

## 5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับผลของการเติมท่อนาโนคาร์บอนในยางคอมปอนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์นั้น ต่อสมบัติการขึ้นรูปหรือสมบัติวัลคาไนซ์ สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี สมบัติทางความร้อน และสมบัติทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต ซึ่งจะได้กล่าวเป็นลำดับดังต่อไปนี้

### 5.1 สมบัติการขึ้นรูปของยางคอมปอนด์

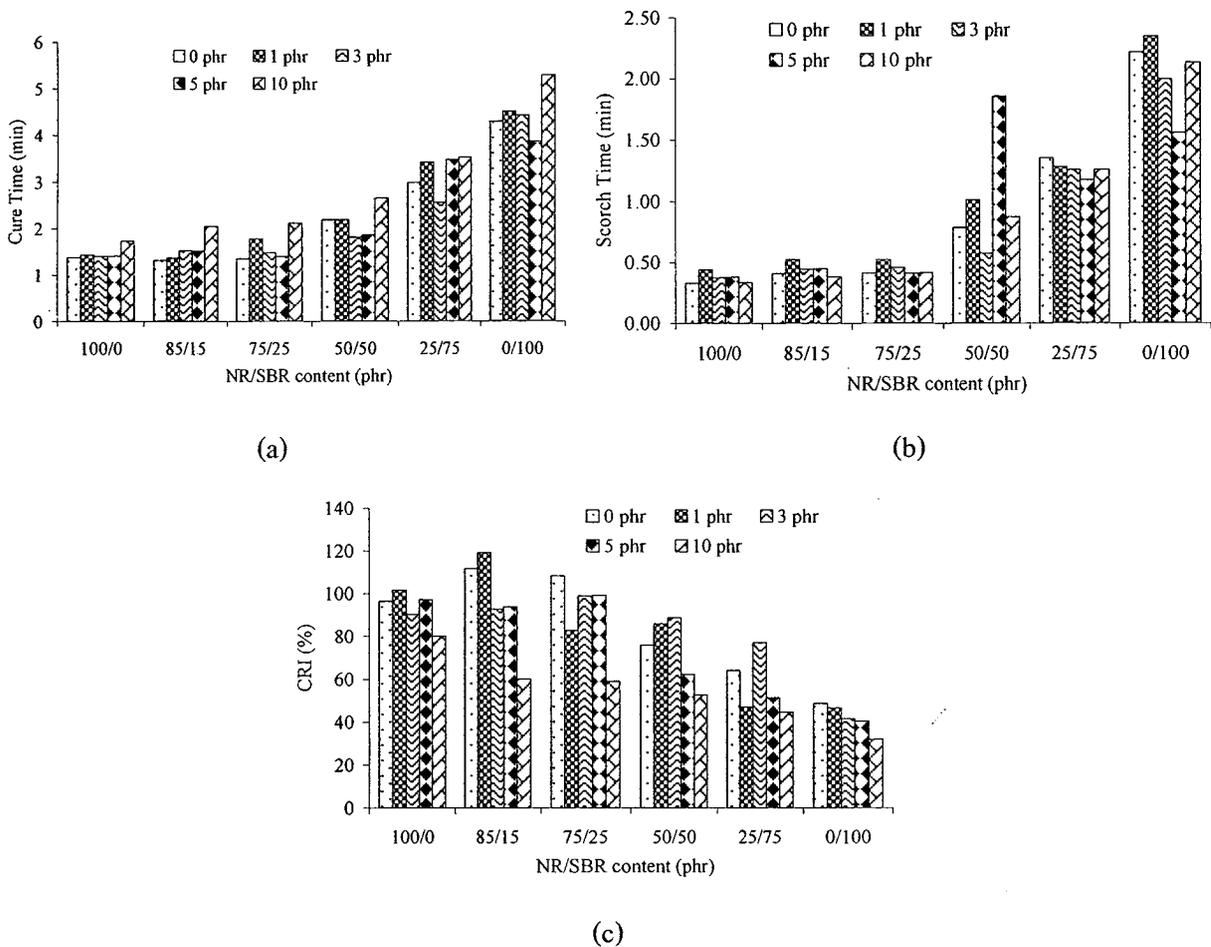
ค่าที่ 0 phr คือ ค่าของยางคอมปอนด์สูตรต่างๆที่ไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน ในการทดลองนี้ได้เติมปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนเป็น 1, 3, 5, และ 10 phr จากรูปที่ 5.1 (a) เวลาในการวัลคาไนซ์ของยางคอมปอนด์ที่ยังไม่เติมท่อนาโนคาร์บอน จะสูงขึ้นตามปริมาณของยาง SBR ที่เพิ่มขึ้น โดยสูตรยางที่มีปริมาณของยางเอสปีอาร์ 100 phr จะใช้เวลาในการวัลคาไนซ์นานที่สุด การเติมยาง SBR ในปริมาณที่ไม่เกิน 25 phr จะใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ ไม่เกิน 2 นาที ซึ่งใช้น้อยกว่ายางในสูตรอื่นๆ สำหรับรูปที่ 5.1 (b) พบว่าเมื่อปริมาณของยางเอสปีอาร์ในยางเพิ่มขึ้นส่งผลให้ยางมีเวลาการสกรอชเพิ่มขึ้น การใช้ยางเอสปีอาร์ในปริมาณ 50 – 100 phr เวลาในการสกรอชจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งใช้เวลานานกว่า 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 ระยะเวลาสกรอชซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิตแสดงถึงระยะเวลาที่ยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้นๆ และเวลาวัลคาไนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยางเอสปีอาร์ในยางคอมปอนด์เพิ่มขึ้น สำหรับยางผสมที่มีสารตัวเติม MWNTs จะเห็นว่า MWNTs (ปริมาณ 1~10 phr) มีผลต่อเวลาสกรอชและเวลาวัลคาไนซ์เล็กน้อย

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) พบว่าเวลาในการวัลคาไนซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มของ MWNTs จากรูปที่ 5.1 (b) การเติม MWNTs ในปริมาณที่แตกต่างกัน ยางจะมีเวลาการสก๊อชใกล้เคียงกัน โดยเปรียบเทียบในยางที่มีอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR เดียวกันจะสังเกตว่าการเติม MWNTs ในยางที่มีปริมาณของ NR 0-25 phr ให้ความเวลาในการสก๊อชประมาณ 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 เมื่อเปรียบเทียบกับการเติม MWNTs ที่ปริมาณอัตราส่วน NR/SBR อื่นๆ



