

## ผลของยางคาร์บอกซิลิกไนไตรล์ผง (XNBRP) ต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์

ภูษงค์ ทับทอง<sup>1,2\*</sup> อุทัย เทพสุวรรณ<sup>1,2</sup> ชาคกริต สิริสิงห์<sup>2,3</sup> และ พงษ์ธร แซ่ฮุย<sup>1,2</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของยางคาร์บอกซิลิกไนไตรล์ผง (XNBRP) ต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์ โดยระหว่างกระบวนการผสมได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของยาง XNBRP ตั้งแต่ 0 ถึง 30 phr จากนั้นจึงแบ่งยางคอมพาวด์ที่เตรียมได้ส่วนหนึ่งไปทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิตและนำยางคอมพาวด์ส่วนที่เหลือไปขึ้นรูปและคงรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน และสมบัติความทนทานต่อน้ำมัน จากการศึกษาพบว่ายาง XNBRP นอกจากส่งผลทำให้ความหนืดของยางคอมพาวด์สูงขึ้นแล้ว ยังทำให้ยางคงรูปมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นอีกด้วย แม้ว่ายาง XNBRP จะส่งผลในเชิงลบต่อสมบัติความยืดหยุ่นของยาง แต่การเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ในช่วง 0 ถึง 20 phr ก็สามารถช่วยปรับปรุงค่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อแรงฉีกขาดของยางให้สูงขึ้นเล็กน้อย อีกทั้งยังพบว่ายาง XNBRP สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและน้ำมันของยางธรรมชาติได้ด้วย

**คำสำคัญ:** ยางธรรมชาติ ยางผง สมบัติเชิงกล ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน ความทนทานต่อน้ำมัน

<sup>1</sup> ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค)

<sup>2</sup> ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล (ศาลายา)

<sup>3</sup> ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: puchongt@mtec.or.th

# Effect of Ultra Fine Carboxylic Acrylonitrile Butadiene Rubber Powder (XNBRP) on properties of Natural Rubber Vulcanizates in Peroxide Cure System

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

---

## ABSTRACT

This research aims to investigate the influence of carboxylic acrylonitrile butadiene rubber powder (XNBRP) on properties of peroxide-cured natural rubber. During mixing, the amount of XNBRP was varied from 0 to 30 phr. After mixing, a portion of the compound was taken for process ability tests and the rest of the compound was shaped and vulcanized for further mechanical property test. Determinations of thermal ageing resistance and oil resistance were also carried out. The results reveal that the addition of XNBRP not only gives rise to an increase of compound viscosity, but also leads to the enhancement of crosslink density. Even though XNBRP imparts negative effect on elasticity, it somehow improves both tensile and tear strengths of the vulcanizate, provided that its content is kept not more than 20 phr. Apart from the mechanical properties, the addition of XNBRP also leads to some improvements of both thermal ageing properties and oil resistance of the vulcanizate.

**Keywords:** natural rubber, ultra fine rubber powder, mechanical properties, thermal ageing resistance, oil resistance

---

<sup>1</sup>National Metal and Materials Technology Center (MTEC).

<sup>2</sup>Research and Development Centre for Thai Rubber Industry (RDCTRI), Faculty of Science, Mahidol University (Salaya).

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

\*Corresponding author, e-mail: puchongt@mtec.or.th

## บทนำ

เทคโนโลยียางผสม (rubber blend technology) เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจาก 1) สามารถรวมเอาสมบัติเด่นของยางแต่ละชนิดเข้าไว้ด้วยกันได้โดยไม่ต้องใช้วิธีที่ซับซ้อน ซึ่งแตกต่างจากการตัดแปรทางเคมีในโมเลกุลของยาง ซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่า และ 2) สามารถช่วยลดต้นทุนทางการผลิต เช่น การนำยางที่มีราคาถูกกว่าผสมกับยางที่มีราคาแพงกว่า อย่างไรก็ตาม การนำเทคโนโลยียางผสมไปประยุกต์ใช้จำเป็นต้องทำด้วยความระมัดระวังเพราะสมบัติของยางผสมนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น สัดส่วนการผสม (blend ratio) แรงยึดติดระหว่างวัฏภาค (interfacial adhesion) การกระจายตัวของสารเคมีและการเชื่อมโยงในแต่ละวัฏภาค (distribution of chemicals and crosslinks between the rubber phases) และลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) [1] โดยทั่วไป ลักษณะทางสัณฐานวิทยาสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดถึงระดับความเข้ากันได้ของยางผสม กล่าวคือ ยางผสมที่มีขนาดของวัฏภาคที่กระจายตัวเล็กกว่า จะแสดงถึงความเข้ากันได้ของวัฏภาคยางที่ดีกว่า (เมื่อเปรียบเทียบกับ สัดส่วนการผสมเท่ากัน) จึงส่งผลให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติดีขึ้น [2-4]

ยางคาร์บอกซิลิกไนไตรล์ (XNBR) เป็นเทอร์พอลิเมอร์ของบิวตาไดอีน (butadiene monomer) อะคริโลไนไตรล์ (acrylonitrile monomer) และกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) เช่น กรดเมทาคริลิก (methacrylic acid) หรือ กรดอะคริลิก (acrylic acid) ยาง XNBR มีความแข็งแรงสูงกว่ายางไนไตรล์ (NBR) เนื่องจากหมู่คาร์บอกซิลิก (carboxylic group) สามารถทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงกันผ่านพันธะไอออนิก (ionic bonds) โดยเกิดผ่านปฏิกิริยาระหว่างโลหะและหมู่คาร์บอกซิล (metallic-carboxyl reactions) ยาง XNBR จึงมักถูกใช้ในงานที่ต้องการทั้งความทนทานต่อน้ำมัน ความเหนียว และความต้านทานต่อการขีดถูสูง [5-6]

