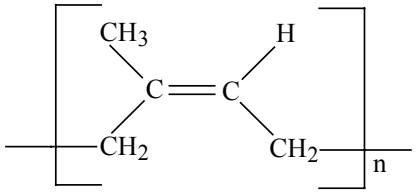
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber : NR) (พรพรรณ, 2540)

ยางธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้งาน ส่วนใหญ่เป็นยางที่ได้จากต้นยางพารา (หรือที่เรียกว่า Hevea brasiliensis) มีชื่อทางเคมีว่า cis-1,4- Polyisoprene และมีโครงสร้างทางเคมี ดังนี้



cis-1,4-polyisoprene

ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงเฉลี่ยประมาณ 200,000 ถึง 500,000 มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง มีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (glass transition temperature : Tg) เท่ากับ -72°C

1.1 สมบัติของยางธรรมชาติ

จากลักษณะโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติดังนี้

1.1.1 ยางธรรมชาติมีโครงสร้างหลักที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ทำให้ยางธรรมชาติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันพืช แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

1.1.2 ยางธรรมชาติมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา จึงสามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และยางทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนได้ง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุในการเสื่อมสภาพของยาง

1.1.3 สายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาติสามารถเคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี อาจจะสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก

1.1.4 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความสม่ำเสมอสูง ทำให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้ เมื่อถูกดึงยืดหรือเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้มีความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง (Morton, 1987) และมีค่าความแข็งแรงขณะไม่วัลคาไนซ์ (green strength) สูงและมีความเหนียวติดกัน (building tack) ดี

1.1.5 เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จึงต้องนำยางไปบด เพื่อทำให้โมเลกุลเล็กลง ก่อนนำไปใช้งาน

เมื่อเวลาในการเก็บเพิ่มขึ้น ยางธรรมชาติจะมีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้ยางแข็งมากขึ้น เนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่แอลดิไฮดิก (aldehydic) ที่มีอยู่ในโมเลกุลของยางทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนของกรดอะมิโนหรือโปรตีน ทำให้เกิดการเชื่อมโยงขึ้น ดังนั้นในกรณีที่ต้องการควบคุมความหนืดของยางธรรมชาติให้คงที่ สามารถทำได้โดยการเติมเกลือของไฮดรอกซีลามีน (hydroxylamine salt) ที่มีความเข้มข้น 0.15% โดยน้ำหนัก (Morton, 1987) แต่เมื่อเวลาในการเก็บเพิ่มขึ้น ยางชนิดที่มีความหนืดคงที่ จะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบดยางก่อนที่จะผสมกับสารเคมีอื่นๆ ซึ่งสิ่งนี้เป็นข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับยางสังเคราะห์ที่สามารถผสมสารเคมีลงไปได้โดยไม่จำเป็นต้องบดยางก่อน ประสิทธิภาพในการบดยางธรรมชาติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลาในการบดยาง กล่าวคือ ถ้าใช้อุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพในการบดจะสูงเช่นกัน และในการบดยางธรรมชาติแต่ละครั้งจะทำให้ยางมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง ทำให้ยางนิ่มลงเรื่อยๆ ดังนั้นถ้าหากมีการบดหรือรีดยางซ้ำหลายๆครั้ง จะทำให้ยางที่ได้นิ่มเกินกว่าความต้องการ จะก่อให้เกิดปัญหาในการแปรรูปตามมา เช่น สารเคมีกระจายตัวได้ไม่ดี โดยเฉพาะสารเคมีที่ผสมยาก เช่น เขม่าดำ ซิลิกาหรือซิงค์ออกไซด์ เป็นต้น และยางที่นิ่มเกินไป ทำให้มีอากาศขังไว้ในยางมาก ก่อให้เกิดรูพรุนของฟองอากาศในแผ่นยางที่ผ่านกระบวนการรีดแผ่น (calendering) ส่วนในกระบวนการอัดรีด จะทำให้ยางห้อยย้อยเสียรูปได้ง่าย และในการอัดเบ้าจะมีอากาศขังอยู่ในยางมากเกินไป โดยทั่วไปยางธรรมชาติสามารถพันลูกกลิ้งได้ง่ายและเร็ว เกาะติดลูกกลิ้งแน่น ไม่มีปัญหาในการผสมสารเคมีเข้าไปในยางขณะอยู่บนลูกกลิ้ง

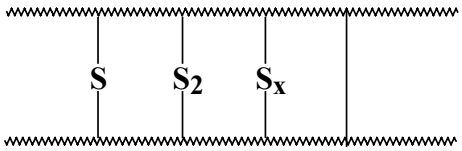
1.2 การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ได้หลายระบบ ได้แก่

1.2.1 ระบบกำมะถันปกติ (Conventional system : CV)

ระบบกำมะถันปกติเป็นระบบที่มีราคาถูกที่สุด ในแต่ละพันธะเชื่อมโยง จะมีกำมะถันอยู่หลายอะตอม เรียกการเชื่อมโยงแบบนี้ว่า พอลิซัลฟิดิก (polysulfidic crosslink) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การเชื่อมโยงแบบนี้ให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดี เช่น สมบัติความทนทานต่อแรงดึง สมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาดและสมบัติความต้านทานต่อการล้า และมีสมบัติในการต้านการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำดีมาก แต่สมบัติการรีเวอร์ชั่น (reversion) ไม่ดี เช่น สมบัติของยางลดลง เมื่ออบสุกเกินไป หรือยางถูกออกซิไดซ์ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ ส่วนสมบัติความต้านทานต่อความร้อน

ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ และสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ของยางธรรมชาติ จะด้อยกว่าระบบอื่นๆ



รูปที่ 2.1 ลักษณะพันธะเชื่อมโยงโดยใช้กำมะถันและเปอร์ออกไซด์ : (a) monosulfidic, (b) disulfidic, (c) polysulfidic, (d) peroxide (พรพรรณ, 2540)

1.2.2 ระบบอีวี (Efficient Vulcanizing system : EV)

ระบบอีวีเป็นระบบที่ใช้กำมะถันน้อยและสารตัวเร่งมาก หรือใช้ระบบสารให้กำมะถัน (sulfur donor) ซึ่งทำให้การใช้กำมะถันในการเชื่อมโยงมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยแต่ละพันธะเชื่อมโยงจะมีกำมะถันอยู่เพียงหนึ่งอะตอม เรียกการเชื่อมโยงแบบนี้ว่า มอนอซัลฟิดิก (monosulfidic crosslink) หรือสองอะตอม เรียกการเชื่อมโยงแบบนี้ว่า ไดซัลฟิดิก (disulfidic crosslink) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สารให้กำมะถันที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ TMTD, TMTM, MBTS, MBT, CBS เป็นต้น ยางคอมปาวด์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลด้อยกว่าระบบกำมะถันปกติ แต่ยางมีความต้านทานต่อการรีเวอร์ชั่นดี มีความทนทานต่อความร้อนดี มีความต้านทานการเสื่อมเมื่อถูกออกซิไดซ์และสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่ดี

1.2.3 ระบบเซมิอีวี (Semi Efficient Vulcanizing system : semi-EV)

ระบบเซมิอีวีเป็นระบบที่ใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในปริมาณที่อยู่กึ่งกลางระหว่างการใช้กำมะถันและสารตัวเร่งในระบบปกติกับระบบอีวี ทำให้ยางคอมปาวด์มีสมบัติเชิงกลและความต้านทานการเสื่อมอยู่ระหว่างทั้งสองระบบนี้ ปริมาณซัลเฟอร์และสารตัวเร่งที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติทั้งสามระบบ สรุปได้ดังตารางที่ 2.1 ปริมาณพันธะการเชื่อมโยงแบบต่างๆ ของระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้ซัลเฟอร์และสมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ได้ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปริมาณซัลเฟอร์และสารตัวเร่งในการวัลคาไนซ์ด้วยระบบต่างๆ (Morton, 1987 : 196)

ระบบการวัลคาไนซ์	ปริมาณซัลเฟอร์ (phr)	ปริมาณสารตัวเร่ง (phr)	อัตราส่วนของสารตัวเร่งต่อซัลเฟอร์
กำมะถันปกติ	2.0 – 3.5	1.2 – 0.4	0.1 – 0.6
เซมิอีวี	1.0 – 1.7	2.5 – 1.2	0.7 – 2.5
อีวี	0.4 – 0.8	5.0 – 2.0	2.5 – 1.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณพันธะการเชื่อมโยงแบบต่างๆของระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้ซัลเฟอร์และสมบัติของยางธรรมชาติที่ได้ (Morton, 1987 : 196)