รูปที่ 5.1 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ

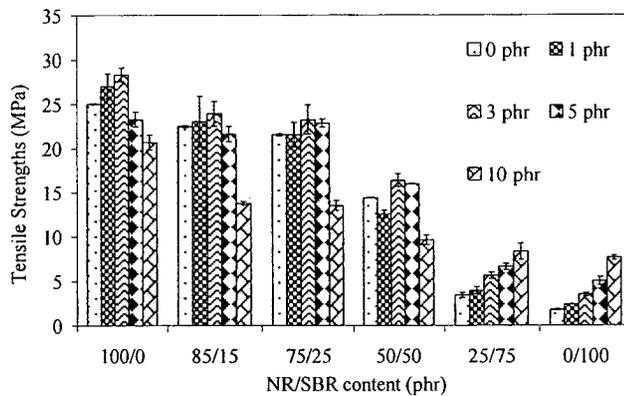
(a) Cure time (b) Scorch time (c) CRI (%)

## 5.2 สมบัติเชิงกลยางคอมปอนด์

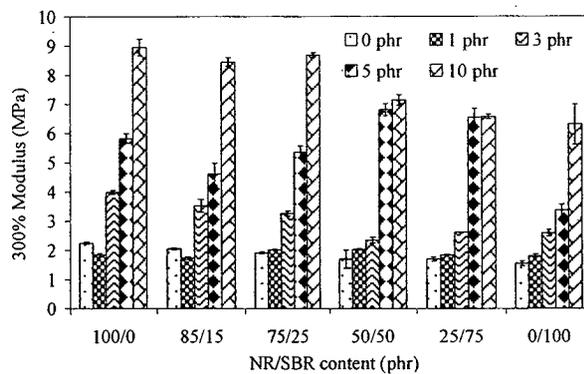
### 5.2.1 ผลของปริมาณอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR และ MWNTs ต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางผสม

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 ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้จะลดลง ส่วนในยางที่มีปริมาณของเอสปีอาร์ 75-100 phr พบว่าการเติม MWNTs ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามก็ยังทำให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับยางที่มีปริมาณของ เอสปีอาร์ 0-25 phr



รูปที่ 5.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ



รูปที่ 5.3 ค่ามอดูลัสของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ

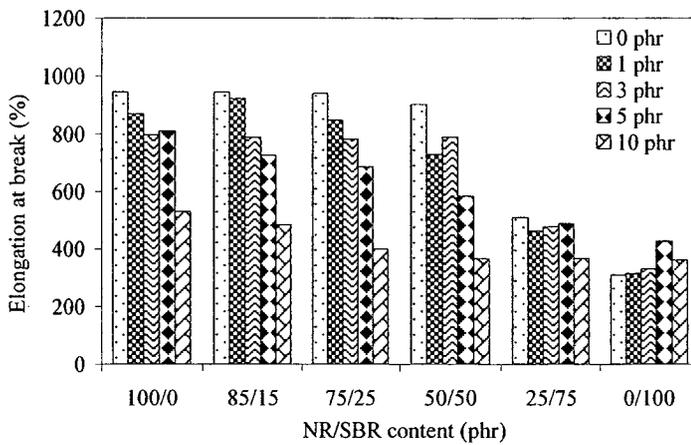
### 5.2.2 ผลของปริมาณ อัตราส่วนระหว่าง NR/SBR และ MWNTs ต่อค่ามอดูลัส

จาก รูปที่ 5.3 พบว่าค่ามอดูลัส จะลดลงตามปริมาณของยาง NR ที่ลดลง เนื่องจากโดยปกติยางเอสปีอาร์จะมีค่ามอดูลัสต่ำกว่ายางธรรมชาติ กล่าวคือ 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

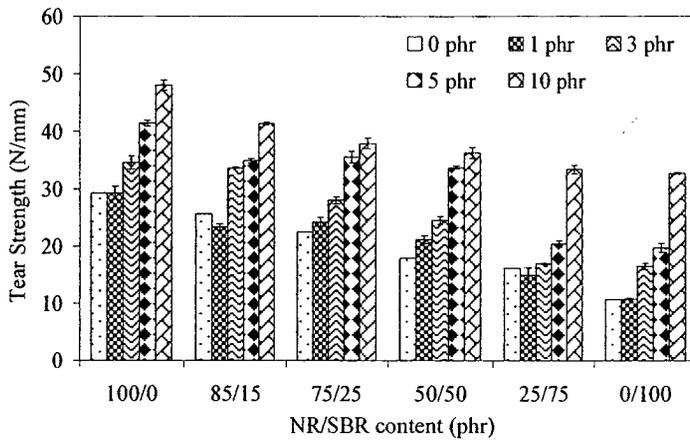
ค่ามอดูลัสแสดงถึงความสามารถในการต้านทานแรงได้ของวัสดุ ดังนั้น MWNTs จึงสามารถเพิ่มความแข็งแรงของยางแต่ละชนิดและยางคอมปอนด์อย่างมีนัยสำคัญ

5.2.3 ผลของปริมาณอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR และ MWNTs ต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยืดจนขาด

ตามที่ทราบกันแล้วว่า จุดเด่นของยางธรรมชาติ คือ มีความยืดหยุ่น โดยยางธรรมชาติสามารถยืดได้มากกว่าเมื่อเทียบกับยางเอสปีอาร์ จากรูปที่ 5.4 พบว่าในยางที่ไม่เติม MWNTs ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดจนขาดในยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่ายางเอสปีอาร์ประมาณ 320 % และเมื่อเติม MWNTs ในปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดลดลงซึ่งจะมีพฤติกรรมเหมือนกับสารตัวเติมในยางชนิดอื่นๆ เช่น เขม่าดำ หรือ เกลย์ เพราะสารตัวเติมเหล่านี้บางส่วนไปตัดโมเลกุลของยางให้สั้นลง



รูปที่ 5.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดจนขาดของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติมด้วย MWNTs ที่ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 5.5 ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางคอมปอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ

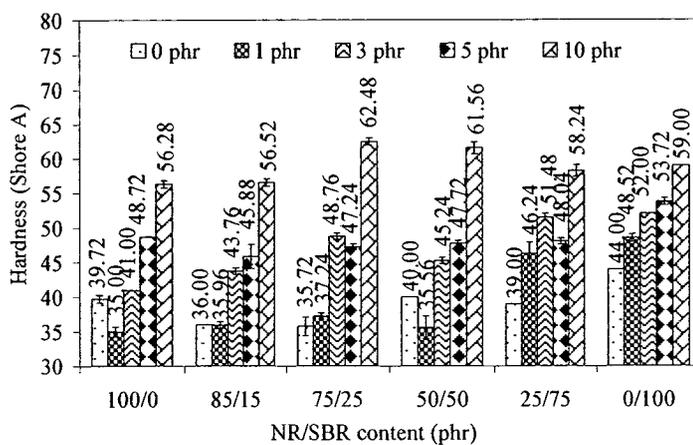
5.2.4 ผลของปริมาณอัตราส่วนระหว่าง NR /SBR และ MWNTs ต่อค่าความต้านทานการฉีกขาด

ค่าความต้านทานการฉีกขาดของยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์มีค่า 29 N/mm และ 10 N/mm ตามลำดับ และพบว่าความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางคอมปอนด์จะลดลงเมื่อมีปริมาณยางเอสปีอาร์เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5.5) การ

เติม MWNTs มีผลต่อความต้านทานต่อการฉีกขาดของคอมเปานด์ โดยปริมาณ MWNTs ที่เพิ่มขึ้นจาก 1-10 phr ทำให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์

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

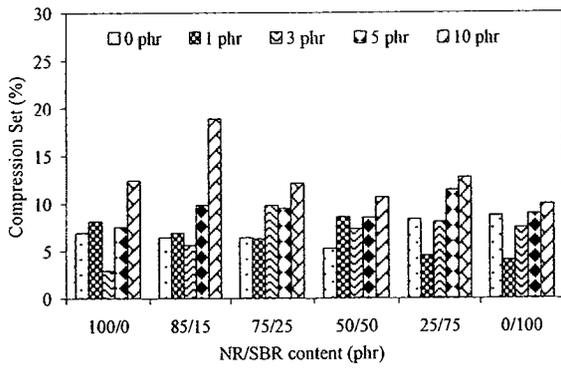
จากรูปที่ 5.6 พบว่ายางคอมเปานด์ในอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR ต่างๆ ซึ่งไม่เติม MWNTs จะให้ค่าความแข็งไม่สม่ำเสมอ แต่ที่น่าสังเกตคือ การเติมยางธรรมชาติหรือยางเอสปีอาร์เพียงลำพัง จะให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าการผสมยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ เมื่อพิจารณาจากกราฟ ค่าความแข็งของยางจะเพิ่มขึ้น ตามปริมาณของ MWNTs และ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



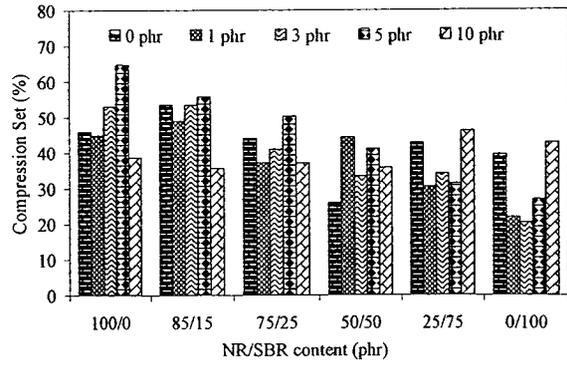
รูปที่ 5.6 ค่าความแข็งของยางคอมเปานด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ

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

การเสีรูปหลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าต่ำกว่า 10 % ซึ่งมีการเสีรูปในปริมาณที่น้อย ในขณะที่อุณหภูมิ 70 °C ยางจะมีค่าการเสีรูปมากกว่า ที่อุณหภูมิ 25 °C อยู่ประมาณ 10 เท่า โดยการเสีรูปจะลดลงตามปริมาณของยางเอสปีอาร์ที่เพิ่มขึ้น จากรูปที่ 5.7(a) การเสีรูปหลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 25 °C มีค่าไม่สม่ำเสมอ แต่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ MWNTs เพราะสารตัวเติมจะไปลดค่าความยืดหยุ่นของยางลง (Thongsang et al, 2006) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าการเสีรูปหลังการกดที่อุณหภูมิ 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 จะทำให้ค่าการเสีรูปหลังการกดลดลง เมื่อเทียบกับยางคอมเปานด์ที่ไม่เติม MWNTs แต่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติม MWNTs 10 phr ปรากฏการณ์นี้ค่อนข้างซับซ้อน ซึ่งอาจเนื่องมาจากการนำความร้อนที่ฉีกของ MWNTs การเสีรูปหลังการกดของยางที่อุณหภูมิ 70 °C มีแนวโน้มลดลง ตามปริมาณของ MWNTs ที่เพิ่มขึ้น



(a) 25°C

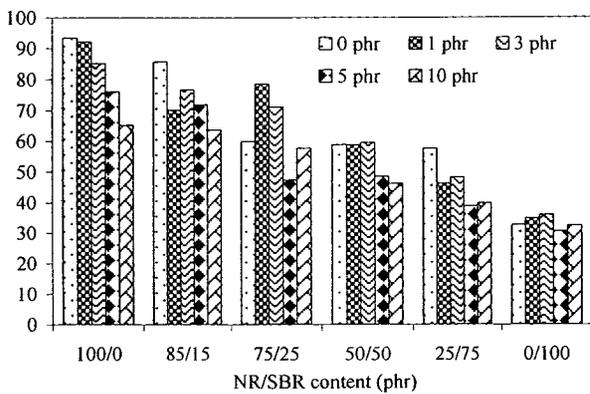


(b) 70°C

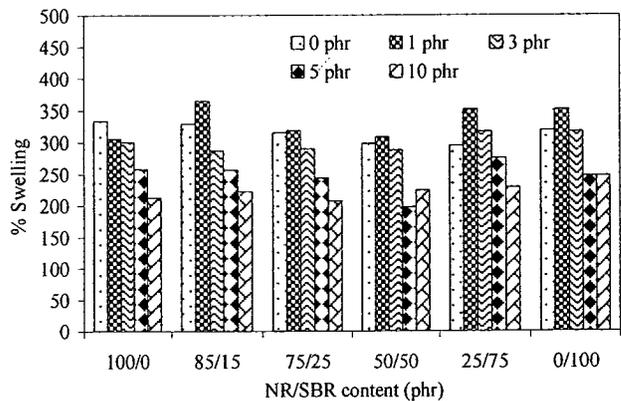
รูปที่ 5.7 ค่าการเสียรูปหลังการกดของยางคอมปอนด์สูตรต่างๆที่เติม MWNTs ในปริมาณต่างๆ

