



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

วัสดุผสมระหว่างยางคอมเพาเนนด์และท่อนาโนคาร์บอน  
Carbon Nanotubes – Rubber Blend Composite

โดย รศ.ดร. เล็ก สีกง และคณะ

เมษายน 2552

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

วัสดุผสมระหว่างยางคอมเพานด์และท่อนาโนคาร์บอน

Carbon Nanotubes – Rubber Blend Composite

### คณะผู้วิจัย

1. รศ.ดร. เล็ก สีคง
2. ผศ.ดร อรสา ภัทรไพบุญชัย
3. รศ. กัลยาณี คุปตานนท์
4. นางสาว พัชรี เพิ่มพูน

### สังกัด

คณะวิศวกรรมศาสตร์และ  
สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

โครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)



## บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ: (ภาษาไทย) วัสดุผสมระหว่างยางคอมปอนด์และท่อนาโนคาร์บอน

(ภาษาอังกฤษ) Carbon Nanotubes – Rubber Blend Composite

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่:

ชื่อ-นามสกุล: รศ.ดร.เล็ก สีคง

หน่วยงาน: ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ที่อยู่: ตู้ป.ณ. 2 คอหงส์ อ. หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทรศัพท์: 074-287065 โทรสาร: 074-212897 E-mail address: lek.s@psu.ac.th

ผู้ร่วมวิจัย/นักศึกษา: ผศ.ดร.อรสา ภัทรไพฑูรย์ชัย รศ.กัลยาณี กูเปตานนท์ และนางสาวพัชรี เพิ่มพูน

งบประมาณทั้งโครงการ : 143000 บาท

ระยะเวลาดำเนินการ: 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 15 กรกฎาคม 2551 ถึงวันที่ 14 เมษายน 2552

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ :

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของสารตัวเติมชนิดท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมลงไปในเรื่องยางคอมปอนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์(สไตรีนบิวตาไดอีน)ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล สมบัติเคมี สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัตของยางผสม ยางคอมปาวด์จะถูกเตรียมจากยางแผ่นรมควันชั้น 3 และยางเอสปีอาร์ (SBR 1502) โดยการเติมและไม่เติมท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการหลอม ตัวแปรที่ศึกษาคืออัตราส่วนผสมของยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ และปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนช่วง 1-10 phr

วัตถุประสงค์:

1. พัฒนayangคอมปอนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์
2. ศึกษาผลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ของยางคอมปอนด์ที่ผสมกันระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์

ผลการดำเนินงาน:

ทำการทดลองผสมยางธรรมชาติ(NR) และยางเอสปีอาร์(SBR) ที่สัดส่วนต่างๆ คือ NR/SBR= 100/0, 90/10, 85/15, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 ด้วยวิธีการหลอมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยเติมสารเคมียาง ดังนี้คือ ซิงค์ออกไซด์(3phr) กรดสเตียริก(1phr) ไคเบนโซโทอะซีลไดซัลไฟด์ (0.75phr) ไคฟีนิลกัวนิดีน (0.75phr) ไคเมทิลบิวทิลฟีนีลลีนไดเอมีน(1phr) และกำมะถัน(2phr) ศึกษาสมบัติการขึ้นรูปในเทอมของเวลาสกอร์ชและสมบัติการวัลคาไนซ์ นำยางคอมปอนด์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C แล้วนำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติการทนต่อน้ำมัน และโทลูอีน สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัตของยางคอมปอนด์ เตรียมยางผสมระหว่างยางคอมปอนด์และท่อนาโนคาร์บอน(MWNTs)โดยใช้สารเคมียางเหมือนกับการเตรียมยางคอมปอนด์แต่จะแปร



ค่า MWNTs 1~10 phr นำชิ้นงานมาทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติการทนต่อน้ำมันและโทลูอิน สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัตของยางผสม

จากการทดลองพบว่า ยางเอสปีอาร์มีผลต่อการเพิ่มระยะเวลาสกร๊ช เมื่อพิจารณาในเทอมของความแตกต่างของค่าทอร์คสูงสุดและต่ำสุด,  $\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$  พบว่า  $\Delta S$  ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ SBR ในยางคอมเปานด์ ยางเอสปีอาร์จะแสดงการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่สูงกว่ายางธรรมชาติในระหว่างที่ผสมด้วยการหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $160^{\circ}\text{C}$  สูตรที่เหมาะสมคือ NR/SBR=85~75/15~25 การเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่เหมาะสมจะเพิ่มค่าดัชนีอัตราคงรูป ความทนทานต่อแรงดึง ค่ามอดูลัส ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็งแรง การทนต่อความร้อน ค่าการเสียรูปหลังการกด ท่อนาโนคาร์บอนต่อน้ำมันและโทลูอินของยางผสม ซึ่งได้แก่ ยางคอมเปานด์ที่มียางเอสปีอาร์ 15 - 25 phr และปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 3 phr เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนมีโครงสร้างระดับนาโนและพื้นที่ผิวมาก ทนต่อแรงดึงสูงมาก อีกทั้งยังนำความร้อนดีทำให้สามารถเสริมแรงในยางและยางผสมได้ อย่างไรก็ตามการทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวในยางหรือยางคอมเปานด์ที่ดี จะทำให้ใช้ปริมาณท่อนาโนคาร์บอนน้อยลง ยิ่งไปกว่านั้นการเพิ่มปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นเช่น MWNTs 10 phr จะให้ค่ามอดูลัสสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีลักษณะเป็นเส้นใยมีโอกาสเกิดการเชื่อมขวางทางกายภาพได้ง่ายกว่าเขม่าดำ ตลอดจนการทนต่อน้ำมัน โทลูอิน และความร้อนสูง

#### สรุปผลการวิจัย:

1. ยางคอมเปานด์สูตร NR/SBR=85~75/15~25 ให้ค่าอัตราการวัลคาไนซ์สูง ขึ้นรูปได้ง่าย ตลอดจนให้สมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันสูงกว่ายางธรรมชาติ

2. ยางผสมระหว่างยางคอมเปานด์และท่อนาโนคาร์บอนสูตร NR/SBR=75/25 และ MWNTs ~3 phr จะให้สมบัติการขึ้นรูป สมบัติเชิงกล การทนต่อน้ำมัน โทลูอิน และความร้อนสูง เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุกันรั่วหรือปะเก็น

3. ยางผสม ระหว่างยางคอมเปานด์และท่อนาโนคาร์บอนสูตร NR/SBR=75/25 และ MWNTs 10 phr ซึ่งให้ค่ามอดูลัสสูงมาก ตลอดจนการทนต่อน้ำมัน โทลูอิน และความร้อนสูง เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงกดหรือแรงอัดสูง เช่น ยางรองแท่นเครื่องยนต์กันสั่นสะเทือน และยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น

#### ข้อเสนอแนะที่ค่าควรเพิ่มเติม:

เมื่อพิจารณาผลการทดลองซึ่งเป็นการศึกษาเบื้องต้น พบว่ายังมีประเด็นที่ต้องศึกษาให้ละเอียดขึ้น เพื่อจะได้นำยางที่สังเคราะห์ใช้ประโยชน์ได้จริงต่อไป เช่น ศึกษาหาวิธีที่ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวอย่างดีในเนื้อยางคอมเปานด์ เช่นการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม และพัฒนาสูตรที่เหมาะสมระหว่างยางคอมเปานด์และท่อนาโนคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบกับสารตัวเติมอื่นๆ เช่น เขม่าดำ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะประเมินความเป็นไปได้ในการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม



### บทคัดย่อ

โครงการวิจัย : RDG5150036

ชื่อโครงการวิจัย : วัสดุผสมระหว่างยางคอมเพานด์และท่อนาโนคาร์บอน

นักวิจัย : รศ.ดร.เล็ก สีคง

ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่) อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail Address : [lek.s@psu.ac.th](mailto:lek.s@psu.ac.th)

ระยะเวลาที่ทำการวิจัย : 15 กรกฎาคม 2551 – 14 เมษายน 2552

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของสารตัวเติมชนิดท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมลงไปในเรื่องยางคอมเพานด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์(สไตรีนบิวตาไดอีน) ต่อสมบัติการขึ้นรูปและวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล สมบัติเคมี สมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต ยางคอมเพานด์จะถูกเตรียมจากยางแผ่นรมควันชั้น 3 และยางเอสปีอาร์ (SBR 1502) โดยการเติมและไม่เติมท่อนาโนคาร์บอนด้วยวิธีการหลอม ตัวแปรที่ศึกษาคืออัตราส่วนผสมของยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์และปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนช่วง 1-10 phr จากการทดลองพบว่า ยางเอสปีอาร์มีผลต่อการเพิ่มระยะเวลาสกอรัช และการผสมยางเอสปีอาร์และท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่เหมาะสมจะเพิ่มค่าดัชนีอัตราคงรูปได้ ความทนทานต่อแรงดึง ค่ามอดูลัส ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง การทนต่อความร้อน ค่าการเสียรูปหลังการกด การทนต่อน้ำมันและโทลูอีนของยางผสมซึ่งได้แก่ ยางคอมเพานด์ที่มียางเอสปีอาร์ 15 - 25 phr และปริมาณท่อนาโนคาร์บอน 3 phr สูตรนี้เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุกันรั่วหรือปะเก็น

ยิ่งไปกว่านั้นการเพิ่มปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นเช่น MWNTs 10 phr จะให้ค่ามอดูลัสสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ตลอดจนการทนต่อน้ำมัน โทลูอีน และความร้อนสูง สูตรนี้เหมาะที่จะพัฒนาเป็นยางผสมที่ทนต่อแรงอัดสูง เช่น ยางรองแท่นเครื่องยนต์กันสั่นสะเทือน และยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาสมบัติการใช้งานเฉพาะด้านในรายละเอียดต่อไป

คำสำคัญ : ท่อนาโนคาร์บอน, ยางเอสปีอาร์, ยางธรรมชาติ, ยางคอมเพานด์, ยางสไตรีนบิวตาไดอีน

### Abstract

**Project code** : RDG5150036

**Title** : Carbon Nanotubes – Rubber Blend Composite

**Investigator** : Assoc. Prof. Dr. Lek Sikong, et al (Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai Campus, Songkhla 90112)

**E-mail Address** : [lek.s@psu.ac.th](mailto:lek.s@psu.ac.th)

**Project Period**: July 14, 2008 – April 14, 2009

This study focused on the investigation of the effect of carbon nanotubes (MWNTs) 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 smoked natural rubber sheet #3 and styrene butadiene, SBR 1502 by melt mixing method in an absence and presence of multi-walled carbon nanotubes. The main variables were the ratios of NR/SBR and a dosage of MWNTs in the range of 1-10 phr. It was found from experimentally investigation that SBR exhibits a long scorch time and suitable amounts of SBR and carbon nanotubes as 15~25 phr and 3 phr in the rubber composite respectively, enhance their cure rate index (CRI), tensile strength, modulus, tear strength, hardness, compression set, thermal resistance, oil and toluene resistance. This formula is suitable for making sealant materials or gaskets. Furthermore, the increasing MWNTs in rubber composite such as 10 phr can significantly enhance not only modulus but oil, toluene and thermal resistances as well. This formula is suitable for developing high compressive resistance rubber composite using for anti-vibration of automobile engine or aeroplane tires. However, it should be further studied on each particular applicable property in detail.

**Key words**: carbon nanotubes, SBR, natural rubber, rubber blend, styrene butadiene rubber

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการวิจัยขนาดเล็ก เรื่องยางพารา(*Small Projects on Rubber; SPR*) ที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้ สัญญาเลขที่ RDG5150036 และขอขอบคุณศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยีผลิตภัณฑ์ยางพารา และโปรแกรมวิทยาพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือขึ้นรูปยางและเครื่องมือทดสอบสมบัติบางประการของยางผสม

รศ.ดร.เล็ก สีกงและคณะ

30 เมษายน 2552



## สารบัญ

|                                                                | หน้า |
|----------------------------------------------------------------|------|
| บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร                                    | (1)  |
| บทคัดย่อ                                                       | (3)  |
| Abstract                                                       | (4)  |
| กิตติกรรมประกาศ                                                | (5)  |
| สารบัญ                                                         | (6)  |
| สารบัญตาราง                                                    | (7)  |
| สารบัญรูป                                                      | (7)  |
| เนื้อหา                                                        | 1    |
| 1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย                            | 1    |
| 2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย                                      | 2    |
| 3 ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง                 | 2    |
| 4 วิธีการ                                                      | 4    |
| 4.1 วัสดุและสารเคมี                                            | 4    |
| 4.2 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย                                     | 4    |
| 5 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล                                       | 7    |
| 5.1 สมบัติการขึ้นรูปยางคอมปอนด์                                | 7    |
| 5.2 สมบัติเชิงกลของยางคอมปอนด์                                 | 8    |
| 5.3 สมบัติทางเคมีของยางคอมปอนด์                                | 12   |
| 5.4 สมบัติทางความร้อนของยางคอมปอนด์                            | 13   |
| 5.5 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต                   | 16   |
| 5.6 ผลของท่อนาโนคาร์บอนต่อผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ FT-IR | 19   |
| 5.7 อภิปรายผล                                                  | 21   |
| 6 สรุปผล                                                       | 22   |
| 7 ข้อเสนอแนะ                                                   | 22   |
| บรรณานุกรม                                                     | 23   |
| ภาคผนวก                                                        | 25   |