	Conventional	Semi-EV	EV
Poly- and disulfidic crosslink, %	95	50	20
Monosulfidic crosslink, %	5	50	80
Cyclic sulfide concentration	High	Medium	Low
Low-temperature crystallization resistance	High	Medium	Low
Heat-ageing resistance	Low	Medium	High
Reversion resistance	Low	Medium	High
Compression set, 22 hr at 70°C, %	30	20	10

ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยกำมะถันหรือสารที่ให้กำมะถัน มีสารเคมีที่จำเป็นต้องใช้ร่วมกันในการวัลคาไนซ์ยาง ดังนี้ (พรพรรณ, 2528)

1) สารตัวเร่ง (accelerator) ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติโดยใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว ต้องใช้กำมะถันในปริมาณมากและการวัลคาไนซ์ต้องใช้เวลานาน แม้ว่าจะใช้อุณหภูมิในการวัลคาไนซ์สูง ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสีคล้ำ และเมื่อวางทิ้งไว้ กำมะถันจะซึมมาอยู่ที่ผิวของผลิตภัณฑ์ จึงนำสารตัวเร่งมาใช้ร่วมกับกำมะถัน ทำให้ลดเวลาในการวัลคาไนซ์ลงอย่างมาก อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ก็ลดลงเช่นกัน และปริมาณกำมะถันที่ใช้เพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลสูงสุดก็ลดลง สารตัวเร่งมีอิทธิพลต่ออัตราการเกิดการเชื่อมโยงในยางธรรมชาติ สารตัวเร่งแบ่งได้หลายกลุ่มดังนี้

1.1) กลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต (dithiocarbamate) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มเกลือแอมโมเนียม (ammonium salt) กลุ่มเกลือโซเดียม (sodium salt) และกลุ่มเกลือซิงค์ (zinc salt) สารตัวเร่งกลุ่มนี้จัดอยู่ในพวกสารตัวเร่งที่มีความเร็วในการวัลคาไนซ์สูง จะเร่งให้ยางเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็วมาก โดยกลุ่มเกลือซิงค์มีการใช้ในทางการค้ามากที่สุด และสารตัวเร่งกลุ่มนี้มักใช้

เป็นตัวเร่งสำหรับน้ำยาง อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ไม่เกิน 125°C ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติโปร่งใส ขาว หรือมีสีสันสดใส ตัวอย่างสารตัวเร่งกลุ่มนี้ เช่น ZDPC, ZDEC, ZDBC, ZDMC เป็นต้น

1.2) กลุ่มแซนเตท (zanthate) เป็นสารตัวเร่งที่วัลคาไนซ์ยางได้เร็วมาก (เร็วกว่ากลุ่มเกลือแอมโมเนียมของไดไธโอคาร์บาเมต) ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยาง ไม่นิยมใช้กับยางแห้ง อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ประมาณ 80 - 110°C เพื่อให้ได้การวัลคาไนซ์แบบพลาโต (plateau curve) ตัวอย่างสารตัวเร่งกลุ่มนี้ ได้แก่ SIX, ZIX, ZBX

1.3) กลุ่มไธยูแรม (thiuram) จัดเป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงพิเศษ ยางจะสก๊อช (scorch) และวัลคาไนซ์ช้ากว่ากลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต สารกลุ่มนี้สามารถใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นสารตัวเร่งด้วยตัวเองตามลำพัง โดยไม่ต้องกำมะถันก็สามารถวัลคาไนซ์ยางได้เช่นกัน ที่เรียกว่า thiuram vulcanization แต่ยางที่ได้มีค่ามอดุลัสต่ำ หรือใช้ปนกับกำมะถันในปริมาณเล็กน้อย (เป็นการวัลคาไนซ์แบบระบบอีวี) จะได้ยางที่มีสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดต่ำและทนความร้อน หรือใช้เป็นตัวเร่งเสริมเพื่อกระตุ้นสารตัวเร่งอื่น เช่น ใช้คู่กับไธอาโซลและซัลฟีนาไมด์ เป็นต้น ตัวอย่างสารตัวเร่งกลุ่มนี้ เช่น TMTD, TMTM, TETD, DPTS เป็นต้น และสารกลุ่มนี้จำเป็นต้องใช้ซิงค์ออกไซด์กระตุ้นการทำงาน แต่ไม่จำเป็นต้องมีกรดไขมันได้ อุณหภูมิที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ประมาณ 125 - 135°C มักใช้กับผลิตภัณฑ์ที่โปร่งใส มีสีขาว หรือสีต่างๆ และใช้กับผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์

