

---

ผลของอัตราส่วนความหนืดของยางธรรมชาติ (NR) และยางไนไตรล์ (NBR)  
Effect of Mooney Viscosity Ratio on Properties of NR/NBR Blends

ภุชงค์ ทับทอง<sup>1,2\*</sup> กรรณิกา หัตถะปะนิตย์<sup>1,2</sup> ชาคริต ลีริสิงห์<sup>2,3</sup> และพงษ์ธร แซ่อู๋<sup>1,2</sup>  
ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ<sup>1</sup>

ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล<sup>2</sup>  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล<sup>3</sup>

Puchong Thaptong<sup>1,2\*</sup> Kannika Halthapanit<sup>1,2</sup> Chakrit Sirisinha<sup>2,3</sup> and Pongdhorn Sae-oui<sup>1,2</sup>

National Metal and Materials Technology Center<sup>1</sup>

Research and Development Centre for Thai Rubber Industry (RDCTRI),

Faculty of Science, Mahidol University.<sup>2</sup>

Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University.<sup>3</sup>

---

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนความหนืดของยางธรรมชาติ (NR) และยางไนไตรล์ (NBR) ต่อสมบัติของยางผสม NR/NBR ที่สัดส่วนการผสม 60/40 โดยน้ำหนัก โดยก่อนที่นำยางทั้งสองชนิดดังกล่าวมาผสมกัน ได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความหนืดของยาง NR/NBR ให้เท่ากับ 2, 2.5, 3 และ 3.5 ซึ่งการปรับลดความหนืดของยาง NR และยาง NBR สามารถทำได้โดยวิธีการบดย่อยและการเติมยาง NBR เหลว (LNBR) ตามลำดับ หลังจากการผสม ได้นำยางคอมพาวด์ส่วนหนึ่งไปทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต และนำยางคอมพาวด์ส่วนที่เหลือไปขึ้นรูปและคงรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ จากการศึกษาพบว่า แม้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดจะมีส่วนช่วยในการปรับปรุงสมบัติในกระบวนการผลิต แต่เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดดังกล่าวส่งผลในเชิงลบต่อทั้งอัตราเร็วและระดับในการคงรูปของยาง ด้วยเหตุนี้ สมบัติเชิงกลต่างๆ ของยางผสม เช่น มอดูลัส ความแข็ง ความทนทานต่อแรงดึง รวมถึงการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดที่อุณหภูมิสูงจึงมีแนวโน้มด้อยลงตามการเพิ่มอัตราส่วนความหนืด อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลให้วัฏภาคของยาง NBR ที่กระจายตัวมีขนาดเล็กลง ดังนั้น การเพิ่มอัตราส่วนความหนืดจึงส่งผลในเชิงบวกต่อสมบัติความทนทานต่อความร้อนและน้ำมันของยาง กล่าวคือ ยางผสมที่มีอัตราส่วนความหนืดสูงจะมีความทนทานต่อความร้อนและน้ำมันสูงกว่ายางผสมที่มีอัตราส่วนความหนืดต่ำ

**คำสำคัญ :** ยางผสม อัตราส่วนความหนืด สัณฐานวิทยา ความทนทานต่อความร้อน ความทนทานต่อน้ำมัน

---

\*Corresponding author. E-mail : puchongt@mtec.or.th, teay\_@hotmail.com

## Abstract

The effect of viscosity ratio on properties of 60/40 NR/NBR blend was investigated in this study. The viscosity ratio of NR/NBR was varied from 2, 2.5, 3 and 3.5. Viscosity adjustment of NR and NBR prior to blending was achieved by the mastication process and the addition of liquid NBR (LNBR), respectively. After mixing, a portion of the rubber compound was used for the processability determination. The rest of the compound was then shaped and vulcanized for further tests. Even though increasing viscosity ratio gives rise to the processability improvement, it shows negative effects on both cure rate and state of cure. Deterioration of most mechanical properties such as modulus, hardness, tensile strength as well as compression set at elevated temperature is therefore inevitable when viscosity ratio is increased. Nevertheless, the results from the morphology study reveal that increasing viscosity ratio leads to the size reduction of NBR dispersed phase. Increasing viscosity ratio therefore gives positive effect on resistance to thermal ageing and oil of the blends, i.e., the blends with high viscosity ratio would possess greater resistance to thermal ageing and oil than those with low viscosity ratio.

**Keywords** : rubber blend, viscosity ratio, morphology, thermal ageing resistance, oil resistance

## 1. บทนำ

เทคโนโลยียางผสม (rubber blend technology) เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจาก (1) สามารถรวมเอาสมบัติเด่นของยางแต่ละชนิดเข้าไว้ด้วยกันได้โดยไม่ต้องใช้วิธีที่ซับซ้อน ซึ่งแตกต่างจากการตัดแปรทางเคมีในโมเลกุลของยาง ซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่า และ (2) สามารถช่วยลดต้นทุนทางการผลิต เช่น การนำยางที่มีราคาสูงกว่าผสมกับยางที่มีราคาแพงกว่า อย่างไรก็ตาม การนำเทคโนโลยียางผสมไปประยุกต์ใช้จำเป็นต้องทำด้วยความระมัดระวังเพราะสมบัติของยางผสมนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น สัดส่วนการผสม (blend ratio) แรงยึดติดระหว่างวัฏภาค (interfacial adhesion) การกระจายตัวของสารเคมีและการเชื่อมโยงในแต่ละวัฏภาค (distribution of chemicals and crosslinks between the rubber phases) และลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) (Andrew & Kevin, 1998) โดยทั่วไป ลักษณะทางสัณฐานวิทยาสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดถึงระดับความเข้ากันได้ของยางผสม กล่าวคือยางผสมที่มีขนาดของวัฏภาคที่กระจายตัวเล็กกว่า จะแสดงถึงความเข้ากันได้ของวัฏภาคยางที่ดีกว่า (เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนการผสมเท่ากัน) ส่งผลให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติดีขึ้น (Karnika de Silva & Micheal, 1998; Sirisinha *et al.*, 2001; Sirisinha *et al.*, 2003)

