



สมบัติเชิงกล การทนต่อน้ำมันและโอโซนของยางผสมระหว่างยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน และยางอะครีโลไนไตรล์ที่เติมสารตัวเติมผสมสำหรับประยุกต์ใช้ทำแผ่นยางหุ้มถังน้ำมัน

Mechanical Properties, Oil and Ozone Resistance of EPDM/NBR Blends Filled with Hybrid Fillers for Fuel Tank Rubber-Cover Applications

ศราวุธ ประเสริฐศรี¹ เอกชัย แซ่ฮั่น และ ปราณี นุ้ยหนู

Sarawut Prasertsri¹, Ekachai Saehan and Pranee Nuinu

ห้องปฏิบัติการวัสดุพอลิเมอร์และยางขั้นสูง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Laboratory of Advanced Polymer and Rubber Materials (APRM), Department of Chemistry, Faculty of Science,

Ubon Ratchathani University

Received : 3 March 2020

Revised : 29 April 2020

Accepted : 25 May 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของยางผสมระหว่างยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) และยางอะครีโลไนไตรล์ (NBR) ที่เติมสารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 100 ส่วนในยางหนึ่งร้อยส่วน (phr) สำหรับประยุกต์ใช้ทำแผ่นยางหุ้มถังน้ำมัน โดยแปรสัดส่วนยางผสม EPDM/NBR ตั้งแต่ 100/0, 70/30, 50/50, 30/70, 0/100 ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt/wt) ในขั้นตอนการทดลองได้บดผสมยางและสารเคมีในเครื่องผสมแบบปิดภายใต้สภาวะที่กำหนด ยกเว้นสารช่วยในการคงรูปจะบดผสมในเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง จากนั้นนำยางคอมปาวด์มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติการทนความร้อน สมบัติการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนและสมบัติการต้านทานการบวมพองในน้ำมันต่างชนิดกัน (น้ำมันดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์-91 และน้ำมันเครื่อง) ผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณยาง NBR ในสัดส่วนยางผสมเพิ่มขึ้นระยะเวลาเริ่มเกิดการคงรูปและระยะเวลาการคงรูป การเสียรูปถาวรหลังการกดอัด อัตราการบวมพองในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่องมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ดัชนีอัตราการคงรูปและอัตราการบวมพองในน้ำมันแก๊สโซฮอล์-91 สูงขึ้น และยางผสมที่สัดส่วน 70/30 EPDM/NBR จะให้ค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดในแต่ละสัดส่วนยางผสมทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งบ่งชี้ถึงความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดี ในขณะที่การเพิ่มปริมาณยาง NBR จนถึง 50 %wt ยางผสมยังคงมีคุณสมบัติการต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนได้ดีโดยไม่ปรากฏรอยแตกบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบ โดยสรุปการพัฒนาสูตรยางคอมปาวด์ผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วน 70/30 %wt/wt ให้สมบัติโดยรวมที่ดีที่สุดและมีต้นทุนวัตถุดิบสูงขึ้นเพียงร้อยละ 13 เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ยาง EPDM เพียงอย่างเดียว) ซึ่งสูตรยางคอมปาวด์ผสมที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ยางหุ้มถังน้ำมันและสามารถนำไปต่อยอดสำหรับผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ต้องการสมบัติการทนน้ำมันและความร้อนได้

คำสำคัญ : ยางผสม ; สารตัวเติมผสม ; ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ; ลักษณะสัณฐานวิทยา



Abstract

This research aimed to investigate the optimal blend ratio of ethylene propylene diene rubber (EPDM) and acrylonitrile butadiene rubber (NBR) filled with hybrid fillers, including carbon black and calcium carbonate at 100 parts per hundred parts of rubber (phr) for fuel tank rubber-cover applications. The varied ratios of EPDM/NBR were 100/0, 70/30, 50/50, 30/70 and 0/100 % wt/wt. For mixing experimental, all ingredients used for preparing each blended compound were mixed in a kneader and the curing agents were subsequently incorporated on a two-roll mill. The compounds were finally shaped and vulcanized at 160°C using compression molding before further mechanical, thermal aging and ozone resistance test as well as oil swelling resistance in different fuel types (diesel, gasohol-91 and engine oils). The results revealed that scorch and cure times, compression set, swelling ratio in diesel and engine oils of the blends tended to decrease with increasing NBR content, while cure rate index, hardness and swelling ratio in gasohol-91 increased. Of all EPDM/NBR ratios, the 70/30 EPDM/NBR blend showed the best tensile strength and tear strength. At a given blend ratio, tensile strength and tear strength of the blends before and after aging are not significantly different. This indicated that thermal resistance of the blends could be achieved at all EPDM/NBR ratios. Furthermore, when NBR was increased up to 50 %wt, the blend has good stability against ozone treatment. In summary, the development of EPDM/NBR compounds with the ratio of 70/30 % wt/wt yields the best overall properties and the raw material cost is about 13% higher than the control formula. The developed rubber formula can be used as basic knowledge for applying as the fuel tank rubber-cover product and can be further developed for other products requiring oil and heat resistance properties.

Keywords : rubber blends ; hybrid fillers ; crosslink density ; morphology

บทนำ

ในปัจจุบันนี้กลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตด้านยานยนต์และส่วนประกอบของชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ ได้มีการพัฒนาในหลายมิติทั้งในแง่คุณสมบัติตามมาตรฐานกำหนด การแข่งขันทางการตลาด การประหยัดพลังงานและอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมรวมทั้งการเพิ่มประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์ให้มีความทนทานและอายุในการใช้งานที่มากขึ้น โดยชิ้นส่วนในยานยนต์ทุกประเภทประมาณร้อยละ 30 จะผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติการทนน้ำมันและความร้อนได้ดี โดยผลิตภัณฑ์ยางทั่วไปที่ต้องการคุณสมบัติทนความร้อนนิยมใช้ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene propylene diene rubber, EPDM) มากที่สุดเพราะยาง EPDM มีราคาไม่สูงมากนักและมีโครงสร้างทางเคมีพอลิเมอร์ที่อิมตัว โดยสังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทิลีน (Ethylene) โพรพิลีน (Propylene) และไดอีน (Diene) โดยไดอีนหรือพันธะคู่ที่เติมลงไปมีปริมาณน้อย (ร้อยละ 2-10 โดยน้ำหนัก) ที่อยู่ในตำแหน่งกิ่งก้านสาขาซึ่งไม่ได้อยู่บนสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ (Bhowmick *et al.*, 2000) ส่งผลทำให้ยาง EPDM มีความทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซนและสารเคมีได้ดี อย่างไรก็ตามยาง EPDM ไม่ทนต่อน้ำมัน ซึ่งปกติแล้วสามารถแก้ไขได้โดยการเติมยางที่มีขั้วผสมเข้าไปด้วยในสัดส่วนที่เหมาะสมจะสามารถปรับปรุงข้อด้อยและเพิ่มคุณสมบัติให้ดีกว่าการใช้ยาง EPDM เพียงอย่างเดียว ส่วนยางทั่วไปที่นิยมใช้งานในการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ยางทนน้ำมัน คือ ยางอะคริโลไนไตรล์บิวทาไดอีนหรือยางไนไตรล์ (Acrylonitrile butadiene rubber, NBR) ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์มอนอเมอร์และบิวทาไดอีนมอนอเมอร์ ประกอบด้วยหมู่อะคริโลไนไตรล์ (-CN) ปริมาณร้อยละ 20-50 โดยน้ำหนัก ที่มีความเป็นขั้ว ทำให้ยางไนไตรล์มีคุณสมบัติเด่นคือทนน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี โดยระดับความทนน้ำมันจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณอะคริโลไนไตรล์ (White, 1995)

เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณสมบัติเด่นร่วมกันจากยางแต่ละชนิดและสามารถเลือกใช้งานที่กว้างมากขึ้นหรือแม้กระทั่งการใช้งานเฉพาะทางที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ ดังนั้น เทคโนโลยียางเบลนด์หรือยางผสม (Rubber blending technology) จึงเป็นหนึ่งในแนวทางการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่ๆ ที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมยาง (Flokes, 1993) โดยเป็นการนำยางแต่ละชนิดที่มีสมบัติเด่นในแต่ละด้านมาผสมรวมในสัดส่วนที่ต้องการ เพื่อปรับปรุงสมบัติข้อด้อยของยางชนิดนั้นๆ ช่วยลดต้นทุนการผลิตและช่วยปรับปรุงกระบวนการแปรรูปให้ง่ายขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การผสมยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) กับยาง EPDM เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติความทนความร้อนและโอโซนของยาง NR ให้ดีขึ้น (Botros, 2002) การผสมยาง NR กับยาง NBR (Sirisinha *et al.*, 2003) หรือยางคลอริเนตพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE) (Sirisinha *et al.*, 2004) เพื่อเพิ่มความสามารถในการต้านทานการบวมพองในน้ำมันให้กับยาง NR ตลอดจนการศึกษากการปรับปรุงสมบัติการทนน้ำมันชนิดต่างๆ ของยาง EPDM ด้วยการผสมกับยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) (Prasertsri *et al.*, 2016) ซึ่งจากองค์ความรู้เทคโนโลยียางผสมก็เป็นที่ทราบว่าสมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพของยางผสมก็ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ธรรมชาติของยาง (Nature of rubber) สัดส่วนยางผสม (Blend ratio) ความเข้ากันได้ของยางผสม (Compatibility) ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) เป็นต้น (Manson, 1976; Tinker & Jones, 1998; Dierkes, *et al.*, 2013) ในอุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์และการประกอบชิ้นส่วนยานยนต์นั้น ถังน้ำมันเชื้อเพลิงจัดเป็นชิ้นส่วนที่มีความสำคัญไม่น้อยกว่าเครื่องยนต์ โดยตัวถังบรรจุน้ำมันที่ทำจากโลหะนั้นมีความจำเป็นต้องใช้ยางซึ่งมีความยืดหยุ่นมาห่อหุ้มตัวถังภายนอกเพื่อยืดอายุการใช้งานและป้องกันการกระแทก โดยยางที่นิยมใช้หุ้มถังน้ำมันในปัจจุบันนี้คือ



ยาง EPDM เพราะมีคุณสมบัติดีเยี่ยมในการทนต่อสภาพแวดล้อมและความร้อน แต่ก็มีข้อเสียในด้านของการทนสารละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งหรือน้ำมัน จากปัญหาดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงสนใจปรับปรุงให้ยางหุ้มถึงน้ำมันมีคุณสมบัติทนต่อน้ำมันได้มากขึ้น โดยการนำยาง NBR (มีขี้ผึ้ง) ที่ทนน้ำมันมาผสมกับยาง EPDM (ไม่มีขี้ผึ้ง) โดยศึกษาสัดส่วนของยางผสม EPDM/NBR 100/0, 70/30, 50/50, 30/70, และ 0/100 ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt/wt) และใช้สารตัวเติมผสมระหว่างเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณมากเพื่อลดต้นทุนการผลิต (ปริมาณสารตัวเติมรวม 100 phr) โดยทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติการทนความร้อน สมบัติการทนน้ำมันและความต้านทานต่อไอโซน เปรียบเทียบกับสูตรควบคุมที่ใช้ผลิตยางหุ้มถึงน้ำมันในทางการค้า (สูตรยาง EPDM 100 %wt) โดยเน้นศึกษาการทนน้ำมันชนิดต่างๆ คือ น้ำมันดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์-91 และน้ำมันเครื่อง เพื่อจะได้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการผลิตแผ่นยางคงรูปจากยางผสม EPDM/NBR สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในยางหุ้มถึงน้ำมันที่เหมาะสมสำหรับใช้งานอุณหภูมิสูงและมีความทนต่อน้ำมันชนิดต่างๆ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ยางและสารเคมี

งานวิจัยนี้ใช้ระบบกัมมะถันในการคงรูปยางผสม EPDM/NBR โดยปริมาณของยางและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณของยางและสารเคมีสำหรับเตรียมยางคอมปาวด์ผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr) ^a	เกรด/บริษัทผู้ผลิต
ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM)	แปรปรมาณ ^b	VISTALON 3666 (4.5% ENB) / บริษัท เอ็กซอนโมบิล จำกัด
ยางไนไตรล์ (NBR)	แปรปรมาณ ^b	NBR 3345 (33% Acrylonitrile content)/ บริษัท เอ็กซอนโมบิล จำกัด
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)	6	Commercial grade/ บริษัท อีเนรีโปรดักท์ จำกัด
กรดสเตียริก (Stearic acid)	2	Commercial grade/ บริษัท อีเนรีโปรดักท์ จำกัด
เขม่าดำ (Carbon black, CB)	40	N330/ บริษัท ไทยคาร์บอนโปรดักท์ จำกัด
แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃)	60	Ground precipitated type/ หจก. พี.เอส.ชาयน์ เคมีคอล
น้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil)	5	Commercial grade/ บริษัท พีทีที โกลบอล เคมีคอล จำกัด (มหาชน)
สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (6-PPD)	2	Commercial grade/ บริษัท อิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมีคัลส์ จำกัด
เตตระเมทิลไทอูรามไดซัลไฟด์ (TMTD)	0.8	Thiuram type/ บริษัท เคมีมินคอร์ปอเรชั่น จำกัด
ซิงค์ไดเอทิลไดไฮโอคาร์บาเมต (ZDEC)	2.5	Carbamate type/ บริษัท เคมีมินคอร์ปอเรชั่น จำกัด
ไดเบนโซโรอาซิล ไดซัลไฟด์ (MBTS)	1.5	Sulfenamide type/ บริษัท เคมีมินคอร์ปอเรชั่น จำกัด
กำมะถัน (Sulfur; S ₈)	2	Commercial grade/ บริษัท เคมีมินคอร์ปอเรชั่น จำกัด

^a ส่วนในยางหนึ่งร้อยส่วน (Parts per hundred parts of rubber; phr)

^b สัดส่วนของยางผสม EPDM/NBR คือ 100/0, 70/30, 50/50, 30/70 และ 0/100 ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt/wt)



2. การบดผสมและทดสอบลักษณะการคงรูปของยางคอมปาวด์

การเตรียมยางคอมปาวด์แบบสองขั้นตอน (Two-step mixing) โดยในขั้นตอนแรกเตรียมยางมาสเตอร์แบทช์ของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ ในเครื่องผสมระบบปิด (Kneader) ขนาด 3 ลิตร โดยกำหนดสภาวะในการผสมดังนี้ Fill factor เท่ากับ 0.7 อุณหภูมิห้องผสมเริ่มต้นเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาในการบดผสมรวม 7 นาที โดยเริ่มต้นบดยางผสม EPDM/NBR กับสารตัวเติมและสารเคมีต่างๆ (ยกเว้นกำมะถันและสารตัวเร่ง) ดังสูตรที่แสดงในตารางที่ 1 หลังจากนั้นนำยางมาสเตอร์แบทช์ที่เตรียมได้ในขั้นตอนแรกมาผสมกับกำมะถันและสารตัวเร่งบนเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นเก็บยางคอมปาวด์ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปวัดลักษณะการคงรูปด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating disc rheometer; ODR) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D2084 โดยบันทึกค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque, M_L) แรงบิดสูงสุด (Maximum torque, M_H) ผลต่างของแรงบิด (Torque difference, $M_H - M_L$) เวลาเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time, t_{s2}) เวลาในการคงรูป (Cure time, t_{c95}) และคำนวณหาค่าดัชนีอัตราการคงรูป (Cure rate index, CRI) ดังสมการที่ (1) (Ahmed *et al.*, 2002)

$$CRI (\text{min}^{-1}) = 100/(t_{c95} - t_{s2}) \quad (1)$$

เมื่อ t_{c95} คือ เวลาในการคงรูป (min)
 t_{s2} คือ เวลาเริ่มเกิดการคงรูป (min)