แม้ว่ายางธรรมชาติ (NR) เป็นยางที่มีสมบัติเชิงกลดีเยี่ยมเพราะสามารถตกผลึกได้เมื่อได้รับการดึงยืด (strain induced crystallization) แต่เนื่องจากยาง NR มีความเป็นขี้ดต่ำ จึงมีข้อเสียหลัก คือ ไม่ทนทานต่อน้ำมัน ดังนั้น การนำยาง NR ไปผสมกับยางที่มีความทนทานต่อน้ำมันสูง เช่น ยาง NBR [3-4] และยาง XNBR [7] จึงสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อน้ำมันของยาง NR ให้สูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยาง NR และยาง XNBR มีความเป็นขี้ดที่แตกต่างกันค่อนข้างมาก ทำให้ยางทั้ง 2 ชนิดดังกล่าวผสมเข้ากันได้ยาก ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องทำให้วัฏภาคที่กระจายตัวอยู่ในยางผสมมีขนาดใหญ่ ยางผสมที่ได้จึงมีสมบัติเชิงกลไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงพบรายงานการวิจัยที่พยายามปรับปรุงความเข้ากันได้ (compatibility) และสัณฐานวิทยาของยางผสมคู่นี้ [8-10]

เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการพัฒนายางผงที่ผู้ผลิตอ้างว่ามีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิในระดับนาโนเมตร เรียกยางผงนี้ว่า “ultra-fine vulcanized rubber powder (UFRP)” ซึ่งเตรียมได้จากการนำน้ำยาง (rubber latex) ไปทำการคงรูปด้วยการฉายรังสีที่มีพลังงานสูง จากนั้นจึงใช้เทคนิคสเปรย์ไดร์ (spray-dried) เพื่อทำให้ง่ายแห้งและเป็นผงละเอียด [11] โดยยางผงที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงการค้ามีหลายชนิด ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือยางคาร์บอกซิลิกไนไตรล์ผง (carboxylic acrylonitrile butadiene rubber powder; XNBRP) แม้ว่าในปัจจุบัน ได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ของการนำยางผงเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อเป็นส่วนประกอบในการผลิตเทอร์โมพลาสติกอีลาสโตเมอร์ (thermoplastic elastomers; TPEs) หรือใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความ

เหนียว (toughening modifier) ในพลาสติก [12-15] แต่การศึกษาเรื่องการนำยางผงไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางชนิดต่างๆ ยังคงมีน้อยมาก ทั้งนี้ เนื่องจากผู้ผลิตได้นำเสนอถึงขนาดของอนุภาคปฐภูมิของยางผงว่าอยู่ในระดับนาโนเมตร ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าเมื่อนำยางผงไปผสมกับยางชนิดอื่นแล้ว ยางผงจะเป็นวัฏภาคกระจายตัวที่มีขนาดอนุภาคเล็กซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องทำให้ยางผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลต่างๆ ที่ดีขึ้น ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของยางคาร์บอนอ็อกซิไดซ์ไนโตรล (XNBRP) ต่อสมบัติของยาง NR ที่คงรูปด้วยระบบเพอร์ออกไซด์

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### วัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ผลิตโดยบริษัทยูเนียนรับเบอร์โปรดักส์ จำกัด ยางคาร์บอนอ็อกซิไดซ์ไนโตรล (XNBRP) ที่นำมาใช้มีชื่อทางการค้าว่า Narpow™ VP-501 ซึ่งมีขนาดอนุภาคปฐภูมิเฉลี่ย 50-100 นาโนเมตรและมีปริมาณอะโครโลไนโตรลเท่ากับ 26% ผลิตโดย SINOPEC Beijing Research Institute of Chemical Industry ประเทศจีน สารเคมีที่ใช้ในการคงรูป ได้แก่ ไดควิมิลเพอร์ออกไซด์ (99%) จากบริษัทคอนคอร์ด์เคมีคอล อินด์ จำกัด และน้ำมันไฮโดรลิก (TELLUS 100) จากบริษัทเชลล์ (ประเทศไทย) จำกัด

### การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง XNBRP

ดำเนินการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง XNBRP ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope (SEM), JEOL JSM-6301F) โดยทำการเคลือบพื้นผิวของยาง XNBRP ด้วยทองคำก่อนดำเนินการศึกษา

### การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

ตารางที่ 1 แสดงสูตรการผสมเคมีที่ใช้ในงานวิจัย หลังจากการออกสูตร ได้ดำเนินการผสมเคมียางโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Brabender 350E) ตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของห้องผสมเท่ากับ 60 °C ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์เท่ากับ 40 รอบต่อนาที เริ่มต้นด้วยการบดยาง NR ในเครื่องผสม เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาทีจึงเติมยาง XNBRP ทำการผสมต่อไปอีกเป็นระยะเวลา 4 นาที แล้วจึงเติมไดควิมิลเพอร์ออกไซด์ ผสมต่ออีก 3 นาทีก่อนที่จะนำยางคอมพาวด์ออกจากเครื่องผสมแล้วนำไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ท้ายสุดจึงแบ่งยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกนำไปวัดค่าความหนืดตามมาตรฐาน ISO R289 ด้วยเครื่อง Mooney viscometer (ViscTech+) ที่อุณหภูมิ 100 °C ส่วนที่ 2 นำไปศึกษาลักษณะการคงรูปด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR TechPRO MD+) ที่อุณหภูมิ 160 °C ตามมาตรฐาน ISO 6502 และทำการบันทึกค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque, ML) และค่าแรงบิดสูงสุด (maximum torque, MH) ที่ได้จากการคงรูปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากผลต่างของค่าแรงบิดดังกล่าว (MH-ML) สามารถนำไปใช้ในการบ่งชี้ระดับของการคงรูปหรือระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง [16-17] และส่วนที่ 3 นำไปขึ้นรูปสำหรับทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางคงรูปต่อไป