แม้ว่ายางธรรมชาติ (NR) เป็นยางที่มีสมบัติเชิงกลดีเยี่ยมเพราะสามารถตกผลึกได้เมื่อได้รับการดึงยืด (strain induced crystallization) แต่เนื่องจากยางธรรมชาติมีความเป็นขี้ต้ำยางธรรมชาติจึงมีข้อเสียหลักคือไม่ทนทานต่อน้ำมัน ในทางตรงกันข้าม ยางไนไตรล์ (NBR) เป็นยางที่มีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ (จำเป็นต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้น) แต่เนื่องจากยางชนิดนี้มีความเป็นขี้ต้ำสูง ดังนั้นยางไนไตรล์จึงมีสมบัติความทนทานต่อน้ำมันอยู่ในเกณฑ์ที่ดีด้วยเหตุนี้ การนำยาง 2 ชนิดนี้มาผสมกันจึงควรส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อน้ำมันที่ดี อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยางทั้ง 2 ชนิดนี้มีความเป็นขี้ต้ำที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังนั้น ยางทั้ง 2 ชนิดนี้จึงผสมเข้ากันได้ยาก ส่งผลทำให้วัฏภาคที่กระจายตัวของยางผสมมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ยางผสมที่ได้จึงมีสมบัติเชิงกลไม่ดีเท่าที่ควร การปรับปรุงความเข้ากันได้ของผสมคูนีมีหลายวิธี เช่น การใช้สารช่วยให้เข้ากันได้ (compatibilizer) (Karnika de Silva & Micheal, 1998; Kongsin & Micheal, 1998; Misra *et al.*, 2005) การปรับปรุงแรงยึดติด

ระหว่างวัฏภาค (interfacial strength) ให้สูงขึ้นโดยการปรับเปลี่ยนระบบการคงรูปและชนิดของตัวเร่ง (Micheal, 1998) การปรับเปลี่ยนสถานะในการผสม (Sirisinha *et al.*, 2001) นอกจากนี้ที่กล่าวมาข้างต้น การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความหนืด (viscosity ratio) ของยางทั้ง 2 ชนิดก่อนที่จะนำมาผสมกันก็เป็นเรื่องที่น่าสนใจ เนื่องจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความหนืดของพอลิเมอร์ผสมจะส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Fang *et al.*, 2000; Groeninckx *et al.*, 2004; Jana & Sau, 2004) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนความหนืดต่อสมบัติและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางผสม NR/NBR โดยกำหนดสัดส่วนการผสมระหว่างยาง NR/NBR คงที่เท่ากับ 60/40 (โดยน้ำหนัก) และทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความหนืดของยางผสมโดยปรับเปลี่ยนจากความหนืดของยาง NBR เป็นหลัก

## 2. ขอบเขตการวิจัย

### 2.1 วัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้ยาง NR เกรด STR 5L มีความหนืดเท่ากับ 78.8-ML1+4@100 °C ผลิตโดยบริษัทยูเนี่ยนรับเบอร์โปรดักส์ จำกัด ยาง NBR เกรด Zeon-Nipol DN 3335 ซึ่งมีปริมาณของอะโครโลไนไตรล์ 33% และมีความหนืดเท่ากับ 33.4-ML1+4@100 °C และยาง NBR เหลว (LNBR) เกรด N30L ที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 20,000-30,000 ผลิตโดยบริษัทซีออนคอปเปอร์เรชั่น สารเคมีชนิดอื่นๆ ที่ใช้ที่เป็นองค์ประกอบในการผสมเคมียาง ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (stearic acid) และกำมะถัน (S<sub>8</sub>) ได้รับมาจากบริษัทเคมีมินคอร์ปอเรชั่น จำกัด สารตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 2 ชนิดที่นำมาใช้ คือ เตตระ-เมทิลไฮดรอกซิลซิลไฟน์ (Perkasit®TMTD) และบิวทิล-2-เบนโซโธไซลิลฟีนาไมด์ (Santocure®TBBS) ได้รับมาจากบริษัทรีไลแอนซ์เทคโนโลยี (Flexsys) จำกัด

### 2.2 การปรับความหนืดของยาง NR และ NBR

ทำการปรับความหนืดของยาง NR โดยวิธีการบดย่อย (mastication) ด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Brabender 350E) ให้มีความหนืดของยางเท่ากับ 67.2 MU และทำการปรับความหนืดของยาง NBR โดยการเติมยาง LNBR เพื่อให้อัตราส่วนความหนืดของยาง NR/NBR เท่ากับ 2, 2.5, 3 และ 3.5 (ตารางที่ 1)

**ตารางที่ 1** การปรับลดความหนืดมูนีและอัตราส่วนความหนืดมูนีของยาง NR/NBR

ยาง NR		ยาง NBR		ความหนืดมูนี (MU) <sup>*</sup> NR/NBR	อัตราส่วนความหนืดมูนี NR/NBR
ระยะเวลาในการบด (นาที)	ความหนืดมูนี (MU) <sup>*</sup>	ปริมาณ LNBR (phr)	ความหนืดมูนี (MU) <sup>*</sup>		
4	67.2	0	33.4	67.2 / 33.4	2
		8	26.8	67.2 / 26.8	2.5
		15.5	22.2	67.2 / 22.2	3
		22.5	19.4	67.2 / 19.4	3.5