### 5.3 สมบัติทางเคมีของยางคอมปาวด์

5.3.1 ผลของปริมาณ อัตราส่วนระหว่าง NR/SBR และ MWNTs ต่อการบวมตัว (%Swelling) ในน้ำมันและ โทลูอีน พบว่าการบวมตัวของยางคอมปอนด์ในน้ำมันจะลดลงเมื่อผสมยางเอสปีอาร์ในปริมาณมากขึ้น ยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์จะไม่ทนต่อโทลูอีน จึงทำให้ยางคอมปอนด์ไม่ทนต่อโทลูอีน การบวมในน้ำมันและโทลูอีนมีแนวโน้มจะลดลงตามปริมาณของ MWNTs ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5.8) เนื่องจากการบวมตัวจะเกิดขึ้นในเนื้อยางเท่านั้นไม่เกิดขึ้นกับสารตัวเติม 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

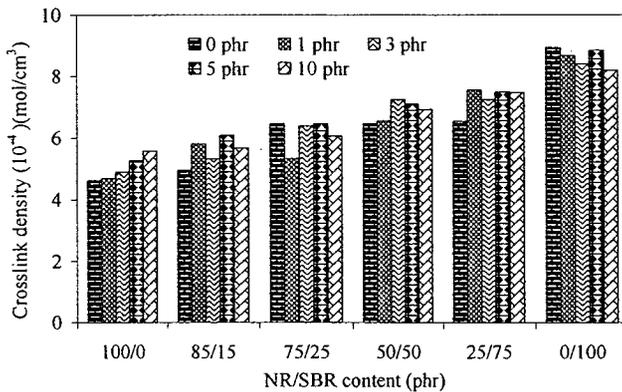


(b) ในโทลูอีน

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 พบว่าปริมาณยางเอสปีอาร์ในยางคอมปาวด์ที่เพิ่มขึ้นจะเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมขวางและพบว่าค่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางคอมเปานด์สูงขึ้นเมื่อเพิ่มสารตัวเติม  $\sim 10$  phr ด้วยเช่นกัน(รูปที่ 5.9) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของยางคอมเปานด์สูตรต่างๆ 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 ความหนาแน่นการเชื่อมขวางของยางคอมเปานด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ เมื่อเติมและไม่เติม MWNTs ที่ปริมาณต่างๆ

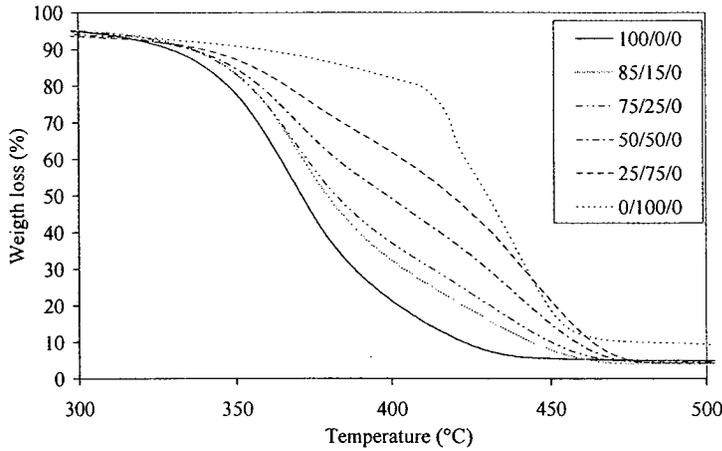
## 5.4 สมบัติทางความร้อนของยางคอมปาวด์

### 5.4.1 ผลของปริมาณอัตราส่วนระหว่าง NR/SBR ต่อน้ำหนักที่สูญหายภายใต้ความร้อน

จากรูปที่ 5.10 และตารางที่ 5.2 พบว่า ยางเอสปีอาร์ทนความร้อนได้ดียางธรรมชาติ ดังนั้นในยางคอมเปานด์ระหว่างยางธรรมชาติและยางเอสปีอาร์ทนความร้อนได้เพิ่มขึ้นตามปริมาณยางเอสปีอาร์ที่เพิ่มขึ้น 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 ผลของการทดสอบความเสถียรทางความร้อนของยางคอมปอนเปานด์ด้วยเครื่อง TGA

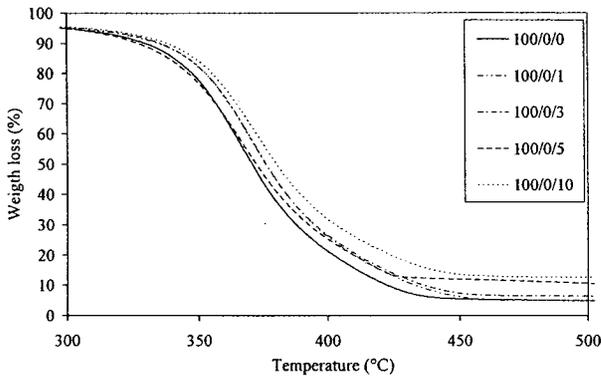
NR/SBR	ปริมาณ MWNTs	T <sub>5</sub> (°C)	T <sub>10</sub> (°C)	T <sub>50</sub> (°C)	ปริมาณเถ้า ณ อุณหภูมิ 750°C (%)
100/0	0	299	329	370	3.5
	1	297	334	376	4.7
	3	304	335	376	6.1
	5	299	326	372	3.1
	10	307	338	380	12.4
85/15	0	303	336	379	3.6
	1	294	335	381	4.6
	3	292	328	377	3.3
	5	307	337	382	8.2
	10	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



