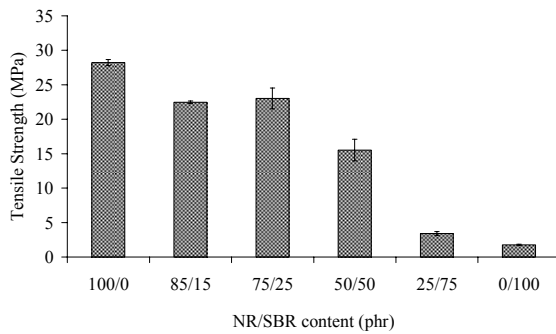
รูปที่ 4.1 เวลาในการคงรูปและเวลาสกอรัซของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกันในสัดส่วนต่างๆ



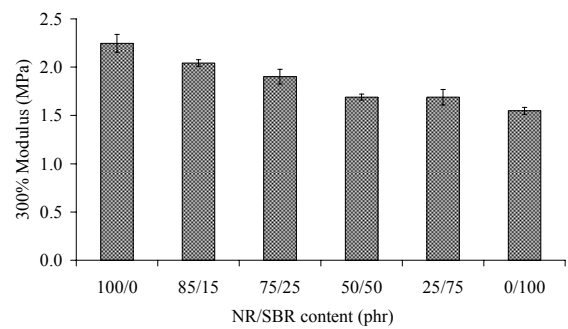
รูปที่ 4.2 ดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกันในสัดส่วนต่างๆ

4.1.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ

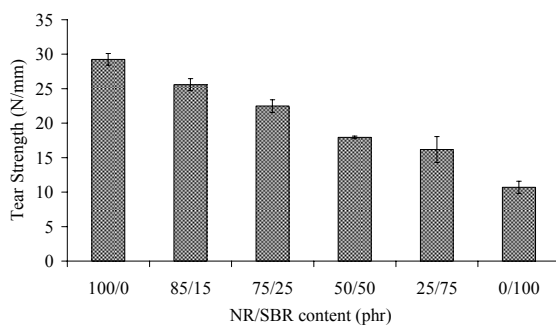
แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีโดยไม่ต้องเติมสารเสริมแรงเพราะยังสามารถตกผลึกได้เมื่อถูกยืด (strain-induced crystallization) อย่างไรก็ตาม ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนนุ่มและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะ แข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมี ต่างๆ ในการใช้งานทางวิศวกรรมส่วนใหญ่ การเติมสารเสริมแรงเสริมแรงก็จะช่วยปรับปรุงสมบัติ ของยางให้ดียิ่งขึ้น (พงษ์ธร, 2548) จากสมบัติที่ดีเยี่ยมในหลายด้านของ CNTs จึงได้ถูกนำมา ประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย เช่น การเสริมแรงในวัสดุผสม เป็นต้น



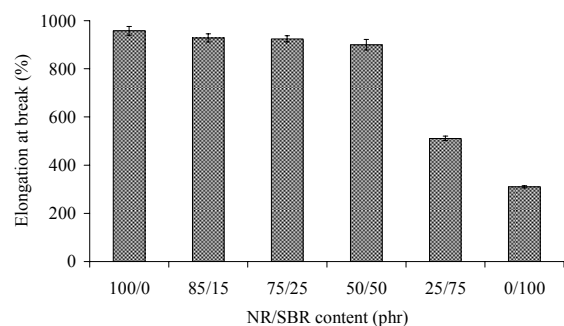
(a) ความทนต่อแรงดึง



(b) มอดูลัสที่ 300%



(c) ความต้านทานต่อการฉีกขาด

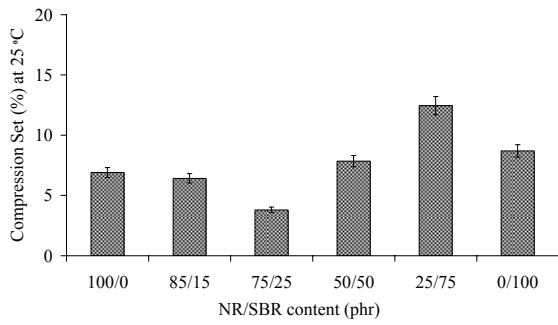


(d) เปร้อ้เส้นต่อการยืด ณ จุดขาด

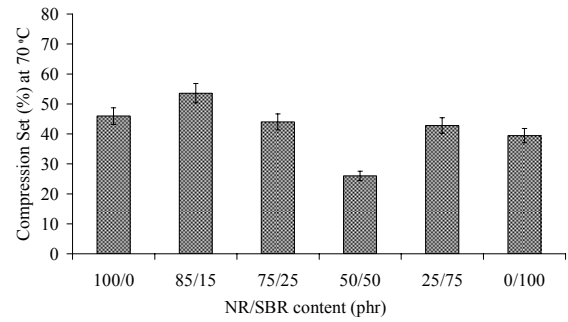
รูปที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกันในสัดส่วน ต่างๆ

จากการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ต่อสมบัติ เชิงกลพบว่า ค่าความทนต่อแรงดึง มอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาดและเปอร์เซ็นต์ ณ จุดขาด

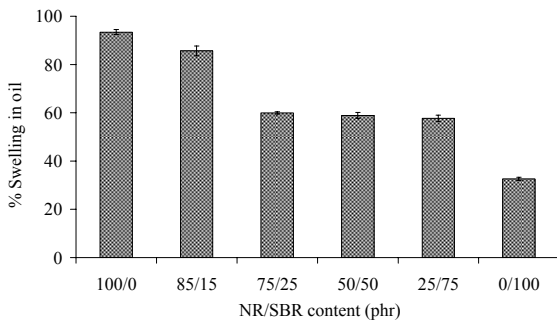
มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของยางเอสปีอาร์ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากโดยปกติยางเอสปีอาร์จะมีค่ามอดูลัสต่ำกว่ายางธรรมชาติกล่าวคือ มอดูลัสของยางเอสปีอาร์เท่ากับ 1.6 MPa ในขณะที่มอดูลัสของยางธรรมชาติมีค่า 2.3 MPa พิจารณาได้จากรูป 4.3 (a) - (d)



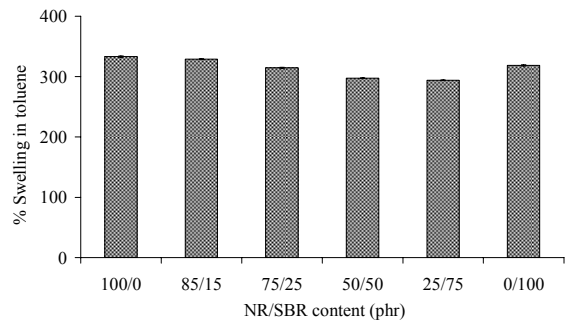
(a) การเสีรูปร่างหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C



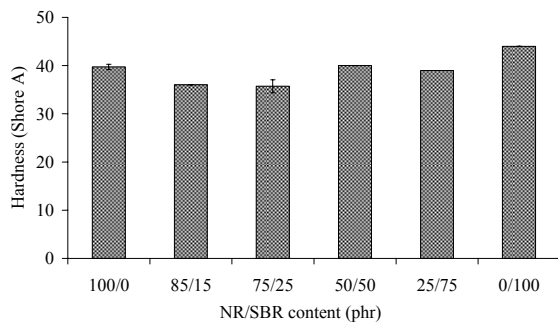
(b) การเสีรูปร่างหลังการกดที่อุณหภูมิ 70°C



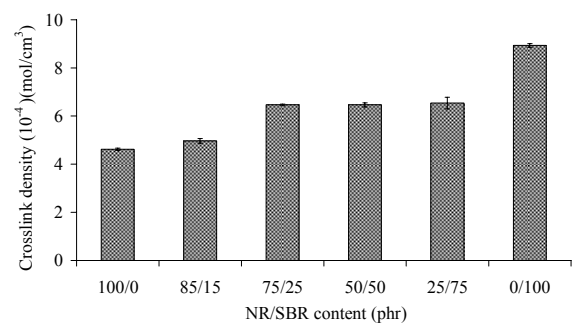
(c) การบวมตัวในน้ำมัน



(d) การบวมตัวในโทลูอีน



(e) ความแข็ง



(f) ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง

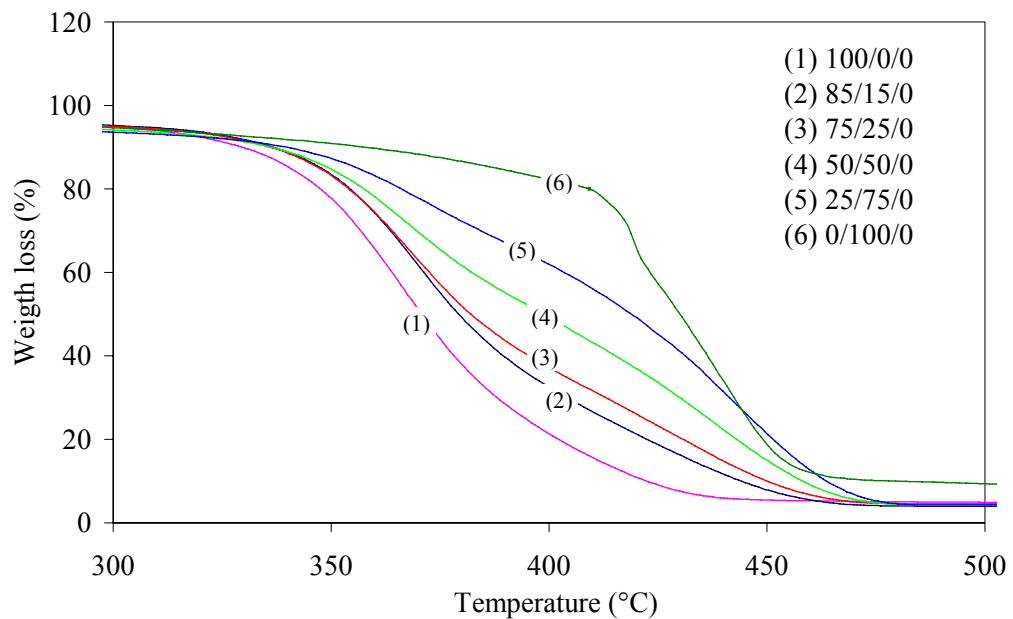
รูปที่ 4.4 สมบัติต่างๆของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกันในสัดส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 (a) และ (b) การเสียรูปหลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 70 °C ยางจะมีค่าการเสียรูปมากกว่าที่อุณหภูมิ 25 °C อยู่ประมาณ 10 เท่า โดยการเสียรูปจะลดลงตามปริมาณของยางเอสปีอาร์ที่เพิ่มขึ้นในปริมาณ 0-50 phr แต่เมื่อมียางเอสปีอาร์มากกว่า 50 phr ค่าการเสียรูปหลังการกดกลับเพิ่มขึ้น การบวมตัวของยางคอมปานด์ในน้ำมันและโทลูอีนมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อผสมยางเอสปีอาร์ในปริมาณมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ในยางผสมส่งผลต่อการบวมตัวของยางคอมปานด์โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) จากภาคผนวก ค. ในตารางที่ ค.1- ค.4

จากรูปที่ 4.4 (e) พบว่ายางคอมปานด์ที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ ในปริมาณต่างๆ จะให้ค่าความแข็งไม่สม่ำเสมอ แต่ที่น่าสังเกตคือ การเติมยางเอสปีอาร์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 50 phr จะทำให้ค่าความแข็งที่สูงกว่ายางธรรมชาติหรือยางผสมที่มียางเอสปีอาร์น้อยกว่า เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.4 (f) พบว่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางเอสปีอาร์ในยางคอมปานด์

4.1.3 การวิเคราะห์เสียรูปทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ยางเอสปีอาร์สามารถทนความร้อนได้ดีกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นในยางคอมปานด์ที่ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ จะมีประสิทธิภาพทนความร้อนได้เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณยางเอสปีอาร์ กล่าวคือเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่น้ำหนักสูญหายไปเท่ากับ 50% (T_{50}) ของยางธรรมชาติต่อยางเอสปีอาร์ 100/0, 85/25, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 อยู่ที่อุณหภูมิ 370, 379, 382, 398, 419, และ 429 °C ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวจะสูงขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของยางเอสปีอาร์ที่เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่ายางเอสปีอาร์ทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่ายางธรรมชาติ

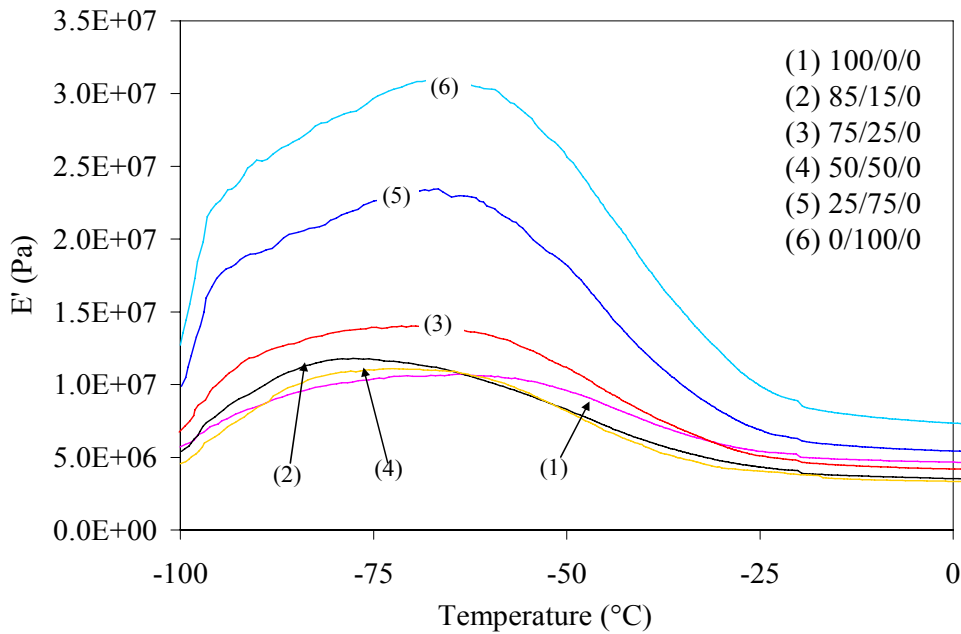


รูปที่ 4.5 เทอร์โมแกรมการสลายตัวด้วยความร้อนของยางคอมปานด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันในสัดส่วนต่างๆ

4.1.4 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัตด้วยเทคนิค DMTA

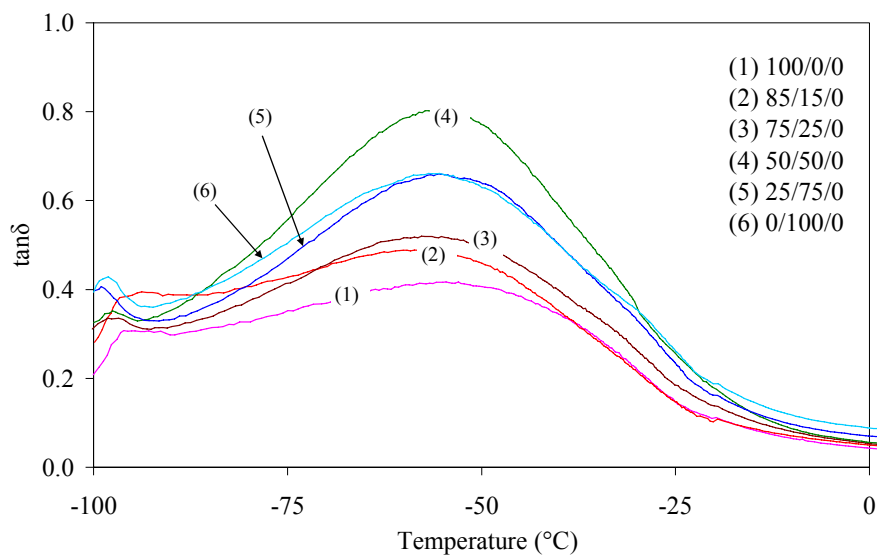
การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต ด้วยเครื่อง DMTA เป็นการวิเคราะห์ความเข้ากันได้ของยางผสมวิธีหนึ่ง โดยพิจารณาจากค่าแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent : $\tan \delta$) และ ค่ามอดูลัสสะสม (storage modulus: E') โดยอุณหภูมิที่มีค่า $\tan \delta$ สูงสุด คือ อุณหภูมิกลาส ทรานซิชัน (glass transition temperature : T_g) ของยางแต่ละชนิด ในการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

จากผลการทดลอง พบว่า ค่า E' ของเฟสยางเอสบีอาร์และยางผสมจะมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ จากรูปที่ 4.6 เนื่องจากยางเอสบีอาร์มีความเป็นอีลาสติกที่ต่ำกว่ายางธรรมชาติ ส่งผลให้ยางคอมปานด์มีค่ามอดูลัสลดลงตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของยางเอสบีอาร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณสัดส่วนของยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ส่งผลต่อค่า stiffness ของยางคอมปานด์ที่ได้



รูปที่ 4.6 ค่า E' ของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันในสัดส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่า $\tan \delta$ พบว่าค่า T_g ของยางเอสบีอาร์และยางผสมจะมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ โดยปริมาณสัดส่วนของยางเอสบีอาร์และยางธรรมชาติส่งผลต่อค่ามอดูลัสสะสม เมื่อปริมาณของยางเอสบีอาร์มีมากขึ้น ค่ามอดูลัสสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากลักษณะการจับยึดกันอย่างระหว่งยางเอสบีอาร์กับยางธรรมชาติยังไม่ดีเท่าที่ควร



รูปที่ 4.7 ค่า $\tan \delta$ ของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ผสมกันในสัดส่วนต่างๆ

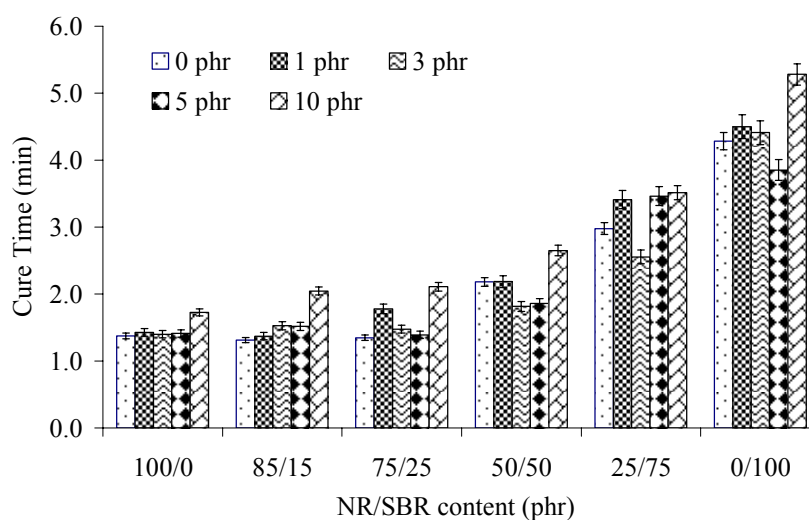
4.2 ผลของชนิดสารเสริมแรง (ใช้ซิลเฟอร์ 2 phr)

4.2.1 การใช้ CNTs เป็นสารเสริมแรง

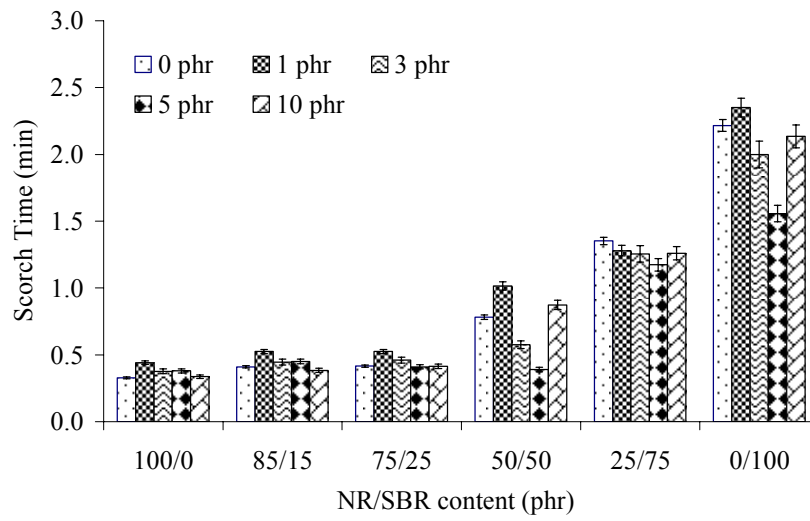
4.2.1.1 CNTs ที่ไม่ปรับผิว

4.2.1.1.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

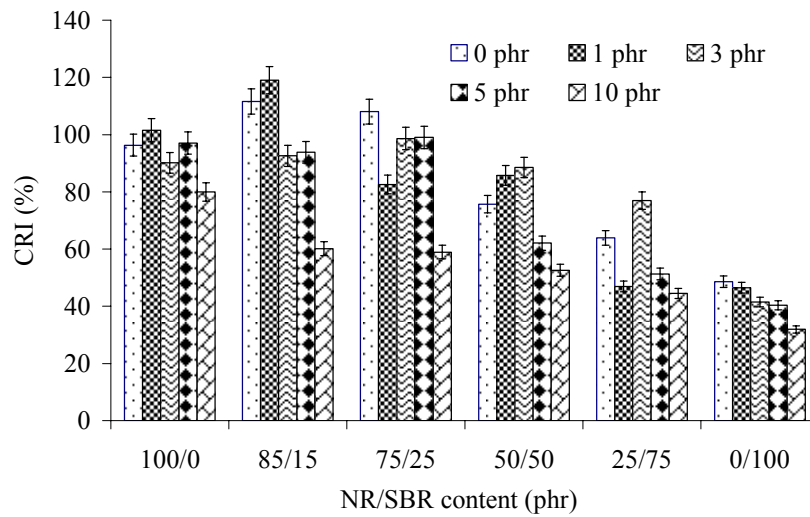
ในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาผลของการใช้ CNTs ชนิด MWNTs เป็นสารเสริมแรงในยางคอมปอนด์ที่ปริมาณ 1, 3, 5, 10 phr จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้เบื้องต้นว่าปริมาณการเติม CNTs ปริมาณ 1-5 phr ในยางคอมปอนด์ไม่ส่งผลมากนักต่อค่าดัชนีอัตราการคงรูปของยาง แต่เวลาในการคงรูปของยางคอมปอนด์มีแนวโน้มยาวนานขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ CNTs เป็น 10 phr ดังรูปที่ 4.8 - 4.10 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่มีผู้ได้รายงานไว้แล้ว (Xiang-Wen Zhou et al., 2006) เนื่องจากปริมาณของ CNTs ที่เพิ่มขึ้นทำให้การเกาะกลุ่มรวมกันของอนุภาคเกิดช่องว่างภายในมากขึ้น สารตัวเร่งปฏิกิริยาอาจถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนส่งผลให้ประสิทธิภาพในการวัลคาไนซ์ลดลงทำให้เวลาที่ใช้ในการคงรูปของยางนานขึ้น (พงษ์ธร, 2548) การเติม CNTs ในปริมาณ 1-5 phr ไม่มีผลต่อการวัลคาไนซ์มากนัก แต่จะสังเกตว่าค่าดัชนีอัตราการคงรูปจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อมีปริมาณ CNTs อยู่มากกว่า 5 phr ดังนั้นในยางธรรมชาติการเติม CNTs ในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้ดัชนีอัตราการคงรูปลดลง



รูปที่ 4.8 เวลาในการคงรูปและเวลาสกอรัซในยางธรรมชาติที่มี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.9 เวลาสกอร์ชในยางธรรมชาติที่มี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



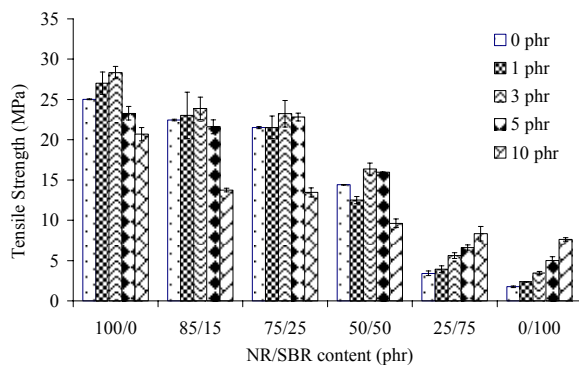
รูปที่ 4.10 ดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติที่มี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

4.2.1.1.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ

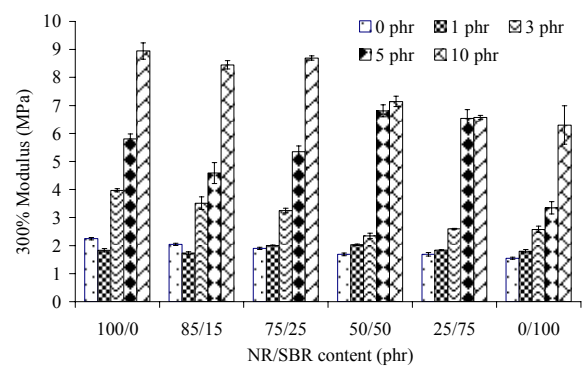
สารเสริมแรง CNTs สามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยางคงรูป เช่น มอดูลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขูดเป็นดั้น ในทำนองเดียวกัน ค่ามอดูลัสและความแข็งของยางก็จะเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่การยืดตัว ณ จุดขาดและสมบัติการกระเด็งกระดอนของยางจะลดลง การเติมสารเสริมแรงที่มีขนาดของอนุภาคขนาดเล็กจะให้การเสริมแรงแก่ยางได้ดี เพราะสารเสริมแรงที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยของน้ำหนัก (หรือเรียกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ) สูงจึงทำให้พื้นที่ที่จะเกิดแรงกระทำระหว่างยางกับสารเสริมแรงเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น สมบัติต่างๆ เช่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาดจึงสูงขึ้นตามพื้นที่ผิวจำเพาะของสารเสริมแรง (พงษ์ธร, 2548) ซึ่งพิจารณาได้จากรูป 4.11 (a) และ (d)

จากรูปที่ 4.11 (b) พบว่าค่ามอดูลัส จะลดลงตามปริมาณของยางธรรมชาติที่ลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณของ CNTs ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยางคอมพอนด์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยค่ามอดูลัสของยางคอมพอนด์ที่มียางเอสปีอาร์ 0-25 phr และเติม CNTs 3 phr จะมีค่าเพิ่มขึ้น 80-86 % เมื่อเทียบกับค่าของยางคอมพอนด์ที่ไม่เติม CNTs และมอดูลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้น 300-350 % เมื่อเติม CNTs 10 phr ค่ามอดูลัสแสดงถึงความสามารถในการต้านทานแรงได้ของวัสดุ ดังนั้น CNTs จึงสามารถเพิ่มความแข็งแรงของยางคอมพอนด์อย่างมีนัยสำคัญ

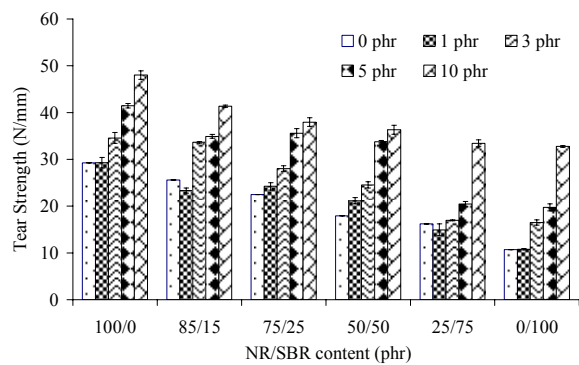
ตามที่ทราบกันแล้วว่าจุดเด่นของยางธรรมชาติ คือ มีความยืดหยุ่น โดยยางธรรมชาติสามารถยืดได้มากกว่าเมื่อเทียบกับยางเอสปีอาร์ จากรูปที่ 4.11 (c) พบว่าในยางที่ไม่เติม CNTs ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดจนขาดในยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่ายางเอสปีอาร์ประมาณ 320 % และเมื่อเติม CNTs ในปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดลดลงซึ่งจะมีพฤติกรรมเหมือนกับสารเสริมแรงในยางชนิดอื่นๆ เช่น เขม่าดำ หรือ เคลย์ เพราะสารเสริมแรงเหล่านี้บางส่วนไปตัดโมเลกุลของยางให้สั้นลง



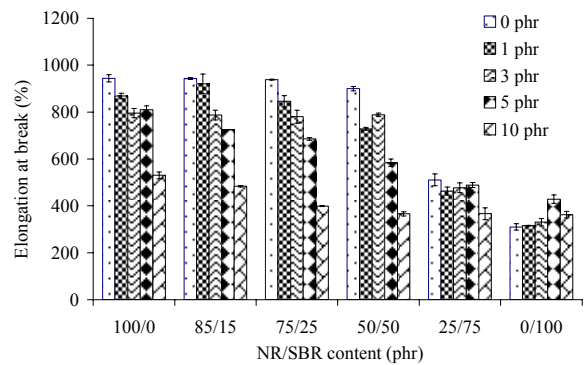
(a) ความทนต่อแรงดึง



(b) โมดูลัสที่ 300%



(c) ความต้านทานต่อการฉีกขาด



(d) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสปีอาร์ โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

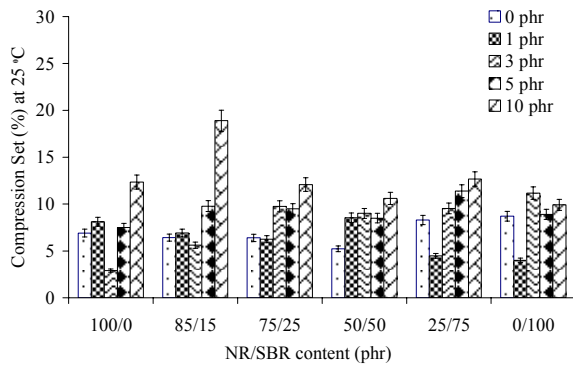
จากรูปที่ 4.12 (a) และ (b) การเสีรูปลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าต่ำกว่า 10 % ซึ่งมีการเสีรูปลังการกดในปริมาณที่น้อย ในขณะที่เดียวกัน การเสีรูปลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 70 °C ยางจะมีค่าการเสีรูปลังการกดมากกว่า ที่อุณหภูมิ 25 °C อยู่ประมาณ 10 เท่า โดยการเสีรูปลังการกดจะลดลงตามปริมาณของยางเอสปีอาร์ที่เพิ่มขึ้น 0-50 phr แต่เมื่อมียางเอสปีอาร์มากกว่า 50 phr ค่าการเสีรูปลังการกดกลับเพิ่มขึ้น การเสีรูปลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าไม่สม่ำเสมอ แต่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ CNTs เพราะสารเสริมแรงจะไปลดค่าความยืดหยุ่นของยางลง (Thong sang et al, 2006) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าการเสีรูปลังการกดที่อุณหภูมิ 70 °C พบว่า ในยางคอมปอนด์ที่มียางเอสปีอาร์ผสมน้อยกว่า 50 phr มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติม CNTs เพิ่มจาก 1 phr เป็น 5 phr และจะมีค่าลดลงเมื่อเติม CNTs 10 phr แต่ในยางคอมปอนด์ที่มียางเอสปีอาร์ 75 และ 100 phr การเติม CNTs 1-5 phr จะทำให้ค่าการเสีรูปลังการกดลดลง เมื่อ