\* ML1+4@100°C

### 2.3 การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

ตารางที่ 2 แสดงสูตรการผสมเคมีที่ใช้ในงานวิจัย หลังจากการออกสูตรได้ดำเนินการผสมเคมีโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Brabender 350E) ตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของห้องผสมที่ 60°C ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ที่ 40 รอบต่อนาที และใช้ระยะเวลาในการผสมเท่ากับ 9 นาที โดยเริ่มด้วยการบดยาง NR และ NBR (ที่ผ่านการปรับความหนืดมูนีแล้ว) ในเครื่องผสมเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาทีจึงทำการเติมซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริกลงไป หลังจากนั้น 5 นาทีจึงทำการเติมกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วทำการผสมต่ออีกเป็นระยะเวลา 3 นาที ก่อนที่จะนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ท้ายสุดจึงแบ่งยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกนำไปวัดค่าความหนืดมูนีตามมาตรฐาน ASTM

D1646-87 ด้วยเครื่อง Mooney viscometer (ViscTech+) ที่อุณหภูมิ 100°C ส่วนที่ 2 นำไปศึกษาลักษณะการคงรูปของยางด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR TechPRO MD+) ที่อุณหภูมิ 155°C โดยนอกจากทำการบันทึกค่าระยะเวลาสกริช ( $t_{s2}$ ) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม ( $t_{c90}$ ) แล้ว ยังทำการบันทึกค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque, ML) และค่าแรงบิดสูงสุด (maximum torque, MH) ที่ได้จากการคงรูปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากผลต่างของค่าแรงบิดดังกล่าว (MH-ML) สามารถนำไปใช้ในการบ่งชี้ถึงระดับของการคงรูปหรือความหนาแน่นของการเชื่อมโยงได้ (Ismail & Anuar, 2000; Ismail & Poh, 2000; Park *et al.*, 2005) และส่วนที่ 3 นำไปขึ้นรูปสำหรับทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางคงรูปต่อไป

**ตารางที่ 2** สูตรการผสมเคมีของยางคอมพาวด์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยาง NR <sup>*</sup>	60
ยาง NBR <sup>*</sup>	40
ซิงก์ออกไซด์	3.0
กรดสเตียริก	2.0
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Santocure <sup>®</sup> TBBS)	1.0
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Perkasit <sup>®</sup> TMTD)	0.3
กำมะถัน	2.0

\* ผ่านการปรับลดความหนืดแล้ว

## 2.4 การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคกรูป

นำยางคอมพาวด์ไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (Carver, Inc.) ที่อุณหภูมิ 155 °C ตามระยะเวลาในการคกรูปที่เหมาะสมของยาง ( $t_{c90}$ ) จากนั้นจึงนำยางคกรูปที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติความแข็ง (hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 สมบัติแรงดึง (tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D412 (ตาย C) สมบัติการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด (compression set) ที่อุณหภูมิสูงตามมาตรฐาน ASTM D395 (method B) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน (thermal ageing resistance) ตามมาตรฐาน ASTM D573 โดยนำชิ้นทดสอบไปทำการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ไม่ได้รับการบ่มแรง และแสดงผลการทดสอบในรูปของสมบัติแรงดึงสัมพัทธ์ (relative tensile properties) ส่วนสมบัติความทนทานต่อน้ำมัน (oil resistance) ได้ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1817 โดยนำชิ้นทดสอบไปแช่ในน้ำมันไฮดรอลิก (Shell-Tellus 100) เป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติแรงดึงเปรียบเทียบกับสมบัติแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการแช่น้ำมัน ในกรณีนี้ สมบัติความทนทานต่อน้ำมันจะแสดงในรูปของสมบัติแรงดึงสัมพัทธ์และค่าการบวมตัว (swelling, R) ในน้ำมัน โดยค่าการบวมตัวในน้ำมันสามารถคำนวณได้จากสมการ :

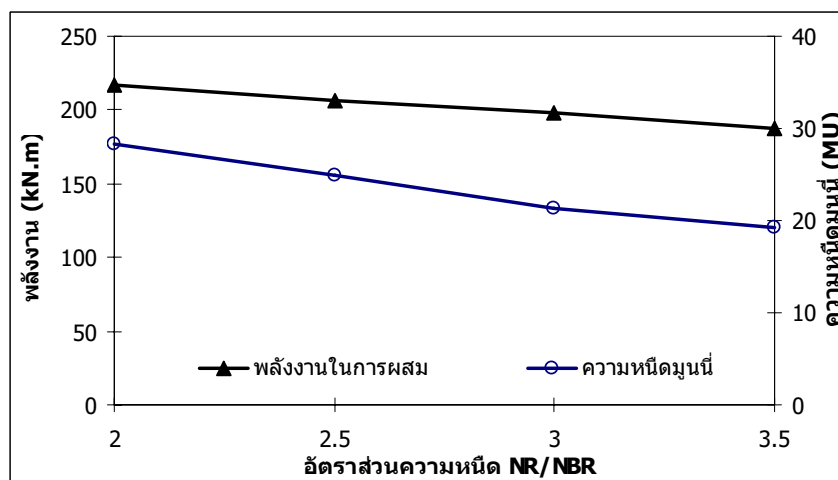
$$R (\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100$$

เมื่อ  $W_0$  และ  $W_1$  คือน้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนและหลังแช่น้ำมันตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) โดยใช้เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM, Multimode Nanoscope IIIA) อีกด้วย