3. การเตรียมยางคงรูปและทดสอบสมบัติของยางคงรูป

นำยางคอมปาวด์ไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเข้าด้วยความร้อน (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยอ้างอิงระยะเวลาในการขึ้นรูปและการคงรูปขึ้นทดสอบกับค่าเวลาเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time, t_{s2}) และค่าเวลาในการคงรูป (Cure time, t_{c95}) ที่ทดสอบได้จากเครื่อง ODR

เมื่อเตรียมขึ้นทดสอบยางคงรูปเรียบร้อยแล้ว นำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมีและสมบัติเชิงกล ดังนี้ การทดสอบสมบัติการทนต่อน้ำมัน ตามมาตรฐาน ASTM D471

โดยน้ำมันที่ใช้มี 3 ชนิด คือ น้ำมันดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์-91 และน้ำมันเครื่อง เริ่มต้นตัดชิ้นตัวอย่างยางคงรูปขนาดความกว้าง ความยาวและความหนา เท่ากับ 20 x 20 x 3 มิลลิเมตร และชั่งน้ำหนักเริ่มต้นหลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างแช่ในน้ำมันและตัวทำละลายที่ปริมาตร 70 มิลลิลิตร บรรจุในขวดแก้วและเก็บไว้ในที่มืดเป็นเวลา 7 วัน ช่วงอุณหภูมิ 28 - 31 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นตัวอย่างยางคงรูปหลังการบวมพองออกมาชั่งน้ำหนักด้วยกระดาศูและชั่งน้ำหนักในขวดชั่งสาร (Weighing bottle) ก่อนนำไปคำนวณหาร้อยละการบวมพอง (Swelling ratio) ดังสมการที่ (2) (Prasertsri *et al.*, 2016)



$$\text{Swelling ratio (\%)} = [(M_2 - M_1)/M_1] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ M_1 คือ น้ำหนักของยางคงรูปก่อนการบวมพอง (g)

M_2 คือ น้ำหนักของยางคงรูปหลังการบวมพอง (g)

การทดสอบความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density)

นำชิ้นตัวอย่างยางคงรูปขนาดความกว้าง ความยาวและความหนา เท่ากับ $20 \times 20 \times 3$ มิลลิเมตร ทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ไปแช่ในโทลูอีนที่อุณหภูมิห้องระยะเวลา 7 วัน เพื่อให้เกิดการบวมพองสมบูรณ์ เมื่อครบกำหนดเวลานำชิ้นตัวอย่างยางคงรูปหลังการบวมพองออกมาซับพื้นผิวด้วยกระดาษทิชชูและชั่งน้ำหนักในขวดชั่งสาร (Weighing bottle) หลังจากนั้นนำชิ้นตัวอย่างยางคงรูปไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อระเหยเอาโทลูอีนออกและชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ก่อนนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาความหนาแน่นของการเชื่อมโยงได้จากสมการของ Flory-Rehner ดังสมการที่ (3) (Flory & Rehner, 1943) โดยเปรียบเทียบความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของชิ้นตัวอย่างยางทั้งก่อนบ่มเร่งและหลังบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

$$n = -\frac{1}{2V_s} \left(\frac{\ln(1 - V_r) + V_r + \chi V_r^2}{V_r^{1/3} - (V_r/2)} \right) \quad (3)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (mole/cm³)

χ คือ ดัชนีความเข้ากันของยางกับตัวทำละลายโทลูอีน

V_s คือ ปริมาตรของโทลูอีน 1 โมล (106.2 cm³/mole)

V_r คือ ปริมาตรของเนื้อยางในยางที่บวมพอง (cm³)

สามารถหา V_r ได้จากสมการที่ 4 (Peng *et al.*, 2009)

$$V_r = \frac{1}{1 + \left(\frac{W_u}{W_s} - 1 \right) \frac{\rho_r}{\Phi_r \rho_s}} \quad (4)$$

เมื่อ W_u คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังระเหยโทลูอีนออก (g)

W_s คือ น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างหลังแช่โทลูอีน (g)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของโทลูอีน (0.8669 g/cm³)

ρ_r คือ ความหนาแน่นของยางวัลคาไนซ์ (g/cm³)

Φ_r คือ สัดส่วนของเนื้อยางที่มีอยู่ในยางวัลคาไนซ์



การทดสอบสมบัติความแข็ง (*Hardness*) ตามมาตรฐาน ASTM D2240

ด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบชอร์เอดูโรมิเตอร์ (*Shore A durometer*) โดยเปรียบเทียบความแข็งของชิ้นตัวอย่างทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง (*Tensile property*) และสมบัติความทนต่อการฉีกขาด (*Tear property*) ตามมาตรฐาน ASTM D412 และ ASTM D624 ตามลำดับ

โดยใช้เครื่อง Universal extensometer ขนาดน้ำหนักในการดึง 1000 นิวตัน และอัตราเร็วในการทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยเปรียบเทียบสมบัติความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของชิ้นตัวอย่างทั้งก่อนบ่มและหลังบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การทดสอบสมบัติการเสียรูปถาวรเนื่องจากการกด (*Compression set*) ตามมาตรฐาน ASTM D395

โดยนำชิ้นตัวอย่างยางคงรูปทรงกระบอกบรรจุในชุดทดสอบการเสียรูปถาวรเนื่องจากการกด (*Compression set apparatus*) ก่อนนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาแล้วนำชิ้นตัวอย่างออกจากชุดทดสอบและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงวัดความหนาหลังการทดสอบแล้วนำค่าที่ได้คำนวณหาค่า *compression set* (%) ดังสมการที่ 5 (Jaunich *et al.*, 2011)

$$\text{Compression set (\%)} = [(t_0 - t_1) / (t_0 - t_n)] \times 100 \tag{5}$$

- เมื่อ t_0 = ความหนาของชิ้นตัวอย่างก่อนการทดสอบ (mm)
- t_1 = ความหนาของชิ้นตัวอย่างหลังการทดสอบ (mm)
- t_n = ความหนาของแท่งโลหะกั้นระยะ (mm)

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อโอโซน (*Ozone resistance*) ตามมาตรฐาน ASTM D1149

โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างยางคงรูปขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร ความยาว 80 มิลลิเมตรและความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ใส่ในชุดทดสอบความต้านทานต่อโอโซนและดึงตัวอย่างให้ยืดออก (*Strain*) ร้อยละ 20 ก่อนนำชุดทดสอบแขวนไว้ในห้องทดสอบภายใต้สภาวะบรรยากาศโอโซน (*Ozone aging chamber*) ที่ความเข้มข้น 50 pphm อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 72 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาแล้วนำชิ้นตัวอย่างออกจากชุดทดสอบ ถ่ายภาพและสังเกตการเกิดรอยแตกบนพื้นผิวของชิ้นตัวอย่าง

การตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยา (*Morphology*)

ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของยางคงรูปเพื่อประเมินการกระจายตัวและการแตกตัวของสารตัวเติมผสม โดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (*Scanning Electron Microscope; SEM*) นำชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึงแล้วมาตัดเฉือนเอาบริเวณพื้นผิวน้ำตัดที่ขาด หลังจากนั้นนำไปเคลือบทองคำด้วยเครื่อง *Sputter Coater* เป็นเวลา 2 นาที แล้วจึงนำไปส่องที่ก่าลึงขยาย 500 เท่า

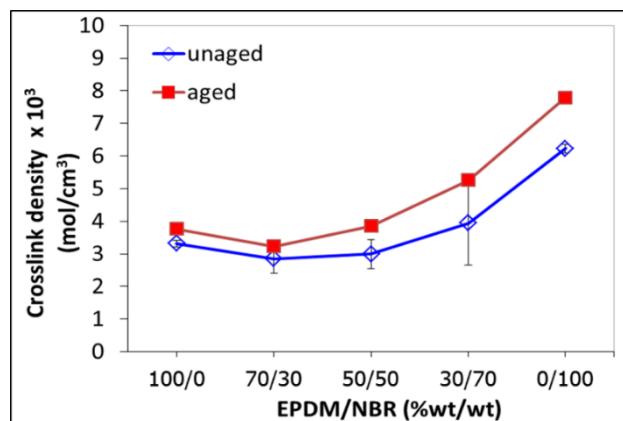
ผลการวิจัย

1. ลักษณะการคงรูปและความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

ลักษณะการคงรูปของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2 จากผลการทดลองพบว่า การเติมยาง NBR เข้าไปส่งผลทำให้เวลาเริ่มเกิดการคงรูป (Scorch time, t_{s2}) และเวลาในการคงรูป (Cure time, t_{c95}) ของยางผสม EPDM/NBR มีแนวโน้มลดลง และดัชนีอัตราการคงรูป (Cure rate index, CRI) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณยาง NBR นั้นไม่เพียงแต่จะเร่งอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงแต่ยังทำให้ยางผสมมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นด้วย โดยจะเห็นจากการเพิ่มขึ้นของค่าความแตกต่างของแรงบิด ($M_H - M_L$) ซึ่งเป็นค่าที่แปรผันตรงกับระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง นอกจากนี้ในกรณีของชิ้นทดสอบที่บ่มเร่งด้วยความร้อน (Aged samples) พบว่า ยางผสม EPDM/NBR ในทุกสัดส่วนการผสมมีค่าความหนาแน่นการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบที่ไม่บ่มเร่งด้วยความร้อนเล็กน้อย (ภาพที่ 1)

ตารางที่ 2 ลักษณะการคงรูปของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ

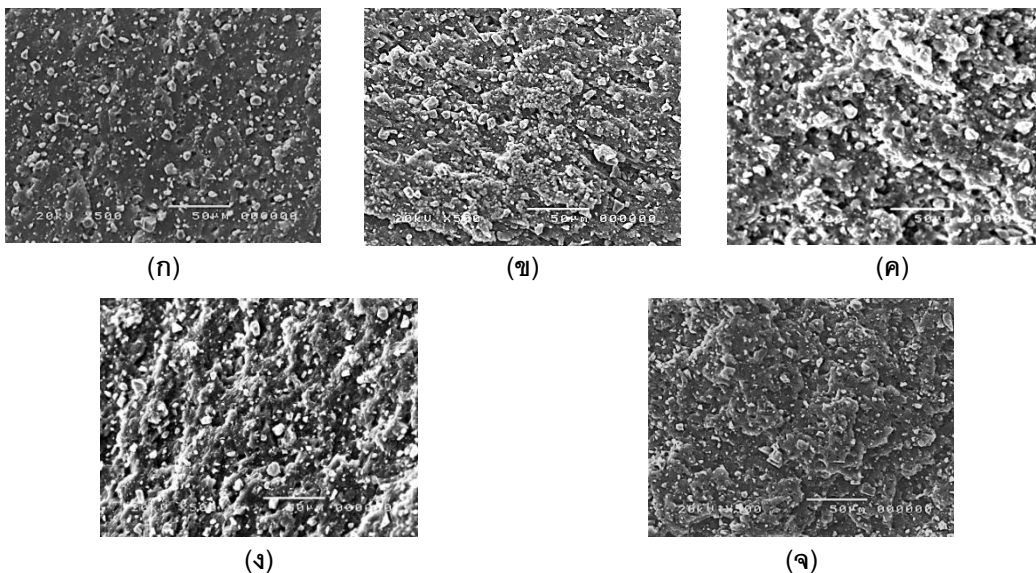
Cure characteristics	Blend ratios of EPDM/NBR (%wt/wt)				
	100/0	70/30	50/50	30/70	0/100
Scorch time, t_{s2} (min)	1.22±0.33	1.00±0.05	0.58±0.06	0.58±0.03	0.53±0.04
Cure time, t_{c95} (min)	8.64±0.25	6.50±0.06	4.90±0.12	4.09±0.05	2.88±0.29
Cure rate index, CRI (%)	13.47±0.41	18.18±0.55	23.13±0.40	28.45±1.83	42.62±1.29
M_L (dN.m)	6.77±0.26	6.96±0.18	5.92±0.17	5.41±0.27	5.15±0.08
M_H (dN.m)	23.85±0.42	26.67±0.35	26.75±0.14	29.48±0.05	37.50±0.37
$M_H - M_L$ (dN.m)	17.08±0.16	19.72±0.49	20.83±0.03	24.06±0.22	32.35±0.45



ภาพที่ 1 ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงทั้งก่อนและหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ

2. ลักษณะสัณฐานวิทยา

ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวหน้าตัดของชิ้นตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบสมบัติความทนต่อแรงดึง (tensile fractured surface) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยภาพที่ 2 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางผสม EPDM/NBR ที่กำลังขยาย 500 เท่า จากรูป SEM สังเกตเห็นเฉพาะผิวขรุขระของพื้นผิวดังกล่าวแต่ไม่สามารถแยกวิภาคของยาง EPDM และยาง NBR ได้ นอกจากนี้พบว่า เมื่อผสมยาง NBR เข้าไปในปริมาณ 30-50 %wt ลักษณะทางพื้นผิวของยางผสมมีความไม่สม่ำเสมอ ปรากฏกลุ่มก้อนการแยกของวิภาคยางและมีการกระจุกกันของสารตัวเติมในบางตำแหน่งอยู่ในเมทริกซ์ยางผสม EPDM/NBR โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งมีอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำ

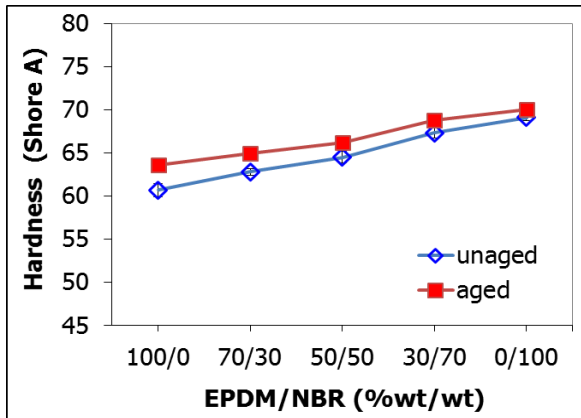


ภาพที่ 2 ลักษณะสัณฐานวิทยา (กำลังขยาย 500 เท่า) ของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ ; (ก) 100/0, (ข) 70/30, (ค) 50/50, (ง) 30/70, (จ) 0/100 %wt/wt