เทียบกับยางคอมพอนด์ที่ไม่เติม CNTs แต่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติม CNTs 10 phr ปรากฏการณ์นี้ค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งอาจเนื่องมาจากการนำความร้อนที่ดีของ CNTs การเสีรูปหลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 70 °C มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณของ CNTs ที่เพิ่มขึ้น

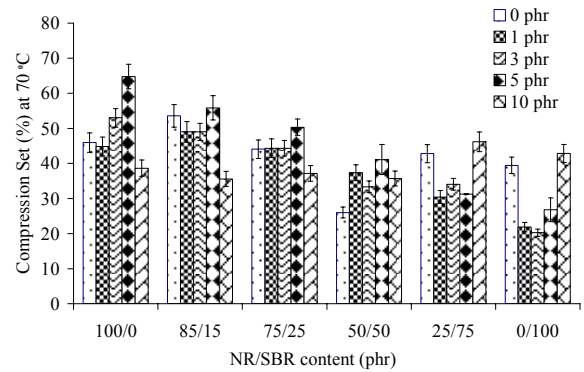
การบวมตัวของยางคอมพอนด์ในน้ำมันจะลดลงเมื่อผสมยางเอสปีอาร์ในปริมาณมากขึ้น ยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์จะไม่ทนต่อโทลูอิน จึงทำให้ยางคอมพอนด์ไม่ทนต่อโทลูอินอีกด้วย การบวมในน้ำมันและโทลูอินมีแนวโน้มจะลดลงตามปริมาณของ CNTs ที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.12 (c) และ (d) เนื่องจากการบวมตัวจะเกิดขึ้นในเนื้อยางเท่านั้นไม่เกิดขึ้นกับสารเสริมแรงเมื่อมีเนื้อยางในระบบน้อยลงการบวมตัวจึงเกิดน้อยลง (Rakehonlatee et al, 2004) อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าการลดการบวมตัวของยางลดมากกว่า 10 % เมื่อเติม CNTs 10 phr ดังนั้นการบวมตัวที่น้อยลงนี้อาจจะเกิดจากโครงสร้างของยางเกิดการเชื่อมขวาง ตามสมการของ Flory-Rhener (Arroyo et al, 2006; Kumnuantip et al, 2003)

จากรูปที่ 4.12 (e) พบว่ายางคอมพอนด์ในอัตราส่วนระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางเอสปีอาร์ ต่างๆ ซึ่งไม่เติม CNTs จะให้ค่าความแข็งไม่สม่ำเสมอ แต่ที่น่าสังเกตคือ การเติมยางยางเอสปีอาร์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 50 phr จะทำให้ค่าความแข็งที่สูงกว่ายางธรรมชาติหรือยางผสมที่มียางเอสปีอาร์น้อยกว่า เมื่อพิจารณาจากกราฟ ค่าความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของ CNTs และ ยางเอสปีอาร์ที่เพิ่มขึ้น โดยสารเสริมแรงชนิด CNTs มีความแข็งมากกว่าเนื้อยางเมื่อนำมาผสมในเนื้อยางจึงทำให้ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นได้

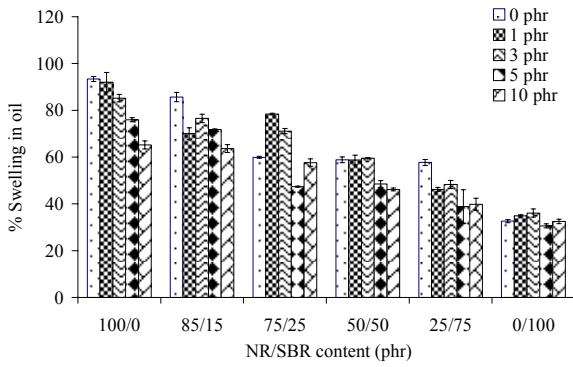
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 (f) พบว่าปริมาณยางเอสปีอาร์ในยางคอมพอนด์ที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมขวางและจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม CNTs ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางคอมพอนด์สูตรต่างๆ ที่ไม่มีสารเสริมแรง การที่ CNTs ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณการเชื่อมขวางนั้น เนื่องมาจากการเกาะกันอย่างดีของสารเสริมแรงกับเนื้อยาง (ชัชวาล และคณะ, 2550 ; Arroyo et al., 2006) และเนื่องจาก aspect ratio ของ CNTs มีค่ามาก (ลักษณะเป็นเส้นใย) มีโอกาสที่จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางทางกายภาพ (physical crosslink) ได้ (Shanmugharaj et al., 2007) กอปรกับสมบัติในการนำความร้อนของ CNTs ที่ดีเลิศจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางมากขึ้น



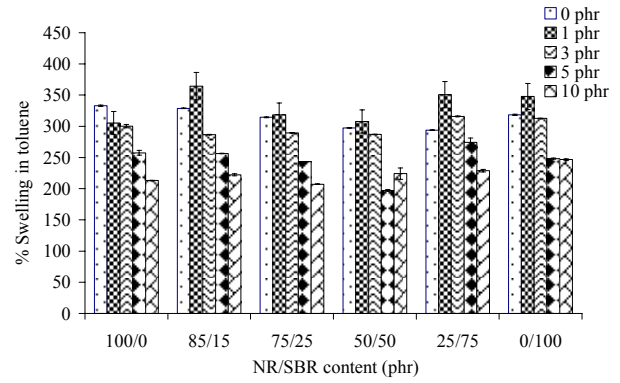
(a) การเสียรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C



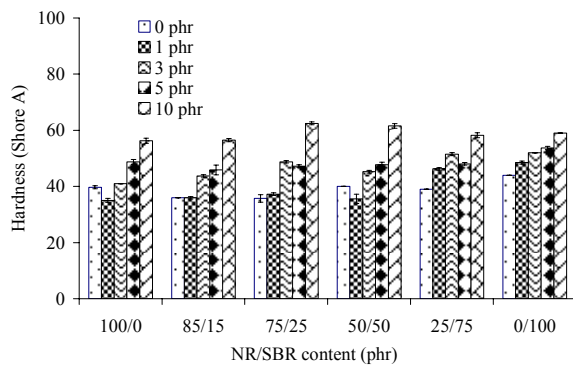
(b) การเสียรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 70°C



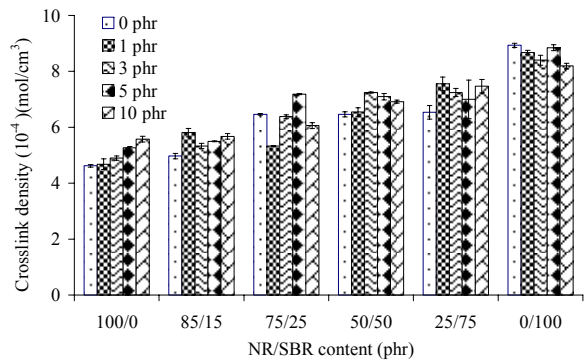
(c) การบวมตัวในน้ำมัน



(d) การบวมตัวในโทลูอีน



(e) ความแข็ง



(h) ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง

รูปที่ 4.12 สมบัติเชิงต่างๆ ของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสปีอาร์โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

4.2.1.1.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

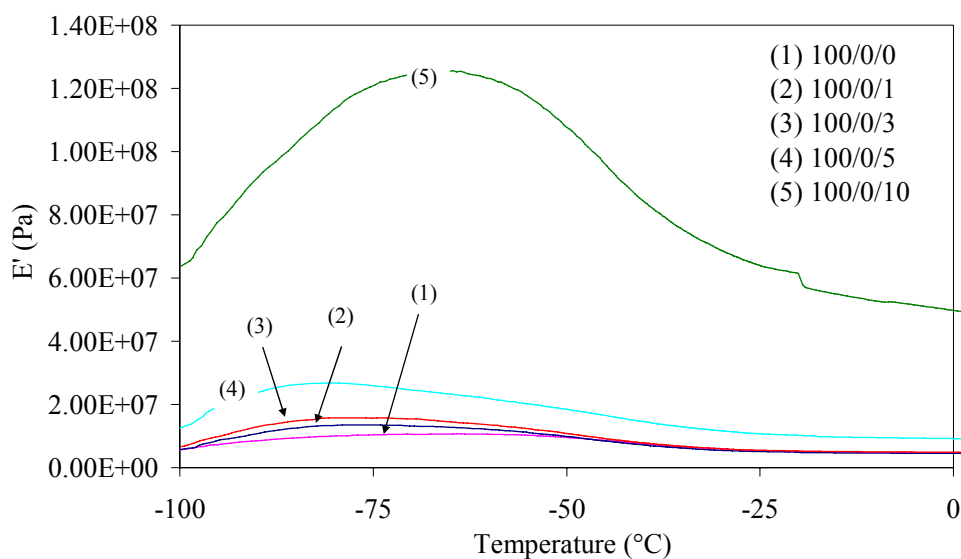
ตารางที่ 4.2 ผลของการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางคอมปोजันต์ด้วยเครื่อง TGA

| ยางธรรมชาติต่อยาง เอสปีอาร์ | ปริมาณ CNTs | T ₅ (°C) | T ₁₀ (°C) | T ₅₀ (°C) | ปริมาณถ่าน อุณหภูมิ 750°C (%) |
|--------------------------------|-------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|
| 100/0 | 0 | 299 | 329 | 370 | 3.5 |
| | 1 | 297 | 334 | 376 | 4.7 |
| | 3 | 304 | 335 | 376 | 6.1 |
| | 5 | 299 | 326 | 372 | 3.1 |
| | 10 | 307 | 338 | 380 | 12.4 |
| 85/15 | 0 | 303 | 336 | 379 | 3.6 |
| | 1 | 294 | 335 | 381 | 4.6 |
| | 3 | 292 | 328 | 377 | 3.3 |
| | 5 | 307 | 337 | 382 | 8.2 |
| | 10 | 294 | 328 | 380 | 5.2 |
| 75/25 | 0 | 300 | 336 | 382 | 4.3 |
| | 1 | 289 | 333 | 384 | 3.6 |
| | 3 | 290 | 334 | 383 | 6.4 |
| | 5 | 291 | 336 | 388 | 8.5 |
| | 10 | 304 | 339 | 392 | 12.4 |
| 50/50 | 0 | 278 | 335 | 398 | 4.0 |
| | 1 | 285 | 335 | 406 | 3.2 |
| | 3 | 294 | 341 | 410 | 6.3 |
| | 5 | 287 | 336 | 396 | 10.6 |
| | 10 | 296 | 342 | 414 | 12.2 |
| 25/75 | 0 | 264 | 339 | 419 | 4.1 |
| | 1 | - | - | - | - |
| | 3 | - | - | - | - |
| | 5 | 271 | 340 | 426 | 7.9 |
| | 10 | 284 | 346 | 429 | 12.4 |
| 0/100 | 0 | 292 | 357 | 429 | 4.1 |
| | 1 | - | - | - | - |
| | 3 | - | - | - | - |
| | 5 | 287 | 356 | 442 | 8.3 |
| | 10 | 284 | 359 | 441 | 12.6 |

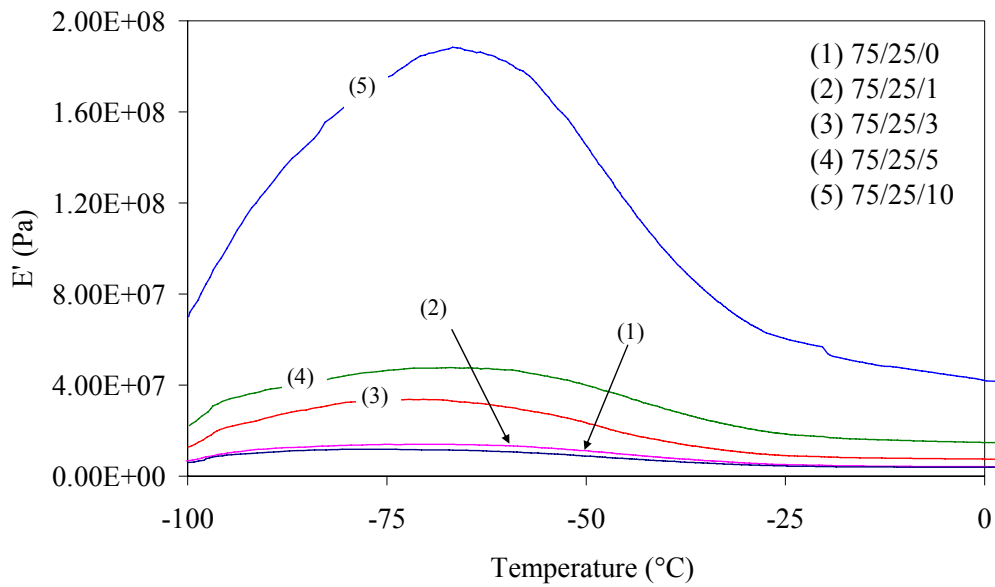
ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของยางคอมปอนด์ เมื่อเติม CNTs ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ยางคอมปอนด์ ทนความร้อนสูงขึ้น หากพิจารณาอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการสูญเสียน้ำหนักเป็น 1, 10, 50% ของน้ำหนักเริ่มต้น หรือ T_5 , T_{10} และ T_{50} ในตารางที่ 4.2 พบว่าการเติม CNTs ซึ่งเป็นตัวนำความร้อนที่ดีจะช่วยถ่ายเทความร้อนสู่ผิวได้เร็วขึ้น จึงทำให้ความร้อนส่งผลต่อการหลอมของยางได้ลดลง การสลายตัวในยางคอมปอนด์เกิดขึ้นได้ช้าลง

4.2.1.1.4 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัตด้วยเทคนิค DMTA

ผลของการเติม CNTs ต่อค่า E' และ $\tan \delta$ ของยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ และยางผสม พบว่าการเติม CNTs ส่งผลต่อการเพิ่มค่า E' ของยางคอมปอนด์ทั้งในยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ และในยางผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.13 – 4.17 โดยค่า E' จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม CNTs เนื่องจากลักษณะที่เป็นเส้นใยของ CNTs ซึ่งช่วยในการเสริมแรงของยางคอมปอนด์ ส่งผลให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ CNTs

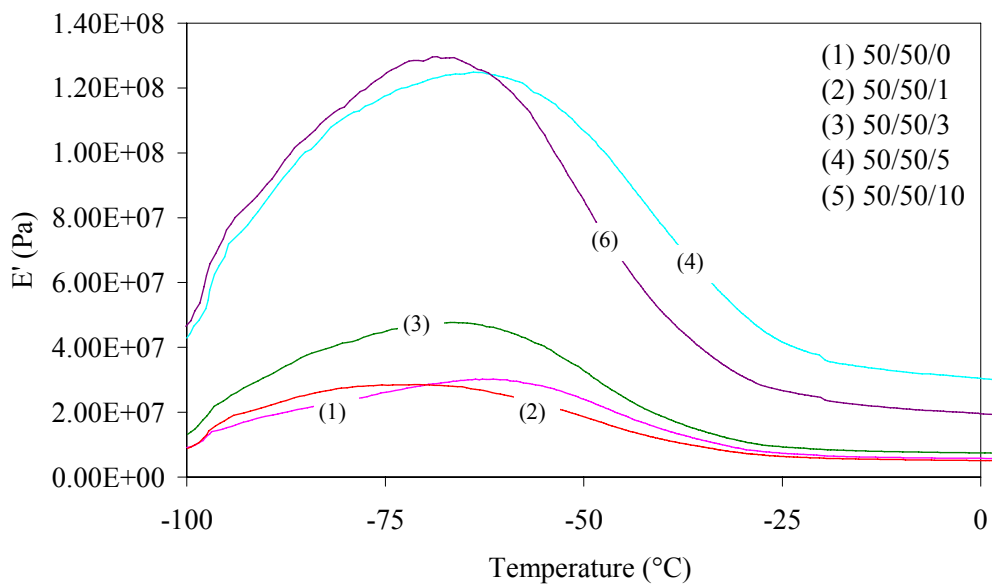


รูปที่ 4.13 ค่า E' ของยางธรรมชาติโดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

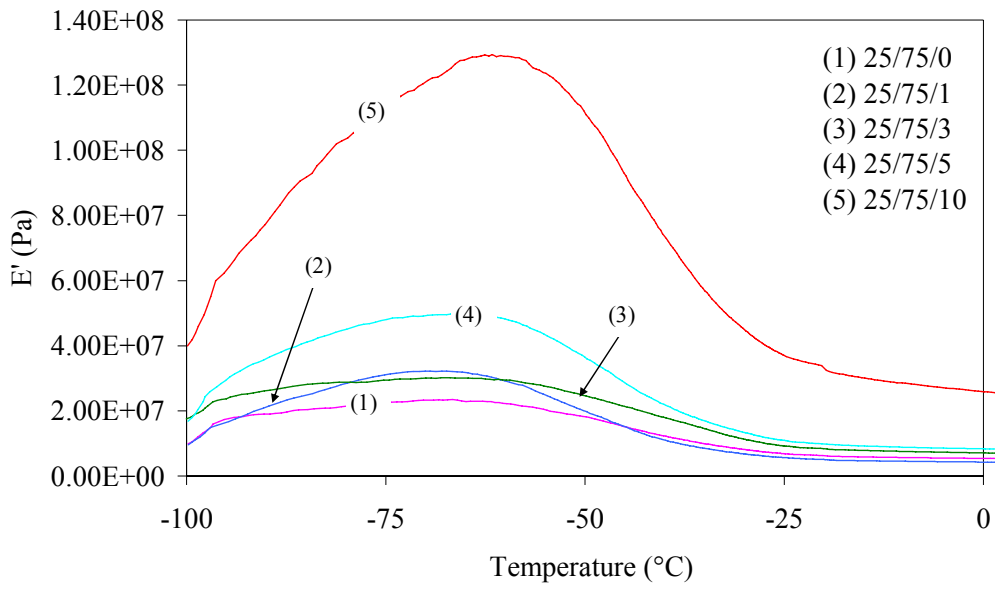


รูปที่ 4.14 ค่า E' ของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสบีอาร์ในสัดส่วน 75/25 โดยมี

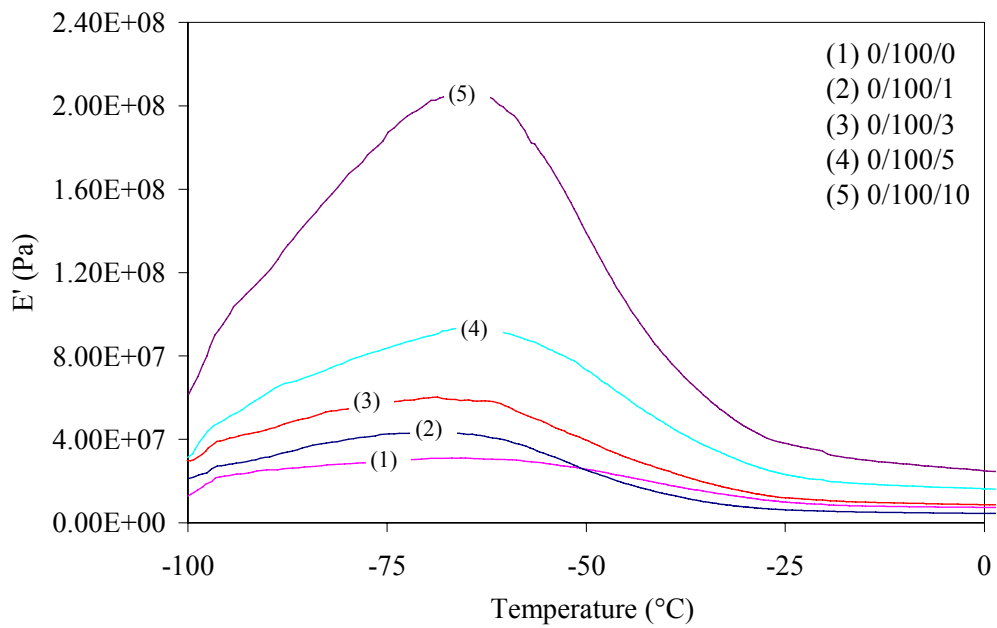
CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.15 ค่า E' ของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสบีอาร์ในสัดส่วน 50/50 โดยมี
 CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.16 ค่า E' ของยางคอมปานด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสบีอาร์ในสัดส่วน 25/75 โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.17 ค่า E' ของยางเอสบีอาร์ โดยมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

สำหรับค่า $\tan \delta$ ของยางคอมปอนด์ที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีความสัมพันธ์กับการสั่นของโมเลกุลมาก การเติมสารตัวเติมขนาดระดับจุลภาคในยางคอมปอนด์ ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า $\tan \delta$ และเมื่อปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น (Hamdan et al., 2004) ทำให้ค่า $\tan \delta$ สูงขึ้น เพราะเกิดแรงเสียดทานขึ้นระหว่างจุลภาคต่ออนุภาคที่เกิดรวมตัวกันเป็นก้อนของสารตัวเติมในบางบริเวณ และเป็นแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์บริเวณที่มีการเกาะกันไม่ดี (Nielsen and Landel., 1994) แต่ในกรณีที่เป็นสารตัวเติมระดับนาโนอาจให้ผลที่แตกต่างออกไป จากตารางที่ 4.43 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CNTs เข้าไปในระบบ จะส่งผลให้ค่า $\tan \delta$ มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bokobza (2007) การเปลี่ยนแปลงค่า $\tan \delta$ นี้เนื่องมาจาก CNTs อาจมีผลต่อการเพิ่มโครงสร้างเชื่อมขวางของยาง ในปริมาณที่เหมาะสมเข้าไปในเนื้อยางคอมปอนด์ ทำให้ยางคอมปอนด์มีพันธะที่แข็งแรงขึ้น อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าสำหรับยางคอมปอนด์ที่มีส่วนผสมของยางธรรมชาติมากกว่า 50 phr การเติม CNTs 10 phr ดูเหมือนว่าจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง (รูปที่ 4.11 (a)) แม้ว่าค่า $\tan \delta$ จะต่ำกว่าค่าของยางคอมปอนด์ที่ไม่เติม CNTs ก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก CNTs มีการจับตัวเป็นก้อนเป็นอนุภาคขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ในยางคอมปอนด์ จึงไม่ได้ช่วยเสริมแรงในยางคอมปอนด์

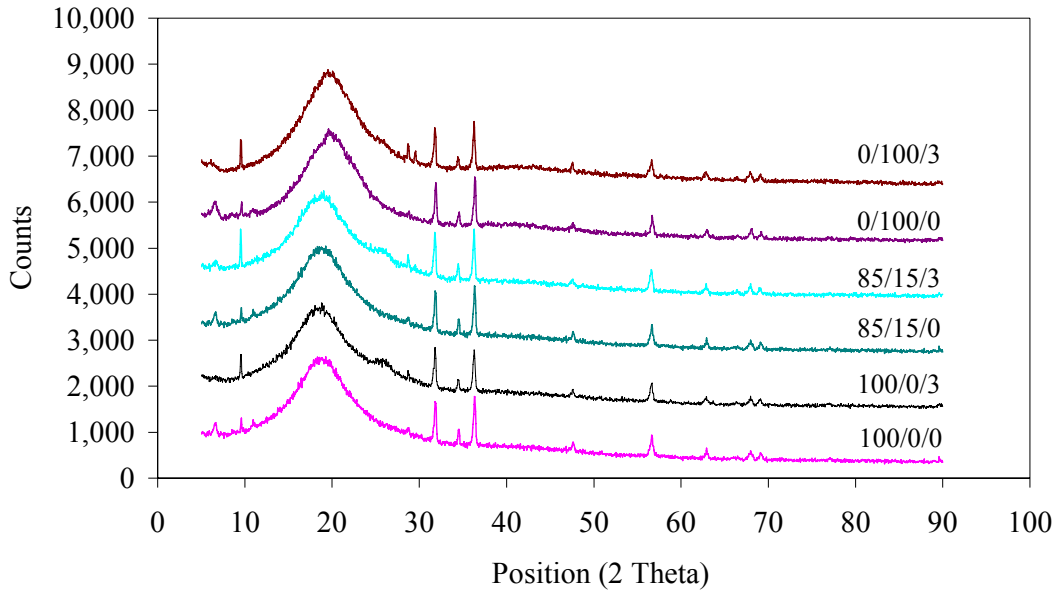
ในยางเอสปีอาร์ CNTs มีผลต่อ $\tan \delta$ ต่างกับยางคอมปอนด์ที่กล่าวมาเล็กน้อย กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณ CNTs จะทำให้ $\tan \delta$ ของยางผสมลดลง แต่เมื่อเทียบกับค่าของยางเอสปีอาร์ที่ไม่มีสารเติมกลับมีค่ามากกว่า ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายๆ สารตัวเติมระดับจุลภาคแทนระดับนาโน เมื่อพิจารณาอุณหภูมิสภาพคล้ายแก้ว ของยางคอมปอนด์ที่เติม CNTs พบว่า CNTs 1-10 phr มีผลต่ออุณหภูมิ T_g ของยางธรรมชาติ โดยทำให้อุณหภูมิ T_g ลดลง 6-14 °C แต่จะมีผลเล็กน้อยสำหรับยางคอมปอนด์สูตรอื่นๆ

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิ T_g ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ค่าสูงสุดของค่า $\tan \delta$ ด้วยเครื่อง DMTA

| ยางธรรมชาติต่อยางเอสปีอาร์ | T_g (°C) | | | | |
|----------------------------|------------|-----|-----|-----|----------|
| | CNTs 0 | 1 | 3 | 5 | 10 (phr) |
| 100/0 | -53 | -59 | -59 | -67 | -57 |
| 85/15 | -59 | -61 | -61 | -58 | -60 |
| 75/25 | -58 | -57 | -56 | -57 | -57 |
| 50/50 | -57 | -57 | -56 | -57 | -59 |
| 25/75 | -56 | -52 | -57 | -56 | -54 |
| 0/100 | -57 | -57 | -60 | -57 | -60 |

4.2.1.1.5 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์อย่างคอมปานด์ที่เติมและไม่เติม CNTs จากรูปที่ 4.18 จะเห็นพีคที่มุม 2 Theta ประมาณ 20 องศา เป็นพีคของยางคอมปานด์ และพีคที่มุมประมาณ 27 องศาเป็นพีคของ CNTs จะเห็นว่าในยางคอมปานด์ที่ไม่ได้เติม CNTs จะไม่ปรากฏพีคนี้ แสดงว่าการเติม CNTs ปริมาณ 3 phr ในยางคอมปานด์ สามารถกระจายตัวในเนื้อยางคอมปานด์ได้อย่างดี



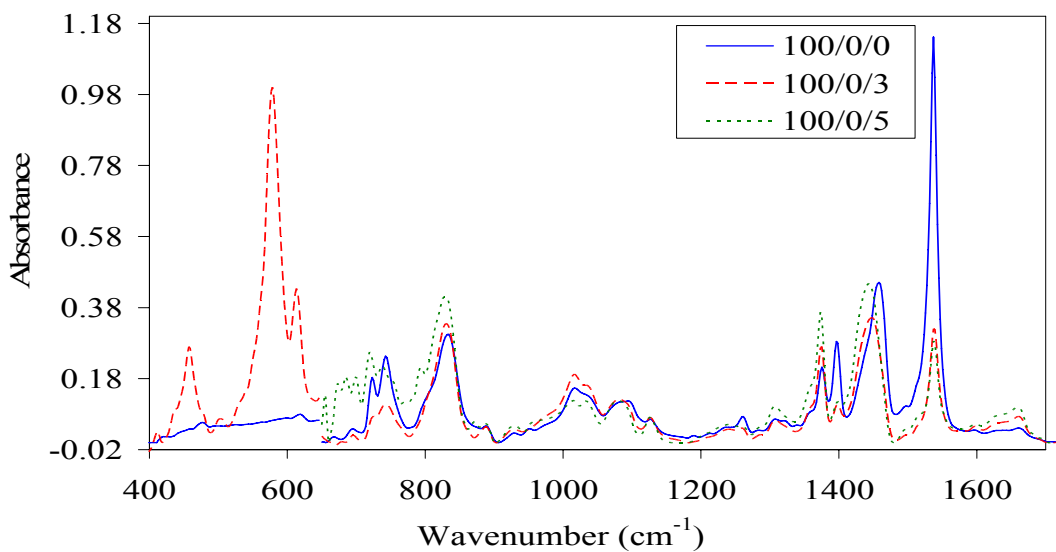
รูปที่ 4.18 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของยางคอมปานด์ที่เติม CNTs ในปริมาณต่างๆ

4.2.1.1.6 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR

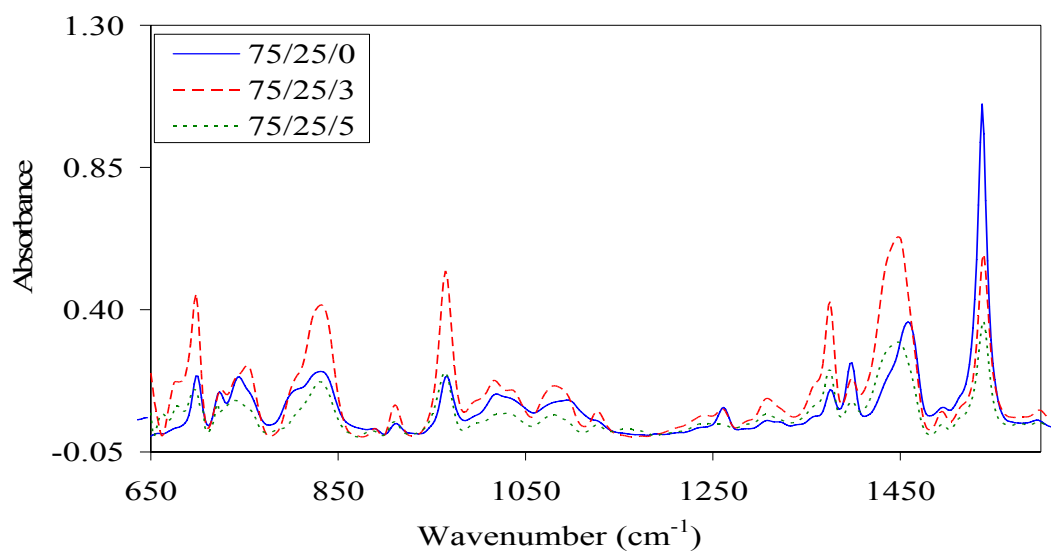
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยรังสีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าค่าการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรดที่บอกเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็น cis-1, 4-Polyisoprene ที่สำคัญได้แก่ ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 837 cm^{-1} เป็นการงอของพันธะ C=C บน cis-1, 4-Polyisoprene และที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1449 และ 1367 cm^{-1} จะเป็นการยืดของพันธะ C-H ของอะลิฟาติก (Aliphatic) ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ (สิทธิพงษ์, 2547) โดยตำแหน่งของเลขคลื่นอาจจะมีการคลาดเคลื่อนบ้าง ดังรูปที่ 4.18 (เส้นกราฟของสูตร 100/0/0) เป็นสเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมโดยตำแหน่งของการงอของพันธะ C=C บน cis-1, 4-Polyisoprene จะปรากฏที่เลขคลื่น 799.72 cm^{-1} ส่วนการยืดของพันธะ C-H ของอะลิฟาติกจะปรากฏที่เลขคลื่น 1382.20 cm^{-1} และ 1240.67 cm^{-1} ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเส้นกราฟที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าตำแหน่งพีค FT-IR ของยางธรรมชาติดังรูปที่ 4.19 (เส้นกราฟของสูตร 100/0/0) และยางเอสปีอาร์ดังรูปที่ 4.20