## 3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

### 3.1 พฤติกรรมการผสม (Mixing behavior) และความหนืดมูนี (Mooney viscosity)

ภาพที่ 1 แสดงผลของอัตราส่วนความหนืดต่อค่าพลังงานที่ใช้ในการผสมและความหนืดมูนีของยาง จากรูปพบว่า การปรับเพิ่มอัตราส่วนความหนืดโดยการเติมยาง LNBR ลงไป ส่งผลทำให้ทั้งค่าพลังงานที่ใช้ในการผสมและค่าความหนืดมูนีของยางต่างก็มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากการเติมยาง LNBR ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลวลงไป จะส่งผลทำให้ความหนืดของยาง NBR ลดลง จึงส่งผลทำให้ความหนืดของยางผสมและพลังงานที่ใช้ในการผสมลดลงตามไปด้วย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ การลดลงของพลังงานที่ใช้ในการผสมและความหนืดของยางคอมพาวด์เป็นผลมาจากการพลาสติกไซซ์ (plasticizing effect) ของยาง LNBR นั่นเอง

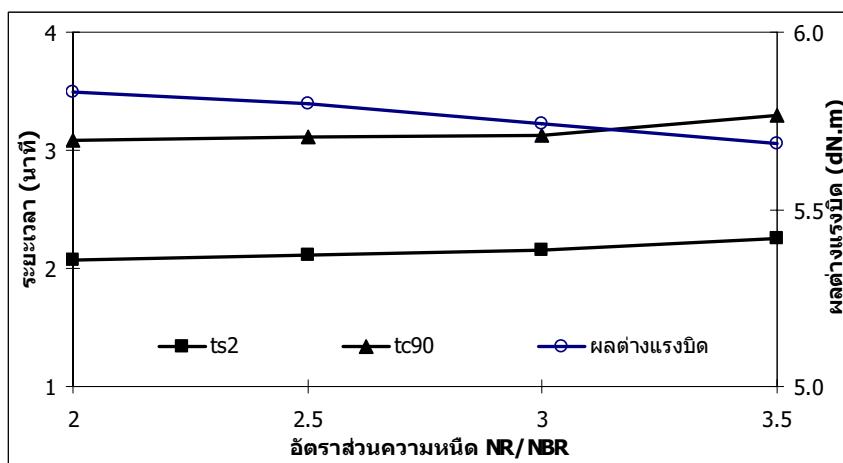


ภาพที่ 1 ผลของอัตราส่วนความหนืดต่อค่าพลังงานในการผสมและความหนืดมูนี (ML1+4@100 °C)

### 3.2 ลักษณะการคงรูป (Cure characteristics)

ผลของอัตราส่วนความหนืดต่อระยะเวลาสกอริช ( $t_s$ ) ระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม ( $t_c$ ) และค่าผลต่างแรงบิดแสดงดังภาพที่ 2 จากภาพพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลกระทบในเชิงลบต่อลักษณะการคงรูปของยาง กล่าวคือพบว่าทั้งระยะเวลาสกอริชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมมีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่ค่าผลต่างแรงบิดกลับมีแนวโน้มต่ำลงเล็กน้อยตามการเพิ่มอัตราส่วนความหนืด แม้ว่าผลการทดลองดังกล่าวจะยังไม่มีค่าอธิบายที่ชัดเจน แต่ก็มีคาดการณ์ว่าจะเกิดจากอัตราเร็วในการแพร่ของกำมะถันจากวัสดุยาง NR

ไปยังวัสดุยาง NBR ที่สูงขึ้นตามอัตราส่วนของความหนืด ทั้งนี้ เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่ากำมะถันมีขีดความสามารถในการละลายและมีอัตราการแพร่ในยาง NBR ต่ำกว่ายาง NR ค่อนข้างมาก (Alliger & Sjothun, 1964) ดังนั้น การเพิ่มอัตราส่วนความหนืดโดยการปรับลดความหนืดของยาง NBR ลงจึงอาจส่งผลทำให้กำมะถันซึ่งส่วนใหญ่ชอบอยู่ในวัสดุยาง NR เกิดการแพร่ผ่านเข้าไปในวัสดุยาง NBR ได้ง่ายยิ่งขึ้น ทำให้วัสดุยาง NR ซึ่งเป็นวัสดุภาคต่อเนื้อที่มีปริมาณของกำมะถันลดลง จึงส่งผลต่อเนื้อทำให้ทั้งอัตราเร็วและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของยางผสมมีค่าต่ำลงเล็กน้อยตามการเพิ่มอัตราส่วนความหนืด

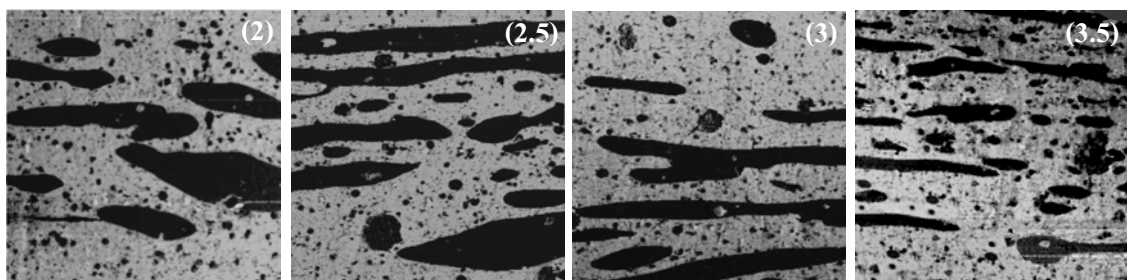


ภาพที่ 2 ผลของอัตราส่วนความหนืดต่อลักษณะการคงรูปของยาง

### 3.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ภาพที่ 3 แสดงผลของอัตราส่วนความหนืดต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางผสม โดยวัสดุที่กระจายตัว (สีเข้ม) คือวัสดุของยาง NBR และวัสดุภาคต่อเนื้อ (สีอ่อน) คือวัสดุของยาง NR จากรูปพบว่าที่อัตราส่วนความหนืดเท่ากับ 2 ยาง NBR มีขนาดของวัสดุที่ค่อนข้างใหญ่ ทั้งนี้ เพราะยาง NBR และยาง NR มีความเป็นขั้วต่างกันค่อนข้างมาก จึงมีระดับความสามารถในการเข้ากันได้ต่ำ เมื่อผสมเข้าด้วยกันจึงทำให้