**ตารางที่ 1** สูตรการผสมเคมีของยางคอมพาวด์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr*)
ยางธรรมชาติ (STR 5L)	100.0
ยางคาร์บอนซีกไนไตรล์ผง (XNBRP)	ปรับเปลี่ยนปริมาณ (0.0-30.0)
ไดควิมิลเพอร์ออกไซด์	1.0

\*parts per hundred of rubber (ส่วนในหนึ่งร้อยส่วนของยาง)

**การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคงรูป**

นำยางคอมพาวด์ไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นระยะเวลา 25 นาที จากนั้นจึงนำยางคงรูปที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความแข็ง (hardness) ด้วยเครื่อง Wallace Shore A durometer ตามมาตรฐาน ISO 7619 (Part 1) สมบัติแรงดึง (tensile properties) และสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ด้วยเครื่อง universal testing machine (Instron 5566 series) ตามมาตรฐาน ISO 37 (die type 1) และ ISO 34 (die B) ตามลำดับ การกระเดิงตัว (rebound resilience) ด้วยเครื่อง Dunlop tripsometer (Toyoseiki 221) ตามมาตรฐาน ISO 4662 การเสียรูปถาวรหลังกด (compression set) ตามมาตรฐาน ISO 815 (method B) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน (thermal ageing resistance) ตามมาตรฐาน ISO 188 โดยนำชิ้นทดสอบไปบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมงก่อนที่จะนำไปทดสอบสมบัติแรงดึงเพื่อเปรียบเทียบกับสมบัติแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ไม่ได้รับการบ่มแรงและแสดงผลการทดสอบในรูปแบบของอัตราส่วนของสมบัติแรงดึงหลังการบ่มแรงต่อสมบัติแรงดึงก่อนการบ่มแรงหรือที่เรียกว่าสมบัติแรงดึงสัมพัทธ์ (relative tensile properties) ส่วนสมบัติความทนทานต่อน้ำมัน (oil resistance) ได้ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 1817 โดยนำชิ้นทดสอบไปแช่น้ำมันไฮดรอลิก (Shell-Tellus 100) เป็นระยะเวลา 168 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติแรงดึงเปรียบเทียบกับสมบัติแรงดึงของชิ้นทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการแช่น้ำมัน ในกรณีนี้ สมบัติความทนทานต่อน้ำมันจะแสดงในรูปแบบของสมบัติแรงดึงสัมพัทธ์และค่าการบวมตัว (swelling, R) ในน้ำมัน โดยค่าการบวมตัวในน้ำมันสามารถคำนวณได้จากสมการ :

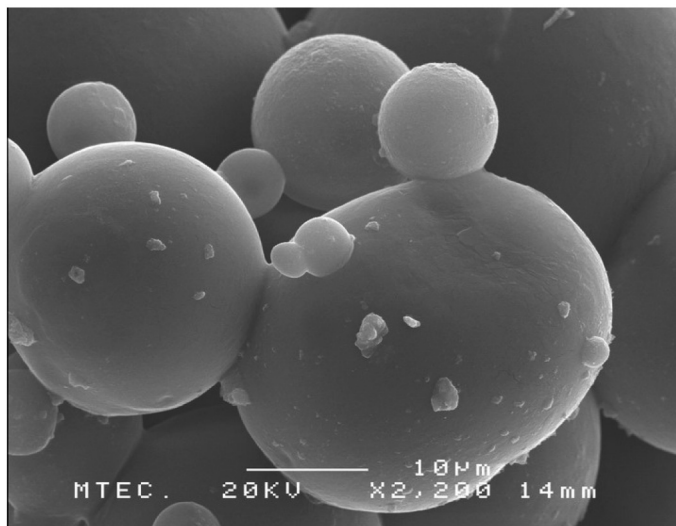
$$R (\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100$$

เมื่อ  $W_0$  และ  $W_1$  คือ น้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อนและหลังแช่น้ำมัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphology) ของยางโดยใช้เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM, Multimode Nanoscope IIIA) อีกด้วย