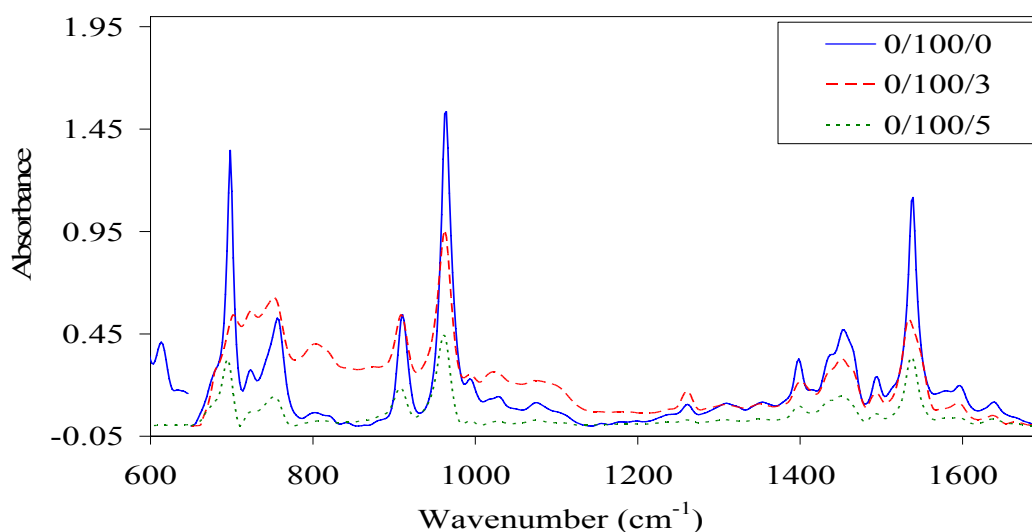
(เส้นกราฟของสูตร 0/100/0) ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยค่าเลขคลื่นพีคของยางธรรมชาติปรากฏที่ 653.8, 673.1, 873.7, 929.7, 1018.4, 1035.7 และ 1373.2 ในขณะที่พีคของยางเอสบีอาร์ปรากฏที่ 696.3, 813.9, 908.5, 962.4 และ 997.1 และเมื่อเติม CNTs ในยางธรรมชาติและยางคอมเปานด์พบว่าปรากฏพีคใหม่ที่แตกต่างกับยางธรรมชาติและยางคอมเปานด์ที่เลขคลื่น 1030, 1080 และ 1154 ซึ่งแสดงถึงอาจเกิดการเชื่อมขวางทางเคมีขึ้นบางส่วนจากอิทธิพลของการเติม CNTs (รูปที่ 4.21)



รูปที่ 4.19 ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม CNTs



รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของยางคอมเปานด์ที่มีสัดส่วนยางธรรมชาติต่อยางเอสบีอาร์ (75/25) ที่เติมและไม่เติม CNTs



รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของยางเอสปีอาร์ที่เดิมและไม่เดิม CNTs

4.2.1.2 CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด

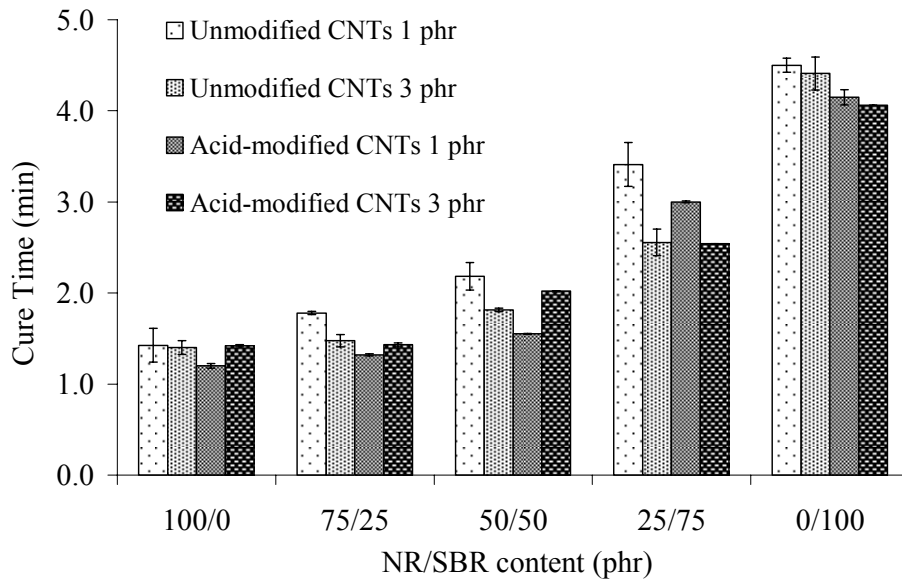
4.2.1.2.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

ปกติ สารเสริมแรงจะมีหมู่ฟังก์ชันเคมีชนิดต่างๆ เกาะติดหรือถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว เช่น ฟีนอลิก (phenolic) ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ควินิน (quinine) คาร์บอกซิล (carboxyl) แล็กโทน (lactone) ไฮลานอล (-OH) ส่วนยางธรรมชาติเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวของ CNTs ก็มีผลกระทบต่ออัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการควบ โดยเฉพาะหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ฟีนอลิก (พงษ์ธร, 2548) เพราะหมู่ฟังก์ชันเคมีเหล่านี้จะทำให้ CNTs มีความเป็นกรดสูงจึงส่งผลต่อทำให้ปฏิกิริยาการควบเกิดขึ้นได้ช้าลง

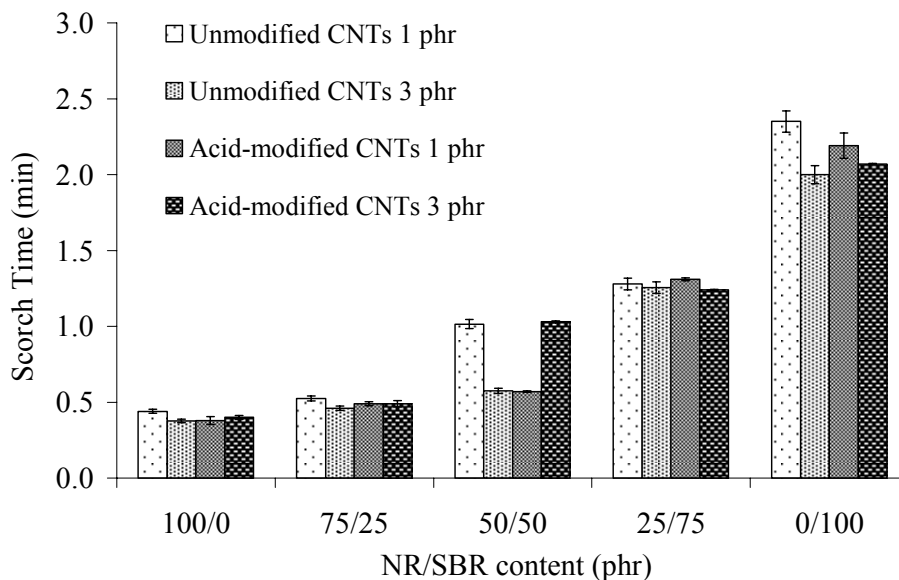
ปัจจุบันได้มีการพัฒนา CNTs โดยการปรับปรุงพื้นผิวโดยการใช้หมู่ฟังก์ชันต่างๆ เช่น COOH, HNO₃, และ H₂SO₄ เป็นต้น แม้ว่าในยางธรรมชาติค่าความเป็นกรด-ด่างของสารเสริมแรงส่งผลกระทบบโดยตรงต่อลักษณะการควบของยาง (สารเสริมแรงที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะหน่วงปฏิกิริยาการควบ) หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวไม่เพียงแต่จะมีผลต่อความว่องไวทางปฏิกิริยา (surface activity) ยังมีผลต่ออัตราการควบรูปอย่างอีกด้วย การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในเขม่าดำจะทำให้ยางมีค่าระยะเวลาสกรูชที่ยาวขึ้นมีอัตราเร็วในการควบรูปและค่ามอดูลัสที่ต่ำลง (พงษ์ธร, 2550)

ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาในลำดับต่อมาโดยการเติม CNTs ที่ทำการปรับผิวด้วยกรด (CNTs-COOH) ปริมาณ 1 และ 3 phr ในยางคอมปานด์จากรูปที่ 4.22- 4.24 พบว่าการเติม CNTs 1 phr และ 3 phr ที่ทำการปรับผิวด้วยกรด ไม่ส่งผลมากนักต่อการวัลคาไนซ์ของยางคอม

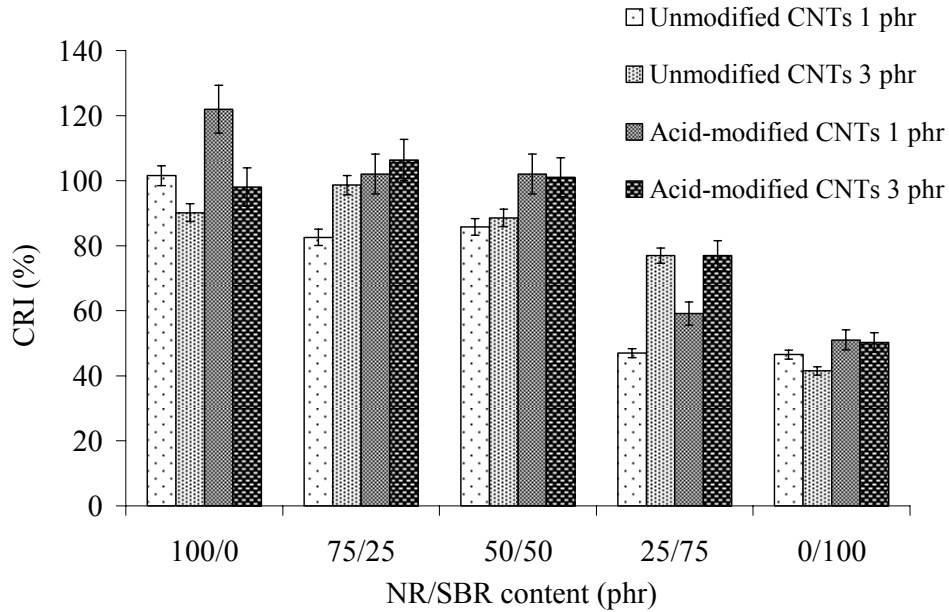
เปานด์ ซึ่งพิจารณาได้จากเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยาง เวลาสกอรัช และดัชนีอัตราการคงรูปของยาง ที่มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเติม CNTs ที่ไม่ปรับผิว



รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบเวลาในการคงรูปของยางคอมพอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกัน โดยมี CNTs ที่ไม่ปรับผิว และปรับผิวด้วยกรด เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



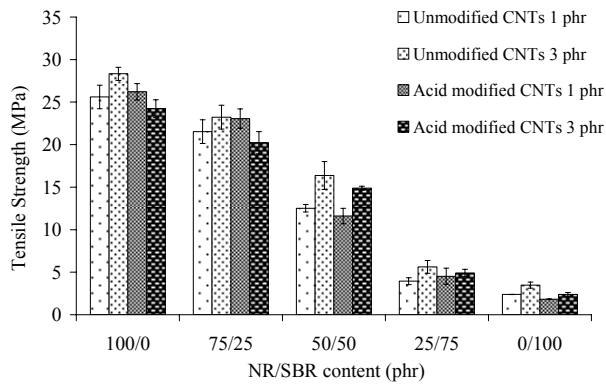
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบเวลาสกอรัชของยางคอมพอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกัน โดยมี CNTs ที่ไม่ปรับผิว และปรับผิวด้วยกรด เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



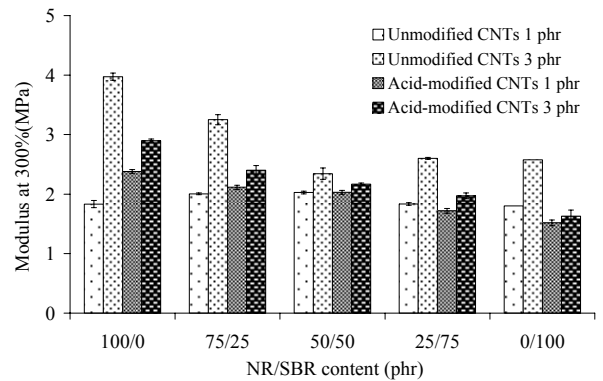
รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกันใน โดยมี CNTs ที่ไม่ปรับผิว และปรับผิวด้วยกรด เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

4.2.1.2.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ

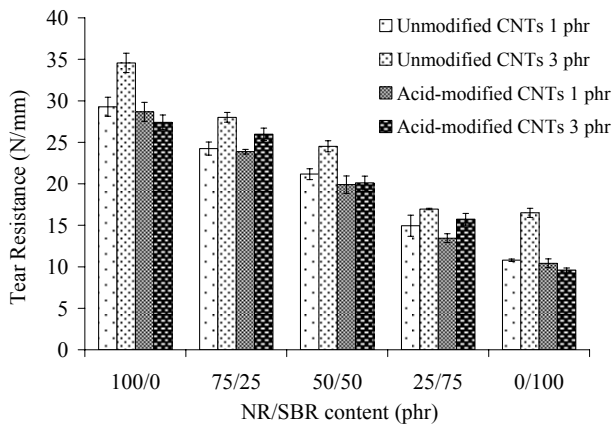
จากการศึกษาผลของการปรับผิว CNTs ด้วยกรดต่อสมบัติเชิงกลของยางคอมปอนด์พบว่า ความทนต่อแรงดึง โมดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าใกล้เคียงกับการเติม CNTs ที่ไม่ปรับผิว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสมบัติอื่นๆของยางคอมปอนด์ ได้แก่ การเสียรูปหลังการกด การบวมตัวในสารเคมี ความแข็งและความหนาแน่นการเชื่อมขวาง ก็มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบการเติม CNTs ที่ไม่ปรับผิว จากรูป 4.25 - 4.26 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับผิว CNTs ด้วยกรดไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้น



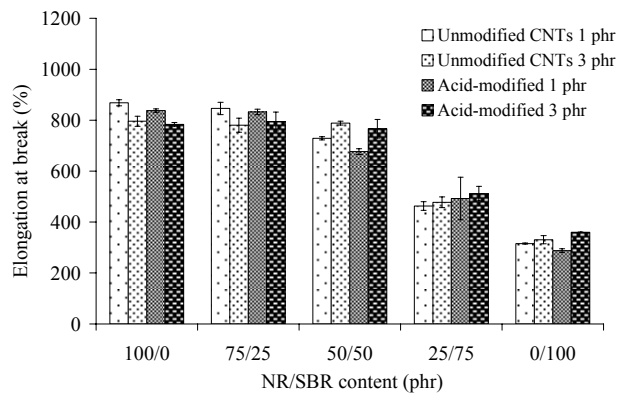
(a) ความทนต่อแรงดึง



(b) โมดูลัสที่ 300%

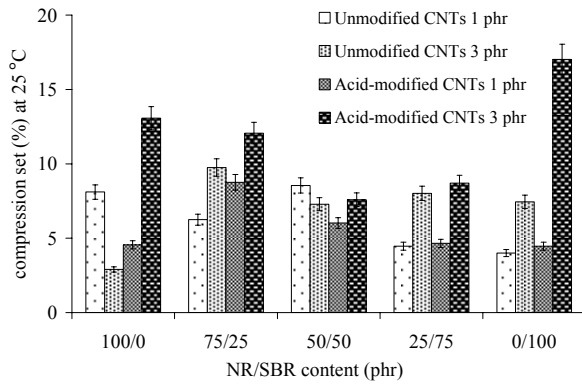


(c) ความต้านทานต่อการฉีกขาด

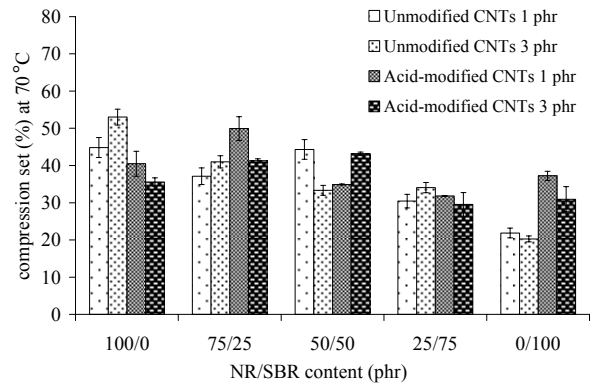


(d) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

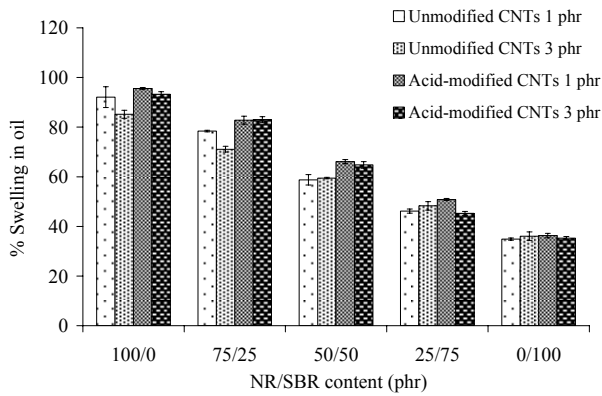
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมพอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกัน โดยไม่ใช้ CNTs ที่ไม่ปรับผิวและปรับผิวด้วยกรด เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



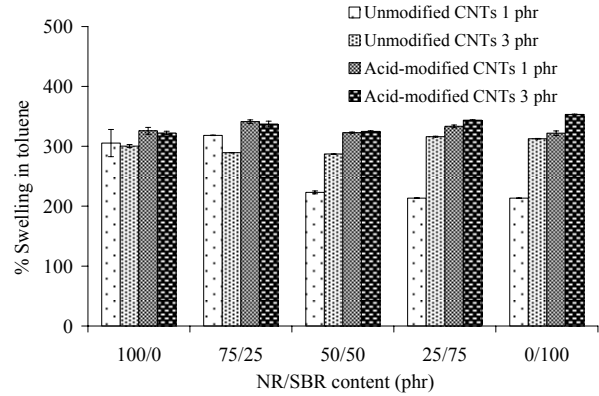
(a) การเสีรูปร่างหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C



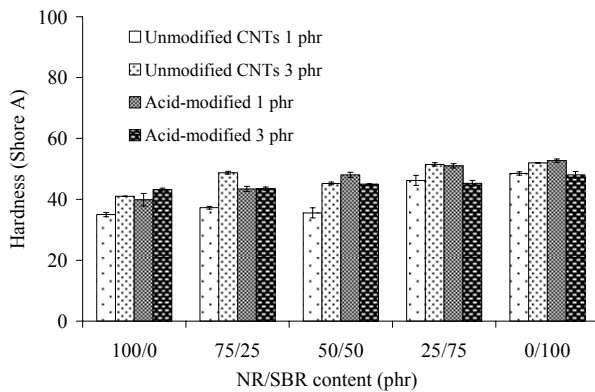
(b) การเสีรูปร่างหลังการกดที่อุณหภูมิ 70°C



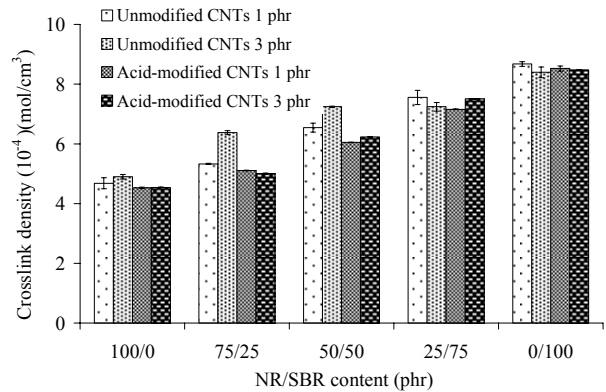
(c) การบวมตัวในน้ำมัน



(d) การบวมตัวในโทลูอิน



(e) ความแข็ง



(f) ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง

รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกัน ใน โดยมี CNTs ที่ไม่ปรับผิว และปรับผิวด้วยกรด เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

4.2.1.3 CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน

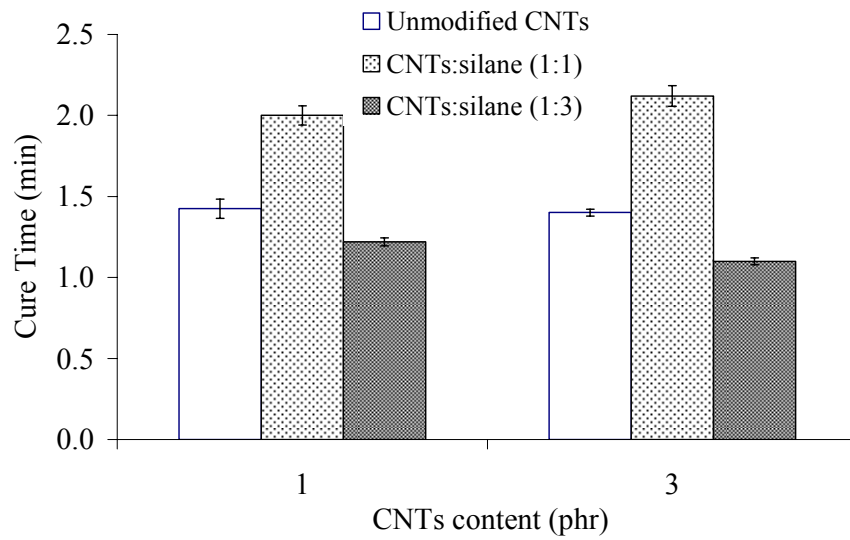
4.2.1.3.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

การปรับผิวของ CNTs เป็นวิธีหนึ่งเพื่อเพิ่มการยึดติดของผิวสัมผัสระหว่างCNTs กับเนื้อยาง (Wang et al., 2006) การปรับผิว คือการทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันบนผิว CNTs ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นๆ เช่น prepolymer ด้วยเหตุนี้การเพิ่มการยึดติดของผิวสัมผัสระหว่าง CNTs กับเนื้อยางจะมีการใช้กันมากขึ้นในวัสดุผสม พอลิเมอร์ (John et al., 2009) มีสารเคมีต่างๆมากมายที่ถูกนำมาใช้ในเทคนิค functionalization เพิ่มการยึดติดของผิวสัมผัสระหว่าง CNTs กับเนื้อยาง (Tasis et al., 2006)

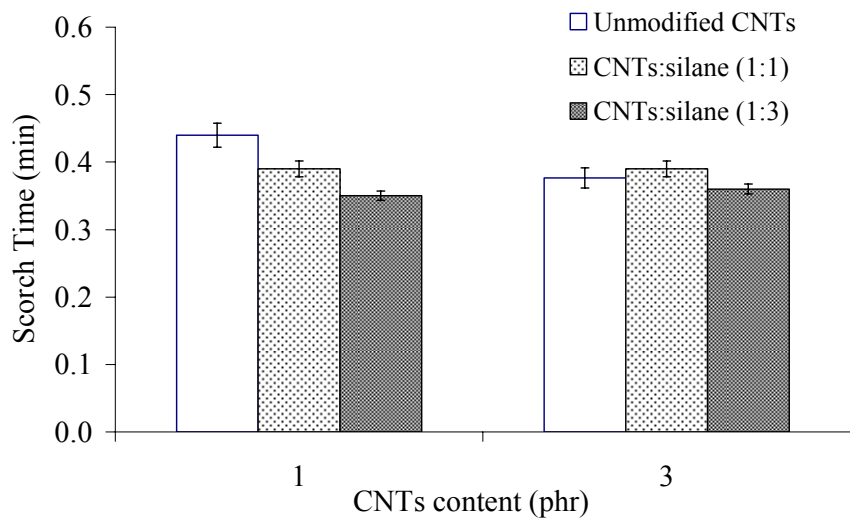
ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงของ CNTs และลดปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตเมื่อใช้ CNTs เป็นสารเสริมแรง บนพื้นผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันเคมีอินทรีย์ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่ จึงทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับ CNTs มีค่าค่อนข้างสูง ปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการต่างๆ เพื่อทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่างๆ ดีขึ้น เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในคือการใช้สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) โดยทั่วไป การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและ CNTs สูงขึ้น สารคู่ควบไซเลนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมี 2 หมู่ ที่แตกต่างกันคือหมู่อัลคอกซี (alkoxy group) เช่น หมู่เมทอกซี ($-OCH_3$) หมู่เอทอกซี ($-OC_2H_5$) และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ (organo-functional group) ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไทโรเอทอกซีไซลิล ไพรอิลเททระซัลไฟด์ (bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide), Si-69) เมอร์แคปโต ไพรอิลไทโรเอทอกซีไซเลน (mercaptopropyl-trimethoxysilane, A-189) ไทโอไซยาโน ไพรอิลไทโรเอทอกซีไซเลน (3-thiocyato-propyl-trithoxysilane, Si-264) เป็นต้น

สืบเนื่องมาจากการใช้ หมู่ฟังก์ชัน COOH เคลือบที่ผิวของ CNTs ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขึ้นรูปได้เพียงเล็กน้อย จึงได้มีการพัฒนาการปรับผิว CNTs โดยในเบื้องต้นได้ทำการศึกษาการปรับผิว CNTs- COOH ด้วยไซเลนโดยใช้อัตราส่วน CNTs- COOH ต่อไซเลน พิจารณาจากรูปที่ 4.27-4.29 ที่อัตราส่วน 1: 1 และ 1:3 (w/w) หากเปรียบเทียบเวลาการขึ้นรูป จากรูปที่ 4.25 พบว่าอัตราส่วน CNTs ต่อไซเลน 1:3 จะใช้เวลาการขึ้นรูปสั้นกว่า 1:1 ในขณะที่เวลาสกอร์ชจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยดัชนีอัตราส่วนการขึ้นรูปที่อัตราส่วน 1:3 จะมีประสิทธิภาพดีกว่า 1:1

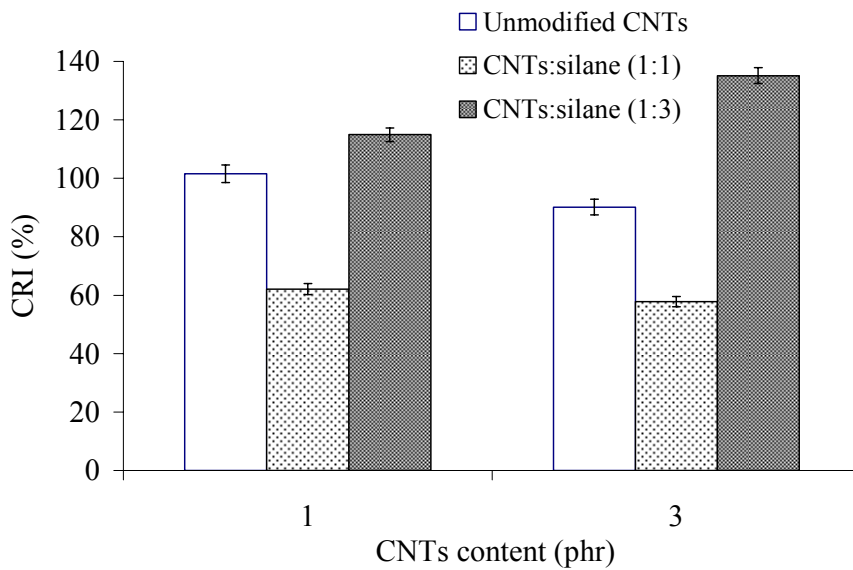
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการปรับผิวด้วยกรดกับปรับผิวด้วยไซเลนพบว่า การปรับผิวไซเลนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการวัลคาไนซ์ เวลาสกอร์ชและดัชนีอัตราส่วนการขึ้นรูปได้ดีกว่าการปรับผิวด้วยกรด



รูปที่ 4.27 เวลาในการคงรูปของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



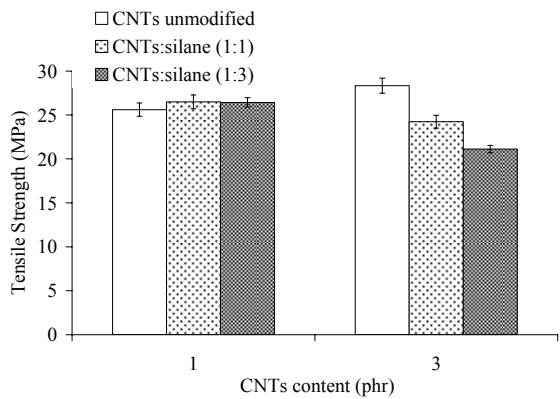
รูปที่ 4.28 เวลาสกอร์ชของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ปรับผิวด้วยไซเลนที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



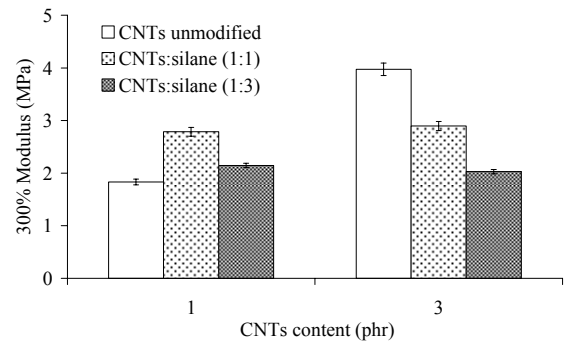
รูปที่ 4.29 คำนวณอัตราการคงรูปของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ปรับผิวด้วยไซเลนที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

4.2.1.3.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ

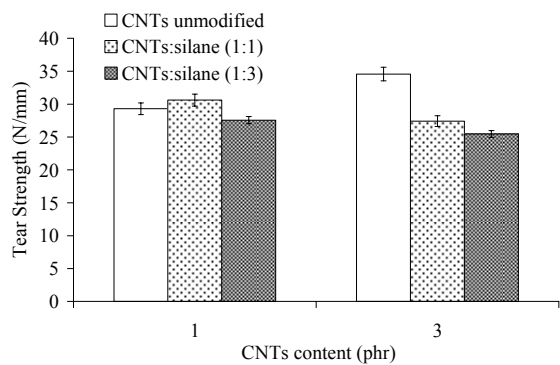
จากการศึกษาพบว่าการเติม CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลนในปริมาณที่เหมาะสมจะให้ค่าความทนต่อแรงดึง โมดูลัส และความต้านทานต่อการฉีกขาด ที่สูงกว่ายางคอมปอนด์ที่เติม CNTs ชนิดไม่ปรับผิวและปรับผิวด้วยกรด ซึ่งพิจารณาได้จากรูปที่ 4.30 (a)-(d) เมื่อเปรียบเทียบการเติม CNTs ปริมาณ 1 phr ที่ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 พบว่า ในอัตราส่วน 1:1 จะให้ค่าความทนต่อแรงดึง โมดูลัสและความต้านทานต่อการฉีกขาด ที่สูงกว่าอัตราส่วน 1:3 โดยเติม CNTs ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาดของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ CNTs และไซเลน แต่เนื่องจากอัตราส่วนที่ศึกษา 1:1 และ 1:3 ไม่แตกต่างกันมากนัก จึงส่งผลให้ค่าความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าไม่แตกต่างกัน