1.4) กลุ่มไธอาโซล (thiazole) เป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ถ้าใช้ไธอาโซลเป็นสารตัวเร่งตัวเดียวล้วนๆ ยางที่ได้จะมีความปลอดภัยในขบวนการผลิตมากกว่าใช้สารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงอื่นๆ ตัวอย่างสารกลุ่มไธอาโซล เช่น MBTS, MBT, ZMBT เป็นต้น (โดย MBTS และ MBT ช่วยให้ยางนิ่มลงในขณะที่ทำการบดผสมด้วย ส่วน ZMBT มีความเร็วในการวัลคาไนซ์มากกว่า MBTS จึงนิยมใช้กับน้ำยาง) ยางที่ใช้สารกลุ่มนี้สามารถวัลคา-ไนซ์ได้ทุกรูปแบบของการวัลคาไนซ์ โดยเฉพาะใช้กับเครื่องอัด ถ้าใช้สารกลุ่มนี้ร่วมกับสารตัวเร่งกลุ่มอื่น เช่น ไดไธโอคาร์บาเมตและไธยูแรม จะทำให้วัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น การใช้ไธอาโซลจำเป็นต้องมีซิงค์ออกไซด์และกรดไขมันร่วมด้วย

1.5) กลุ่มซัลฟีนาไมด์ (sulphenamide) เป็นสารตัวเร่งที่ delay action หรือให้เวลาสก๊อชยาวกว่าไธอาโซล เพราะเมื่อได้รับความร้อน ซัลฟีนาไมด์จะแตกตัวให้ MBT และเบสออกมา โดยที่ MBT จะทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ และเบสเป็นตัวกระตุ้นให้สารตัวเร่งทำงานเร็วขึ้น มอดุลัสสูงขึ้น สารกลุ่มนี้ เช่น CBS, TBBS, DCBS, Vulcacit AZ เป็นต้น การใช้ซัลฟีนาไมด์ร่วมกับไดไธโอคาร์บาเมตหรือไธยูแรม จะทำให้วัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น และจำเป็นต้องมีซิงค์ออกไซด์

อย่างน้อย 3 phr และกรดไขมันร่วมด้วย เพื่อให้ประสิทธิภาพสูงสุด ซัลฟีนาไมด์เป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางมีค่ามอดุลัสสูงมากและมีสมบัติเชิงกลดี รวมทั้งให้การวัลคาไนซ์แบบพลาโต (หรือ flat cure) แต่ซัลฟีนาไมด์จะเกิดการสลายตัวได้ง่าย เมื่ออยู่ใกล้ความชื้นหรือไอน้ำ ซึ่งจะทำให้ยางเกิดสก๊อชได้ง่ายขึ้นและวัลคาไนซ์ได้ช้าลง

1.6) กลุ่มกัวนิดีน (guanidine) เป็นสารตัวเร่งที่วัลคาไนซ์ได้ช้า มักใช้เป็นสารตัวเร่งเสริม เหมาะที่จะใช้กับยางหนา เพราะต้องใช้เวลาในการวัลคาไนซ์นาน สารกลุ่มนี้ เช่น DPG, DOTG, ออกตะ-โททิลไบกัวนิดีน (o-totyl biguanidine) เป็นต้น

การใช้สารตัวเร่ง 2 ชนิดในระบบเดียวกัน เป็นการเสริมประสิทธิภาพ (synergism) ให้สารตัวเร่งทำงานได้ดีขึ้น เช่น ใช้ TMTD คู่กับ CBS ทำให้ยางวัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น และยางที่ได้มีสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดและความต้านทานต่อการบ่มเร่งดีกว่าในกรณีที่ใช้ซัลเฟอร์กับ CBS เพียงอย่างเดียว (พรพรรณ, 2528:77)