วัสดุที่กระจายตัวมีขนาดที่ใหญ่ตามไปด้วย ผลการทดลองยังบ่งชี้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลให้วัสดุที่กระจายตัว (วัสดุของ NBR) มีขนาดเล็กลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะการเติม LNBR ลงไปส่งผลทำให้ความหนืดของยาง NBR ลดลง ดังนั้นเมื่อยางได้รับแรงเฉือนในระหว่างกระบวนการผสม วัสดุของยาง NBR ซึ่งมีความหนืดต่ำจึงเกิดการแตกตัวได้ง่าย ส่งผลทำให้ยาง NBR มีขนาดของวัสดุที่เล็กลง



ภาพที่ 3 AFM ไมโครกราฟแสดงสัณฐานวิทยาของยางผสม NR/NBR ที่อัตราส่วนความหนืดต่างๆ (Scan size 50  $\mu$ m)

### 3.4 สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ตารางที่ 3 แสดงผลของอัตราส่วนความหนืดต่อสมบัติเชิงกลต่างๆ ของยาง เช่น ความแข็ง ความทนทานต่อแรงดึง การยืดตัว ณ จุดขาด มอดูลัส และการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดที่อุณหภูมิ 70°C จากตารางพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลทำให้ยางผสมมีความแข็งแรงลดลง ซึ่งคาดว่าอาจเกิดจาก (1) ผลของความหนืดที่ลดลงของยาง NBR เพราะการเติมยาง LNBR ลงไปจะทำให้โมเลกุลของยาง NBR เคลื่อนที่ได้ง่ายยิ่งขึ้น ยางจึงนิ่มมากขึ้น และ (2) ผลจากการลดลงของความหนาแน่นของการเชื่อมโยง เนื่องจากความแข็งของยางจะแปรผันโดยตรงกับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยาง (Saeoui *et al.*, 2007) เป็นที่ทราบกันดีว่าค่ามอดูลัสมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งของยาง ดังนั้นจึงพบเช่นเดียวกันว่าค่ามอดูลัสของยางมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนความหนืดของยางเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนความหนืดต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางมีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ สำหรับระบบพอลิเมอร์ผสม (polymer blends) แล้ว ขนาดของภูมิภาคที่กระจายตัวเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมนั้นๆ ดังที่ได้มีการรายงานว่าพอลิเมอร์ผสมจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นเมื่อภูมิภาคที่กระจายตัวมีขนาดเล็ก (Fan *et al.*, 2007; Misra *et al.*, 2005) แต่จากผลการทดลองกลับพบว่ายางผสมที่มีขนาดของภูมิภาคที่กระจายตัวเล็ก (ที่อัตราส่วน

ความหนืดสูง) กลับมีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำกว่ายางผสมที่มีขนาดของภูมิภาคที่กระจายตัวใหญ่ (ที่อัตราส่วนความหนืดต่ำ) ในกรณีนี้คาดว่าผลของการลดลงของความหนาแน่นการเชื่อมโยงอาจมีอิทธิพลมากกว่าผลของสัญญาณวิทยา จึงทำให้ยางผสมมีความทนทานต่อแรงดึงลดลงอย่างช้าๆ ตามการเพิ่มอัตราส่วนของความหนืด นอกจากนี้ การเพิ่มอัตราส่วนความหนืดยังส่งผลทำให้ยางมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงขึ้นอีกด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการลดลงของความหนาแน่นการเชื่อมโยง เป็นที่ทราบกันดีว่ายางที่มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงจะยืดตัวได้น้อยกว่ายางที่มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำ จากตารางยังพบอีกว่าการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลให้ยางมีการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดที่อุณหภูมิ 70°C สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วนความหนืดเท่ากับ 3.5 ในทางทฤษฎีสมบัติการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดที่อุณหภูมิสูงจะขึ้นอยู่กับทั้งระดับความยืดหยุ่นและระดับความทนทานต่อความร้อนของยาง แต่จากสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยาง (จะได้กล่าวโดยละเอียดต่อไปในหัวข้อ 3.5) พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดทำให้ยางมีความทนทานต่อความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มขึ้นของค่าการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดที่อุณหภูมิ 70°C มีสาเหตุหลักมาจากการลดลงของความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยาง ซึ่งส่งผลต่อเนื่องทำให้ยางมีระดับความยืดหยุ่นที่ต่ำลง