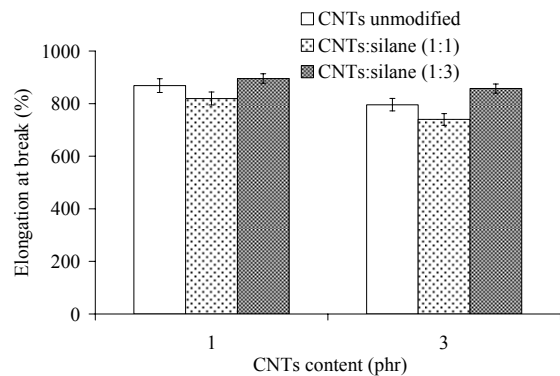
(a) ความทนต่อแรงดึง



(b) มอดูลัสที่ 300%



(c) ความต้านทานต่อการฉีกขาด



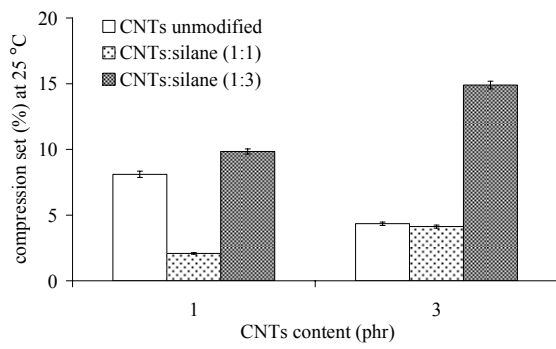
(d) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

รูปที่ 4.30 สมบัติเชิงกลของยางคอมเพาเนนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

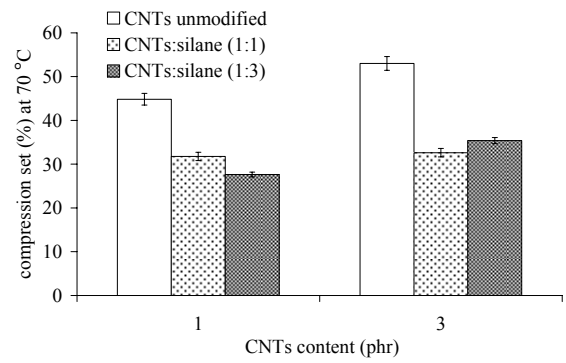
พิจารณาจากรูปที่ 4.31 (a)-(b) การเสียรูปหลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 25 °C และ 70 °C ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 มีค่าการเสียรูปที่น้อยกว่าการเติม CNTs 3 phr

การบวมตัวของยางธรรมชาติในน้ำมันและโทลูอีนมีแนวโน้มลดลงสำหรับสูตรยางที่เติม CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:3 ซึ่งพิจารณาจากรูปที่ 4.31 (c)-(d) จากการทดลองพบว่า การปรับผิว CNTs ด้วยไซเลนช่วยให้การบวมตัวเกิดขึ้นน้อยลงในยางธรรมชาติ

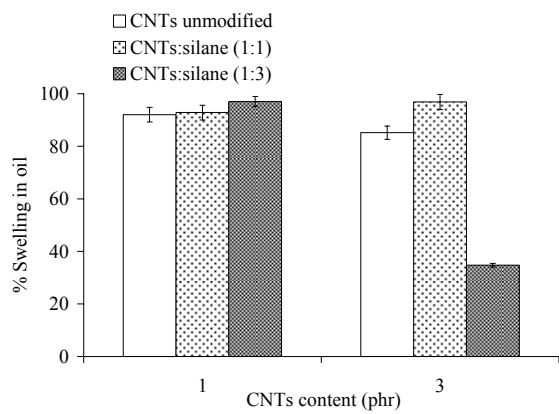
จากรูปที่ 4.31 (d) พบว่าการเติม CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลนในปริมาณที่เหมาะสมในยางธรรมชาติจะช่วยเพิ่มค่าความแข็งของยาง พิจารณาจากรูปที่ 4.31 (f) พบว่าค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางยางธรรมชาติที่เติม CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน 1 phr มีค่าใกล้เคียงกับการเติม CNTs ชนิดไม่ปรับผิว แต่เมื่อเติม CNTs ปริมาณ 3 phr ที่ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:3 จะให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางที่สูงกว่า อัตราส่วน 1:1 และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว



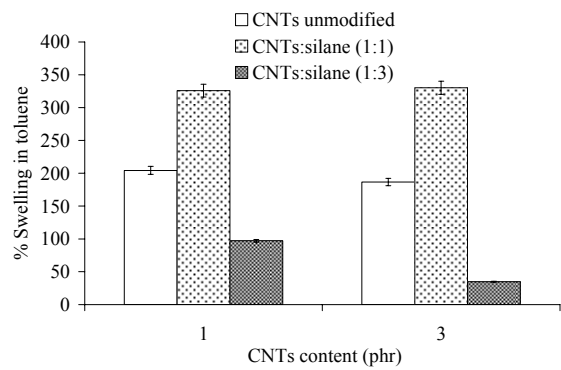
(a) การเสีรูปร่างหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C



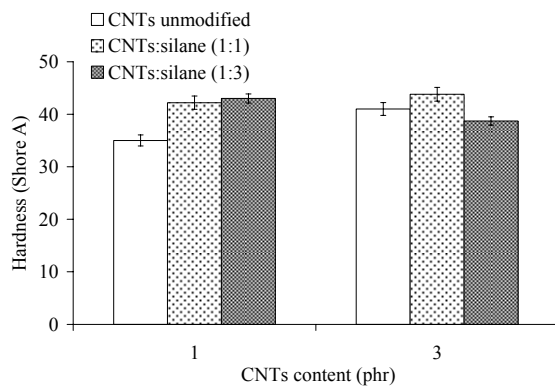
(b) การเสีรูปร่างหลังการกดที่อุณหภูมิ 70°C



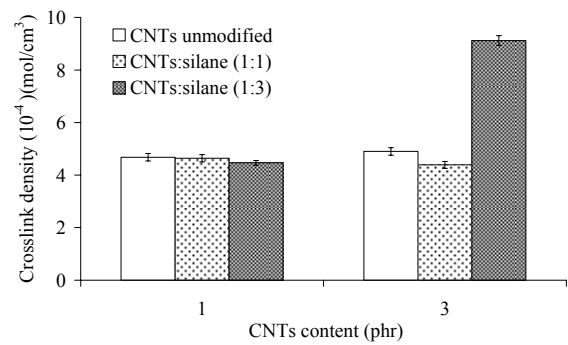
(c) การบวมตัวในน้ำมัน



(d) การบวมตัวในโทลูอีน



(e) ความแข็ง

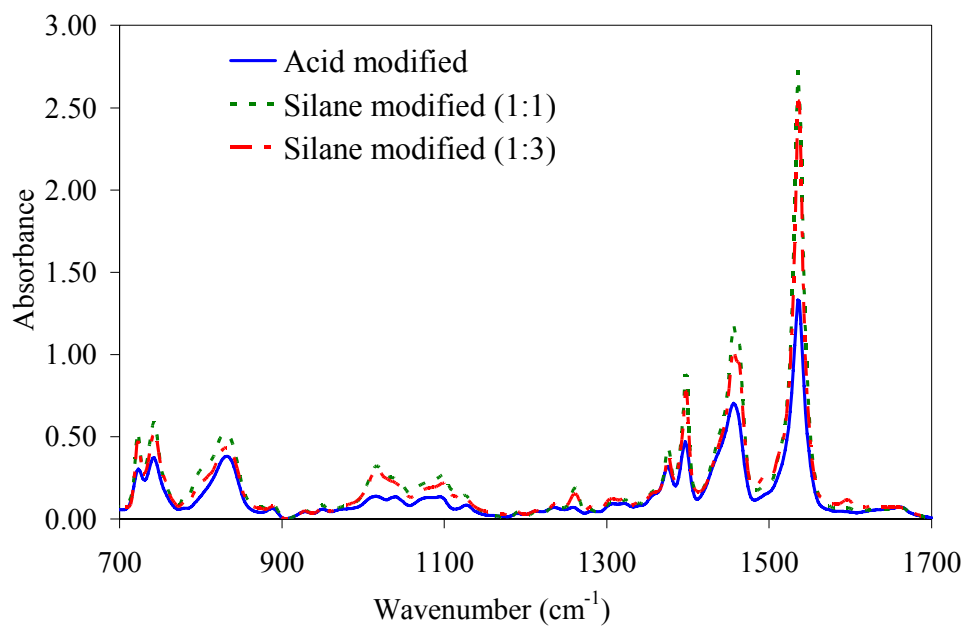


(f) ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง

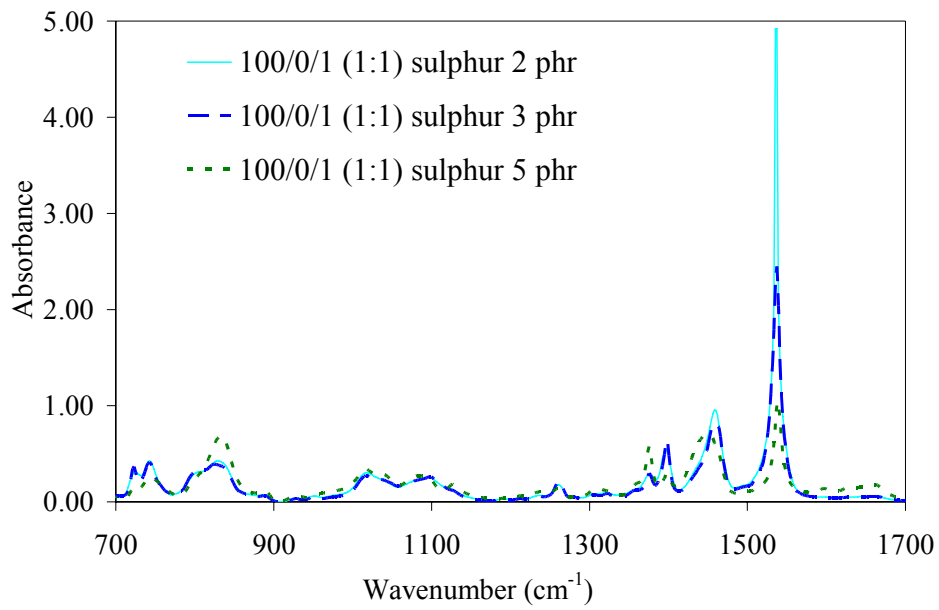
รูปที่ 4.31 สมบัติต่างๆของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

4.2.1.3.3 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของ CNTs ที่ปรับผิวด้วยรังสีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด ค่าการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1154 cm^{-1} , 1382 cm^{-1} , 1654 cm^{-1} , 1735 cm^{-1} , $2925\text{-}2854\text{ cm}^{-1}$, 3446 cm^{-1} ซึ่งเป็นพันธะของ C-O, O-H, C=C, C-O, C-H, O-H ตามลำดับ ส่วนพีคใหม่ที่เกิดขึ้นเมื่อทำการปรับผิว CNTs ด้วยไซเลนปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 803 cm^{-1} ซึ่งเป็นพันธะของ Si-OH เนื่องจากไซเลนไปจับที่ผิวของ CNTs (John Kathi et al., 2009) จากรูปที่ 4.32 เมื่อเติม CNTs ที่ปรับผิวลงในยางธรรมชาติพบว่าการเติม CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลนจะเกิดพีคในแต่ละตำแหน่งที่สูงกว่าการเติม CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด โดยการเติม CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 จะเกิดพีคในแต่ละตำแหน่งที่สูงกว่าอัตราส่วน 1:3 ดังรูปที่ 4.33

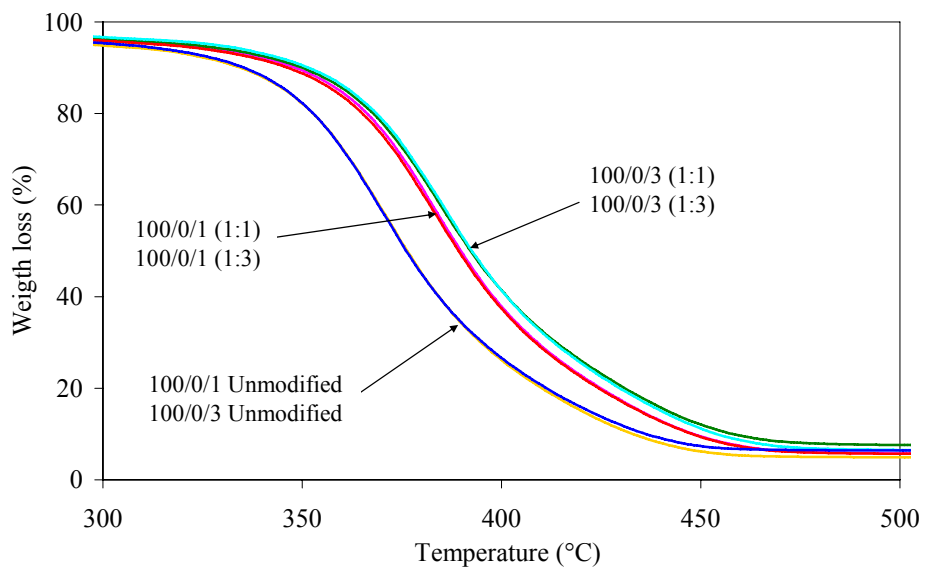


รูปที่ 4.32 การวิเคราะห์ FT-IR ของ CNTs ชนิดต่างๆ



รูปที่ 4.33 ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ชนิดต่างๆเป็นสารเสริมแรงในปริมาณ 3 phr

4.2.1.3.4 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA



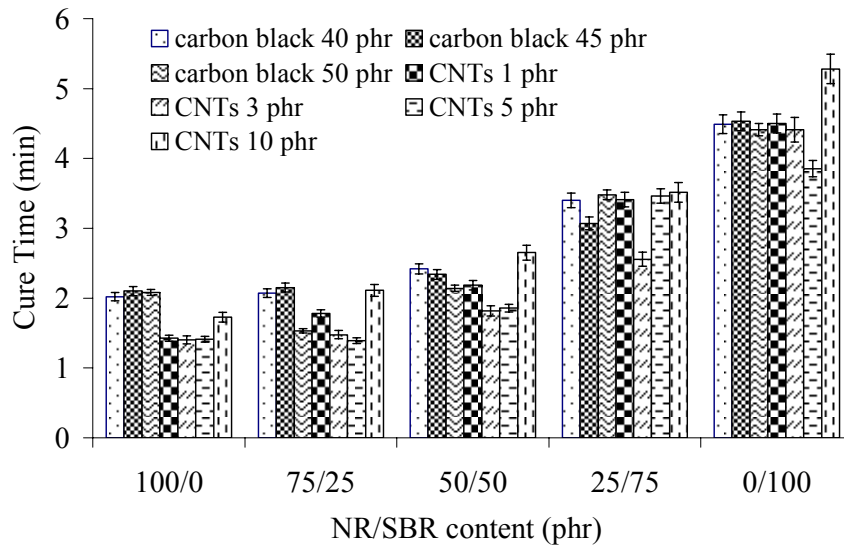
รูปที่ 4.34 ผลการวิเคราะห์ TGA ของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ชนิดต่างๆเป็นสารเสริมแรงในปริมาณ 1 และ 3 phr

ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของยางคอมปอนด์ด้วยเครื่อง TGA จากรูปที่ 4.34 พบว่าการปรับผิว CNTs ด้วยไซเลนส่งผลการทนต่อความร้อนในยางคอมปอนด์ โดยเมื่อทำการเติม CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลนในยางธรรมชาติ ทำให้ยางสามารถทนความร้อนได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการเติม CNTs ที่ไม่ปรับผิวทั้งในปริมาณ 1 และ 3 phr ในขณะที่การทนความร้อนในยางคอมปอนด์ซึ่งเติม CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 มีค่าไม่แตกต่างกัน

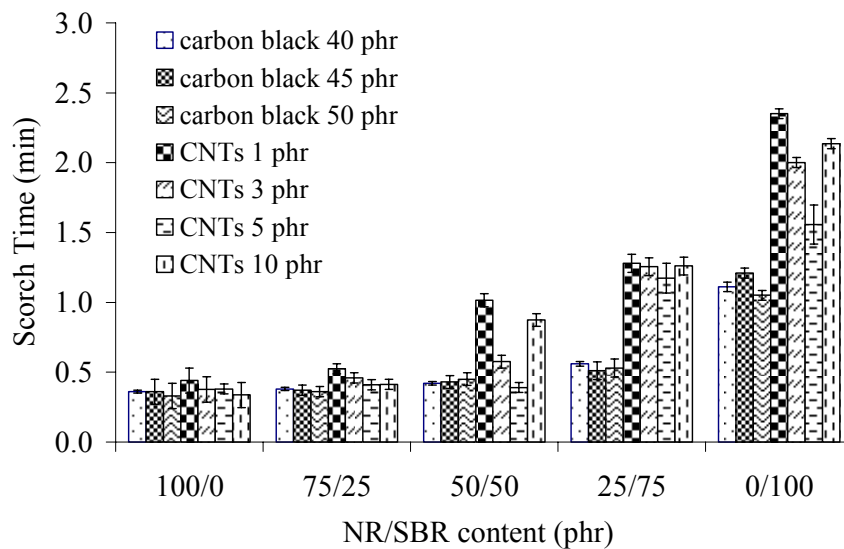
4.2.2 การใช้ carbon black เป็นสารเสริมแรง

4.2.2.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

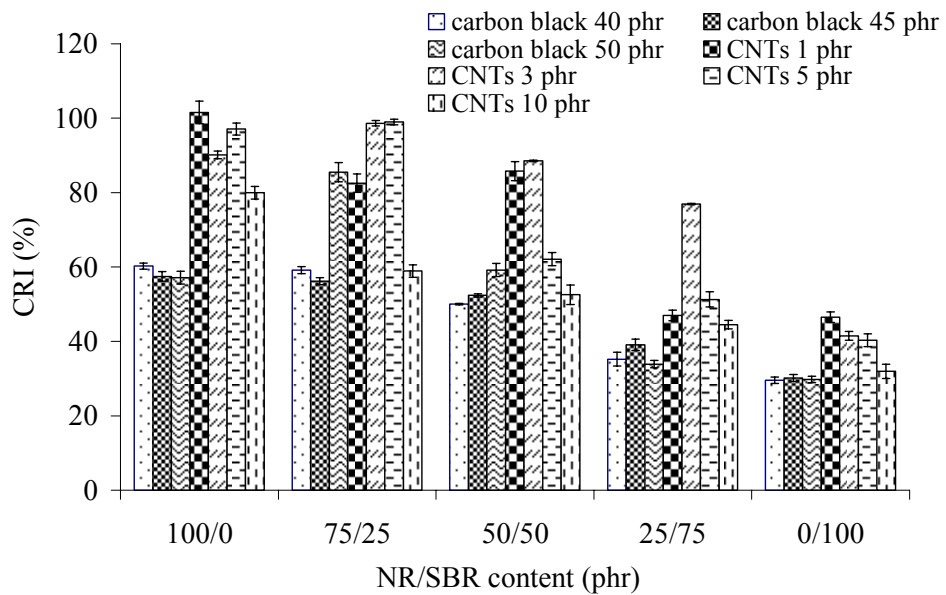
ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงของ carbon black และ CNTs ในยางคอมปอนด์ โดยการเติม carbon black ในปริมาณ 40, 45 และ 50 phr เปรียบเทียบการเติม CNTs ที่ไม่ปรับผิวในปริมาณ 1, 3, 5, 10 phr เมื่อพิจารณาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปอนด์ พบว่าการเติม carbon black ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาคงรูป เวลาสกอร์ชของยางคอมปอนด์มากนัก เมื่อเปรียบเทียบจากรูปที่ 4.35 พบว่าการเติม unmodified-CNTs ในปริมาณ 10 phr ใช้เวลาในการคงรูปที่ใกล้เคียงกับการเติม carbon black ในปริมาณ 40, 45 และ 50 phr โดยปริมาณการเติมสารเสริมแรงแตกต่างกันประมาณ 4-5 เท่า ในยางคอมปอนด์ที่มีอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางเอสบีอาร์ 100/0 และ 75/25 พบว่าการเติม carbon black และ CNTs เป็นสารเสริมแรง มีค่าเวลาสกอร์ชใกล้เคียงกัน แต่ CNTs จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของเวลาสกอร์ชอย่างชัดเจนมากกว่าการเติม carbon black เมื่อมีอัตราส่วนผสมของยางธรรมชาติต่อยางเอสบีอาร์ 50/50, 25/75 และ 0/100 จากรูปที่ 4.36 ในขณะที่การเติม CNTs ปริมาณ 1-5 phr ส่งผลให้ดัชนีอัตราการคงรูปสูงกว่าการเติม carbon black ดังรูปที่ 4.37 แม้การเติม CNTs จะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า carbon black แต่ให้ประสิทธิภาพในการวัลคาไนซ์ที่ดีกว่า



รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบเวลาคงรูปของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกัน โดยมี carbonblack และ unmodified-CNTs เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.36 เวลาสกอร์ชของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกัน โดยมี carbon black และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

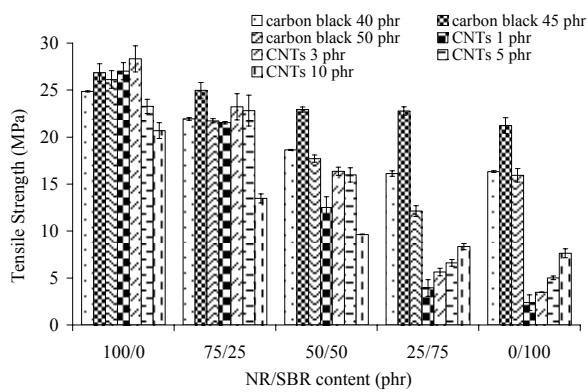


รูปที่ 4.37 คัดชนีอัตราการคงรูปของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกันโดยมี carbonblack และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

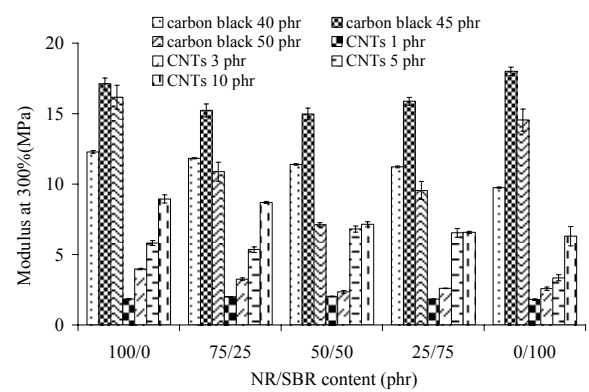
4.2.2.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ

การเปรียบเทียบการเสริมแรงยางผสมด้วย CNTs และ carbon black เพื่อแสดงให้เห็นว่า การใช้ CNTs เสริมแรงในปริมาณน้อยๆ (1-3 phr) อาจให้ผลที่ใกล้เคียงกันกับการใช้ carbon black ที่เติมในปริมาณที่มากกว่า (40-50 phr) โดยยึดเกณฑ์ของสมบัติเชิงกล เช่น ความทนต่อแรงที่ใกล้เคียงกัน พบว่า CNTs 1 phr ให้สมบัติความทนต่อแรงดึงถึงถึง 27 MPa มากกว่า carbon black ที่เติมในปริมาณ 40 phr ที่ให้ค่า 25 MPa เล็กน้อย ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของยางผสมที่เติม CNTs 1 phr มีค่า 900% ซึ่งมากกว่ายางผสมที่เติม carbon black 40 phr ซึ่งให้ค่า 400% เป็นเท่าตัว และเมื่อเปรียบเทียบการเติม CNTs ในปริมาณ 1, 3, 5 และ 10 phr และ carbon black 40 phr ในยางเอสปีอาร์พบว่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$, ภาคผนวก ค. ตารางที่ ค.15 - ค.18)

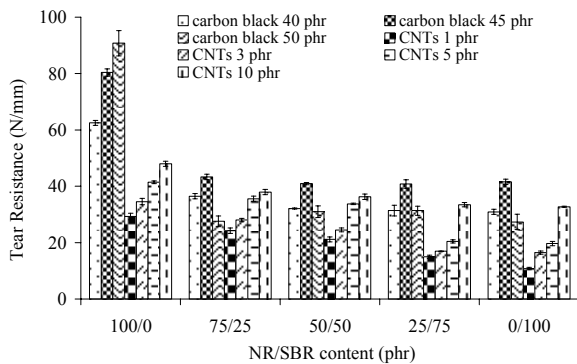
การเติม carbon black ในยางผสม 40 phr มีจุดเด่นคือ ให้ค่ามอดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความแข็งสูงกว่ายางผสมที่เติม CNTs 1 phr และ carbon black มีผลต่อสมบัติของยางคอมปอนด์ที่มียางเอสปีอาร์อยู่ในปริมาณที่มาก ค่อนข้างเด่นชัด จากรูปที่ 4.37



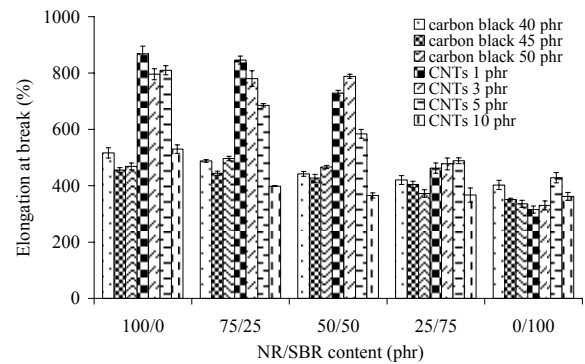
(a) ความทนต่อแรงดึง



(b) มอดูลัสที่ 300%



(c) ความต้านทานต่อการฉีกขาด

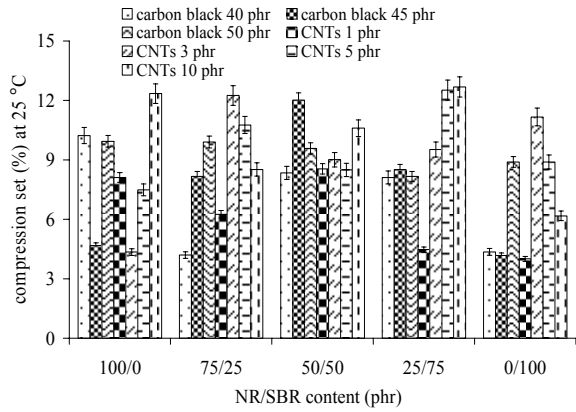


(d) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

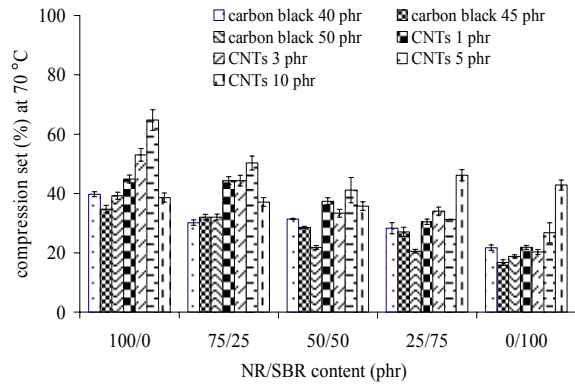
รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางคอมพอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกัน โดยมี carbon black และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

การเติม CNTs และ carbon black ส่งผลให้เกิดการเสียรูปในยางคอมพอนด์ที่มีค่าใกล้เคียงกันทั้งในอุณหภูมิ 25°C และ 70°C เมื่อพิจารณาถึงสมบัติการทนทานต่อน้ำมันหรือโทลูอีน และค่าความแข็ง ระหว่างการเติม CNTs 10 phr และการเติม carbon black 40 phr พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันในขณะที่ปริมาณการเติม CNTs น้อยกว่าประมาณ 4 เท่า (รูปที่ 4.39)

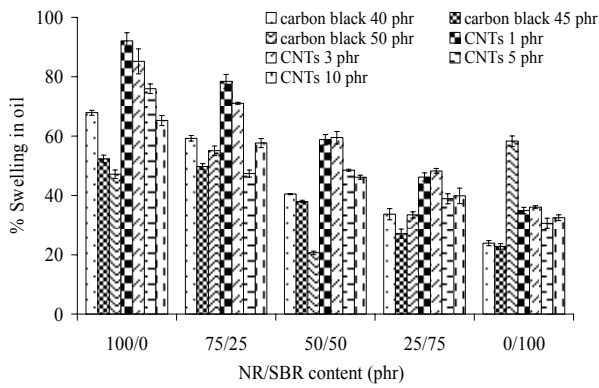
ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางจะเกิดขึ้นสูงเมื่อเสริมแรงด้วย CNTs เมื่อเปรียบเทียบกับเสริมแรงด้วย carbon black ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าการเสริมแรงยางคอมพอนด์ด้วย CNTs ในปริมาณ 1-5 phr ให้สมบัติต่างๆ ที่ดีกว่าการเติม carbon black ในปริมาณ 40-50 phr เช่น ลักษณะการวัลคาไนซ์ ความทนต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด การบวมตัวในสารละลาย ความแข็ง และความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง เนื่องจากลักษณะของลักษณะของ CNTs ที่เป็นเส้นใย (รูปที่ 4.47-4.49) ในขณะที่ carbon black มีลักษณะเป็นอนุภาค (รูปที่ 4.50)



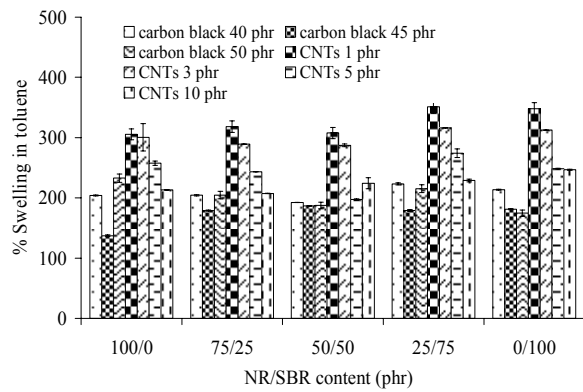
(a) การเสีรูปร่างหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C



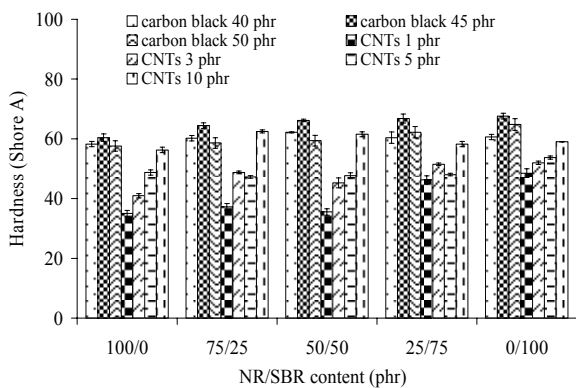
(b) การเสีรูปร่างหลังการกดที่อุณหภูมิ 70°C