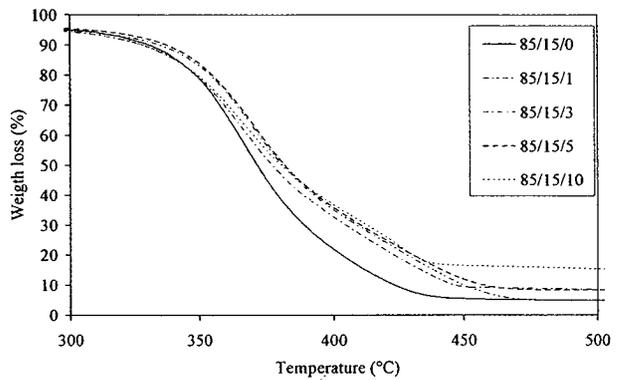
รูปที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางธรรมชาติที่ไม่มีสารเติม

5.4.2 ผลของ MWNTs ต่อน้ำหนักที่สูญหายของยางคอมพอนัดภายใต้ความร้อน

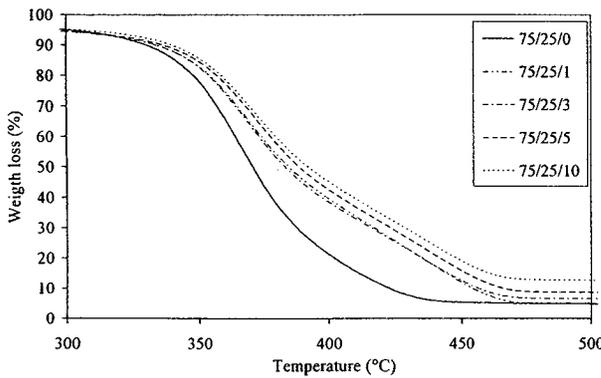
เมื่อเติมท่อนาโนคาร์บอนในยางคอมพอนัดเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ยางคอมพอนัดทนความร้อนสูงขึ้น ดังแสดงด้วยค่า  $T_{50}$  ในตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.11 การเติมท่อนาโนคาร์บอนซึ่งเป็นตัวนำความร้อนที่ดีจะถ่ายเทความร้อนสู่ผิวได้เร็ว จึงทำให้ความร้อนมีอิทธิพลต่อการหลอมยางลดลง



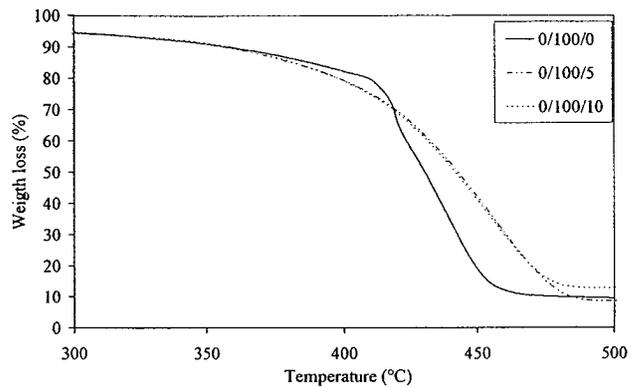
(a) ยางธรรมชาติ



(b) ยางคอมพอนัด NR/SBR = 85/15



(c) ยางคอมพอนัด NR/SBR = 75/25



(d) ยางเอสปีอาร์

รูปที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA ของยางคอมพอนัดที่เติม MWNTs ที่ปริมาณต่างๆ

## 5.5 การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต

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

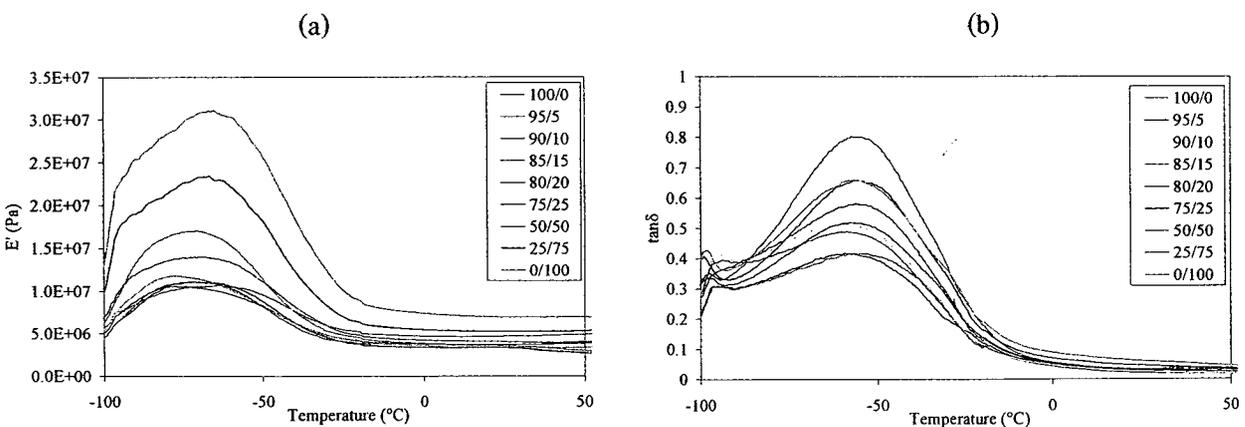
$E'$  มีค่าสูง แสดงว่า การกระจายตัวของสารตัวเติมในชิ้นงานตัวอย่างยังไม่ดี เกิดการรวมกันเป็นก้อนอยู่กับโมเลกุลของยางที่แทรกระหว่างสารเติม จึงถูกรั้งไว้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ยาก

$\tan \delta$  มีค่าสูง แสดงว่า แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคที่เกิดรวมตัวกันเป็นก้อนที่ไม่แข็งแรงของสารตัวเติมในบางบริเวณ และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคและพอลิเมอร์บริเวณที่ เกาะกันไม่ดี จึงส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานไม่แข็งแรงเท่าที่ควร