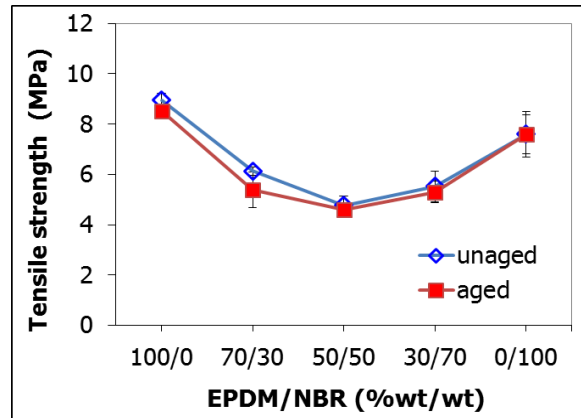
3. สมบัติเชิงกล สมบัติการทนต่อน้ำมันและความต้านทานต่อโอโซน

ภาพที่ 3 (ก-ค) แสดงสมบัติเชิงกลของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ ทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนพบว่า การผสม NBR เข้าไปจะทำให้ความแข็ง (Hardness) ของยางผสม EPDM/NBR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และความแข็งของชิ้นทดสอบที่ผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อนจะสูงกว่าที่ไม่บ่มแรงด้วยความร้อน (ภาพที่ 3(ก)) ในขณะที่สมบัติความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) และความทนต่อการฉีกขาด (Tear strength) แสดงดังภาพที่ 3(ข) และภาพที่ 3(ค) ตามลำดับ พบว่า การผสมยาง NBR เข้าไปใน EPDM จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางผสม EPDM/NBR ต่ำกว่าในกรณียาง EPDM หรือ NBR 100%wt โดยที่สัดส่วนของยางผสมที่ 50/50 %wt/wt จะมีค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบค่าความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดในทุกสัดส่วน

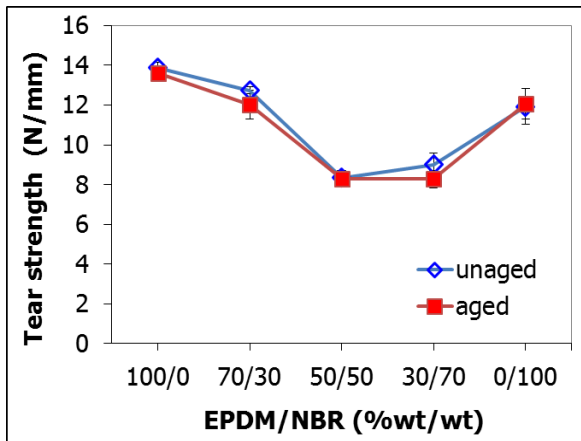
ยางผสม พบว่า สมบัติทั้งก่อนและหลังการบ่มแรงด้วยความร้อนมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ภาพที่ 3(ง) แสดงสมบัติการเสีรูปถาวรเนื่องจากการกด (Compression set) ของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ พบว่า การเติมยาง NBR เข้าไปจะทำให้ค่าการเสีรูปถาวรเนื่องจากการกดของยางผสมมีแนวโน้มลดต่ำลง ซึ่งบ่งบอกถึงการคืนตัวของยางคงรูปได้ดีขึ้น



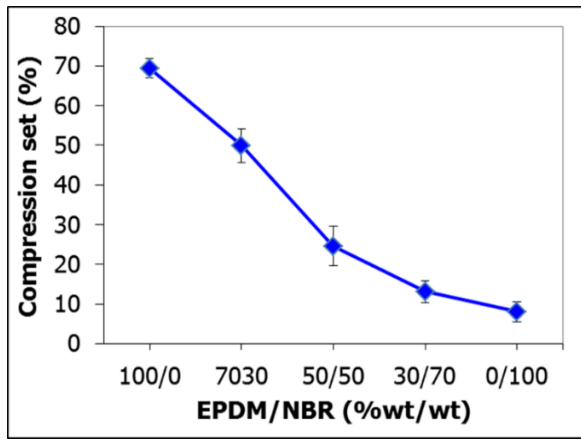
(ก)



(ข)



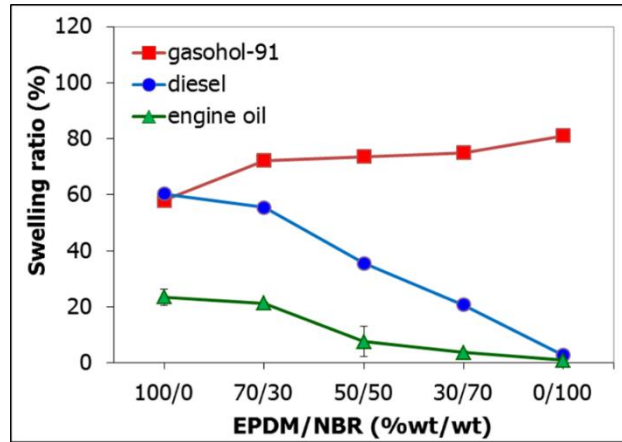
(ค)



(ง)

ภาพที่ 3 สมบัติเชิงกลของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ; (ก) ความแข็ง, (ข) ความทนต่อแรงดึง, (ค) ความทนต่อการฉีกขาด, (ง) การเสีรูปถาวรเนื่องจากการกด

ผลของอัตราการบวมพองของชิ้นตัวอย่างยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ เมื่อแช่ในน้ำมันดีเซล น้ำมันเครื่องและน้ำมันแก๊สโซฮอล์-91 แสดงดังภาพที่ 4 โดยอัตราการบวมพองของชิ้นตัวอย่างที่แช่ในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่องมีแนวโน้มลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่า การต้านทานการบวมพองในน้ำมันแก๊สโซฮอล์-91 ของยางผสมมีแนวโน้มด้อยลงเมื่อมีสัดส่วนของยาง NBR ในปริมาณมากขึ้น



ภาพที่ 4 อัตราการบวมพองในน้ำมันของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ

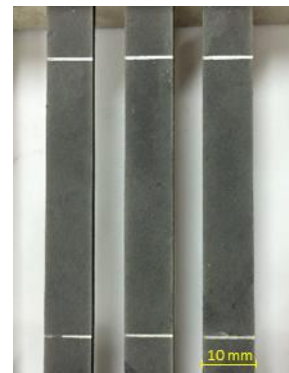
ภาพที่ 5 (ก-ค) แสดงภาพถ่ายพื้นผิวชิ้นตัวอย่างของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ หลังผ่านการทดสอบความต้านทานต่อโอโซน โดยภาพที่ 5(ก) ไม่พบรอยแตกบนชิ้นทดสอบของยาง EPDM (100/0 %wt/wt) ในขณะที่ยาง NBR (0/100 %wt/wt) พบรอยแตกขนาดเล็กจำนวนมาก (ดังตัวอย่างในตำแหน่งลูกศรชี้ในภาพที่ 5(จ)) เนื่องจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนเกิดขึ้นทั่วบริเวณพื้นผิวการทดสอบ และเมื่อพิจารณา EPDM/NBR ที่สัดส่วน 70/30 %wt/wt (ภาพที่ 5(ข)) และ 50/50 %wt/wt (ภาพที่ 5(ค)) ไม่ปรากฏรอยแตกบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบ แต่เมื่อปริมาณของยาง NBR เพิ่มมากขึ้นก็พบรอยแตกเกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วน 30/70 %wt/wt (ดังตัวอย่างในตำแหน่งลูกศรชี้ในภาพที่ 5(ง))



