วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 พ.ค. - ส.ค. 50

ผลของปริมาณเอทธิลีนในยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) และสัดส่วนการผสมต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน

Effects of Ethylene Content in EPDM and Blend Ratio on Properties of NR/EPDM Blends

พงษ์ธร แซ่อุย อุทัย เทพสุวรรณ และภุชงค์ ทับทอง

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย

ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

หน่วยเทคโนโลยียางมหิดล-เอ็มเทค คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

ชาคริต สิริสิงห

หน่วยเทคโนโลยียางมหิดล-เอ็มเทค คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ต.ศาลายา อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณเอทธิลีนในยาง EPDM และสัดส่วนของการผสมต่อสมบัติเชิงกล ความทนทานต่อความร้อนและโอโซนของยางผสม NR/EPDM โดยเริ่มต้นการทดลองด้วยการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยาง EPDM ที่มีปริมาณ เอทธิลีนแตกต่างกัน 2 เกรด คือ EPDM 4770P และ EPDM 4570 โดยมีสัดส่วนของการผสมระหว่าง NR/EPDM เท่ากับ 100/0 80/20 60/40 40/60 20/80 และ 0/100 หลังจากการผสมเคมียาง จึงนำยางคอมพาวด์ส่วนหนึ่งไปทดสอบสมบัติความสามารถในการขึ้นรูปและนำยางคอมพาวด์ส่วนที่เหลือไปขึ้นรูปและคงรูปเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มปริมาณ เอทธิลีนในยาง EPDM แม้จะส่งผลทำให้ยางผสมมีความยืดหยุ่นด้อยลง แต่ก็ส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้มีความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการ ฉีกขาด โมดูลัส และความแข็งสูงขึ้น ซึ่งการปรับปรุงสมบัติเชิงกลดังกล่าวคาดว่าน่าจะเกิดจากการเสริมแรงของผลึกที่มีอยู่ในยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนสูงนั่นเอง จากการศึกษาผลของสัดส่วนการผสมพบว่าการผสมยาง EPDM ลงไปในสัดส่วนที่ไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติในกระบวนการผลิต เช่น ความหนืด พลังงานที่ใช้ในการผสม รวมถึงลักษณะการคงรูปที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติเนื่องจากที่สัดส่วนการผสมดังกล่าวยางผสมยังคงมีวัฏภาคของยางธรรมชาติเป็นเมทริกซ์ แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จนถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก (หรือสูงกว่า) สมบัติในกระบวนการผลิตของยางผสมก็จะเริ่มเปลี่ยนแปลงและเข้าใกล้สมบัติของยาง EPDM มากขึ้น เนื่องจากเกิดการกลับกันของวัฏภาค เมื่อพิจารณาผลของสัดส่วนการผสมต่อสมบัติเชิงกลพบว่าการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนต่ำลงไปจะส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติเชิงกลด้อยลงอย่างรวดเร็ว (เบี่ยงเบนจากกฎของการผสม) ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากความไม่สมดุลของการคงรูประหว่างวัฏภาค

พงษ์ธร แซ่อุย, อุทัย เทพสุวรรณ และ ภุชงค์ ทับทอง. "ผลของปริมาณเอทธิลีนในยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) และสัดส่วนการผสมต่อสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน" *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 15 2

แต่การเพิ่มสัดส่วนของ ยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนสูงลงไปจะส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของยางผสมเป็นไปตามกฎของการผสม ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าตัวแปรหลักที่ควบคุมสมบัติความทนทานต่อความร้อนและโอโซนของยางผสมคือสัดส่วนของการผสมเท่านั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณเอทธิลีนในยาง EPDM แต่อย่างใด โดยการปรับปรุงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพของยางจะเห็นเด่นชัดเมื่อทำการผสมยาง EPDM ลงไปในสัดส่วนที่ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ, ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน, ผสม, สมบัติเชิงกล, ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ

Abstract

The effects of ethylene content in EPDM and blend ratio on the mechanical properties as well as the resistance to thermal aging and ozone of NR/EPDM blends were investigated. Natural rubber was blended with two grades of EPDM having different ethylene contents, i.e., EPDM 4770P and EPDM 4570. The blend ratio of NR/EPDM was varied from 100/0, 80/20, 60/40, 40/60, 20/80 and 0/100. 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. The results reveal that, although an increase in ethylene content has negative effect on elasticity of the blend, it gives rise to the enhancement of most properties such as tensile strength, tear strength, modulus and hardness. This enhancement is thought to arise from the reinforcement of crystallinity existed in EPDM with high ethylene content. Concerning the effect of blend ratio, it is found that the blends having EPDM not more than 40%wt. possess similar processability (such as Mooney viscosity, mixing energy as well as cure characteristics) to NR. This is simply due to the fact that NR is still the matrix in these blends. When the EPDM content is increased to 60%wt. or higher, the processability of the blends begins to alter and approach that of neat EPDM due to the occurrence of phase reversion. For EPDM with low ethylene content, increasing EPDM content would result in a significant drop in the mechanical properties of the blends (deviating from the mixture's rule). This is simply due to the cure imbalance between the two phases. However, for EPDM with high ethylene content, the changes in the mechanical properties of the blends follow the mixture's rule. The results also indicate that the resistance to thermal aging and ozone of the blends is solely controlled by the blend ratio. The significant improvement in such resistance is observed when 40%wt. or more of EPDM is added into NR.

Keywords : Natural rubber, Ethylene propylene diene rubber, Blend, Mechanical properties, Aging resistance

1. คำนำ

แม้ว่ายางธรรมชาติ (NR) จะเป็นยางที่มีสมบัติเชิงกลดีเยี่ยมและมีความยืดหยุ่นสูง [1] แต่เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่อยู่ในปริมาณสูง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีข้อด้อยหลักคือเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย โดยเฉพาะการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน ความร้อน และโอโซน ซึ่งข้อด้อยดังกล่าวทำให้การใช้งานของยางธรรมชาติค่อนข้างจำกัด [2] ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยียางผสม (Rubber Blend) โดยการนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น เพื่อที่จะปรับปรุงข้อด้อยของยางธรรมชาติดังกล่าว ซึ่งยาง

สังเคราะห์ที่นิยมนำมาใช้ผสมกับยางธรรมชาติต้องเป็นยางสังเคราะห์ชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลในปริมาณที่น้อยมากหรือไม่มีพันธะคู่อยู่เลย เช่น ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) หรือยางเอทธิลีนโพรพิลีน (EPM) เพราะยางสังเคราะห์เหล่านี้จะทำให้ยางผสมที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนสูงขึ้น อย่างไรก็ดี การผสมยางธรรมชาติกับยาง EPDM แม้ว่าจะทำให้ยางผสมที่ได้มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูงขึ้น แต่เนื่องจากยางธรรมชาติ และยาง EPDM มีพันธะคู่อยู่ในปริมาณที่แตกต่างกันมาก ดังนั้น ยางทั้ง 2 ชนิดนี้จึงมีปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางผสมคู่นี้ โดยพยายามแก้ไขปัญหาความไม่สมดุลของการคงรูปดังกล่าวด้วยการดัดแปรโมเลกุลของยาง EPDM ให้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาคงรูปสูงขึ้นก่อนที่จะนำไปผสมกับยางธรรมชาติ [3-5] อย่างไรก็ดี เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมโดยทั่วไปแล้วถูกควบคุมด้วยปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น ธรรมชาติของพอลิเมอร์ สัดส่วนการผสม รวมถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม เพราะโดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์ผสมมักจะมีสมบัติเชิงกลที่คล้ายกับพอลิเมอร์ชนิดที่เป็นเมทริกซ์หรือวัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) [6-12] ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อศึกษาผลของปริมาณ เอทธิลีนในยาง EPDM และผลของสัดส่วนการผสมต่อสมบัติเชิงกล รวมถึงสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและโอโซนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยาง EPDM