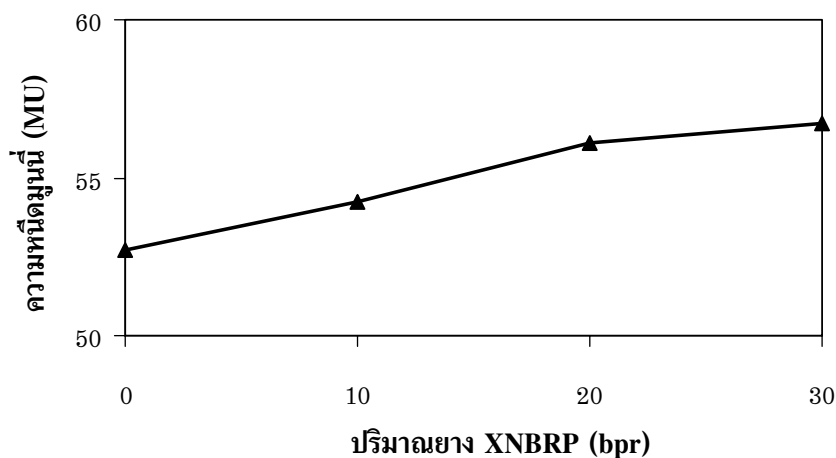
## ผลการทดลองและวิจารณ์

### ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง XNBRP (morphology)

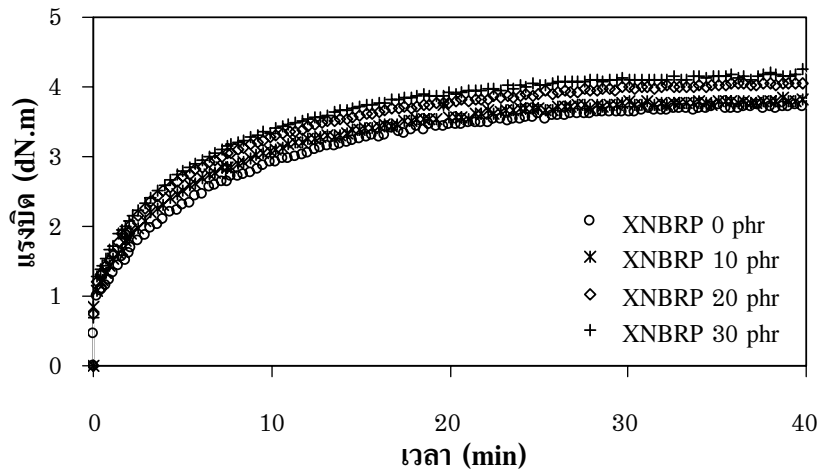
รูปที่ 1 แสดง SEM ไมโครกราฟของยาง XNBRP จากรูปพบว่าอนุภาคของยาง XNBRP มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ในระดับไมครอน จากการสังเกตพบว่าอนุภาครูปทรงกลมที่มีขนาดใหญ่และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคกว้างเหล่านี้ น่าจะเกิดจากการรวมกันของอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่าอนุภาคปฐมภูมิ ผลการทดลองบ่งชี้ว่าอนุภาคปฐมภูมิของยาง XNBRP (ซึ่งผู้ผลิตอ้างว่ามีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 50-100 นาโนเมตร) เป็นอนุภาคที่มีความเสถียรต่ำ เมื่อได้รับความร้อนในระหว่างขั้นตอนของการทำสเปย์ได้ อนุภาคปฐมภูมิเหล่านี้ก็จะหลอมรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่



รูปที่ 1 SEM ไมโครกราฟของยาง XNBRP (x2,200 เท่า)



รูปที่ 2 ผลของปริมาณยาง XNBRP ต่อความชื้นที่ดูดขึ้นของยางคอมพาวด์

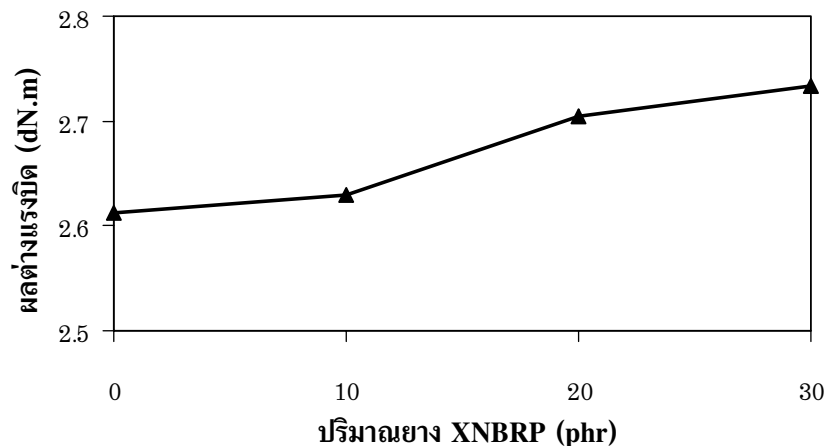


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยาง XNBRP และลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวด์

#### สมบัติของยางคอมพาวด์ (compound properties)

รูปที่ 2 แสดงผลของปริมาณยาง XNBRP ต่อความหนืดของยางคอมพาวด์ จากรูปพบว่า การเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ส่งผลให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการเจือจาง (dilution effect) เพราะยาง XNBRP เป็นยางที่มีความสามารถในการไหลต่ำ เพราะเป็นยางที่ผ่านการคงรูปมาแล้ว ด้วยเหตุนี้ การเพิ่มปริมาณยาง XNBRP จึงส่งผลทำให้สัดส่วนของยาง NR ที่มีความสามารถในการไหลสูง (เพราะเป็นยางที่ยังไม่คงรูป) ลดลง ด้วยเหตุนี้ ความหนืดของยางคอมพาวด์จึงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณยาง XNBRP

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยาง XNBRP และลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวด์แสดงดังรูปที่ 3 จากรูปพบว่า ลักษณะการคงรูปของยางทั้งหมดเป็นแบบ “Marching” นั่นคือค่าแรงบิดสูงสุดมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาการคงรูปที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่อัตราเร็วของการเกิด “Marching” (marching rate) โดยพิจารณาจากค่าความชันของกราฟในช่วงระยะเวลาจาก 25 ถึง 40 นาที พบว่าการปรับเปลี่ยนปริมาณยาง XNBRP ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราเร็วของการเกิด “Marching” ไรก็ดี เมื่อพิจารณาที่ค่าผลต่างแรงบิดของยาง (รูปที่ 4) กลับพบว่าค่าผลต่างแรงบิดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ผลการทดลองดังกล่าวบ่งชี้ว่าการเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ส่งผลทำให้ยางมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ทั้งนี้ คาดว่าอาจเป็นผลมาจากการที่ยาง XNBRP และยางธรรมชาติสามารถคงรูปได้ด้วยระบบเพอร์ออกไซด์ จึงมีความเป็นไปได้ที่ยาง XNBRP จะทำหน้าที่เสมือนเป็นจุดเชื่อมโยง (crosslink point) ระหว่างสายโซ่ของยางธรรมชาติ จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น



รูปที่ 4 ผลของปริมาณยาง XNBRP ต่อค่าผลต่างแรงบิด

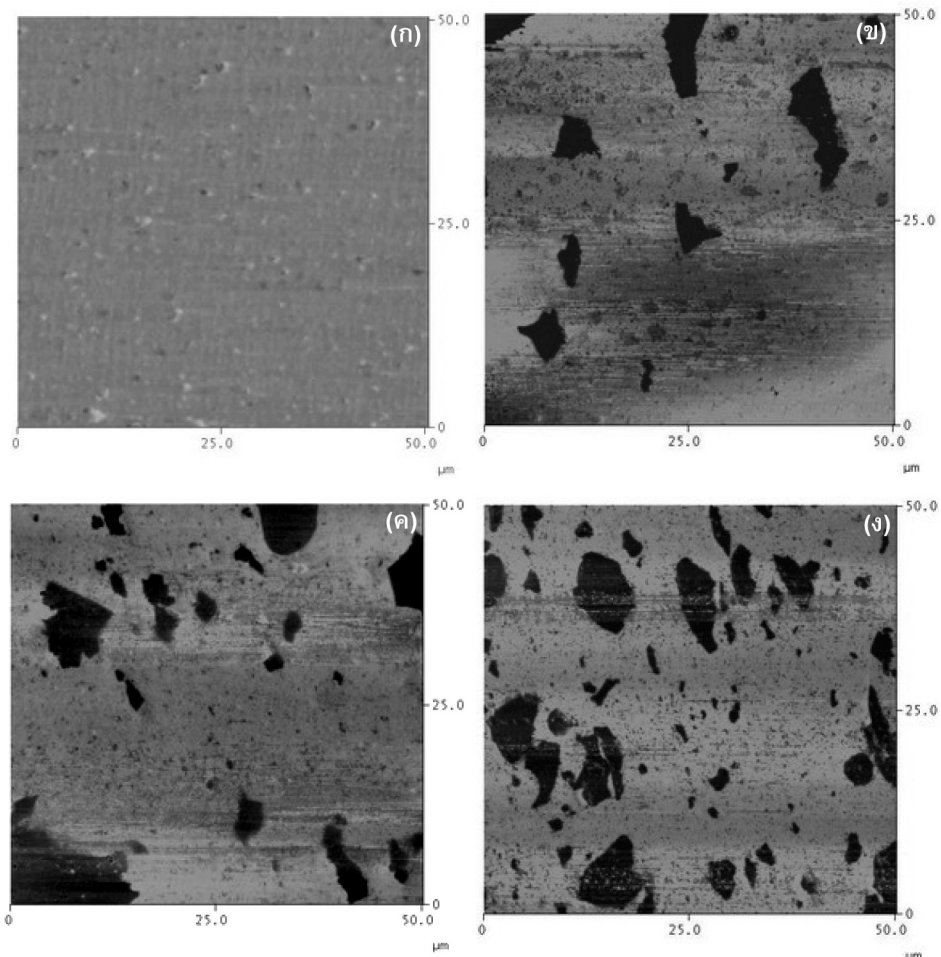
#### สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

ตารางที่ 2 แสดงผลของปริมาณยาง XNBRP ต่อความแข็ง สมบัติแรงดึง และความทนทานต่อการฉีกขาด ตามลำดับ จากตารางพบว่าค่าความแข็งของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มปริมาณของยาง XNBRP ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการเพิ่มขึ้นของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงตามการเพิ่มปริมาณยาง XNBRP จากการที่ค่ามอดูลัสของยางมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความแข็ง ดังนั้นจึงพบเช่นเดียวกันว่าค่า 300% มอดูลัสของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มปริมาณยาง XNBRP อย่างไรก็ดี จากการสังเกตจะพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสตามปริมาณยาง XNBRP จะเห็นได้เด่นชัดกว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็ง เพราะพบว่า การเติมยาง XNBRP ลงไป 30 phr จะทำให้ยางมีความแข็งสูงขึ้นเพียงแค่ 10% เท่านั้น ในขณะที่ทำให้ยางมีค่า 300% มอดูลัสสูงขึ้นถึงเกือบ 100% ทั้งนี้คาดว่า การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่า 300% มอดูลัสน่าจะเกิดจากการตกผลึกเมื่อได้รับการดึงยืด ซึ่งเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อทำการเติมยาง XNBRP ลงไป เป็นที่ทราบกันดีว่ายาง XNBR เป็นยางที่มีขั้วสูงทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูง อีกทั้งยังมีหมู่ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ (bulky group) อยู่ภายในโมเลกุลด้วย จึงทำให้ยางชนิดนี้มีความยืดหยุ่นและมีความสามารถในการยืดตัวต่ำกว่ายาง NR เมื่อเติมยาง XNBRP ลงไปในยาง NR และทำการยืดขึ้นทดสอบไปที่ 300% การยืดตัว ส่วนที่เป็นวัฏภาคของยาง NR ก็จะเกิดการยืดตัวได้มากกว่าส่วนที่เป็นวัฏภาคของยาง XNBRP เรียกปรากฏการณ์การเพิ่มขึ้นของความเครียดในวัฏภาคของยาง NR ตามการเพิ่มสัดส่วนของยาง XNBRP นี้ว่าผลของการขยายตัวของความเครียดหรือ “strain amplification effect” ซึ่งจะส่งผลทำให้วัฏภาคของยาง NR เกิดการตกผลึกได้มากยิ่งขึ้น ค่า 300% มอดูลัสของยางจึงสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มปริมาณของยาง XNBRP ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มปริมาณของยาง XNBRP กลับส่งผลทำให้ยางมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ทั้งนี้ นอกจากผลของการเจือจางแล้ว (เพราะยาง XNBR มีความสามารถในการยืดตัวต่ำกว่ายาง NR) การลดลงของค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของยางน่าจะเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงด้วย เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าการยืดตัว ณ จุดขาดของยางจะแปรผกผันกับระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง



ตารางที่ 2 ผลของปริมาณยาง XNBRP ต่อสมบัติเชิงกลของยาง

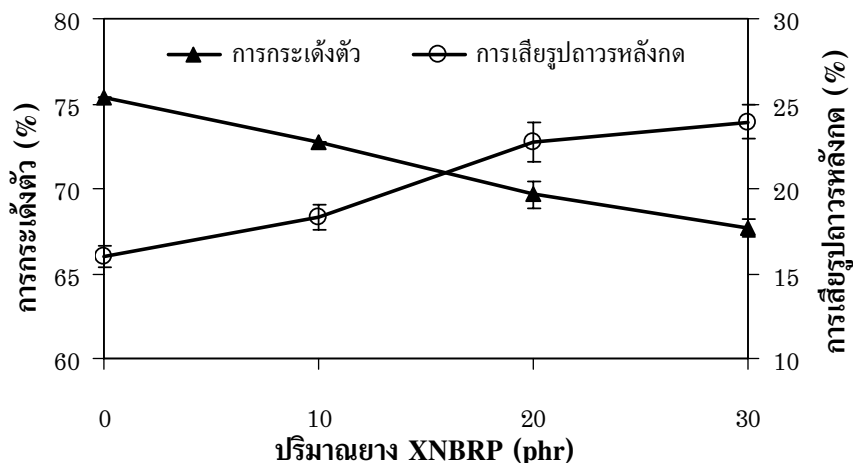
ปริมาณ ยาง XNBRP (phr)	ความแข็ง (Shore A)	300% มอดูลัส (MPa)	ความ ทนทาน ต่อแรงดึง	การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	ความทนทาน ต่อการฉีกขาด (N/mm)
0	32.9 ± 0.2	1.13 ± 0.01	12.6 ± 1.7	743 ± 17	35.4 ± 1.2
10	33.8 ± 0.1	1.44 ± 0.03	13.0 ± 1.7	699 ± 17	39.3 ± 2.8
20	35.2 ± 0.4	1.73 ± 0.03	15.0 ± 1.3	719 ± 20	42.5 ± 2.3
30	36.5 ± 0.2	2.18 ± 0.04	13.4 ± 0.7	672 ± 12	39.9 ± 2.2



รูปที่ 5 AFM ไมโครกราฟแสดงขนาดของอนุภาคยาง XNBRP

(ก) XNBRP 0 phr (ข) XNBRP 10 phr (ค) XNBRP 20 phr และ (ง) XNBRP 30 phr

เป็นที่น่าแปลกใจที่ผลการทดลองในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณยาง XNBRP จาก 0 phr ถึง 20 phr หลังจากนั้นการเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ก็จะส่งผลทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดของยางเริ่มลดลง การเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดในช่วงแรกนั้นเป็นเรื่องที่เหนือความคาดหมายเพราะว่ายาง XNBRP มีความเข้ากันได้กับยาง NR ต่ำ อีกทั้งข้อมูลจากการศึกษาสัณฐานวิทยาแสดงในรูปที่ 5 ก็แสดงให้เห็นว่ายาง XNBRP ยังคงมีระดับการแตกตัวที่ไม่ดีเท่าที่ควร (แสดงด้วยพื้นที่สีเข้ม มีขนาดเฉลี่ย 5-10 ไมโครเมตร) ดังนั้น ยางคงรูปจึงควรมีค่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดที่ต่ำลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มปริมาณของยาง XNBRP แต่งานวิจัยนี้กลับพบผลในทางตรงกันข้าม จึงได้มีการตั้งข้อสันนิษฐานว่าการเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดในช่วงแรกนั้นน่าจะเกิดจากการเพิ่มขึ้นของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง นอกจากนี้ จากการที่ในการทดลองนี้ใช้ระบบการคงรูปด้วยเพอร์ออกไซด์ ซึ่งอาจทำให้เกิดการคงรูปร่วม ณ บริเวณพื้นผิวรอยต่อระหว่างวัฏภาคของยาง NR และยาง XNBRP จึงทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางทั้ง 2 ชนิดยังคงมีค่าค่อนข้างสูง ส่วนการลดลงของค่าความทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดในช่วงหลังนั้นคาดว่าเกิดจากผลของการแตกตัวที่ไม่ดีของยาง XNBRP ที่เริ่มมีบทบาทต่อสมบัติเชิงกลของยางมากขึ้นนั่นเอง เพราะเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ากลุ่มก้อนของยาง XNBRP ที่มีขนาดใหญ่จะเปรียบเสมือนตำหนักที่มีอยู่ในเนื้อยาง ซึ่งจะทำให้ยางเกิดการประลัยได้ง่ายยิ่งขึ้น



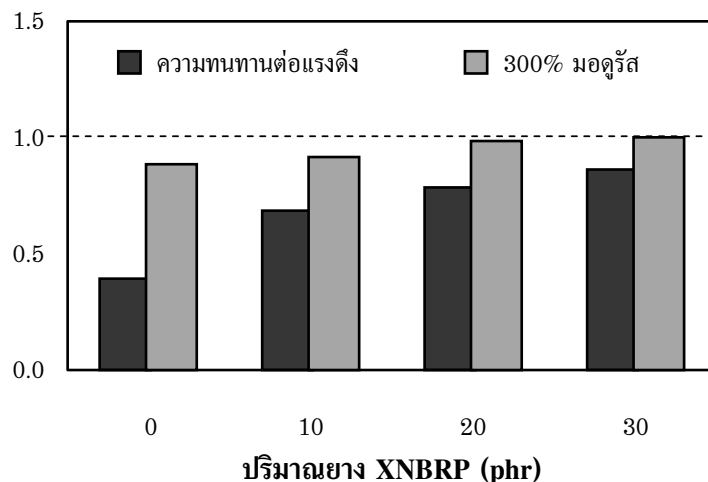
รูปที่ 6 ผลของปริมาณยาง XNBRP ต่อการกระเด็งตัวและการเสียรูปถาวรหลังกด

รูปที่ 6 แสดงผลของปริมาณยาง XNBRP ต่อสมบัติความยืดหยุ่นของยาง ซึ่งแสดงในรูปของค่าการกระเด็งตัวและค่าการเสียรูปถาวรหลังกดที่อุณหภูมิ 100 °C ตามลำดับ จากรูปพบว่า การเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ส่งผลให้ยางมีค่าการกระเด็งตัวลดลงและมีค่าการเสียรูปถาวรหลังกดสูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวบ่งชี้อย่างชัดเจนว่า การเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ส่งผลในเชิงลบต่อสมบัติความยืดหยุ่นของยาง แม้ว่า การเพิ่มปริมาณยาง XNBRP จะส่งผลทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นเล็กน้อย

ซึ่งควรจะส่งผลดีต่อระดับความยืดหยุ่นของยาง แต่ในเวลาเดียวกัน การเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ก็ส่งผลทำให้ยาง NR ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงกว่ายาง XNBR มีสัดส่วนที่ลดลงด้วยเช่นกัน ผลการทดลองบ่งชี้ว่าผลของการเจือจางมีอิทธิพลต่อสมบัติความยืดหยุ่นของยางมากกว่าผลของการเพิ่มขึ้นของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

### สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน (thermal ageing resistance)

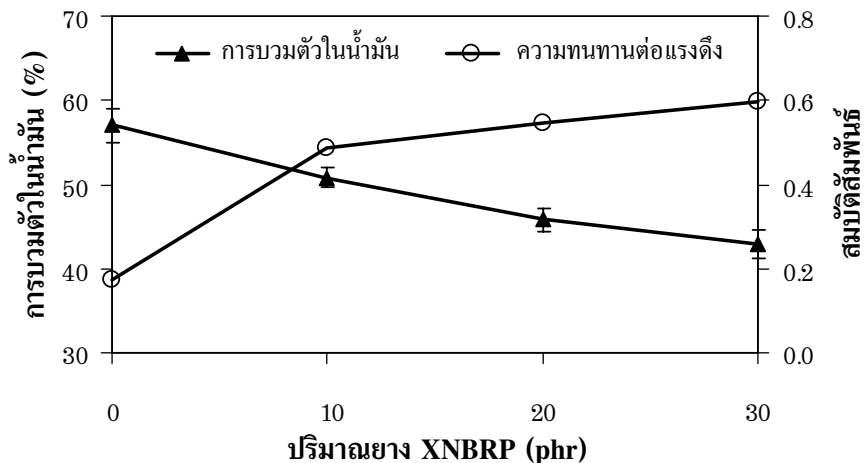
รูปที่ 7 แสดงผลของปริมาณยาง XNBRP ต่อสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนซึ่งแสดงในรูปของสมบัติสัมพัทธ์ (ความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ และ 300% มอดูลัสสัมพัทธ์) จากรูปพบว่า การเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ส่งผลทำให้ทั้งค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ และค่า 300% มอดูลัสสัมพัทธ์มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเข้าใกล้ 1 ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ส่งผลทำให้ยาง NR มีสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูงขึ้น ทั้งนี้ การปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากผลของการเจือจาง เพราะยาง NBR และอนุพันธ์มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนสูงกว่ายาง NR [18] อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาที่ค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ และ 300% มอดูลัสสัมพัทธ์ของยางมีค่าต่ำกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน ความทนทานต่อแรงดึง และความแข็งของยางมีค่าต่ำลง



รูปที่ 7 ผลของปริมาณยาง XNBRP ต่อสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน

### สมบัติความทนทานต่อน้ำมัน (oil resistance)

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยาง XNBRP และสมบัติความทนทานต่อน้ำมัน ซึ่งแสดงในรูปของร้อยละการบวมตัวในน้ำมัน และความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ จากรูปพบว่า การเพิ่มปริมาณยาง XNBRP ส่งผลให้ยางมีความทนทานต่อน้ำมันสูงขึ้น สืบเนื่องจากการลดลงของระดับการบวมตัวในน้ำมัน และการเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ การปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อน้ำมันตามการเพิ่มปริมาณของยาง XNBRP ดังกล่าวคาดว่าอาจเกิดจาก 1) ผลของการเจือจาง เพราะยาง XNBR มีความเป็นขี้ผึ้งจึงทนทานต่อน้ำมันได้ดีกว่ายาง NR และ 2) การเพิ่มขึ้นของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง เพราะการเพิ่มขึ้นของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงจะทำให้ยางเกิดการบวมตัวได้น้อยลงและยังส่งผลทำให้อัตราเร็วในการแพร่ของน้ำมันเข้าไปในเนื้อยางลดลงด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์พบว่า มีค่าต่ำกว่า 1 ในทุกๆ ปริมาณยาง XNBRP แสดงให้เห็นว่าหลังจากแช่น้ำมัน ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณยาง XNBRP และสมบัติความทนทานต่อน้ำมัน