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

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

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

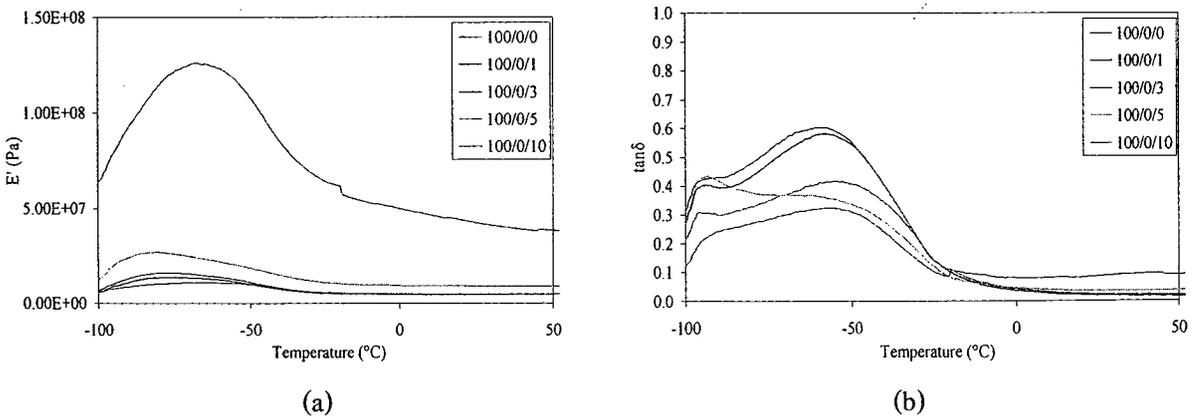


รูปที่ 5.12  $E'$  (a) และ  $\tan \delta$  (b) ของยางคอมพอนัดที่ไม่มีสารตัวเติม

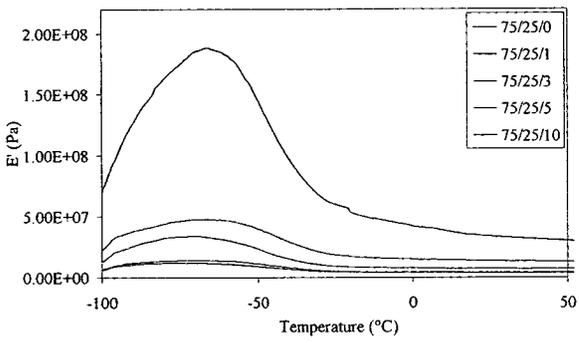
5.2 ผลของ MWNTs ต่อค่ามอดุลัสสะสม ( $E'$ ),  $\tan \delta$ , และอุณหภูมิ  $T_g$  จากการวิเคราะห์ด้วย DMTA

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

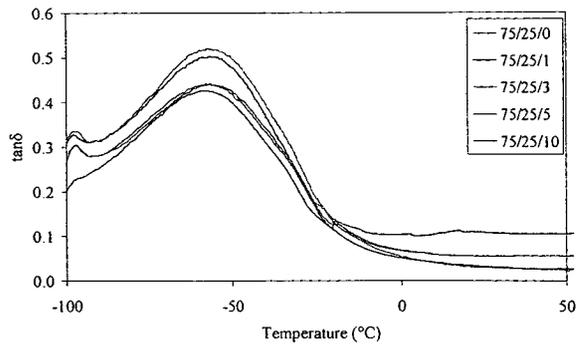
สำหรับค่า  $\tan \delta$  ของยางคอมเปานด์ที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนไหวของโมเลกุลมาก ในกรณีที่ มีสารตัวเติมขนาดระดับจุลภาคในระบบ ค่า  $\tan \delta$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น (Hamdan et al, 2004) ซึ่งการที่มีสารตัวเติมมากขึ้น ทำให้ค่า  $\tan \delta$  สูงขึ้น เพราะเป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคต่ออนุภาคที่เกิดรวมตัวกันเป็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



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

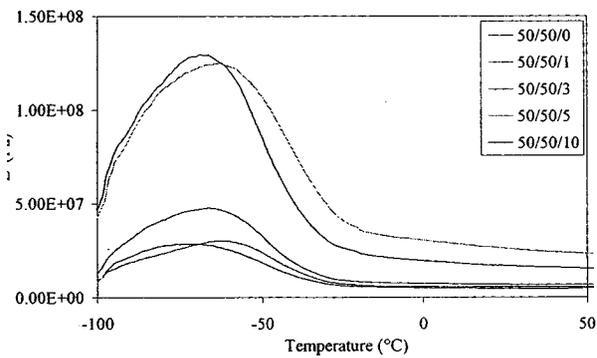


(a)

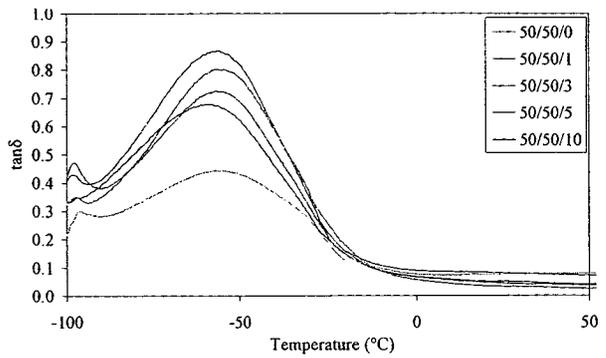


(b)

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

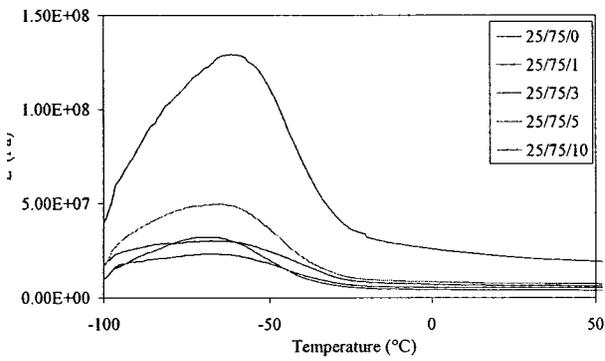


(a)