2.ขอบเขตการวิจัย

2.1.วัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ที่ผลิตโดยบริษัทยูเนี่ยนรับเบอร์โพรดักส์ จำกัด ส่วนยาง EPDM ที่เลือกนำมาใช้ในการศึกษานี้มีจำนวน 2 เกรด คือ Nordel 4770P และ Nordel 4570 ซึ่งผลิตโดยบริษัท DuPont Dow Elastomers (สมบัติพื้นฐานของยาง EPDM ทั้ง 2 เกรด แสดงดังตารางที่ 1) ส่วนสารเคมีชนิดอื่น ๆ ที่ใช้ที่เป็นความว่องไวต่อปฏิกิริยาคงรูป ที่แตกต่างกัน ส่งผลทำให้เกิดความไม่สมดุลในการคงรูป (cure incompatibility) กล่าวคือวัฏภาคของยางธรรมชาติมักจะมีระดับของการคงรูปที่ค่อนข้างสูงในขณะที่วัฏภาค ของยาง EPDM มักจะมีระดับของการคงรูปที่ต่ำมาก ด้วยเหตุนี้ ยางผสมที่ได้จึงมักมีสมบัติเชิงกลที่ค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะ สมบัติความทนทานต่อแรงดึง ทำให้เกิดข้อจำกัดในด้าน การนำยางผสมดังกล่าวไปใช้งานในทางวิศวกรรม ปัจจุบันได้ มีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยี ต่าง ๆ มากมายเพื่อที่จะองค์ประกอบในการผสมเคมียาง ได้แก่ ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (Stearic acid) และกำมะถัน (S_8) ซึ่งได้รับมาจากบริษัทเคมมินคอร์ปอเรชั่น จำกัด ส่วนสารตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 2 ชนิดที่นำมาใช้ คือ เตตระเมทธิลไธยูแรมไดซัลไฟด์ (TMTD) และบิวทิล-2-เบนโซไธอะซิลซัลฟีนาไมด์ (TBBS) ซึ่งได้รับมาจากบริษัท รีไลแอนซ์เทคโนเคม (Flexsys) จำกัด

2.2.การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

ตารางที่ 2 แสดงสูตรการผสมเคมีที่ใช้ในงานวิจัย หลังจากการออกสูตร ได้ดำเนินการผสมเคมียางโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Haake Rheomix 3000p) ตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของห้องผสมที่ 60^{o}C ความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์ที่ 40 รอบต่อนาที และ fill factor เท่ากับ 0.7 โดยเริ่มด้วยการผสมยางธรรมชาติและยาง EPDM ในเครื่องผสม เมื่อเวลาผ่านไป 2 นาทีจึงทำการเติมซิงก์ออกไซด์และกรดสเตียริก และเมื่อเวลาผ่านไป 6 นาที จึงใส่กำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจึงผสมต่ออีกเป็นระยะเวลา 3 นาที ก่อนที่จะนำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ท้ายสุดจึงแบ่งยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกนำไปวัดค่าความหนืดมูนนี่ตามมาตรฐาน ASTM D1646-87 ด้วยเครื่อง Mooney viscometer (viscTech+) ที่อุณหภูมิ 125^{o}C ส่วนที่ 2 นำไปหาระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time, t_s2) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (Optimum cure time, t_c90) ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR TechPRO

MD+) ที่อุณหภูมิ 160°C และส่วนที่ 3 นำไปขึ้นรูปสำหรับทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูปต่อไป

2.3.การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคงรูป

นำยางคอมพาวด์ไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิคที่อุณหภูมิ 160°C ตามระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมของยาง (t_c90) จากนั้นจึงนำยางคงรูปที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) โดยใช้เครื่อง Atomic Force Microscope (AFM, Multimode Nanoscope IIIA) สมบัติความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D624 สมบัติแรงดึง (Tensile properties) ตามมาตรฐาน ASTM D412 ดาย C สมบัติการเสียรูปหลังการกดอัด (Compression set) ตามมาตรฐาน ASTM D395 (method B) โดยทำการทดสอบ ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง สมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance) ตามมาตรฐาน ASTM D573 โดยนำชิ้นทดสอบไปทำการบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและเปรียบเทียบกับสมบัติของชิ้นทดสอบก่อนการบ่มเร่ง และสมบัติความทนทานต่อโอโซน (Ozone resistance) ตามมาตรฐาน ISO 1431-1 โดยใช้ความเข้มข้นของโอโซนเท่ากับ 50 ส่วนในร้อยล้านส่วน (pphm) และใช้ระยะเวลาในการทดสอบนาน 100 ชั่วโมง

3.ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1.พฤติกรรมการผสม (Mixing behavior)

ตารางที่ 3 แสดงผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อพฤติกรรมการผสม จากตารางพบว่ายาง EPDM จำเป็นต้องใช้แรงบิดและพลังงานในการผสมสูงกว่า ยางธรรมชาติทั้งนี้เนื่องจากยาง EPDM ทั้ง 2 ชนิดที่นำมาใช้ในการศึกษามีค่าความหนืดที่สูงกว่ายางธรรมชาติมาก ดังจะเห็นได้ชัดเจนจากผลการทดลองในรูปที่ 1 นอกจากนี้ยังพบว่าทั้ง ค่าแรงบิดและพลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในการผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามสัดส่วนของยาง EPDM ที่เพิ่มขึ้นซึ่งก็เป็นไปตามกฎของการผสมหรือเป็นผลมาจากการเจือจาง (dilution effect) นั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง EPDM ทั้ง 2 เกรด พบว่าปริมาณเอทธิลีนไม่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อพฤติกรรมการผสมของยางเนื่องจากยาง EPDM ทั้ง 2 เกรดมีความหนืดใกล้เคียงกัน ณ อุณหภูมิของการผสม

3.2.ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

รูปที่ 1 แสดงผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์ จากรูปพบว่า ยางผสมที่มีสัดส่วนของยาง EPDM ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักมีความหนืดมูนนี่ที่ค่อนข้างต่ำและใกล้เคียงกับค่าความหนืดมูนนี่ของยางธรรมชาติ จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้สามารถสันนิษฐานได้ว่าที่สัดส่วนการผสมเหล่านี้ ยางธรรมชาติยังคงทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ จึงมีอิทธิพลต่อความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูง อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ให้สูงขึ้น (ร้อยละ 60 และ 80 โดยน้ำหนัก) พบว่าความหนืดมูนนี่ของยางผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามสัดส่วนของยาง EPDM ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของยาง EPDM อาจส่งผลทำให้เกิดการกลับกันของวัฏภาค (phase reversion) ส่งผลทำให้ยาง EPDM กลายเป็นเมทริกซ์ ด้วยเหตุนี้ ความหนืดของยางผสมจึงสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าเข้าใกล้ความหนืดของยาง EPDM มากขึ้น จากการสังเกตยังพบว่าปริมาณเอทธิลีน ในยาง EPDM ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางผสม ทั้งนี้เนื่องจากยาง EPDM ทั้ง 2 เกรดที่เลือกมาใช้ในการศึกษานี้มีค่าความหนืดตั้งต้นที่ใกล้เคียงกัน

3.3.ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางผสมแสดงดังรูปที่ 2 จากรูปพบว่าที่สัดส่วนการผสม NR/EPDM เท่ากับ 60/40 ยางธรรมชาติซึ่งมีปริมาณมากกว่าจะเป็นวัฏภาคที่ต่อเนื่องหรือเมทริกซ์ (สีอ่อน) ในขณะที่ยาง EPDM จะเป็นวัฏภาคที่กระจายตัว (สีเข้ม) อย่างไรก็ดี เมื่อ

ทำการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ให้สูงขึ้น (ที่สัดส่วนการผสม NR/EPDM เท่ากับ 40/60) พบว่าเกิดการกลับของวัฏภาคขึ้น กล่าวคือยาง EPDM ได้กลายมาเป็นเมทริกซ์ในขณะที่ยางธรรมชาติกลายเป็นวัฏภาคที่กระจายตัว จากรูปที่ 2 ยังพบว่าปริมาณเอทธิลีนในยาง EPDM ไม่ได้ส่งผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางผสม เพราะที่อุณหภูมิของการผสม ยาง EPDM ทั้ง 2 เกรดที่นำมาผสมกับยางธรรมชาตินั้นมีค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกัน

3.4.ลักษณะการคงรูป (Cure characteristics)

ตารางที่ 4 แสดงผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนการผสมต่อลักษณะการคงรูปของยางผสม เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าแรงบิดต่ำสุด (ML) แปรผันโดยตรงกับค่าความหนืดมูนนี่ กล่าวคือถ้าแรงบิดต่ำสุดมีค่าต่ำ ความหนืดมูนนี่ก็จะมีค่าต่ำด้วยเช่นกัน จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงบิดต่ำสุดของยางผสมที่มีสัดส่วนของยาง EPDM ไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าแรงบิดต่ำสุดของยางธรรมชาติ ในขณะที่เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ให้สูงกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก พบว่าแรงบิดต่ำสุดมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าใกล้กับค่าแรงบิดต่ำสุดของยาง EPDM ทั้งนี้เนื่องจากที่สัดส่วนการผสมเหล่านี้ ยาง EPDM ทำหน้าที่เป็น วัฏภาคที่ต่อเนื่องหรือที่เรียกว่าเมทริกซ์นั่นเอง จากการสังเกต ยังพบว่าค่าแรงบิดสูงสุด (MH) ก็มีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับค่าแรงบิดต่ำสุด

เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่ในปริมาณที่สูงกว่า ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาคงรูปด้วยกำมะถันได้เร็วกว่ายาง EPDM ซึ่งมีปริมาณพันธะคู่อยู่น้อย ดังนั้น จึงพบว่ายางธรรมชาติมีระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมต่ำกว่ายาง EPDM มาก ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างช้า ๆ ตามการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ในยางผสม ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการเจือจางนั่นเอง อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาค่าผลต่างของแรงบิด (MH-ML) ซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับของการเชื่อมโยงในยาง กลับพบว่ายาง EPDM มีค่าผลต่างของแรงบิดสูงกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวค่อนข้างเป็นที่น่าแปลกใจ เพราะในทางทฤษฎีแล้วยางธรรมชาติซึ่งเป็นยางที่มีปริมาณพันธะคู่สูงมาก ควรมีระดับของการเชื่อมโยงหรือมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่ายาง EPDM ซึ่งเป็นยางที่มีปริมาณพันธะคู่อยู่น้อย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวยังไม่สามารถอธิบายได้ในขณะนี้

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณเอทธิลีนต่อลักษณะการคงรูปของยาง EPDM พบว่ายาง EPDM เกรดที่มีปริมาณ เอทธิลีนสูงจะให้ค่าผลต่างของแรงบิด ระยะเวลาสกอร์ช และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมสูงกว่ายาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนต่ำ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในระบบของยางผสม กลับพบว่าปริมาณเอทธิลีนในยาง EPDM ไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อลักษณะการคงรูปของยางผสมในทุก ๆ สัดส่วนของการผสม

3.5.ความแข็ง (Hardness)

รูปที่ 3 แสดงผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อความแข็งของยางผสม จากรูปสามารถเห็นได้ ชัดว่ายาง EPDM ทั้ง 2 เกรด มีความแข็งสูงกว่ายางธรรมชาติ และยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนสูงก็จะมีความแข็ง สูงกว่ายาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนสูงมีความสามารถในการตกผลึกและมีระดับของการเชื่อมโยงที่สูงกว่านั่นเอง (สามารถดูได้จากค่าผลต่างของแรงบิดที่แสดงไว้ในตารางที่ 4) ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าค่าความแข็งของยางผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามสัดส่วนของยาง EPDM ซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างยาง EPDM ทั้ง 2 เกรดที่สัดส่วนการผสมเดียวกัน พบว่าการเติมยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนสูงทำให้ยางผสมที่ได้มีค่าความแข็งสูงกว่าการเติมยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนต่ำ แต่เนื่องจากปริมาณเอทธิลีนในยาง EPDM ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยาง

ผสมอย่างมีนัยสำคัญ (สามารถสังเกตได้จากค่าความแตกต่างของแรงบิดที่แสดงในตารางที่ 4) ดังนั้น จึงสามารถกล่าวได้ว่าสาเหตุที่ยางผสมที่มียาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนสูงเป็นองค์ประกอบมีความแข็งสูงกว่ายางผสมที่มียาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนต่ำเป็นองค์ประกอบนั้นเป็นผลมาจากความสามารถในการตกผลึกที่สูงกว่าของยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนสูงนั่นเอง

3.6.ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

รูปที่ 4 แสดงผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของการผสมต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาด จากรูปพบว่ายางธรรมชาติมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายาง EPDM เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถตกผลึกได้ในขณะที่ถูกดึงยืด (strain-induced crystallization) ซึ่งการตกผลึกในขณะถูกดึงยืดดังกล่าวสามารถเกิดได้ง่ายในยางธรรมชาติโดยเฉพาะในบริเวณยอดของรอยแตก (crack tip) เพราะในขณะที่ถูกดึงยืด ยางบริเวณนี้จะเกิดการตกผลึก ส่งผลให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น ความทนทานต่อการฉีกขาดจึงสูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม แม้ว่ายาง EPDM (โดยเฉพาะเกรดที่มีปริมาณเอทธิลีนสูง) จะมีส่วนที่เป็นผลึกผสมอยู่บ้าง แต่เนื่องจากผลึกที่มีอยู่ในยาง EPDM มีปริมาณค่อนข้างน้อยและกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งเนื้อยาง และเป็นที่ทราบกันดีว่ายาง EPDM เป็นยางที่ไม่สามารถเกิดการตกผลึกได้ในขณะที่ถูกดึงยืด ทำให้ยางที่อยู่ ณ บริเวณยอดของรอยแตกมีปริมาณผลึกอยู่ค่อนข้างน้อย ด้วยเหตุนี้ยาง EPDM จึงมีความทนทานต่อการฉีกขาดที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติ

จากการสังเกตยังพบอีกว่ายาง EPDM 4770P ซึ่งมีปริมาณเอทธิลีนร้อยละ 70 โดยน้ำหนักมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายาง EPDM 4570 ซึ่งมีปริมาณเอทธิลีนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยาง EPDM 4770P มีปริมาณผลึกที่สูงกว่านั่นเอง เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าผลึกที่มีอยู่ในยางจะช่วยทำให้ยางมีความแข็งแรงหรือมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดีขึ้น (แม้ว่าผลึกดังกล่าวจะทำให้สมบัติความยืดหยุ่นของยางด้อยลงก็ตาม) สำหรับยางผสมพบว่าการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จาก 0 ถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก จะส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้มีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ให้สูงกว่านั้นกลับพบว่าค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางผสมที่ได้มีแนวโน้มค่อนข้างคงที่และใกล้เคียงกับค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง EPDM ซึ่งผลการทดลองนี้ก็สอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสมดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว กล่าวคือ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จนถึงร้อยละ 60 หรือสูงกว่านั้น ยาง EPDM ก็จะกลายเป็นเมทริกซ์ ส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับยาง EPDM มากขึ้น เมื่อพิจารณาผลของปริมาณเอทธิลีนในยาง EPDM ต่อสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยางผสมพบว่าการเพิ่มปริมาณเอทธิลีนในยาง EPDM ส่งผลทำให้ยางผสมมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเอทธิลีนทำให้ยางมีปริมาณการตกผลึกที่สูงขึ้นดังที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้

3.7.การเสียรูปหลังการกดอัด (Compression set)

รูปที่ 5 แสดงผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าการเสียรูปหลังการกดอัดของยางผสมที่อุณหภูมิสูง โดยทั่วไปแล้ว สมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดของยางที่อุณหภูมิสูงจะขึ้นอยู่กับทั้งความยืดหยุ่นและความทนทานต่อความร้อนของยาง เช่น ถ้ายางมีความยืดหยุ่นสูง ยางก็จะมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดต่ำ และถ้ายางมีความทนทานต่อความร้อนสูง ก็จะส่งผลทำให้ยางสามารถรักษาสมบัติความยืดหยุ่นได้ดีแม้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งก็จะส่งผลทำให้ยางมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงต่ำด้วย จากผลการทดลองในรูปที่ 5 พบว่ายางธรรมชาติมีสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงด้อยกว่ายาง EPDM ซึ่งอาจเป็นผลจากที่ยางธรรมชาติมีระดับของการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า (ดูได้จากค่าผลต่างของแรงบิด) และมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนที่ต่ำกว่าด้วย

จากการที่ยาง EPDM มีพันธะคู่ในปริมาณน้อยมาก (มีปริมาณแค่เพียงพอต่อการคงรูปด้วยกำมะถัน) และ

พันธะคู่ที่มีอยู่ในโมเลกุลก็ไม่ได้อยู่ในสายโซ่หลัก จึงทำให้ยาง EPDM มีความทนทานต่อความร้อนสูง นั่นหมายถึงยาง EPDM สามารถรักษาสมบัติความยืดหยุ่นไว้ได้ ณ ที่อุณหภูมิสูง ทำให้ยาง EPDM มีสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงที่ดี และจากการที่ยาง EPDM 4570 มีปริมาณเอทธิลีนต่ำกว่า ยาง EPDM 4770P (เป็นผลทำให้ยางเกรดนี้มีปริมาณผลึกที่ต่ำกว่าด้วย) ด้วยเหตุนี้ยาง EPDM 4570 จึงมีความยืดหยุ่นสูงกว่า ส่งผลทำให้ยางเกรดนี้มีสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดที่ดีกว่าด้วย

เมื่อพิจารณาค่าการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงของยางผสม NR/EPDM พบว่าค่าการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงของยางผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างช้า ๆ ตามการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จนถึงประมาณร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นค่าการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงก็จะมีแนวโน้มลดลง โดยปกติแล้ว การเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จะทำให้ยางผสมมีความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น ดังนั้นยางผสมที่ได้ก็ควรจะมีสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงดีขึ้น (แต่ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่ายางผสมเหล่านั้นต้องมีระดับของความยืดหยุ่น (degree of elasticity) ที่เท่ากัน) แต่ผลการทดลองในรูปที่ 5 กลับแสดงให้เห็นว่าค่าการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM นั่นหมายถึงการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ส่งผลทำให้สมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดของยางผสมด้อยลงทั้ง ๆ ที่ผลการทดลองในตารางที่ 3 ได้แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จากร้อยละ 0 ถึง 60 โดยน้ำหนักไม่ได้ส่งผลกระทบต่อระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโดยรวมของยางผสม (สังเกตได้จากค่าผลต่างของแรงบิดไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามสัดส่วนของยาง EPDM) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าการด้อยลงของสมบัติการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงดังกล่าวเป็นผลมาจากความไม่เข้ากันของการคงรูปนั่นเอง กล่าวคือในระหว่างที่เกิดการคงรูป สารที่ทำให้เกิดการคงรูปส่วนใหญ่โดยเฉพาะสารตัวเร่งปฏิกิริยา (ซึ่งมีความเป็นขั้วค่อนข้างสูง) ชอบที่จะเข้าไปอยู่ในวัฏภาคของยางธรรมชาติมากกว่าในวัฏภาคของยาง EPDM (เพราะยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วสูงกว่ายาง EPDM) ประกอบกับยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาคงรูปอยู่มาก จึงเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้เร็วและจะดึงดูดเอาสารตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในวัฏภาคของยางธรรมชาติมากขึ้น จึงส่งผลทำให้ยางธรรมชาติมีระดับของการเชื่อมโยงสูงกว่ายาง EPDM ค่อนข้างมาก (นั่นคือวัฏภาคของยางธรรมชาติจะมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงมาก ในขณะที่วัฏภาคของยาง EPDM จะมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่ต่ำมาก แม้ว่าระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงโดยรวมจะค่อนข้างคงที่ก็ตาม) อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนการผสมให้มียาง EPDM สูงถึงร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก กลับพบว่าค่าการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่สัดส่วนการผสมดังกล่าวนั้นเกิดการกลับของวัฏภาคทำให้ยาง EPDM ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ ส่งผลทำให้ยางผสมมีความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้นมาก อีกทั้งยางผสมที่ได้ยังมีระดับการเชื่อมโยงโดยรวมสูงกว่าที่สัดส่วนการผสมอื่น ๆ เพราะที่สัดส่วนการผสมนี้มียางธรรมชาติเพียงแค่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้ยังคงมีสารตัวเร่งปฏิกิริยาเหลืออยู่ในวัฏภาคของยาง EPDM ในปริมาณที่มากเพียงพอที่จะทำให้วัฏภาคของยางเกิดการคงรูปได้อย่างพอเพียง

3.8.สมบัติแรงดึง (Tensile properties)

รูปที่ 6-8 แสดงผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าความทนทานต่อแรงดึง ค่า 100% โมดูลัส และการยืดตัว ณ จุดขาดของยางผสมตามลำดับ จากรูปที่ 6 พบว่าความทนทานต่อแรงดึงของยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่ายาง EPDM มาก ซึ่งเป็นไปตามที่คาดหวังไว้เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถเกิดการตกผลึกขณะดึงยืดได้ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติแรงดึงของยาง EPDM ทั้ง 2 เกรด พบว่ายาง EPDM 4770P มีความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายาง EPDM 4570 ทั้งนี้เนื่องจากยาง EPDM 4770P มีความเป็นผลึกสูงกว่ายาง EPDM 4570 นั่นเอง ในส่วนของยางผสมพบว่าสมบัติความทนทานต่อแรงดึงของ

ยางผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากการเจือจาง อย่างไรก็ดีพบว่ายางผสมที่ได้จากยางธรรมชาติและยาง EPDM 4570 มีสมบัติความทนทานต่อแรงดึงที่เบี่ยงเบนไปจากกฎของการผสมค่อนข้างมาก กล่าวคือค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM จากร้อยละ 0 ถึง 40 โดยน้ำหนัก จากนั้นก็จะเริ่มลดลงอย่างช้า ๆ สาเหตุที่ทำให้ ความทนทานต่อแรงดึงของยางผสมลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกนั้นคาดว่าเกิดจากความไม่เข้ากันของการคงรูประหว่างวัฏภาคของยางธรรมชาติและวัฏภาคของยาง EPDM อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าแปลกใจที่พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนเกรดของยาง EPDM จาก 4570 เป็น 4770P ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางผสมที่ได้มีแนวโน้มลดลงอย่างช้า ๆ ตามการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ซึ่งมีลักษณะของการลดลงเป็นไปตามกฎของการผสม ที่เป็นเช่นนี้คาดว่าอาจเกิดจากผลของการเสริมแรงจากผลึกที่มีอยู่ค่อนข้างมากในยาง EPDM 4770P

จากผลการทดลองในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าค่า 100% โมดูลัสของยางมีแนวโน้มเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับค่าความแข็งของยาง นั่นคือ ยาง EPDM ทั้ง 2 เกรดมีค่า 100% โมดูลัสสูงกว่ายางธรรมชาติ ทั้งนี้เพราะยาง EPDM มีระดับของการเชื่อมโยงที่สูงกว่าดังที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง EPDM ทั้ง 2 เกรดพบว่ายาง EPDM 4770P มีค่าโมดูลัสสูงกว่ายาง EPDM 4570 เนื่องจากยาง EPDM 4770P มีระดับของการเชื่อมโยงที่สูงกว่าและมีปริมาณผลึกที่มากกว่านั่นเอง

สำหรับยางผสม พบว่า ค่า 100% โมดูลัสของยางผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม และเมื่อทำการเปรียบเทียบที่สัดส่วนการผสมเดียวกัน จะเห็นว่ายางผสมที่ได้จากยาง EPDM 4770P จะมีค่า 100% โมดูลัสที่สูงกว่ายางผสมที่ได้จากยาง EPDM 4570 ซึ่งอธิบายได้จากการที่ยาง EPDM 4770P มีปริมาณผลึกที่สูงกว่านั่นเอง

เนื่องจากยางธรรมชาติมีระดับการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่ายาง EPDM ดังนั้นจึงพบว่ายางธรรมชาติมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่ายาง EPDM เมื่อเปรียบเทียบระหว่างยาง EPDM ทั้ง 2 เกรดพบว่ายาง EPDM 4770P มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่ายาง EPDM 4570 และเมื่อนำยาง EPDM ทั้ง 2 เกรดไปผสมกับยางธรรมชาติก็พบว่ายางผสมที่ได้จากยาง EPDM 4770P มีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงกว่ายางผสมที่ได้จากยาง EPDM 4570 ที่ทุก ๆ สัดส่วนการผสม ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นที่น่าแปลกใจเพราะในเชิงทฤษฎีแล้ว ยาง EPDM 4770P ควรมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดที่ต่ำกว่ายาง EPDM 4570 เพราะยาง EPDM 4770P มีระดับของการเชื่อมโยงและมีปริมาณผลึกที่สูงกว่า ผลการทดลองดังกล่าวยังไม่สามารถอธิบายได้ ณ ขณะนี้

3.9.ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

นอกจากสมบัติเชิงกลแล้ว ได้ดำเนินการศึกษาผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนของยางผสม ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 9-11 สำหรับค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ ค่า 100% โมดูลัสสัมพัทธ์ และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสัมพัทธ์ตามลำดับ จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ของยางธรรมชาติมีค่าค่อนข้างต่ำ นั่นแสดงว่าการบ่มเร่งด้วยความร้อนส่งผลทำให้ยางธรรมชาติ (ซึ่งมีปริมาณพันธะคู่อยู่มาก) เกิดการเสื่อมสภาพได้เร็ว (เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ง่าย) ทำให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้ามสำหรับยาง EPDM ทั้ง 2 เกรดซึ่งเป็นยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่หลัก ยาง EPDM ทั้ง 2 เกรดนี้จึงมีความทนทานต่อความร้อนสูงมาก ส่งผลทำให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ค่อนข้างสูง (ประมาณ 0.89 และ 0.86 สำหรับยาง EPDM 4570 และยาง EPDM 4770P ตามลำดับ) เมื่อพิจารณาแนวโน้มของความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ของยางผสมพบว่าเป็นไปตามผลของการเจือจางนั่นคือความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ของยางผสม มีค่าสูงขึ้นตามการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM เนื่องจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ายางผสมที่ได้จากยาง EPDM

4570 และยางผสมที่ได้จากยาง EPDM 4770P ต่างก็มีค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพของยางผสมไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณเอทธิลีนที่มีอยู่ในยาง EPDM

รูปที่ 10 และ 11 แสดงผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่า 100% โมดูลัสสัมพัทธ์ และค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสัมพัทธ์ ตามลำดับ เนื่องจากยาง EPDM มีพันธะคู่อยู่ในปริมาณน้อยมากและพันธะคู่ที่มีอยู่ก็ไม่ได้อยู่ในสายโซ่หลัก ดังนั้นยาง EPDM จึงมีค่าความทนทานต่อการเสื่อมสภาพสูงกว่ายางธรรมชาติมาก ดังจะเห็นได้จากสมบัติสัมพัทธ์ของยาง EPDM ที่มีค่าเข้าใกล้ 1 ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากการเจือจาง ผลการทดลองในรูปที่ 9 ถึง 11 ยังแสดงให้เห็นว่าเกรดของยาง EPDM ไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยางผสมอย่างมีนัยสำคัญเพราะจากการสังเกตพบว่าสมบัติแรงดึงสัมพัทธ์ของยางผสม (ทั้งสมบัติความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์ โมดูลัสสัมพัทธ์ และการยืดตัว ณ จุดขาดสัมพัทธ์ ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการผสมระหว่างยางธรรมชาติและยาง EPDM เท่านั้น

3.10.ความทนทานต่อโอโซน (Ozone resistance)

จากการศึกษาผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อสมบัติความทนทานต่อโอโซน พบว่าหลังจากผ่านการทดสอบด้วยโอโซนที่ความเข้มข้น 50 pphm เป็นระยะเวลา 100 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นรอยแตกเล็ก ๆ จำนวนมากบนพื้นผิวของยางธรรมชาติ ดังแสดงในรูปที่ 12 ในขณะที่ไม่พบรอยแตกใด ๆ บนพื้นผิวของยาง EPDM สำหรับยางผสมที่มีสัดส่วนของยางธรรมชาติและยาง EPDM เท่ากับ 80/20 พบว่าหลังจากบ่มเร่งด้วยโอโซนแล้ว บนพื้นผิวของชิ้นทดสอบยังคงมีรอยแตกเกิดขึ้นเพียงแต่รอยแตกที่พบนั้นมีขนาดยาวกว่าและมีจำนวนน้อยกว่าที่พบในยางธรรมชาติเท่านั้น แต่เมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ให้สูงขึ้น (มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก) พบว่ายางผสมที่ได้มีสมบัติความทนทานต่อโอโซนอยู่ในระดับที่ดีมาก กล่าวคือไม่พบรอยแตกใด ๆ บนพื้นผิวของชิ้นทดสอบเลย ทั้งในยางผสมที่ได้จากยาง EPDM 4570 และที่ได้จากยาง EPDM 4770P จึงสามารถสรุปได้ว่าระดับความทนทานต่อโอโซนของยางผสม NR/EPDM ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณเอทธิลีนในยาง EPDM แต่จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของยาง EPDM ในยางผสมเท่านั้น

4.สรุปผลการทดลอง

สมบัติในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ของยางผสม (เช่น ความหนืดและพลังงานที่ใช้ในการผสม) ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณของเอทธิลีนที่มีอยู่ในยาง EPDM แต่จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการผสมและความหนืดตั้งต้นของยางที่นำมาผสมกันเท่านั้น ในงานวิจัยนี้ พบว่ายางผสมที่มีปริมาณยาง EPDM ไม่เกินร้อยละ 40 โดยน้ำหนักยังคงมีสมบัติในกระบวนการผลิตที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติเนื่องจากที่สัดส่วนการผสมดังกล่าวยางผสมยังคงมียางธรรมชาติเป็นเมทริกซ์ การเพิ่มสัดส่วนของยาง EPDM ให้สูงกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 60 โดยน้ำหนักส่งผลทำให้เกิดการกลับของวัฏภาค สมบัติในกระบวนการผลิตของยางผสมจึงเริ่มเปลี่ยนไปและเข้าใกล้สมบัติของยาง EPDM มากขึ้น แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีอัตราเร็วของการคงรูปที่สูงกว่ายาง EPDM แต่เป็นที่น่าแปลกใจที่พบว่ายาง EPDM มีระดับของการคงรูปหรือมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่ายางธรรมชาติ (ระดับของความหนาแน่นของการเชื่อมโยงแปรผันโดยตรงกับปริมาณ เอทธิลีนที่มีอยู่ในโมเลกุล) จากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า ทั้งปริมาณเอทธิลีนในยาง EPDM และสัดส่วนการผสมต่างก็ เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล ในภาพรวมพบว่าความไม่เข้ากันของการคงรูปส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้จากยางธรรมชาติและยาง EPDM มีสมบัติเชิงกลที่ต่ำกว่าที่คาดหวังไว้โดยใช้กฎของการผสม แต่การเพิ่มปริมาณเอทธิลีนในยาง EPDM ก็ส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าสมบัติความทนทานต่อความร้อนและความทนทานต่อโอโซนของยางไม่ขึ้นอยู่

กับปริมาณเอทธิลีนที่มีอยู่ในยาง EPDM แต่จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของยาง EPDM เท่านั้น

5.เอกสารอ้างอิง

[1] Hofmann, W., Rubber Technology Handbook., Munich, Hansar, 611 p, 1989.

[2] Nagdi, K. editor, Rubber as an Engineering Material. Guideline for Users., 1 ed., New York, Hansar, 302 p, 1993.

[3] Morrissey, R.T., Halogenation of Ethylene Propylene Diene Rubbers, Rub. Chem. Tech. Vol. 44(4) ; pp. 1025-1042, 1971.

[4] Coran, A.Y., Making Rubber Blends of Diene Rubber and EPR or EPDM, Monsanto Company, St Louis, US Patent no. 4687810, 1987.

[5] Baranwal, K.C. and Son, P.N., Co-curing of EPDM and Diene Rubber by Grafting Accelerators onto EPDM, Rub. Chem. Tech. Vol. 47(1) ; pp. 88-99, 1974.

[6] Kumar, C.R., George, K.E. and Thomas, S., Morphology and Mechanical Poperties of Termoplastic Eastomers from Nlon-nitrile Rbber blends, J. Appl. Polym. Sci. Vol. 61 ; pp. 2383-96, 1996.

[7] George, S., Reethamma, J., Thomas, S. and Varughese, K.T., Blends of Iotactic Plypropylene and Ntrile Rbber: Morphology, Mchanical Poperties and Cmpatibilisation, Polymer Vol. 36(23) ; pp. 4405-16, 1995.

[8] George, S., Reethamma, J., Thomas, S. and Varughese, K.T., High Dnsity Plyethylene/ Arylonitrile Btadiene Rbber Bends: Morphology, Mchanical Poperties and Cmpatibilisation, J. Appl. Polym. Sci. Vol. 57 ; pp. 449-65, 1995.

[9] Oommen, Z. and Thomas, S., Mechanical Poperties and Filure Mde of Termoplastic Eastomers from Ntural Rbber/ Ply (Mthyl Mthacrylate)/ Ntural Rbber-*g*- Ply (Mthyl Mthacrylate) blends, J. Appl. Polym. Sci. Vol. 65 ; pp. 1245-55, 1997.

[10] Varghese, H., Bhagawan, S.S., Rao, S.S. and Thomas, S., Morphology, Mchanical and Vscoelastic Bhavior of Bends of Ntrile Rbber and Ehylene-Vnyl Aetate Cpolymer, Eur. Polym. J. Vol. 31(10) ; pp. 957-67, 1995.

[11] Joseph, S. and Thomas, S., Morphology, Mrphology Dvelopment and Mchanical Poperties of Plystyrene/Plybutadiene Bends, Eur. Polym. J. Vol. 39(1) ; pp. 115-125, 2003.

[12] Sirisinha, C., Limcharoen, S. and Thunyarittikorn, J., Oil Rsistance Cntrolled by Pase Mrphology in Ntural Rbber/nitrile Rbber Bends, J. Appl. Polym. Sci. Vol. 87 ; pp. 83-89, 2003.

ตารางที่ 1 สมบัติพื้นฐานของยาง EPDM ที่นำมาใช้ศึกษา[a]

เกรด	ความหนืดมูนนี่*	ปริมาณเอทธิลีน (% wt.)	ปริมาณไดอีน (ENB) (% wt.)	น้ำหนักโมเลกุล	MWD	เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก
4570	70	50	4.9	210,000	Medium	< 1
4770P	70	70	4.9	200,000	Medium	13

[a] ข้อมูลจาก DuPont Dow Elastomers, * ML(1+ 4) @ 125°C

ตารางที่ 2 สูตรการผสมเคมีของยางคอมพาวด์

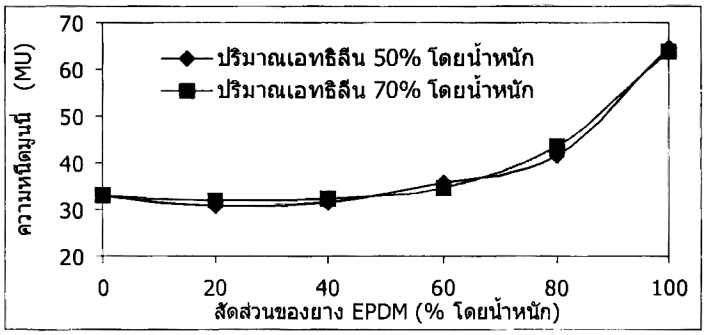
ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)					
ยางธรรมชาติ (STR 5L)	100.0	80.0	60.0	40.0	20.0	0.0
ยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) (4770P หรือ 4570)	0.0	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0
ZnO	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Stearic acid	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
TBBS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
TMTD	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
S_8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8

ตารางที่ 3 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อพฤติกรรมการผสม

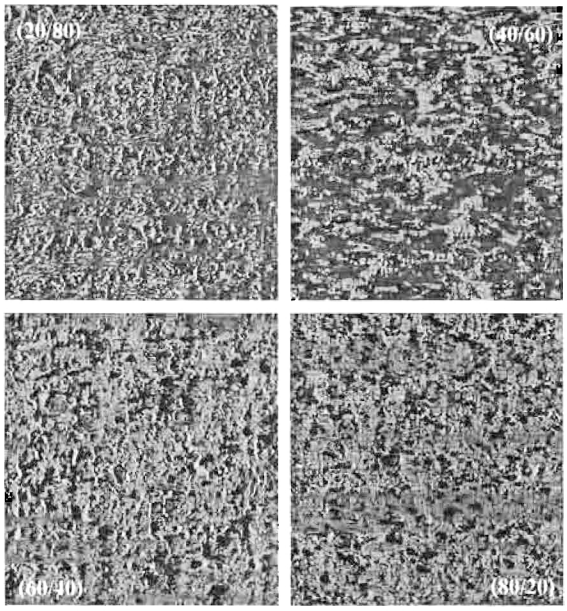
สัดส่วนยาง EPDM (% wt.)	EPDM 4570			EPDM 4770P		
	แรงบิด (N.m)	อุณหภูมิ (°C)	พลังงาน ($x10^5$ J)	แรงบิด (N.m)	อุณหภูมิ (°C)	พลังงาน ($x10^5$ J)
0	58.4	128	1.56	58.4	128	1.56
20	62.9	131	1.65	64.3	131	1.61
40	65.5	132	1.72	67.6	133	1.73
60	68.3	134	1.80	75.3	134	1.83
80	83.5	137	1.98	87.3	136	1.87
100	104.0	140	2.12	97.4	138	2.04

ตารางที่ 4 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อลักษณะการคงรูป

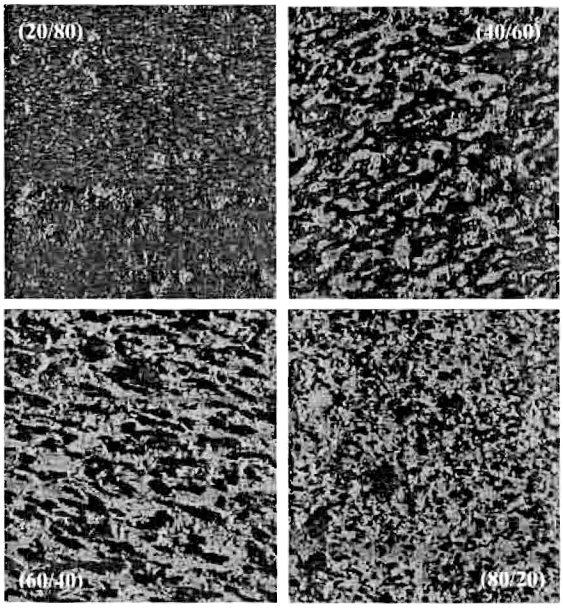
สัดส่วนยาง EPDM (% wt.)	EPDM 4570					EPDM 4770P				
	MH (N.m)	ML (N.m)	MH-ML (N.m)	t_s2 (min)	t_c90 (min)	MH (N.m)	ML (N.m)	MH-ML (N.m)	t_s2 (min)	t_c90 (min)
0	1.2	7.8	6.6	6.6	10.0	1.2	7.8	6.6	6.6	10.0
20	1.0	7.7	6.7	6.5	10.0	1.1	7.7	6.6	5.9	8.9
40	1.2	8.1	6.9	7.1	11.3	1.1	8.2	7.1	6.7	10.8
60	1.3	9.2	7.9	8.3	15.0	1.3	9.6	8.3	7.7	14.1
80	1.6	11.1	9.5	11.8	19.9	1.8	11.7	9.9	10.4	18.0
100	2.1	15.0	12.9	17.0	36.2	2.2	17.3	15.1	21.1	44.8



รูปที่ 1 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าความหนืดมูนี่ (ML1+4@125°C)

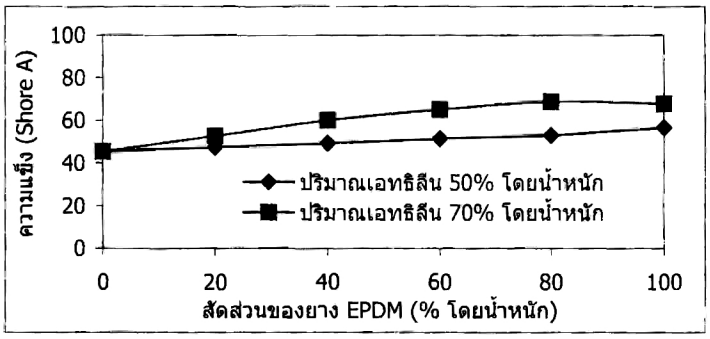


(ก) NR/EPDM4570

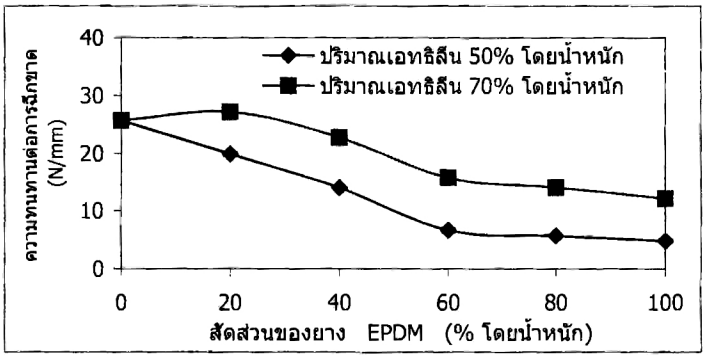


(ข) NR/EPDM4770P

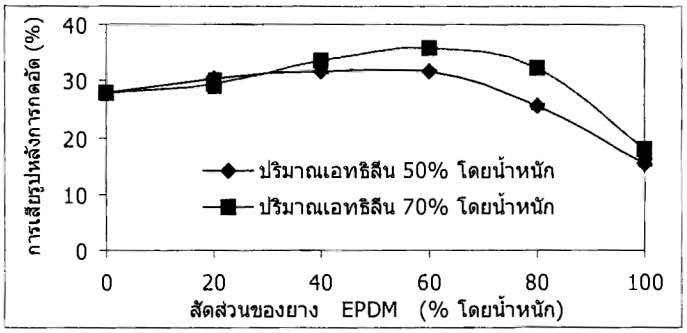
รูปที่ 2 AFM ไมโครกราฟแสดงสัณฐานวิทยาของยางผสม (ที่ขนาดการส่องกราด 20 ไมครอน)



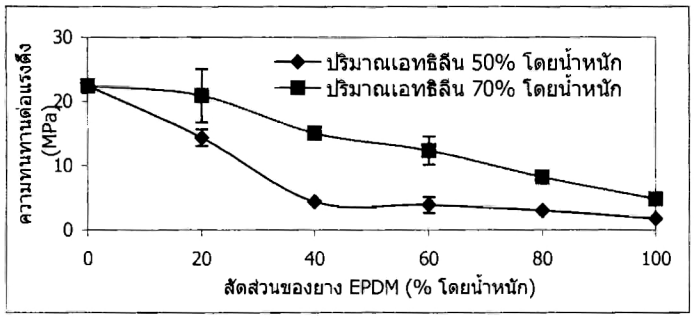
รูปที่ 3 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าความแข็ง



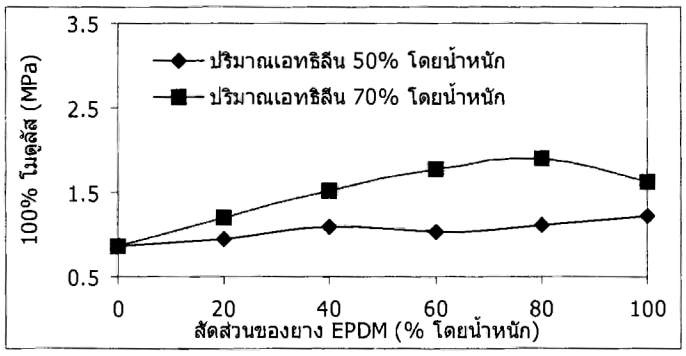
รูปที่ 4 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาด



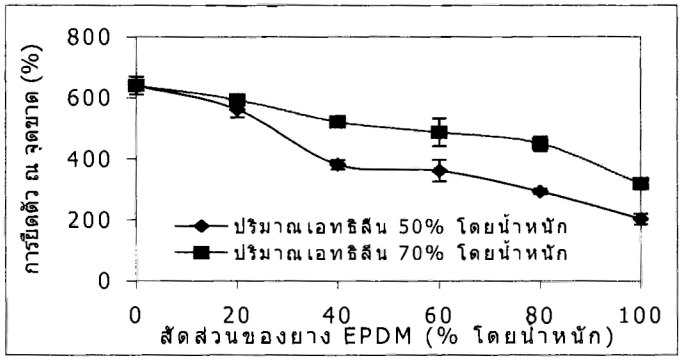
รูปที่ 5 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูง



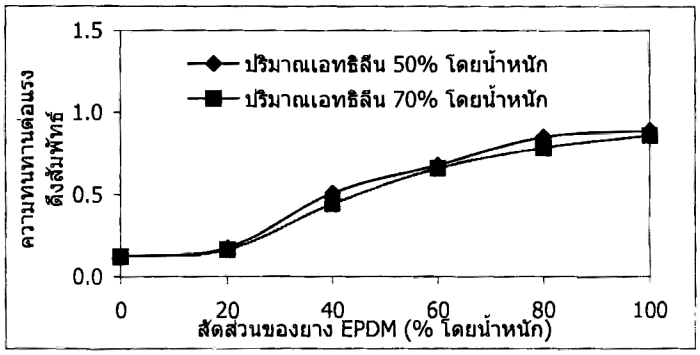
รูปที่ 6 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าความทนทานต่อแรงดึง



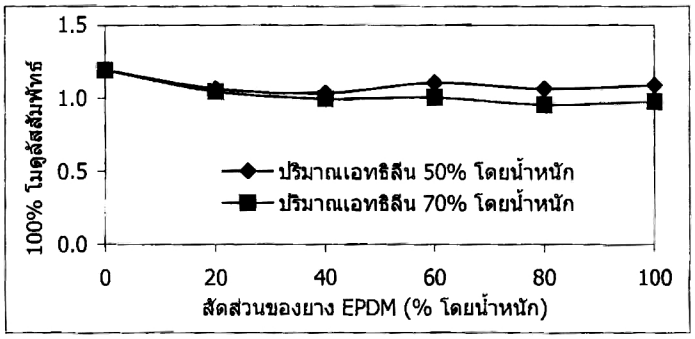
รูปที่ 7 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่า 100% โมดูลัส



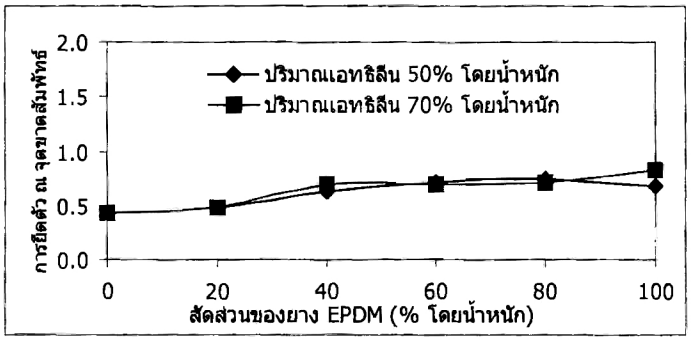
รูปที่ 8 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาด



รูปที่ 9 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงสัมพัทธ์



รูปที่ 10 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่า 100% โมดูลัสสัมพัทธ์



รูปที่ 11 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสัมพัทธ์

(ก) NR/EPDM4570 (ปริมาณเอทธิลีน 50%) (ข) NR/EPDM4770P (ปริมาณเอทธิลีน 70%)

รูปที่ 12 ผลของปริมาณเอทธิลีนและสัดส่วนของยาง EPDM ต่อความทนทานต่อโอโซนของยางผสม
(จากซ้ายไปขวา : 100/0, 80/20, 60/40, 40/60, 20/80, 0/100)