ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (NR/EPDM blends)

ชญาภา นิ่มสุวรรณ

บทนำ

การพัฒนาเทคโนโลยียางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (natural rubber; NR) กับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (ethylene propylene diene monomer; EPDM) ได้มีมานานหลายทศวรรษแล้ว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรวมสมบัติเด่นทางด้านสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติกับความต้านทานโอโซนของยาง EPDM เข้าด้วยกัน อย่างไรก็ตามแม้ว่ายางผสมจะมีความต้านทานโอโซนดีขึ้น แต่สมบัติเชิงกลของยางผสมก็มักมีค่าต่ำกว่าที่คาดไว้ ทั้งนี้เพราะยางธรรมชาติและยาง EPDM มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันแตกต่างกันค่อนข้างมาก (เพราะยางธรรมชาติมีปริมาณพันธะคู่สูงมากในขณะที่ยาง EPDM มีปริมาณพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาน้อย) ประกอบกับปัญหาการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอกันของสารวัลคาไนซ์ในยางแต่ละวัฏภาค (สารวัลคาไนซ์ส่วนใหญ่สามารถละลายและกระจายตัวในยางธรรมชาติได้ดีกว่ายาง EPDM) จึงมักส่งผลทำให้วัฏภาคของยางธรรมชาติเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วและมีระดับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงในขณะที่วัฏภาคของยาง EPDM จะเกิดการวัลคาไนซ์ได้ช้าและมีระดับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงต่ำ ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องทำให้ยางผสมมีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เรียกปรากฏการณ์ความแตกต่างของระดับการวัลคาไนซ์จนส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลด้อยลงนี้ว่า **“ความไม่เข้ากันของการวัลคาไนซ์ (cure incompatibility)”**

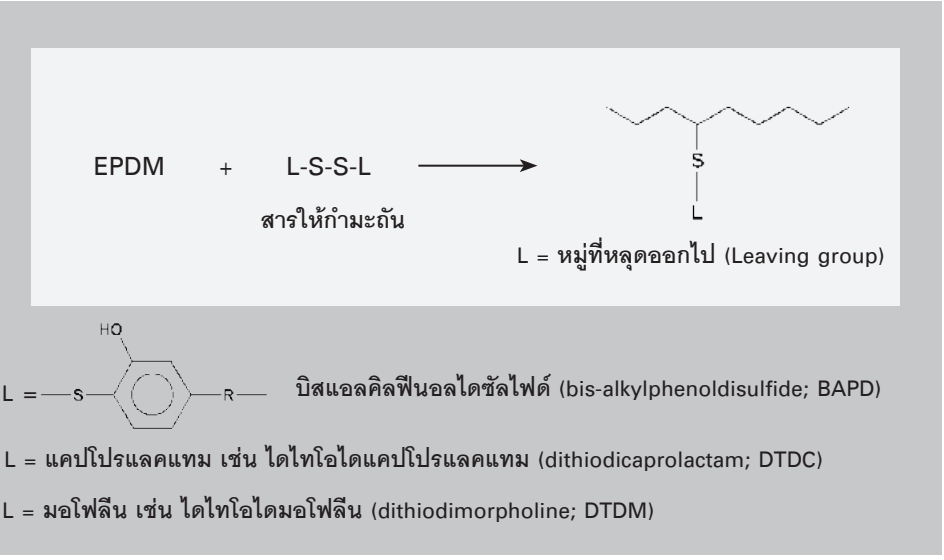
การปรับปรุงสมบัติของยางผสม NR/EPDM

หลักการทั่วไปที่นิยมใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางผสม NR/EPDM คือ การเพิ่มอัตราเร็วและระดับการวัลคาไนซ์ของยาง EPDM ให้สูงขึ้นเพื่อลดปัญหาความไม่เข้ากันของการวัลคาไนซ์ข้างต้น ปัจจุบันได้มีการนำเสนอวิธีการต่างๆ มากมายไม่ว่าจะเป็นการเลือกใช้ยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณของพันธะคู่ (ไดอีน) สูงๆ มาผสมกับยางธรรมชาติ เพราะยางเกรดที่มีปริมาณพันธะคู่สูงจะเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วและมีระดับการวัลคาไนซ์สูง อย่างไรก็ดียาง EPDM เกรดที่มีปริมาณพันธะคู่สูงๆ ที่ขายกันในเชิงการค้าส่วนใหญ่ก็ยังคงมีปริมาณของไดอีนไม่เกินร้อยละ 13 ด้วยเหตุนี้จึงได้มีความพยายามที่จะดัดแปรโมเลกุลของยาง EPDM ให้มีความว่องไวต่อสารวัลคาไนซ์สูงขึ้นหรือการเลือกใช้สารวัลคาไนซ์ที่มีความว่องไวต่อวัฏภาคของยาง EPDM สูงขึ้น ทั้งนี้ Morrissey [1] ได้รายงานว่าการทำปฏิกิริยาฮาโลจิเนชัน (halogenation) ของยาง EPDM ในสารละลายจะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ในการวัลคาไนซ์ของยางผสมเมื่อนำยาง EPDM ไปผสมกับยางที่มีความไม่อิ่มตัวสูง เช่น ยาง NR และ SBR นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ดัดแปรโมเลกุลของยาง EPDM ด้วยสารเคมีชนิดต่างๆ เช่น มาลิอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) เอนคลอโรไทโอเอไมด์ (N-chlorothioamides) และ ไดไทโอไดมอโฟลีน (dithiodimorpholine; DTDM) ซึ่งเป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มที่สามารถให้กำมะถันกับระบบได้ (sulfur donor accelerator) เพื่อให้มีหมู่ฟังก์ชันที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเกาะอยู่บนโครงสร้างโมเลกุลของยาง EPDM ก่อนที่จะนำยาง EPDM ไปผสมกับยางธรรมชาติ [2-5]

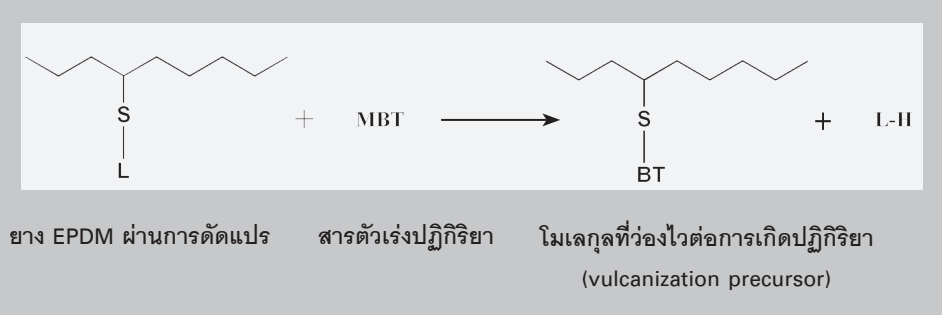
การเลือกใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถละลายได้ดีในวัฏภาคของยาง EPDM ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางผสม [6, 7] ถึงแม้ว่าการเลือกใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีหมู่แทนที่เป็นหมู่แอลคิลมากขึ้น (มีความเป็นขั้วลดลง) จะช่วยให้ยางผสมที่มียาง EPDM เป็นองค์ประกอบมีสมบัติเชิงกลดีขึ้นเพราะสารตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถละลายเข้าไปในวัฏภาคของยาง EPDM ได้มากขึ้น แต่สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีหมู่แทนที่เป็นหมู่แอลคิลสายโซ่ยาวๆ เหล่านี้มีผลิตขายในเชิงการค้าน้อยมาก

Hopper [3] และ Baranwal [4] ศึกษาการดัดแปรโมเลกุลของยาง EPDM (เกรดที่มีความไม่อิ่มตัวสูง; Polysar 585) โดยใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงการค้าที่สามารถให้กำมะถันได้ (sulfur donor accelerator) ปริมาณ 1 phr จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ บิสแอลคิลฟีนอลไดซัลไฟด์ (bis-alkylphenoldisulfide; BAPD) ไดไทโอไดแคปโปรแลคแทม (dithiodicaprolactam; DTDC) และไดไทโอไดมอโฟลีน (dithiodimorpholine; DTDM) ผสมในเครื่องผสมระบบปิด (internal mixer) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิอย่างต่ำ 150°C ตามขั้นตอนการผสมแบบปกติและคงสภาวะนี้ไว้ประมาณ 1-2 นาที เรียกขั้นตอนนี้ว่า “reactive mixing” รูปที่ 1 แสดงกลไกการดัดแปรยาง EPDM โดยเริ่มจากการแตกตัวของสารดัดแปรตรงพันธะ S-S ที่อุณหภูมิสูงเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ที่มีหมู่ฟังก์ชันแอลคิลฟีนอลโมโนซัลไฟด์ (alkylphenol monosulfide) แคปโปรแลคแทม (caprolactam) หรือ มอโฟลิโน (morpholino) เป็นองค์ประกอบขึ้นอยู่กับชนิดของสารดัดแปร ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลยาง EPDM เกิดเป็นกราฟต์โคโพลิเมอร์ เมื่อต้องการหยุดปฏิกิริยาก็สามารถทำได้โดยปล่อยให้อากาศผ่านเข้าไปเพราะออกซิเจนเป็นตัวจับอนุมูลอิสระที่ดีเยี่ยม นำยาง EPDM ที่ผ่านการดัดแปรออกจากเครื่องผสม (อุณหภูมิอาจขึ้นไปสูงถึง 170±5°C ได้ สำหรับการผสมในโรงงาน) แล้ วนำไปวิเคราะห์ ด้ วยเทคนิค gel permeation chromatorgraphy (GPC) ตามด้ วย UV spectroscopy ที่ 240 nm ผลปรากฏว่ ามีหมู่ ที่ว่ องไวต่ อแสง UV เชื่อมติดอยู่ กับโมเลกุลของยาง EPDM จริง

เมื่อนำยาง EPDM ที่ผ่านการดัดแปรแล้วไปผสมกับยางธรรมชาติและวัลคาไนซ์ยางผสม ส่วนของสารที่ให้กำมะถันหรือส่วนที่เป็นหมู่ที่หลุดออกไป (leaving group) บนโมเลกุลของยาง EPDM จะทำปฏิกิริยากับทูเมอแคปโตเบนโซไทอะโซล (2-mercaptobenzothiazole; MBT) ที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาของระบบเกิดเป็นโมเลกุลที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่จะเกิดต่อไปดังแสดงในรูปที่ 2

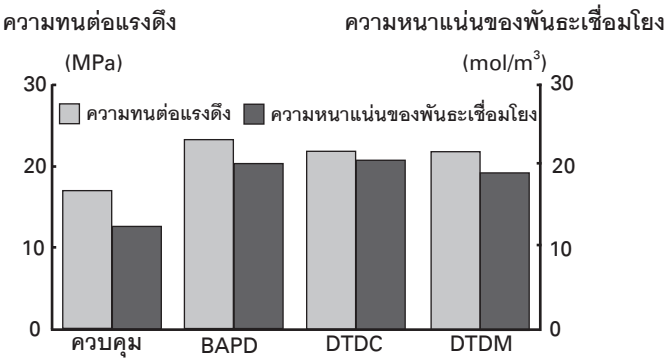


รูปที่ 1 การดัดแปรยาง EPDM

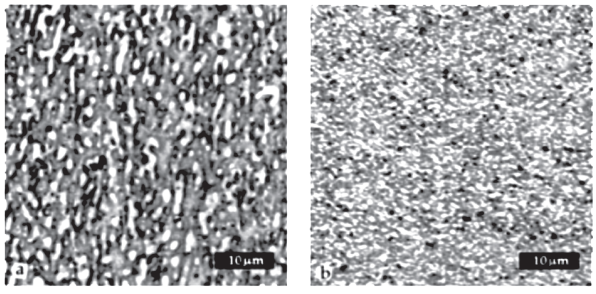


รูปที่ 2 การวัลคาไนซ์ยาง EPDM ที่ดัดแปรแล้ว

จากการศึกษานี้พบว่าการใช้อัตราส่วนยางผสม NR/EPDM = 60:40 จะสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานต่อโอโซนที่ดีทั้งแบบสถิตและแบบพลวัต และเป็นสัดส่วนที่สามารถใช้ยางธรรมชาติได้สูงที่สุดโดยที่ผลิตภัณฑ์ยังคงมีประสิทธิภาพการใช้งานสูง ต้นทุนต่ำ และยังคงรักษาสมบัติความต้านทานโอโซนไว้ได้โดยไม่ต้องเติมสารต้านโอโซน (antiozonant) การทำการผสมแบบเกิดปฏิกิริยา (reactive mixing) จะทำให้ระดับการวัลคาไนซ์ในวัฏภาคของยาง EPDM สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องทำให้ยางมีความทนต่อแรงดึงสูงขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการดัดแปรโมเลกุลยาง EPDM ด้วย BAPD ยังส่งผลทำให้วัฏภาคของยาง EPDM มีขนาดเล็กลงจาก 3 μm เหลือ 1 μm ดังแสดงในรูปที่ 4 และในกรณีที่ยางผสมนั้นเสริมแรงด้วยเขม่าดำ การดัดแปรโมเลกุลยาง EPDM ด้วย DTDM จะช่วยให้อันตรกิริยาของวัฏภาคยาง EPDM กับเขม่าดำยึดติดกันได้ดีมากขึ้น



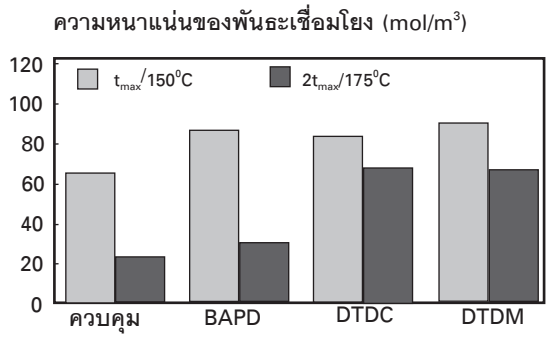
รูปที่ 3 ผลของการดัดแปรยาง EPDM ต่อความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงและความทนต่อแรงดึงของยางผสมที่ไม่ได้เสริมแรง [10]



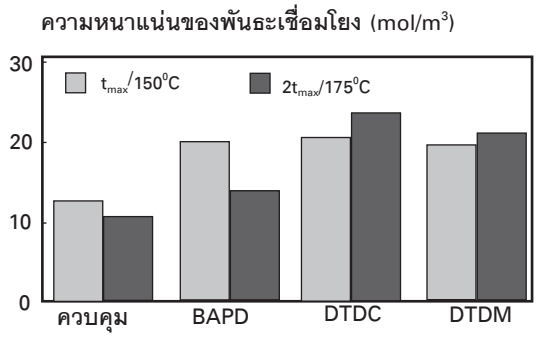
รูปที่ 4 STEM micrographs ของยางผสม NR/EPDM (ก) EPDM ที่ไม่ผ่านการดัดแปร (ข) EPDM ที่ดัดแปรด้วย BAPD [10]

สมบัติการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงของยางผสม NR/EPDM เป็นสิ่งที่สำคัญเพราะผลิตภัณฑ์เป้าหมายส่วนใหญ่จะได้รับการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง (อาจสูงกว่า 170°C) ซึ่งอาจจะทำให้ยางเกิดรีเวอร์ชัน[1] (reversion) ได้ จากผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของวัฏภาคยางธรรมชาติในยางผสมที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบ CV (กำมะถัน 2 phr/CBS 0.6 phr) ด้วยเทคนิค ^{1}H NMR พบว่าการดัดแปรโมเลกุลของยาง EPDM ไม่เพียงแต่จะส่งผลทำให้วัฏภาคยาง EPDM มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้นเท่านั้น ยังส่งผลทำให้วัฏภาคยางธรรมชาติมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 5 แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (175°C) และระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ให้สูงขึ้น จะพบว่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของวัฏภาคยางธรรมชาติในยางผสมชุดควบคุม (ยาง EPDM ที่ไม่ผ่านการดัดแปร) และในยางผสมชุดที่มีการดัดแปรยาง EPDM ด้วย BAPD จะมีค่าต่ำลงค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ (150°C) ทั้งนี้การลดลงของความหนาแน่นพันธะเชื่อมโยงดังกล่าวเกิดจากรีเวอร์ชันของยางธรรมชาตินั่นเอง จากรูปจะพบว่าอัตราการเกิดรีเวอร์ชันในวัฏภาคของยางธรรมชาติจะมีค่าค่อนข้างต่ำในยางผสมที่ได้จากการดัดแปรโมเลกุลยาง EPDM ด้วย DTDC และ DTDM

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการวัลคาไนซ์ต่อระดับความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในวัฏภาคของยาง EPDM ในยางผสม (รูปที่ 6) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาการวัลคาไนซ์ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในวัฏภาคของยาง EPDM ในยางชุดควบคุมลดลงเพียงเล็กน้อย จากผลการทดลองพบว่าการดัดแปรโมเลกุลด้วย BAPD ส่งผลทำให้วัฏภาคของยาง EPDM เกิดรีเวอร์ชันค่อนข้างมาก (คาดว่าพันธะที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นพันธะโพลิซัลฟิดิก) ในขณะที่การดัดแปรด้วย DTDC หรือ DTDM กลับไม่ได้ทำให้ยางเกิดรีเวอร์ชันเนื่องจากพันธะการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นพันธะไดซัลฟิดิก นอกจากนั้นการดัดแปรยาง EPDM โดยการใช้สารดัดแปร BAPD ผสมกับ DTDC จะช่วยให้พันธะเชื่อมโยงในวัฏภาคของยาง EPDM ในยางผสมที่วัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงนั้นมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้สารดัดแปร BAPD เพียงลำพัง ซึ่งจะช่วยทดแทนจำนวนพันธะที่ลดลงอันเนื่องมาจากการเกิดรีเวอร์ชันได้



รูปที่ 5 ผลของอุณหภูมิวัลคาไนซ์ต่อความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในวัฏภาคของยางธรรมชาติ (กำมะถัน 2 phr/CBS 0.6 phr) [10]



รูปที่ 6 ผลของอุณหภูมิวัลคาไนซ์ต่อความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในวัฏภาคของยาง EPDM (กำมะถัน 2 phr/CBS 0.6 phr) [10]

[1] รีเวอร์ชัน (reversion) คือ ปรากฏการณ์ที่จำนวนพันธะกำมะถันที่เชื่อมโยงโมเลกุลของยาง (sulfur crosslink) เพื่อให้ความแข็งแรงกับยางมีจำนวนลดลง ถ้าหากเวลาในการวัลคาไนซ์นานเกินไป

การใช้งานยางผสม NR/EPDM

1. ยางผสม NR/EPDM สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการเอ็กซทรูด

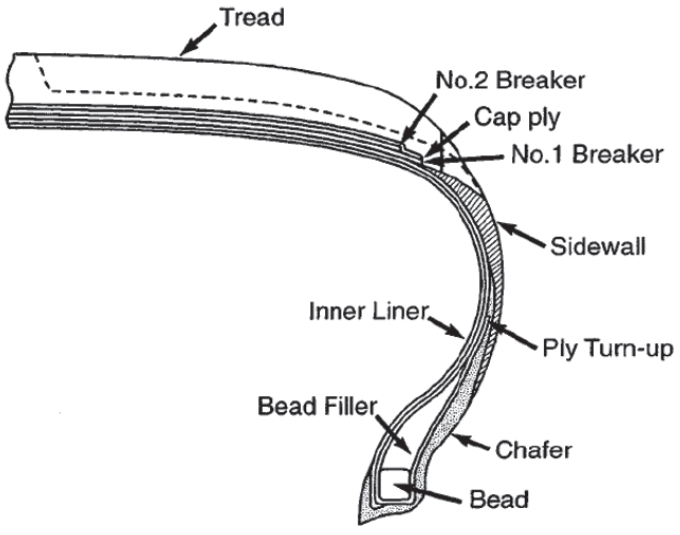
โดยทั่วไปยางผสม NR/EPDM สามารถนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางได้หลากหลาย เช่น ปะเก็น ซีลต่างๆ ที่ใช้ตามประตูหน้าต่าง ซึ่งมักจะผลิตโดยการเอ็กซทรูด (extrusion) เพราะผลิตภัณฑ์มีรูปร่างที่ค่อนข้างซับซ้อนและต้องการมิติที่แน่นอน ตัวอย่างสูตรผสมเคมีของยางซีลที่ทำจากยางผสม NR/EPDM ที่ผ่านการดัดแปรแล้วแสดงในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 เมื่อนำยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมมาสเตอร์แบตช์สูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 มาผ่านการเอ็กซทรูดจะให้ชิ้นงานที่มีผิวเรียบและยางไหลเข้าไปที่มุมจนเต็มเป็นรูปร่างที่ชัดเจน แต่ว่ายังมีการบวมตัว (die swell) ที่สูง และยางจะมีรูพรุนเมื่อนำไปวัลคาไนซ์ด้วยตู้อบอากาศร้อนหรือไมโครเวฟ ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากความชื้นที่มีอยู่ในเนื้อยาง ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการเติมสารต้านความชื้น (anti-moisture agent) ได้แก่ Rhenosorb C/GW เข้าไปในยางคอมพาวด์สูตร 1 และ 2 ก่อนการเอ็กซทรูด กลายเป็นสูตร 3 และ 4 ตามลำดับ สมบัติของคอมพาวด์ที่ได้แสดงในตารางที่ 2

เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 2 จะเห็นว่ายางสูตร 3 มีความแข็งต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดเล็กน้อย แต่จะมีความทนต่อแรงดึงสูงกว่ายางสูตร 4 ซึ่งมีความแข็งมากกว่า เมื่อพิจารณาในภาพรวมจะพบว่ายางผสมทั้ง 2 สูตรมีสมบัติเชิงกลดีกว่าเกณฑ์กำหนดเชิงการค้า อีกทั้งยังมีสมบัติความทนต่อความร้อนและโอโซนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

2. ยางผสม NR/EPDM สำหรับใช้เป็นแก้มยางรถยนต์

แก้มยาง (side wall) เป็นส่วนของยางรถยนต์ที่มีความบางมากกว่าส่วนอื่นๆ อยู่ระหว่างดอกยางกับขอบยาง ทำหน้าที่หุ้มโครงยาง (carcass) เพื่อป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากการใช้งาน ป้องกันไม่ให้ความชื้นซึมผ่านเข้าไปทำความเสียหายแก่โครงยาง และดูดซับการสั่นสะเทือนจากพื้นถนนขณะขับขี่ โดยทั่วไปนิยมผลิตจากยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางบิวทาไดอีน (polybutadiene; BR) และต้องใส่สารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) สารต้านโอโซน (antiozonant) และแว็กซ์ (wax) เพื่อป้องกันการแตกและเสียหายจากสภาพอากาศแวดล้อม อย่างไรก็ตามระหว่างที่ยางล้อมีการใช้งาน สารต้านโอโซนและแว็กซ์ก็จะเคลื่อนตัวไปยังพื้นผิวของแก้มยางและหลุดออกไป แก้มยางจึงมีความแข็งเพิ่มขึ้นและเกิดรอยแตก (crack) ส่งผลให้อายุการใช้งานของยางล้อสั้นลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางล้อรถบรรทุกที่มีการหล่อดอกหลายครั้ง (3-4 ครั้ง) จำเป็นที่จะต้องมีแก้มยางที่มีสมบัติดีเพียงพอตลอดอายุการใช้งานของยางล้อ การสูญเสียสารต้านโอโซนบริเวณแก้มยางหลังจากที่มีการหล่อดอกไปได้เพียงหนึ่งหรือสองครั้งจึงเป็นปัญหาที่สำคัญ



รูปที่ 7 โครงสร้างของยางล้อรถยนต์

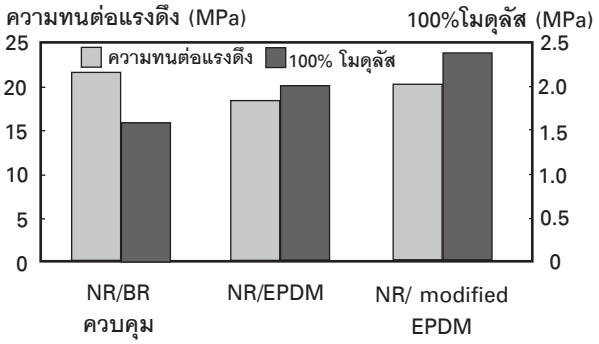
ตารางที่ 1 สูตรผสมเคมีของยางมาสเตอร์แบตช์ NR และ EPDM ที่ผ่านการดัดแปรแล้วสำหรับการขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กซทรูด [11]

สูตรผสมเคมี	ปริมาณ (phr)	
	สูตร 1	สูตร 2
NR มาสเตอร์แบตช์		
ยางธรรมชาติ (SMR L)	100	100
เขม่าดำ N550	30	50
น้ำมัน Sunpar 2280	1.5	5
ซิงก์ออกไซด์	3	3
กรดสเตียริก	1	1
TMQ	0.85	0.85
EPDM ดัดแปรมาสเตอร์แบตช์		
ยาง EPDM (Polysar 585)	80	50
ยาง EPDM (Polysar 5875)	40	100
เขม่าดำ N550	60	100
น้ำมัน Sunpar 2280	3	15
Strucktol WB212	5	5
BAPD	0.8	0.8
DTDC	0.4	0.4
ซิงก์ออกไซด์	3	3
กรดสเตียริก	1	1
นำมาสเตอร์แบตช์มาผสมกัน (crossblend)		
เขม่าดำทั้งหมด	42	70
น้ำมันทั้งหมด	10.1	29
ระบบการวัลคาไนซ์		
กำมะถัน	0.6	0.6
TBBS	1	1
TMTD	1	1
DPTH	0.25	0.25
TBUT	0.5	0.5
ZDBC	0.8	0.8

หมายเหตุ: สูตร 1 นิ่มเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ยางโพรไฟล์ฟองน้ำต่างๆ เช่น ขอบประตูรถยนต์
สูตร 2 มีความแข็งปานกลางเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ยางโพรไฟล์ เช่น ขอบกระจกหลังของรถตู้

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของยางผสมที่เติมสารต้านความชื้น

สมบัติ	เกณฑ์กำหนดเชิงการค้า [12]	สูตร 3	สูตร 4
ความแข็ง (IRHD)	55-65	53	63.5
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	>6.0	17.7	13.9
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	>250	585	385
การเสียรูปถาวรหลังกดที่ 70°C, 1 วัน (%)	<35	28	25
การกระเด้งตัว (%)	>25	72	62
ความทนต่อโอโซน 50 pphm, 40°C , 72 ชม., 20%	ไม่มีรอยแตก	ไม่มีรอยแตก	ไม่มีรอยแตก
สมบัติหลังการบ่มเร่ง (70°C, 7 วัน)			
ความแข็ง (IRHD)	-	58	69
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	-	14.5	13.5
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	-	420	270



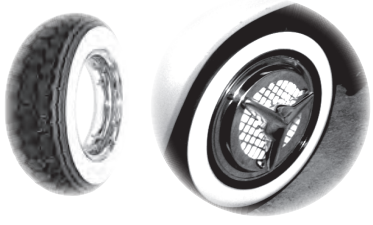
รูปที่ 8 ความทนต่อแรงดึงและ100%โมดุลัสของยางผสม NR/EPDM ที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำ เมื่อเทียบกับยางผสม NR/BR สูตรควบคุม (เขม่าดำ N660 50 phr น้ำมัน 10 phr t_{max}/150°C) [14]

ในอดีตได้มีการศึกษายางผสม NR/EPDM สำหรับทำเป็นแก้มยางสีขาวสำหรับรถแต่ง แต่ก็ต้องเติมสารต้านโอโซนลงไปด้วย ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการเปลี่ยนสีหรือการบลูมขึ้น [13] อย่างไรก็ตาม ได้มีการศึกษายางผสม NR/EPDM (60:40) เพื่อนำไปทำเป็นแก้มยางสีดำ [14] ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับยางผสม NR/BR ที่ใช้กันอยู่นั้น พบว่ายางผสม NR/EPDM ที่ผ่านการดัดแปรแล้วจะให้ผลใกล้เคียงกัน (รูปที่ 8) แต่โมดุลัสของยางผสม NR/EPDM ที่ผ่านการดัดแปรแล้วจะสูงกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงเกิดในวัฏภาคยางธรรมชาติมากกว่า รวมทั้งอุณหภูมิเปลี่ยนสภาวะคล้ายแก้ว (glass transition temperature; Tg) ของยาง EPDM สูงกว่าของยาง BR และยาง EPDM ที่ผ่านการดัดแปรแล้วมีอันตรกิริยากับเขม่าดำได้ดีกว่า แต่การที่แก้มยางที่ทำจากยางผสม NR/EPDM ที่ผ่านการดัดแปรแล้วมีโมดุลัสสูงกว่ายางผสม NR/BR นั้น อาจก่อให้เกิดปัญหาที่ตามมาได้ เช่น การเกิดจุดรวมความเค้น (stress concentration) ซึ่งจะเป็นจุดที่ทำให้บริเวณไหล่ยาง (shoulder) ได้รับความเสียหาย

อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงสูตรในการผลิตให้แก้มยางที่ได้มีสมบัติดีขึ้น เช่น การใช้สารดัดแปรผสม (BAPD 0.8 phr ผสมกับ DTDC 0.4 phr) เพื่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงในวัฏภาคของยาง EPDM สูงขึ้น การเลือกใช้เขม่าดำเกรด N339 ในยางผสม NR/EPDM ที่ผ่านการดัดแปรแล้วจะทำให้แก้มยางมีความต้านทานต่อการสึกกร่อน (abrasion resistance) ได้พอๆ กับการใช้เขม่าดำเกรด N660 ในยางผสม NR/BR หรือการเลือกใช้น้ำมันพาราฟินิก (parafinic oil) ในสูตรจะให้สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าการใช้น้ำมันแนฟทินิก (naphthenic oil) หรือน้ำมันอะโรมาติก (aromatic oil) จากรายงาน [14] พบว่ายางผสม NR/EPDM ที่ผ่านการดัดแปรแล้วนี้จะทนต่อโอโซนได้ดีโดยไม่จำเป็นต้องเติมสารต้านโอโซน และยังทำให้ลักษณะของยางล้อดูใหม่ตลอดเวลาอีกด้วย

3. ยางผสม NR/EPDM สำหรับผลิตภัณฑ์ยางสีขาว

ในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ยางสีขาว เช่น ปะเก็นสำหรับเครื่องซักผ้าและเครื่องล้างจาน จำเป็นต้องใช้ผลิตภัณฑ์ที่ใส่สารตัวเติมสีขาว เช่น ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต Cook และคณะ [15] ได้ศึกษาการเตรียมยางผสม NR/EPDM (60:40) ตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 3 และทดสอบสมบัติต่างๆ เปรียบเทียบกับยางธรรมชาติและยาง EPDM สูตรเชิงการค้า ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4



ตารางที่ 3 สูตรผสมเคมีของยางธรรมชาติ ยางผสม และยาง EPDM สูตรเชิงการค้า [15]

สูตรผสมเคมี	ปริมาณ (phr)				
	ยาง NR (ควบคุม)	ยางผสมไม่ดัดแปร	ยางผสมดัดแปร สูตร 1	ยางผสมดัดแปร สูตร 2	ยาง EPDM สูตรเชิงการค้า
ยางธรรมชาติ (SMR L)	100	-	-	-	-
NR/EPDM (60:40)	-	100	100	100	-
Vistalon 3666	-	-	-	-	125
Vistalon 8600	-	-	-	-	30
BAPD	-	-	0.8	0.8	-
DTDC	-	-	0.4	0.4	-
Wingstaty L	1	-	-	1	-
TMQ	0.5	-	-	0.5	-
แคลเซียมคาร์บอเนต (Winnofil S)	40	40	40	40	-
ไททาเนียมไดออกไซด์	3	3	3	3	10
เคลย์ (Polestar 200R)	-	-	-	-	60
Ultrasil VN3	-	-	-	-	30
Durosil	-	-	-	-	30
Enerpar 13	-	-	-	-	40
Strukpar 2280	15	15	15	15	-
Struktol WB 212	2	2	2	2	-
ซิงก์ออกไซด์	5	5	5	5	5
กรดสเตียริก	1	1	1	1	1
กำมะถัน	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5
TBBS	1	1	1	1	-
Cure Rite 18	1.7	1.7	1.7	1.7	-
PEG 4000	-	-	-	-	2
สารคู่ควบ (Polyvest 25)	-	-	-	-	2
Flectol Pastilles	-	-	-	-	0.5
MBTS	-	-	-	-	1.5
DPTH	-	-	-	-	1.5
Rhenocure ZAT	-	-	-	-	1.4
Vulkacit I	-	-	-	-	1

หมายเหตุ: Cure Rite 18 = N-oxydiethylene-thiocarbamy-N'-oxydiethylene sulfenamide
Rhenocure ZAT = zinc amine dithiophosphate complex
Vulkacit I = dimethyl diphenyl thiuram disulfide

โดยทั่วไประหว่างการผสมยางและสารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำ อุณหภูมิของยางที่อยู่ในห้องผสมจะสูงมาก บางครั้งอาจทำให้เกิดยางตาย (scorch) ได้ (ถ้ามีการเติมสารวัลคาไนซ์ลงไป) แต่ในกรณีของสารตัวเติมสีขาวที่ไม่เสริมแรง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตนั้น อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในห้องผสมจะช้ากว่าและยางผสมที่ได้ก็มีความหนืดต่ำกว่ายางผสมที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ อีกทั้งยังดูดซับสารดัดแปรได้น้อยกว่าเขม่าดำ ทำให้สารดัดแปรที่ให้กำมะถัน (sulfur donor) มีโอกาสเข้าไปทำปฏิกิริยากับยาง EPDM ได้มากขึ้น สำหรับการผสมในเครื่องผสมระบบเปิด (เช่น two-roll mill) ยางผสมที่ได้จะมีสมบัติที่ดี เช่น มีความเหนียวติด (tacky and cohesive) และสามารถนำไปผลิตได้ง่ายกว่าคอมพาวด์ยาง EPDM นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่ายางผสม NR/EPDM ที่ผ่านการดัดแปรจะมีเวลาในการวัลคาไนซ์ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ แต่ยางผสม NR/EPDM ที่ไม่ผ่านการดัดแปรจะมีเวลาการวัลคาไนซ์ที่ยาวกว่า

ตารางที่ 4 สมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติ ยางผสม และยาง EPDM สูตรเชิงการค้า [15]

สมบัติ	ยาง NR (ควบคุม)	ยางผสม ไม่ดัดแปร	ยางผสมดัดแปร สูตร 1	ยางผสมดัดแปร สูตร 2	ยาง EPDM สูตรเชิงการค้า
สมบัติก่อนการบ่มเร่ง					
เวลาการวัลคาไนซ์ (t_{95}) ที่ 180°C (min:sec)	3:12	4:22	3:07	3:00	3:41
100%โมดุลัส (MPa)	0.49	0.66	0.73	0.69	0.93
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	19.3	7.99	8.58	9.37	11.6
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	860	745	710	750	810
ความแข็ง (IRHD)	29	36	40	39	47
ความทนต่อการฉีกขาดขณะร้อนที่ 180°C (N/mm)	4	2.5	2.8	1.9	5.9
การเสียรูปถาวรหลังกดที่ 70°C, 1 วัน (%)	20	36	36	37	25
สมบัติหลังการบ่มเร่ง					
ความทนต่อแรงดึงเปลี่ยนแปลง (MPa)	-45	-26	-26	-18	+3
การยืดตัว ณ จุดขาดเปลี่ยนแปลง (%)	-17	-8	-8	-13	-9
ความแข็งเปลี่ยนแปลง (IRHD)	+7	-15	-8	+3	+18
การเสียรูปถาวรหลังกดเปลี่ยนแปลงที่ 70°C, 1 วัน (%)	-25	+6	-3	-8	-28
สมบัติหลังการบ่มเร่งในสารชะล้างร้อน (“Original formula” non-biological Persil automatic powder, 10 g/litre, 95°C, 72 h)					
ความทนต่อแรงดึงเปลี่ยนแปลง (%)	-5	+7	+2	+4	-11
ความแข็งเปลี่ยนแปลง (%)	-2	-8	-10	-6	-12
การเสียรูปถาวรหลังกดเปลี่ยนแปลง (%)	-35	-6	-8	-14	-48
ปริมาตรเปลี่ยนแปลง (%)	+3.7	+3	+2.4	+2.9	+12.4

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่ายางผสมมีสมบัติโดยรวม (เช่น ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาดขณะร้อน และการเสียรูปถาวรหลังกด) ต่ำกว่าสมบัติของยางธรรมชาติควบคุมหรือยาง EPDM สูตรเชิงการค้า ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการดัดแปรโมเลกุลยาง EPDM ส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติเชิงกลสูงกว่ายางผสมที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร (จากการวิเคราะห์ด้วย GPC/UV พบว่ายาง EPDM ได้รับการดัดแปรประมาณร้อยละ 0.11 โดยน้ำหนัก) การเติมสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) ในยางผสมดัดแปรสูตร 2 ทำให้ยางมีความทนต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดดีขึ้น แต่กลับส่งผลทำให้ความทนต่อการฉีกขาดขณะร้อนลดลงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามการใส่สารต้านออกซิเดชันนอกจากจะช่วยลดโอกาสของการเกิดออกซิเดชันแบบเฉียบพลันแล้วยังทำให้รอบการวัลคาไนซ์นั้นใช้เวลาสั้นลงอีกด้วย

จากตารางยังพบว่ายางผสมทั้ง 3 สูตรมีสมบัติความทนต่อความร้อนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี (ดีกว่ายางธรรมชาติควบคุมแต่ด้อยกว่ายาง EPDM สูตรเชิงการค้า) การดัดแปรยางผสมทำให้ยางผสมมีสมบัติความทนต่อความร้อนดีขึ้น หลังการบ่มเร่งด้วยสารชะล้างร้อนเพื่อจำลองสภาวะการใช้งานของเครื่องซักผ้า พบว่ายางผสมมีสมบัติโดยรวมดีกว่ายางธรรมชาติหรือ EPDM สูตรเชิงการค้า โดยยางผสมที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรต่างก็ให้ผลใกล้เคียงกัน โดยทั่วไปแล้วยาง EPDM ควรจะมีความทนต่อน้ำและสารเคมีสูงกว่ายางธรรมชาติและยางผสม แต่สาเหตุที่ยาง EPDM สูตรเชิงการค้านี้มีความทนต่อสารชะล้างร้อนต่ำกว่ายางผสมเนื่องจากในสูตรยาง EPDM มีการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าซิลิกามีความเป็นขั้วสูงจึงสามารถดูดซับน้ำได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต (ซึ่งใช้ในสูตรยางผสม) จึงทำให้ยาง EPDM เกิดการบวมตัวสูงกว่ายางผสม

อย่างไรก็ตามแม้ว่ายางผสมจะมีสมบัติความทนต่อความร้อนและโอโซนอยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่ยางผสมที่ได้ก็ยังคงมีค่าการเสียรูปถาวรหลังกดที่ค่อนข้างสูงซึ่งอาจส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพในการอุดรอยรั่ว ด้วยเหตุนี้จึงต้องปรับปรุงสูตรผสมเคมีเพื่อให้วัฏภาคของยาง EPDM มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนเกรดของยาง EPDM จาก Polysar 585 ซึ่งมีปริมาณ ENB ต่ำ ไปเป็น Polysar 5875 ซึ่งมีปริมาณ ENB สูงกว่าและมีการดัดแปรโมเลกุล EPDM โดยใช้ BAPD 1 phr ส่งผลทำให้เกิดการดัดแปรโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 0.11 เป็น 0.452 โดยน้ำหนัก ซึ่งการปรับเปลี่ยนสูตรดังกล่าวทำให้วัฏภาคของยาง EPDM มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้นจึงส่งผลทำให้สมบัติการเสียรูปถาวรหลังกดดีขึ้น

ตารางที่ 5 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในแต่ละวัฏภาคของยางผสม NR/EPDM ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปร (t_{95} ที่ 180°C) [15]

วัลคาไนเซต	ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (mol/m^3)	
	NR	EPDM
NR ควบคุม	53	-
NR/EPDM ไม่ผ่านการดัดแปร	71	9
NR/EPDM ผ่านการดัดแปร	80	15.5

หมายเหตุ: NR/EPDM ที่ผ่านการดัดแปร ร้อยละ 0.452 โดยน้ำหนัก, BAPD 1 phr, กำมะถัน 0.6 phr, TBBS 1 phr, Cure Rite 18 = 1.7 phr

โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณของสารวัลคาไนซ์เข้าไปในยางผสมจะส่งผลทำให้ทั้งวัฏภาคของยางธรรมชาติและยาง EPDM มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงขึ้น จึงมักส่งผลทำให้ยางผสมมีสมบัติการเสียรูปถาวรที่ดีขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามหากการเพิ่มปริมาณสารวัลคาไนซ์ดังกล่าวส่งผลทำให้วัฏภาคของยางธรรมชาติมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงมากเกินไปก็อาจส่งผลทำให้ยางผสมที่ได้มีความแข็งแรงลดลง

การปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำมันและสารตัวเติมก็ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติของยางผสม ตารางที่ 6 แสดงผลของการแปรปริมาณน้ำมันและสารตัวเติมต่อสมบัติของยางผสม จากตารางจะเห็นได้ว่าการลดปริมาณน้ำมันจาก 15 phr ลงเหลือ 5 phr จะส่งผลทำให้ยางมีความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดขณะร้อนสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจาก 40 phr ไปเป็น 85 phr นอกจากจะทำให้ยางแข็งมากขึ้นแล้ว ยังช่วยปรับปรุงสมบัติความทนต่อการฉีกขาดขณะร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ก็ส่งผลเชิงลบต่อสมบัติอื่นๆ ของยาง เช่น ความทนต่อแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาด

ตารางที่ 6 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในยางผสม NR/EPDM (t_{95} ที่ 180°C) [15]

สมบัติ	ปริมาณน้ำมัน (phr)		ปริมาณสารตัวเติม (phr)	
	15[a]	5[a]	40[b]	85[b]
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	8.64	10.2	11.3	9.85
การยืดตัว ณ จุดขาด (%)	655	650	685	710
ความแข็ง (IRHD)	39	45	45	52
ความทนต่อการฉีกขาดขณะร้อนที่ 100°C (N/mm)	2.1	4.0	5.9	9.4
การเสียรูปถาวรหลังกดที่ 70°C, 22 ชั่วโมง (%)	35	35	33	36

หมายเหตุ: [a]EPDM ที่ดัดแปรด้วย BAPD 1 phr
[b]EPDM ที่ดัดแปรด้วย BAPD 0.8 phr/DTDC 0.4 phr
ยางผสมทุกสูตรประกอบไปด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ 3 phr, ซิงก์ออกไซด์ 5 phr, กรดสเตียริก 1 phr และ BAPD 0.8 phr/DTDC 0.4 phr เป็นโมดิฟายเออร์ ระบบวัลคาไนซ์ ได้แก่ กำมะถัน 0.6 phr, TBBS 2.0 phr, TMTD 1.0 phr, Tetrone A 0.25 phr, TBTD 0.5 phr และ ZDBC 1.0 phr

สรุป

การใช้เทคโนโลยียางผสมเป็นการนำเอาสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดมารวมกัน แต่การนำเอายางแต่ละชนิดมาผสมกันนั้นจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัยเพื่อให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติดีตามความต้องการ สำหรับในกรณีของการผสมระหว่างยางธรรมชาติและยาง EPDM ปัจจัยหลักที่ต้องพิจารณา คือ ความแตกต่างของอัตราเร็วและระดับของการวัลคาไนซ์ระหว่างยางธรรมชาติและยาง EPDM การปรับปรุงอัตราเร็วและระดับของการวัลคาไนซ์ของยาง EPDM สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การเลือกใช้ยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณไดอีนสูงขึ้น การเลือกใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ชอบยาง EPDM รวมถึงการดัดแปรโมเลกุลของยาง EPDM ด้วยสารให้กำมะถันก่อนที่จะนำไปผสมกับยางธรรมชาติ ซึ่งการดัดแปรดังกล่าวนี้สามารถทำได้กับยาง EPDM ที่มีขายในท้องตลาดได้แทบทุกเกรด แต่การดัดแปรจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในกรณีที่ใช้ยาง EPDM เกรดที่มีปริมาณไดอีนค่อนข้างสูง ซึ่งเมื่อผ่านการดัดแปรแล้วยางผสม NR/EPDM ที่ดัดแปรแล้วสามารถจะนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ ได้ เช่น ซีล ประเก็น ยางขอบกระจก และแก้มยาง

ตัวย่อสารเคมี

ตัวย่อ	ชื่อสารเคมี
BAPD	Bis-alkylphenol disulfide
CBS	N-cyclohexy-2-benzothiazole sulfenamide
DPTH	Dipentamethylenethiuram hexasulfide
DTDC	Dithiodicaprolactam
DTDM	Dithiomorpholine
ENB	Ethylidene norbornene
MBTS	2,2'-Benzothiazole disulfide
PEG	Polyethylene glycol
TBBS	N-t-butylbenzothiazole-2-sulfenamide
TBUT	Tetrabutyl thiuram disulfide
TMQ	2,2,4-Trimethyl-1,2-dihydroquinoline
ZDBC	Zinc dibutyldithiocarbamate

เอกสารอ้างอิง

1. Morrissey, R.T., **"**Halogenation of ethylene propylene diene rubbers**"**, *Rubber Chem. Technol.*, **44(4)**, 1025-1042, (1971)
2. Coran, A.Y., **"**Making rubber blends of diene rubber and EPR or EPDM**"**, US Patent 4,687,810, 18 August, Monsanto Company, St Louis.
3. Hopper, R.J., **"**Improved co-cure of EPDM-polydiene blends by conversion of EPDM into macromolecular cure retarder**"** *Rubber Chem. Technol.,* **49(1)**, 341-352, (1976)
4. Baranwal, K.C. and Son, P.N., **"**Co-curing of EPDM and diene rubbers by grafting accelerators onto EPDM**"**, *Rubber Chem. Technol.*, **47(1)**, 88-99, (1974)
5. Hashimoto, K., Miura, M., Takagi, S. and Okamoto, H., **"**Co-vulcanization of EPDM and NR 1**"**, International Polymer Science and Technology, 3, T84-T87, (1976)
6. Mastromatteo, R.P., Mitchell, J.M. and Brette, Jr., T.J., **"**New accelerators for blends of EPDM**"**, *Rubber Chem. Technol.*, **44(4)**, 1065-1079, (1971)
7. Woods, M.E. and Mass, T.R., **"**Fundamental considerations for the covulcanization of elastomer blends**"** in **"**Copolymers, Polyblends and Composites – Advances in Chemistry Series (ed. N.A.J. Platzer), **142**, 386-398, (1975)
8. Woods, M.E. and Davidson, J.A., **"**Fundamental considerations for the covulcanization of elastomer blends. II. Lead oxide-activated cures of NBR-EPDM blends**"**, *Rubber Chem. Technol.*, **49(1)**, 112-117, (1976)
9. Brown, P.S. and Tinker, A.J., **"**The effect of modifying EPDM in the crosslink distribution of NR/EPDM blends**"**, *Journal of Natural Rubber Research*, submitted for publication.
10. Lewan, M.V., **"**NR/NBR blends – basic problems and solutions**"** in Tinker, A.J. and Jones, K.P., **"**Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Specialty Polymers**"**, Chapman&Hall, 1998.
11. Ahmad, M.A., Arizal, R. and Cook, S., **"**NR/EPDM blends for extruded profile weatherstrip**"** in Tinker, A.J. and Jones, K.P., **"**Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Specialty Polymers**"**, Chapman&Hall, 1998.
12. von Hellens, C.W., **"**Some considerations for the application of EPDM in tire components**"**, Paper No. 40, ACS Rubber Division Meeting, Detroit, Michigan, USA, October 17-20 (1989)
13. Shell Chemical Company, Technical Bulletin SCR, 65-160, August, (1965)
14. Cook, S., **"**Compounding NR/EPDM blends for tyre sidewalls**"** in Tinker, A.J. and Jones, K.P., **"**Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Specialty Polymers**"**, Chapman&Hall, 1998.
15. Cook, S. and Escolar, R.M., **"**Compounding NR/EPDM blends for light-coloured applications**"** in Tinker, A.J. and Jones, K.P., **"**Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Specialty Polymers**"**, Chapman&Hall, 1998.
16. MRPR, **"**The Natural Rubber Formulary and Property Index**"**, (1984)

ชญาภา นิ่มสุวรรณ
การศึกษา : ปริญญาโท (วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) มหาวิทยาลัยมหิดล
สถานที่ทำงานปัจจุบัน : นักวิเคราะห์ ห้องปฏิบัติการยาง
หน่วยวิจัยโพลิเมอร์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