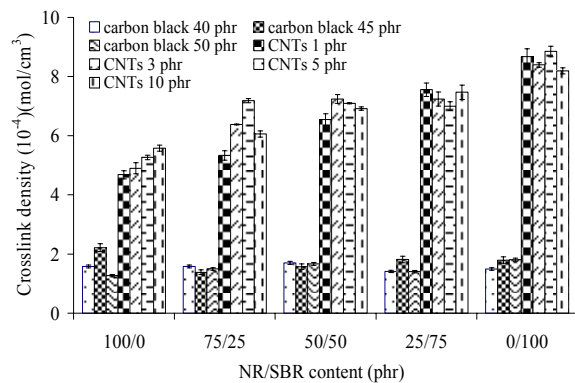
(c) การบวมตัวในน้ำมัน



(d) การบวมตัวในโทลูอีน



(e) ความแข็ง

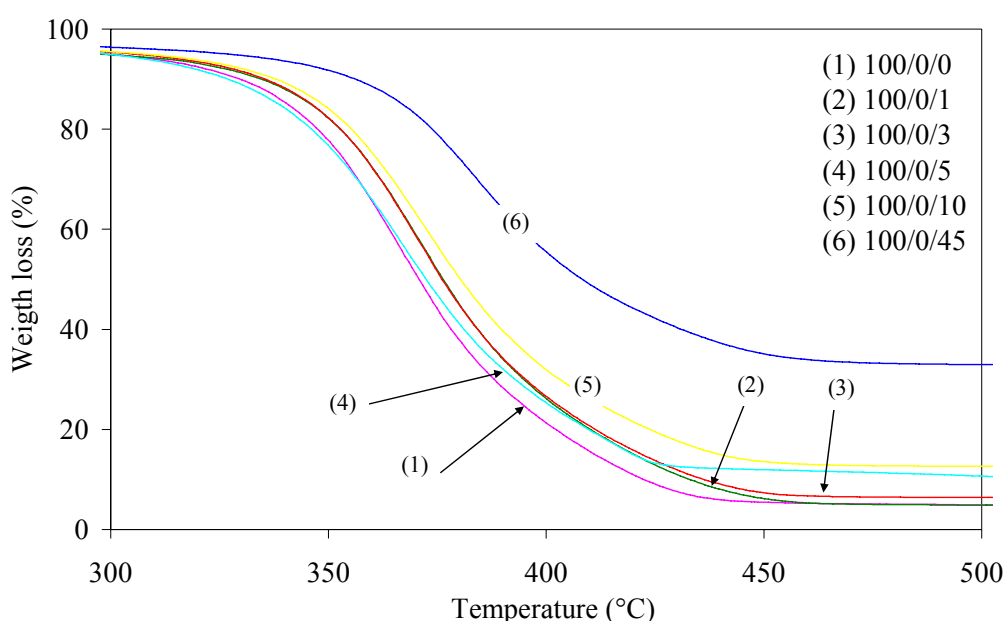


(f) ความหนาแน่นการเชื่อม

รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบสมบัติต่างๆของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกัน โดยมี carbon black และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

4.2.2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA

จากรูปที่ 4.40 พบว่า การเติม carbon black 45 phr ส่งผลให้ยางคอมปอนด์สามารถทนความร้อนได้ดีกว่าการเติม CNTs ในปริมาณ 1, 3, 5, 10 phr โดยเมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน น้ำหนักที่สูญหายไปในสูตรยางที่เติม carbon black จะมีปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับการเติม CNTs เนื่องจากปริมาณการเติม carbon black ที่สูงกว่าดั่งนั้น จึงไม่อาจสรุปได้อย่างแน่ชัดว่าสารเสริมแรงชนิดไหนที่สามารถทนต่อความร้อนได้ดีกว่าเพราะมีตัวแปร ด้านปริมาณของการเติมสารเสริมแรงเข้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 4.40 ผลการวิเคราะห์ TGA ยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ผสมกัน โดยมี carbon black และ CNTs ที่ไม่ปรับผิว เป็นสารเสริมแรงในปริมาณต่างๆ

4.3 ผลของปริมาณกำมะถันต่อการขึ้นรูป

4.3.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์

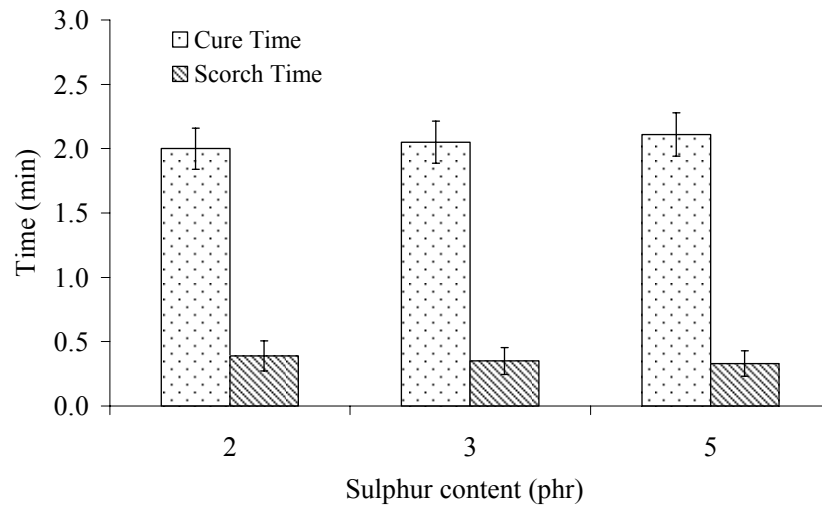
สารที่ทำให้ยางคงรูปเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ผสมลงไปทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชันหรือปฏิกิริยาของรูป การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะส่งผลทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งจะให้ยางเปลี่ยนสภาพจากอ่อนเหนียวหนึบ (tacky) และไหลได้ในแบบเทอร์โมพลาสติกไปเป็นยางคงรูป (เทอร์โมเซต) ที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความทนทาน และมีสมบัติที่เสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก ปัจจุบันการคงรูปของยางส่วนใหญ่เกิดจากการเติมสารกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูป โดยทั่วไป การคงรูปที่ใช้กันมากใน

โรงงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบที่ใช้กำมะถัน (sulphur) ระบบที่ใช้เปอร์ออกไซด์ (peroxide) และระบบที่ใช้สารเคมีอื่นๆ เช่น โลหะออกไซด์

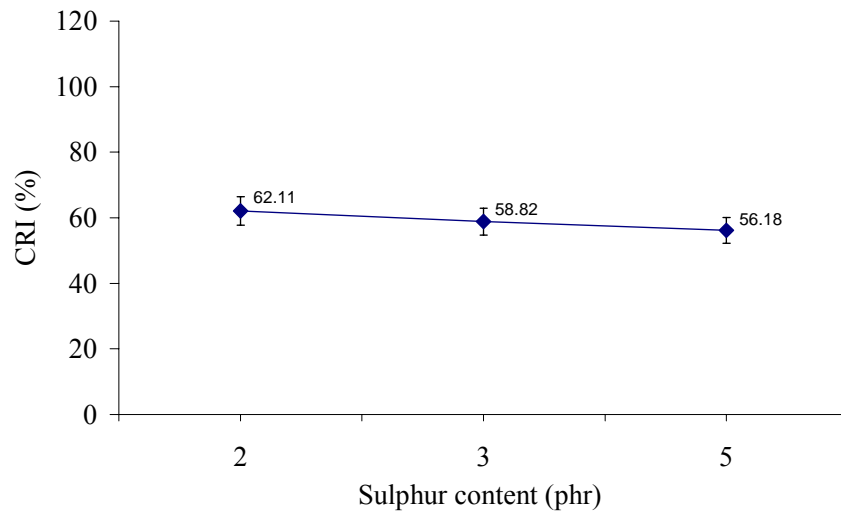
ระบบการคงรูปที่ใช้กำมะถันเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันเพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปเกิดขึ้นได้เร็ว (เมื่อใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เหมาะสม) และยางคงรูปที่ได้ก็มีสมบัติเชิงกลที่ดี ด้วยเหตุนี้ ระบบการคงรูปด้วยกำมะถันจึงนิยมใช้ในการคงรูปยางแทบทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล โดยเฉพาะยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่ เช่น SBR IR BR และ NBR เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณของกำมะถันที่ใช้ในการผลิต ผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 0.5-3.0 phr (พงษ์ธร, 2548)

ผลการศึกษาเบื้องต้นจากสูตรยางที่ใช้ในงานวิจัยนี้โดยมีปริมาณกำมะถัน 2 phr ไม่อาจสรุปได้อย่างแน่ชัดว่าเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ยางคอมพอนด์มีสมบัติเชิงกลที่ดี ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาผลของปริมาณกำมะถันต่อสมบัติต่างๆของยางคอมพอนด์ โดยศึกษาปริมาณการเติมกำมะถัน 2, 3 และ 5 phr ในยางธรรมชาติโดยมี CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณ 1 phr

จากการวิจัยพบว่าเมื่อพิจารณาเวลาในการคงรูป เวลาสกอรัช และดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมพอนด์ จากรูป 4.41 - 4.42 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมพอนด์มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณของกำมะถันสูงขึ้น โดยกำมะถันจะเพิ่มปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ผลจากการศึกษาเบื้องต้นถึงปริมาณของกำมะถัน จากข้อมูลการคงรูปเพียงอย่างเดียว ยังไม่อาจสรุปได้อย่างแน่ชัดว่าการเติมกำมะถันที่ปริมาณเท่าใดจะให้ประสิทธิภาพการคงรูปที่ดี ซึ่งอาจจะต้องพิจารณาจากสมบัติเชิงกลประกอบด้วย



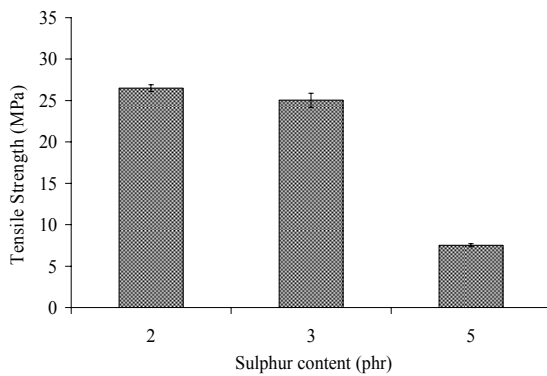
รูปที่ 4.41 เวลาในการคงรูปและเวลาสกอร์ชในยางธรรมชาติที่มี CNTs:Silane (1:1) ปริมาณ 1 phr เป็นสารเสริมแรง โดยมีปริมาณกำมะถันในปริมาณต่างๆ



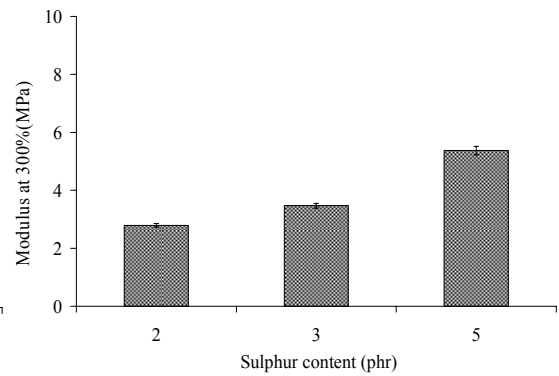
รูปที่ 4.42 ดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมพอนด์ในยางธรรมชาติที่มี CNTs:Silane (1:1) ปริมาณ 1 phr เป็นสารเสริมแรง โดยมีปริมาณกำมะถันในปริมาณต่างๆ

4.3.2 สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ

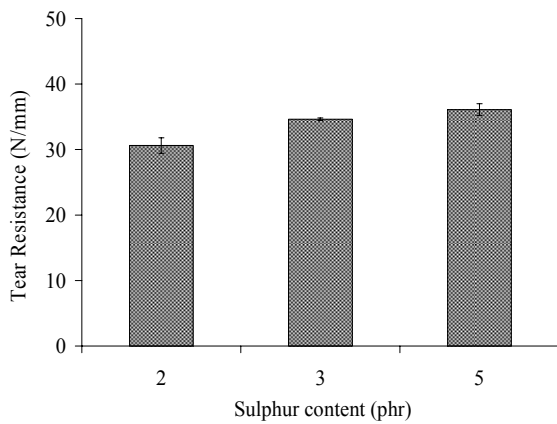
พิจารณาจากรูปที่ 4.43 (a)-(d) พบว่าเมื่อเติมปริมาณกำมะถันสูงขึ้น ค่าความทนต่อแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดจะมีค่าต่ำลง ในขณะที่ค่าความทนต่อการฉีกขาดและมอดูลัส 300% จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกำมะถัน การเติมกำมะถันในปริมาณที่มากเกินไป (5 phr) จะทำให้ยางแข็งขึ้นและเปราะง่าย ส่งผลให้ความยืดหยุ่นลดลงนั่นเอง



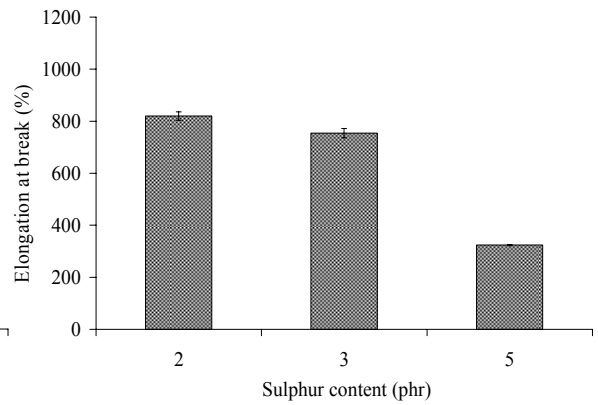
(a) ความทนต่อแรง



(b) โมดูลัสที่ 300%

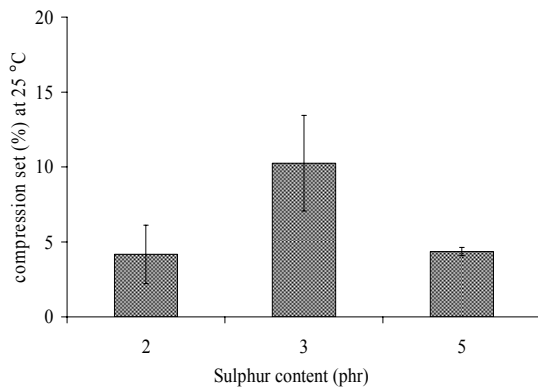


(c) ความต้านทานต่อการฉีกขาด

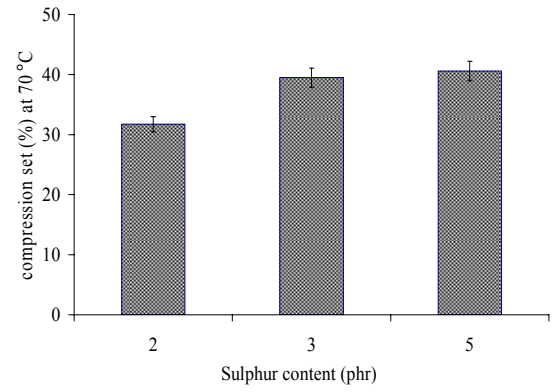


(d) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

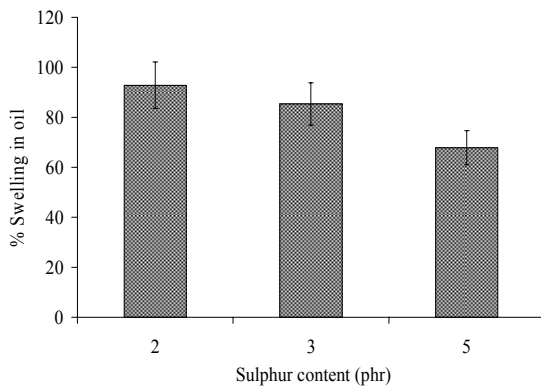
รูปที่ 4.43 สมบัติเชิงกลของยางคอมพอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน CNTs:Silane เท่ากับ 1:3 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณ 1 phr โดยเติมกำมะถันในปริมาณต่างๆ



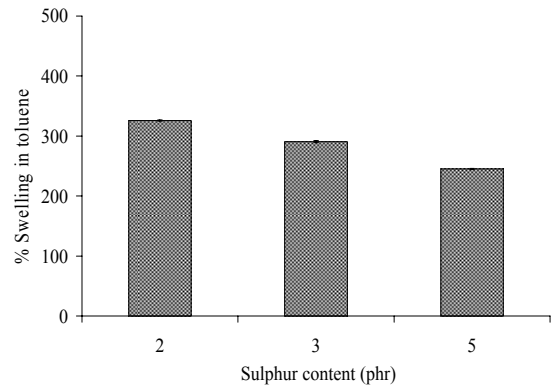
(a) ค่าการเสียรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ



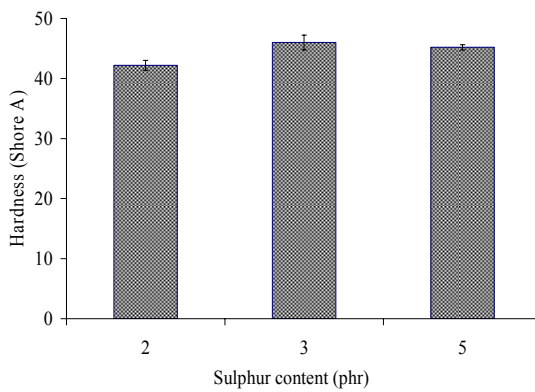
(b) ค่าการเสียรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ



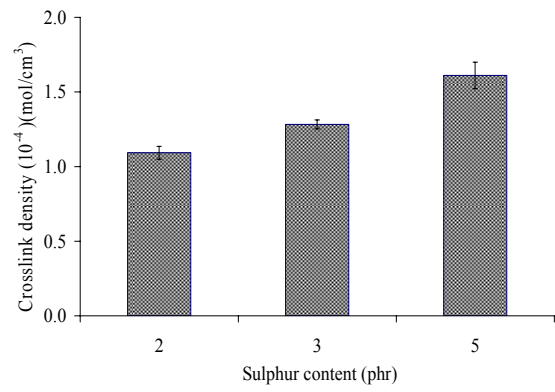
(c) การบวมตัวในน้ำมัน



(d) การบวมตัวในโทลูอีน



(e) ความแข็ง



(f) ความหนาแน่นการเชื่อม

รูปที่ 4.44 สมบัติต่างๆ ของยางคอมพอนด์ในยางธรรมชาติซึ่งมี CNTs ปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน CNTs:Silane เท่ากับ 1:3 เป็นสารเสริมแรงในปริมาณ 1 phr โดยเติมกำมะถันในปริมาณต่างๆ

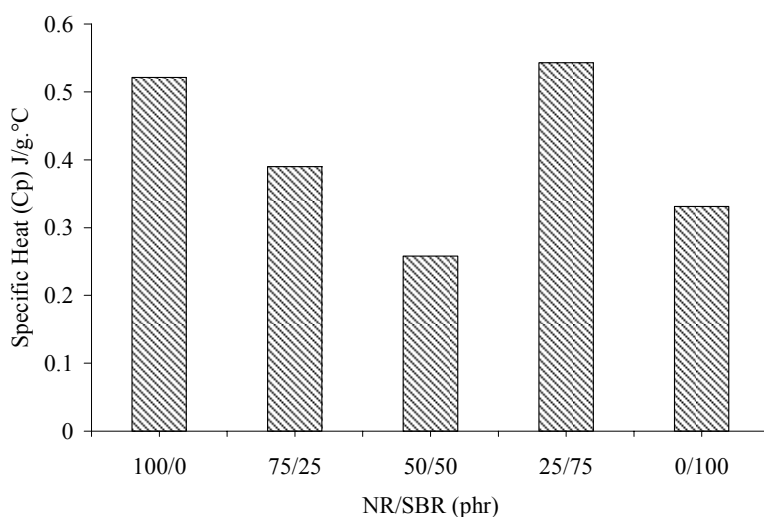
พิจารณาจากรูปที่ 4.44 (a)-(b) พบว่าการเสียรูปหลังการกดของยางเมื่อเติมกำมะถัน 5 phr ที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าต่ำสุดเนื่องจาก ยางที่เติมกำมะถันในปริมาณมากจะเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้น รูปที่ 4.43 (f) ส่งผลให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกำมะถันรูปที่ 4.43 (e) ในขณะที่เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิ 70 °C ค่าการเสียรูปหลังการกดจะสูงขึ้นเมื่อปริมาณกำมะถันเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 3 และ 5 phr เพราะมีอิทธิพลของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของยาง

จากรูปที่ 4.44 (c)-(d) พบว่าการบวมตัวของยางธรรมชาติในน้ำมันและโทลูอีนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมกำมะถันในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากกำมะถันที่เติมในยางธรรมชาติเกิดการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

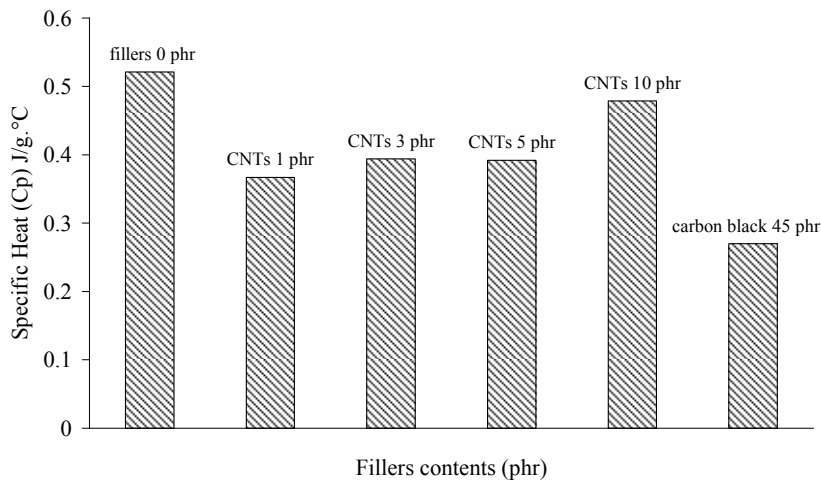
4.4 สมบัติทางความร้อนของยาง

จากการเปรียบเทียบข้อมูลค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางคอมพอนด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสปีอาร์ในสัดส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 25/75, 0/100 พบว่า ยางเอสปีอาร์มีค่าความจุความร้อนที่ต่ำกว่ายางธรรมชาติ

การเติม CNTs ส่งผลต่อค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางคอมพอนด์โดยค่าความจุความร้อนจำเพาะสูงขึ้นตามปริมาณการเติม CNTs เมื่อเปรียบค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางคอมพอนด์ที่เติม CNTs และ carbon black พบว่าการเติม carbon black 45 phr จะให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ต่ำกว่าการเติม CNTs ในปริมาณ 1, 3, 5, 10 phr (รูปที่ 4.45-4.46)



รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางคอมพอนด์ที่มียางธรรมชาติผสมกับยางเอสปีอาร์ในสัดส่วนต่างๆ โดยปราศจากสารเสริมแรง



รูปที่ 4.46 เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางคอมปอนด์ในยางธรรมชาติที่เติม CNTs ชนิดไม่ปรับผิวและ carbon black ในปริมาณต่างๆ

4.5 การวิเคราะห์ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (conductivity)

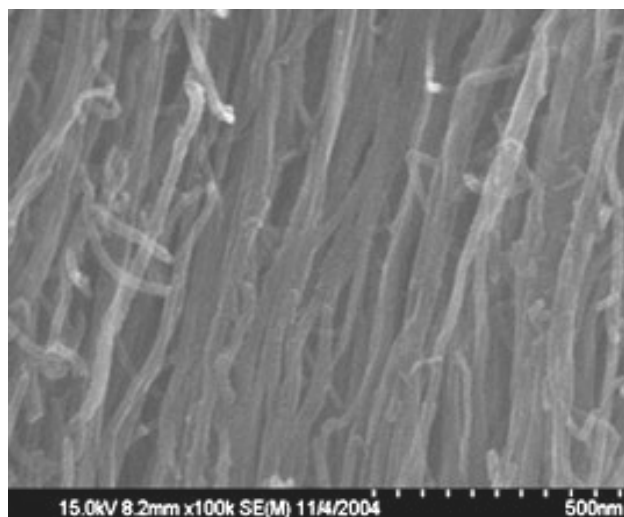
ตารางที่ 4.4 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของยางคอมปอนด์สูตรต่างๆ

| NR/SBR | Reinforcing filler | ค่าสภาพการนำไฟฟ้า (s/cm) |
|--------|------------------------|--------------------------|
| 100/0 | No filler | 0.004750 |
| 75/25 | | 0.004767 |
| 50/50 | | 0.004458 |
| 25/75 | | 0.004628 |
| 0/100 | | 0.004464 |
| 100/0 | Unmodified CNTs 1 phr | 0.007642 |
| 100/0 | Unmodified CNTs 3 phr | 0.143229 |
| 100/0 | Unmodified CNTs 5 phr | 22.451736 |
| 100/0 | Unmodified CNTs 10 phr | 83.002813 |
| 100/0 | Carbon black 45 phr | 4.880785 |

จากการวัดค่าสภาพการนำไฟฟ้าของยางคอมปอนด์พบว่า การเติม CNTs เป็นสารเสริมแรงในยางส่งผลให้ยางมีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น ตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของ CNTs ดังตารางที่ 4.4 โดยการเติม CNTs ทำให้ยางมีประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า carbon black ประมาณ 4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเติม CNTs 5 phr และ carbon black 45 phr

4.6 การวิเคราะห์ด้วย SEM

4.6.1 CNTs

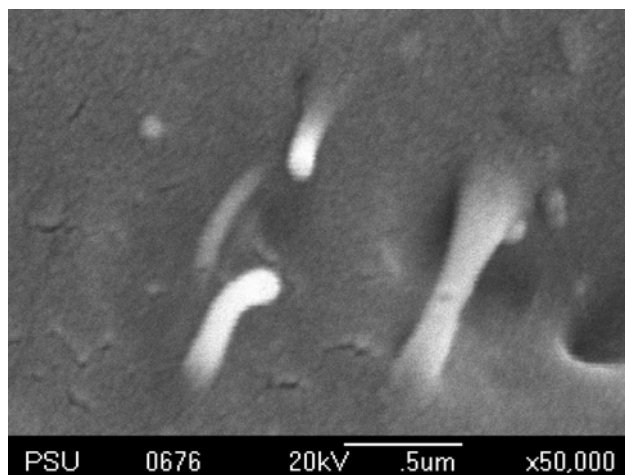
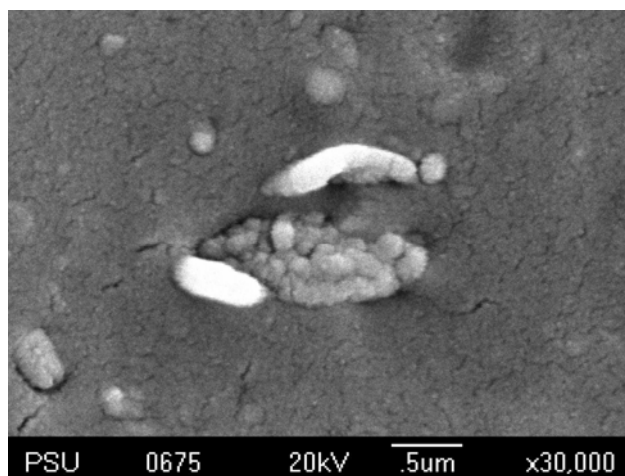
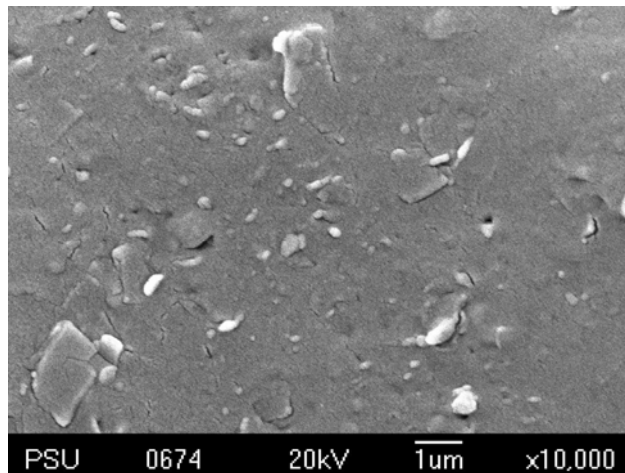


รูปที่ 4.47 ภาพ SEM ของ CNTs ชนิด MWNTs

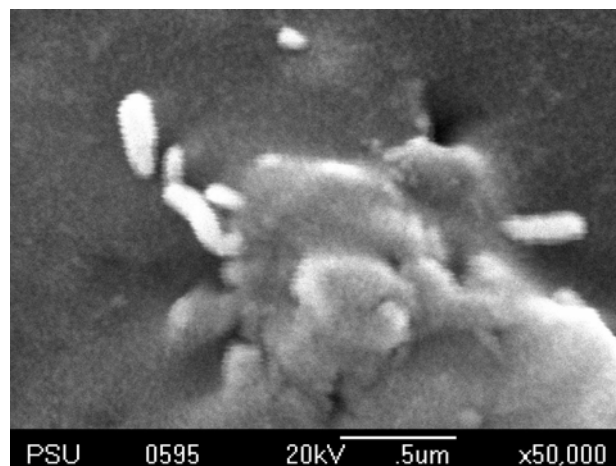
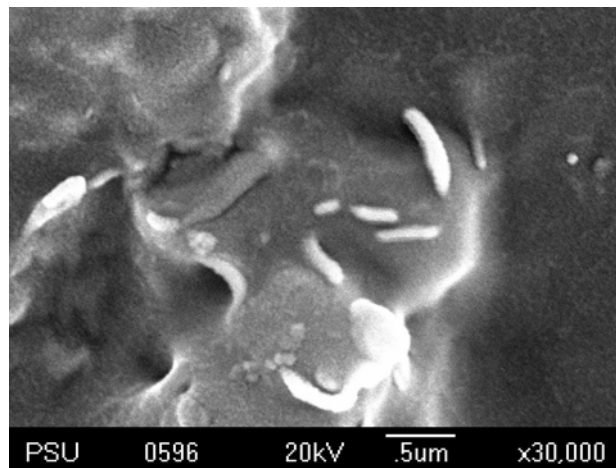
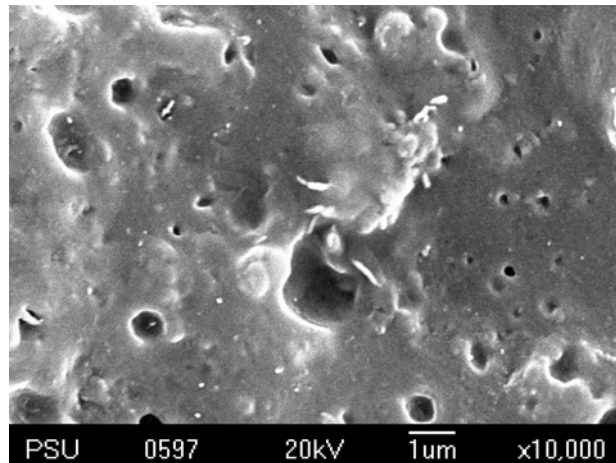
CNTs มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 8-15 nm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3-5 nm มีความยาว ~50 μm (รูปที่ 4.47) มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า 233 m^2/g จากลักษณะรูปร่างของ CNTs ที่เป็นเส้นใยเมื่อผสมในยางคอมพอนด์ การจับยึดกันระหว่าง CNTs กับเนื้อยางจะเกิดขึ้นได้แข็งแรงกว่าการเติม carbon black ในเนื้อยาง โดยพิจารณาได้จากรูปที่ 4.48 - 4.49 และจากลักษณะที่เป็นท่อยาวของ CNTs ส่งผลให้มีสภาพการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า carbon black