ตารางที่ 3 ผลของอัตราส่วนความหนืดต่อสมบัติเชิงกลของยางผสม

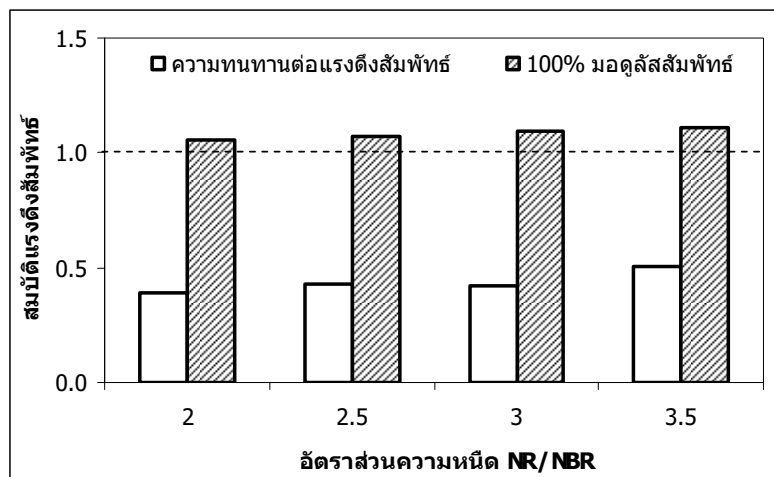
อัตราส่วนความหนืด NR/NBR	ความแข็ง (Shore A)	100% มอดูลัส (MPa)	ความทนทานต่อแรงดึง (MPa)	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	การยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด* (%)
2	48.4±0.2	0.95±0.00	15.00±1.58	505±14	27.77±0.49
2.5	47.7±0.3	0.90±0.01	14.96±0.63	529±9	28.38±1.16
3	47.2±0.3	0.87±0.02	14.23±0.77	528±18	29.15±0.77
3.5	46.7±0.3	0.85±0.01	13.84±0.20	549±16	35.31±1.50

\* ในสภาวะ 70°C, ระยะเวลา 22 ชั่วโมง

### 3.5 ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน (Thermal ageing resistance)

ภาพที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหนืดและสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางซึ่งแสดงในรูปของ 100% มอดูลัสสัมพัทธ์และความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ จากภาพพบว่าสมบัติ 100% มอดูลัสสัมพัทธ์ของยางผสมมีค่าสูงกว่า 1 ในทุกๆ อัตราส่วนความหนืด แสดงว่าหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าเกิดจากปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล (intermolecular reaction) ที่เพิ่มขึ้นและ/หรือปฏิกิริยาการเชื่อมโยงภายในสายโซ่โมเลกุล (intramolecular reaction) ในยาง NBR เพราะระหว่างการบ่มเร่งในสภาวะที่มี

ออกซิเจน ยางจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) ซึ่งก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ (degradation) ซึ่งการเสื่อมสภาพของยางโดยทั่วไปนั้นจะเกิดได้ทั้งปฏิกิริยาการตัดขาดสายโซ่ (chain scission) ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล และปฏิกิริยาการเชื่อมโยงภายในสายโซ่โมเลกุล ซึ่ง 2 ปฏิกิริยาหลังนี้จะทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงที่สูงขึ้น สำหรับยาง NBR นั้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลและ/หรือปฏิกิริยาการเชื่อมโยงภายในสายโซ่โมเลกุลจะเกิดได้เร็วกว่าปฏิกิริยาการตัดขาดของสายโซ่ (Hofmann, 1989) จึงส่งผลทำให้ยางมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงขึ้นหลังการบ่มเร่ง ซึ่งการที่ยางมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงขึ้นหลังการบ่มเร่งดังกล่าว ทำให้ยางมีค่ามอดูลัสและความแข็งแรงสูงขึ้น



ภาพที่ 4 ผลของอัตราส่วนความหนืดต่อสมบัติความทนทานต่อความร้อน

เมื่อพิจารณาความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์พบว่ามีค่าต่ำกว่า 1 ในทุกๆ อัตราส่วนความหนืด แสดงให้เห็นว่าหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ยางผสมมีค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของยางเมื่อได้รับความร้อนนั่นเอง เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนความหนืดต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลให้ยางผสมมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผลการทดลองเผยให้เห็นว่ายางผสมที่มีอัตราส่วนความหนืดสูงมีการลดลงของค่าความทนทานต่อแรงดึง (เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนบ่มเร่ง) ต่ำกว่ายางผสมที่มีอัตราส่วนความหนืดต่ำที่เป็นเช่นนี้ คาดว่าเกิดจากการปรับปรุงสัณฐานวิทยาของยางผสม เพราะการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลให้วัฏภาคที่กระจายตัว (วัฏภาคของยาง NBR) มีขนาดเล็กกลง เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่ายาง

NBR มีสมบัติความทนทานต่อความร้อนสูงกว่ายาง NR ดังนั้นการลดลงของขนาดวัฏภาคของยาง NBR จึงทำให้วัฏภาคของยาง NR และ NBR มีพื้นที่ในการเกิดอันตรกิริยาต่อกันมากขึ้น ยางผสมที่ได้จึงมีความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์สูงขึ้น

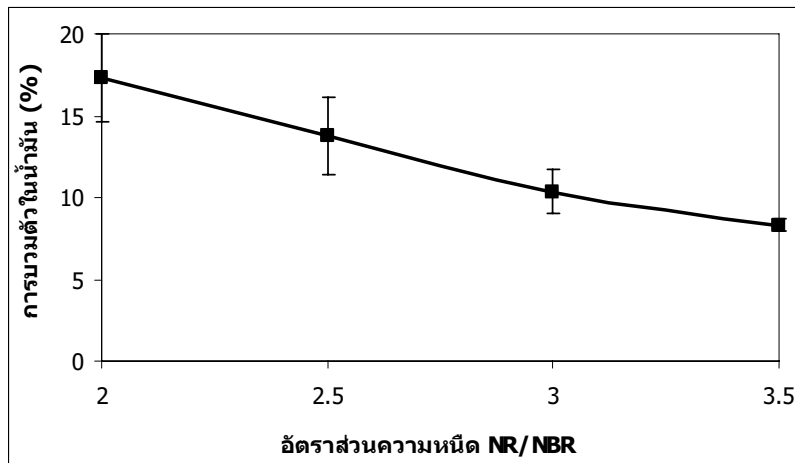
### 3.6 ความทนทานต่อน้ำมัน (Oil resistance)

ภาพที่ 5 และ 6 แสดงผลของอัตราส่วนความหนืดต่อสมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยางผสม ซึ่งแสดงในรูปของค่าการบวมตัวในน้ำมัน สมบัติแรงดึงสัมพัทธ์ และ 100% มอดูลัสสัมพัทธ์ ตามลำดับ แม้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดจะส่งผลให้ยางผสมมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำลง ซึ่งก็ควรจะส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติความทนทานต่อน้ำมันที่ลดลงด้วย เพราะเป็นที่รู้กันดีว่าสมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยางจะแปรผันโดยตรงกับระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

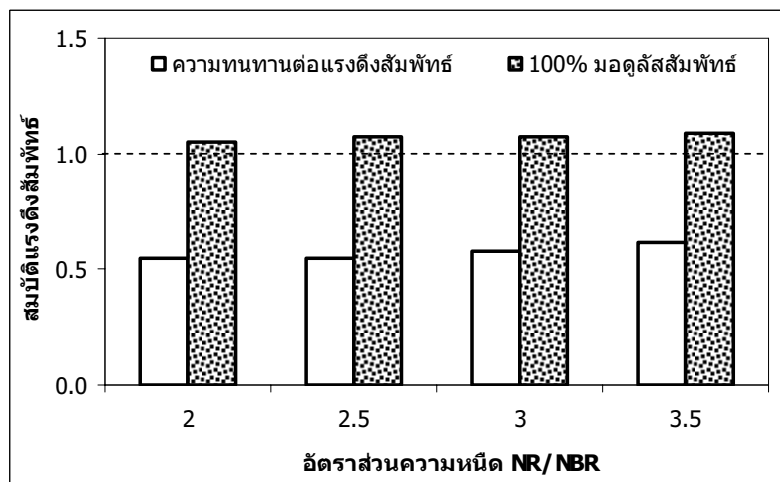


แต่จากผลการทดลองกลับแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลทำให้ยางผสมมีความทนทานต่อน้ำมันสูงขึ้น กล่าวคือ ยางผสมมีค่าการบวมตัวในน้ำมันลดลง (ภาพที่ 5) และมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์สูงขึ้น (ภาพที่ 6) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการลดลงของขนาดวัฏภาคที่กระจายตัวเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ยางผสมมีสมบัติความทนทานต่อน้ำมันสูงขึ้น

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ก็สอดคล้องกับผลงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้านี้ (Sirisinha et al., 2001) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสมบัติความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์พบว่ามีความต่ำกว่า 1 ในทุกๆ อัตราส่วนความหนืด แสดงให้เห็นว่าหลังจากแช่น้ำมัน ยางผสมมีค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง



ภาพที่ 5 ผลของอัตราส่วนความหนืดต่อการบวมตัวในน้ำมัน



ภาพที่ 6 ผลของอัตราส่วนความหนืดต่อสมบัติความทนทานต่อน้ำมัน

เป็นที่น่าแปลกใจที่ผลการทดลองในภาพที่ 6 ซึ่งให้เห็นว่า 100% มอดูลัสสัมพัทธ์ของยางผสมมีค่าสูงกว่า 1 ในทุกๆ อัตราส่วนความหนืด ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ายางมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงขึ้นหลังจากแช่น้ำมัน ที่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากเมื่อนำชิ้นทดสอบไปแช่ไว้ในน้ำมัน ชิ้นทดสอบก็จะเกิดการบวมตัวเพราะโมเลกุลของน้ำมันจะแพร่เข้าไปแทรกอยู่ภายในสายโซ่โมเลกุลของยางที่ยึดติดกันด้วยโครงร่างตาข่ายแบบ

3 มิติ (3-dimension network) โดยการบวมตัวจะเกิดขึ้นมากในวัฏภาคของยาง NR ซึ่งเป็นวัฏภาคที่มีความเป็นขั้วต่ำ ซึ่งการบวมตัวดังกล่าวจะส่งผลทำให้สายโซ่โมเลกุลยางอยู่ห่างกันมากขึ้น ดังนั้น สายโซ่โมเลกุลยางที่อยู่ระหว่างจุดเชื่อมโยง 2 จุด (chains between crosslink points) ซึ่งแต่เดิมเคยหย่อนก็จะถูกทำให้ตึงด้วยเหตุนี้ แรงที่จำเป็นต้องใช้ในการดึงยืดไปยังระดับความเครียดที่ต้องการจึงสูงขึ้นอย่างไรก็ดี เนื่องจากในขณะที่ยางเกิดการบวมตัว

สายโซ่โมเลกุลยางก็จะอยู่ห่างกันมากขึ้น จึงมีความเป็นไปได้ที่ปมของสายโซ่โมเลกุล (ที่เกิดจากการพันกัน) อาจเกิดการคลายตัว (disentanglement) ทำให้ยางสูญเสียการเชื่อมโยงทางกายภาพไป อันอาจเป็นเหตุให้ยางมีค่ามอดูลัสลดลง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในการทดลองนี้พบว่ายางผสมที่เกิดการบวมตัวกลับมีค่า 100% มอดูลัสสูงขึ้น ผลการทดลองจึงบ่งชี้ว่าการดึงตัวของสายโซ่โมเลกุลยางมีผลต่อค่ามอดูลัสสูงกว่าการคลายตัวของปมสายโซ่โมเลกุล นอกจากนี้ ยังพบอีกด้วยว่าการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลให้ค่า 100% มอดูลัสสัมพัทธ์ของยางมีแนวโน้มสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดส่งผลทำให้วิภาคของยาง NBR มีขนาดเล็กลง พื้นที่ที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างยาง NR และ NBR จึงสูงขึ้น ดังนั้น เมื่อนำยางไปแช่ในน้ำมัน วิภาคของยาง NR จึงเกิดการบวมตัวได้น้อยลง ดังนั้น การคลายตัวของปมสายโซ่โมเลกุลจึงเกิดขึ้นได้น้อยตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้ จึงพบว่าค่า 100% มอดูลัสสัมพัทธ์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มอัตราส่วนความหนืด

#### 4. สรุปผลการทดลอง

แม้ว่าการเพิ่มอัตราส่วนความหนืดในยางผสม NR/NBR จะช่วยปรับปรุงสมบัติในกระบวนการผลิต แต่การปรับลดความหนืดของยาง NBR ด้วย LNBR ก็ส่งผลให้ยางผสมเกิดการคงรูปได้ช้าลงและทำให้ยางคงรูปที่ได้มีระดับของการคงรูปที่ต่ำลงด้วย นอกจากนี้ การเพิ่มอัตราส่วนความหนืดยังส่งผลทำให้ยางมีค่ามอดูลัส ความแข็ง และความทนทานต่อแรงดึงต่ำลง แต่จะส่งผลให้การยึดตัว ณ จุดขาดและการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดที่อุณหภูมิสูงของยางสูงขึ้น ยังพบอีกว่าสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและสมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยางผสมขึ้นอยู่กับขนาดของวิภาคที่กระจายตัว โดยยางผสมที่มีอัตราส่วนความหนืดสูง (มีขนาดของวิภาคที่กระจายตัวเล็ก) จะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและน้ำมันสูงกว่ายางผสมที่มีอัตราส่วนของความหนืดต่ำ (มีขนาดของวิภาคที่กระจายตัวใหญ่)

#### 5. เอกสารอ้างอิง

Alliger, G., & Sjothun, I.J. (1964). *Vulcanization of Elastomers: Principles and Practice of Vulcanization of Commercial Rubbers*. New York : Reinhold Publishing Corporation.

- Andrew, J.T., & Kevin, P.J. (1998). *Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Speciality Polymers*. London : Chapman and Hall.
- Fan, Z., Wang, X., Fu, Z., Xu, J., & Dong, Q. (2007). Regulation of Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene/Poly (Ethylene-co-Propylene) in-Reactor Alloys by Multi-Stage Sequential Polymerization. *Polymer*, 48, 5905-5916.
- Fang, Z.P., Ma, G.W., Shentu, B.Q., Cai, G.P., & Xu, C.W. (2000). Influence of Viscosity Ratio on the Morphology of PVC/PE Blends. *European Polymer Journal*, 36, 2309-2311.
- Groeninckx, G., Tol, R.T., Vinckier, I., Moldenaers, P., & Mewis, J. (2004). Phase Morphology and Stability of Co-continuous (PPE/PS) /PA6 and PS/PA6 Blends: Effect of Rheology and Reactive Compatibilization. *Polymer*, 45, 2587-2601.
- Hofmann, W. (1989). *Rubber Technology Handbook*. Munich : Hanser Publishers.
- Ismail, H., & Anuar, H. (2000). Palm Oil Fatty Acid as an Activator in Carbon Black Filled Natural Rubber Compounds: Dynamic Properties, Curing Characteristics, Reversion and Fatigue Studies. *Polymer Testing*, 19, 349-359.
- Ismail, H., & Poh, B.T. (2000). Cure and Tear Properties of ENR 25/SMR L and ENR 50/SMR L Blends. *European Polymer Journal*, 36, 2403-2408.
- Jana, S.C., & Sau, M. (2004). Effects of Viscosity Ratio and Composition on Development of Morphology in Chaotic Mixing of Polymers. *Polymer*, 45, 1665-1678.
- Karnika de Silva, K.G., & Micheal, V.L. (1998). Improving the Morphology and Properties of NR/NBR Blends with NR/PMMA Graft Copolymers. In Andrew, J.T., & Kevin, P.J. *Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Speciality Polymers*. (pp 68-79). London : Chapman and Hall.

- Kongsin, K., & Micheal, V.L. (1998). Improving the Morphology and Properties of NR/NBR Blends with Polychloroprene as the Compatibilizing Agent. In Andrew, J.T., & Kevin, P.J. Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Speciality Polymers. (pp 80-93). London : Chapman and Hall.
- Micheal, V.L. (1998). NR/NBR Blends-Basic Problems and Solutions. In Andrew, J.T., & Kevin, P.J. Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Speciality Polymers. (pp 53-67). London : Chapman and Hall.
- Misra, A., Bhattacharyya, A.R., Ghosha, A.K., & Eichhorn, K.-J. (2005). Reactively Compatibilised Polyamide6/Ethylene-co-Vinyl Acetate Blends: Mechanical Properties and Morphology. *Polymer*, 46, 1661-1674.
- Park, S.J., Seo, M.K., & Nah, C. (2005). Influence of Surface Characteristics of Carbon Blacks on Cure and Mechanical Behaviors of Rubber Matrix Compounds. *Journal of Colloid Interface Science*, 291, 229-235.
- Sae-oui, P., Sirisinha, C., Thepsuwan, U., & Thapthong, P. (2007). Influence of Accelerator Type on Properties of NR/EPDM Blends. *Polymer Testing*, 26, 1062-1067.
- Sirisinha, C., Baulek-Limcharoen, S., & Thunyarittikorn, J. (2001). Relationships Among Blending Condition, Size of Dispersed Phase, and Oil Resistance in Natural Rubber and Nitrile Rubber Blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 82, 1232-1237.
- Sirisinha, C., Limcharoen, S., & Thunyarittikorn, J. (2003). Oil Resistance Controlled by Phase Morphology in Natural Rubber/Nitrile Rubber Blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 87, 83-89.