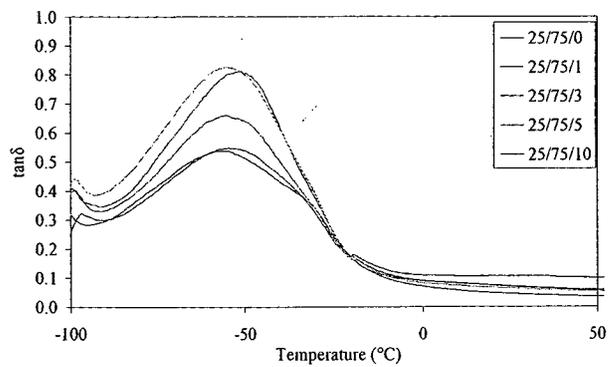


(b)

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

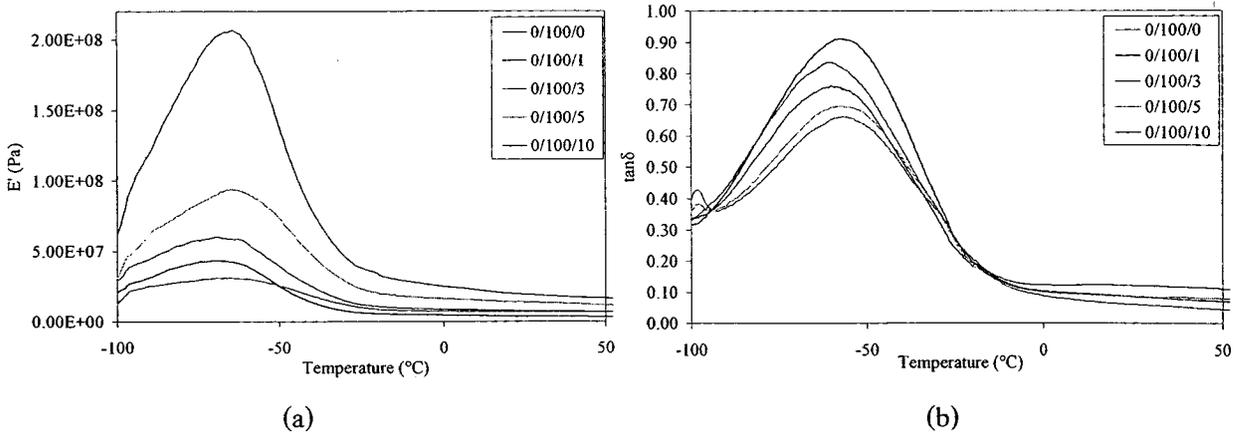


(a)



(b)

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



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

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

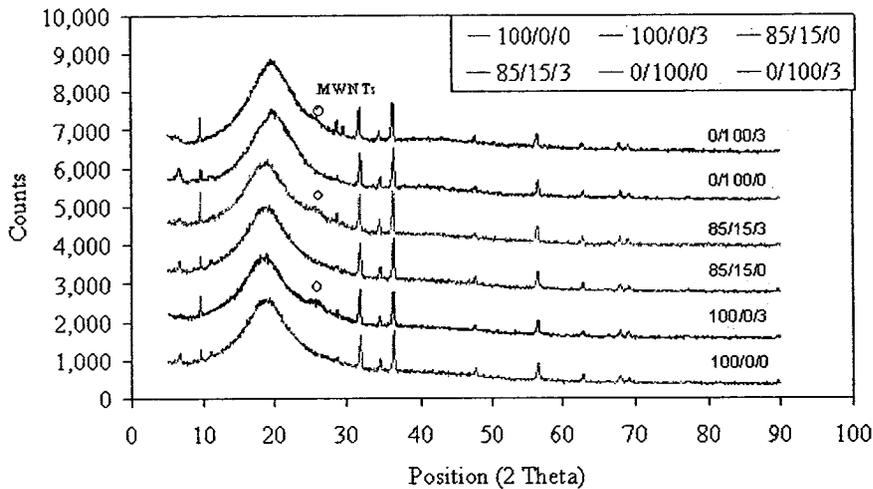
ตารางที่ 5.3 อุณหภูมิ  $T_g$  ที่ได้มาจากผลการวิเคราะห์ค่าสูงสุดของค่า  $\tan \delta$  ด้วยเครื่อง DMTA

ยางคอมพอนด์ 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 ผลของท่อนาโนคาร์บอนที่ผสมในยางคอมพอนด์ต่อสเปกตรัมที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD และ FT-IR

### 5.6.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD

ผลการวิเคราะห์ยางคอมพอนด์ที่เติมและไม่เติม MWNTs แสดงดังรูปที่ 5.18 จะเห็นพีคที่มุม  $2\theta = 20$  องศา เป็นพีคของยางคอมพอนด์ และพีคที่มุม 27 องศาเป็นพีคของ MWNTs จะเห็นว่าในกรณียางคอมพอนด์ที่ไม่ได้เติม MWNTs จะไม่ปรากฏพีคนี้ แสดงว่า MWNTs 3 phr ที่เติมเข้าไปในยางคอมพอนด์ สามารถกระจายตัวในเนื้อของยางคอมพอนด์อย่างดี

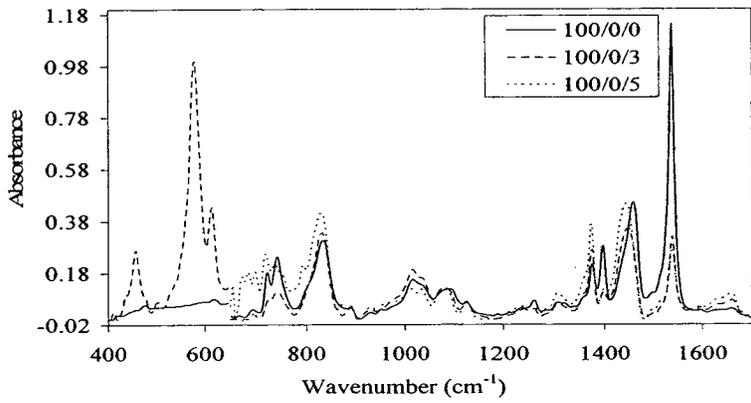


รูปที่ 5.18 ผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของยางคอมพอนันต์ที่เติม MWNTs