4.4.2 ลักษณะการกระจายตัวของสารเสริมแรงในเนื้อยางคอมพอนด์

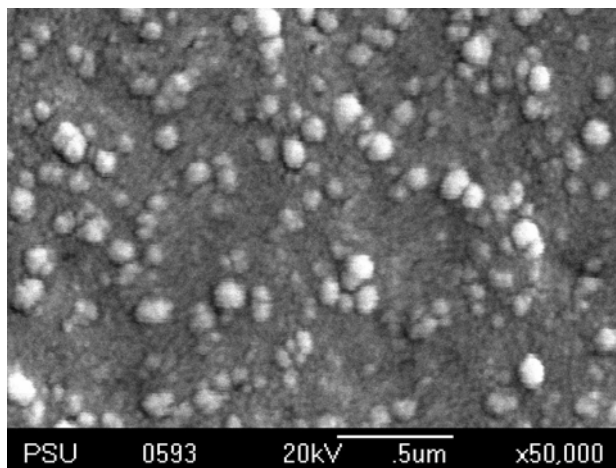
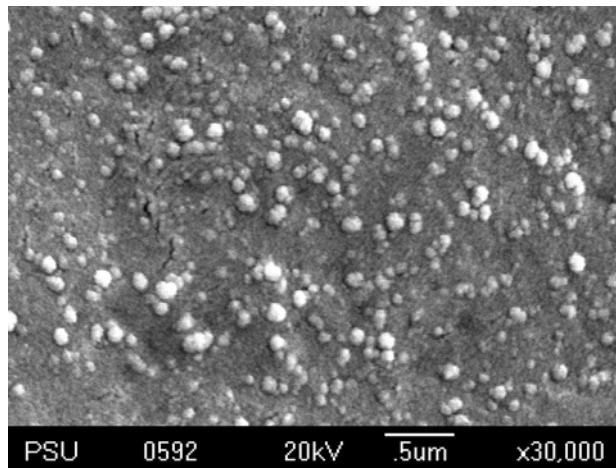
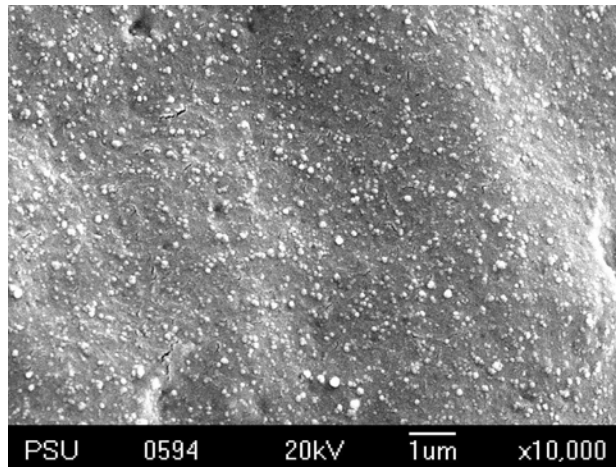
เมื่อพิจารณาลักษณะการกระจายตัวของ CNTs และ carbon black ในเนื้อยางคอมพอนด์ จากการวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 10,000, 30,000 และ 50,000 เท่า พบว่า CNTs จะมีลักษณะเป็นเส้นใยแทรกอยู่ในเนื้อยาง โดยเส้นใยจะมีลักษณะที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากถูกหุ้มด้วยสารเคมีและเนื้อยาง นอกจากนี้การปรับผิวด้วยไซเลนส่งผลให้ CNTs (รูปที่ 4.48-4.49) มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ CNTs ที่ไม่ปรับผิว ส่วน carbon nanotube จะมีลักษณะเป็นอนุภาคกระจายอยู่ในเนื้อยางสามารถมองเห็นชัดเจนเนื่องจากเติมในเนื้อยางในปริมาณที่สูง (รูปที่ 4.50)



รูปที่ 4.48 ภาพ SEM ของยางคอมปอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ในสัดส่วน 75/25 โดยเสริมแรงด้วย CNTs ที่ปรับผิวไฮโดรในอัตราส่วน (1:1) ปริมาณ 1 phr



รูปที่ 4.49 ภาพ SEM ของยางคอมพอนันต์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ในสัดส่วน 75/25 โดยเสริมแรงด้วย CNTs ที่ไม่ปรับผิว 3 phr



รูปที่ 4.50 ภาพ SEM ของยางคอมพอนด์ที่มียางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ในสัดส่วน 75/25 โดยเสริมแรงด้วย carbon black ปริมาณ 45 phr

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของปริมาณสัดส่วนยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์และปริมาณการเติม ท่อนาโนคาร์บอน พบว่า การใช้ยางเอสบีอาร์ในปริมาณ 75-100 phr และเพิ่มปริมาณ CNTs จะทำให้ค่าเวลาในการสกร้อชยาวนาน ส่งผลให้ดัชนีอัตราการคงรูป (CRI) ลดลงซึ่งมีผลดีต่อกระบวนการขึ้นรูปยาง

การเติม CNTs มีผลต่อสมบัติเชิงกล คือ เพิ่มค่า ความทนทานต่อแรงดึง โมดูลัส ความทนทานการฉีกขาด การเสีรูปหลังการกด และความแข็ง จากการวิจัยนี้พบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงจะมีค่าสูงสุดในสูตรยางที่มีปริมาณยางธรรมชาติ 75-100 phr และเติม CNTs ในปริมาณ 3 phr ส่วนค่าโมดูลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม CNTs การบวมตัวของยางคอมพอนด์ในน้ำมันและโทลูอิน จะลดลงตามปริมาณของยางเอสบีอาร์และท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่ายางเอสบีอาร์สามารถช่วยลดการบวมตัวของยางในสารละลายได้ดีกว่ายางธรรมชาติ เพราะยางเอสบีอาร์และ CNTs ช่วยเพิ่มค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางในโครงสร้างของยางผสม นอกจากนี้ยางเอสบีอาร์และ CNTs ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทนทานต่อความทนความร้อนได้ดีขึ้นในยาง

จากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัตของยางคอมพอนด์ด้วย DMTA พบว่าค่าโมดูลัสสะสมและ $\tan \delta$ ของยางเอสบีอาร์มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ จึงทำให้ยางเอสบีอาร์มีความแข็งแรงน้อยกว่ายางธรรมชาตินั่นเอง และพบว่าค่า $\tan \delta$ สำหรับยางผสมจะต่ำลงเมื่อเติม CNTs ในปริมาณที่เหมาะสมจึงทำให้ยางผสมแข็งแรงขึ้น นอกจากนี้ความแข็งแรงยังขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางคอมพอนด์ด้วย ซึ่งพบว่าการเติม CNTs 3 phr สามารถกระจายตัวในเนื้อของยางคอมพอนด์ได้อย่างดี

การปรับผิว CNTs ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงในยางคอมพอนด์ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่าการปรับผิวด้วย 3-aminopropyltriethoxysilane ส่งผลให้ยางคอมพอนด์มีดัชนีอัตราคงรูปและสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าการปรับผิวด้วยกรด โดยการปรับผิวซึ่งมีอัตราส่วนของ CNTs ต่อไซเลน เท่ากับ 1:1 และใช้ปริมาณกัมมะถัน 2 phr ในการวัลคาไนซ์

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการคงรูปของยางคอมพอนด์ที่เสริมแรงด้วย CNTs กับ carbon black พบว่าการเสริมแรงด้วย CNTs จะเพิ่มเวลาสกร้อชของยางคอมพอนด์ให้ยาวนานกว่า

การเสริมแรงด้วย carbon black อีกทั้งการเติม CNTs จะให้ค่าสมบัติเชิงกลต่างๆที่ใกล้เคียงกับการเติม carbon black โดยใช้ CNTs ในปริมาณที่น้อยกว่า carbon black ประมาณ 40-50 เท่า

ชนิดของสารเสริมแรงส่งผลต่อการนำไฟฟ้าในยางคอมพอนด์จากการศึกษาพบว่า CNTs มีประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า carbon black โดยค่าสภาพการนำไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามปริมาณของ CNTs ในเนื้อยาง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาผลของ CNTs ในยางคอมพอนด์ ต่อสมบัติอื่นๆ ได้แก่ การนำไฟฟ้า การนำความร้อน (Heat build-up) เป็นต้น

2. เมื่อได้สัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์ ควรนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำหรับทดสอบเพื่อนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานได้จริง

บรรณานุกรม

- ��ชวาล กัลป์ทาลา และคณะ.2550.อิทธิพลของสารช่วยประสานต่อสมบัติการไหล ความหนาแน่นของพันธะข้ามและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์, วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ฉบับพิเศษ ปีที่ 30 ฉบับที่ 4 (ต.ค.-ธ.ค.)
- ณัฐวุฒิ ทองโสม. 2549.การเตรียมและสมบัติของพอลิซัลโฟนาโนคอมดพลิต, สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- บุญธรรม นิธิอุทัย และ ปรีชา ป็องภัย. 2534.คู่มือปฏิบัติการเทคโนโลยียาง ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ : ปัตตานี พิมพ์ครั้งที่3.
- พงษ์ธร แซ่ฮุ่ย. 2550. ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) พิมพ์ครั้งที่ 3.
- พงษ์ธร แซ่ฮุ่ย. 2548. สารเคมียาง, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) พิมพ์ครั้งที่ 1.
- พงษ์ธร แซ่ฮุ่ย และ ชาคริต ลีริสิงห์. 2550. ยาง กระบวนการผลิตและการทดสอบ, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) พิมพ์ครั้งที่ 1.
- สรวุฒิ ช่วงโชติ และ พิษณุ สุภพล. (2548). ท่อนาโนคาร์บอน, วารสารไฟฟ้าและละออดสาหกรรม ปีที่ 12 ฉบับที่ 3 (พ.ค.- มิ.ย.)
- สรวุฒิ ช่วงโชติ และ พิษณุ สุภพล. (2548). ท่อนาโนคาร์บอน, วารสารไฟฟ้าและละออดสาหกรรม ปีที่ 12 ฉบับที่ 4 (พ.ค.- มิ.ย.)
- Arroyo, M., Lopez-Manchado, M.A., Valentin, J.L., and Carretero, J. 2006. Morphology/behaviour relationship of nanocomposites based on natural

rubber/epoxidized natural rubber blend. *Composites Science and Technology*, doi:10.1016/j.compscitech.2006.09.019.

Basfar, A.A., Abdel-Aziz, M.M., Mofit, S., 2002. Influence of different curing systems on the physico-mechanical properties and stability of SBR and NR rubbers. *Radiation Physics and Chemistry*, 63, 81–87.

Bokobza, L. 2007. Multiwall carbon nanotube elastomeric composites: A review, *Polymer*, Vol. 48, pp. 4907-4902.

Chen, G.K., Kim, H.S., Park, B.H., and Yoon, J.S. 2006. Multi-walled carbon nanotubes reinforced nylon 6 composites. *Polymer*, 47, 4760-4767.

Dimitrios Tasis, Nikos Tagmatarchis, Vassilios Georgakilas, Claudio Gamboz, Maria-Rosa Soranzo, and Maurizio Prato. 2003. Supramolecular organized structures of fullerene-based materials and organic functionalization of carbon nanotubes. *C. R. Chimie 6* : 597–602

Falco, A.D., Goyanes, S., Rubiolo, G.H., Mondragon, I., and Marzocca, A. (2007). Carbon nanotubes as reinforcement of styrene-butadiene rubber. *Applied Surface Science*. doi:10.1016/j.apsusc.2007.07.049.

Findik, F., Kokasal, T., Yilmaz, Y., 2004. Investigation of mechanical and physical properties of several industrial rubbers. *Materials and Design* Vol.25, pp. 269 - 276

Frogley, m., Ravivh, D., and Wagner, D., 2003. Mechanical properties of carbon nanoticle-reinforced elastomers. *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 1647-1654

Guo, D.J., and Li, H.L. 2005. Well-dispersed multi-walled carbon nanotube/polyaniline composites films. *Journal Solid State Electrochem*, 9, 445-449.

- Hamdan, S., Hashim, D.M.A., and Yusop, M. 2004. Dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) of thermoplastic natural rubber (TPNR) barium ferrite ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) composites. *AJSTD*, 21, 69-79.
- John Kathi., Kyong-Yop Rhee., and Joong Hee Lee. 2009. Effect of functionalization of multi-walled carbon nanotubes with 3-aminopropyltriethoxysilane on mechanical and morphological properties of epoxy nanocomposites. *Composite:Part A* 40, 800-809
- Kim, S.W., Kim, J.K., Lee, S.H., Park, S.J., and Kang, K.H. 2006. Thermophysical properties of multi-walled carbon nanotube-reinforced polypropylene composites. *International Journal of Thermophysics*, 27, 152-160.
- Kim, Y.A., Hayashi, T., Endo, M., Gotoh, Y., Wada, N., Seiyama, J., 2006. Fabrication of aligned carbon nanotube-filled rubber composite, *Scripta Materialia*, Vol.54, pp.31-35
- Kueseng, K., and Jacob, K., 2006. Natural rubber nanocomposites with SiC anoparticles and carbon nanotubes. *European Polymer Journal*, Vol. 42, pp. 220-227.
- Kumnuantip, C., and Sombatsompop, N., 2003. Dynamic mechanical properties and swelling behavior of NR/reclaimed rubber blends. *Materials Letters*, 57, 3167-3174.
- Lu, M., Lau, K.T., Tam, W.Y., and Liao, K. (2006). Enhancement of Vicker's hardness of nanoclay-supported nanotube reinforced novel polymer composites. *Carbon*, 44, 381-392.
- Moniruzzaman, M., and Winey, K.I. 2006. Polymer nanocomposites containing carbon Nanotubes. *Macromolecules*, 39, 5194-5205.
- Naunton, W.J.S., *The Applied Science of Rubber*, Edward Arnold (Publishers) Ltd, London, 1960 , 289-298.

Rakchonlatee, S., Kuatrakul, T., Chunput, P. and Saeoue, P. 2004. Influence of Rice Husk Ash in Mixed Filler on Processability and Mechanical Properties of Natural Rubber. *Science and Techno*12:50-55

Shanmugaraj, A.M., Bae, J.H., Lee, K.Y., Noh, W.H., Lee, S.H., and Ryu, S.H. (2007). Physical and chemical characteristics of multiwalled carbon nanotubes functionalized with aminosilane and its influence on the properties of natural rubber composites. *Composites Science and Technology*, 67, 1813-1822.

Saltman, W.M., "Styrene-Butadiene Rubber", in "Rubber Technology", Maurice Morton, editor, Van Nostrand Reinhold Company, 2nd edition, 1973, p 190

Subramaniam, A., "Molecular Weight And Molecular Weight distribution of Natural Rubber", RRIM technology bulletin 4, Rubber Research Institute of Malaysia, April 1980, p 16

Thongsang, S., and Sombatsompop, N. 2006. Reinforcement of Natural Rubber with Fly Ash from Different Local Sources. *Suranaree J. Sci. Techno* 114: 77-89.

Xiao, K.Q., Zhang, L.C., and Zarudi, I. 2007. Mechanical and rheological properties of carbon nanotube-reinforced polyethylene composites. *Composites Science and Technology* 67:177-182.

Yue, D., Liu, Y., and Shen, Z. 2006. Study on preparation and properties of carbon nanotubes/rubber composites. *Mater Science* 41: 2541-2544.

Zhou, X., Zhu, Y., Gong, O., and Liang, L. 2006. Preparation and properties of the powder SBR composites filled with CNTs by spray drying process. *Materials letters*.doi:10.1016/j.matlet.03.147.

<http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=rubber-chemist&month=12-2006&date=30&group=4&gblog=1> (accessed 8/08/2009)

<http://www.Digital Library.htm> "Carbon nanotube" (accessed 8/08/2009)

<http://www.navy.mi.th/science/Webpage/newdocument/carbonnanotube.ppt> (accessed 2/12/2009)

http://www.dss.go.th/dssweb/st-articles/files/cp_5_2548_polymer_blend.pdf
(accessed 2/12/2009)

<http://www.neoplast.biz/index.php?lay=show&ac=article&Id=174422&Ntype=1>
(accessed 8/08/2009)

<http://www.nsrui.ac.th/science/article/showarticle.asp?id=0000000012> “Carbon nanotube”

<http://www.pharmacy.uwaterloo.ca/.../about/index.html> (accessed 8/08/2009)

http://rubber.sc.mahidol.ac.th/rtu/information3_6.htm “เทคโนโลยียางพื้นฐาน”
(accessed 8/08/2009)

<http://www.thaiscience.com/lab.vol/p13cabon%20nanotubes.htm> “Carbon nanotube”
(accessed 8/08/2009)

<http://www.wikipedia.org> (accessed 8/08/2009)

http://www.statistics.ob.tc/single_a.htm(accessed 8/08/2009)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางคอมเพานด์

ตารางที่ ก.1 (Without CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/0

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.52 | 21.00 | 260.20 | 28.53 | | | 2.30 | 1 | 1.49 | 45.62 | 30.62 |
| 2 | 1.44 | 18.50 | 259.90 | 30.08 | 609.40 | 937.60 | 2.14 | 2 | 1.47 | 42.19 | 28.70 |
| 3 | 1.48 | 17.70 | 264.60 | 29.80 | 625.30 | 962.00 | 1.99 | 3 | 1.50 | 42.65 | 28.43 |
| 4 | 1.45 | 13.50 | | 15.18 | 587.30 | 903.50 | 1.55 | 4 | 1.49 | 43.56 | 29.23 |
| 5 | 1.40 | 19.30 | | 18.62 | | | 2.30 | 5 | 1.48 | 43.33 | 29.28 |
| 6 | 1.51 | 18.60 | 252.80 | 27.91 | 632.70 | 973.40 | 2.05 | 6 | | | |
| S.D. | | 2.51 | 4.88 | 6.43 | 20.09 | 30.93 | 0.28 | S.D. | | | 0.84 |
| Avg. | | 18.10 | 259.38 | 25.02 | 613.68 | 944.13 | 2.06 | Avg. | | | 29.25 |

ตารางที่ ก.1 (Without CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 85/15/0

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.51 | 18.30 | 202.10 | 22.31 | 593.10 | 912.50 | 2.02 | 1 | 1.46 | 36.24 | 24.82 |
| 2 | 1.42 | 18.39 | 234.00 | | 333.10 | 974.10 | 2.16 | 2 | 1.48 | 36.93 | 24.95 |
| 3 | 1.44 | 18.20 | 228.90 | | 613.40 | 943.70 | 2.11 | 3 | 1.46 | 37.16 | 25.45 |
| 4 | 1.47 | 17.80 | 254.40 | | 642.50 | | 2.02 | 4 | 1.49 | 38.38 | 25.76 |
| 5 | 1.49 | 17.10 | 202.00 | 22.59 | 590.40 | | 1.91 | 5 | 1.5 | 40.51 | 27.01 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.53 | 22.42 | 0.20 | 125.51 | 30.80 | 0.09 | S.D. | | | 0.87 |
| Avg. | | 17.96 | 202.00 | 22.45 | 554.50 | 943.43 | 2.04 | Avg. | | | 25.60 |

ตารางที่ ก.1 (Without CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 75/25/0

| ชิ้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชิ้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.45 | 16.25 | 211.60 | 24.33 | 598.60 | 920.90 | 1.87 | 1 | 1.41 | 31.59 | 22.40 |
| 2 | 1.44 | 16.20 | | 21.83 | 602.70 | 927.30 | 1.88 | 2 | 1.45 | 31.74 | 21.89 |
| 3 | 1.44 | 16.80 | 199.30 | 23.06 | 613.10 | 943.20 | 1.94 | 3 | 1.47 | 32.04 | 21.80 |
| 4 | 1.46 | 16.50 | 215.90 | 24.65 | | | 1.88 | 4 | 1.49 | 33.11 | 22.22 |
| 5 | 1.42 | 16.50 | | 21.20 | | 961.80 | 1.94 | 5 | 1.53 | 36.85 | 24.08 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.24 | 8.62 | 1.51 | 7.47 | 18.26 | 0.04 | S.D. | | | 0.93 |
| Avg. | | 16.45 | 208.93 | 23.01 | 604.80 | 938.30 | 1.90 | Avg. | | | 22.48 |

ตารางที่ ก.1 (Without CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 50/50/0

| ชิ้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชิ้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.48 | 14.60 | | 14.41 | 580.90 | 893.70 | 1.64 | 1 | 1.47 | 26.17 | 17.80 |
| 2 | 1.45 | 15.10 | 160.70 | 18.47 | | | 1.74 | 2 | 1.46 | 26.40 | 18.08 |
| 3 | 1.49 | 15.10 | 148.50 | 16.62 | 589.10 | 906.30 | 1.69 | 3 | | | |
| 4 | | | | | | | | 4 | | | |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | | | | | | | S.D. | | | |
| Avg. | | 0.29 | 8.63 | 2.03 | 5.80 | 8.91 | 0.05 | Avg. | | | 0.20 |

ตารางที่ ก.1 (Without CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 25/75/0

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.50 | 15.60 | | 1.85 | 195.20 | | | 1 | 1.41 | 20.52 | 14.55 |
| 2 | 1.47 | 15.49 | 31.43 | 3.56 | 342.40 | 526.80 | 1.76 | 2 | 1.51 | 27.01 | 17.89 |
| 3 | 1.45 | 14.90 | 28.23 | 3.25 | 331.10 | 509.40 | 1.71 | 3 | 1.51 | 27.85 | 18.44 |
| 4 | 1.44 | 13.90 | 27.24 | 3.15 | 322.90 | 496.70 | 1.61 | 4 | 1.55 | 24.34 | 15.70 |
| 5 | 1.46 | 14.30 | 32.58 | 3.72 | 352.10 | | 1.63 | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.74 | 2.84 | 0.74 | 64.43 | 15.11 | 0.07 | S.D. | | | 1.88 |
| Avg. | | 14.84 | 29.87 | 3.11 | 308.74 | 510.97 | 1.68 | Avg. | | | 16.19 |

ตารางที่ ก.1 (Without CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 0/100/0

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.40 | 13.28 | | | | | 1.58 | 1 | 1.48 | 14.42 | 9.74 |
| 2 | 1.46 | 13.81 | 15.49 | 1.77 | 201.40 | 309.80 | 1.58 | 2 | 1.50 | 15.87 | 10.58 |
| 3 | 1.48 | 13.70 | 16.02 | 1.80 | 203.10 | 312.50 | 1.54 | 3 | 1.45 | 17.24 | 11.89 |
| 4 | 1.45 | 12.97 | 14.34 | 1.65 | | 289.90 | 1.49 | 4 | 1.52 | 16.10 | 10.59 |
| 5 | 1.44 | 13.40 | 15.79 | 1.83 | 213.70 | 328.70 | 1.55 | 5 | 1.56 | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.34 | 0.75 | 0.08 | 6.67 | 15.91 | 0.04 | S.D. | | | 0.89 |
| Avg. | | 13.43 | 15.79 | 1.76 | 206.07 | 310.23 | 1.55 | Avg. | | | 10.70 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/1

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.54 | 23.00 | 258.70 | 28.00 | 570.10 | 877.00 | 2.49 | 1 | 1.55 | 50.43 | |
| 2 | 1.55 | 22.60 | 182.70 | 19.65 | 522.20 | 803.30 | 2.43 | 2 | 1.49 | 41.89 | 28.11 |
| 3 | 1.52 | 23.50 | 215.40 | 23.62 | 553.90 | 824.40 | 2.58 | 3 | 1.61 | 47.23 | 29.34 |
| 4 | 1.58 | 23.00 | 246.90 | 26.04 | 559.20 | 860.30 | 2.43 | 4 | 1.44 | 43.79 | 30.41 |
| 5 | 1.56 | 24.00 | 231.00 | 24.78 | 541.10 | 832.50 | 2.56 | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.54 | 29.64 | 3.12 | 18.39 | 29.27 | 0.07 | S.D. | | | 1.15 |
| Avg. | | 23.22 | 226.94 | 24.42 | 549.30 | 839.50 | 2.50 | Avg. | | | 29.29 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 85/15/1

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.60 | 16.40 | 240.50 | 25.05 | 643.50 | 989.90 | 1.71 | 1 | 1.43 | 33.87 | 23.69 |
| 2 | 1.44 | 15.50 | 172.60 | 19.97 | 579.70 | 891.80 | 1.79 | 2 | 1.54 | 36.16 | 23.48 |
| 3 | 1.49 | 15.20 | 187.60 | 20.99 | 617.50 | 950.00 | 1.70 | 3 | 1.47 | 33.11 | 22.52 |
| 4 | | | | | | | | 4 | 1.60 | 37.78 | 23.61 |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.62 | 35.67 | 2.69 | 32.08 | 49.33 | 0.05 | S.D. | | | 0.54 |
| Avg. | | 15.70 | 200.23 | 22.00 | 613.57 | 943.90 | 1.73 | Avg. | | | 23.33 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 75/25/1

| ชิ้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชิ้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.46 | 17.40 | 179.90 | 20.54 | 538.90 | 829.10 | 1.99 | 1 | 1.51 | 42.95 | 28.44 |
| 2 | 1.54 | 18.60 | 222.10 | 24.04 | 579.40 | 891.30 | 2.01 | 2 | 1.45 | 34.33 | 23.68 |
| 3 | 1.45 | 17.50 | 234.20 | 26.92 | 584.40 | 897.50 | 2.01 | 3 | 1.48 | 42.72 | 28.86 |
| 4 | 1.54 | 19.80 | 288.10 | 22.52 | 561.20 | 863.30 | 2.14 | 4 | 1.52 | 37.69 | 24.80 |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 1.12 | 38.11 | 2.69 | 20.62 | 31.24 | 0.07 | S.D. | | | 2.60 |
| Avg. | | 18.33 | 261.15 | 23.51 | 565.98 | 870.30 | 2.04 | Avg. | | | 26.45 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 50/50/1

| ชิ้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชิ้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.55 | 18.60 | 112.70 | 12.20 | 472.50 | 726.90 | 2.00 | 1 | 1.53 | 32.04 | 20.94 |
| 2 | 1.50 | 18.30 | 106.50 | 11.83 | 478.20 | 735.60 | 2.03 | 2 | 1.46 | 31.97 | 21.90 |
| 3 | 1.45 | 17.80 | 116.50 | 12.83 | 470.30 | 723.60 | 2.05 | 3 | 1.58 | 39.98 | 25.30 |
| 4 | | | | | | | | 4 | 1.43 | 29.53 | 20.65 |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.40 | 5.05 | 0.51 | 4.08 | 6.20 | 0.02 | S.D. | | | 2.14 |
| Avg. | | 18.23 | 116.50 | 12.29 | 473.67 | 728.70 | 2.03 | Avg. | | | 22.20 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 25/75/1

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.51 | 16.40 | 32.35 | 3.57 | 293.10 | 451.00 | 1.81 | 1 | 1.54 | 24.41 | 15.85 |
| 2 | 1.53 | 17.00 | 40.13 | 4.37 | 327.60 | 504.00 | 1.85 | 2 | 1.52 | 21.36 | 14.05 |
| 3 | 1.50 | 16.60 | 34.94 | 3.88 | 308.80 | 475.10 | 1.84 | 3 | 1.53 | 26.70 | 17.45 |
| 4 | | | | | | | | 4 | | | |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.31 | 3.96 | 0.40 | 17.27 | 26.54 | 0.02 | S.D. | | | 1.70 |
| Avg. | | 16.67 | 34.94 | 3.94 | 309.83 | 476.70 | 1.84 | Avg. | | | 15.78 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 0/100/1

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.50 | 16.40 | 21.44 | 2.38 | 205.20 | 315.70 | 1.82 | 1 | 1.54 | 19.53 | 12.68 |
| 2 | 1.53 | 16.30 | 21.67 | 2.36 | 206.10 | 317.40 | 1.78 | 2 | 1.52 | 16.56 | 10.89 |
| 3 | 1.45 | 16.50 | 20.68 | 2.38 | 203.70 | 313.40 | 1.90 | 3 | 1.52 | 16.25 | 10.69 |
| 4 | | | | | | | | 4 | | | |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.10 | 0.52 | 0.01 | 1.21 | 2.01 | 0.06 | S.D. | | | 1.10 |
| Avg. | | 16.40 | 20.68 | 2.37 | 205.00 | 315.50 | 1.83 | Avg. | | | 11.42 |

ที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/3

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.53 | 37.00 | 265.00 | 28.87 | 529.60 | 814.70 | 4.03 | 1 | 1.49 | 50.28 | 33.74 |
| 2 | 1.53 | 35.90 | 255.10 | 27.79 | 518.60 | 797.90 | 3.91 | 2 | 1.62 | 50.28 | 31.04 |
| 3 | 1.50 | 35.80 | 227.20 | 25.24 | 504.00 | 775.40 | 3.98 | 3 | 1.58 | 55.92 | 35.39 |
| 4 | | | | | | | | 4 | 1.50 | 56.84 | 37.89 |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.67 | 19.60 | 1.86 | 12.84 | 19.72 | 0.06 | S.D. | | | 2.88 |
| Avg. | | 36.23 | 249.10 | 27.30 | 517.40 | 796.00 | 3.97 | Avg. | | | 34.52 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 85/15/3

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.49 | 30.80 | 206.30 | 23.08 | 503.80 | 775.10 | 3.45 | 1 | 1.55 | 51.96 | 33.52 |
| 2 | 1.55 | 35.00 | 214.50 | 23.07 | 504.30 | 775.90 | 3.76 | 2 | 1.54 | 51.73 | 33.59 |
| 3 | 1.54 | 30.80 | 235.70 | 25.51 | 527.60 | 811.80 | 3.33 | 3 | 1.50 | 50.74 | 33.83 |
| 4 | | | | | | | | 4 | | | |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 2.42 | 15.17 | 1.41 | 13.60 | 20.96 | 0.22 | S.D. | | | 0.16 |
| Avg. | | 32.20 | 218.83 | 23.89 | 511.90 | 787.60 | 3.51 | Avg. | | | 33.65 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 75/25/3

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.51 | 28.60 | 220.90 | 24.39 | 520.00 | 800.00 | 3.16 | 1 | 1.52 | 42.19 | 27.76 |
| 2 | 1.48 | 29.50 | 154.80 | 17.43 | 451.80 | 695.00 | 3.32 | 2 | 1.58 | 45.32 | 28.68 |
| 3 | 1.45 | 28.50 | 22.07 | 22.07 | 495.10 | 761.00 | 3.28 | 3 | 1.52 | 41.96 | 27.61 |
| 4 | | | | | | | | 4 | 1.51 | 45.62 | 30.21 |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.55 | 101.26 | 3.54 | 34.51 | 53.08 | 0.09 | S.D. | | | 1.20 |
| Avg. | | 28.87 | 22.07 | 21.30 | 488.97 | 752.00 | 3.25 | Avg. | | | 28.56 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 50/50/3

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.52 | 20.80 | 144.40 | 15.84 | 507.00 | 780.10 | 2.28 | 1 | 1.5 | 37.92 | 25.28 |
| 2 | 1.51 | 20.80 | 145.30 | 16.03 | 514.20 | 791.00 | 2.30 | 2 | 1.59 | 43.64 | 27.45 |
| 3 | 1.48 | 21.80 | 153.00 | 17.23 | 515.50 | 794.60 | 2.45 | 3 | 1.56 | 37.46 | 24.01 |
| 4 | | | | | | | | 4 | 1.48 | 35.93 | 24.28 |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.58 | 4.73 | 0.75 | 4.58 | 7.55 | 0.10 | S.D. | | | 1.56 |
| Avg. | | 21.13 | 153.00 | 16.37 | 512.23 | 788.57 | 2.34 | Avg. | | | 25.25 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 25/75/3

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.42 | 22.00 | 45.01 | 5.28 | 295.40 | 454.40 | 2.58 | 1 | 1.49 | 30.90 | 20.74 |
| 2 | 1.47 | 23.00 | 49.23 | 5.59 | 313.40 | 482.20 | 2.61 | 2 | 1.51 | 25.71 | 17.03 |
| 3 | 1.53 | 24.00 | 55.08 | 6.00 | 322.30 | 495.80 | 2.61 | 3 | 1.52 | 25.71 | 16.91 |
| 4 | | | | | | | | 4 | | | |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 1.00 | 5.06 | 0.36 | 13.70 | 21.10 | 0.02 | S.D. | | | 2.18 |
| Avg. | | 23.00 | 55.08 | 5.62 | 310.37 | 477.47 | 2.60 | Avg. | | | 18.23 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 0/100/3

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.51 | 22 | 30.52 | 3.37 | 213.6 | 328.7 | 2.43 | 1 | 1.54 | 25.02 | 16.25 |
| 2 | 1.5 | 23 | 32.88 | 3.65 | 224 | 344.6 | 2.56 | 2 | 1.5 | 25.71 | 17.14 |
| 3 | 1.49 | 23 | 32.2 | 3.60 | 223.5 | 343.9 | 2.57 | 3 | 1.51 | 24.34 | 16.12 |
| 4 | 1.54 | 25.4 | 29.6 | 3.20 | 198.7 | 305.6 | 2.75 | 4 | | | |
| 5 | 1.55 | 24 | 33.11 | 3.56 | 214 | 330.5 | 2.58 | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 1.29 | 1.82 | 0.19 | 10.27 | 15.82 | 0.11 | S.D. | | | 0.56 |
| Avg. | | 23.48 | 31.64 | 3.48 | 214.76 | 330.66 | 2.58 | Avg. | | | 16.50 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/5

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.41 | 50.00 | 219.30 | 25.93 | 519.00 | 798.50 | 5.91 | 1 | 1.6 | 58.0 | 36.2 |
| 2 | 1.46 | 48.80 | 209.40 | 23.90 | 464.50 | 717.70 | 5.57 | 2 | 1.4 | 54.4 | 38.9 |
| 3 | 1.44 | 50.00 | 204.00 | 23.61 | 534.20 | 821.80 | 5.79 | 3 | 1.5 | 61.7 | 41.1 |
| 4 | 1.52 | 55.00 | 203.60 | 22.32 | 447.90 | 689.10 | 6.03 | 4 | 1.6 | 61.0 | 39.3 |
| 5 | 1.50 | 51.80 | 141.30 | 15.70 | 368.30 | 566.70 | 5.76 | 5 | 1.5 | 60.6 | 41.8 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 2.42 | 30.96 | 3.91 | 65.83 | 101.22 | 0.17 | S.D. | | | 2.2 |
| Avg. | | 51.12 | 195.52 | 22.29 | 466.78 | 718.76 | 5.81 | Avg. | | | 39.5 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 85/15/5

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.42 | 39.00 | 189.20 | 22.21 | 473.10 | 725.10 | 4.58 | 1 | 1.58 | 55.62 | 35.20 |
| 2 | 1.38 | 35.00 | 152.40 | 18.40 | 417.20 | 641.80 | 4.23 | 2 | 1.41 | 41.96 | 29.76 |
| 3 | 1.48 | 44.00 | 186.40 | 20.99 | 471.90 | 725.10 | 4.95 | 3 | 1.50 | 41.73 | 27.82 |
| 4 | 1.49 | 45.00 | 161.60 | 18.08 | 422.00 | 649.20 | 5.03 | 4 | 1.54 | 53.33 | 34.63 |
| 5 | | | | | | | | 5 | 1.45 | 47.84 | 32.99 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 4.65 | 18.21 | 2.01 | 30.61 | 46.06 | 0.37 | S.D. | | | 3.19 |
| Avg. | | 40.75 | 172.40 | 19.92 | 446.05 | 685.30 | 4.70 | Avg. | | | 32.08 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 75/25/5

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.53 | 47.00 | 212.60 | 23.16 | 472.10 | 726.30 | 5.12 | 1 | 1.5 | 49.4 | 33.0 |
| 2 | 1.54 | 52.00 | 220.90 | 23.90 | 454.30 | 689.90 | 5.63 | 2 | 1.5 | 54.1 | 35.6 |
| 3 | 1.50 | 49.00 | 219.30 | 24.36 | 449.60 | 691.60 | 5.44 | 3 | 1.5 | 46.4 | 31.1 |
| 4 | 1.54 | 48.00 | 207.70 | 22.48 | 441.90 | 679.80 | 5.19 | 4 | 1.5 | 54.5 | 36.6 |
| 5 | 1.46 | 47.00 | 207.20 | 23.65 | 442.70 | 681.00 | 5.37 | 5 | 1.5 | 51.2 | 34.6 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 2.07 | 6.85 | 0.72 | 12.28 | 18.95 | 0.20 | S.D. | | | 2.2 |
| Avg. | | 48.60 | 211.40 | 23.51 | 452.12 | 693.72 | 5.35 | Avg. | | | 34.2 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 50/50/5

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.49 | 61.00 | 117.40 | 13.13 | 316.30 | 486.60 | 6.82 | 1 | 1.52 | 51.04 | 33.58 |
| 2 | 1.51 | 63.00 | 150.80 | 16.64 | 342.80 | 527.40 | 6.95 | 2 | 1.48 | 60.58 | 40.93 |
| 3 | 1.50 | 60.00 | 174.40 | 19.38 | 372.70 | 573.30 | 6.67 | 3 | 1.40 | 47.53 | 33.95 |
| 4 | 1.54 | 60.40 | 179.60 | 19.44 | 386.80 | 595.10 | 6.54 | 4 | 1.47 | 56.92 | 38.72 |
| 5 | 1.51 | 64.00 | 138.60 | 15.30 | 337.50 | 519.30 | 7.06 | 5 | 1.43 | 67.75 | 47.38 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 1.74 | 22.32 | 2.71 | 28.31 | 43.54 | 0.21 | S.D. | | | 5.68 |
| Avg. | | 61.68 | 164.20 | 16.78 | 351.22 | 540.34 | 6.81 | Avg. | | | 38.91 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 25/75/5

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.51 | 62.79 | 62.79 | 6.33 | 325.10 | 500.20 | 6.93 | 1 | 1.56 | 38.68 | 24.79 |
| 2 | 1.50 | 58.36 | 58.36 | 6.49 | 314.90 | 484.50 | 6.48 | 2 | 1.50 | 31.89 | 21.26 |
| 3 | 1.52 | 58.06 | 58.06 | 6.37 | 307.40 | 472.90 | 6.37 | 3 | 1.41 | 28.31 | 20.08 |
| 4 | 1.52 | 64.93 | 64.93 | 7.12 | 319.50 | 491.50 | 7.12 | 4 | 1.47 | 29.53 | 20.09 |
| 5 | 1.50 | 61.04 | 61.04 | 6.78 | 321.60 | 494.80 | 6.78 | 5 | 1.58 | 32.20 | 20.38 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 2.93 | 3.45 | 0.33 | 6.84 | 10.54 | 0.31 | S.D. | | | 2.00 |
| Avg. | | 61.04 | 61.34 | 6.62 | 317.70 | 488.78 | 6.74 | Avg. | | | 21.32 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 0/100/5

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|----------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.51 | 32.00 | 41.81 | 4.62 | 247.60 | 300.90 | 3.53 | 1 | 1.61 | 30.90 | 19.19 |
| 2 | 1.39 | 29.00 | 36.62 | 4.39 | 220.60 | 339.40 | 3.48 | 2 | 1.45 | 34.26 | 23.63 |
| 3 | 1.53 | 29.60 | 49.21 | 5.36 | 289.60 | 445.50 | 3.22 | 3 | 1.54 | 34.96 | 22.70 |
| 4 | 1.57 | 28.50 | 50.35 | 5.35 | 280.40 | 431.40 | 3.03 | 4 | 1.58 | 34.10 | 21.58 |
| 5 | 1.43 | 29.80 | 45.85 | 5.34 | 266.20 | 409.60 | 3.47 | 5 | 1.51 | 30.59 | 20.26 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 1.34 | 2.34 | 0.47 | 27.54 | 62.39 | 0.22 | S.D. | | | 1.79 |
| Avg. | | 29.78 | 48.47 | 5.01 | 260.88 | 385.36 | 3.35 | Avg. | | | 21.47 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/10

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.61 | 90.00 | 195.40 | 20.23 | 335.60 | 516.20 | 9.32 | 1 | 1.53 | 63.48 | |
| 2 | 1.50 | 82.00 | 192.30 | 21.37 | 349.50 | 357.70 | 9.11 | 2 | 1.54 | 74.92 | 48.65 |
| 3 | 1.48 | 79.00 | 170.70 | 19.76 | 232.30 | 497.30 | 8.90 | 3 | 1.56 | 71.84 | |
| 4 | 1.56 | 80.00 | 200.20 | 21.39 | 354.80 | 545.80 | 8.55 | 4 | 1.58 | 68.44 | |
| 5 | 1.43 | 76.00 | 195.20 | | 343.70 | 528.70 | 8.86 | 5 | 1.54 | 72.94 | 47.36 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 5.27 | 11.57 | 0.82 | 51.30 | 75.58 | 0.29 | S.D. | | | 0.91 |
| Avg. | | 81.40 | 190.76 | 20.69 | 323.18 | 489.14 | 8.95 | Avg. | | | 48.01 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 85/15/10

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.47 | 70.00 | 116.90 | | 267.50 | 411.50 | | 1 | 1.44 | 59.28 | 41.17 |
| 2 | 1.43 | 71.60 | 104.80 | | 247.20 | 380.30 | 8.34 | 2 | 1.49 | 62.03 | 41.63 |
| 3 | 1.50 | 77.00 | 145.10 | 16.12 | 312.70 | 481.00 | 8.56 | 3 | 1.48 | 51.12 | |
| 4 | 1.57 | 74.00 | 176.20 | | 357.30 | 549.70 | | 4 | 1.51 | 62.41 | 41.33 |
| 5 | 1.60 | 72.00 | 151.70 | 15.80 | 316.00 | 486.20 | | 5 | 1.55 | 67.67 | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 2.69 | 28.46 | 0.23 | 43.43 | 66.83 | 0.15 | | | | 0.24 |
| Avg. | | 72.92 | 138.94 | 15.96 | 300.14 | 461.74 | 8.45 | | | | 41.38 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 75/25/10

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.49 | 78.00 | 116.90 | 13.07 | 258.40 | 397.60 | 8.72 | 1 | 1.55 | 57.83 | 37.31 |
| 2 | 1.50 | 78.00 | 124.80 | 13.87 | 260.20 | 400.30 | 8.67 | 2 | 1.45 | 58.98 | |
| 3 | 1.50 | 79.00 | 151.00 | | 309.80 | 476.60 | 8.78 | 3 | 1.47 | 59.81 | |
| 4 | 1.57 | 81.00 | 98.50 | | 216.70 | 333.30 | 8.60 | 4 | 1.48 | 57.14 | 38.61 |
| 5 | 1.56 | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 1.41 | 37.12 | 0.57 | 38.08 | 58.61 | 0.08 | S.D. | | | 0.92 |
| Avg. | | 79.00 | 124.75 | 13.47 | 261.28 | 401.95 | 8.69 | Avg. | | | 37.96 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 50/50/10

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.45 | 64.00 | 101.50 | | 261.30 | 402.00 | 7.36 | 1 | 1.49 | 53.10 | 35.64 |
| 2 | 1.57 | 68.00 | 96.66 | 10.26 | 244.50 | 376.20 | 7.22 | 2 | 1.48 | 63.10 | |
| 3 | 1.54 | 64.00 | 86.21 | 9.33 | 234.50 | 360.80 | 6.93 | 3 | 1.52 | 56.84 | 37.39 |
| 4 | 1.51 | 64.00 | 84.46 | 9.32 | 233.90 | 359.90 | 7.06 | 4 | 1.51 | 60.96 | |
| 5 | | | | | | | | 5 | 1.45 | 52.03 | 35.88 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 2.00 | 1.24 | 0.54 | 12.79 | 19.66 | 0.19 | S.D. | | | 0.95 |
| Avg. | | 65.00 | 85.34 | 9.64 | 243.55 | 374.73 | 7.14 | Avg. | | | 36.31 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 25/75/10

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.48 | 57.00 | 64.54 | 7.27 | 199.10 | 306.30 | 6.42 | 1 | 1.52 | 52.34 | 34.43 |
| 2 | 1.53 | 60.00 | 83.92 | 9.14 | 249.00 | 383.00 | 6.54 | 2 | 1.52 | 49.90 | 32.83 |
| 3 | 1.51 | 59.80 | 71.72 | 7.92 | 219.30 | 337.50 | 6.60 | 3 | 1.51 | 56.84 | |
| 4 | 1.55 | 61.00 | 83.92 | 9.02 | 247.00 | 379.90 | 6.56 | 4 | 1.51 | 50.81 | 33.65 |
| 5 | | | | | | | | 5 | 1.52 | 49.97 | 32.88 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 1.72 | 8.63 | 0.90 | 23.88 | 36.69 | 0.08 | S.D. | | | 0.76 |
| Avg. | | 59.45 | 77.82 | 8.34 | 228.60 | 351.68 | 6.53 | Avg. | | | 33.45 |

ตารางที่ ก.2 (Unmodified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 0/100/10

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.54 | 53.00 | 72.02 | 7.80 | 249.60 | 384.00 | 5.74 | 1 | 1.61 | 52.41 | 32.55 |
| 2 | 1.55 | 69.00 | 71.70 | 7.71 | 237.60 | 365.50 | 7.42 | 2 | 1.47 | 48.52 | 33.01 |
| 3 | 1.48 | 61.00 | 68.20 | 7.68 | 232.40 | 357.50 | 6.87 | 3 | 1.53 | 50.01 | 32.69 |
| 4 | 1.55 | 68.00 | 71.64 | 7.70 | 232.90 | 358.30 | 7.31 | 4 | 1.59 | 52.03 | 32.72 |
| 5 | 1.53 | 66.00 | 66.53 | 7.25 | 225.30 | 346.60 | 7.19 | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 6.58 | 2.61 | 0.22 | 8.99 | 13.84 | 0.69 | S.D. | | | 0.19 |
| Avg. | | 63.40 | 68.79 | 7.63 | 235.56 | 362.38 | 6.91 | Avg. | | | 32.74 |

ตารางที่ ก.3 (Acid-modified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/1

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.43 | | 215.70 | 25.14 | 542.80 | 835.00 | | 1 | 1.46 | 40.74 | 27.90 |
| 2 | 1.52 | 22.00 | 251.00 | 27.52 | 549.60 | 845.60 | 2.41 | 2 | 1.44 | 39.67 | 27.55 |
| 3 | 1.51 | 21.50 | 243.10 | 26.84 | 560.60 | 862.50 | 2.37 | 3 | 1.41 | 40.13 | 28.46 |
| 4 | 1.51 | 21.50 | 233.80 | 25.81 | 549.90 | 846.00 | 2.37 | 4 | 1.47 | 44.78 | 30.46 |
| 5 | 1.50 | 21.30 | 232.00 | 25.78 | 541.40 | 832.90 | 2.37 | 5 | 1.45 | 42.04 | 28.99 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.30 | 13.27 | 0.95 | 7.61 | 11.75 | 0.02 | | | | 1.14 |
| Avg. | | 21.58 | 235.12 | 26.22 | 548.86 | 844.40 | 2.38 | | | | 28.67 |

ตารางที่ ก.3 (Acid-modified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 75/25/1

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.44 | 18.00 | 200.30 | 23.18 | 546.30 | 840.40 | 2.08 | 1 | 1.4 | 33.3 | 23.8 |
| 2 | 1.50 | 19.00 | 192.90 | 21.43 | 536.30 | 825.10 | 2.11 | 2 | 1.5 | 36.6 | 24.3 |
| 3 | 1.46 | 18.80 | 206.90 | 23.62 | 558.30 | 889.00 | 2.15 | 3 | 1.5 | 35.3 | 23.9 |
| 4 | 1.45 | 18.30 | 230.30 | 26.47 | 564.00 | 867.60 | 2.10 | 4 | 1.5 | 34.4 | 23.6 |
| 5 | 1.47 | 18.80 | 211.60 | 24.00 | 559.00 | 868.40 | 2.13 | 5 | 1.4 | 39.6 | 27.9 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.41 | 14.12 | 1.82 | 11.28 | 25.27 | 0.02 | | | | 1.8 |
| Avg. | | 18.58 | 208.40 | 23.74 | 552.78 | 858.10 | 2.12 | | | | 24.7 |

ตารางที่ ก.3 (Acid-modified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 50/50/1

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.44 | 16.80 | 129.20 | 14.95 | 445.60 | 685.50 | 1.94 | 1 | 1.47 | 29.91 | 20.35 |
| 2 | 1.49 | 18.30 | 109.20 | 12.91 | 434.60 | 668.60 | 2.05 | 2 | 1.49 | 30.21 | 20.28 |
| 3 | 1.47 | 18.50 | 98.96 | 11.52 | 447.10 | 687.80 | 2.10 | 3 | 1.52 | 31.81 | 20.93 |
| 4 | 1.41 | 18.30 | 88.96 | 10.93 | 442.40 | 680.50 | 2.16 | 4 | 1.42 | 28.08 | 19.77 |
| 5 | 1.40 | 16.00 | 89.80 | 11.05 | 429.70 | 661.10 | 1.90 | 5 | 1.42 | 25.79 | 18.16 |
| 6 | | | | | | | | | | | |
| S.D. | | 1.12 | 5.55 | 1.69 | 7.46 | 11.45 | 0.11 | | | | 1.05 |
| Avg. | | 17.58 | 92.57 | 12.27 | 439.88 | 676.70 | 2.03 | | | | 19.90 |

ตารางที่ ก.3 (Acid-modified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 25/75/1

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.51 | 15.40 | 50.43 | 5.77 | 385.80 | 593.50 | 1.70 | 1 | 1.47 | 19.45 | 13.23 |
| 2 | 1.48 | 14.90 | 22.81 | 2.59 | 243.40 | 374.40 | 1.68 | 2 | 1.49 | 20.98 | 14.08 |
| 3 | 1.52 | 16.40 | 37.92 | 4.16 | 329.70 | 503.30 | 1.80 | 3 | 1.42 | 19.84 | 13.97 |
| 4 | 1.44 | 15.40 | 40.13 | 4.65 | 349.80 | 538.20 | 1.78 | 4 | 1.39 | 17.93 | 12.90 |
| 5 | 1.49 | 14.60 | 30.82 | 3.52 | 294.90 | 453.60 | 1.63 | 5 | 1.47 | 19.23 | 13.08 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.68 | 4.86 | 1.19 | 54.33 | 83.47 | 0.07 | | | | 0.54 |
| Avg. | | 15.34 | 36.29 | 4.13 | 320.72 | 492.60 | 1.72 | | | | 13.45 |

ตารางที่ ก.3 (Acid-modified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 0/100/1

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.49 | 14.00 | 15.87 | 1.78 | 179.90 | 276.80 | 1.57 | 1 | 1.44 | 12.44 | 8.64 |
| 2 | 1.47 | 13.50 | 15.73 | 1.79 | 185.70 | 285.87 | 1.53 | 2 | 1.41 | 12.44 | 8.82 |
| 3 | 1.51 | | 16.70 | 1.84 | 188.00 | 289.20 | | 3 | 1.49 | 17.70 | 11.88 |
| 4 | 1.45 | 12.70 | 15.87 | 1.82 | 192.40 | 296.00 | 1.46 | 4 | 1.51 | 12.66 | 8.38 |
| 5 | 1.42 | 12.90 | 15.95 | 1.87 | 189.20 | 291.10 | 1.51 | 5 | 1.53 | 15.87 | 10.37 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.59 | 0.46 | 0.04 | 4.67 | 7.16 | 0.04 | | | | 1.48 |
| Avg. | | 13.28 | 16.17 | 1.82 | 187.04 | 287.79 | 1.52 | | | | 9.62 |

ตารางที่ ก.3 (Acid-modified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/3

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.48 | 25.40 | 193.90 | 23.63 | 510.40 | 785.20 | 2.86 | 1 | 1.44 | 38.15 | 26.49 |
| 2 | 1.51 | 26.30 | 234.10 | 25.84 | 502.60 | 773.30 | 2.90 | 2 | 1.49 | 50.05 | 33.59 |
| 3 | 1.43 | 25.00 | 218.30 | 25.44 | 511.80 | 787.40 | 2.91 | 3 | 1.50 | 41.20 | 27.47 |
| 4 | 1.49 | 26.00 | 195.80 | 23.66 | 513.50 | 789.90 | 2.91 | 4 | 1.48 | 52.56 | 35.51 |
| 5 | | | | | | | | 5 | 1.46 | 41.28 | 28.27 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.59 | 19.23 | 1.16 | 4.82 | 7.36 | 0.02 | | | | 4.02 |
| Avg. | | 25.68 | 210.53 | 24.64 | 509.58 | 783.95 | 2.90 | | | | 30.27 |

ตารางที่ ก.3 (Acid-modified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 75/25/3

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.46 | 21.50 | 215.80 | 24.40 | 548.20 | 843.50 | 2.45 | 1 | 1.42 | 35.55 | 25.04 |
| 2 | 1.45 | 20.00 | 163.70 | 18.82 | 489.70 | 753.30 | 2.30 | 2 | 1.48 | 38.15 | 25.78 |
| 3 | 1.46 | | 179.00 | 20.43 | 511.90 | 787.60 | | 3 | 1.49 | 39.83 | 26.73 |
| 4 | 1.46 | 21.51 | 287.60 | 21.42 | 516.20 | 794.20 | 2.46 | 4 | 1.45 | 38.22 | 26.36 |
| 5 | | | | | | | | 5 | 1.42 | 35.63 | 25.09 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.87 | 55.23 | 2.35 | 24.11 | 37.18 | 0.09 | | | | 0.75 |
| Avg. | | 21.00 | 211.53 | 21.27 | 516.50 | 794.65 | 2.40 | | | | 25.80 |

ตารางที่ ก.3 (Acid-modified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 50/50/3

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.44 | 18.00 | 127.00 | 14.70 | 478.50 | 736.10 | 2.08 | 1 | 1.48 | 27.08 | 18.30 |
| 2 | 1.53 | 20.00 | 135.60 | 14.77 | 492.70 | 757.90 | 2.18 | 2 | 1.45 | 30.52 | 21.05 |
| 3 | 1.47 | 19.30 | 133.70 | 15.15 | 498.10 | 752.50 | 2.19 | 3 | 1.45 | 28.23 | 19.47 |
| 4 | 1.41 | 18.80 | 167.90 | 19.71 | 532.70 | 819.60 | 2.22 | 4 | 1.44 | 28.53 | 19.81 |
| 5 | | | | | | | | 5 | 1.45 | 32.04 | 22.10 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.84 | 24.18 | 2.43 | 23.00 | 36.58 | 0.06 | | | | 1.47 |
| Avg. | | 19.03 | 150.80 | 16.08 | 500.50 | 766.53 | 2.17 | | | | 20.14 |

ตารางที่ ก.3 (Acid-modified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 25/75/3

| ชิ้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชิ้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.47 | 17.80 | 36.93 | 4.19 | 301.20 | 463.30 | 2.02 | 1 | 1.48 | 22.74 | 15.36 |
| 2 | 1.48 | 17.80 | 45.85 | 5.16 | 343.00 | 527.70 | 2.00 | 2 | 1.47 | 24.49 | 16.66 |
| 3 | 1.48 | 16.70 | 47.00 | 5.29 | 347.60 | 534.80 | 1.88 | 3 | 1.50 | 22.58 | 15.05 |
| 4 | 1.44 | 17.40 | 41.43 | 4.95 | 333.50 | 513.00 | 2.01 | 4 | 1.43 | 19.07 | 13.34 |
| 5 | 1.46 | 17.00 | 43.56 | 4.97 | 337.40 | 519.00 | 1.94 | 5 | 1.38 | 21.90 | 15.87 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.49 | 2.81 | 0.43 | 18.32 | 28.23 | 0.06 | | | | 1.23 |
| Avg. | | 17.34 | 44.00 | 4.91 | 332.54 | 511.56 | 1.97 | | | | 15.26 |

ตารางที่ ก.3 (Acid-modified CNTs)

(NR/SBR/CNTs) ; 0/100/3

| ชิ้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | Load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชิ้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.47 | 14.80 | 22.05 | 2.56 | 263.50 | 408.20 | 1.68 | 1 | 1.47 | 14.27 | 9.71 |
| 2 | 1.47 | 13.80 | 22.51 | 2.55 | 247.20 | 380.30 | 1.56 | 2 | 1.48 | 13.81 | 9.33 |
| 3 | 1.54 | 14.80 | 19.15 | 2.07 | 197.50 | 303.90 | 1.60 | 3 | 1.50 | 17.55 | 11.70 |
| 4 | 1.49 | 15.00 | 21.21 | 2.37 | 225.80 | 347.40 | 1.68 | 4 | 1.48 | 14.50 | 9.80 |
| 5 | | | | | | | | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.54 | 1.46 | 0.23 | 28.54 | 44.87 | 0.06 | | | | 1.06 |
| Avg. | | 14.60 | 20.18 | 2.39 | 233.50 | 359.95 | 1.63 | | | | 10.13 |

ตารางที่ ก.4 (Silane-modified CNTs) (CNTs:Silane , 1:1)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/1

Sulphur 2 phr

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.51 | 25.7 | 214.9 | 23.72 | 516.4 | 794.4 | 2.84 | 1 | 1.42 | 38.38 | 27.03 |
| 2 | 1.54 | 26 | 252.4 | 26.79 | 544.1 | 838.1 | 2.81 | 2 | 1.48 | 39.14 | 26.45 |
| 3 | 1.57 | 26.8 | 249.1 | 26.44 | 537.7 | 827 | 2.85 | 3 | 1.46 | 45.93 | 31.46 |
| 4 | 1.4 | 23 | 225.2 | 26.81 | 534.7 | 822.5 | 2.74 | 4 | 1.51 | 44.94 | 29.76 |
| 5 | 1.42 | 23 | 221 | 25.94 | 529.8 | 815 | 2.70 | 5 | | | |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 1.78 | 17.08 | 1.29 | 10.40 | 16.29 | 0.06 | | | | 2.35 |
| Avg. | | 24.90 | 232.52 | 25.94 | 532.54 | 819.40 | 2.79 | | | | 28.67 |

ตารางที่ ก.4 (Silane-modified CNTs) (CNTs:Silane , 1:1)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/3

Sulphur 2 phr

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.48 | 27.9 | 190.2 | 21.42 | 486 | 747.7 | 3.14 | 1 | 1.5 | 39.6 | 26.40 |
| 2 | 1.52 | 26 | 169.1 | 18.55 | 462.8 | 712 | 2.85 | 2 | 1.4 | 37.99 | 27.14 |
| 3 | 1.53 | 27 | 177.4 | 20.13 | 498.3 | 766.7 | 2.94 | 3 | 1.46 | 41.66 | 28.53 |
| 4 | 1.43 | 27 | 181.8 | 21.87 | 477.9 | 735.2 | 3.15 | 4 | 1.53 | 42.04 | 27.48 |
| 5 | 1.44 | 27.9 | 199.9 | 23.14 | 479.9 | 738.3 | 3.23 | 5 | 1.43 | 35.78 | 25.02 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.79 | 11.84 | 1.75 | 12.91 | 19.89 | 0.16 | | | | 1.31 |
| Avg. | | 27.16 | 183.68 | 21.02 | 480.98 | 739.98 | 3.06 | | | | 26.91 |

ตารางที่ ก.5 (Silane-modified CNTs) (CNTs:Silane , 1:3)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/1

Sulphur 2 phr

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.51 | 19.45 | 205.3 | 22.66 | 542.1 | 834.1 | 2.15 | 1 | 1.54 | 38.15 | 24.77 |
| 2 | 1.52 | 19.3 | 235.8 | 25.86 | 573.3 | 882 | 2.12 | 2 | 1.66 | 52.57 | 31.67 |
| 3 | 1.52 | 18.7 | 251.5 | 27.58 | 594.9 | 915.3 | 2.05 | 3 | 1.63 | 45.62 | 27.99 |
| 4 | 1.54 | 19.5 | 250.2 | 27.08 | 574.2 | 883.4 | 2.11 | 4 | 1.48 | 40.51 | 27.37 |
| 5 | 1.53 | 20 | 231.2 | 25.19 | 586.2 | 901.9 | 2.18 | 5 | 1.61 | 44.02 | 27.34 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.47 | 18.71 | 1.93 | 20.02 | 30.79 | 0.05 | | | | 2.48 |
| Avg. | | 19.39 | 234.80 | 25.67 | 574.14 | 883.34 | 2.12 | | | | 27.83 |

ตารางที่ ก.5 (Silane-modified CNTs) (CNTs:Silane , 1:3)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/3

Sulphur 2 phr

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.48 | 18 | 158.2 | 17.82 | 519.9 | 799.8 | 2.03 | 1 | 1.5 | 40.44 | 26.96 |
| 2 | 1.44 | 17.6 | 176.9 | 20.48 | 548.1 | 843.2 | 2.04 | 2 | 1.47 | 37.46 | 25.48 |
| 3 | 1.44 | 17.8 | 182 | 21.06 | 553.1 | 851 | 2.06 | 3 | 1.48 | 36.7 | 24.80 |
| 4 | 1.44 | 18.5 | 191.2 | 22.13 | 545.8 | 839.7 | 2.14 | 4 | 1.5 | 35.32 | 23.55 |
| 5 | 1.51 | 18 | 188.5 | 20.81 | 556.1 | 895.6 | 1.99 | 5 | 1.49 | 39.52 | 26.52 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 0.33 | 13.08 | 1.60 | 14.39 | 34.16 | 0.06 | | | | 1.37 |
| Avg. | | 17.98 | 179.36 | 20.46 | 544.60 | 845.86 | 2.05 | | | | 25.46 |

ตารางที่ ก.6 (Silane-modified CNTs) (CNTs:Silane , 1:1)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/1

Sulphur 3 phr

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1 | 1.52 | 31 | 235.7 | 25.84 | 501.8 | 772 | 3.40 | 1 | 1.5 | 52.26 |
| 2 | 2 | 1.46 | 30.8 | 227.2 | 25.94 | 503.8 | 775.1 | 3.52 | 2 | 1.52 | 52.57 |
| 3 | 3 | 1.43 | 29 | 213.1 | 24.84 | 482.1 | 741.6 | 3.38 | 3 | 1.47 | 47.99 |
| 4 | 4 | 1.48 | 30.8 | 213.4 | 24.03 | 482.5 | 742.4 | 3.47 | 4 | 1.44 | 40.44 |
| 5 | 5 | 1.54 | 33 | 226.5 | 24.51 | 478.3 | 738.5 | 3.57 | 5 | 1.46 | 50.28 |
| 6 | | | | | | | | 6 | | | |
| S.D. | | 1.42 | 9.76 | 0.84 | 12.09 | 18.01 | 0.08 | | | | 2.84 |
| Avg. | | 30.92 | 223.18 | 25.03 | 489.70 | 753.92 | 3.47 | | | | 32.92 |