### สารบัญตาราง

| ตารางที่ |                                                                                      | หน้า |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.1      | สารเคมียางและหน้าที่                                                                 | 4    |
| 4.2      | สูตรที่ใช้ MWNTs เป็นสารตัวเติมโดยใส่ MWNTs ในปริมาณ 1-10 phr                        | 5    |
| 4.3      | ขั้นตอนการผสมและลำดับการใส่สารเคมี ในการผสมยางคอมปอนด์                               | 5    |
| 5.1      | ผลต่างของค่าทอร์คสูงสุดและต่ำสุด ที่ได้จากเครื่องทดสอบ MDR 2000                      | 7    |
| 5.2      | ผลของการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางคอมปอนด์ด้วยเครื่อง TGA                      | 14   |
| 5.3      | อุณหภูมิ $T_g$ ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ค่าสูงสุดของค่า $\tan \delta$ ด้วยเครื่อง DMTA | 19   |

### สารบัญรูป

| รูปที่ |                                                                                                        | หน้า |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 4.1    | ภาพ TEM ของท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWNTs                                                                    | 4    |
| 5.1    | ลักษณะการวัดคาบในซ์ของยางคอมปอนด์ที่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ                                           | 8    |
| 5.2    | สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ                          | 9    |
| 5.3    | ค่ามอดูลัสของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ                                          | 9    |
| 5.4    | ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดจนขาดของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ                           | 10   |
| 5.5    | ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ                             | 10   |
| 5.6    | ค่าความแข็งของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ                                         | 11   |
| 5.7    | การเสียรูปหลังการกดของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ                                 | 12   |
| 5.8    | เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ (a) ในน้ำมัน และ (b) ในโทลูอีน | 12   |
| 5.9    | ความหนาแน่นการเชื่อมขวางของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ                            | 13   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่                                                                                                             | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 5.10 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางธรรมชาติที่ไม่มีสารเติม                                                   | 15   |
| 5.11 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางคอมปอนด์ที่เติม MWNTs ที่ปริมาณต่างๆ                                      | 15   |
| 5.12 $E'$ (a) และ $\tan \delta$ (b) ของยางคอมปอนด์ที่ไม่มีสารตัวเติม                                               | 16   |
| 5.13 $E'$ (a) และ $\tan \delta$ (b) ด้วยเครื่อง DMTA ของยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม MWNTs                         | 17   |
| 5.14 $E'$ (a) และ $\tan \delta$ (b) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA ของยางคอมปอนด์ NR/SBR= 75/25 ที่เติมและไม่เติม MWNTs | 18   |
| 5.15 $E'$ (a) และ $\tan \delta$ (b) ด้วยเครื่อง DMTA ของยางคอมปอนด์ NR/SBR= 50/50 ที่เติมและไม่เติม MWNTs          | 18   |
| 5.16 $E'$ (a) และ $\tan \delta$ (b) ด้วยเครื่อง DMTA ของยางคอมปอนด์ NR/SBR= 25/75 ที่เติมและไม่เติม MWNTs          | 18   |
| 5.17 $E'$ (a) และ $\tan \delta$ (b) ด้วยเครื่อง DMTA ของยางเอสบีอาร์ที่เติมและไม่เติม MWNTs                        | 19   |
| 5.18 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของยางคอมปอนด์ที่เติม MWNTs                                              | 20   |
| 5.19 ผลวิเคราะห์ FT-IR ของยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม MWNTs                                                       | 21   |
| 5.20 ผลวิเคราะห์ FT-IR ของยางคอมปอนด์ NR/SBR= 75/25 ที่เติมและไม่เติม MWNTs                                        | 21   |
| 5.21 ผลวิเคราะห์ FT-IR ของยางเอสบีอาร์ที่เติมและไม่เติม MWNTs                                                      | 21   |



## 1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย

ยางธรรมชาติจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีการนำยางธรรมชาติไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย สมบัติที่เด่นของยางธรรมชาติได้แก่ ยางธรรมชาติมีสมบัติดีเยี่ยมในด้านการทนต่อแรงดึง (tensile strength) แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรงและความยืดหยุ่นสูงมาก มีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีความร้อนภายใน (heat build-up) ที่เกิดขึ้นขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกัน (tack) ที่ดี มีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) สูง ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน โอโซน และความร้อน

ในขณะที่ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (styrene-butadiene rubber) หรือยางเอสบีอาร์ เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในงานทั่วไป ราคาไม่แพง มีหลายเกรดขึ้นกับกระบวนการสังเคราะห์และมีข้อดีกว่ายางธรรมชาติคือ มีคุณภาพสม่ำเสมอกว่า มีสิ่งเจือปนน้อยกว่า ไม่ต้องบดยางให้มันก่อนทำการผสมเคมียางเนื่องจากยางชนิดนี้ถูกสังเคราะห์มาให้มีน้ำหนักโมเลกุลที่ไม่สูงมากนัก จึงมีความหนืดที่เหมาะสมทำให้สารเคมีกระจายตัวได้ดี ไหลได้ง่ายในระหว่างการขึ้นรูป มีแนวโน้มที่จะเกิดยางตายในระหว่างกระบวนการผลิตน้อยกว่า มีอัตราเร็วในการคงรูปช้ากว่าและถูกออกซิไดซ์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติ ทำให้สามารถผสมยางในเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูงกว่าได้ แต่ยางเอสบีอาร์ก็ยังมีค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้เมื่อถูกยืด เวลาใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) เข้าช่วย เช่น เหม่ดำจะทำให้ยางมีความทนทานต่อการขัดสี ยางเอสบีอาร์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น การผลิตสายพาน พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ และส่วนมากจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตยางล้อยานพาหนะขนาดเล็กโดยใช้ผสมกับยางชนิดอื่นๆ เช่น ยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดอีน เป็นต้น

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลข้างต้นพบว่าทั้งในยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ต่างมีจุดเด่นและด้อยแตกต่างกัน ถ้านำยางทั้งสองชนิดมาผสมกันในสัดส่วนที่เหมาะสม แล้วเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงบางชนิด เช่น เหม่ดำ นาโนเคลย์ หรือซิลิกา ซึ่งทำให้วัสดุผสมที่ได้ผสมที่ได้ มีสมรรถนะสูงขึ้นกว่าเดิม อย่างไรก็ตามการเติมตัวเติมดังกล่าวมาแล้วในยาง ต้องใช้ในปริมาณที่มากเช่น การเติมเหม่ดำอาจต้องใช้ปริมาณ 70-80 phr หรือมากกว่า เมื่อไม่นานมานี้ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube, CNTs) ถูกประยุกต์ใช้สำหรับการเสริมแรงในพอลิเมอร์หลายชนิด เนื่องจากมีสมบัติเฉพาะตัวที่ดี ได้แก่ ด้านแรงดึง นำไฟฟ้า หรือความร้อนได้สูงมาก นอกจากนั้นยังใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในปริมาณที่น้อยกว่าตัวเติมแบบเก่าเพราะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากทำให้สามารถลดเวลาในการผลิตได้ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ท่อนาโนคาร์บอนเสริมแรงในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสบีอาร์โดยได้ศึกษาผลของตัวเติมชนิดนี้ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ของยางคอมพอนด์ เพื่อใช้งานด้านต่างๆ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติ ซึ่งยังไม่มีการวิจัยในเรื่องนี้อย่างชัดเจนและเจาะจง



## 2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. พัฒนayangคอมเปาน์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์
2. ศึกษาผลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ ของยางคอมเปาน์ที่ผสมกันระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์

## 3 ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) คือ วัสดุที่มีรูปทรงเป็นท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร ซึ่งของท่อนาโนคาร์บอนมาจากขนาดของมัน ซึ่งมีขนาดระดับนาโน ( $10^{-9}$  เมตร) หรือมีความกว้างประมาณ 1 ใน 10,000 ของความกว้างของเส้นผมมนุษย์ มีความยาวประมาณ 1 ล้านเท่าของความกว้างของมัน ท่อนาโนคาร์บอนมีด้วยกัน 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 คือ ชนิดที่มีผนังซ้อนกัน 2 – 50 ชั้น เรียกว่า multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) และชนิดที่มีผนังชั้นเดียวหรือเป็นท่อเดี่ยว เรียกว่า single-walled carbon nanotubes (SWNTs) ท่อนาโนคาร์บอนมีความแข็งแรงกว่าเพชร มีค่ามอดูลัสสูงถึง 1 TPa ความแข็งแรง 11~63 GPa สามารถยืดตัวได้ 10~13% ก่อนขาด SWNTs อาจมีพื้นที่ผิว  $1500 \text{ m}^2/\text{g}$  มีความหนาแน่น  $1.33\sim 1.40 \text{ g/cm}^3$  นำไฟฟ้าได้ดีกว่าทองแดงและนำความร้อนมากกว่า  $3000 \text{ W/m.K}$  ในสูญญากาศทนความร้อน  $2800^\circ\text{C}$  และในอากาศทนได้  $750^\circ\text{C}$  (<http://www.Digital Library.htm> “Carbon nanotube”; <http://www.nsruc.ac.th/science/article/showarticle.asp?id=0000000012> “Carbon nanotube”)

จากสมบัติที่ดีเยี่ยมในหลายด้านของท่อนาโนคาร์บอนทั้งสองชนิด (SWNTs และ MWNTs) จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย เช่น การเสริมแรงในวัสดุผสมเพื่อใช้เป็นถังบรรจุไฮโดรเจน Field emission sources ชูเปอร์แคปาซิเตอร์ และเครื่องรับรู้ระดับโมเลกุล มีงานวิจัยจำนวนมากที่นำท่อนาโนคาร์บอนมาเป็นตัวเสริมแรงในวัสดุ 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-ท่อนาโนคาร์บอน (Moniruzzaman et al, 2006) นั้นมีวิธีการเตรียมมีหลายวิธีแต่วิธีที่นิยมมี 3 วิธี ก็คือ การทำเป็นสารละลาย (solution) การหลอม (melt) และ In situ polymerization

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุผสมระหว่างยาง-ท่อนาโนคาร์บอน จากการสืบค้นนั้นพบว่ามีงานวิจัยไม่มากนักที่จะนำเสนอเกี่ยวกับเรื่องนี้ ดังนั้นจึงเป็นงานวิจัยที่ยังใหม่อยู่ ตัวอย่างงานของวิจัยด้านนี้ได้แก่ Yue และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเตรียมและสมบัติของยางไนไตรล์(HNBR)ที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นตัวเสริมแรง ซึ่งได้ข้อสรุปว่ากระบวนการหลอมเหมาะสมสำหรับการผสมท่อนาโนคาร์บอนในยาง ซึ่งจะทำให้ยางผสมมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่ Falco และคณะ (2007) ได้สรุปว่าการใช้ท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นเป็นตัวเสริมแรงในยางเอสปีอาร์นั้นควรใช้กระบวนการทำเป็นสารละลายในการเตรียมวัสดุผสม โดยเริ่มต้นนำยาง SBR มาละลายในโทลูอิน แล้วนำมาผสมกับท่อนาโนคาร์บอนและสารเคมีสำหรับยาง (ท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้นั้น 15 มิลลิกรัม และผ่านการทำให้เกิดการกระจายตัวในเอทานอล และอบแห้งมาแล้ว) ซึ่งพบว่าสามารถปรับปรุงค่า



มอดูลัส และค่าทนทานต่อแรงดึงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ผสมท่อนาโนคาร์บอน และยางที่ผสมกับเขม่าดำ (carbon black) เพราะท่อนาโนคาร์บอนมีขนาดเล็กจึงเกิดการกระจายตัวที่ดี และเข้ากันได้ดีในเนื้อยาง

นอกจากกระบวนการผสมจะมีผลต่อสมบัติของยางผสมแล้ว การปรับปรุงผิวท่อนาโนคาร์บอนด้วยไซเลน (silane) ก่อนการผสมด้วยกระบวนการหลอมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง จะเพิ่มสมบัติต่างๆ ได้ (Shanmugharaj et al, 2007)

จะเห็นว่าการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติโดยการเติมสารตัวเติมลงไปในยางคอมพอนด์ ที่ใช้สารตัวเติมระดับนาโน เช่นท่อนาโนคาร์บอนนั้นไม่ว่าจะเป็นชนิด SWNTs หรือชนิด MWNTs เมื่อนำมาผสมในยาง ด้วยกระบวนการแบบนำมอละลายในสารละลายละลายโทลูอิน หรือกระบวนการหลอมก็ตาม ส่งผลให้สมบัติของวัสดุเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ ผลก็คือ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น 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 ในยางธรรมชาติมีผลต่อสมบัติเชิงกลของยางคอมพอนด์โดย ปริมาณการเติม CNTs ที่ช่วยเสริมแรงในยางได้ดี อยู่ในช่วง 1-10 wt% เมื่อเพิ่มปริมาณ CNTs มากเกินไปจะส่งผลทำให้ยางมีความเปราะ

จากตัวอย่างงานวิจัยเกี่ยวข้องทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าเมื่อผสมท่อนาโนคาร์บอนชนิดผนังหลายชั้นลงไปในพอลิเมอร์หรือยางสามารถเพิ่มสมบัติของวัสดุผสมได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การทำปฏิกิริยาที่ระหว่างท่อนาโนคาร์บอนกับพอลิเมอร์และการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอน

การเสริมแรงยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ที่อัตราส่วนต่างๆด้วยสารตัวเติมระดับนาโน ได้มีผู้ศึกษาไว้บ้าง (Findik et al, 2004) ได้แก่ การใช้เขม่าดำ ชนิด ISAF และ HAF เป็นสารตัวเติม จากผลการวิจัยพบว่า ยาง NR/SBR ที่เติม ISAF จะให้ค่าความแข็งแรงมากกว่าการเติม HAF การเพิ่มอัตราส่วนของยาง SBR ส่งผลให้ค่ามอดูลัส และการต้านต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

อย่างไรก็ตามการวิจัยที่เสริมแรงยางคอมพอนด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ด้วย MWNTs ยังไม่มีผู้ศึกษามาก่อน ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจผลของสารเติมชนิดนี้ต่อกระบวนการขึ้นรูปยางคอมพอนด์ สมบัติเชิงกลและสมบัติอื่นๆ จึงได้ดำเนินการศึกษาในครั้งนี้

## 4.วิธีการวิจัย

### 4.1 วัสดุและสารเคมี

#### 4.1.1 ยาง

ยางแผ่นรมควันชั้น 3 และ ยางเอสบีอาร์ (SBR1502)

#### 4.1.2 สารตัวเติม

ใช้ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotubes) ชนิด multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 8-15 nm และมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3-5 nm มีความยาว  $\sim 50 \mu\text{m}$  (รูปที่ 4.1) มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่า  $233 \text{ m}^2/\text{g}$  ความหนาแน่นก้อน (bulk density)  $0.15 \text{ g/cm}^3$  และความหนาแน่นจริง (true density)  $\sim 2.1 \text{ g/cm}^3$  มีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า  $100 \text{ A/cm}^2$



รูปที่ 4.1 ภาพ TEM ของท่อนาโนคาร์บอนชนิด MWNTs

#### 4.1.3 สารเคมียาง

สารเคมียางที่ใช้มีหน้าที่ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สารเคมียางและหน้าที่ (พงษ์ธร, 2550)

| สารเคมี                                                     | หน้าที่                                                                   |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1. ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO)                           | เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาคงรูป               |
| 2. กรดสเตียริก (stearic acid, SA)                           | เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาคงรูป ใช้คู่กับ ZnO |
| 3. ไดเบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (dibenzothiazyl disulfide, MBTS) | เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วปานกลาง                                     |
| 4. ไดฟีนิลกวานิดีน (diphenyl guanidine, DPG)                | เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิที่นิยมใช้ร่วมกับสารตัวเร่งในกลุ่มไทโอโซล |
| 5. ไคเมทิลบิวทิลฟีนิลสีนไคเอมีน (6PPD)                      | เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพ                                               |
| 6. กำมะถัน (sulfur, S)                                      | เป็นสารทำให้ยางคงรูป                                                      |

### 4.2 ขั้นตอนและวิธีการวิจัย

การศึกษาผลจากการเติม (MWNTs) เสริมแรงในยางคอมปอนด์ระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางเอสบีอาร์ (SBR) โดยศึกษาดังต่อไปนี้

#### 4.2.1 การศึกษาผลของปริมาณอัตราส่วนระหว่าง NR: SBR ต่อสมบัติต่างๆของยางคอมปอนด์



ในกระบวนการผสมยางคอมปอนด์ ใช้สูตรพื้นฐานตามตารางที่ 4.2 และผสมยางคอมปอนด์โดยใส่สารเคมีตามลำดับดังตารางที่ 4.3 มีขั้นตอนและวิธีการ ดังนี้

1) เตรียมสารเคมีเพื่อใช้ในสูตรยาง คอมปอนด์

ตารางที่ 4.2 สูตรที่ใช้ MWNTs เป็นสารตัวเติมโดยใส่ MWNTs ในปริมาณ 1-10 phr

| สารเคมี      | ปริมาณยางธรรมชาติ (NR) : ยางสไตรีนบิวตาไดอิน (SBR) (phr) |             |             |             |             |             |
|--------------|----------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|              | 100/0                                                    | 85/15       | 75/25       | 50/50       | 25/75       | 0/100       |
| NR           | 100                                                      | 85          | 75          | 50          | 25          | 0           |
| SBR          | 0                                                        | 15          | 25          | 50          | 75          | 100         |
| ZnO          | 3.00                                                     | 3.00        | 3.00        | 3.00        | 3.00        | 3.00        |
| Stearic acid | 1.00                                                     | 1.00        | 1.00        | 1.00        | 1.00        | 1.00        |
| MBTS         | 0.75                                                     | 0.75        | 0.75        | 0.75        | 0.75        | 0.75        |
| DPG          | 0.75                                                     | 0.75        | 0.75        | 0.75        | 0.75        | 0.75        |
| 6PPD         | 1.00                                                     | 1.00        | 1.00        | 1.00        | 1.00        | 1.00        |
| MWNTs        | 1, 3, 5, 10                                              | 1, 3, 5, 10 | 1, 3, 5, 10 | 1, 3, 5, 10 | 1, 3, 5, 10 | 1, 3, 5, 10 |
| Suphur       | 2                                                        | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           |

2) ผสมยางกับสารเคมี โดยเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง ตามมาตรฐาน ASTM D 3184 – 80

ตารางที่ 4.3 ขั้นตอนการผสมและลำดับการใส่สารเคมี ในการผสมยางคอมปอนด์

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

3) หาเวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time) ของยางคอมปอนด์ด้วย MDR 2000 ที่ 160°C

4) อัดยางให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดยาง ตามเวลาในการวัลคาไนซ์ที่หาได้จาก MDR 2000 ตามมาตรฐาน ASTM D 5289-95

5) หาอัตราส่วนของยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ที่ดีที่สุด โดยทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2-5

6) ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ cure time และ scorch time, ความทนต่อแรงดึง (tensile

strength)(ASTM D412-68), ความสามารถในการยืดของยางจนขาด (%Elongation at break), โมดูลัส (300% Modulus)(ISO 37), การต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength)(ISO 34), ความแข็ง (hardness)(ASTM D2240), การเสียรูปหลังการกด (compression set)(ASTM D471, Method B), การบวมตัว(%Swelling)ในน้ำมันและโทลูอีน

7) วิเคราะห์สมบัติต่างๆด้วย SEM (scanning electron microscope), FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy), TGA (thermogravimetric analysis) และ DMTA (dynamic mechanical thermal analysis)

#### 4.2.2 การศึกษาผลของปริมาณ MWNTs ต่อสมบัติต่างๆของยางคอมปอนด์

ทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2-7 ในหัวข้อ 4.2.1 โดยแปรปริมาณของ MWNTs เป็น 1, 3, 5 และ 10 phr และใช้สารเคมีตามตารางที่ 4.1

#### 4.2.3 วิธีทดสอบและวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของยางคอมปอนด์

##### 1) การศึกษาร้อยละการบวมตัว (% Swelling)

เป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของชิ้นงานหลังจากนำไปแช่ในสารละลาย ซึ่งการบวมตัวจะเกิดกับเนื้อยางอย่างเดียว (Rakchonlatee et al., 2004) โดยนำชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร หน้า 6 มิลลิเมตร จำนวน 6 ชิ้นต่อ 1 สูตรการทดลองมาชั่งน้ำหนักและแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (ส่วนละ 3 ชิ้น) โดยส่วนแรกนำไปแช่ในน้ำมันเกรด SAE 15W-40 ที่อุณหภูมิห้องปริมาตรที่ใช้ 30 มิลลิลิตร เป็นเวลา 7 วัน และส่วนที่สองนำไปแช่ในโทลูอีนที่อุณหภูมิห้อง ปริมาตรที่ใช้ 30 มิลลิลิตร เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นเมื่อครบกำหนดก็นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก และคำนวณร้อยละการบวมตัวดังสมการที่ 4.1

$$\% \text{ Swelling} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ  $m_0$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่ (กรัม) และ  $m_1$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่ (กรัม)

การนำชิ้นงานไปแช่ในโทลูอีนนอกจากจะสามารถคำนวณร้อยละการบวมตัวได้แล้ว ยังสามารถคำนวณความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (Crosslink density) ได้ด้วยตามสมการของ Flory-Rhener (Arroyo et al., 2006; Kumnuantip et al., 2003) ซึ่งสมการการคำนวณแสดงในสมการที่ 4.2 และ 4.2

$$-\left[\ln(1 - \phi_r) + \phi_r + \chi \phi_r^2\right] = v_0 n \left[ \phi_r^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{\phi_r}{2}\right) \right] \quad (4.2)$$

เมื่อ  $\phi_r$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของยางในมวลที่บวมตัว,  $v_0$  คือ มวลโดยปริมาตรของตัวทำละลาย (106.2 cm<sup>3</sup>/mol),  $\chi$  คือ ค่าคงที่ Flory-Huggins ของยางในตัวทำละลาย (0.393) และ  $n$  คือ ความหนาแน่นการเชื่อมขวาง (mol/cm<sup>3</sup>)

$$\frac{1}{\phi_r} = 1 + \frac{w_s^* \rho_r}{w_i^* \rho_s} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $w_r$  คือ น้ำหนักชิ้นงานหลังแช่ (กรัม),  $w_i$  คือ น้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่ (กรัม),  $\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของโทลูอีน (0.87 g/cm<sup>3</sup>) และ  $\rho_r$  คือ ความหนาแน่นของยาง (g/cm<sup>3</sup>)



## 5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับผลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนในยางคอมปอนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์นั้น ต่อสมบัตการขึ้นรูปหรือสมบัติวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต ซึ่งจะได้กล่าวเป็นลำดับดังต่อไปนี้

### 5.1 สมบัตการขึ้นรูปของยางคอมปอนด์

ค่าที่ 0 phr คือ ค่าของยางคอมปอนด์สูตรต่างๆที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน ในการทดลองนี้ได้เติมปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนเป็น 1, 3, 5, และ 10 phr จากรูปที่ 5.1 (a) เวลาในการวัลคาไนซ์ของยางคอมปอนด์ที่ยังไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน จะสูงขึ้นตามปริมาณของยาง SBR ที่เพิ่มขึ้นโดยสูตรยางที่มีปริมาณของยางเอสปีอาร์ 100 phr จะใช้เวลาในการวัลคาไนซ์นานที่สุด การเติมยาง SBR ในปริมาณที่ไม่เกิน 25 phr จะใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ ไม่เกิน 2 นาที ซึ่งใช้น้อยกว่ายางในสูตรอื่นๆ สำหรับรูปที่ 5.1 (b) พบว่าเมื่อปริมาณของยางเอสปีอาร์ในยางเพิ่มขึ้นส่งผลให้ยางมีเวลาการสกอรัซเพิ่มขึ้น การใช้ยางเอสปีอาร์ในปริมาณ 50 – 100 phr เวลาในการสกอรัซจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งใช้เวลายาวนานกว่า การใช้ยางเอสปีอาร์ในปริมาณ 0-75 phr จากรูปที่ 5.1 (c) พบว่าดัชนีอัตราคงรูป (CRI) ของยางจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของยางเอสปีอาร์และลดปริมาณของยางธรรมชาติ และดูเหมือนว่าอัตราการวัลคาไนซ์ของยางสูตร NR/SBR = 85/5 และ 75/25 จะมีค่าสูงสุด

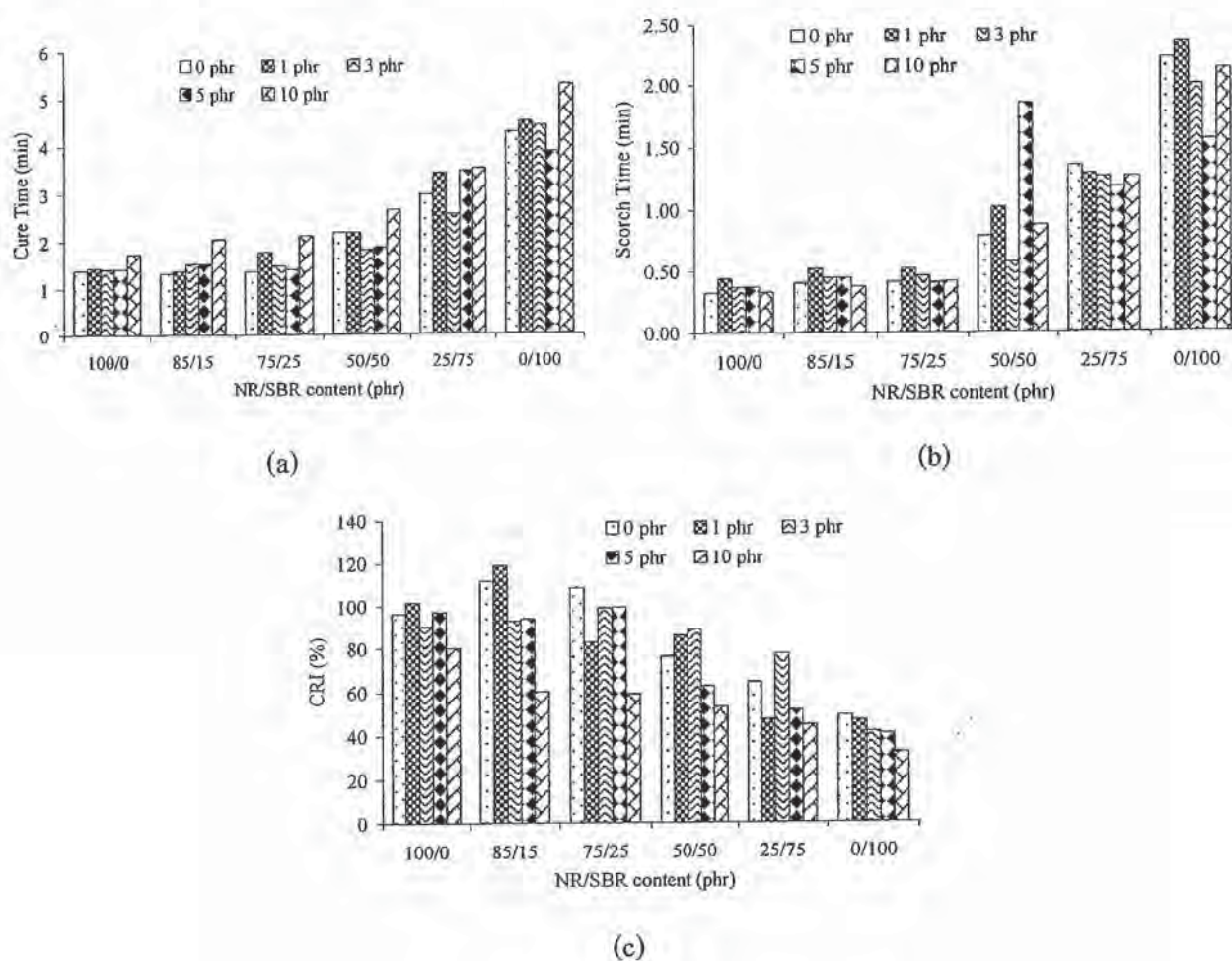
สมบัติในการวัลคาไนซ์ อาจพิจารณาในเทอมของความแตกต่างของค่าทอร์คสูงสุดและต่ำสุด,  $\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$  จากตารางที่ 5.1 พบว่า  $\Delta S$  ลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณ SBR ในยางคอมปอนด์ ยางเอสปีอาร์จะแสดงการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่สูงกว่ายางธรรมชาติในระหว่างที่ผสมด้วยการหลอมเหลว ที่อุณหภูมิ 160°C อย่างไรก็ตามค่า  $\Delta S$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน เนื่องจากสารตัวเติมที่อาจจับตัวเป็นก้อนและมีผลต่อการด้านการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ ในกระบวนการเตรียมยางด้วยกระบวนการหลอมหรือผสมยางด้วยเครื่องสองลูกกลิ้งดูเหมือนว่า MWNTs จะจับตัวเป็นก้อนในเนื้อยางโดยเฉพาะอย่างยิ่งเกิดขึ้นในเนื้อยางธรรมชาติ ระยะเวลาสกอรัซซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิตแสดงถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้นๆ และเวลาวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางเอสปีอาร์ในยางคอมปอนด์เพิ่มขึ้น สำหรับยางผสมที่มีสารตัวเติม MWNTs จะเห็นว่า MWNTs (ปริมาณ 1~10 phr) มีผลต่อเวลาสกอรัซและเวลาวัลคาไนซ์เล็กน้อย

ตารางที่ 5.1 ผลต่างของค่าทอร์คสูงสุดและต่ำสุด ที่ได้จากเครื่องทดสอบ MDR 2000

|       | $\Delta S$ |       |       |       |       |       |
|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MWNTs | 100/0      | 85/15 | 75/25 | 50/50 | 25/75 | 0/100 |
| 0phr  | 4.76       | 3.92  | 4.23  | 4.11  | 3.17  | 3.09  |
| 1phr  | 8.55       | 8.54  | 3.91  | 7.67  | -     | -     |
| 3phr  | 5.02       | 8.54  | 7.96  | 7.67  | -     | -     |
| 5phr  | 5.63       | 5.48  | 5.09  | 9.27  | 6.98  | 7.07  |
| 10phr | 8.55       | 8.54  | 7.96  | 7.67  | 7.65  | 7.06  |



จากรูปที่ 5.1 จะสังเกตว่า ภาพ (a) พบว่าเวลาในการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมของ MWNTs จากรูปที่ 5.1 (b) การเติม MWNTs ในปริมาณที่แตกต่างกัน ยางจะมีเวลาการสก๊อชใกล้เคียงกัน โดยเปรียบเทียบในยางที่มีอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR เดียวกันจะสังเกตว่าการเติม MWNTs ในยางที่มีปริมาณของ NR 0-25 phr ให้เวลาในการสก๊อชประมาณ 1-2 นาที จากรูปที่ 5.1 (c) พบว่าดัชนีอัตราคงรูป (CRI) ซึ่งแสดงถึงอัตราในการทำให้ยางคงรูปเร็วหรือช้า พบว่าจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของการเติม MWNTs ยกเว้นสำหรับสูตร 100/0 และ 85/15 เมื่อเติม MWNTs 1 phr และสูตร 50/50 เมื่อเติม MWNTs 1 และ 3 phr จะให้ค่าอัตราการวัลคาไนซ์ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับยางที่ไม่มีสารเติม โดยการเติม MWNTs 10 phr ในยางเอสปีอาร์ 100 phr จะให้ค่า CRI ที่ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การเติม MWNTs ที่ปริมาณอัตราส่วน NR/SBR อื่นๆ



รูปที่ 5.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ

(a) Cure time (b) Scorch time (c) CRI (%)

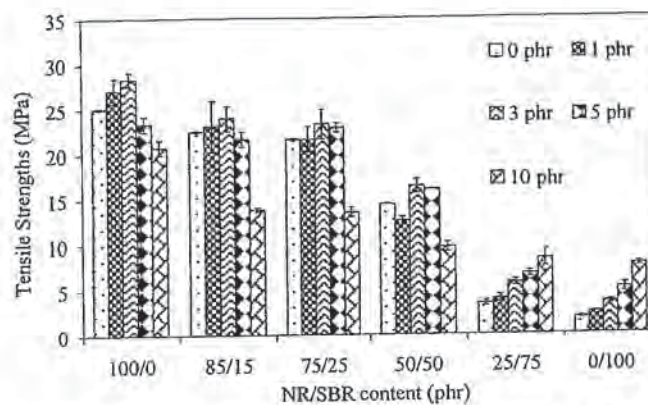
## 5.2 สมบัติเชิงกลยางคอมปอนด์

### 5.2.1 ผลของปริมาณอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR และ MWNTs ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางผสม

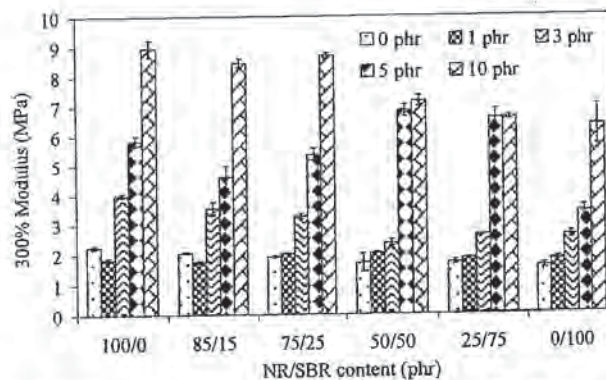
จาก รูปที่ 5.2 เมื่อพิจารณาที่ 0 phr การใช้ยาง NR ร่วมกับยางเอสปีอาร์จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงที่ดีเมื่อมีปริมาณของยางเอสปีอาร์ 0-25 phr โดยยางคอมปอนด์ที่ได้จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 27



MPa คือ NR/SBR = 90/10 ซึ่งสูงกว่าค่าของยางธรรมชาติ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยประมาณ 25 MPa ส่วนยางคอมปอนด์สูตร NR/SBR = 85/15, 80/20 และ 75/25 ให้ค่าความต้านแรงดึงเฉลี่ยที่เท่ากัน คือ 23 MPa ในขณะที่ยางยางเอสปีอาร์ 100 % จะให้ความต้านทานต่อแรงดึงเฉลี่ยต่ำสุด คือ 2 MPa ค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางคอมปอนด์จะลดลงเมื่อมีปริมาณของยางเอสปีอาร์เพิ่มขึ้น การเติม MWNTs ในปริมาณ 1-3 phr ลงในยางที่มีปริมาณของเอสปีอาร์ 0-50 phr จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของ MWNTs เป็น 5, 10 phr ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ใส่จะลดลง ส่วนในยางที่มีปริมาณยางเอสปีอาร์ 75-100 phr พบว่าการเติม MWNTs ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็ยังทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับยางที่มีปริมาณยาง เอสปีอาร์ 0-25 phr



รูปที่ 5.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 5.3 ค่ามอดูลัสของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs

ในปริมาณต่างๆ

### 5.2.2 ผลของปริมาณ อัตราส่วนระหว่าง NR/SBR และ MWNTs ต่อค่ามอดูลัส

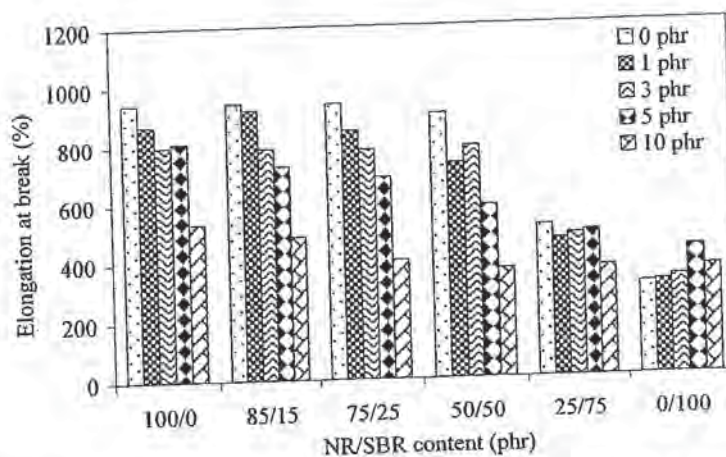
จาก รูปที่ 5.3 พบว่าค่ามอดูลัส จะลดลงตามปริมาณของยาง NR ที่ลดลง เนื่องจากโดยปกติยางเอสปีอาร์จะมีค่ามอดูลัสต่ำกว่ายางธรรมชาติกล่าวคือ มอดูลัสของยางเอสปีอาร์เท่ากับ 1.6 MPa ในขณะที่มอดูลัสของยางธรรมชาติมีค่า 2.3 MPa และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ MWNTs ส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยางคอมปอนด์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยค่ามอดูลัสของยางคอมปอนด์ที่มียางเอสปีอาร์ 0-25 phr และเติม MWNTs 3 phr จะมีค่าเพิ่มขึ้น 80-86 % เมื่อเทียบกับค่าของยางคอมปอนด์ที่ไม่เติม MWNTs และมอดูลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้น 300-350 % เมื่อเติม MWNTs 10 phr



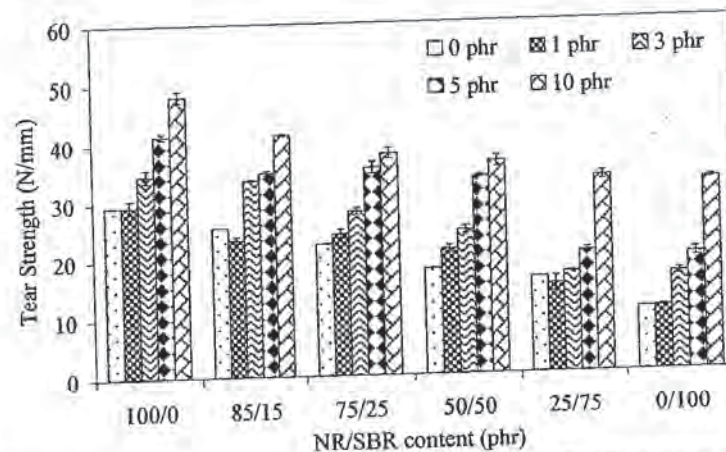
ค่ามอดูลัสแสดงถึงความสามารถในการต้านทานแรงได้ของวัสดุ ดังนั้น MWNTs จึงสามารถเพิ่มความแข็งแรงของยางแต่ละชนิดและยางคอมปาวด์อย่างมีนัยสำคัญ

### 5.2.3 ผลของปริมาณอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR และ MWNTs ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดจนขาด

ตามที่ทราบกันแล้วว่า จุดเด่นของยางธรรมชาติ คือ มีความยืดหยุ่น โดยยางธรรมชาติสามารถยืดได้มากกว่าเมื่อเทียบกับยางเอสบิอาร์ จากรูปที่ 5.4 พบว่าในยางที่ไม่เติม MWNTs ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดจนขาดในยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่ายางเอสบิอาร์ประมาณ 320 % และเมื่อเติม MWNTs ในปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดลดลงซึ่งจะมีพฤติกรรมเหมือนกับสารตัวเติมในยางชนิดอื่นๆ เช่น เชม้าดำ หรือ เคลย์ เพราะสารตัวเติมเหล่านี้บางส่วนไปตัดโมเลกุลของยางให้สั้นลง



รูปที่ 5.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดจนขาดของยางคอมปาวด์ที่เติมและไม่เติมด้วย MWNTs ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 5.5 ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางคอมปาวด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ

### 5.2.4 ผลของปริมาณอัตราส่วนระหว่าง NR /SBR และ MWNTs ต่อค่าความต้านทานการฉีกขาด

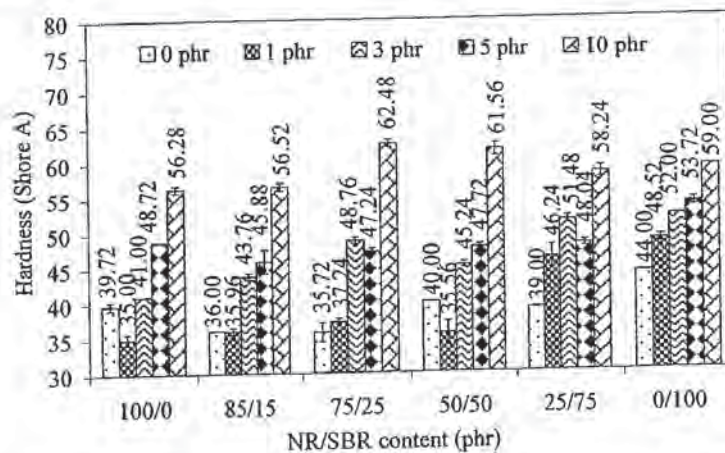
ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติและยางเอสบิอาร์มีค่า 29 N/mm และ 10 N/mm ตามลำดับ และพบว่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมปาวด์จะลดลงเมื่อมีปริมาณยางเอสบิอาร์เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5.5) การ



เติม MWNTs มีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมเปานด์ โดยปริมาณ MWNTs ที่เพิ่มขึ้นจาก 1-10 phr ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์

### 5.2.5 ผลของปริมาณ อัตราส่วนระหว่าง NR/SBR และ MWNTs ต่อค่าความแข็ง

จากรูปที่ 5.6 พบว่ายางคอมเปานด์ในอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR ต่างๆ ซึ่งไม่เติม MWNTs จะให้ค่าความแข็งไม่สม่ำเสมอ แต่ที่น่าสังเกตคือ การเติมยางธรรมชาติหรือยางเอสปีอาร์เพียงลำพัง จะให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าการผสมยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ เมื่อพิจารณาจากกราฟ ค่าความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของ MWNTs และ ยางเอสปีอาร์ที่เพิ่มขึ้น โดยสารตัวเติมชนิด MWNTs มีความแข็งมากกว่าเนื้อยาง เมื่อนำมาผสมในเนื้อยาง จึงทำให้ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นได้

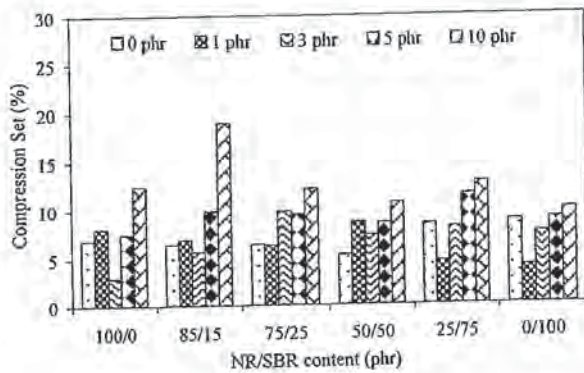


รูปที่ 5.6 ค่าความแข็งของยางคอมเปานด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ

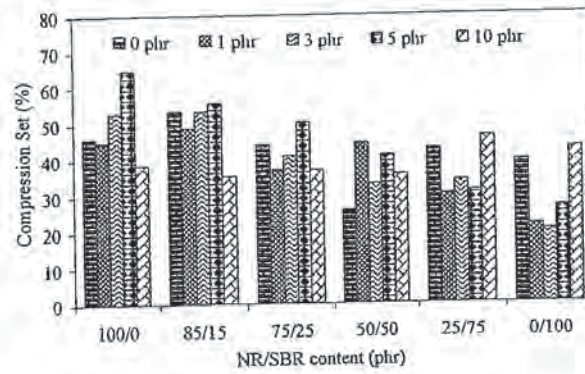
### 5.2.6 ผลของปริมาณ อัตราส่วนระหว่าง NR/SBR และ MWNTs ต่อค่าการเสียรูปหลังการกด

การเสียรูปหลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าต่ำกว่า 10 % ซึ่งมีการเสียรูปในปริมาณที่น้อย ในขณะที่อุณหภูมิ 70 °C ยางจะมีค่าการเสียรูปมากกว่า ที่อุณหภูมิ 25 °C อยู่ประมาณ 10 เท่า โดยการเสียรูปจะลดลงตามปริมาณของยางเอสปีอาร์ที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 5.7(a) การเสียรูปหลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าไม่สม่ำเสมอ แต่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ MWNTs เพราะสารตัวเติมจะไปลดค่าความยืดหยุ่นของยางลง (Thongsang et al, 2006) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าการเสียรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 70 °C ในรูปที่ 5.7 (b) พบว่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติม MWNTs เพิ่มจาก 1 phr เป็น 5 phr และจะมีค่าลดลงเมื่อเติม MWNTs 10 phr ในยางคอมเปานด์ที่มียางเอสปีอาร์ผสมน้อยกว่า 50 phr แต่ในยางคอมเปานด์ที่มียางเอสปีอาร์ 75 และ 100 phr การเติม MWNTs 1-5 phr จะทำให้ค่าการเสียรูปหลังการกดลดลง เมื่อเทียบกับยางคอมเปานด์ที่ไม่เติม MWNTs แต่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติม MWNTs 10 phr ปรากฏการณ์นี้ค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งอาจเนื่องมาจากการนำความร้อนที่ดีของ MWNTs การเสียรูปหลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 70 °C มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณของ MWNTs ที่เพิ่มขึ้น





(a) 25°C

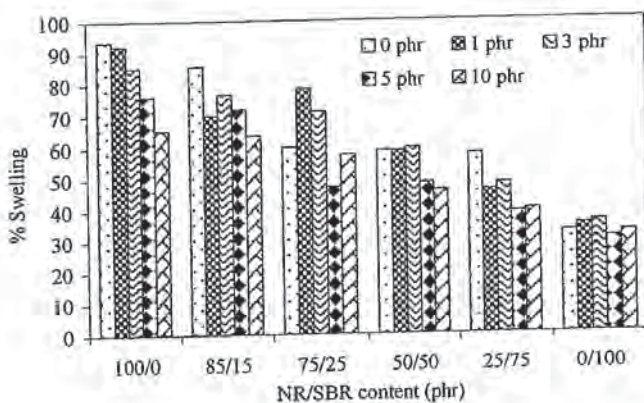


(b) 70°C

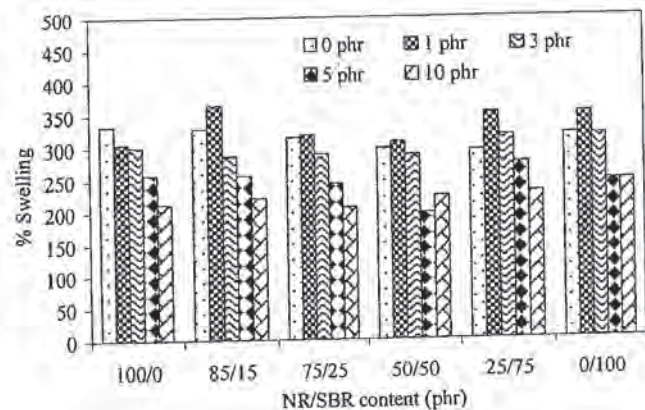
รูปที่ 5.7 ค่าการเสียรูปหลังการกดของยางคอมปอนด์สูตรต่างๆ ที่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ

### 5.3 สมบัติทางเคมีของยางคอมปาวด์

5.3.1 ผลของปริมาณ อัตราส่วนระหว่าง NR/SBR และ MWNTs ต่อการบวมตัว (%Swelling) ในน้ำมันและโทลูอีน พบว่าการบวมตัวของยางคอมปอนด์ในน้ำมันจะลดลงเมื่อผสมยางเอสบิอาร์ในปริมาณมากขึ้น ยางธรรมชาติและยางเอสบิอาร์จะไม่ทนต่อโทลูอีน จึงทำให้ยางคอมปอนด์ไม่ทนต่อโทลูอีน การบวมในน้ำมันและโทลูอีนมีแนวโน้มจะลดลงตามปริมาณของ MWNTs ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5.8) เนื่องจากการบวมตัวจะเกิดขึ้นในเนื้อยางเท่านั้น ไม่เกิดขึ้นกับสารตัวเติม เมื่อมีเนื้อยางในระบบน้อยลงการบวมตัวจึงเกิดน้อยลง (Rakehonlatee et al, 2004) อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าการลดการบวมตัวของยางลดมากกว่า 10 % เมื่อเติม MWNTs 10 phr ดังนั้นการบวมตัวที่น้อยลงนี้อาจจะเกิดจากโครงสร้างของยางเกิดการเชื่อมขวาง ตามสมการของ Flory-Rhener (Amyo et al, 2006; Kumnuantip et al, 2003) (สมการที่ 4.2 และ 4.3)



(a) ในน้ำมัน



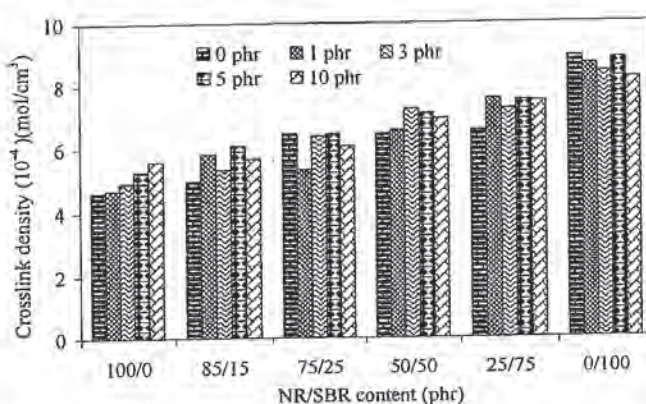
(b) ในโทลูอีน

รูปที่ 5.8 การบวมตัวของยางคอมปอนด์สูตรต่างๆ ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ



### 5.3.2 ผลของปริมาณ อัตราส่วนระหว่าง NR /SBR และ MWNTs ต่อความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (Crosslink density)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.9 ที่ 0 phr พบว่าปริมาณยางเอสปีอาร์ในยางคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมขวางและพบว่าค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางคอมเปาน์ดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสารตัวเติม  $\sim 10$  phr ด้วยเช่นกัน(รูปที่ 5.9) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของยางคอมเปาน์ดสูตรต่างๆ ที่ไม่มีสารตัวเติม ยกเว้นสำหรับยางเอสปีอาร์ที่ MWNTs มีผลต่อความหนาแน่นการเชื่อมขวางน้อย การที่ท่อนาโนคาร์บอนส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณการเชื่อมขวางนั้น เนื่องมาจากการเกาะกันอย่างดีของสารตัวเติมกับเนื้อยาง (ชัชวาล และคณะ, 2550 ; Arroyo et al, 2006) และเนื่องจาก aspect ratio ของท่อนาโนคาร์บอนมีค่ามาก (ลักษณะเป็นเส้นใย) มีโอกาสที่จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางทางกายภาพ (physical crosslink) ได้ (Shanmugharaj et al 2007) กอปรกับสมบัติในการนำความร้อนของท่อนาโนคาร์บอนที่ดีเลิศจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางมากขึ้น



รูปที่ 5.9 ความหนาแน่นการเชื่อมขวางของยางคอมเปาน์ดระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ เมื่อเติมและไม่เติม MWNTs ที่ปริมาณต่างๆ

## 5.4 สมบัติทางความร้อนของยางคอมปาวด์

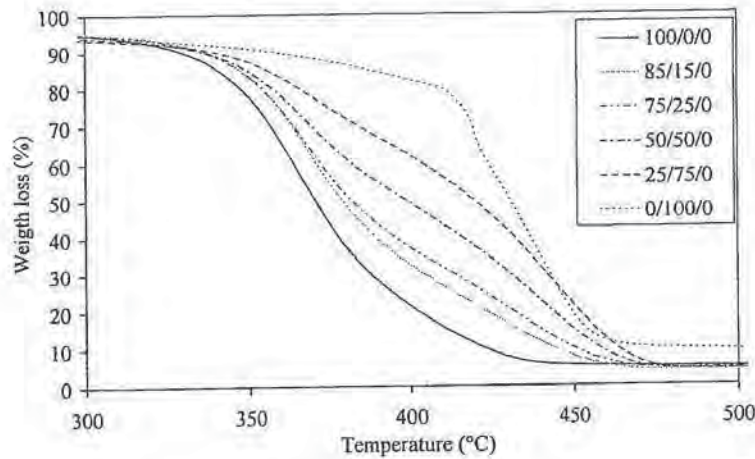
### 5.4.1 ผลของปริมาณอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR ต่อน้ำหนักที่สูญหายภายใต้ความร้อน

จากรูปที่ 5.10 และตารางที่ 5.2 พบว่า ยางเอสปีอาร์ทนความร้อนได้ดียางธรรมชาติ ดังนั้นในยางคอมเปาน์ดระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ทนความร้อนได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณยางเอสปีอาร์ที่เพิ่มขึ้น กล่าวคืออุณหภูมิที่น้ำหนักสูญหายไป 50% ของยาง NR/SBR= 100/0, 85/25, 75/25, 50/50, 25/75 และ 0/100 มีค่าประมาณ 370, 379, 382, 398, 419, และ 429 °C ตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 ผลของการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางคอมปาวด์ด้วยเครื่อง TGA

| NR/SBR | ปริมาณ MWNTs | T <sub>5</sub> (°C) | T <sub>10</sub> (°C) | T <sub>50</sub> (°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                          |

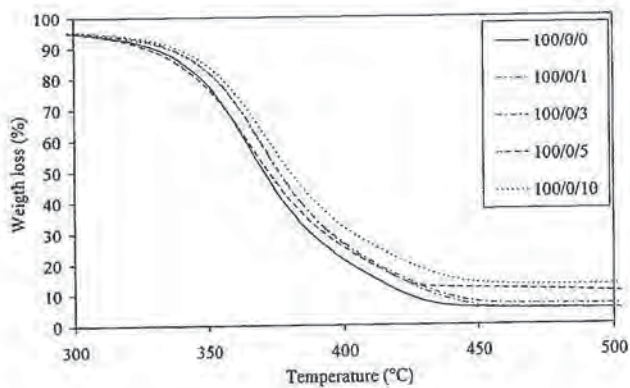




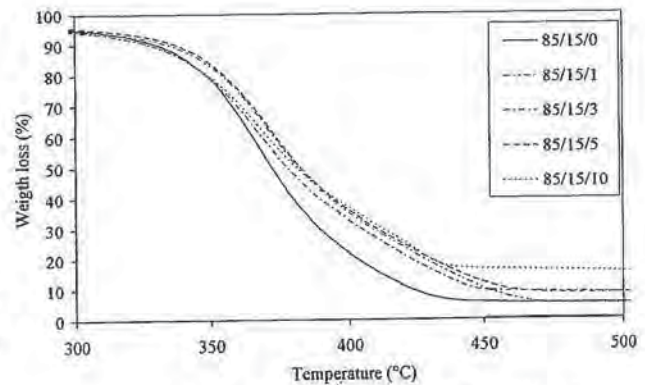
รูปที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางธรรมชาติที่ไม่มีสารเติม

#### 5.4.2 ผลของ MWNTs ต่อน้ำหนักที่สูญหายของยางคอมเพานด์ภายใต้ความร้อน

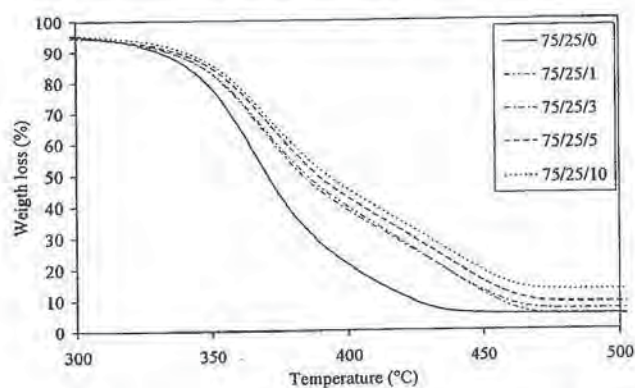
เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนในยางคอมเพานด์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ยางคอมเพานด์ทนความร้อนสูงขึ้น ดังแสดงด้วยค่า  $T_{50}$  ในตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.11 การเติมท่อนาโนคาร์บอนซึ่งเป็นตัวนำความร้อนที่ดีจะถ่ายเทความร้อนสู่ผิวได้เร็ว จึงทำให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อการหลอมยางลดลง



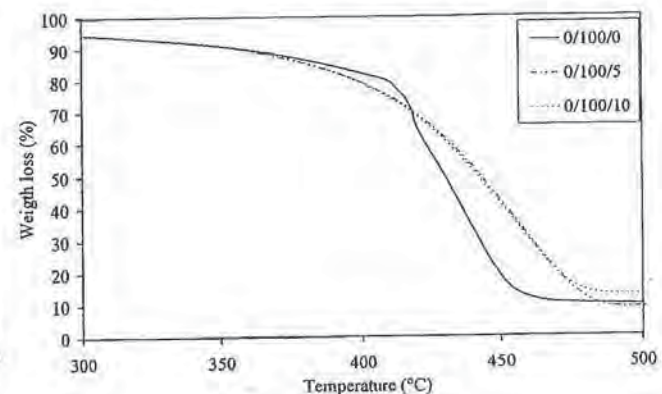
(a) ยางธรรมชาติ



(b) ยางคอมเพานด์ NR/SBR = 85/15



(c) ยางคอมเพานด์ NR/SBR = 75/25



(d) ยางเอสบีอาร์

รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางคอมเพานด์ที่เติม MWNTs ที่ปริมาณต่างๆ

### 5.5 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต

ผลการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต ด้วยเครื่อง DMTA แสดงด้วยค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus:  $E'$ ) และ  $\tan \delta$

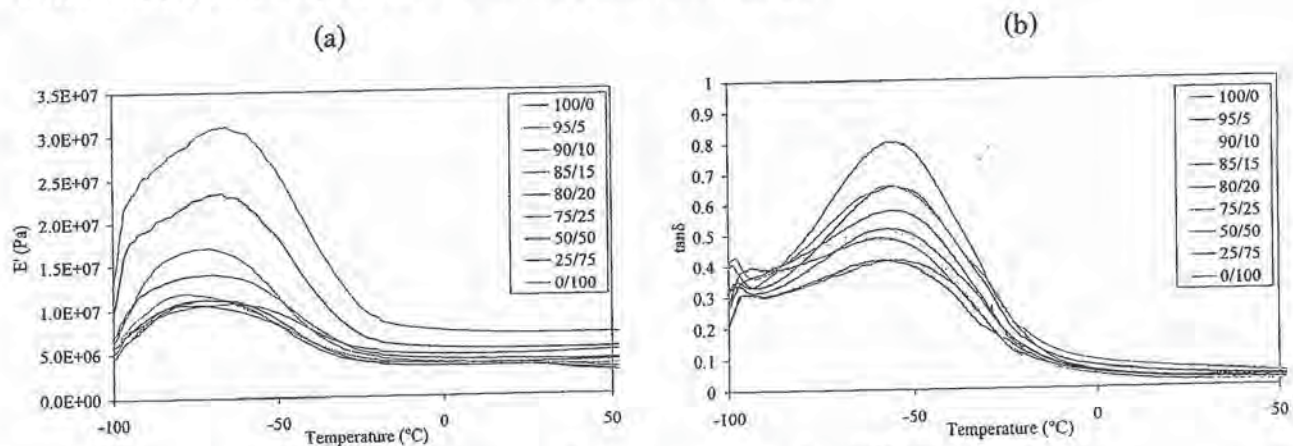
$E'$  มีค่าสูง แสดงว่า การกระจายตัวของสารตัวเติมในชิ้นงานตัวอย่างยังไม่ได้ เกิดการรวมกันเป็นก้อนอยู่กับโมเลกุลของยางที่แทรกระหว่างสารเติม จึงถูกรั้งไว้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ยาก

$\tan \delta$  มีค่าสูง แสดงว่า แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคที่เกิดรวมตัวกันเป็นก้อนที่ไม่แข็งแรงของสารตัวเติมในบางบริเวณ และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์บริเวณที่เกาะกันไม่ดี จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานไม่แข็งแรงเท่าที่ควร

อุณหภูมิ ณ จุดที่  $\tan \delta$  สูงสุด คือ อุณหภูมิสภาพแก้ว (glass transition temperature,  $T_g$ ) ของยางคอมพอนด์

#### 5.5.1 ผลของปริมาณ อัตราส่วนระหว่าง NR/SBR ต่อค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus : $E'$ ), $\tan \delta$ และอุณหภูมิ $T_g$ จากการวิเคราะห์ ด้วย DMTA

ผลของปริมาณอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR ของยางคอมพอนด์คือค่า  $E'$  และ  $\tan \delta$  แสดงดังตัวอย่างรูปที่ 5.12 พบว่าค่า  $E'$  และ  $\tan \delta$  ของยางเอสปีอาร์ มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งส่งผลถึงความแข็งแรงของยางเอสปีอาร์ที่ต่ำกว่ายางธรรมชาติ ดังนั้นยางคอมพอนด์ที่ประกอบด้วยยางธรรมชาติมากกว่า 75 phr (ค่า  $E'$  และ  $\tan \delta$  ต่ำกว่า) จึงมีความแข็งแรงสูงกว่ายางเอสปีอาร์ (รูปที่ 5.3) จากรูปที่ 5.12 และตารางที่ 5.2 พบว่าอุณหภูมิ  $T_g$  ของยางคอมพอนด์ที่ไม่มีสารเติม ( $-56^\circ\text{C} \sim -59^\circ\text{C}$ ) ต่ำกว่ายางธรรมชาติเล็กน้อย ( $-53^\circ\text{C}$ )



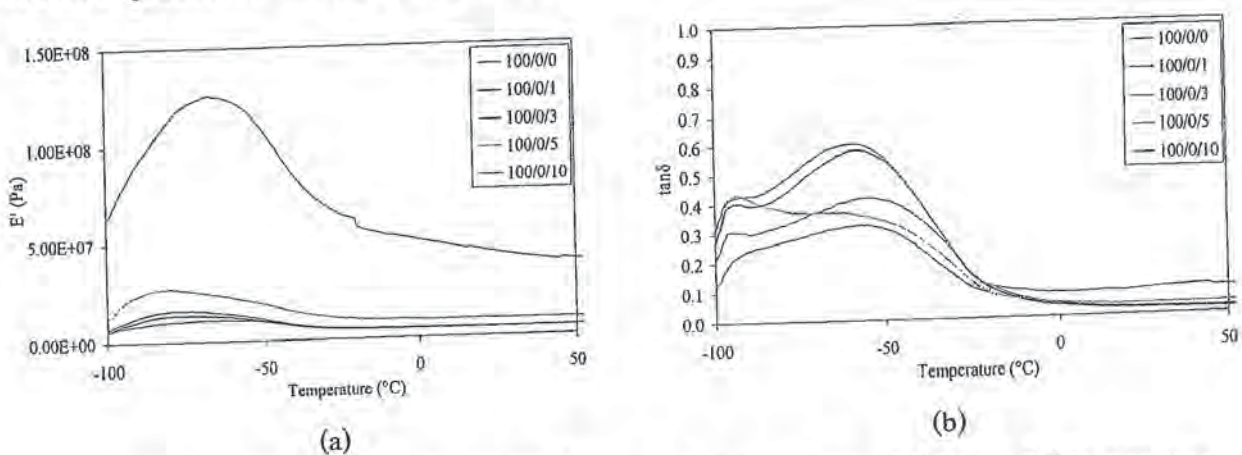
รูปที่ 5.12  $E'$  (a) และ  $\tan \delta$  (b) ของยางคอมพอนด์ที่ไม่มีสารตัวเติม



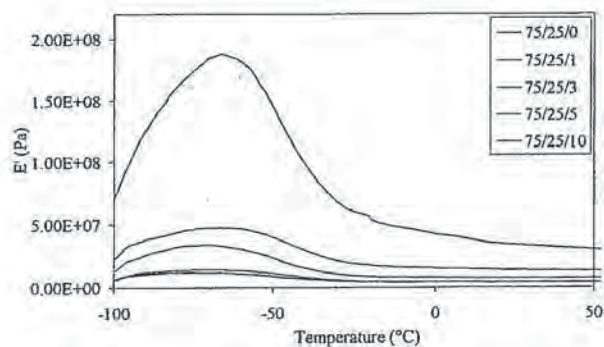
### 5.5.2 ผลของ MWNTs ต่อค่ามอดูลัสสะสม (Storage modulus: $E'$ ), $\tan \delta$ , และอุณหภูมิ $T_g$ จากการวิเคราะห์ด้วย DMTA

ผลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนต่อค่า  $E'$  และ  $\tan \delta$  ของยางธรรมชาติ ยางคอมเปานด์ และยางเอสปือร์ แสดงดังรูปที่ 5.13 (a) – 5.17 (a) จะพบว่าการเติมท่อนาโนคาร์บอนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการเพิ่ม  $E'$  ของยางคอมเปานด์ทุกสูตร ซึ่งเกิดจากการจับตัวเป็นก้อนของท่อนาโนคาร์บอนบางส่วนที่ยังเกาะกับเนื้อยางไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลยางบริเวณนั้น ทำให้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ  $E'$  เมื่อมีเพิ่มปริมาณสารตัวเติม

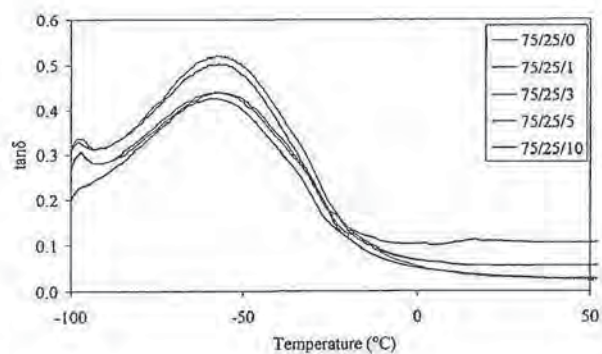
สำหรับค่า  $\tan \delta$  ของยางคอมเปานด์ที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนไหวของโมเลกุลมาก ในกรณีที่มีสารตัวเติมขนาดระดับจุลภาคในระบบ ค่า  $\tan \delta$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น (Hamdan et al, 2004) ซึ่งการที่มีสารตัวเติมมากขึ้น ทำให้ค่า  $\tan \delta$  สูงขึ้น เพราะเป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคที่เกิดรวมตัวกันเป็นก้อนของสารตัวเติมในบางบริเวณ และเป็นแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์บริเวณที่มีการเกาะกันไม่ดี (Nielsen and Landel, 1994) แต่ในกรณีที่เติมสารตัวเติมระดับนาโนอาจให้ผลที่แตกต่างกันออกไป จากรูปที่ 5.13 (b) – 5.16 (b) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณท่อนาโนคาร์บอนเข้าไปในระบบ จะส่งผลให้ค่า  $\tan \delta$  มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bokobza (2007) การเปลี่ยนแปลงค่า  $\tan \delta$  นี้เนื่องมาจากท่อนาโนคาร์บอน อาจมีผลต่อการเพิ่มโครงสร้างเชื่อมขวางของยาง ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.3.2 จึงทำให้การเติม MWNTs ในปริมาณที่เหมาะสมเข้าไปในเนื้อยางคอมเปานด์ ทำใหยางคอมเปานด์มีพันธะที่แข็งแรงขึ้น อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่าสำหรับยางคอมเปานด์ที่มีส่วนผสมของยางธรรมชาติมากกว่า 50 phr การเติมท่อนาโนคาร์บอน 10 phr ดูเหมือนว่าจะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลง (รูปที่ 5.2) แม้ว่าค่า  $\tan \delta$  จะต่ำกว่าค่าของยางคอมเปานด์ที่ไม่เติม MWNTs ก็ตาม ทั้งนี้อาจเนื่องจาก MWNTs มีการจับตัวเป็นก้อนเป็นอนุภาคขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ในยางคอมเปานด์ จึงไม่ได้ช่วยเสริมแรงในยางคอมเปานด์



รูปที่ 5.13  $E'$  (a) และ  $\tan \delta$  (b) ด้วยเครื่อง DMTA ของยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม MWNTs

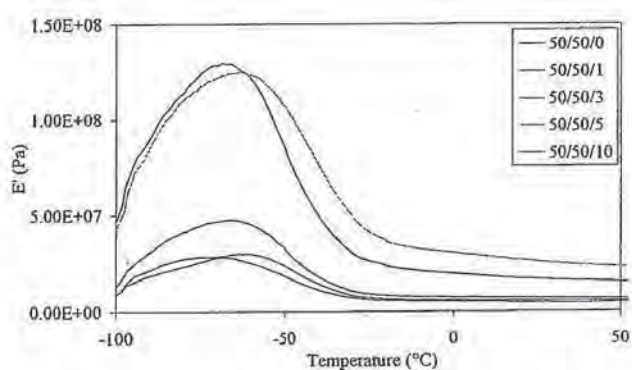


(a)

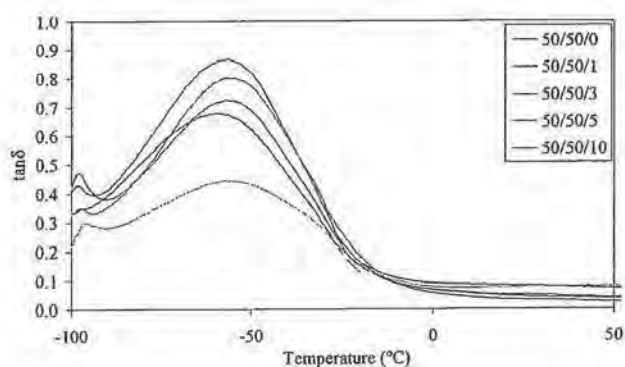


(b)

รูปที่ 5.14 E' (a) และ  $\tan \delta$  (b) วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMTA ของยางคอมเพานด์ NR/SBR= 75/25 ที่เติมและไม่เติม MWNTs

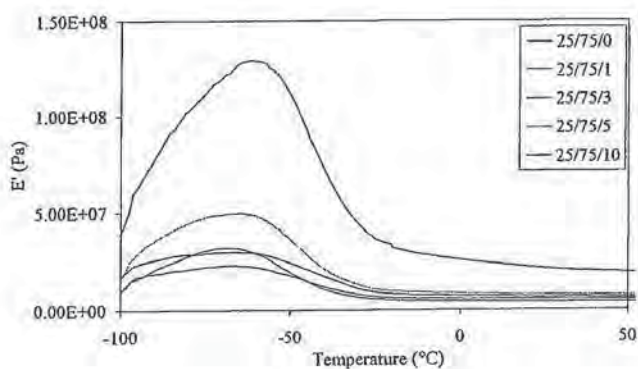


(a)

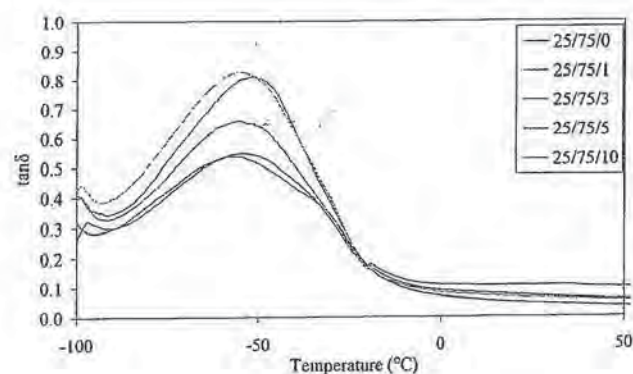


(b)

รูปที่ 5.15 E' (a) และ  $\tan \delta$  (b) ด้วยเครื่อง DMTA ของยางคอมเพานด์ NR/SBR= 50/50 ที่เติมและไม่เติม MWNTs



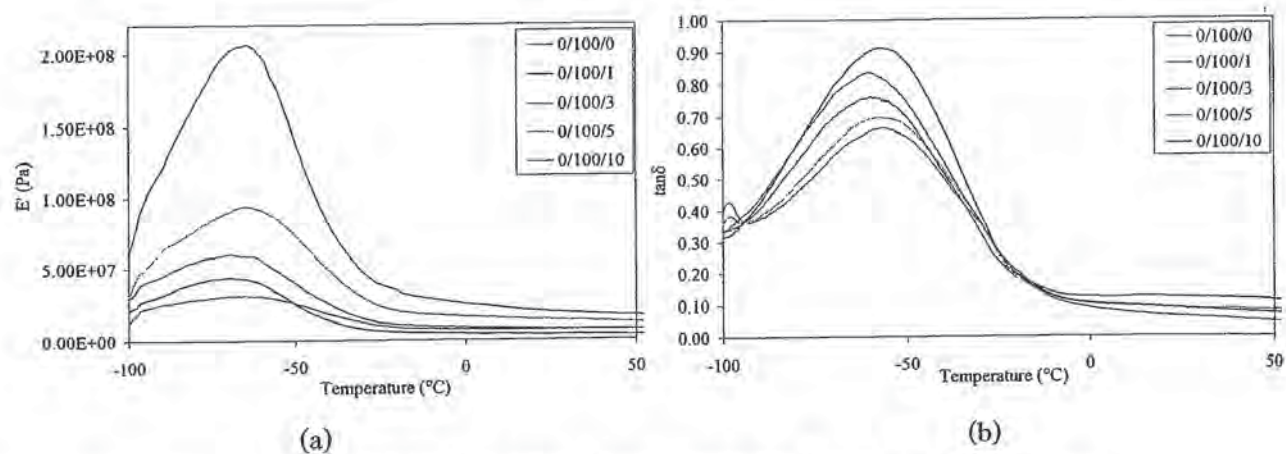
(a)



(b)

รูปที่ 5.16 E' (a) และ  $\tan \delta$  (b) ด้วยเครื่อง DMTA ของยางคอมเพานด์ NR/SBR= 25/75 ที่เติมและไม่เติม MWNTs





รูปที่ 5.17  $E'$  (a) และ  $\tan \delta$  (b) ด้วยเครื่อง DMTA ของยางเอสปีอาร์ที่เติมและไม่เติม MWNTs

ในยางเอสปีอาร์ MWNTs มีผลต่อ  $\tan \delta$  ต่างกับยางคอมเพานด์ที่กล่าวมาแล้วเล็กน้อยกล่าวคือ จากรูปที่ 5.17 (b) เมื่อเพิ่มปริมาณ MWNTs จะทำให้  $\tan \delta$  ของยางผสมลดลง แต่เมื่อเทียบกับค่าของยางเอสปีอาร์ที่ไม่มีสารเติมกลับมีค่ามากกว่า ซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายๆ สารตัวเติมระดับจุลภาคแทนระดับนาโน เมื่อพิจารณาอุณหภูมิสภาพคล้ายแก้ว ของยางคอมเพานด์ที่เติมสาร MWNTs ในตารางที่ 5.3 พบว่า MWNTs 1-10 phr มีผลต่ออุณหภูมิ  $T_g$  ของยางธรรมชาติ โดยทำให้อุณหภูมิ  $T_g$  ลดลง 6-14 °C แต่จะมีผลเล็กน้อยสำหรับยางคอมเพานด์สูตรอื่นๆ

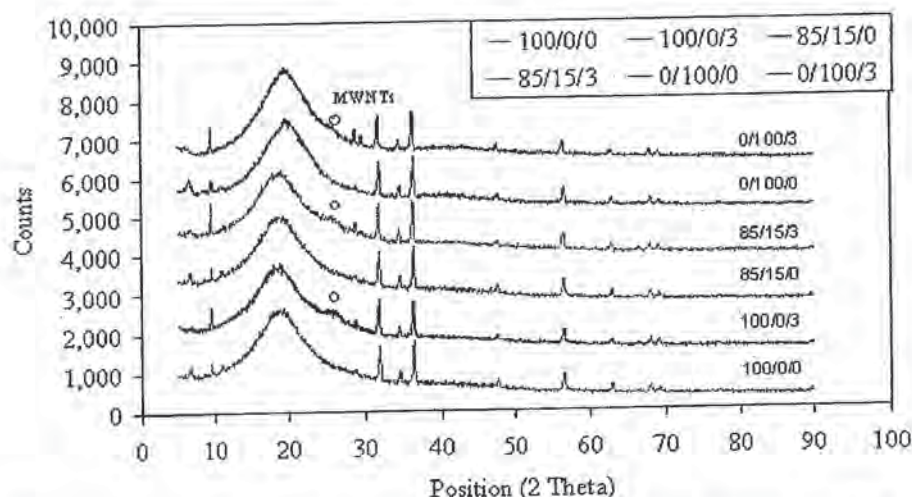
ตารางที่ 5.3 อุณหภูมิ  $T_g$  ที่ได้มาจากผลการวิเคราะห์ค่าสูงสุดของค่า  $\tan \delta$  ด้วยเครื่อง DMTA

| ยางคอมเพานด์ NR/SBR | $T_g$ (°C) |     |     |     |          |
|---------------------|------------|-----|-----|-----|----------|
|                     | MWNT 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      |

## 5.6 ผลของท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมในยางคอมเพานด์ต่อสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ FT-IR

### 5.6.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

ผลการวิเคราะห์ยางคอมเพานด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs แสดงดังรูปที่ 5.18 จะเห็นพีกที่มุม  $2\theta = 20$  องศา เป็นพีกของยางคอมเพานด์ และพีกที่มุม 27 องศาเป็นพีกของ MWNTs จะเห็นว่าในกรณียางคอมเพานด์ ที่ไม่ได้เติม MWNTs จะไม่ปรากฏพีกนี้ แสดงว่า MWNTs 3 phr ที่เติมเข้าไปในยางคอมเพานด์ สามารถกระจายตัวในเนื้อของยางคอมเพานด์อย่างดี



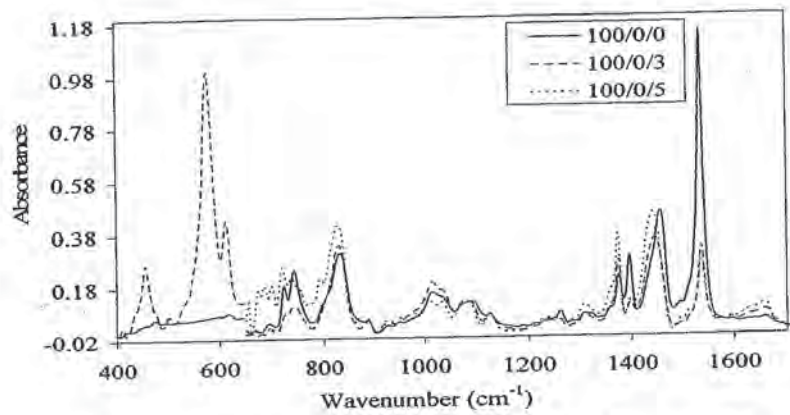
รูปที่ 5.18 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของยางคอมปอนด์ที่เติม MWNTs

### 5.6.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR

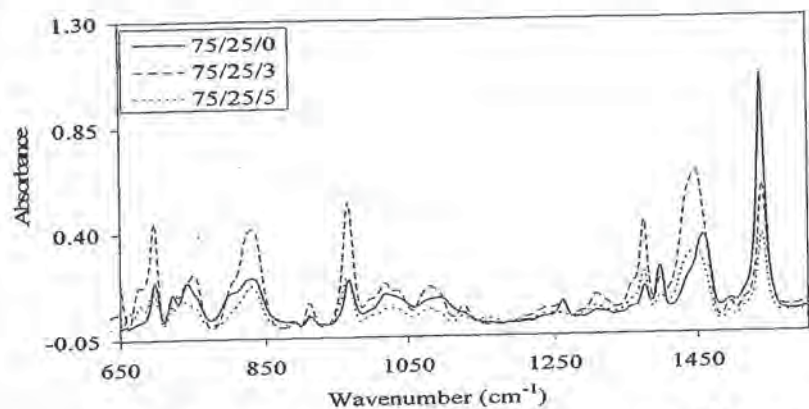
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยรังสีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรดที่บ่งบอกเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็น *cis*-1, 4-Polyisoprene ที่สำคัญได้แก่ ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $837\text{ cm}^{-1}$  เป็นการงอของพันธะ C=C บน *cis*-1, 4-Polyisoprene และที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ  $1449$  และ  $1367\text{ cm}^{-1}$  จะเป็นการยืดของพันธะ C-H ของอะลิฟาติก (Aliphatic) ในโมเลกุลของยางธรรมชาติ (สิทธิพงษ์, 2547) โดยตำแหน่งของเลขคลื่นอาจจะมีการคลาดเคลื่อนบ้าง ดังรูปที่ 5.19 (เส้นกราฟของสูตร 100/0/0) เป็นสเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมโดยตำแหน่งของการงอของพันธะ C=C บน *cis*-1, 4-Polyisoprene จะปรากฏที่เลขคลื่น  $799.72\text{ cm}^{-1}$  ส่วนการยืดของพันธะ C-H ของอะลิฟาติกจะปรากฏที่เลขคลื่น  $1382.20\text{ cm}^{-1}$  และ  $1240.67\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเส้นกราฟที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าพีค FT-IR ของยางธรรมชาติดังรูปที่ 5.19 (เส้นกราฟของสูตร 100/0/0) และยางเอสบิอาร์ดังรูปที่ 5.21 (เส้นกราฟของสูตร 0/0/100) ไม่ค่อยต่างกันมากนัก พีคที่แตกต่างกันที่ค่าเลขคลื่นพีคของยางธรรมชาติปรากฏที่ 653.8, 673.1, 873.7, 929.7, 1018.4, 1035.7 และ  $1373.2$  ในขณะที่พีคของยางเอสบิอาร์ปรากฏที่ 696.3, 813.9, 908.5, 962.4 และ 997.1 และเมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนในยางธรรมชาติและยางคอมปอนด์ พบว่าปรากฏพีคใหม่ที่แตกต่างกับยางธรรมชาติและยางคอมปอนด์ที่เลขคลื่น 1030, 1080 และ 1154 ซึ่งแสดงถึงอาจเกิดการเชื่อมขวางทางเคมีขึ้นบางส่วนจากผลของการเติมท่อนาโนคาร์บอน (รูปที่ 5.19-5.21)

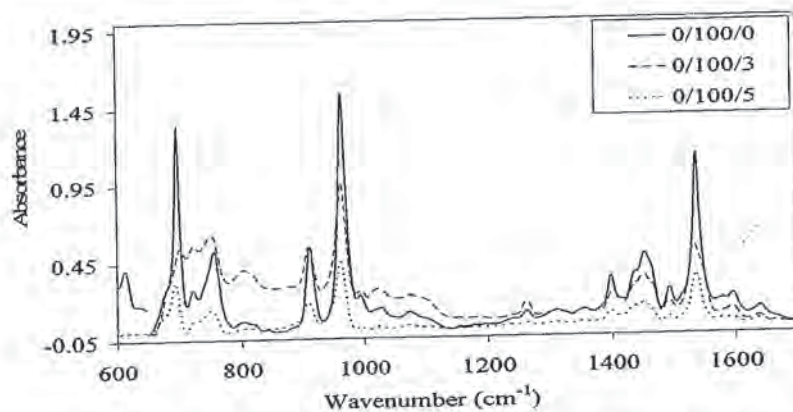




รูปที่ 5.19 ผลวิเคราะห์ FT-IR ของยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม MWNTs



รูปที่ 5.20 ผลวิเคราะห์ FT-IR ของยางคอมเพานด์ NR/SBR= 75/25 ที่เติมและไม่เติม MWNTs



รูปที่ 5.21 ผลวิเคราะห์ FT-IR ของยางเอสบีอาร์ที่เติมและไม่เติม MWNTs

## 5.7 การอภิปรายผล

จากการศึกษาผลของปริมาณสัดส่วนยางธรรมชาติและยางเอสบีอาร์ และสารเติมชนิด MWNTs พบว่า สูตรยางที่เหมาะสมที่ให้อัตราการวัลคาไนซ์สูงคือ NR/SBR= 85/15 และ 75/25 ส่งผลดีต่อกระบวนการขึ้นรูปยาง ส่วนการเติม MWNTs ในปริมาณ 1~3 phr ส่งผลต่ออัตราการวัลคาไนซ์เล็กน้อย แต่จะมีผลต่อการลดอัตราการวัลคาไนซ์ (CRI) เมื่อเติม MWNTs มากขึ้น

การเติม MWNTs มีผลต่อสมบัติเชิงกล คือ เพิ่มค่า ความต้านทานต่อแรงดึง โมดูลัส ความต้านทานการฉีกขาด การเสีรูปหลังการกด และความแข็ง จากการวิจัยนี้พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะมีค่าสูงสุดในสูตรยางที่เหมาะสมคือ NR/SBR=75/25 และเติม MWNTs 1~3 phr ส่วนค่าโมดูลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม MWNTs

การบวมตัวของยางคอมเพานด์ในน้ำมันและโทลูอิน จะลดลงตามปริมาณของยางเอสปีอาร์และ MWNTs ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงว่ายางเอสปีอาร์สามารถช่วยลดการบวมตัวของยางในสารละลายได้ดีกว่ายางธรรมชาติ เพราะยางเอสปีอาร์และ MWNTs ช่วยเพิ่มค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางในโครงสร้างของยางผสม นอกจากนี้ ยางเอสปีอาร์ และ MWNTs ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทนทานต่อความร้อนได้ดีขึ้นในยางคอมเพานด์ ซึ่งสูตรที่เหมาะสมคือ NR/SBR=75/25 และ MWNTs ~ 5 phr

จากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัตของยางคอมเพานด์ด้วย DMTA พบว่าค่าโมดูลัสสะสม และ  $\tan \delta$  ของยางเอสปีอาร์มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ จึงทำให้ยางเอสปีอาร์มีความแข็งแรงน้อยกว่ายางธรรมชาติ นั่นเอง และพบว่าค่า  $\tan \delta$  สำหรับยางผสมจะต่ำลงเมื่อเติม MWNTs ในปริมาณที่เหมาะสมจึงทำให้ยางผสมแข็งแรงขึ้น ซึ่งพบว่าสูตรที่เหมาะสมคือ NR/SBR=75/25 และ MWNTs ~ 3 phr

## 6.สรุปผล

1. ยางคอมเพานด์สูตร NR/SBR=85~75/15~25 ให้ค่าอัตราการวัลคาไนซ์สูง ขึ้นรูปได้ง่าย ตลอดจนให้สมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันสูงกว่ายางธรรมชาติ
2. ยางผสมระหว่างยางคอมเพานด์และท่อนาโนคาร์บอนสูตร NR/SBR=75/25 และ MWNTs ~3 phr จะให้สมบัติการขึ้นรูป สมบัติเชิงกล การทนต่อน้ำมัน โทลูอิน และความร้อนสูง เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุกันรั่วหรือปะเก็น
3. ยางผสม ระหว่างยางคอมเพานด์และท่อนาโนคาร์บอนสูตร NR/SBR=75/25 และ MWNTs 10 phr ซึ่งให้ค่าโมดูลัสสูงมาก ตลอดจนการทนต่อน้ำมัน โทลูอิน และความร้อนสูง เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงกดหรือแรงอัดสูง เช่น ยางรองแท่นเครื่องยนต์กันสั่นสะเทือน และยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น

## 7. ข้อเสนอแนะ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองซึ่งเป็นการศึกษาเบื้องต้น พบว่ายังมีประเด็นที่ต้องศึกษาให้ละเอียดขึ้น เพื่อจะได้นำสิ่งที่สังเคราะห์ให้ประโยชน์ได้จริงต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาหาวิธีที่ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวอย่างดีในเนื้อยางคอมเพานด์ เช่นการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม
2. ศึกษาเมื่อได้สัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ ควรนำไปพัฒนาผลผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบกับสารตัวเติมอื่นๆ เช่น เชมดำ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะประเมินความเป็นไปได้ในการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม



## บรรณานุกรม

- พงษ์ธร แซ่อูย. 2550. ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) พิมพ์ครั้งที่ 3.
- พงษ์ธร แซ่อูย. 2548. สารเคมียาง, ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) พิมพ์ครั้งที่ 1
- สุรวุฒิ ช่างโชติ และ พิชญ์ ศุภพล. 2548. วารสารไฟฟ้าและอุตสาหกรรม, ปีที่ 12 ฉบับที่ 3 (พ.ศ - ม.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.
- 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.
- 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
- Froley, 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.
- 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
- 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.

- 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
- Shanmugharaj, 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.
- 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.2006.03.147.
- <http://www.Digital Library.htm> "Carbon nanotube"
- <http://www.nsrut.ac.th/science/article/showarticle.asp?id=0000000012> "Carbon nanotube"
- <http://www.thaiscience.com/lab.vol/p13cabon%20nanotubes.htm> "Carbon nanotube"



## ภาคผนวก

| ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ชี้แจงโดยนักวิจัย                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ตรวจสอบคำผิด เช่น หน้า (1) บรรทัดที่ 7 จากด้านล่าง ควรใช้คำว่า “ระหว่างทางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวตาไดอิน...” และหน้าที่ (2) บรรทัดที่ 3,8,17,15</li> <li>2. ตรวจสอบการเรียงหัวข้อเรื่องให้สอดคล้องกับสารบัญด้วย พร้อมทั้งให้ตรงกับหมายเลขหน้า</li> <li>3. หน้า (2) ข้อสรุปผลการวิจัย ข้อ 2 ควรสรุปให้ชัดเจนกว่านี้ และให้ใช้คำที่ใช้กันทั่วไป เช่น การต้านแรง (มอดูลัส)</li> <li>4. บทคัดย่อ ควรเขียนสรุปงานทั้งหมด ตั้งแต่บทนำ วิธีการ ผลที่ได้ (ไม่ใช่การวิเคราะห์ วิจารณ์ผลอีก) ผู้อ่านบทคัดย่อจะรู้ทันทีว่าทำอะไร ได้อะไร ส่วนรายละเอียดมากกว่านั้นก็อ่านจากฉบับเต็ม</li> <li>5. การใช้คำว่ายางสไตรีนบิวตาไดอิน ใช้ SBR หรือ เอสบีอาร์ หรือยางสไตรีนบิวตาไดอิน ควรใช้ให้เหมือนกันตลอดทั้งเล่ม</li> <li>6. หน้า (9) คำว่า “รายการรูป (ต่อ)” ควรใช้คำว่า “สารบัญรูป (ต่อ)”</li> <li>7. หน้า 3 “เอทิลีนเตตระฟลูออโรเอทิลีน” ควรใช้คำว่า “พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน”</li> <li>8. หน้า 7 บรรทัดที่ 1 และ 7 จากด้านล่าง แก้ไข “PE” เปลี่ยนเป็น “PP”</li> <li>9. หน้า 10 ตรวจสอบหน่วยการนำไฟฟ้า “s/m” ย่อมาจากอะไร ถูกต้องหรือไม่</li> <li>10. ตรวจสอบวิธีการทดสอบในทุกแห่ง ควรอ้างมาตรฐานการทดสอบให้ครบถ้วนและควรเป็นปีล่าสุดด้วยเช่นหน้า 11</li> <li>11. หน้า 13 บรรทัดที่ 6 หน่วย <math>m^2</math> ควรแก้เป็น <math>mm^2</math>, m ควรแก้เป็น mm</li> <li>12. หน้า 14 บรรทัดที่ 5 คำว่า “เนื้ออย่างเดียวกัน” หมายความว่าอย่างไร และคำว่า “SAW” แก้ไขเป็น “SAE” คำว่า “มิลลิตร” แก้ไขเป็น “มิลลิลิตร”</li> <li>13. ตรวจสอบการพิมพ์ไม่ครบในหน้า 15 บรรทัดที่ 10 จากด้านล่าง “โดยมีวิธีการทดสอบดังนี้” แล้วข้อความก็ขาดหายไป</li> <li>14. ควรสรุปผลงานวิจัยให้รัดกุม กระชับ เช่น สัดส่วนที่ตีระหว่าง NR+SBR และปริมาณท่อนาโนคาร์บอน หากมีการพัฒนาของคอมพาวด์ระหว่างยาง NR และ SBR ควรสรุปให้เห็นเด่นชัดว่า ได้พัฒนาอย่างไรบ้าง และมีข้อดีต่อการผสมที่มีการดำเนินการอยู่แล้วทั่วไปอย่างไร เพราะมีข้อมูลการผสม NR กับ SBR มาก และการนำเสนอในบทสรุปผู้บริหารและบทคัดย่อกลับสรุปได้ไม่ชัดเจนจากงานวิจัยที่แท้จริง</li> </ol> | <p>ดำเนินการแก้ไขแล้วหน้า (1), (2), (3), (4), (5), (7), (8), 1, 3, 4 ....</p> <p>ดำเนินการแก้ไขแล้วหน้า(2)</p> <p>ดำเนินการแก้ไขแล้วหน้า(3)</p> <p>ดำเนินการแก้ไขแล้วหน้า(4)</p> <p>ดำเนินการแก้ไขแล้วโดยใช้คำว่า เอสบีอาร์</p> <p>ดำเนินการแก้ไขแล้วหน้า(7)<br/>ได้ตัดเนื้อหาส่วนนี้ออกไปแล้ว</p> <p>ได้ตัดเนื้อหาส่วนนี้ออกไปแล้ว<br/>แก้ไขเป็น A/cm<sup>2</sup> หน้า 4</p> <p>ดำเนินการแก้ไขแล้วหน้า 5 และ 6</p> <p>ดำเนินการแก้ไขแล้วหน้า 6</p> <p>ดำเนินการแก้ไขแล้วหน้า 6</p> <p>ดำเนินการแก้ไขแล้ว</p> <p>ดำเนินการแก้ไขให้ชัดเจนแล้วหน้า 22</p> |

### ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)

1. หน้า 14 การที่นักวิจัยทดสอบที่ 3 วัน หรือ 7 วัน อ้างอิงจากอะไรอุณหภูมิเท่าไร
2. หากจะพัฒนาสูตรอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ ควรแนะนำได้ว่ายางผสมชนิดนี้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ประเภทใด และควรมีสูตรพื้นฐานอย่างไร เพื่อจะได้นำไปพัฒนาสูตรต่อไป
3. เมื่อได้สัดส่วนที่เหมาะสมระหว่าง NR และ SBR โดยการเติมท่อนาโนคาร์บอนควรพัฒนาการผลิต โดยการขึ้นรูปหรือศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางชนิดใดชนิดหนึ่ง ศึกษาสมบัติและสูตรที่เหมาะสม ซึ่งจะเป็นการพัฒนาการผลิตไปจนถึงผลิตภัณฑ์ว่าจะเป็นประโยชน์มากขึ้น และเป็นแนวทางให้ผู้สนใจ สามารถเห็นประโยชน์และพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

อ้างอิงจากบทความวิจัยที่อุณหภูมิห้อง

ดำเนินการแก้ไขแล้วหน้า 22

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้น มีเวลาและงบประมาณที่จำกัด จึงไม่สามารถศึกษาการทำเป็นผลิตภัณฑ์ได้เพราะมีรายละเอียดการใช้งานเฉพาะที่ต้องศึกษาพิจารณาอีกหลายตัวแปร แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปที่จะมีการศึกษาต่อไปได้สำหรับผู้สนใจ