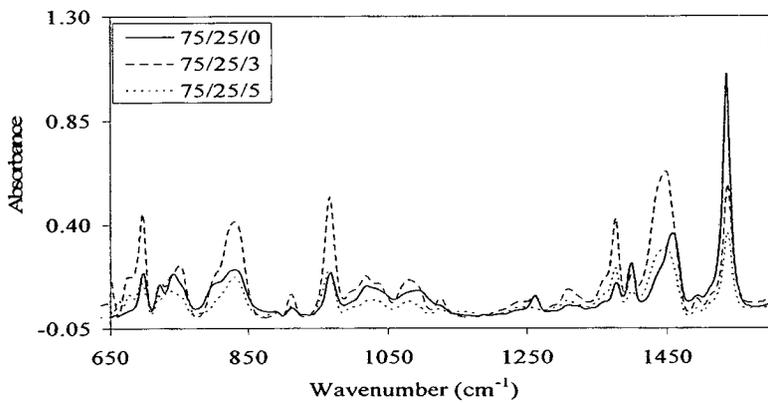
### 5.6.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยรังสีอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าค่าการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรดที่บอกเอกลักษณ์ของยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างเป็น 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) เป็นสเปกตรัมของยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติม โดยตำแหน่งของการงอของพันธะ 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

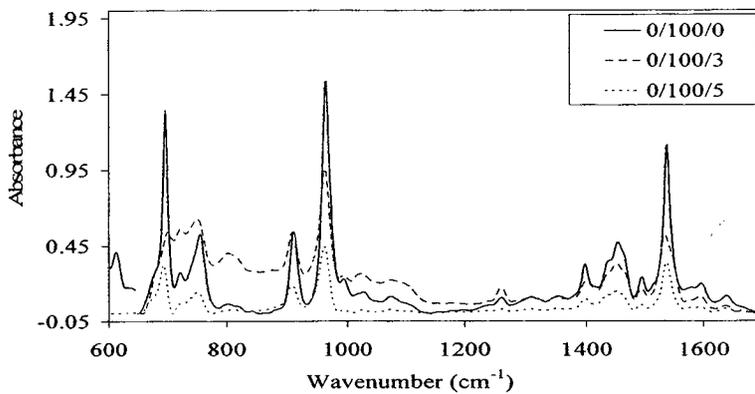
เมื่อพิจารณาเส้นกราฟที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าพีค FT-IR ของยางธรรมชาติดังรูปที่ 5.19 (เส้นกราฟของสูตร 100/0/0) และยางเอสปีอาร์ดังรูปที่ 5.21 (เส้นกราฟของสูตร 0/0/100) ไม่ค่อยต่างกันมากนัก พีคที่แตกต่างกันที่ค่าเลขคลื่นพีคของยางธรรมชาติปรากฏที่ 653.8, 673.1, 873.7, 929.7, 1018.4, 1035.7 และ 1373.2 ในขณะที่พีคของยางเอสปีอาร์ปรากฏที่ 696.3, 813.9, 908.5, 962.4 และ 997.1 และเมื่อเติมท่อนานโนคาร์บอนในยางธรรมชาติและยางคอมพอนันต์ พบว่าปรากฏพีคใหม่ที่แตกต่างกับยางธรรมชาติและยางคอมพอนันต์ที่เลขคลื่น 1030, 1080 และ 1154 ซึ่งแสดงถึงอาจเกิดการเชื่อมขวางทางเคมีขึ้นบางส่วนจากผลของการเติมท่อนานโนคาร์บอน (รูปที่ 5.19-5.21)



รูปที่ 5.19 ผลวิเคราะห์ FT-IR ของยางธรรมชาติที่เติมและไม่เติม MWNTs



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



รูปที่ 5.21 ผลวิเคราะห์ FT-IR ของยางเอสบิอาร์ที่เติมและไม่เติม MWNTs

## 5.7 การอภิปรายผล

จากการศึกษาผลของปริมาณสัดส่วนยางธรรมชาติและยางเอสบิอาร์ 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 การเสีรูปลหลังการกด และความแข็ง จากการวิจัยนี้พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงจะมีค่าสูงสุดในสูตรยางที่เหมาะสมคือ NR/SBR=75/25 และเติม MWNTs 1~3 phr ส่วนค่าโมดูลัสจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติม MWNTs

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

จากการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัตของยางคอมพอนด์ด้วย 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. ยางคอมพอนด์สูตร NR/SBR=85~75/15~25 ให้ค่าอัตราการวัลคาไนซ์สูง ขึ้นรูปได้ง่าย ตลอดจนให้สมบัติเชิงกลและการทนต่อน้ำมันสูงกว่ายางธรรมชาติ
2. ยางผสมระหว่างยางคอมพอนด์และท่อนาโนคาร์บอนสูตร NR/SBR=75/25 และ MWNTs ~3 phr จะให้สมบัติการขึ้นรูป สมบัติเชิงกล การทนต่อน้ำมัน โทลูอิน และความร้อนสูง เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุกันรั่วหรือปะเก็น
- 3.ยางผสม ระหว่างยางคอมพอนด์และท่อนาโนคาร์บอนสูตร NR/SBR=75/25 และ MWNTs 10 phr ซึ่งให้ค่าโมดูลัสสูงมาก ตลอดจนการทนต่อน้ำมัน โทลูอิน และความร้อนสูง เหมาะที่จะพัฒนาเป็นวัสดุที่ทนต่อแรงกดหรือแรงอัดสูง เช่น ยางรองแท่นเครื่องยนต์กันสั่นสะเทือน และยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น

## 7. ข้อเสนอแนะ

เมื่อพิจารณาผลการทดลองซึ่งเป็นการศึกษาเบื้องต้น พบว่ายังมีประเด็นที่ต้องศึกษาให้ละเอียดขึ้น เพื่อจะได้นำยางที่สังเคราะห์ใช้ประโยชน์ได้จริงต่อไป ดังนี้

1. ศึกษาหาวิธีที่ทำให้ท่อนาโนคาร์บอนกระจายตัวอย่างดีในเนื้อยางคอมพอนด์ เช่นการปรับสภาพผิวของสารตัวเติม
2. ศึกษาเมื่อได้สัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอสปีอาร์ ควรนำไปพัฒนาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เปรียบเทียบกับสารตัวเติมอื่นๆ เช่น เขม่าดำ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะประเมินความเป็นไปได้ในการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม