



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ยางธรรมชาติต้านการเสื่อมจากยางธรรมชาติเบลนด์กับยางอีพดีเอ็ม
เมื่อใช้สารตัวเติมชนิดสีขาว
(Weathering Resistant NR based on NR/EPDM Blends containing White Fillers)

โดย ผศ.ดร.กรรณิการ์ สหกะโร และคณะ

30 มิถุนายน พ.ศ. 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ยางธรรมชาติด้านการเสื่อมจากยางธรรมชาติเบลนด์กับยางอีพดีเอ็ม
เมื่อใช้สารตัวเติมชนิดสีขาว

(Weathering Resistant NR based on NR/EPDM Blends containing White Fillers)

คณะผู้วิจัย

1. ผศ.ดร.กรรณิการ์ สหะโร
2. นางสาวนิรมล แซ่หนู่น

สังกัด

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)	ยางธรรมชาติด้านการเสื่อมจากยางธรรมชาติเบลนด์กับยางอีพดีเอ็มเมื่อใช้สารตัวเติมชนิดสีขาว		
(ภาษาอังกฤษ)	Weathering Resistant NR based on NR/EPDM Blends containing White Fillers		
ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด และที่อยู่			
ชื่อ-สกุล	ผศ.ดร. กรรณิการ์ สหกะโร		
หน่วยงาน	ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี		
ที่อยู่	181 ถนนเจริญประดิษฐ์ อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี 94000		
โทรศัพท์/โทรสาร	073-312213/073-331099	E-mail skannika@bunga.pn.psu.ac.th	
นักศึกษาวิจัย	นางสาวนิรมล แซ่หนู		
ระยะเวลาดำเนินการ	9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2550 ถึงวันที่ 30 มีนาคม 2551		

ปัญหาที่ทําวิจัยและความสำคัญ

ยางธรรมชาติมีสมบัติด้านความทนทานต่อสภาพแวดล้อมเนื่องจากเกิดการเสื่อมได้ง่ายจากออกซิเจน ความร้อน และโอโซนทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งานโดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร การยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปทำได้โดยการใส่สารแอนติออกซิแดนท์ร่วมกับแอนติโอโซนเนสซึ่งสารเคมีที่มีประสิทธิภาพสูงคือสารกลุ่มอะมีนและอนุพันธ์แต่มีสมบัติตกสีทำให้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีคล้ำเท่านั้น ทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาคือการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพดีเอ็ม แต่มักจะได้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลด้อยเนื่องจากความแตกต่างของอัตราการวัลคาไนซ์และการกระจายตัวของสารตัวเติมในเฟสยางทั้งสอง การวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางเบลนด์ส่วนใหญ่ทำโดยใช้สูตรยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมหรือใส่เซมาดำเป็นหลัก แต่พบว่ายังไม่มีการศึกษาผลจากการใช้สารตัวเติมชนิดสีขาวที่ชัดเจน งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมซิลิกาในยางธรรมชาติเบลนด์กับยางอีพดีเอ็มเพื่อให้สามารถพัฒนายางเบลนด์ที่มีสมบัติทนทานต่อการเสื่อมสำหรับทำผลิตภัณฑ์ที่มีสีสันท

วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมยางเบลนด์ที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักให้มีสมบัติเชิงกลดีและต้านทานต่อการเสื่อม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีสันท ทดแทนหรือลดปริมาณการใช้ยางสังเคราะห์ และใช้ยางอีพดีเอ็มเป็นสารด้านการเสื่อมแทนการใช้สารเคมีด้านการเสื่อมชนิดตกสี

ผลการดำเนินงาน

การศึกษาค้นคว้าของเทคนิคการเบลนด์แบบรีเอกทีฟต่อสมบัติของยางเบลนด์ที่ได้เปรียบเทียบกับเบลนด์แบบปกติเมื่อใช้สัดส่วนการเบลนด์ NR/EPDM ที่ 70/30 และ 50/50 พบว่ายางเบลนด์แบบรีเอกทีฟที่ใส่ซิลิกามีเวลาการวัลคาไนซ์เร็วกว่ายางเบลนด์ปกติ โดยยางเบลนด์ที่สัดส่วน 70/30 มีเวลาการวัลคาไนซ์เร็วกว่าที่สัดส่วน 50/50 และเมื่อมีการใส่สารตัวเติมซิลิกาลงไปจะทำให้ยางมีเวลาการวัลคาไนซ์นานขึ้น ผลการแปรเวลาการให้ความร้อนกับยางคอมปาวด์อีพดีเอ็มก่อนที่จะนำไปเบลนด์กับยางธรรมชาติเพื่อกระตุ้นให้ยางอีพดีเอ็มสามารถวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้นและลดปัญหาความไม่

เข้ากันของอัตราการวัลคาไนซ์สำหรับการเบลนด์แบบรีแอกทีฟพบว่าเวลาที่เหมาะสมในการ preheat ยางคอมปาวด์อีพียีเอ็ม คือ เวลาที่เท่ากับ $T_{s1}-1.0$ นาที ผลการทดสอบสมบัติการดึงพบว่ายางเบลนด์ที่สัดส่วน 70/30 มีค่าโมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดสูงกว่าที่สัดส่วน 50/50 และการใส่ซิลิกาลงไปทำให้ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นความสามารถในการยืดจนขาดลดลง และความทนทานต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย ผลการทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งพบว่ายางเบลนด์ที่สัดส่วน 50/50 ให้ความต้านทานต่อการบ่มเร่งสูงกว่าที่สัดส่วน 70/30 และเมื่อมีการใส่ซิลิกาไปส่งผลให้ยางเบลนด์มีความต้านทานต่อการบ่มเร่งสูงขึ้น ยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงกว่ายางเบลนด์แบบปกติ แต่มีสมบัติความทนทานต่อการบ่มเร่งด้อยกว่า ผลการวิเคราะห์ผิวของยางเบลนด์ที่ไม่ใส่ซิลิกาที่ขาดจากการดึงด้วยเทคนิค SEM พบว่า SEM micrographs ของยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีขนาดของเฟสขนาดเล็กและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่ายางเบลนด์แบบปกติซึ่งสอดคล้องกับสมบัติความทนทานต่อแรงดึงที่ได้

การเปรียบเทียบผลของการใช้แอนติออกซิแดนท์ 4 ชนิด คือ 6PPD, TMQ, Lowinox CPL และ BHT ปริมาณ 2 phr ในยางเบลนด์ พบว่าการใช้แอนติออกซิแดนท์ชนิดเอมีน (6PPD และ TMQ) จะให้ scorch time และ cure time สั้นกว่าการใช้แอนติออกซิแดนท์ชนิดอนุพันธ์ของฟีนอล (Lowinox CPL และ BHT) ซึ่งพบว่าไม่มีผลต่อเวลาการวัลคาไนซ์ ชนิดของแอนติออกซิแดนท์ไม่มีผลต่อสมบัติการดึงมากนักโดยยางเบลนด์ที่ใช้ 6PPD มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดส่วนการใช้แอนติออกซิแดนท์ชนิดอื่นๆและการไม่ใช้แอนติออกซิแดนท์ให้ยางที่มีสมบัติความทนทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน และให้ผลลักษณะเดียวกันทั้งในยางเบลนด์แบบปกติและรีแอกทีฟ ยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดเด่นกว่ายางเบลนด์แบบปกติที่ทุกชนิดของแอนติออกซิแดนท์ ผลการทดสอบค่าความทนทานต่อการบ่มเร่งของยางเบลนด์พบว่าค่าโมดูลัสของยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังจากการบ่มเร่ง แต่ความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์ลดลง สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดตกสีที่ให้ผลดีที่สุด คือ 6PPD และสารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่ตกสีที่ให้ผลดีที่สุด คือ Lowinox CPL

การเพิ่มสัดส่วนของยางธรรมชาติในยางเบลนด์ทำให้ยางมีความหนืดลดลง ค่าการเพิ่มขึ้นของแรงบิดบนกราฟการวัลคาไนซ์ (M_H-M_L) เพิ่มขึ้น เวลาการวัลคาไนซ์ลดลง แต่มี scorch time ใกล้เคียงกันที่ทุกสัดส่วนการเบลนด์ ยางเบลนด์ที่ใส่ซิลิกาจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นและเวลาการวัลคาไนซ์ยาวกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติม ผลการใส่ซิลิกายังทำให้ยางมีค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นมาก ส่วนค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์พบว่าจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการใส่ซิลิกาไปในยางเบลนด์ทำให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดลดลง ซึ่งยางเบลนด์ทั้งแบบปกติและแบบรีแอกทีฟมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางเบลนด์แบบปกติ ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์ ผลการทดสอบค่าความทนทานต่อการบ่มเร่งของยางเบลนด์ พบว่า ค่าโมดูลัสมีการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมซิลิกามีค่าโมดูลัสหลังการบ่มเร่งเพิ่มขึ้น แต่กรณีที่ใส่ซิลิกาลับพบว่ายางส่วนใหญ่มีค่าโมดูลัสลดลง และความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์มีค่าลดลงตามสัดส่วนของยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น โดยยางที่ใส่ซิลิกามีความทนทานต่อการบ่มเร่งดีกว่ายางที่ไม่ใส่และยางเบลนด์แบบปกติมีความทนทานต่อการบ่มเร่งดีกว่าแบบรีแอกทีฟ

การใช้ 6PPD และ Lowinox CPL ในยางเบลนด์ทำให้ได้สมบัติความทนทานต่อการบ่มเร่งใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยางที่ไม่ใส่สารด้านการเสื่อมใดๆมีการลดลงของสมบัติมากกว่าอย่างชัดเจน และยางเบลนด์ NR/EPDM แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติมากกว่ายางธรรมชาติโดยผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อมจริงและแตกต่างจากที่คาดการณ์ไว้ ทั้งนี้อาจจะเกิดจากยางเบลนด์มีระดับการเชื่อมโยงแตกต่างกันและมีความเป็นไปได้ว่าในยางเบลนด์จะมีพันธะเชื่อมโยงชนิดพอลิซัลไฟด์ (polysulfidic crosslinks) มากกว่าจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ

ได้มากเมื่อได้รับความร้อนอย่างต่อเนื่อง ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนที่ความเข้มข้น 50 pphm อุณหภูมิ 40 °C เมื่อยึดออกค้างไว้ที่ 20 % เป็นเวลา 96 ชั่วโมง พบว่ายางเบลนด์ที่ใส่ซิลิกามีความต้านทานต่อโอโซนดีกว่ายางเบลนด์ที่ไม่ใส่สารตัวเติมโดยไม่พบรอยแตกเนื่องจากโอโซนในยางเบลนด์ NR/EPDM (70/30) ที่ใส่ซิลิกาทั้งที่ไม่ใส่สารด้านการเสื่อมใดๆ นอกจากนี้ยางเบลนด์ NR/EPDM มีความทนทานต่อโอโซนสูงกว่ายางธรรมชาติอย่างชัดเจน ผลการทดสอบกับยางธรรมชาติทุกกรณีรวมทั้งที่ใส่ซิลิกาและ 6PPD พบว่ายางเกิดรอยแตกจำนวนมาก ในขณะที่ยางเบลนด์ที่ไม่ใส่ซิลิกาแต่ใส่ 6PPD ไม่มีรอยแตกเกิดขึ้น และยางเบลนด์ที่ใส่ซิลิกาไม่พบรอยแตกในทุกตัวอย่างที่ศึกษา นอกจากนี้ยังพบว่ายางเบลนด์แบบปกติมีความทนทานต่อโอโซนดีกว่ายางเบลนด์แบบรีแอกทีฟเล็กน้อย

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่าเราสามารถเตรียมยางเบลนด์ระหว่างยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มโดยให้ยางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักเพื่อให้มีสมบัติเชิงกลและความทนทานต่อการแตกเนื่องจากโอโซนเด่นและมีความต้านทานต่อการเสื่อมเนื่องจากการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนและสภาพกลางแจ้งนอกอาคารระดับปานกลาง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีสนได้ โดยการใช้ยางอีพิตีเอ็ม 30 phr ร่วมกับซิลิกา 40 phr ทำให้ยางไม่เกิดการแตกเนื่องจากโอโซนเลยแม้จะไม่ใส่สารด้านการเสื่อมใดๆ การใส่สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่ตกสี เช่น Lowinox CPL ร่วมด้วยในสูตรจะทำให้ได้ยางที่มีความทนทานต่ออากาศร้อนและสภาพแวดล้อมมากขึ้นโดยที่ไม่มีผลต่อสีของยางที่ได้ ทั้งนี้สามารถใช้ยางเบลนด์ที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักได้โดยไม่ต้องใส่สารแอนติโอโซนเนสส์ การใช้เทคนิคการเบลนด์แบบรีแอกทีฟจะทำให้ได้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเบลนด์แบบปกติ ทั้งนี้ยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟและแบบปกติมีสมบัติความต้านทานต่อการเสื่อมใกล้เคียงกัน

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัยเพิ่มเติม และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

การใช้ยางอีพิตีเอ็มร่วมกับยางธรรมชาติในระดับที่ไม่น้อยกว่า 30 phr และสารตัวเติมซิลิกาโดยไม่ใช้สารด้านการเสื่อมใดๆ ให้ยางที่มีลักษณะทางกายภาพสวยงามและความทนทานต่อการแตกเนื่องจากโอโซนได้ดี จึงสามารถที่จะนำไปขึ้นรูปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ต้องการสีสนได้ แต่พบว่ายางเบลนด์ที่ได้ยังมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนและสภาวะที่มีแดดจัดค่อนข้างมากจึงควรมีการปรับปรุงสมบัตินี้ให้ดีขึ้น ซึ่งอาจจะทำได้โดยการปรับปรุงการวัลคาไนเซชันร่วมให้ดีขึ้นและการปรับสัดส่วนของกำมะถันกับสารตัวเร่งให้เหมาะสมยิ่งขึ้นก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้ควรมีการพัฒนาให้สามารถเตรียมยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟให้มีลักษณะต่อเนื่องมากขึ้น

ผลงานวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

บทความทางวิชาการหรือการบรรยายทางวิชาการระดับประเทศเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีการเตรียมยางเบลนด์ NR/EPDM แบบรีแอกทีฟ เพื่อแก้ปัญหาความไม่เข้ากันของอัตราการใช้วัลคาไนซ์ และการใช้ยางอีพิตีเอ็มเป็นส่วนปรับปรุงความทนทานต่อโอโซนของยางธรรมชาติ

บทคัดย่อ

ยางธรรมชาติมีสมบัติด้านความทนทานต่อการเสื่อมเนื่องจากออกซิเจน ความร้อน และโอโซนทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งาน การยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปทำได้โดยการใส่สารแอนติออกซิแดนซ์ร่วมกับแอนติโอซิแนนซ์ ซึ่งสารเคมีที่มีประสิทธิภาพสูงคือสารกลุ่มอะมีนและอนุพันธ์แต่มีสมบัติตกสีทำให้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีคล้ำเท่านั้น ทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาคือการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพียูรีตีเอ็ม แต่มักจะได้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลด้อยเนื่องจากความแตกต่างของอัตราการจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของสารตัวเติมในเฟสยางทั้งสอง งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมซิลิกาในยางธรรมชาติเบลนด์กับยางอีพียูรีตีเอ็มเพื่อให้สามารถพัฒนาเบลนด์ที่มีสมบัติทนทานต่อการเสื่อมสำหรับทำผลิตภัณฑ์ที่มีสีสนได้ โดยใช้เทคนิคการเบลนด์แบบรีแอกทีฟเปรียบเทียบกับเบลนด์แบบปกติ ศึกษาทั้งสูตรที่ไม่ใส่และใส่ซิลิกาพร้อมกับไซเลน การใส่ซิลิกาในยางเบลนด์คอมปาวด์ทำให้เวลาการจัดเรียงตัวและอัตราการจัดเรียงตัวช้าลง ผลจากการแปรเวลาในการ preheat ยางคอมปาวด์อีพียูรีตีเอ็มสำหรับยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟพบว่าเวลาที่ให้ยางมีสมบัติดีที่สุด คือ $T_{90}-1.0$ นาที ซึ่งพบว่า ยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีสมบัติการดึงสูงกว่ายางเบลนด์แบบปกติอย่างชัดเจน ผลจากการใช้สารแอนติออกซิแดนซ์ 4 ชนิดได้แก่ 6PPD, TMQ, Lowinox CPL และ BHT ในยางเบลนด์ที่สัดส่วน NR/EPDM เท่ากับ 70/30 พบว่า สารแอนติออกซิแดนซ์ชนิดตกสีที่ให้สมบัติด้านความทนทานต่อการบ่มเร่งสูงสุดคือ 6PPD และแอนติออกซิแดนซ์ชนิดไม่ตกสี คือ Lowinox CPL ผลการแปรสัดส่วน NR/EPDM เป็น 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 พบว่า ยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง สมบัติการดึงดีกว่ายางเบลนด์แบบปกติ โดยการเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติมีผลให้สมบัติการดึงเพิ่มขึ้น แต่สมบัติด้านความทนทานต่อการบ่มเร่งด้อยลง ผลการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติด้านความทนทานต่อการบ่มเร่ง สภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร และโอโซนของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์ NR/EPDM ทั้งแบบปกติและแบบรีแอกทีฟ พบว่า ยางธรรมชาติมีสมบัติด้านความทนทานต่อโอโซนด้อยกว่าทั้งยางเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟแต่กลับมีความทนทานต่อการบ่มเร่งและสภาพแวดล้อมดีกว่ายางเบลนด์แบบปกติ และแบบรีแอกทีฟตามลำดับ ยางเบลนด์มีสมบัติเด่นด้านความทนทานต่อโอโซนโดยเฉพาะในกรณีที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติม ซึ่งพบว่ายางเบลนด์ NR/EPDM ที่สัดส่วน 70/30 ที่มีซิลิกา 40 phr และไม่ใส่สารด้านการเสื่อมใดๆไม่เกิดรอยแตก ในขณะที่การใช้ยางธรรมชาติล้วนที่ใส่ซิลิกาและ 6PPD เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน การใส่ซิลิกาลงไปในสูตรยางมีผลทำให้ยางเบลนด์ที่ได้มีสมบัติด้านความทนทานต่อการบ่มเร่ง สภาพแวดล้อมและโอโซนในยางดีขึ้นอย่างชัดเจน

คำสำคัญ ยางธรรมชาติ; ยางอีพียูรีตีเอ็ม; ยางเบลนด์; ซิลิกา; ความทนทานต่อการเสื่อม; รีแอกทีฟเบลนด์

Abstract

Natural rubber (NR) has poor degradation resistances due to oxygen, heat and ozone, and hence its application is quite limited. To extend a service life of NR products, antioxidants together with antiozonants are normally incorporated into the compound formulations. The effective but highly staining antidegradants are amine and its derivative types which can be used only for dark or black compounds. One of alternatives is to blend NR with EPDM, however, their blends often show inferior properties due to their differences in cure rate and filler distribution between each phases. In this work, the NR/EPDM blends filled with silica were investigated in order to develop a degradation resistant blend for coloring applications. The blends were prepared by reactive processing technique in comparison with the simple blending technique, both without and with silica & silane. The incorporation of silica into compounds resulted in longer cure times and lower cure rates. By varying the EPDM preheating times prior to being blended with NR for reactive blends, the most suitable preheating time was found to be T_{s1} -1.0 min. The reactive blends showed significant higher tensile strength than those of simple blends. The use of 4 different types of antioxidants, i.e 6PPD, TMQ, Lowinox CPL and BHT in the 70/30 NR/EPDM blends revealed that the 6PPD and Lowinox CPL gave the best ageing properties for staining and non-staining types antioxidants, respectively. By varying the NR/EPDM blend ratios to be 50/50, 60/40, 70/30 and 80/20, the reactive blends clearly demonstrated higher crosslink densities and better tensile properties than those of the simple blends. Increasing the NR contents resulted in better tensile properties but poorer ageing resistance. On comparing the ageing, weathering and ozone resistances of NR with simple and reactive 70/30 NR/EPDM blends, NR clearly showed poorer ozone resistance but unexpectedly better ageing and weathering resistances than those of simple and reactive blends. The blends demonstrated excellent ozone resistance especially in the 70/30 NR/EPDM blends filled with 40 phr of silica without any antidegradants which showed no cracks at all where the NR with both silica and 6PPD suffered from ozone cracks under the same conditions. The addition of silica in the blends resulted in a significant improvement of ageing, weathering and ozone resistances.

Keywords natural rubber; EPDM; rubber blend; silica; degradation resistance; reactive blend

เนื้อหา

1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมแต่มีสมบัติด้อยด้านความทนทานต่อสภาพแวดล้อม ทำให้มีขีดจำกัดในการใช้งาน โดยเฉพาะการใช้งานในสภาพแวดล้อมภายนอกอาคาร โดยที่ยางอาจจะถูกใช้งานในสภาพเสียดสีและ/หรือโดนน้ำมัน ออกซิเจนและความร้อนมีผลให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในขณะที่การสัมผัสกับโอโซนทำให้ยางเกิดรอยแตกเล็กๆซึ่งจะนำไปสู่การขยายตัวของรอยแตกและเกิดการล้าเหลวในที่สุด การแก้ปัญหาการเสื่อมเพื่อยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติโดยทั่วไปทำได้โดยการใส่สารแอนติออกซิแดนท์ร่วมกับแอนติโอโซนเนสส์ และซีฟิ่ง โดยที่สารด้านการเสื่อมชนิดที่มีประสิทธิภาพสูงนั้นเป็นสารกลุ่มอะมีนและอนุพันธ์ (amine and its derivatives) ซึ่งมีสมบัติการตกสี (staining) ทำให้การใช้สารเคมีกลุ่มนี้เหมาะกับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีคล้ำเท่านั้น อีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหานี้คือการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางที่มีสมบัติการทนต่อการเสื่อมซึ่งยางที่ใช้กันมากที่สุดคือยางอีพิตีเอ็ม เนื่องจากเป็นยางที่ใช้กันทั่วไประยะการเบลนด์ยางที่มีโครงสร้างและลักษณะทางเคมีแตกต่างกันเพื่อที่จะผสมผสานสมบัติเด่นของยางทั้งสองเข้าด้วยกันนั้นมักจะทำได้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติด้อยกว่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากปัญหาความไม่เข้ากัน โดยเฉพาะความแตกต่างในอัตราการใช้สารวัลคาไนซ์และการกระจายตัวของสารตัวเติมในเฟสยางทั้งสอง หลายวิธีได้ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางเบลนด์ เช่น การใช้สารเพิ่มความเข้ากันได้ การวัลคาไนซ์ยางอีพิตีเอ็มบางส่วนก่อนที่จะเบลนด์ การใช้เทคนิคสแตเตอร์แบท การดัดแปลงโครงสร้างของยาง หรือแม้แต่ว่าการปรับสภาพผิวของสารตัวเติมเพื่อให้สามารถกระจายตัวเข้าไปในเฟสยางทั้งสองเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด การวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางเบลนด์ส่วนใหญ่ทำโดยใช้สูตรยางทั้งที่ไม่ใส่สารตัวเติมและใส่สารตัวเติมเข้ามาด้าเป็นหลัก เนื่องจากเป็นที่ทราบกันว่าสารตัวเติมเข้ามาด้าทำให้เกิดการเลือกเฟสในยางเบลนด์ อย่างไรก็ตามพบว่ายังไม่มีการศึกษาผลจากการใช้สารตัวเติมชนิดอื่นมากนักโดยเฉพาะสารตัวเติมชนิดสีขาวได้แก่ซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพในยาง ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตใช้เพื่อลดต้นทุนหรืออาจจะใช้เป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมประสิทธิภาพได้หากมีขนาดอนุภาคเล็ก ในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมซิลิกาในยางธรรมชาติเบลนด์กับยางอีพิตีเอ็มเพื่อให้สามารถพัฒนายางเบลนด์ที่มีสมบัติทนทานต่อการเสื่อมสำหรับทำผลิตภัณฑ์ที่มีสีสนได้ เช่น แผ่นยางปูพื้นสนามเด็กเล่น ยางกระเบื้องมุงหลังคา เป็นต้น

2. วัตถุประสงค์

เพื่อเตรียมยางเบลนด์ที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักให้มีสมบัติเชิงกลดีและต้านทานต่อการเสื่อม เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีสน ทดแทนหรือลดปริมาณการใช้ยางสังเคราะห์ และใช้ยางอีพิตีเอ็มเป็นสารด้านการเสื่อมแทนการใช้สารเคมีด้านการเสื่อมชนิดตกสี

3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

การเบลนด์ยางตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปเข้าด้วยกันนั้นเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการพัฒนาให้ได้สมบัติตามต้องการ ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลดีแต่มีสมบัติด้อยด้านความทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยเฉพาะออกซิเจน ความร้อนและโอโซน ในขณะที่ยางอีพิตีเอ็มมีสมบัติเด่นในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมแต่มีข้อด้อยในด้านสมบัติเชิงกล การเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ยางเบลนด์ที่มีทั้งสมบัติเชิงกลและสมบัติการทนต่อสภาพแวดล้อมดี อย่างไรก็ตามการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็มมีปัญหาความไม่เข้ากัน (EI-Sabbagh, 2003; Lewis *et al.*, 2003) เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีปริมาณพันธะคู่หรือระดับความไม่อิ่มตัวในสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกันสูง และปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ยาง

เบลนด์ที่ได้มักมีสมบัติคือความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวของพันธะเชื่อมโยงและสารตัวเติมในเฟสยางทั้งสองชนิด ยางที่มีระดับความไม่อึดตัวแตกต่างกันนั้นมีความเป็นขั้วแตกต่างกันและมีจำนวนตำแหน่งที่ว่องไวต่อการวัลคาไนซ์ด้วย กำมะถันแตกต่างกัน (Coran 1988; Chapman and Tinker, 2003) สารวัลคาไนซ์โดยเฉพาะสารตัวเร่งซึ่งมีความเป็นขั้วสูง จะแพร่เข้าไปในยางที่มีความไม่อึดตัวสูงกว่าซึ่งในที่นี้ได้แก่ยางธรรมชาติทำให้ความเข้มข้นของสารวัลคาไนซ์ในแต่ละเฟส ยางไม่เท่ากัน (Guillaumond 1976; Ignatz-Hoover *et al.*, 2003) ในทำนองเดียวกับเขม่าดำซึ่งมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนย้ายไปยังเฟสยางที่มีความเป็นขั้วสูงกว่าเช่นกัน

ในการเบลนด์ยางธรรมชาติกับยางอีพิตีเอ็ม พบว่าเฟสของยางอีพิตีเอ็มที่กระจายตัวอยู่ในยางที่ไม่อึดตัวมีผลให้ ยางเบลนด์มีความทนทานต่อการแตกเนื่องจากโอโซน Doyle (1996) ได้อธิบายว่าเฟสของยางอีพิตีเอ็มทำหน้าที่ป้องกัน ไม่ให้รอยแตกเล็กๆที่เกิดขึ้นในเฟสของยางไดอีนมารวมตัวกันเป็นรอยแตกใหญ่ได้ หรือเปรียบเฟสของยางอีพิตีเอ็มเสมือน ตัวที่หยุดการแตกเพราะมีผลทำให้พลังงานที่ปลายของรอยแตกลดลง การใช้ยางอีพิตีเอ็มเบลนด์กับยาง NR และ BR ใน สูตรคอมปาวด์แก้มยางรถยนต์ (tire sidewall compound) ปริมาณ 20-40 phr นั้นพบว่าทำให้ยางเบลนด์มีความทนทานต่อ โอโซนเพียงพอโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารต้านการเสื่อมจากโอโซนอีก (Sandstrom and Lal, 1977; Layer and Lattimer, 1990; Waddell, 1998; van de Ven and Noordermeer, 2000)

การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางอีพิตีเอ็มเบลนด์กับยางธรรมชาติหรือยางที่มีระดับความไม่อึดตัวสูงอื่นๆ เช่น BR, SBR เป็นต้น ทำได้โดยการแก้ไขปัญหาคความไม่เข้ากันของอัตราการวัลคาไนซ์เพื่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ร่วมระหว่างเฟสยาง ทั้งสอง ได้มีการนำเสนอแนวทางและวิธีต่างๆหลากหลาย เช่น การใช้สารเติมแต่งที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (multifunctional rubber additive) ได้แก่ bis(diisopropyl)thiophosphoryl disulfide (DIPDIS) ทำให้เกิดปฏิกิริยากับยางอีพิตีเอ็มอยู่ใน ลักษณะของ rubber-bound intermediate ทำให้ยางอีพิตีเอ็มมีความเป็นขั้วสูงขึ้น (Ghosh *et al.*, 2001; 2004; Ghosh and Basu, 2002) เพื่อควบคุมการเคลื่อนย้ายของสารวัลคาไนซ์และสารตัวเติม การใช้ยางอีพิตีเอ็มกราฟต์ด้วยมาลิกแอโนไฮ ไดรด์ ยางทรานส์พอลีโอคทีลีน (trans-polyoctylene) หรือยางบิวทาไดอีนเหลว เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ (Chang *et al.*, 1999; van Duin *et al.*, 1993) การใช้เทคนิคการวัลคาไนซ์สองขั้นตอน (two-stage vulcanization) (Suma *et al.*, 1993) และการดัดแปลงโมเลกุลยางอีพิตีเอ็มโดยการกราฟต์โมเลกุลสารตัวเร่งลงบนสายโซ่โมเลกุล วิธีหลังนี้มีการเตรียมในหลาย ลักษณะ เช่น Baranwal and Son (1974) ดัดแปลงยางอีพิตีเอ็มโดยทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่ง 4,4-dithiobismorpholine (DTBM) และ 2-mercaptobenzothiazole (MBT) ในสภาวะสารละลายในสภาพที่มีสารที่ว่องไวต่อแสง (photosensitizer) และแสงยูวี Hopper (1976, 1989, 1998) ดัดแปลงยางอีพิตีเอ็มโดยการใช้สาร N-chlorothiosulfonamides ทำปฏิกิริยากับ ยางอีพิตีเอ็มในทั้งสภาวะสารละลายและสภาวะหลอม Cook (1998) ผสมสารให้กำมะถันคือ dithiocaprolactam (DTDC) และ dithiodimorpholine (DTDM) กับยางอีพิตีเอ็มในเครื่องผสมแบบปิดที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้ sulfur donor bound rubber intermediate ก่อนที่จะนำมาเบลนด์กับยางธรรมชาติ สารวัลคาไนซ์และสารเติมแต่งอื่นๆ

จากผลการศึกษายางเบลนด์ NR/BR/EPDM ที่อัตราส่วนการเบลนด์ 35/35/30 กับยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมและยางที่ใช้ เขม่าดำ (Sahakaro *et al.*, 2007) พบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติการดึงของยางเบลนด์ได้เมื่อใช้วิธีการเบลนด์แบบรีแอกทีฟ (reactive blending) ทดแทนการเบลนด์แบบปกติ เทคนิคการเบลนด์แบบรีแอกทีฟทำได้โดยการใส่สารวัลคาไนซ์ทั้งหมดลงในเฟสของยางอีพิตีเอ็มก่อนที่จะนำไปให้ความร้อนภายใต้ความดันเป็นระยะเวลาที่ขึ้นอยู่กับเวลาสก๊อชของยางอีพิตีเอ็ม แล้วนำไปผสมกับยางธรรมชาติและยางปียอร์ที่ผ่านการบดเพื่อปรับความหนืดแล้ว พบว่ายางเบลนด์วัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติ ความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดสูงกว่าสมบัติของยางเบลนด์ที่เตรียมจากวิธีการผสมแบบปกติทั้งแบบที่ ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมเขม่าดำ การเพิ่มขึ้นของสมบัติการดึงในยางเบลนด์บ่งชี้ว่าเทคนิคการเบลนด์แบบรีแอกทีฟทำให้ได้ ยางเบลนด์ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของพันธะเชื่อมโยงและ/หรือการกระจายตัวของ สารตัวเติมในยางสม่ำเสมอมากขึ้นซึ่งยืนยันได้จากผลการทดสอบสัณฐานวิทยาของยางเบลนด์ด้วยเทคนิค AFM และ TEM

นอกจากนี้การใช้ยางอีพดีเอ็มในปริมาณ 30 ส่วนผสมกับยาง NR/BR สูตรแก้มยางรถยนต์ (tire sidewall) ทำให้ได้ยางที่มีความต้านทานต่อโอโซนในระดับที่ต้องการโดยไม่ต้องใช้สาร 6PPD ผลการทดสอบเปรียบเทียบสมบัติของยางเบลนด์ NR/BR/EPDM กับสูตรยาง NR/BR พบว่ายางเบลนด์แบบรีแอกทีฟให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืด ความทนทานต่อการฉีกขาดและการล้ารวมทั้งความต้านทานต่อโอโซนในสภาพสแตติกและไดนามิกส์ดีเยี่ยม โดยสมบัติที่ได้อยู่ในระดับเดียวกันหรือบางอย่างดีกว่ายางคอมปาวด์ที่ได้จากการเบลนด์ NR/BR ที่ใช้กับแก้มยางทั่วไป

แนวทางการเบลนด์แบบรีแอกทีฟที่ใช้กับยางเบลนด์ NR/BR/EPDM น่าจะใช้ได้ผลดีกับยางเบลนด์ NR/EPDM ด้วยเพื่อให้ได้ยางที่มีระดับการเชื่อมโยงในแต่ละเฟสใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากสารตัวเติมซิลิกาที่มีลักษณะทางเคมีแตกต่างจากเขม่าดำ พฤติกรรมของยางคอมปาวด์และยางวัลคาไนซ์ที่ได้รวมถึงการตอบสนองต่อเทคนิคการเบลนด์ที่ใช้จึงอาจจะแตกต่างกัน ในการวิจัยจะใช้การเบลนด์แบบรีแอกทีฟเปรียบเทียบกับเบลนด์แบบปกติ เพื่อหาสภาวะการเบลนด์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ยางเบลนด์ที่มีสมบัติเชิงกลดีและทนทานต่อสภาพแวดล้อมโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารต้านการเสื่อมประเภทอะมีนเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ยางเบลนด์ในการทำผลิตภัณฑ์ที่มีสีสน้ำเพื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมนอกอาคาร

4. วิธีการ

4.1 ศึกษาสมบัติของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่เตรียมโดยใช้วิธีการเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟ โดยใช้สูตรยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมและใส่สารตัวเติมซิลิกาในสูตรยางคอมปาวด์ปริมาณ 40 phr

เตรียมยางเบลนด์ NR/EPDM ให้มีอัตราส่วนเบลนด์ 50/50 และ 70/30 โดยใช้สูตรยางดังตารางที่ 1 ทำการผสมยางโดยใช้เครื่องผสมยางสองลูกกลิ้งขนาด 6"x14" และใช้อุณหภูมิห้องในการเริ่มต้นผสม

ตารางที่ 1 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาสมบัติยางเบลนด์ NR/EPDM ทั้งแบบที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมซิลิกา

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)			
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4
ADS	50	50	70	70
EPDM (Keltan 512)	50	50	30	30
ZnO	4	4	4	4
Stearic acid	2	2	2	2
TBBS	0.95	0.95	0.95	0.95
Sulphur	2.5	2.5	2.5	2.5
Silica (Ultrasil VN3)	-	40	-	40
Silane (Si-69)	-	3.6	-	3.6
Parafin oil	-	4	-	4

เนื่องจากยางธรรมชาติมีความหนืดของยางดิบสูงกว่ายางอีพดีเอ็ม จึงต้องทำการปรับความหนืดของยางธรรมชาติให้ใกล้เคียงกับยางอีพดีเอ็มก่อนที่จะใช้ในการเบลนด์

4.1.1 การเบลนด์แบบปกติ

การเบลนด์ทำโดยนำยางธรรมชาติที่บดปรับความหนืดแล้วมาผสมกับยางอีพดีเอ็ม แล้วเติมกรดสเตียริก ZnO TBBS และกำมะถัน ตามลำดับ ใช้เวลาในการบดผสมรวม 10 นาที ในกรณีของสูตรที่ใส่สารตัวเติมจะใส่ซิลิกา ไชเลน และน้ำมัน

ลงในยางทันทีหลังจากบดผสมยางเข้าด้วยกัน ก่อนที่จะเติมกรดสเตียริก ซึ่งจะใช้เวลาในการบดผสมยางสูตรที่มีซิลิกา รวม 16 นาที

4.1.2 การเบลนด์แบบรีแอกทีฟ

กรณีของยางที่ไม่ใส่ซิลิกา : เตรียมคอมปาวด์ของยางอีพดีเอ็มโดยใช้สูตรเดียวกันกับการเบลนด์แบบปกติดังตารางที่ 1 โดยใส่สารเคมีทุกชนิดยกเว้นยางธรรมชาติลงในยางอีพดีเอ็ม แล้วนำยางที่ได้ไปทดสอบหาค่า scorch time (T_{s1}) ที่อุณหภูมิ 150 °C จากนั้นนำคอมปาวด์ของยางอีพดีเอ็มไปให้ความร้อน (preheat) โดยใช้เครื่องอัดเป็นระยะเวลาต่างๆ ก่อนถึงเวลา scorch time เพื่อหาเวลาการให้ความร้อนที่เหมาะสม เช่นทำการแปรเวลา $T_{s1}-0.5$, $T_{s1}-1.0$, $T_{s1}-1.5$, $T_{s1}-3.0$, $T_{s1}-4.5$ และ $T_{s1}-6.0$ นาที ซึ่งขั้นตอนนี้ทำให้เกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ขึ้นต้นในเฟสยางอีพดีเอ็มก่อนที่จะนำไปเบลนด์กับยางธรรมชาติซึ่งมีอัตราการวัลคาไนซ์สูงกว่า

นำคอมปาวด์ของยางอีพดีเอ็มที่ผ่านการให้ความร้อนตามระยะเวลาที่กำหนดหรือเรียกว่า Preheated EPDM ไปผสมกับยางธรรมชาติที่ได้ปรับความหนืดเพื่อให้ได้ยางเบลนด์ที่มีองค์ประกอบสุดท้ายเช่นเดียวกับยางที่เตรียมแบบปกติ

กรณีของยางที่ใส่ซิลิกา : เตรียมมาสเตอร์แบทช์ของยางกับซิลิกา ไชเลน และน้ำมันก่อน โดยให้ซิลิกามีความเข้มข้นเริ่มต้นในยางทั้งสองชนิดเท่ากันดังสูตรในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สูตรที่ใช้ในการเตรียมมาสเตอร์แบทช์ของยางกับซิลิกา

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ (phr)	
	NR-silica masterbatch	EPDM-silica masterbatch
ADS	100	-
EPDM (Keltan 512)	-	100
Silica (Ultrasil VN3)	40	40
Silane (Si-69)	3.6	3.6
Parafinic oil	4	4

นำมาสเตอร์แบทช์ของยางอีพดีเอ็มกับซิลิกาที่เตรียมได้ตามสัดส่วนของยางที่ต้องการ (30phr และ 50 phr) มาใส่สารเคมีอื่นๆ ทั้งหมดดังสูตรในตารางที่ 1 (ZnO, Stearic acid, TBBS และ Sulphur) ก่อนที่จะนำไป preheat ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลาต่างๆ ก่อน scorch time แล้วนำมาเบลนด์กับมาสเตอร์แบทช์ของยางธรรมชาติกับซิลิกา ให้ได้องค์ประกอบสุดท้ายในยางเบลนด์ที่มีสัดส่วนยาง NR/EPDM เท่ากับ 50/50 และ 70/30 ดังสูตรในตารางที่ 1 (สูตร 2 และ สูตร 4)

นำยางเบลนด์คอมปาวด์สุดท้ายที่ได้จากการเตรียมทั้งแบบปกติและรีแอกทีฟทั้งที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกาไปทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ ตามมาตรฐาน ASTM D2084 และสมบัติของยางหลังวัลคาไนซ์ ได้แก่ สมบัติการดึงตามมาตรฐาน ASTM D412 และความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงโดยวิธีการบวมพองจนถึงจุดสมดุล (equilibrium swelling method)

เปรียบเทียบสมบัติของยางเบลนด์ที่ได้จากการใช้ยางอีพดีเอ็มที่ preheat เป็นเวลาต่างๆ เพื่อกำหนดสภาวะการ preheat ที่เหมาะสม

4.2 ศึกษาผลของชนิดของสารแอนติออกซิแดนท์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่เตรียมโดยวิธีการเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟที่สัดส่วนเบลนด์ 70/30

เตรียมยางเบลนด์ชนิดไม่ใส่สารตัวเติมที่อัตราส่วน NR/EPDM เท่ากับ 70/30 โดยวิธีการเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในขั้นตอนที่ 4.1 และใช้สูตรเช่นเดียวกับสูตรที่ 3 ในตารางที่ 1 โดยใส่สารด้านการเสื่อมประเภทต่างๆ เพิ่มลงไปในส่วนในสูตรในปริมาณ 2.0 phr ทำการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการบ่มเร่งและลักษณะทางกายภาพของยางเบลนด์ที่ได้เมื่อไม่ใส่สารด้านการเสื่อมใดๆ เปรียบเทียบกับการใส่สารด้านการเสื่อม ได้แก่ สารด้านการเสื่อมที่ไม่ตกสี (BHT และ Lowinox CPL) และสารด้านการเสื่อมที่ตกสี (TMQ, 6PPD)

4.3 ศึกษาผลของสัดส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/EPDM แบบปกติและแบบรีแอกทีฟ

เตรียมยางเบลนด์ NR/EPDM ที่สัดส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 แบบปกติและรีแอกทีฟ ทั้งที่ใส่และไม่ใส่สารตัวเติมซิลิกา โดยใช้สภาวะการเตรียมที่เหมาะสมจากการศึกษาในข้อ 4.1 โดยใช้องค์ประกอบต่างๆ (ZnO, Stearic acid, TBBS, Sulphur และ silica+silane+oil) เช่นเดียวกับสูตรในตารางที่ 1 ซึ่งไม่มีการใส่สารแอนติออกซิแดนท์

ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ สมบัติการดึงก่อนและหลังบ่มเร่ง และความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์

4.4 เปรียบเทียบสมบัติการบ่มเร่ง ความทนทานต่อสิ่งแวดล้อมและโอโซนของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่สัดส่วนการเบลนด์ 70/30 กับยางธรรมชาติล้วนที่ใส่และไม่ใส่สารแอนติออกซิแดนท์

ทดสอบสมบัติการบ่มเร่งของยางเบลนด์สูตรที่ไม่ใส่สารด้านการเสื่อมและใส่สารด้านการเสื่อมชนิดไม่ตกสีที่ให้สมบัติการบ่มเร่งดีที่สุดจากข้อ 4.2 (Lowinox CPL) เปรียบเทียบกับสูตรที่ใส่สารด้านการเสื่อมชนิดตกสี (6PPD) และเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติล้วน โดยทดสอบในตู้อบอากาศร้อนตามมาตรฐาน ASTM D573 ทดสอบหลังจากนำแผ่นยางวัลคาไนซ์วางทิ้งไว้ภายนอกอาคารเป็นระยะเวลานาน 1 เดือน และทดสอบความทนทานต่อโอโซนตามมาตรฐาน ISO 1431 Part 1 ซึ่งใช้ความเข้มข้นของโอโซน 50 pphm ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นระยะเวลา 96 ชั่วโมง ภายใต้เปอร์เซ็นต์การยืด 20%

5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

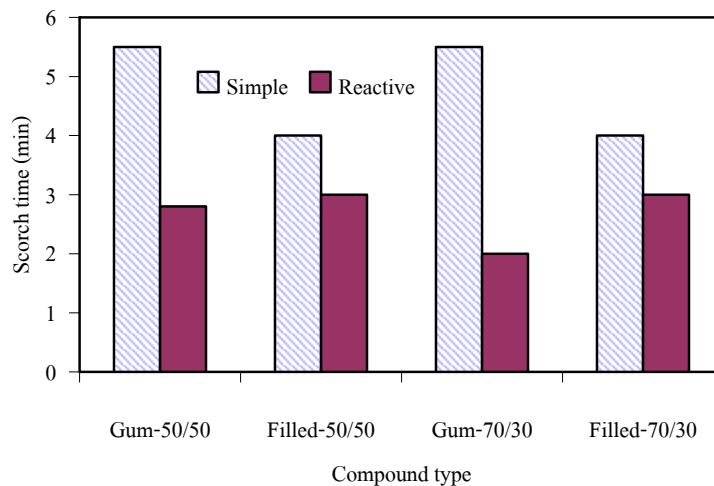
5.1 สมบัติของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่เตรียมโดยวิธีการเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟ โดยใช้สูตรยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมและใส่สารตัวเติมซิลิกาในสูตรยางคอมปาวด์ปริมาณ 40 phr

ผลการทดสอบสมบัติการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลเบื้องต้นของยางธรรมชาติ ADS และยางอีพดีเอ็ม Keltan 512 ที่ใช้ในการเตรียมยางเบลนด์ เมื่อเตรียมยางคอมปาวด์โดยใช้สูตรเช่นเดียวสูตรที่ใช้กับยางเบลนด์ พบว่ายางอีพดีเอ็มวัลคาไนซ์ได้ช้ากว่ายางธรรมชาติมากดังจะเห็นได้จากเวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้และเวลาการวัลคาไนซ์ที่แสดงในตารางที่ 3 โดยยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดสูงกว่ายางอีพดีเอ็มมากเมื่อไม่ใช้ซิลิกา แต่การใช้ซิลิกาทำให้สมบัติของยางอีพดีเอ็มเพิ่มขึ้นจนอยู่ในระดับเดียวกับยางธรรมชาติ

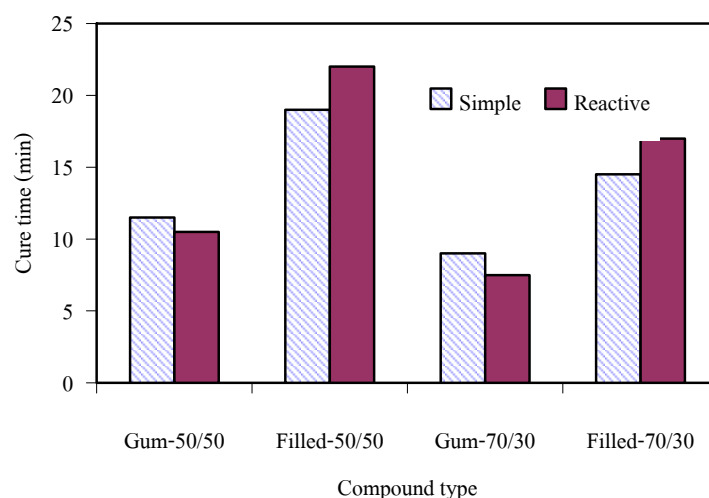
ตารางที่ 3 ลักษณะการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150 °C และสมบัติการดึงของยางที่ใช้ในการเบลนด์

Property	NR		EPDM	
	Gum	Filled	Gum	Filled
M_L (dN.m)	1.40	2.70	7.00	4.20
M_H-M_L (dN.m)	18.90	26.00	24.50	36.00
T_{s1} (min)	5.50	4.50	18.50	13.50
T_{c90} (min)	9.00	12.50	42.21	46.50
100% Modulus (MPa)	0.87 ± 0.04	1.64 ± 0.04	1.27 ± 0.02	1.84 ± 0.04
300% Modulus (MPa)	2.10 ± 0.06	6.53 ± 0.12	-	5.94 ± 0.28
Tensile strength (MPa)	25.49 ± 0.38	23.23 ± 0.64	1.75 ± 0.15	23.26 ± 0.30
Elongation at break (%)	700 ± 7	582 ± 21	192 ± 14	658 ± 19

การเตรียมยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟ ได้ทำการแปรเวลาการให้ความร้อนกับยางคอมปาวด์อีพียูที่ T_{s1} -0.5, T_{s1} -1.0, T_{s1} -1.5, T_{s1} -3.0, T_{s1} -4.5 และ T_{s1} -6.0 นาที ก่อนนำไปเบลนด์กับยางธรรมชาติ เมื่อทดสอบสมบัติของยางเบลนด์คอมปาวด์ทั้งที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา พบว่าค่าความหนืดมูนี ค่าทอร์กต่ำสุด และค่า M_H-M_L ของยางเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการ preheat นอกจากนี้ยางจะมี scorch time และ cure time สั้นลงเนื่องมาจากการ preheat ทำให้เกิดการกระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ในยางอีพียูให้เกิดเป็น rubber bound intermediate ส่งผลให้ลดระยะเวลาในการ cure ลงซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบกับยาง NR/BR/EPDM (Sahakaro *et al.*, 2007) การใส่ซิลิกามีผลให้ยางเบลนด์วัลคาไนซ์ช้าลงทั้งที่สัดส่วน 50/50 และ 70/30 เช่นเดียวกับกรณีของยางเบลนด์แบบปกติ จากผลการทดสอบสมบัติของยางเบลนด์ที่ใช้เวลา preheat ต่างกัน พบว่าการ preheat ที่ T_{s1} -1.0 นาที ให้สมบัติการดึงของยางโดยรวมดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบ scorch time และ cure time ของยางเบลนด์แบบปกติกับแบบรีแอกทีฟที่เวลา preheat T_{s1} -1.0 นาที ได้ผลดังรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 Scorch time ของยางเบลนด์ NR/EPDM สัดส่วน 50/50 และ 70/30 ที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา ทั้งการเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟ (เวลาในการ Preheat ที่ T_{s1} -1.0 นาที)

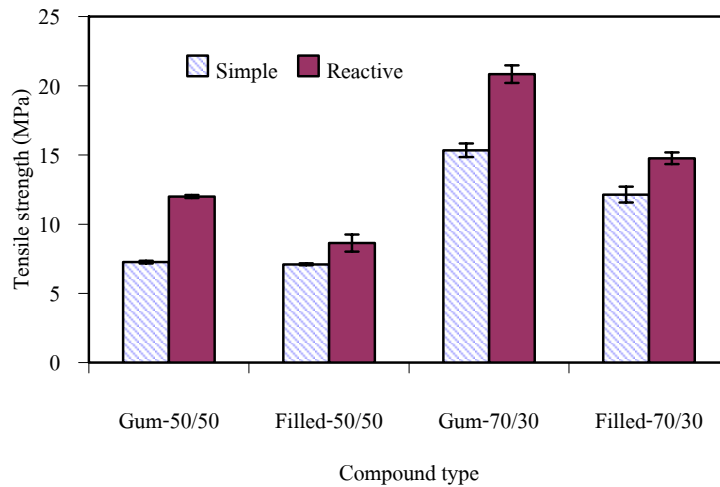


รูปที่ 2 Cure time ของยางเบลนด์ NR/EPDM สัดส่วน 50/50 และ 70/30 ที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา ทั้งการเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟ (เวลาในการ Preheat ที่ T_{s1} -1.0 นาที)

ผลการทดสอบสมบัติของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่อัตราส่วน 50/50 และ 70/30 แบบปกติและแบบรีแอกทีฟที่ใช้เวลาในการ Preheat ที่ T_{s1} -1.0 นาที) สรุปได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สมบัติการดึงของยางเบลนด์แบบปกติ (S) เปรียบเทียบกับยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟ (R)

Property	NR/EPDM 50/50				NR/EPDM 70/30			
	S-Gum	R-Gum	S-Filled	R-Filled	S-Gum	R-Gum	S-Filled	R-Filled
100% Modulus (MPa)	0.94 ±0.02	0.98 ±0.02	2.21 ±0.09	1.84 ±0.01	0.93±0. 05	0.92 ±0.04	2.37±0. 13	1.95 ±0.11
300% Modulus (MPa)	1.83 ±0.05	2.03 ±0.05	6.01 ±0.11	5.01 ±0.25	2.06±0. 16	2.02 ±0.09	5.63±0. 21	6.37 ±0.46
Tensile strength (MPa)	7.26 ±0.10	12.00 ±0.11	7.10 ±0.07	8.64 ±0.62	15.34± 0.50	20.84 ±0.64	12.14± 0.57	14.76 ±0.42
Elongation at break (%)	608 ±12	635 ±23	371 ±6	481 ±5	628 ±23	725 ±28	533 ±16	532 ±25



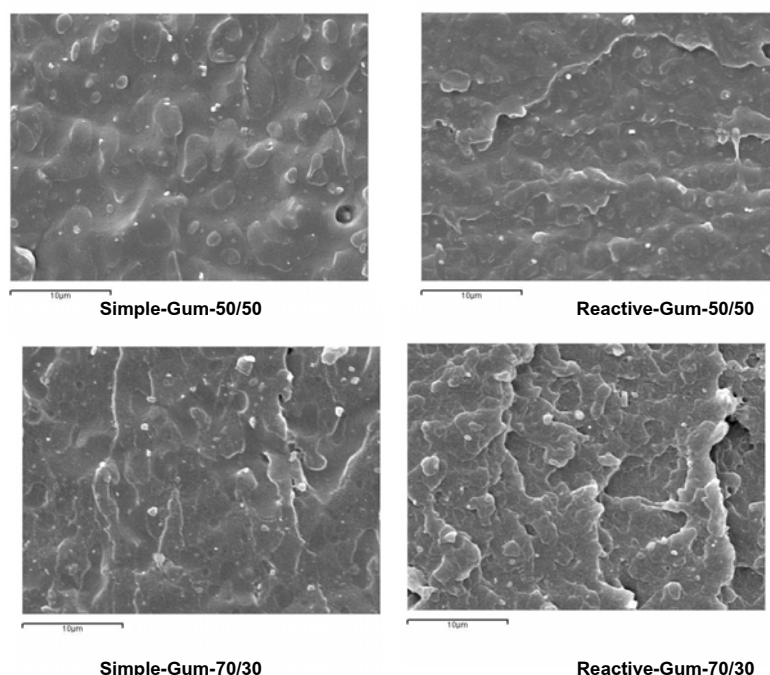
รูปที่ 3 ความทนทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ NR/EPDM สัดส่วน 50/50 และ 70/30 ที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา ทั้งการเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟ (เวลาในการ Preheat ที่ Ts1-1.0 นาที)

เมื่อเปรียบเทียบความทนทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์แบบปกติและรีแอกทีฟ พบว่า ที่สัดส่วนการเบลนด์ทั้งสองยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางเบลนด์แบบปกติอย่างชัดเจน ยกเว้นยางเบลนด์ที่สัดส่วน 50/50 ที่ใส่ซิลิกาซึ่งมีสมบัติความทนทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน การเบลนด์แบบรีแอกทีฟเป็นการเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่าง NR กับ EPDM ที่มีความแตกต่างกันทางด้านอัตราคาร์บอนไนซ์ การทำการ preheat ยางอีพดีเอ็มโดยการกระตุ้นให้ยางเกิดปฏิกิริยากับส่วนของกำมะถันและสารตัวเร่งไปก่อนเป็นผลให้สายโซ่โมเลกุลของยางอีพดีเอ็มมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการเชื่อมโยงมากขึ้น และป้องกันการเคลื่อนย้ายเฟสของสารคาร์บอนไนซ์ ทำให้สามารถเบลนด์ยางทั้งสองชนิดเข้ากันได้ง่ายและสมบัติที่ได้ดีขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 5 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์ NR/EPDM แบบปกติและแบบรีแอกทีฟที่ไม่ใส่ซิลิกา

Type of blend	Crosslink density (mol/m ³)	
	NR/EPDM 50/50	NR/EPDM 70/30
Simple	65.20	72.41
Reactive	66.02	82.77

ยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงกว่ายางเบลนด์แบบปกติและยางที่มีสัดส่วนเบลนด์ 70/30 มีค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงกว่าที่สัดส่วน 50/50

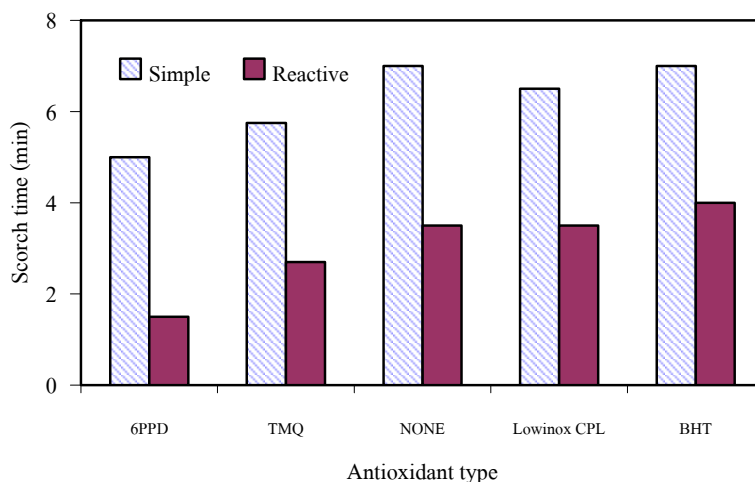


รูปที่ 4 เปรียบเทียบ SEM micrographs ของ Tensile fractured surfaces ของยางเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟที่ใส่ส่วนผสม NR/EPDM เท่ากับ 50/50 และ 70/30 ที่ไม่ใส่สารตัวเติมซิลิกา (กำลังขยาย 3500 เท่า)

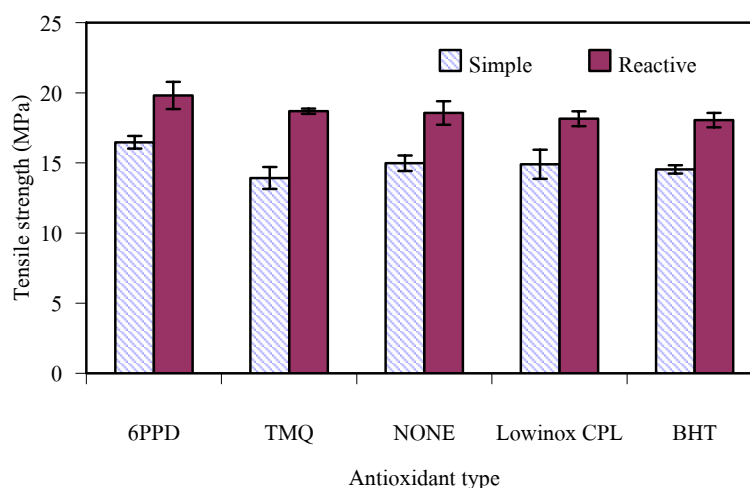
ผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของยางเบลนด์ที่ไม่ใส่ซิลิกาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่งโดยใช้ชิ้นตัวอย่างจากบริเวณผิวของยางที่ถูกดึงจนขาด เมื่อสังเกตจากลักษณะของรอยต่อระหว่างเฟสยาง จากรูปที่ 4 พบว่าเฟสของยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟจะมีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่ายางเบลนด์แบบปกติซึ่งส่งผลให้ยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีสมบัติที่ดีกว่า

5.2 ผลของชนิดของสารแอนติออกซิแดนท์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่เตรียมโดยวิธีการเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟที่ใส่ส่วนผสมเบลนด์ 70/30

ยางเบลนด์ NR/EPDM ที่อัตราส่วน 70/30 แบบปกติและรีแอกทีฟ (ใช้เวลาการ preheat ยางคอมปาวด์อีพีดีเอ็ม เท่ากับ T_{90} -1.0 นาที ก่อนที่จะเบลนด์กับยางธรรมชาติ) ที่ใช้สารด้านการเชื่อมต่างชนิดกันปริมาณ 2 phr และไม่ใส่สารตัวเติมซิลิกา มีลักษณะของกราฟการวัลคาไนซ์คล้ายคลึงกัน แต่มีค่า scorch time และ cure time แตกต่างกันโดยยางเบลนด์ที่ใส่สารด้านการเชื่อมชนิด 6PPD และ TMQ จะให้ scorch time และ cure time ที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยางเบลนด์ที่ไม่ใส่สารด้านการเชื่อม เนื่องจากการมีหมู่เอมีนในสูตรโครงสร้างซึ่งมีฤทธิ์เป็นเบสทำให้กระตุ้นปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ให้เกิดเร็วขึ้น สำหรับสารด้านการเชื่อมพวกอนุพันธ์ของฟีนอล คือ Lowinox CPL และ BHT พบว่าไม่มีผลมากนัก ที่ทุกชนิดของสารด้านการเชื่อมที่ใช้พบว่ายางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมี scorch time และ cure time สั้นกว่ายางเบลนด์แบบปกติ



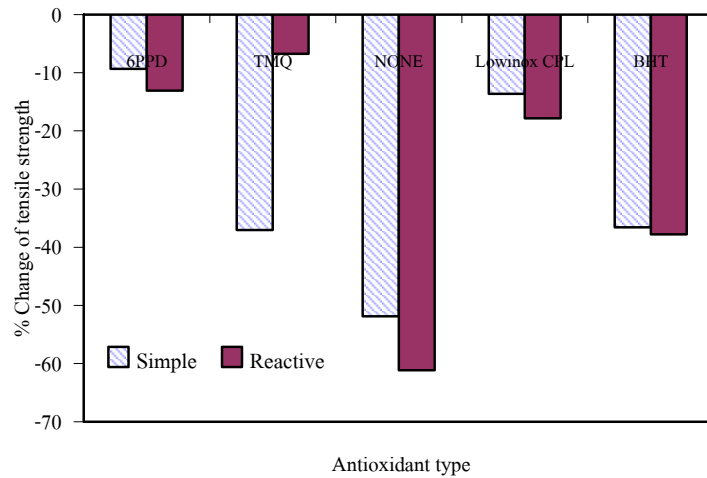
รูปที่ 5 Scorch time ของยางเบลนด์ NR/EPDM (70/30) ไม่ใส่ซิลิกาเมื่อแปรชนิดของสารแอนติออกซิแดนซ์



รูปที่ 6 ความทนทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์ NR/EPDM (70/30) ไม่ใส่ซิลิกาเมื่อแปรชนิดของสารแอนติออกซิแดนซ์

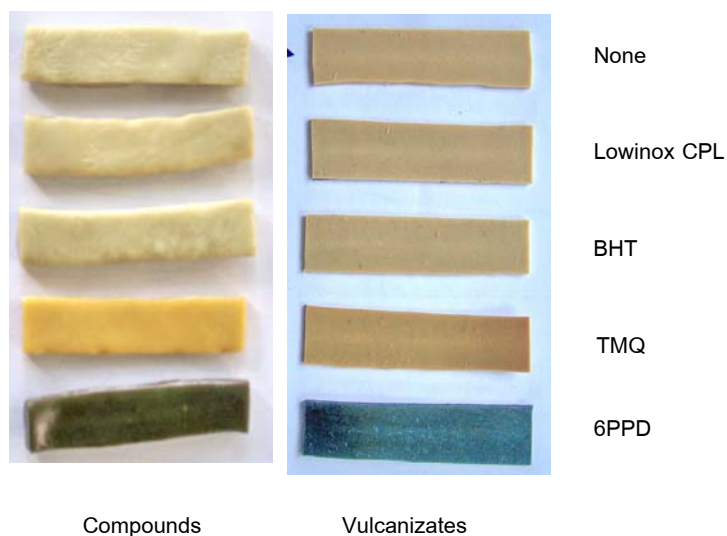
ยางที่ใช้ 6PPD มีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงที่สุด ส่วนการใช้แอนติออกซิแดนซ์ชนิดอื่นๆ และการไม่ใช้แอนติออกซิแดนซ์ให้ยางที่มีสมบัติความทนทานต่อแรงดึงใกล้เคียงกัน ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับผลของค่ามอดูลัส และยางเบลนด์แบบปกติมีความทนทานต่อแรงดึงน้อยกว่ายางเบลนด์แบบรีแอคทีฟอย่างชัดเจนดังรูปที่ 6

สมบัติของยางหลังการบ่มแรงภายใต้อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง พบว่ามีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดลดลง



รูปที่ 7 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความทนทานต่อการดึงของยางเบลนด์แบบปกติและรีแอกทีฟกรณีไม่ใส่สารตัวเติมซิลิกา เมื่อแปรชนิดของสารแอนติออกซิแดนท์ หลังจากการบ่มแรงกายไ้อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบความทนทานต่อการบ่มแรงของยางเบลนด์แบบปกติและรีแอกทีฟ พบว่า ยางเบลนด์แบบปกติจะให้ค่าความทนทานต่อการบ่มแรงสูงกว่ายางเบลนด์แบบรีแอกทีฟเล็กน้อยยกเว้นยางที่ใช้ TMQ ในกลุ่มของ antioxidant ชนิดไม่ตกสพบว่า BHT ให้ความต้านทานต่อการบ่มแรงด้อยกว่า Lowinox CPL อย่างชัดเจน เนื่องจาก BHT มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า ทำให้สูญเสียสารต้านการเสื่อมจากการระเหยมากกว่าและจากโครงสร้างโมเลกุลจะเห็นได้ว่า หมู่ฟีนอลของ BHT อยู่ในสภาพที่มีความเกาะกันมากกว่าทำให้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาน้อยกว่าหมู่ฟีนอลในโครงสร้างของ Lowinox CPL ส่วน 6PPD ให้สมบัติการบ่มแรงดีที่สุดแต่ตกส้อย่างรุนแรงดังแสดงในรูปที่ 8 การใช้ TMQ ให้ผลแตกต่างกันในยางเบลนด์แบบปกติและรีแอกทีฟอาจเป็นผลเนื่องมาจาก TMQ เป็นสารที่กระจายตัวได้ยากเพราะมีลักษณะเป็นเม็ดใหญ่และแข็งมาก ขั้นตอนการผสมยางเบลนด์แบบปกติอาจทำให้ TMQ กระจายตัวในยางได้ไม่ดีแม้จะมีการบดให้ละเอียดก่อนการนำไปผสมแล้ว แต่กรณีของยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟเมื่อ preheat ยางอีพดีเอ็มซึ่งใช้อุณหภูมิสูงถึง 150 °C น่าจะมีผลทำให้ TMQ เกิดการหลอมเหลวและกระจายตัวเข้าไปในยางได้ดีกว่ายางเบลนด์แบบปกติ และแสดงสมบัติเด่นของ TMQ ซึ่งเป็นสารป้องกันการเสื่อมที่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาพอุณหภูมิสูงได้ดี



รูปที่ 8 เปรียบเทียบสีของยางเบลนด์ก่อนและหลังการวัลคาไนซ์กรณีไม่ใส่ซิลิกาเมื่อแปรชนิดของสารแอนติออกซิแดนท์

5.3 ผลของสัดส่วนการเบลนด์ต่อสมบัติของยางเบลนด์ NR/EPDM แบบปกติและแบบรีแอกทีฟ

สมบัติของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่สัดส่วน 50/50, 60/40, 70/30 และ 80/20 แบบปกติและรีแอกทีฟ (ใช้เวลาการ preheat ยางคอมปาวด์อีพีดีเอ็ม เท่ากับ $T_{s1}-1.0$ นาที) ทั้งที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา เป็นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6 ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางเบลนด์ที่สัดส่วนเบลนด์ NR/EPDM ต่างๆ

Property	Gum-Simple				Filled-Simple			
	50/50	60/40	70/30	80/20	50/50	60/40	70/30	80/20
M_L (dN.m)	3.60	3.30	2.70	2.60	7.60	7.20	6.20	5.40
M_H-M_L (dN.m)	17.40	16.90	17.90	17.70	23.50	23.70	25.00	25.60
T_{s1} (min)	5.50	5.50	5.50	5.50	4.00	4.50	4.00	4.50
T_{c90} (min)	11.50	10.00	9.50	9.00	19.00	16.50	14.50	14.00
	Gum-Reactive				Filled-Reactive			
	50/50	60/40	70/30	80/20	50/50	60/40	70/30	80/20
M_L (dN.m)	4.50	4.30	3.50	3.70	8.60	8.60	7.80	7.10
M_H-M_L (dN.m)	17.90	17.90	18.40	18.30	19.60	20.00	20.40	19.20
T_{s1} (min)	2.00	2.00	2.00	1.50	3.50	3.50	4.00	3.50
T_{c90} (min)	10.00	9.00	8.50	7.00	21.50	18.00	16.50	16.00

จากตารางที่ 6 จะเห็นว่าค่าทอร์กต่ำสุดและเวลาวัลคาไนซ์ลดลงเมื่อมีสัดส่วนของยางธรรมชาติมากขึ้นทั้งในยางเบลนด์แบบปกติและรีแอกทีฟ ค่า scorch time ของยางเบลนด์ที่สัดส่วนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟจะมี scorch time สั้นกว่ายางเบลนด์แบบปกติเนื่องจากผลของขั้นตอนการ preheat ยางคอมปาวด์อีพีดีเอ็มดังที่กล่าวมาข้างต้น ผลของซิลิกาทำให้ยางมีความหนืดและความแข็งมากขึ้นดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าทอร์กต่ำสุดและค่าการ

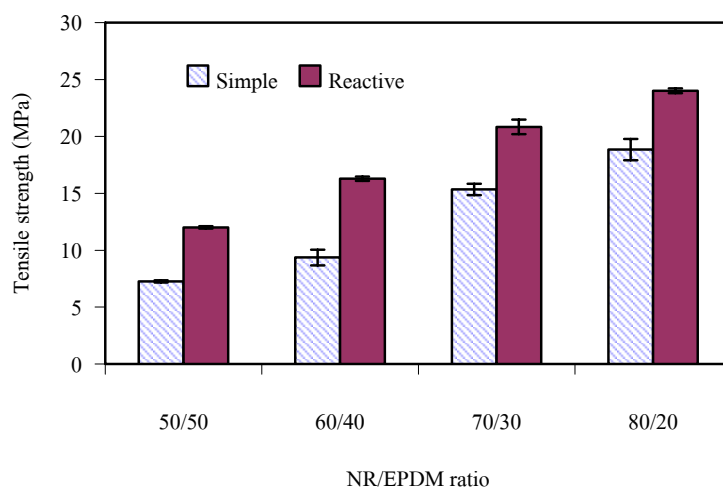
เพิ่มขึ้นของแรงบิดตามลำดับ นอกจากนี้ซิลิกามีผลให้ยางมีอัตราการวัลคาไนซ์ช้าลงเนื่องจากสภาพความเป็นกรดของซิลิกา ทำให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์

ตารางที่ 7 สมบัติการดึงของยางเบลนด์ที่สัดส่วนเบลนด์ NR/EPDM ต่างๆ

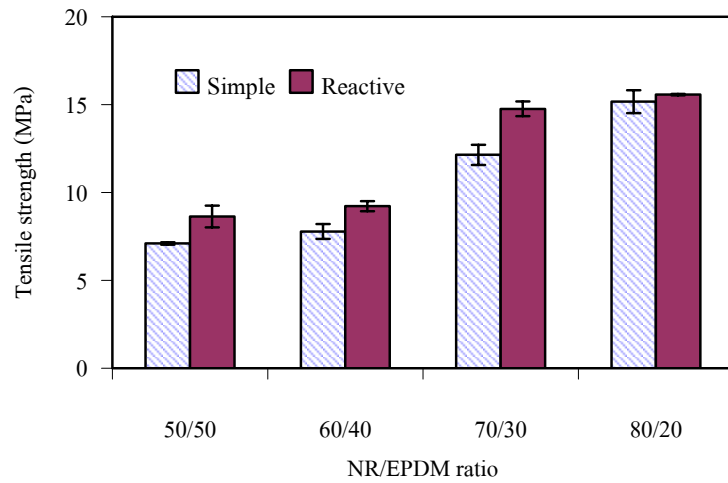
Property	Gum-Simple				Filled-Simple			
	50/50	60/40	70/30	80/20	50/50	60/40	70/30	80/20
100% Mod. (MPa)	0.94±0.02	0.93±0.04	0.93±0.05	0.87±0.02	2.21±0.09	2.02±0.04	2.00±0.03	1.86±0.02
T.S. (MPa)	7.26±0.10	9.36±0.69	15.34±0.50	18.84±0.93	7.10±0.07	7.78±0.42	12.14±0.57	15.17±0.65
E.B. (%)	608±12	611±20	628±23	680±5	371±6	399±9	533±16	540±13
	Gum-Reactive				Filled-Reactive			
	50/50	60/40	70/30	80/20	50/50	60/40	70/30	80/20
100% Mod. (MPa)	0.98±0.02	0.96±0.03	0.92±0.04	0.89±0.02	1.84±0.01	1.60±0.14	1.56±0.11	1.38±0.08
T.S. (MPa)	12.00±0.11	16.29±0.19	20.84±0.64	24.01±0.21	8.64±0.62	9.22±0.28	14.76±0.42	15.57±0.04
E.B. (%)	635±23	682±8	725±28	703±19	481±5	526±32	532±25	590±10

หมายเหตุ T.S. = Tensile strength E.B. = Elongation at break

ค่าโมดูลัสของยางเบลนด์มีแนวโน้มลดลงในขณะที่ยางสามารถยืดออกได้มากขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของยางธรรมชาติมากขึ้นดังแสดงในตารางที่ 7 เนื่องจากยางอีพียีเอ็มเป็นส่วนที่ยืดหยุ่นได้น้อยกว่ายางธรรมชาติ ส่วนความทนทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์จะเพิ่มตามสัดส่วนของยางธรรมชาติที่มีความแข็งแรงสูงกว่า โดยยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟที่มีความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางเบลนด์แบบปกติอย่างชัดเจนทั้งกรณีที่ใช้และไม่ใช้ซิลิกาดังรูปที่ 9 และ 10 และสมบัติความแข็งแรงของยางเบลนด์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อยางเบลนด์มีสัดส่วนของยางอีพียีเอ็มมากกว่า 30 ส่วน ดังจะเห็นได้ว่าที่สัดส่วน NR/EPDM 50/50 และ 60/40 ยางเบลนด์มีความทนทานต่อแรงดึงค่อนข้างต่ำ

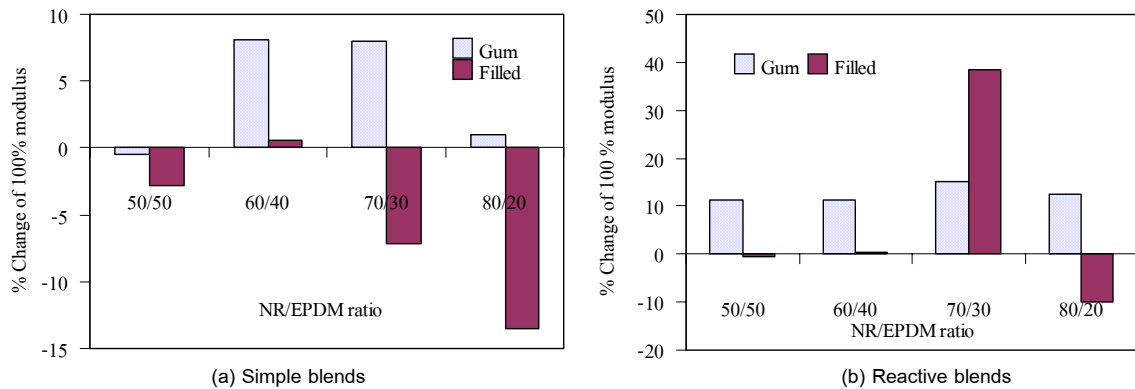


รูปที่ 9 ความทนทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์แบบปกติและรีแอกทีฟที่สัดส่วน NR/EPDM ต่างๆ กรณีไม่ใช้ซิลิกา



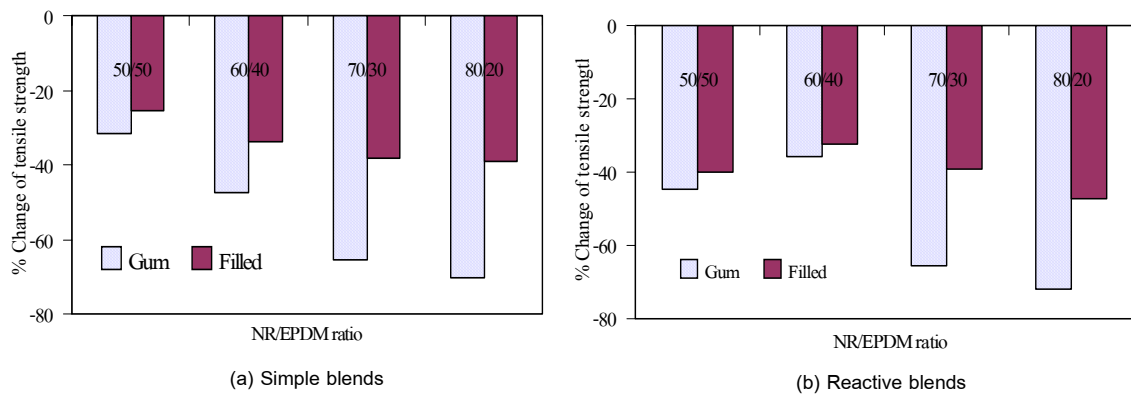
รูปที่ 10 ความทนทานต่อแรงดึงของยางเบลนด์แบบปกติและรีแอกทีฟที่สัดส่วน NR/EPDM ต่างๆ กรณีใส่ซิลิกา 40 phr

เมื่อนำยางเบลนด์ที่สัดส่วนเบลนด์ต่างๆ ไปบ่มแรงดันที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง และทดสอบสมบัติการดึงหลังบ่มแรง เพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 11-12



รูปที่ 11 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่า 100% โมดูลัส ที่สัดส่วน NR/EPDM ต่างๆ ทั้งที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา

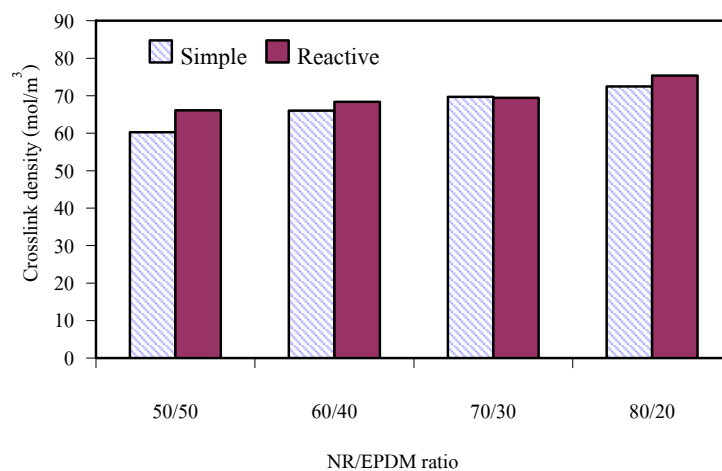
หลังจากการบ่มแรงดันที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง พบว่า ค่ามอดูลัสมีการเปลี่ยนแปลงไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยยางที่ไม่ใส่สารตัวเติมซิลิกามีค่ามอดูลัสหลังการบ่มแรงเพิ่มขึ้น แต่กรณีที่ใช้ซิลิกาพบว่ายางส่วนใหญ่มีค่ามอดูลัสลดลง



รูปที่ 12 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าความทนทานต่อแรงดึง ที่สัดส่วน NR/EPDM ต่างๆ ทั้งที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา

ยางเบลนด์มีความต้านทานต่อการบ่มเร่งลดลงตามสัดส่วนยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติทนความร้อนได้น้อยกว่ายางอีพดีเอ็ม และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรณีใส่และไม่ใส่ซิลิกา พบว่า ยางที่ใส่ซิลิกามีความทนทานต่อการบ่มเร่งได้ดีกว่าในยางที่ไม่ใส่ซิลิกา

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงด้วยวิธีวัดการบวมพองจนสมดุลในโทลูอินของยางที่ไม่ใส่ซิลิกาพบว่ายางเบลนด์มีพันธะเชื่อมโยงมากขึ้นเมื่อมีสัดส่วนของยางธรรมชาติมากขึ้น ดังรูปที่ 13

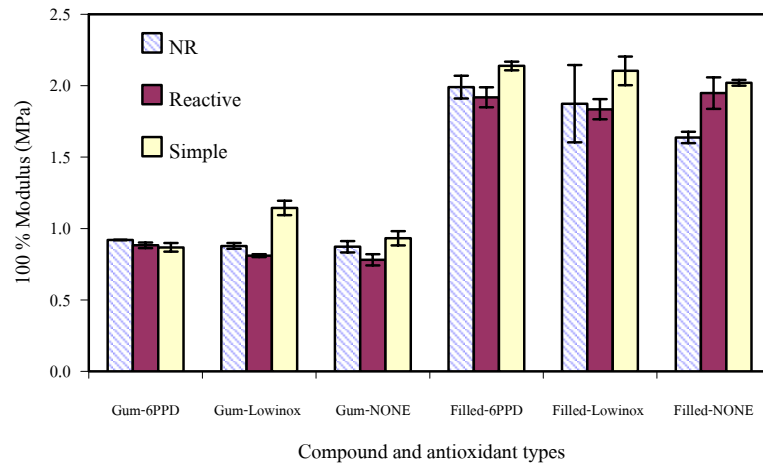


รูปที่ 13 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟ ที่สัดส่วน NR/EPDM ต่างๆ กรณีไม่ใส่สารตัวเติมซิลิกา

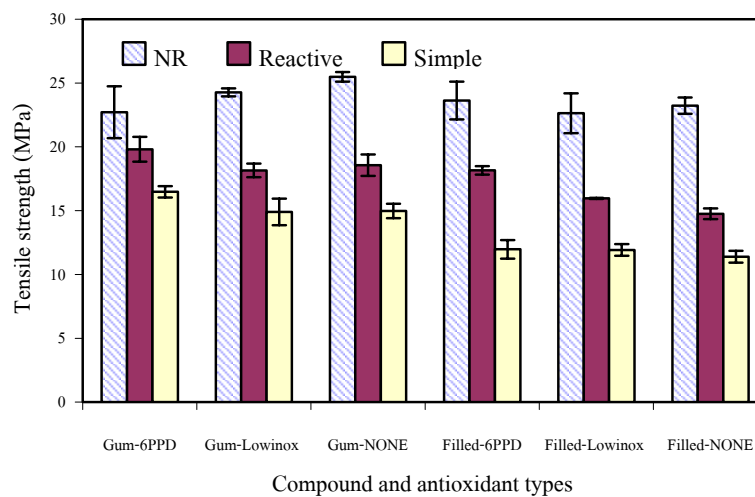
จากผลการทดสอบสมบัติการดึงก่อนและหลังบ่มเร่ง จะเห็นว่าการใช้สัดส่วน NR/EPDM 70/30 นั้นยางเบลนด์ยังคงรักษาสมบัติเชิงกลไว้ได้ดี แต่ยางเบลนด์ที่ไม่ใส่สารด้านการเชื่อมมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติค่อนข้างมาก การใช้สัดส่วน 60/40 ทำให้สมบัติความต้านทานต่อการบ่มเร่งดีขึ้น แต่ยางมีสมบัติเชิงกลด้อยอย่างชัดเจน ในการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกศึกษายางเบลนด์ที่สัดส่วน 70/30 เปรียบเทียบกรณีที่ใช้และไม่ใช้สารด้านการเชื่อม

5.4 สมบัติการบ่มเร่ง ความทนทานต่อสิ่งแวดล้อมและโอโซนของยางเบลนด์ NR/EPDM ที่สัดส่วนการเบลนด์ 70/30 เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติล้วนที่ใส่และไม่ใส่สารแอนติออกซิแดนท์

จากผลการทดลองข้อ 5.2 พบว่า Lowinox CPL ให้สมบัติความทนทานต่อการบ่มเร่งดีใกล้เคียงกับการใช้ 6PPD โดย Lowinox CPL ให้สีของยางเหมือนกับยางที่ไม่ใส่สารด้านการเสื่อมใดๆ ในขณะที่การใช้ 6PPD ทำให้เกิดการดกสีอย่างรุนแรงและยางที่ได้มีสีเกือบดำ ผลการเปรียบเทียบสมบัติของยางธรรมชาติล้วนกับยางเบลนด์ ซึ่งมีทั้งที่ไม่ใส่สารด้านการเสื่อมและใส่ Lowinox CPL และ 6PPD ปริมาณ 2 phr เป็นดังนี้

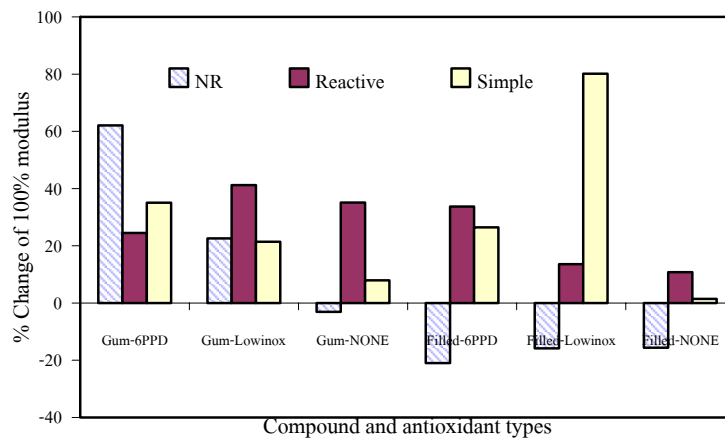


รูปที่ 14 100 % Modulus ของยาง NR กับยางเบลนด์ NR/EPDM (70/30) แบบปกติและรีแอกทีฟ ที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา

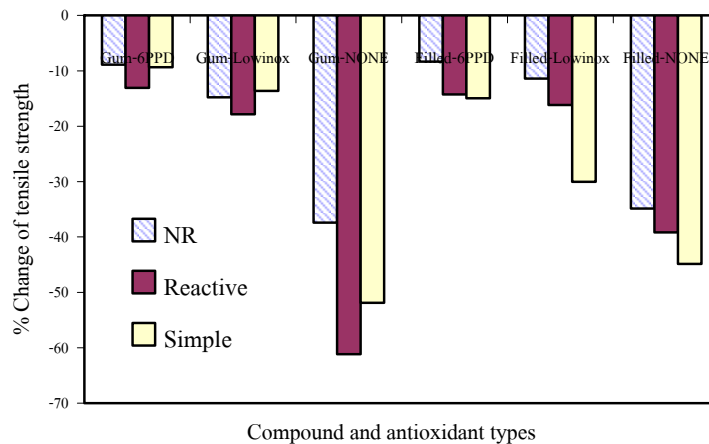


รูปที่ 15 ความทนทานต่อแรงดึงของยาง NR กับยางเบลนด์ NR/EPDM (70/30) แบบปกติและรีแอกทีฟ ที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา

โมดูลัสและความทนทานต่อแรงดึงของยางที่ใช้แอนติออกซิแดนท์ชนิด 6PPD และ Lowinox CPL มีค่าใกล้เคียงกับยางที่ไม่ใส่สารด้านการเสื่อม โดยการใส่ซิลิกาทำให้โมดูลัสเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนแต่มีผลให้ความทนทานต่อแรงดึงลดลงเล็กน้อย



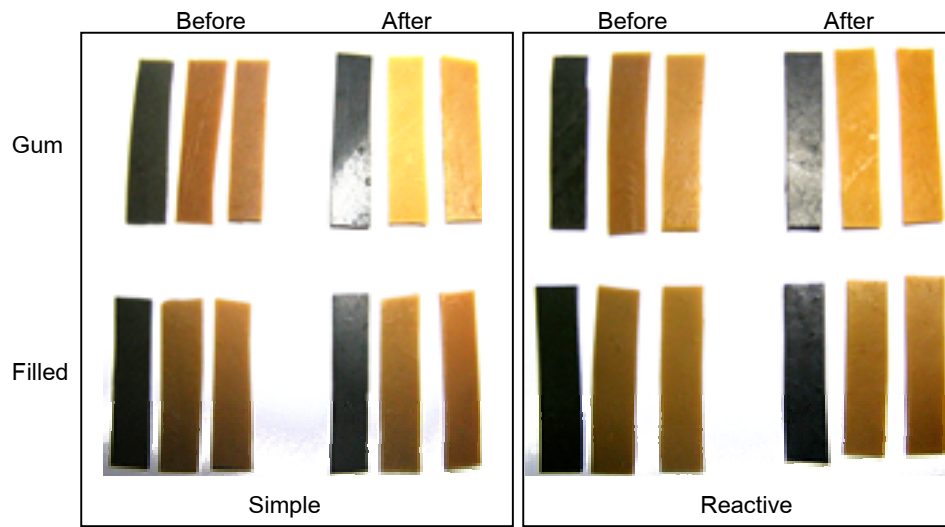
รูปที่ 16 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของ 100 % Modulus ของยาง NR และยางเบลนด์ NR/EPDM (70/30) แบบปกติ และรีแอกทีฟที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง



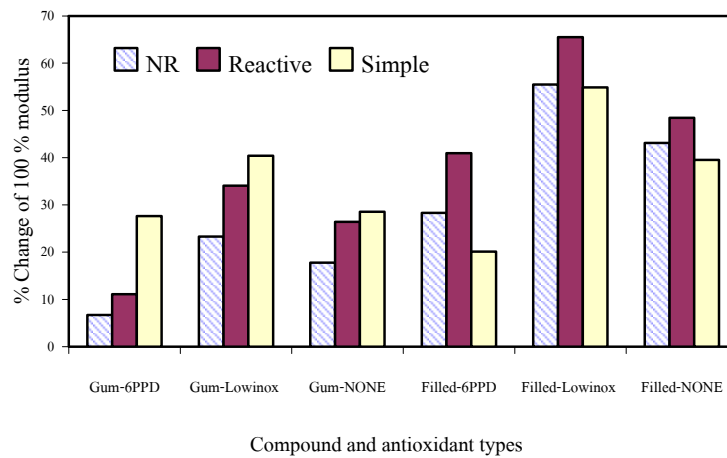
รูปที่ 17 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของความทนทานต่อแรงดึงของยาง NR และยางเบลนด์ NR/EPDM (70/30) แบบปกติ และรีแอกทีฟที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา หลังการบ่มแรงที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง

จากรูปที่ 17 จะเห็นว่ายางเบลนด์ที่ใส่สารแอนติออกซิแดนท์ยังสามารถรักษาสมบัติหลังการบ่มแรงไว้ได้ดี โดยใช้ Lowinox CPL ซึ่งไม่ตกสี ให้ผลที่ดีเช่นเดียวกับการใช้ 6PPD ในขณะที่ยางที่ไม่ใส่สารต้านการเสื่อมใดๆมีการลดลงของสมบัติมากที่สุด

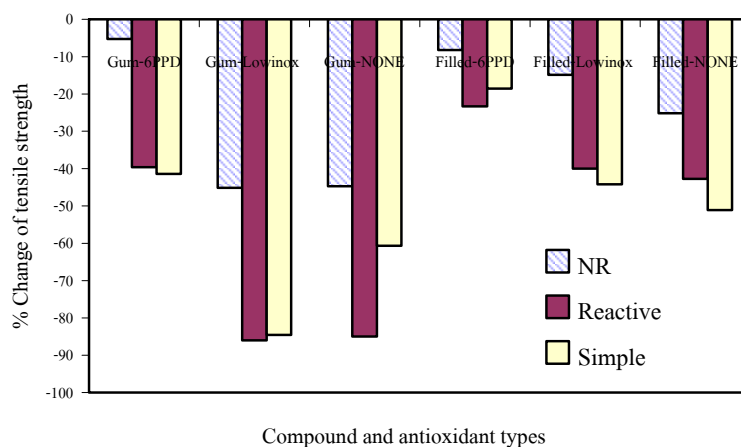
เมื่อนำยางไปแขวนทิ้งไว้ในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคารในบริเวณที่ไม่มีร่มเงาใดๆเป็นระยะเวลา 1 เดือน (ระหว่างวันที่ 6 มีนาคม ถึง 5 เมษายน พ.ศ. 2551) ยางมีลักษณะทางกายภาพดังรูปที่ 18 และมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติดังรูปที่ 19-20



รูปที่ 18 สีของยางเบลดแบบปกติและรีแอกทีฟ ทั้งที่ใส่และไม่ใส่ซีลีกา เมื่อใส่ 6PPD, Lowinox CPL และไม่ใส่ตามลำดับ



รูปที่ 19 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของ 100 % Modulus ของยาง NR และยางเบลด NR/EPDM (70/30) แบบปกติ และรีแอกทีฟที่ใส่และไม่ใส่ซีลีกา หลังจากแขวนยางทิ้งไว้ในสภาวะแวดล้อมนอกอาคารนาน 1 เดือน



รูปที่ 20 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของความทนทานต่อแรงดึงของยาง NR และยางเบลนด์ NR/EPDM (70/30) แบบปกติ และรีแอกทีฟที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา หลังจากแขวนยางทิ้งไว้ในสภาวะแวดล้อมนอกอาคารนาน 1 เดือน

ผลการทดลองที่ได้ทั้งหลังการบ่มแรงและหลังจากแขวนยางทิ้งไว้ในสภาวะแวดล้อมนอกอาคารสอดคล้องกันคือยางเบลนด์แสดงเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของสมบัติมากกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งแตกต่างจากที่คาดการณ์ไว้ ทั้งที่เป็นยางเบลนด์ที่มียางอีพีดีเอ็มซึ่งมีความทนทานต่อความร้อนและออกซิเดชันเป็นองค์ประกอบ การที่ยางเบลนด์เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติมากกว่ายางธรรมชาติที่เป็นองค์ประกอบเดียว อาจสะท้อนถึงความแตกต่างกันของระดับการวัลคาไนซ์ในยางทั้งสองเฟส และอาจมีผลมาจากโครงสร้างของพันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น การที่ยางเบลนด์มีพันธะคู่ที่น้อยลงในขณะที่สารวัลคาไนซ์มีปริมาณเท่าเดิม และยังชอบเฟสของยางธรรมชาติมากกว่า อาจมีผลให้เกิด Polysulfidic crosslink ที่มีจำนวนอะตอมของกำมะถันระหว่างจุดเชื่อมโยงมากขึ้นในเฟสยางธรรมชาติซึ่งกลายเป็นจุดที่ไม่เสถียร เพราะ Polysulfidic crosslink นี้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เมื่อได้รับความร้อนต่อเนื่องไป

อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้สารตัวเติมซิลิกาจะช่วยให้ยางสามารถรักษาสมบัติหลังการบ่มแรงในสภาวะร้อนและสภาพแวดล้อมจริงได้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคซิลิกาทำให้ยางสามารถทนความร้อนได้มากขึ้น

ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนที่ความเข้มข้น 50 ppm อุณหภูมิ 40 °C เมื่อยืดออกค้างไว้ที่ 20 % เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ของยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับยางเบลนด์แบบปกติและรีแอกทีฟ ทั้งที่ใส่และไม่ใส่ซิลิกา พบว่า ยางที่ใส่ซิลิกามีความต้านทานต่อโอโซนดีกว่ายางที่ไม่ใส่ เนื่องจากอนุภาคของซิลิกาจะเข้าไปขัดขวางรอยแตกไม่ให้ขยายตัวออกไป และยางที่มีการใช้สารแอนติออกซิแดนท์ชนิด 6PPD มีความต้านทานต่อโอโซนดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติด้านความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและการบ่มแรง นอกจากนี้ยังพบว่า ยางเบลนด์ NR/EPDM มีความทนทานต่อโอโซนสูงกว่ายางธรรมชาติ เนื่องจากในยางธรรมชาติเมื่อถูกทำให้ยืดออก โอโซนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับยางที่ตำแหน่งพันธะคู่ ทำให้เกิดสารโอโซนไนด์ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ยืดหยุ่น เป็นผลให้ยางเกิดรอยแตกที่ผิวขึ้น แล้วเกิดเป็นผิวยางใหม่ที่สามารถทำปฏิกิริยากับโอโซนต่อไปได้อีก ยางจึงมีการขยายตัวของรอยแตกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่สำหรับในยางเบลนด์นั้น เมื่อเกิดรอยแตกเล็กๆ ขึ้นแล้วเฟสของยางอีพีดีเอ็มที่มีปริมาณพันธะคู่อย่างต่ำที่มีกระจายอยู่ทั่วไปในเฟสของยางธรรมชาติ เข้าไปขัดขวางรอยแตกเล็กๆ นั้นไม่ให้ขยายตัวออกไป เช่นเดียวกับกรณียางที่ใส่ซิลิกา นอกจากนี้ยางเบลนด์แบบปกติมีความทนทานต่อโอโซนดีกว่ายางเบลนด์แบบรีแอกทีฟเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติด้านความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและการบ่มแรง

ตารางที่ 8 ความต้านทานต่อโอโซนของยางธรรมชาติ ยางเบลนด์แบบปกติและแบบรีแอกทีฟ

ชนิดยาง	ชนิดคอมปาวด์	ชนิดแอนติออกซิแดนท์	ลักษณะของรอยแตก
ยางธรรมชาติ	ไม่ใส่สารตัวเติม	6PPD	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มม.
		Lowinox CPL	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มม.
		NONE	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตก 1-3 มม.
	ใส่สารตัวเติม	6PPD	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มม.
		Lowinox CPL	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตก 1-3 มม.
		NONE	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตก 1-3 มม.
ยางเบลนด์ แบบปกติ	ไม่ใส่สารตัวเติม	6PPD	ไม่ปรากฏรอยแตก
		Lowinox CPL	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตก 1-3 มม.
		NONE	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตก 1-3 มม.
	ใส่สารตัวเติม	6PPD	ไม่ปรากฏรอยแตก
		Lowinox CPL	ไม่ปรากฏรอยแตก
		NONE	ไม่ปรากฏรอยแตก
ยางเบลนด์ แบบรีแอกทีฟ	ไม่ใส่สารตัวเติม	6PPD	ไม่ปรากฏรอยแตก
		Lowinox CPL	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มม.
		NONE	เกิดรอยแตกจำนวนนับไม่ถ้วน ความยาวรอยแตกมากกว่า 3 มม.
	ใส่สารตัวเติม	6PPD	ไม่ปรากฏรอยแตก
		Lowinox CPL	ไม่ปรากฏรอยแตก
		NONE	ไม่ปรากฏรอยแตก

จากตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่าการใช้ยางเบลนด์ที่ใส่ซิลิกาโดยไม่ใส่สารด้านการเสื่อมใดๆทำให้ยางไม่เกิดการแตกเนื่องจากโอโซนเลย ในขณะที่การใช้ยางธรรมชาติล้วนนั้นเกิดรอยแตกแม้ว่าจะใส่ 6PPD แล้วก็ตาม โดยยางเบลนด์ที่ไม่ใส่สารตัวเติมมีสมบัติความทนทานต่อโอโซนต่ำกว่า

6. สรุปผล

การเตรียมยางเบลนด์ NR/EPDM แบบรีแอกทีฟทั้งที่สัดส่วนเบลนด์ 70/30 และ 50/50 ให้ยางที่มีสมบัติความทนทานต่อแรงดึง ความสามารถในการยืด และความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงกว่ายางเบลนด์แบบปกติ โดยเวลาที่เหมาะสมในการ preheat ยางคอมปาวด์อีพียูเอ็มเพื่อเตรียมยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟ คือ $T_{91}-1.0$ นาที และยางเบลนด์ที่ไม่ใส่ซิลิกาจะเห็นการเพิ่มขึ้นของสมบัติมากกว่ายางที่ใส่ซิลิกา การเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีผลให้เวลาที่ยางสามารถแปรรูปได้ลดลง ยางเบลนด์วัลคาไนซ์ที่มีสัดส่วน NR/EPDM เท่ากับ 70/30 มีค่าโมดูลัส ความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดสูงกว่าแต่มีความต้านทานต่อการบ่มเร่งน้อยกว่ายางที่มีสัดส่วนเบลนด์ 50/50 โดยการใส่ซิลิกาลงไปทำให้ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นแต่ความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดลดลงในขณะที่ยางเบลนด์มีความต้านทานต่อการบ่มเร่งสูงขึ้น ผลการวิเคราะห์ SEM micrographs ของยางเบลนด์ที่ไม่ใส่ซิลิกาพบว่ายางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีขนาดของเฟสเล็กและมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่ายางเบลนด์แบบปกติสอดคล้องกับสมบัติความทนทานต่อแรงดึงที่ได้ การใช้แอนติออกซิแดนท์ชนิด 6PPD และ TMQ ทำให้ยางมีค่า scorch time และ cure time สั้นกว่าการใช้ Lowinox CPL และ BHT แต่ไม่มีผลต่อสมบัติการดึงที่ชัดเจน หลังการบ่มเร่งพบว่าค่าโมดูลัสของยางเบลนด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแต่ความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดลดลง ซึ่งสารแอนติออกซิแดนท์ชนิดตกสีที่ให้ผลดีที่สุด คือ 6PPD และสารชนิดไม่ตกสีที่ให้ผลดีที่สุด คือ Lowinox CPL การเพิ่มสัดส่วนของยางธรรมชาติในยางเบลนด์ทำให้ค่าโมดูลัสลดลงในขณะที่ความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของยางเบลนด์เพิ่มขึ้น และการใส่ซิลิกามีผลให้ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นมากแต่ทำให้ยางมีความทนทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดลดลงโดยที่ยางเบลนด์แบบรีแอกทีฟมีความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางเบลนด์แบบปกติ การเพิ่มสัดส่วนของยางธรรมชาติทำให้ยางเบลนด์มีความทนทานต่อการบ่มเร่งลดลงและยางที่ใส่ซิลิกามีความทนทานต่อการบ่มเร่งดีกว่ายางที่ไม่ใส่ การใช้ 6PPD และ Lowinox CPL ในสูตรจะให้ยางเบลนด์ที่มีความทนทานต่อการบ่มเร่งใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยางที่ไม่ใส่สารต้านการเสื่อมใดๆมีการลดลงของสมบัติความทนทานต่อแรงดึงอย่างชัดเจน ผลการทดสอบความต้านทานต่อโอโซนพบว่ายางเบลนด์ที่ใส่ซิลิกามีความต้านทานต่อโอโซนดีกว่ายางที่ไม่ใส่และดีกว่ายางธรรมชาติที่ใส่ 6PPD นอกจากนี้ยางเบลนด์แบบปกติมีความทนทานต่อโอโซนดีกว่ายางเบลนด์แบบรีแอกทีฟเพียงเล็กน้อย

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าเราสามารถเตรียมยางเบลนด์ที่มียางธรรมชาติเป็นองค์ประกอบหลักให้มีสมบัติเชิงกลดีและต้านทานต่อการเสื่อมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีสนได้ โดยการใช้ยางอีพียูเอ็ม 30 phr ร่วมกับซิลิกา 40 phr ทำให้ยางทนทานต่อการแตกเนื่องจากโอโซนได้ดีมาก แต่เพื่อปรับปรุงให้ยางเบลนด์ที่ได้มีความทนทานต่ออากาศร้อนและสภาพแวดล้อมมากขึ้นควรใส่สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่ตกสี เช่น Lowinox CPL ร่วมด้วย โดยไม่จำเป็นต้องมีสารแอนติโอโซนแซนซ์ สูตรของยางเบลนด์ที่ให้สมบัติโดยรวมดีที่สุด แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 สูตร เทคนิคการผสม และสมบัติของยางเบลนด์ที่ได้

สารเคมี	ปริมาณ (phr)
NR (ADS)	70.0
EPDM (Keltan 512)	30.0
ZnO	4.0
Stearic acid	2.0
Silica (Ultrasil VN3)	40.0
Silane (Si-69)	3.6
Parafinic oil	4.0
Lowinox CPL	2.0
TBBS	0.95
Sulfur	2.5
เทคนิคการผสม	
รีแอกทีฟเบลนด์ (reactive blend) ใช้เวลาการให้ความร้อนกับยางคอมปาวด์อีพดีเอ็มที่ประกอบด้วยสารวัลคาไนซ์ทั้งหมด เท่ากับ $T_{s1}-1.0$ นาทีที่อุณหภูมิ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ก่อนเบลนด์กับยางธรรมชาติ	
สมบัติของยางคอมปาวด์	
M_L (dN.m)	4.70
M_H-M_L (dN.m)	25.40
Scorch time, T_{s1} (min)	4.0
Cure time, T_{c90} (min)	18.5
สมบัติของยางหลังวัลคาไนซ์ที่ 90% cure time ที่ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$	
100% Modulus (MPa)	1.84 ± 0.07
300% Modulus (MPa)	6.03 ± 0.25
Tensile strength (MPa)	15.96 ± 0.04
Elongation at break (%)	563 ± 11
%change of 100%modulus (Aged at $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 22 hours)	+13.6
%change of T.S. (Aged at $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 22 hours)	-16.2
%change of E.B. (Aged at $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 22 hours)	-15.3
%change of T.S. (Outdoor exposure, 1 month)	-40.0
%change of E.B. (Outdoor exposure, 1 month)	-28.0
Ozone resistance (50pphm, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 20%strain, 96 hours)	No cracks

7. ข้อเสนอแนะ

การใช้ยางอีพดีเอ็มร่วมกับยางธรรมชาติในระดับที่ไม่น้อยกว่า 30 phr และสารตัวเติมซิลิกาโดยไม่ใช้สารด้านการเสื่อมให้ยางที่มีลักษณะทางกายภาพสวยงามและมีความทนทานต่อการแตกเนื่องจากโอโซนได้ดี จึงสามารถที่จะนำไปขึ้นรูปทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ต้องการสีสนได้ แต่พบว่ายางเบลนด์ที่ได้ยังมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยอากาศร้อนและสภาวะที่มีแดดจัดค่อนข้างมากจึงควรมีการปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น ในกรณีที่เราต้องการสมบัติเชิงกลสูงการใช้เทคนิคการเบลนด์แบบรีเอกทีฟสามารถให้ยางที่มีสมบัติดีกว่าการเบลนด์แบบปกติ

8. เอกสารอ้างอิง

- Baranwal K. C. and Son P. N. 1974. Co-curing of EPDM and diene rubbers by grafting accelerators onto EPDM. Rubber Chem. Technol., 47: 88-99.
- Chang Y. W., Shin Y. S., Chun H. and Nah C. 1999. Effects of trans-polyoctylene rubber (TOR) on the properties of NR/EPDM blends. J. Appl. Polym. Sci., 73: 749-756.
- Chapman A. V. and Tinker A.J. 2003. Vulcanization of blends-crosslink distribution and its effect on properties. KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, 56 (10): 533-544.
- Coran A. Y. 1988. Blends of dissimilar polymers-cure rate incompatibility. Rubber Chem. Technol., 61: 281-292.
- Cook S. 1998. Chapter 14-Solutions to the basic problems of poor physical properties of NR/EPDM blends in Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Speciality Polymers, Edited by Tinker A. J. and Jones K.P. Chapman and Hall, London. 169-183.
- Doyle M. J. 1996. A mechanism of ozone crack initiation in blends of natural rubber with saturated hydrocarbon elastomers, International Tire Exhibition and Conference, 1996; September 10-12: Akron, Ohio.
- El-Sabbagh S. H. 2003. Compatibility study of natural rubber and ethylene-propylene-diene rubber blends. J. Appl. Polym. Sci., 90: 1-11.
- Ghosh A. K., Debnath S. C., Naskar N. and Basu D. K. 2001. NR-EPDM covulcanization: a novel approach. J. Appl. Polym. Sci., 81: 800-808.
- Ghosh A. K. and Basu D. K. 2002. Natural rubber-Ethylene-propylene-diene rubber covulcanization: effect of reinforcing fillers. J. Appl. Polym. Sci., 84: 1001-1010.
- Ghosh A. K., Das A. and Basu D. K. 2004. Effect of bis(diisopropyl)thiophosphoryl disulfide on the covulcanization of styrene-butadiene rubber and ethylene-propylene-diene (monomer) blends. J. Appl. Polym. Sci., 92: 1231-1242.
- Guillaumond F.X. 1976. The influence of the solubility of accelerators on the vulcanization of elastomer blends. Rubber Chem. Technol., 49: 105-111.
- Hopper R. J. 1976. Improved cocure of EPDM-polydiene blends by conversion of EPDM into macromolecular cure retarder. Rubber Chem. Technol., 49: 341-352.
- Hopper R. J. 1976. Chlorothio-sulfonamide-modified rubbery terpolymers and their blends. U.S. Pat 3,970,133 (to Goodyear Tire & Rubber Co.).

- Hopper R. J. 1989. Modification of rubber with N-chlorothio-sulfonamide. U.S. Pat 4,820,780 (to Goodyear Tire & Rubber Co.).
- Hopper R. J. 1998. Process for preparation of N-halothiosulfonamide modified terpolymers. U.S. Pat 5,756,590 (to Goodyear Tire & Rubber Co.).
- Ignatz-Hoover F., To B. H., Datta R. N., de Hoog A. J. Huntink N. M. and Talma A. G. 2003. Chemical additives migration in rubber. *Rubber Chem. Technol.*, 76: 747-767.
- Layser R.W. and Lattimer R.P. 1990. Protection of rubber against azone. *Rubber Chem. Technol.*, 63: 426-450.
- Lewis C., Bunyung S. and Kiatkamjornwong S. 2003. Rheological properties and compatibility of NR/EPDM and NR/Brominated EPDM blends. *J. Appl. Polym. Sci.*, 89: 837-847.
- Sandstrom P. H. and Lal J. 1977. Tire with sidewall composition. U.S. Pat 4,003,420 (to Goodyear Tire & Rubber Co.).
- Sahakaro K., Naskar N., Datta R. N. and Noordermeer, J. W. M. 2007. Blending of NR/BR/EPDM by reactive processing for tire sidewall applications. I. Preparation, cure characteristics and mechanical properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, 103 (4): 2538-2546.
- Sahakaro K., Talma A. G., Datta R. N. and Noordermeer J. W.M. 2007. Blending of NR/BR/EPDM by reactive processing for tire sidewall applications.II. Characterization, *J. Appl. Polym. Sci.*, 103 (4): 2547-2554.
- Sahakaro K., Datta R. N., Baaij J. and Noordermeer J. W. M. 2007. Blending of NR/BR/EPDM by reactive processing for tire sidewall applications. III. Assessment of the blend ozone- and fatigue-resistance in comparison with a conventional NR/BR compound, *J. Appl. Polym. Sci.* 03 (4): 2555-2563.
- Suma N., Joseph R. and George K. E. 1993. Improved mechanical properties of NR/EPDM and NR/butyl blends by precuring EPDM and butyl. *J. Appl. Polym. Sci.*, 49: 549-557.
- van de Ven P. M. and Noordermeer J. W. M. 2000. Design of EPDM for blends with NR/BR for tire sidewalls: influence of molecular structure and carbon black distribution on properties. *Rubber World*, 222 (6): 55-60.
- van Duin M., Krans J.C.J. and Smedinga J. 1993. Covulcanization and ozone resistance of NR/EPDM blends. *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 46 (6): 445-451.
- Waddell W.H. 1998. Tire black sidewall surface discoloration and non-staining technology: a review. *Rubber Chem. Technol.*, 71: 590-618.