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่า ยางผง XNBRP ซึ่งอยู่ในสภาพที่พร้อมนำไปใช้งานนั้นไม่ได้อยู่ในลักษณะของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนแอกกรีเกตที่มีขนาดใหญ่ในระดับไมโครเมตร เมื่อทำการเติมยาง XNBRP ลงไปในยาง NR จะส่งผลทำให้ยางคอมพาวด์ที่ได้มีความหนืดและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากยาง XNBRP มีระดับความยืดหยุ่นต่ำกว่ายาง NR ค่อนข้างมาก ดังนั้น การเติมยาง XNBRP ลงไปแม้ว่าจะส่งผลทำให้ยางมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ผลของการเจือจางก็ยังคงมีอิทธิพลต่อสมบัติความยืดหยุ่นของยางมากกว่า ด้วยเหตุนี้ ความยืดหยุ่นของยางจึงมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มปริมาณของยาง XNBRP อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าแปลกใจที่ผลการทดลองบ่งชี้ว่าการเติมยาง XNBRP ลงไปในปริมาณที่ไม่เกิน 20 phr จะส่งผลทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติความ

ทนทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดที่สูงขึ้น นอกจากสมบัติเชิงกลแล้ว การเติมยาง XNBRP ลงไปยังส่งผลทำให้ยางมีสมบัติความทนทานต่อน้ำมันและความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เพราะยาง XNBRP มีความเป็นขั้วสูงและมีจำนวนพันธะคู่ในโมเลกุลน้อยกว่ายาง NR

### เอกสารอ้างอิง

1. Andrew, J. T., and Kevin, P. J. 1998. Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Speciality Polymers. London. Chapman and Hall. p. 2.
2. Karnika de Silva, K. G., and Micheal, V. L. 1998. Improving the Morphology and Properties of NR/NBR Blends with NR/PMMA Graft Copolymers. In Andrew, J. T. and Kevin, P. J. Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Speciality Polymers. London. Chapman and Hall. p. 68.
3. Sirisinha, C., Baulek-Limcharoen, S., and 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: 3442-3447.
4. Sirisinha, C., Limcharoen, S., and Thunyarittikorn, J. 2003. Oil Resistance Controlled by Phase Morphology in Natural Rubber/Nitrile Rubber Blends. *Journal of Applied Polymer Science* 87: 83-89.
5. Nagdi, K. 1993. Rubber as an Engineering Material: Guideline for Users. Munich; Vienna; New York; Barcelona. Hanser Publishers. p. 115.
6. Dick, J. S. 2001. Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance. Munich. Hanser Publishers. p. 198.
7. Naskar, N., Biswas, T., and Basu, D. K. 1994. Polymer Blend: A Novel Method for the Preparation of a Natural Rubber-Carboxylated Nitrile Rubber Blend. *Journal of Applied Polymer Science* 52(8): 1007-1014.
8. Lopattananon, N., Kraibut, A., Sangjan, R., and Seadan, M. 2007. Ionic Elastomer Blends of Zinc Salts of Maleated Natural Rubber and Carboxylated Nitrile Rubber: Effect of Grafted Maleic Anhydride. *Journal of Applied Polymer Science* 105: 1444-1455.
9. Naskar, N., Debnath, S. C., and Basu, D. K. 2001. Novel Method for Preparation of Carboxylated Nitrile Rubber-Natural Rubber Blends Using Bis(diisopropyl)thiophosphoryl Polysulfides. *Journal of Applied Polymer Science* 80: 1725-1736.
10. Naskar, N., Debnath, S. C., and Basu, D. K. 2002. Effect of Thiophosphoryl Compounds as Accelerators and Coupling Agents on the Vulcanization of NR-XNBR Blend. *Journal of Applied Polymer Science* 86: 3286-3299.

11. Qiao, J., Wei, G., Zhang, X., Gao, J., Zhang, W., Liu, Y., Li, J., Zhang, F., Zhai, R., Shao, J., Yan, K., and Yin, J. 2000. U.S. Pat. 6,423,760.
12. Zhang, M., Liu, Y., Zhang, X., Gao, J., Huang, F., Song, Z., Wei, G., and Qiao, J. 2002. The Effect of Elastomeric Nano-Particles on the Mechanical Properties and Crystallization Behavior of Polypropylene. *Polymer* 43: 5133-5138.
13. Peng, J., Zhang, X., Qiao, J., and Wei, G. 2002. Radiation Preparation of Ultrafine Carboxylated Styrene-Butadiene Rubber Powders and Application for Nylon 6 as an Impact Modifier. *Journal of Applied Polymer Science* 86: 3040-3046.
14. Liu, Y., Zhang, X., Gao, J., Huang, F., Tan, B., Guo, M., Wei, G., and Qiao, J. 2004. Toughening of Polypropylene by Combined Rubber System of Ultrafine Full-Vulcanized Powdered Rubber and SBS. *Polymer* 45: 275-286.
15. Liua, Y., Fana, Z., Maa, H., Tana, Y., and Qiao, J. 2006. Application of Nano Powdered Rubber in Friction Materials. *Wear* 261(2): 225-229.
16. Ismail, H., and 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.
17. Park, S. J., Seo, M. K., and Nah, C. 2005. Influence of Surface Characteristics of Carbon Blacks on Cure and Mechanical Behaviors of Rubber Matrix Compoundings. *Journal of Colloid Interface Science* 291: 229-235.
18. พงษ์ธร ชาญชัย. 2548. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). หน้า 118.

ได้รับบทความวันที่ 10 มีนาคม 2552

ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 21 เมษายน 2552