(ก)



(ข)

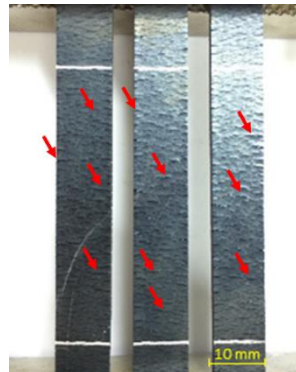


(ค)

ภาพที่ 5 ลักษณะพื้นผิวชิ้นตัวอย่างหลังผ่านการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ; (ก) 100/0, (ข) 70/30, (ค) 50/50 %wt/wt



(ง)



(จ)

ภาพที่ 5 ลักษณะพื้นผิวชั้นตัวอย่างหลังผ่านการทดสอบความต้านทานต่อไอโซนของยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ; (ง) 30/730, (จ) 0/100 %wt/wt (ลูกศรชี้แสดงตัวอย่างตำแหน่งที่เกิดรอยแตก)

วิจารณ์ผลการวิจัย

1. ลักษณะการคงรูปและความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

การเพิ่มปริมาณยาง NBR เข้าไปในยางผสม EPDM/NBR ส่งผลทำให้ใช้เวลาในการคงรูปน้อยลงและอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปมีแนวโน้มสูงขึ้น (ตารางที่ 2) สาเหตุมาจากยาง NBR มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลมากกว่ายาง EPDM ซึ่งพันธะคู่มีความไวต่อปฏิกิริยากับกำมะถันที่เป็นสารคงรูป (Bhowmick *et al.*, 2000) และอาจเป็นผลเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างทางเคมีและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลยาง EPDM มีความแะกะจิงส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปที่ช้ากว่ายาง NBR ดังนั้น ยางผสมที่มีสัดส่วนของยาง NBR อยู่มากก็จะเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ดีและมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ยางที่มากกว่า (Botros *et al.*, 2005, Goma *et al.*, 2010 ; Jovanović *et al.*, 2013) ซึ่งเป็นสัญญาณบ่งบอกว่ายางคงรูปมีความแข็งแรง (Stiffness) มากขึ้น นอกจากนี้การที่ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นหลังจากการบ่มเร่งขึ้นทดสอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลยางมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นได้จากที่ใช้เวลาในการคงรูปที่ร้อยละ 95 (t_{95}) ในตอนแรก โดยเรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดปฏิกิริยาหลังการอบสุก (Post curing effect) (Rattanasom *et al.*, 2009)

2. ลักษณะสัณฐานวิทยา

จากรูป SEM ของยางผสมที่กำลังขยาย 500 เท่า จะสังเกตเห็นเฉพาะผิวขรุขระของพื้นผิวดตัวอย่างเท่านั้นแต่ไม่สามารถแยกแยะวัฏภาคระหว่างยาง EPDM และยาง NBR ได้ เนื่องจากตัวอย่างยางคงรูปในการทดลองนี้เติมสารตัวเติมผสมเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณรวม 100 phr ซึ่งเท่ากับเนื้อยาง ดังนั้นจึงไม่สามารถแยกวัฏภาคของยาง NBR ซึ่งมีพันธะคู่สูงกว่าด้วยออกไซด์ของโอสมียมเตตระออกไซด์ (Osmium tetroxide, OsO_4) เพื่อดูลักษณะสัณฐานวิทยาของยางผสม EPDM/NBR ดังที่มีรายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ไม่เติมสารตัวเติมหรือเติมสารตัวเติมในปริมาณน้อย (Tinker *et al.*, 1998) โดยทางทฤษฎีแล้วยางผสม EPDM/NBR จะเกิดความไม่เข้ากันและเกิดการแยกวัฏภาค เนื่องจากความแตกต่างในสภาพความมีขั้ว



ของยางทั้ง 2 ชนิด (ยาง EPDM ไม่มีซัลฟิวกับยาง NBR ที่มีซัลฟิว) โดยมีนักวิจัยส่วนหนึ่งได้เสนอแนะการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้โดยการเติมสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer) เช่น ยางโพรโมบิวไทล์ (Botros *et al.*, 2005) มาเลอิกแอนไฮไดรด์กราฟต์เอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Botros *et al.*, 2006) เป็นต้น ซึ่งจากภาพ SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า เกิดการเกาะกลุ่มก้อนของสารตัวเติมและสารตัวเติมมีความชอบที่กระจายตัวในยางแต่ละวัสดุภาคไม่เท่ากัน โดยสังเกตเห็นชัดเจนที่สัดส่วน 50/50 EPDM/NBR (ภาพที่ 2 (ค)) ซึ่งลักษณะสัณฐานวิทยาที่ไม่สม่ำเสมอดังกล่าวนี้เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสมด้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติเชิงกลของยางเพียงชนิดเดียว (ซึ่งจะอธิบายและวิจารณ์ผลการทดลองในส่วนถัดไป) ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ของ Jovanovic และคณะ ได้ศึกษาผลของปริมาณเคมีด้าเกรด N330 (60-100 phr) ต่อสมบัติของยางผสม EPDM/NBR พบว่า การกระจายตัวของเคมีด้าในแต่ละวัสดุภาคยางไม่สม่ำเสมอและมีการยึดติดระหว่างรอยต่อของแต่ละวัสดุภาคยางต่ำ เนื่องจากความไม่เข้ากันของยาง EPDM (ไม่มีซัลฟิว) กับยาง NBR (มีซัลฟิว) (Jovanović *et al.*, 2013)

3. สมบัติเชิงกล สมบัติการทนต่อน้ำมันและความต้านทานต่อโอโซน

การเพิ่มปริมาณยาง NBR ในยางผสมทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นจึงเป็นสาเหตุทำให้ความแข็งแรงสูงขึ้น นอกจากนี้การที่ยางคงรูปที่ผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อนมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกิดพันธะการเชื่อมโยงเพิ่มเติมในขณะการบ่มแรงด้วยความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผลของความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ เมื่อพิจารณาสมบัติความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมจะต่ำกว่าพฤติกรรมของกฎการผสม (Anti-synergistic effect in mixture rule) ทั้งนี้เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างยางผสม EPDM กับ NBR (Botros *et al.*, 2006) แต่อย่างไรก็ตาม การผสมยาง NBR เข้าไป ช่วยลดการเสียรูปถาวรเนื่องจากการกด (Compression set) ของยาง EPDM ลงได้ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราเร็วในการเกิดการคงรูปของยาง EPDM ต่ำกว่ายาง NBR ดังนั้น ยางผสมที่มีสัดส่วนยาง EPDM ในปริมาณมาก จึงมีความสามารถในการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ยางต่ำกว่าและนำไปสู่สาเหตุการยุบตัวถาวรเนื่องจากการกดที่มากกว่ายางผสมที่มีสัดส่วนยาง NBR ในปริมาณมาก

การที่เพิ่มสัดส่วนของยาง NBR ส่งผลดีในแง่การลดอัตราการบวมพองของยางผสมที่แช่ในน้ำมันที่มีสภาพขี้ดต่ำ (ดีเซลและน้ำมันเครื่อง) เนื่องจากการเพิ่มสัดส่วนยาง NBR ทำให้ยางผสมมีสภาพความเป็นขี้ดมากขึ้นจึงทำให้ต้านทานต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ดต่างๆ ได้ดี (Manoj *et al.*, 2010) แต่ในทางตรงกันข้ามกับน้ำมันแก๊สโซฮอล์-91 ที่มีปริมาณเบนซินร้อยละ 90 และเอทานอลร้อยละ 10 โดยปริมาตร (Prasertsri *et al.*, 2014) ซึ่งความมีขี้ดของเอทานอลที่อยู่ในแก๊สโซฮอล์ส่งผลทำให้แนวโน้มของการบวมพองที่สูงขึ้นตามสัดส่วนของยาง NBR ที่มากขึ้น ซึ่งผลการทดสอบสมบัติการบวมพองในน้ำมันหลากหลายชนิดในงานวิจัยนี้ เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจเลือกใช้ยางผสมในแต่ละสัดส่วนให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องสัมผัสกับน้ำมันที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้ง่ายขึ้น กล่าวคือ ถ้าน้ำมันที่ไม่มีขี้ดก็เลือกใช้ยางผสม EPDM/NBR ที่มียาง NBR ในสัดส่วนที่มาก ในทางตรงกันข้ามหากต้องสัมผัสกับน้ำมันที่มีขี้ดก็ใช้ยางผสม EPDM/NBR ที่มียาง EPDM ในสัดส่วนที่มาก

ในทางทฤษฎีการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนของยางผสมขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น สัดส่วนของยางผสม ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางผสม เป็นต้น แต่เมื่อปริมาณของยาง NBR มากกว่า 50 %wt ปรากฏรอยแตกเกิดขึ้นบางตำแหน่งบนพื้นผิวชิ้นงาน (ภาพที่ 5(ง)) EPDM/NBR 30/70 %wt/wt) ซึ่งเป็นสัญญาณเริ่มเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนของวัสดุภาคยาง

NBR ซึ่งมีปริมาณพันธะคู่ที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาโอโซนไลซิส (Ozonolysis) มากกว่ายาง EPDM (Mark *et al.*, 2013) จากผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อโอโซนเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้สามารถประเมินได้ว่ายางผสมที่ไม่พบรอยแตกบนพื้นผิวขึ้นทดสอบทั้ง 2 สูตร คือ 70/30 และ 50/50 EPDM/NBR (ภาพที่ 5(ข) และ (ค)) มียาง EPDM เป็นเมทริกซ์หรือวัฏภาคต่อเนื่อง (Matrix or continuous phase) และมียาง NBR เป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) ในทำนองเดียวกันสูตร 30/70 EPDM/NBR ที่เริ่มเกิดรอยแตกหลังจากผ่านการทดสอบโอโซน มียาง NBR เป็นเมทริกซ์หรือวัฏภาคต่อเนื่อง (Matrix or continuous phase) และมียาง EPDM เป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) นั่นเอง

5. การเปรียบเทียบสมบัติและวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของสูตรยางที่พัฒนาขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของสูตรยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ ในงานวิจัยนี้ สูตรยางควบคุม (สูตรที่ใช้ยาง EPDM เพียงอย่างเดียว) กับคุณลักษณะ (Specification) ของแผ่นยางหุ้มถังน้ำมันที่บริษัทผู้ผลิตต้องการ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า สูตรยางคอมปาวด์ที่พัฒนาขึ้น คือ สูตรยางผสม 70/30 EPDM/NBR มีค่าระยะเวลาในการคงรูป (t_{95}) ที่สั้นกว่าสูตรควบคุม นับเป็นข้อได้เปรียบในแง่การช่วยลดเวลาและประหยัดพลังงานในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ ซึ่งสูตรทั้งสองให้ค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกัน โดยที่สูตรยางที่พัฒนาขึ้นมีความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดต่ำกว่าสูตรควบคุม แต่ให้สมบัติเด่นในการต้านทานต่อการบวมพองในน้ำมันที่ไม่มีขี้ขี้ คือ น้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่อง โดยค่าความแข็งและความทนต่อแรงดึงของสูตรยางที่พัฒนาขึ้นผ่านคุณลักษณะของแผ่นยางหุ้มถังน้ำมัน และมีความทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนโดยไม่ปรากฏรอยแตกขึ้นบนพื้นผิวของขึ้นทดสอบ

ตารางที่ 3 สมบัติเชิงกล สมบัติการทนต่อน้ำมันและการทนต่อโอโซนของสูตรยางที่พัฒนาในงานวิจัยและยางสูตรควบคุม (เปรียบเทียบกับคุณลักษณะของแผ่นยางหุ้มถังน้ำมันที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด*)

คุณสมบัติ	คุณลักษณะของแผ่นยางหุ้มถังน้ำมัน*	สูตรควบคุม (100/0 EPDM/NBR)	สูตรในงานวิจัยที่เหมาะสม (70/30 EPDM/NBR)
เวลาในการคงรูป (min)	-	8.64±0.25	6.50±0.06
ความแข็ง (Shore A)	60-65 Shore A	60.7±0.8	62.8±1.1
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	ไม่ต่ำกว่า 5 MPa	8.95±0.28	6.13±0.175
ความทนต่อการฉีกขาด (N/mm)	-	13.88±0.05	12.73±0.40
การบวมพองในน้ำมันดีเซล (%)	-	60.4±0.4	55.5±0.7
การบวมพองในน้ำมันแก๊สโซฮอล์-91 (%)	-	58.0±0.2	72.2±0.4
การบวมพองในน้ำมันเครื่อง (%)	-	23.5±0.4	21.3±0.5
ความต้านทานต่อโอโซน	-	ไม่พบรอยแตก	ไม่พบรอยแตก



เมื่อคำนวณต้นทุนการผลิตสูตรยางผสม 70/30 EPDM/NBR ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับสูตรควบคุมดังแสดงในตารางที่ 4 โดยคิดการผสมในเครื่องผสมแบบปิด (Kneader) ให้ได้อย่างคอมปาวด์น้ำหนักสุทธิ 1 กิโลกรัม พบว่า สูตรควบคุมมีต้นทุนการผลิตเท่ากับ 107.59 บาท/กิโลกรัม และสูตรที่พัฒนาในงานวิจัยเท่ากับ 121.12 บาท/กิโลกรัม โดยมีต้นทุนสูงขึ้นประมาณ 13.52 บาท คิดเป็นร้อยละ 12.57 จากต้นทุนของสูตรควบคุม

ตารางที่ 4 การคำนวณต้นทุนการผลิตของสูตรยางที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม

ยางและสารเคมี	ราคา (บาท/กิโลกรัม)	สูตรควบคุม (100/0 EPDM/NBR)			สูตรในงานวิจัยที่เหมาะสม (70/30 EPDM/NBR)		
		ปริมาณ (phr)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ราคา (บาท)	ปริมาณ (phr)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ราคา (บาท)
EPDM	160	100	1.1325	181.20	70	0.7892	126.27
NBR	260	-	-	-	30	0.3382	87.93
Zinc oxide	125	6	0.0680	8.50	6	0.0676	8.45
Stearic acid	65	2	0.0227	1.48	2	0.0225	1.46
CB (N330)	90	40	0.4530	40.77	40	0.4510	40.59
CaCO ₃	18	60	0.6795	12.23	60	0.6764	12.18
Paraffin oil	150	5	0.0566	8.49	5	0.0564	8.46
6-PPD	270	2	0.0227	6.13	2	0.0225	6.08
TMTD	170	0.8	0.0091	1.55	0.8	0.0090	1.53
ZDEC	220	2.5	0.0283	6.23	2.5	0.0282	6.20
MBTS	168	1.5	0.0170	2.86	1.5	0.0169	2.84
Sulfur	38	2	0.0227	0.86	2	0.0225	0.86
		รวม	2.5121	270.29	รวม	2.5004	302.84
เมื่อคิดต้นทุนต่อ 1 กิโลกรัมของยางคอมปาวด์							
		รวม	1.0000	107.59	รวม	1.0000	121.12
			น้ำหนัก (กก.)	ราคา (บาท)		น้ำหนัก (กก.)	ราคา (บาท)



สรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนยางผสม EPDM/NBR ต่อสมบัติการคงรูป สมบัติเชิงกล การทนต่อความร้อน ความทนต่อน้ำมันและความต้านทานต่อโอโซน สรุปได้ดังนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม (ใช้ยาง EPDM 100 %wt) พบว่าการเติมยาง NBR เข้าไปผสมกับยาง EPDM ส่งผลทำให้ดัชนีอัตราการคงรูปมีแนวโน้มสูงขึ้น ในขณะที่เวลาเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาในการคงรูปมีแนวโน้มลดลง ส่งผลดีในแง่การลดเวลาในการขึ้นรูปของยางผสม EPDM/NBR ได้ นอกจากนี้การเพิ่มสัดส่วนยาง NBR ในยางผสมมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ยางคงรูปที่ได้มีความแข็งแรงมากขึ้นและการต้านทานต่อการเสียรูปหลังการกดดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในทุกสัดส่วนยางผสม EPDM/NBR จะให้สมบัติความทนต่อแรงดึงต่ำกว่าในยาง EPDM และยาง NBR อย่างเดียว ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันของยาง EPDM ที่ไม่มีขั้วกับยาง NBR ที่มีขั้ว เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วนต่างๆ พบว่า ยางผสม 70/30 EPDM/NBR จะให้ค่าความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาดและการต้านทานต่อการเสียรูปหลังการกดดีที่สุด ยางผสมที่มียาง NBR ในสัดส่วน ≤ 50 %wt ให้คุณสมบัติการต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนได้โดยไม่พบรอยแตกบนพื้นผิวของชิ้นทดสอบ นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มสัดส่วนยาง NBR ในยางผสมส่งผลให้อัตราการบวมพองในน้ำมันดีเซลและน้ำมันเครื่องลดลง ในขณะที่การบวมพองในน้ำมันแก๊สโซฮอล์-91 มีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสูตรยางผสม EPDM/NBR ในสัดส่วนต่างๆ นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมกับน้ำมันที่มีระดับความมีขั้วต่างๆ ได้ และเมื่อเปรียบเทียบผลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสมที่ต่างๆ สัดส่วน พบว่า ความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมก่อนและหลังการบ่มเร่งมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงให้เห็นว่ายางผสมมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนได้ดีและการใช้สารตัวเติมผสมในปริมาณมากช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของยางผสมที่พัฒนาในงานวิจัยนี้กับสูตรควบคุม (ยาง EPDM เพียงอย่างเดียว) สรุปว่า ยางผสม EPDM/NBR ที่สัดส่วน 70/30 %wt/wt มีคุณสมบัติความแข็งแรงและความทนต่อแรงดึงผ่านคุณลักษณะของแผ่นยางหุ้มถังน้ำมัน มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนได้ดีและมีต้นทุนวัตถุดิบสูงขึ้นประมาณร้อยละ 13 ซึ่งผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ยางหุ้มถังน้ำมันและสามารถนำไปต่อยอดสำหรับผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ ที่ต้องการสมบัติการทนน้ำมันและความร้อนได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และขอขอบคุณแผนกวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ วิทยาลัยเทคนิคศรีสะเกษ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้งานเครื่องผสมระบบปิด (Kneader) เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating disc rheometer; ODR) ในการบดผสมยางและทดสอบลักษณะการคงรูปในงานวิจัยนี้



เอกสารอ้างอิง

- Ahmed, K., Nizami, S.S., Raza N.Z., Shirin K. (2012) Cure characteristics, mechanical and swelling properties of marble sludge filled EPDM modified chloroprene rubber blends. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 2, 90-97.
- Bhowmick, A.K., Stephens H. (2000) *Elastomer handbook*. New York: CRC Press.
- Botros, S.H. (2002) Preparation and characteristics of NR/EPDM rubber blends. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 41, 341-359.
- Botros, S.H., Tawfic, M.L. (2005) Compatibility and thermal stability of EPDM/NBR elastomer blends, *Journal of Elastomer and Plastic*, 37, 299-317.
- Botros, S.H., Tawfic, M.L. (2005) Preparation and characteristics of EPDM/NBR rubber blends with BIIR as compatibilizer, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 44, 209-227.
- Botros, S.H., Tawfic, M.L. (2006) Synthesis and characteristics of MAH-g-EPDM compatibilized EPDM/NBR rubber blends. *Journal of Elastomer and Plastics*, 38, 349-365.
- Dierkes, W.K., Tiwari, M., Guo, R., Datta, R., Talma, A., Noordermeer, J.W.M., van Ooij, W.J. (2013) Overcoming incompatibility problems in elastomer blends by tailored surface properties of rubber additives. *Rubber Chemistry and Technology*, 86(1), 1-27.
- Flokes, M.J., Hope, P.S. (1993) *Polymer blends and alloys*. London: Chapman & Hill.
- Flory, P.J., Rehner Jr. (1943) Statistical mechanics of cross-linked polymer networks. II. Swelling. *Journal of Chemical Physics*, 11, 521-526
- Gomaa, E., Mostafa, N., Aly, E.H. (2010) Positron annihilation study of nanoholes and compatibility of EPDM/NBR blends. *Journal of Taibah University for Science*, 4, 39-45.



Jaunich, M., Stark, W., D. Wolff (2011) Low temperature properties of rubber seals. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 64, 52-55.

Jovanović, V., Samaržija-Jovanović, S., Budinski-Simendić, J., Marković, G., Marinović-Cincović, M. (2013) Composites based on carbon black reinforced NBR/EPDM rubber blends. *Composites Part B: Engineering*, 45, 333-340.

Manoj, K.C. (2010) Aromatic liquid transport through filled EPDM/NBR blends. *Journal of Polymer Research*, 17, 1-9.

Manson, J.A., Sperling, L.H. (1976) *Polymer Blends and Composites*. New York: Plenum Press.

Mark, J.E., Erman, B., Roland M. (2013) *The Science and Technology of Rubber*. Cambridge: Academic Press.

Peng, H., Liu, L., Luo, Y., Wang, X., Jia D. (2009) Effect of 3-propionylthio-1-propyltrimethoxysilane on structure, mechanical, and dynamic mechanical properties of NR/silica composites, *Polymer Composites*, 30, 955-961.

Prasertsri, S., Amnuay, P., Sripan, K., Nuinu, P. (2014) Role of hydroxyl-terminated polybutadiene in changing properties of EPDM/ENR blends. *Advanced Materials Research*, 844, 349-352.

Prasertsri, S., Kurakanok, K., Sukkapan N. (2016) Physico-mechanical properties and automotive fuel resistance of EPDM/ENR blends containing hybrid fillers. *Journal of Polymer Research*, 23, 228(1-8).

Rattanasom, N., Prasertsri, S., Suchiva, K. (2009) Mechanical properties, thermal stability, gas permeability, and phase morphology in natural rubber-bromobutyl rubber blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 113, 3985-3992.

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.



Sirisinha, C., Saeoui, P., Pattanawanidchai, S. (2004) Rheological properties, oil, and thermal resistance in sulfur-cured CPE/NR blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 93, 1129-1135.

Tinker, A.J., Jones, K.P. (1998) *Blends of natural rubber: novel techniques for blending with specialty polymers*. London: Chapman & Hall.

White, J.L. (1995) *Rubber processing: technology, materials and principles*. Munich: Hanser Publishers.