ตารางที่ ก.7 (Silane-modified CNTs) (CNTs:Silane , 1:1)

(NR/SBR/CNTs) ; 100/0/1

Sulphur 5 phr

| ชั้นงาน | หนา (มม.) | load 300 % | load at break (N) | Tensile Strength (MPa) | extension @ break | elongation at break (%) | modulus 300% (MPa) | ชั้นงาน | หนา (มม.) | Maximum load (N) | Tear Resistance (N/mm) |
|---------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|---------|-----------|------------------|------------------------|
| 1 | 1.47 | 48 | 67.44 | 7.647 | 232.1 | 357.1 | 5.44 | 1 | 1.44 | 55.54 | 38.57 |
| 2 | 1.49 | 46 | 47.76 | 5.342 | 183.9 | 282.9 | 5.15 | 2 | 1.55 | 56.61 | 36.52 |
| 3 | 1.5 | 49 | 66.53 | 7.392 | 226.8 | 348.9 | 5.44 | 3 | 1.51 | 51.04 | 33.80 |
| 4 | 1.47 | 48 | 96.21 | 10.96 | 276.9 | 426.1 | 5.44 | 4 | 1.41 | 49.44 | 35.06 |
| 5 | 1.46 | | 30.14 | 3.44 | 133.1 | 204.7 | | 5 | 1.48 | 54.32 | 36.70 |
| 6 | | | | | | | | | | | |
| S.D. | | 1.26 | 24.69 | 2.81 | 54.40 | 83.76 | 0.15 | | | | 1.80 |
| Avg. | | 47.75 | 61.62 | 6.96 | 210.56 | 323.94 | 5.37 | | | | 36.13 |

ตารางที่ ข.4 การเสิชรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C และอุณหภูมิ 70°C

CNTs ที่ไม่ปรับผิว

| NR/SBR/CNTs | Compression set 25°C | | | Avg. | S.D. | Compression set 70°C | | | Avg. | S.D. |
|-------------|-------------------------|-------|-------|-------|---------|-------------------------|-------|-------|-------|---------|
| | | | | | | | | | | |
| 100/0/0 | | 6.90 | | 6.90 | #DIV/0! | 45.83 | 48.00 | 44.00 | 45.94 | 2.00 |
| 85/15/0 | 7.69 | 7.41 | 4.17 | 6.42 | 1.96 | 59.38 | 48.00 | 53.33 | 53.57 | 5.69 |
| 75/25/0 | 4.17 | 3.45 | | 3.81 | 0.51 | 47.83 | 45.83 | 38.46 | 44.04 | 4.93 |
| 50/50/0 | 8.00 | 7.69 | | 7.85 | 0.22 | 26.09 | 29.17 | 22.73 | 25.99 | 3.22 |
| 25/75/0 | | 11.11 | 13.79 | 12.45 | 1.90 | 53.57 | 40.00 | 34.78 | 42.78 | 9.70 |
| 0/100/0 | | 8.70 | | 8.70 | #DIV/0! | 40.00 | 34.78 | 43.48 | 39.42 | 4.38 |
| 100/0/10 | | 16.00 | 8.70 | 12.35 | 5.16 | 44.00 | 40.00 | 31.82 | 38.61 | 6.21 |
| 85/15/10 | 24.14 | | 13.64 | 18.89 | 7.43 | 36.36 | 34.78 | | 35.57 | 1.12 |
| 75/25/10 | 8.33 | 8.70 | | 8.51 | 0.26 | 40.91 | 33.33 | | 37.12 | 5.36 |
| 50/50/10 | | 8.70 | 12.50 | 10.60 | 2.69 | 33.33 | | 38.10 | 35.71 | 3.37 |
| 25/75/10 | | 16.67 | 8.70 | 12.68 | 5.64 | 46.15 | | | 46.15 | #DIV/0! |
| 0/100/10 | 4.35 | 8.00 | | 6.17 | 2.58 | | 41.67 | 44.00 | 42.83 | 1.65 |
| 100/0/5 | 6.90 | 12.12 | 3.45 | 7.49 | 4.37 | 61.76 | 63.89 | 68.57 | 64.74 | 3.48 |
| 85/15/5 | | 10.34 | 15.15 | 12.75 | 3.40 | 57.58 | 51.85 | 58.06 | 55.83 | 3.45 |
| 75/25/5 | 10.71 | 10.81 | | 10.76 | 0.07 | 52.78 | 50.00 | 48.15 | 50.31 | 2.33 |
| 50/50/5 | 8.70 | 7.69 | 9.09 | 8.49 | 0.72 | 45.83 | 37.50 | 40.00 | 41.11 | 4.28 |
| 25/75/5 | 12.00 | 13.04 | | 12.52 | 0.74 | 31.25 | | | 31.25 | #DIV/0! |
| 0/100/5 | | 9.09 | 8.70 | 8.89 | 0.28 | 30.43 | 26.09 | 23.81 | 26.78 | 3.37 |
| 100/0/3 | 4.35 | | 4.35 | 4.35 | 0.00 | 50.00 | | 56.00 | 53.00 | 4.24 |
| 85/15/3 | 4.35 | 12.50 | 0.00 | 5.62 | 6.35 | | 52.17 | 54.84 | 53.51 | 1.88 |
| 75/25/3 | 12.00 | 12.50 | | 12.25 | 0.35 | 36.00 | 43.48 | 43.48 | 40.99 | 4.32 |
| 50/50/3 | | 6.90 | 11.11 | 9.00 | 2.98 | 33.33 | | | 33.33 | #DIV/0! |
| 25/75/3 | | 9.52 | 9.52 | 9.52 | 0.00 | 33.33 | 34.78 | | 34.06 | 1.02 |
| 0/100/3 | | 8.70 | 13.64 | 11.17 | 3.49 | 19.05 | 19.05 | 22.73 | 20.27 | 2.12 |

| NR/SBR/CNTs | Compression set 25°C | | | Avg. | S.D. | Compression set 70°C | | | Avg. | S.D. |
|-------------|----------------------|------|------|------|------|----------------------|-------|-------|-------|------|
| | | | | | | | | | | |
| 100/0/1 | 9.09 | 8.33 | 6.90 | 8.11 | 1.11 | | 48.00 | 41.67 | 44.83 | 4.48 |
| 85/15/1 | | 3.23 | 3.70 | 3.46 | 0.34 | | 50.00 | 48.00 | 49.00 | 1.41 |
| 75/25/1 | 8.33 | 4.17 | | 6.25 | 2.95 | 40.91 | 36.36 | 34.78 | 37.35 | 3.18 |
| 50/50/1 | 9.09 | | 8.00 | 8.55 | 0.77 | 43.48 | 45.16 | | 44.32 | 1.19 |
| 25/75/1 | | 4.17 | 4.76 | 4.46 | 0.42 | 30.43 | | | 30.43 | - |
| 0/100/1 | | | 4.00 | 4.00 | - | 29.17 | 18.18 | 18.18 | 21.84 | 6.34 |

ตารางที่ ข.5 การการเสีรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C และอุณหภูมิ 70°C

CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด

| NR/SBR/CNTs | Compression set 25°C | | | Avg. | S.D. | Compression set 70°C | | | Avg. | S.D. |
|-------------|----------------------|-------|-------|-------|------|----------------------|-------|-------|-------|------|
| | | | | | | | | | | |
| 100/0/1A | 4.35 | 4.76 | | 4.55 | 0.29 | 38.10 | | 42.86 | 40.48 | 3.37 |
| 75/25/1A | 8.00 | | 9.52 | 8.76 | 1.08 | | 47.62 | 52.17 | 49.90 | 3.22 |
| 50/50/1A | | 4.35 | 7.69 | 6.02 | 2.36 | | 35.00 | 34.78 | 34.89 | 0.15 |
| 25/75/1A | 4.55 | | 4.76 | 4.65 | 0.15 | 31.82 | 31.82 | | 31.82 | 0.00 |
| 0/100/1A | | 4.17 | 4.76 | 4.46 | 0.42 | 36.36 | | 38.10 | 37.23 | 1.22 |
| 100/0/3A | 12.50 | 13.64 | | 13.07 | 0.80 | | 34.78 | 36.36 | 35.57 | 1.12 |
| 75/25/3A | 9.52 | 13.64 | 13.04 | 12.07 | 2.22 | 41.67 | 40.91 | | 41.29 | 0.54 |
| 50/50/3A | 9.52 | 8.70 | 4.55 | 7.59 | 2.67 | | 42.86 | 43.48 | 43.17 | 0.44 |
| 25/75/3A | 8.33 | 8.70 | 9.09 | 8.71 | 0.38 | 31.82 | | 27.27 | 29.55 | 3.21 |
| 0/100/3A | | 19.23 | 14.81 | 17.02 | 3.12 | | 28.57 | 33.33 | 30.95 | 3.37 |

ตารางที่ ข.6 การการเสีรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 25°C และอุณหภูมิ 70°C

CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน

| NR/SBR/CNTs | CNTs:silane | Sulppur(phr) | Compression set | | | Avg. | S.D. | Compression set | | | Avg. | S.D. |
|-------------|-------------|--------------|-----------------|-------|-------|-------|------|-----------------|-------|-------|-------|------|
| | | | 25°C | | | | | 70°C | | | | |
| 100/0/1 | 1:1 | 2 | | 4.17 | | 4.17 | | 33.33 | 28.57 | 33.33 | 31.75 | 2.75 |
| 100/0/3 | 1:1 | 2 | 4.55 | 3.70 | | 4.12 | 0.60 | | 34.78 | 30.43 | 32.61 | 3.07 |
| 100/0/1 | 1:3 | 2 | 8.33 | 12.50 | 8.70 | 9.84 | 2.31 | 29.17 | 26.09 | | 27.63 | 2.18 |
| 100/0/3 | 1:3 | 2 | 12.50 | 13.64 | | 13.07 | 0.80 | | 34.78 | 36.00 | 35.39 | 0.86 |
| 100/0/1 | 1:1 | 3 | | 8.00 | 12.50 | 10.25 | 3.18 | | 40.91 | 38.10 | 39.50 | 1.99 |
| 100/0/1 | 1:1 | 5 | 4.17 | | 4.55 | 4.36 | 0.27 | 40.91 | 40.91 | 40.00 | 40.61 | 0.52 |

ตารางที่ ข.7 ความแข็ง

CNTs ที่ไม่ปรับผิว

| NR/SBR/CNTs | Hardness (Shore A) | | | | | Avg. | S.D. |
|-------------|--------------------|----|----|----|----|-------|------|
| | | | | | | | |
| 100/0/0 | 39 | 40 | 39 | 40 | 40 | 39.60 | 40 |
| 85/15/0 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36.00 | 36 |
| 75/25/0 | 35 | 34 | 35 | 37 | 37 | 35.60 | 36 |
| 50/50/0 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40.00 | 40 |
| 25/75/0 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39.00 | 39 |
| 0/100/0 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44 | 44.00 | 44 |
| 100/0/10 | 57 | 57 | 56 | 55 | 57 | 56.40 | 56 |
| 85/15/10 | 57 | 57 | 56 | 57 | 56 | 56.60 | 57 |
| 75/25/10 | 62 | 62 | 63 | 62 | 63 | 62.40 | 62 |
| 50/50/10 | 63 | 62 | 62 | 61 | 61 | 61.80 | 62 |
| 25/75/10 | 58 | 58 | 59 | 57 | 59 | 58.20 | 58 |
| 0/100/10 | 59 | 59 | 59 | 59 | 59 | 59.00 | 59 |
| 100/0/5 | 48 | 49 | 50 | 48 | 48 | 48.60 | 49 |
| 85/15/5 | 49 | 45 | | 46 | 46 | 46.50 | 46 |
| 75/25/5 | 47 | 48 | 47 | 47 | 47 | 47.20 | 47 |
| 50/50/5 | 47 | 47 | 49 | 48 | 47 | 47.60 | 48 |
| 25/75/5 | 49 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48.20 | 48 |
| 0/100/5 | 53 | 53 | 54 | 54 | 54 | 53.60 | 54 |
| 100/0/3 | 41 | 41 | 41 | 41 | 41 | 41.00 | 41 |
| 85/15/3 | 44 | 44 | 44 | 44 | 43 | 43.80 | 44 |
| 75/25/3 | 49 | 48 | 49 | 49 | 49 | 48.80 | 49 |
| 50/50/3 | 45 | 45 | 46 | 45 | 45 | 45.20 | 45 |
| 25/75/3 | 51 | 52 | 52 | 51 | 51 | 51.40 | 51 |
| 0/100/3 | 52 | 52 | 52 | 52 | 52 | 52.00 | 52 |

| NR/SBR/CNTs | Hardness (Shore A) | | | | | Avg. | S.D. |
|-------------|--------------------|----|----|----|----|-------|------|
| | | | | | | | |
| 100/0/1 | 35 | 34 | 35 | 36 | 35 | 35.00 | 35 |
| 85/15/1 | 35 | 36 | 36 | 36 | 36 | 35.80 | 36 |
| 75/25/1 | 37 | 37 | 38 | 37 | 37 | 37.20 | 37 |
| 50/50/1 | 37 | 33 | 36 | 36 | 37 | 35.80 | 36 |
| 25/75/1 | 46 | 46 | 47 | 46 | 46 | 46.20 | 46 |
| 0/100/1 | 49 | 48 | 49 | 48 | 49 | 48.60 | 49 |

ตารางที่ ข.8 ความแข็ง

CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด

| NR/SBR/CNTs | Hardness (Shore A) | | | | | Avg. | S.D. |
|-------------|--------------------|----|----|----|----|-------|------|
| | | | | | | | |
| 100/0/1 | 37 | 38 | 39 | 41 | 42 | 39.40 | 2.07 |
| 75/25/1 | 42 | 44 | 43 | 43 | 44 | 43.20 | 0.84 |
| 50/50/1 | 49 | 48 | 47 | 49 | 48 | 48.20 | 0.84 |
| 25/75/1 | 51 | 52 | 51 | 50 | 51 | 51.00 | 0.71 |
| 0/100/1 | 52 | 53 | 53 | 53 | 52 | 52.60 | 0.55 |
| 100/0/3 | 38 | 39 | 40 | 39 | 37 | 38.60 | 1.14 |
| 75/25/3 | 42 | 44 | 43 | 43 | 44 | 43.20 | 0.84 |
| 50/50/3 | 49 | 48 | 47 | 49 | 48 | 48.20 | 0.84 |
| 25/75/3 | 51 | 52 | 51 | 50 | 51 | 51.00 | 0.71 |
| 0/100/3 | 52 | 53 | 53 | 53 | 52 | 52.60 | 0.55 |

ตารางที่ ข.9 ความแข็ง

CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน

| NR/SBR/CNTs | CNTs:silane | Sulppur(phr) | Hardness (Shore A) | | | | | Avg. | S.D. |
|-------------|-------------|--------------|--------------------|----|----|----|----|-------|------|
| 100/0/1 | 1:1 | 2 | 42 | 42 | 41 | 43 | 43 | 42.20 | 0.84 |
| 100/0/3 | 1:1 | 2 | 44 | 44 | 43 | 44 | 44 | 43.80 | 0.45 |
| 100/0/1 | 1:3 | 2 | 43 | 43 | 42 | 44 | 43 | 43.00 | 0.82 |
| 100/0/3 | 1:3 | 2 | 38 | 39 | 40 | 39 | 37 | 38.60 | 1.14 |
| 100/0/1 | 1:1 | 3 | 45 | 45 | 46 | 48 | 46 | 46.00 | 1.22 |
| 100/0/1 | 1:1 | 5 | 46 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45.20 | 0.45 |

ตารางที่ ข.10 ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง

CNTs ที่ไม่ปรับผิว

| NR/SBR/CNTs | Crosslink density (10^{-4})(mol/ cm ³) | | | Avg. | S.D. |
|-------------|--|------|------|------|------|
| | | | | | |
| 100/0/0 | 4.58 | 4.61 | 4.67 | 4.62 | 0.04 |
| 85/15/0 | 4.96 | 4.88 | 5.07 | 4.97 | 0.10 |
| 75/25/0 | 6.46 | 6.43 | 6.49 | 6.46 | 0.03 |
| 50/50/0 | 6.47 | 6.50 | 6.64 | 6.54 | 0.09 |
| 25/75/0 | 6.23 | 6.69 | 6.56 | 6.49 | 0.24 |
| 0/100/0 | 9.00 | 8.85 | 8.95 | 8.93 | 0.08 |
| 100/0/10 | 5.61 | 5.66 | 5.46 | 5.58 | 0.10 |
| 85/15/10 | 5.65 | 5.79 | 5.59 | 5.67 | 0.10 |
| 75/25/10 | 6.00 | 6.00 | 6.18 | 6.06 | 0.11 |
| 50/50/10 | 6.88 | 6.89 | 6.98 | 6.92 | 0.05 |
| 25/75/10 | 7.50 | 7.69 | 7.22 | 7.47 | 0.24 |
| 0/100/10 | 8.27 | 8.08 | 8.23 | 8.19 | 0.10 |
| 100/0/5 | 5.24 | 5.24 | 5.32 | 5.27 | 0.04 |
| 85/15/5 | 5.51 | 5.48 | 0.00 | 5.49 | 0.02 |
| 75/25/5 | 0.00 | 7.17 | 7.20 | 7.19 | 0.02 |
| 50/50/5 | 6.97 | 7.11 | 7.20 | 7.09 | 0.12 |
| 25/75/5 | 0.00 | 6.51 | 7.49 | 7.00 | 0.69 |
| 0/100/5 | 8.75 | 8.84 | 8.96 | 8.85 | 0.10 |
| 100/0/3 | 4.86 | 4.99 | 4.85 | 4.90 | 0.08 |
| 85/15/3 | 5.26 | 5.29 | 5.44 | 5.33 | 0.10 |
| 75/25/3 | 5.60 | 5.60 | 5.71 | 5.64 | 0.07 |
| 50/50/3 | 6.35 | 6.39 | 6.39 | 6.38 | 0.02 |
| 25/75/3 | 7.34 | 7.08 | 7.32 | 7.24 | 0.14 |
| 0/100/3 | 8.48 | 8.52 | 8.19 | 8.40 | 0.18 |

| NR/SBR/CNTs | Crosslink density (10^{-4})(mol/ cm ³) | | | Avg. | S.D. |
|-------------|--|------|------|------|------|
| | | | | | |
| 100/0/1 | 4.53 | 4.89 | 4.63 | 4.68 | 0.19 |
| 85/15/1 | 5.98 | 5.71 | 5.73 | 5.81 | 0.15 |
| 75/25/1 | 5.35 | 5.31 | 5.34 | 5.33 | 0.02 |
| 50/50/1 | 6.69 | 6.56 | 6.39 | 6.55 | 0.15 |
| 25/75/1 | 7.55 | 7.63 | 7.48 | 7.56 | 0.07 |
| 0/100/1 | 8.65 | 8.73 | 8.64 | 8.67 | 0.05 |

ตารางที่ ข.11 ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง

CNTs ที่ปรับผิวด้วยกรด

| NR/SBR/CNTs | Crosslink density (10^{-4})(mol/ cm ³) | | | Avg. | S.D. |
|-------------|--|------|------|------|------|
| | | | | | |
| 100/0/1 | 4.52 | 4.52 | 4.54 | 4.53 | 0.01 |
| 75/25/1 | 5.19 | 5.10 | 5.03 | 5.11 | 0.08 |
| 50/50/1 | 5.99 | 6.06 | 6.09 | 6.05 | 0.05 |
| 25/75/1 | 7.18 | 7.18 | 7.12 | 7.16 | 0.03 |
| 0/100/1 | 8.64 | 8.47 | 8.46 | 8.52 | 0.10 |
| 100/0/3 | 4.55 | 4.49 | 4.58 | 4.54 | 0.04 |
| 75/25/3 | 4.99 | 4.95 | 5.06 | 5.00 | 0.05 |
| 50/50/3 | 6.11 | 5.93 | 6.65 | 6.23 | 0.38 |
| 25/75/3 | 7.40 | 7.39 | 7.74 | 7.51 | 0.20 |
| 0/100/3 | 8.49 | 8.54 | 8.41 | 8.48 | 0.07 |

ตารางที่ ข.12 ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง

CNTs ที่ปรับผิวด้วยไซเลน

| NR/SBR/CNTs | CNTs:silane | Sulphur(phr) | Crosslink density (10^{-4})(mol/ cm ³) | | | Avg. | S.D. |
|-------------|-------------|--------------|--|------|------|------|------|
| 100/0/1 | 1:1 | 2 | 4.67 | 4.64 | 4.62 | 4.64 | 0.03 |
| 100/0/3 | 1:1 | 2 | 5.10 | 5.25 | 5.11 | 5.16 | 0.08 |
| 100/0/1 | 1:3 | 2 | 4.46 | 4.53 | 4.42 | 4.47 | 0.06 |
| 100/0/3 | 1:3 | 2 | 4.18 | 4.21 | 4.28 | 4.22 | 0.05 |
| 100/0/1 | 1:1 | 3 | 4.95 | 5.02 | 5.46 | 5.14 | 0.28 |
| 100/0/1 | 1:1 | 5 | 5.93 | 5.76 | 6.13 | 5.94 | 0.19 |

ภาคผนวก ค.
ผลการวิเคราะห์ ANOVA

การใช้ฟังก์ชัน MS-Excel วิเคราะห์ Single-Factor ANOVA

(http://www.statistics.ob.tc/single_a.htm)

เมื่อค่า P ที่คำนวณได้ (ในตารางจะเป็น P-value) น้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ศึกษาส่งผลให้ค่าการวิเคราะห์ที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

1. การวิเคราะห์ข้อมูล การบวมตัวในโทลูอินของยางคอมปอนด์ในสูตรยางที่ผสมยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ในอัตราส่วน 100/0, 75/25, 50/50, 25/75, 0/100 โดยปราศจากการเติมสารเสริมแรง

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าการบวมตัวในโทลูอินด้วย ANOVA ในสูตรยาง 100/0 และ 75/25

| Source of Variation | SS | df | MS | F | P-value | F crit |
|---------------------|----------|----|----------|----------|-----------------|----------|
| Between Groups | 1679.043 | 1 | 1679.043 | 2687.466 | 8.29E-07 | 7.708647 |
| Within Groups | 2.499072 | 4 | 0.624768 | | | |
| Total | 1681.542 | 5 | | | | |

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์ค่าการบวมตัวในโทลูอินด้วย ANOVA ในสูตรยาง 100/0 และ 50/50

| Source of Variation | SS | df | MS | F | P-value | F crit |
|---------------------|----------|----|----------|----------|-----------------|----------|
| Between Groups | 1679.043 | 1 | 1679.043 | 2687.466 | 8.29E-07 | 7.708647 |
| Within Groups | 2.499072 | 4 | 0.624768 | | | |
| Total | 1681.542 | 5 | | | | |

ตารางที่ ค.การวิเคราะห์ค่าการบวมตัวในโทลูอินด้วย ANOVA ในสูตรยาง 100/0 และ 25/75

| Source of Variation | SS | df | MS | F | P-value | F crit |
|---------------------|----------|----|----------|----------|-----------------|----------|
| Between Groups | 1785.859 | 1 | 1785.859 | 1381.017 | 3.13E-06 | 7.708647 |
| Within Groups | 5.172591 | 4 | 1.293148 | | | |
| Total | 1791.032 | 5 | | | | |

ตารางที่ ค.4 การวิเคราะห์ค่าการบวมตัวในโพลูอินด้วย ANOVA ในสูตรยาง 100/0 และ 0/100

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 1531.357 | 1 | 1531.357 | 1192.133 | 5.34E-05 | 10.12796 |
| Within Groups | 3.853654 | 3 | 1.284551 | | | |
| Total | 1535.21 | 4 | | | | |

2. การวิเคราะห์ข้อมูล ค่าความทนต่อแรงดึงของยางคอมเพานด์ในสูตรยางธรรมชาติโดยเติม CNTs ที่ไม่ปรับผิวเป็นสารเสริมแรง ในปริมาณ 0, 1, 3, 5, 10 phr

ตารางที่ ค.5 การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 0 phr และ 1 phr

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 0.988375 | 1 | 0.988375 | 0.036179 | 0.853368 | 5.117355 |
| Within Groups | 245.8731 | 9 | 27.31923 | | | |
| Total | 246.8615 | 10 | | | | |

ตารางที่ ค.6 การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 0 phr และ 3 phr

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 10.3968 | 1 | 10.3968 | 0.340307 | 0.577955 | 5.591448 |
| Within Groups | 213.8584 | 7 | 30.5512 | | | |
| Total | 224.2552 | 8 | | | | |

ตารางที่ ค.7 การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 0 phr และ 5 phr

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 20.29632 | 1 | 20.29632 | 0.681789 | 0.430314 | 5.117355 |
| Within Groups | 267.9229 | 9 | 29.76921 | | | |
| Total | 288.2192 | 10 | | | | |

ตารางที่ ค.8 การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 0 phr และ 10 phr

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|----------------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 45.04934 | 1 | 45.04934 | 1.724883 | 0.225481 | 5.317655 |
| Within Groups | 208.9387 | 8 | 26.11733 | | | |
| Total | 253.988 | 9 | | | | |

3. การวิเคราะห์ข้อมูล ค่าความทนต่อแรงดึงของยางคอมเพานด์ในสูตรยางธรรมชาติโดยเปรียบเทียบการเติม CNTs ที่ไม่ปรับผิวและด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 ในปริมาณ 1 phr

ตารางที่ ค.9 การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และไม่ปรับผิว

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 5.79121 | 1 | 5.79121 | 1.015532 | 0.343085 | 5.317655 |
| Within Groups | 45.62108 | 8 | 5.702635 | | | |
| Total | 51.41229 | 9 | | | | |

ตารางที่ ค.10 การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:3 และไม่ปรับผิว

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 3.94384 | 1 | 3.94384 | 0.585074 | 0.466293 | 5.317655 |
| Within Groups | 53.926 | 8 | 6.74075 | | | |
| Total | 57.86984 | 9 | | | | |

ตารางที่ ค.11 การวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงดึงด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 0.17689 | 1 | 0.17689 | 0.065453 | 0.804532 | 5.317655 |
| Within Groups | 21.62052 | 8 | 2.702565 | | | |
| Total | 21.79741 | 9 | | | | |

4. การวิเคราะห์ข้อมูล ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมพอนด์ในสูตรยางธรรมชาติโดยเปรียบเทียบการเติม CNTs ที่ไม่ปรับผิวและปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 ในปริมาณ 1 phr

ตารางที่ ค.12 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และไม่ปรับผิว

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 4.06138 | 1 | 4.06138 | 0.89696 | 0.38016 | 5.9873 |
| Within Groups | 27.16745 | 6 | 4.52790 | | | |
| Total | 31.22884 | 7 | | | | |

ตารางที่ ค.13 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:3 และไม่ปรับผิว

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 11.45293 | 1 | 11.45293 | 2.28329 | 0.17453 | 5.59145 |
| Within Groups | 35.11177 | 7 | 5.01597 | | | |
| Total | 46.56470 | 8 | | | | |

ตารางที่ ค.14 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางที่เติม CNTs 1 phr ซึ่งปรับผิวด้วยไซเลนในอัตราส่วน 1:1 และ 1:3

| Source of Variation | SS | df | MS | F | P-value | F crit |
|---------------------|----------|----|---------|---------|----------------|---------|
| Between Groups | 1.58739 | 1 | 1.58739 | 0.26992 | 0.61941 | 5.59145 |
| Within Groups | 41.16736 | 7 | 5.88105 | | | |
| Total | 42.75476 | 8 | | | | |

5. การวิเคราะห์ข้อมูล ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดของยางคอมปานด์ในสูตรยางเอสปีอาร์ที่เติม CNTs 1, 3, 5, 10 phr เปรียบเทียบกับการเติม carbon black 40 phr

ตารางที่ ค.15 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางเอสปีอาร์ที่เติม CNTs 1 phr เปรียบเทียบกับการเติม carbon black 40 phr

| Source of Variation | SS | df | MS | F | P-value | F crit |
|---------------------|----------|----|----------|----------|-----------------|----------|
| Between Groups | 17583.72 | 1 | 17583.72 | 63.77029 | 0.000206 | 5.987378 |
| Within Groups | 1654.412 | 6 | 275.7353 | | | |
| Total | 19238.14 | 7 | | | | |

ตารางที่ ค.16 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางเอสปีอาร์ที่เติม CNTs 3 phr เปรียบเทียบกับการเติม carbon black 40 phr

| Source of Variation | SS | df | MS | F | P-value | F crit |
|---------------------|----------|----|----------|----------|-----------------|----------|
| Between Groups | 16679.06 | 1 | 16679.06 | 50.39287 | 0.000102 | 5.317655 |
| Within Groups | 2647.844 | 8 | 330.9805 | | | |
| Total | 19326.9 | 9 | | | | |

ตารางที่ ค.17 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางเอสบีอาร์ที่เติม CNTs 5 phr เปรียบเทียบกับการเติม carbon black 40 phr

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 1819.801 | 1 | 1819.801 | 0.84562 | 0.384683 | 5.317655 |
| Within Groups | 17216.24 | 8 | 2152.031 | | | |
| Total | 19036.05 | 9 | | | | |

ตารางที่ ค.18 การวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ณ จุดขาดด้วย ANOVA ในสูตรยางเอสบีอาร์ที่เติม CNTs 10 phr เปรียบเทียบกับการเติม carbon black 40 phr

| <i>Source of Variation</i> | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P-value</i> | <i>F crit</i> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------------------|---------------|
| Between Groups | 6240.004 | 1 | 6240.004 | 20.68813 | 0.001878 | 5.317655 |
| Within Groups | 2412.98 | 8 | 301.6225 | | | |
| Total | 8652.984 | 9 | | | | |

ประวัติผู้เขียน

| | | |
|--|--------------------------|---------------------|
| ชื่อ สกุล | นางสาวพัชรี เพิ่มพูน | |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา | 5110120028 | |
| วุฒิการศึกษา | | |
| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2546 |

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

- ทุนก้นกุญระดับนักศึกษาปริญญาโท จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปีการศึกษา 2551
- ทุนสนับสนุนการทำวิจัยสำหรับงานวิจัยทางด้านนาโน จากศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านนาโนเทคโนโลยีของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2551 และ 2552
- กองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการทุนวิจัย ขนาดเล็กเรื่องยางพารา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ประจำปี 2551

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

- Lek Sikong, Phatcharee phoempoon, Orasa Patarapaiboolchai and Kalayanee Kooptanond. 2009. "Carbon Nanotubes - Rubber Blend (Natural Rubber - Styrene Butadiene Rubber) Composite" (Oral) Proceeding of 4th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals Environment and 2nd Asian Symposium on Materials and Processing, 1st -3rd June 2009, Bayview Beach Resort Batu Ferringhi, Penang, Malaysia.