2) สารกระตุ้น (activator) คือ สารที่ช่วยเสริมให้สารตัวเร่งทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น อาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์เป็นสารกระตุ้นที่สำคัญและนิยมใช้ คือ ซิงค์ออกไซด์ ส่วนสารกระตุ้นที่เป็นสารอินทรีย์ที่สำคัญ คือ กรดไขมัน เช่น กรด สเตียริก กรดลอริก กรดปาล์มมิติก เป็นต้น สารกระตุ้นมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ เมื่อใส่เข้าไปในยางในปริมาณเล็กน้อย จะทำให้ยางมีมอดุลัสสูงขึ้น และในบางครั้ง ถ้าไม่มีสารกระตุ้น จะไม่มีการวัล-คาไนซ์เกิดขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารกระตุ้น เพื่อทำให้ยางวัลคาไนซ์ได้อย่างสมบูรณ์

1.2.4 ระบบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide system)

ยางธรรมชาติที่วัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ที่มีแอนติออกซิแดนท์ที่เหมาะสม จะให้ยางที่มีความต้านทานต่ออุณหภูมิสูงดีที่สุดในระบบทั้งหมด แต่ระบบเปอร์ออกไซด์จะอบสุกช้าและสก๊อชเร็ว ระยะเวลาในการอบสุกประมาณ 6 เท่าของอายุครึ่งชีวิตของเปอร์ออกไซด์ และการมีเปอร์ออกไซด์หลงเหลืออยู่ จะทำให้ความต้านทานต่อการออกซิไดซ์ของยางเสียไป การใช้แอนติ-ออกซิแดนท์ต้องใช้อย่างระมัดระวัง เพราะแอนติออกซิแดนท์บางตัว จะทำให้การใช้เปอร์ออกไซด์ไม่ได้ผล ตัวอย่างแอนติออกซิแดนท์ดังกล่าว เช่น พารา-ฟินิลลีนไดอะมีน (p-phenylenediamines) เป็นต้น แอนติออกซิแดนท์ที่เหมาะสม ได้แก่ MBI หรือ ZMBI ผสมกับ TMQ และ ZDMC เป็นต้น

เปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ ไดคิวมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) จะให้ยางที่มีกลิ่นพิเศษ ส่วนเปอร์ออกไซด์ตัวอื่นที่ใช้ได้ คือ บิส-เตตระ-บิวทิวเปอร์ออกซี-ไอโซไพรพิวเบนซีน (bis-(t-butylperoxy-isopropyl benzene)) แต่จะอบสุกช้ากว่า

ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ จะมีความต้านทานการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี และสมบัติเชิงกลด้อยกว่าระบบกำมะถันปกติ และไม่เหมาะกับการวัลคาไนซ์ด้วยไอน้ำหรืออากาศร้อน เพราะสารเปอร์ออกไซด์จะกระตุ้นให้เกิดการออกซิไดซ์ได้ โดยปริมาณเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ประมาณ 2.5 – 3.0 phr ลักษณะพันธะการเชื่อมโยงเมื่อใช้เปอร์ออกไซด์ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ มีลักษณะดังรูปที่ 2.1

1.2.5 ระบบยูรีเทน (Urethane system)

ยางที่วัลคาไนซ์ด้วยระบบยูรีเทนมีความต้านทานต่อการรีเวอร์ชั่นได้ดี ทนต่อความร้อนได้สูง และมีสมบัติเชิงกลดี และระบบนี้สามารถใช้ร่วมกับระบบที่วัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ การปรับอัตราส่วนระหว่างสองระบบนี้ ทำให้สามารถปรับคุณสมบัติและราคาต้นทุนได้

ในการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ นอกจากสารที่ใช้ในการวัลคาไนซ์แล้ว ยังประกอบด้วยสารต่างๆ อีก ได้แก่

- สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (age resistors) ได้แก่ สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) สารแอนติโอโซแนนท์ (antiozonant) เนื่องจากยางสามารถเสื่อมสภาพเมื่อวางทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน ออกซิเจนและโอโซนเป็นตัวการสำคัญในการเสื่อมสภาพของยาง โดยมีโลหะหนัก ความร้อน แสง และความเครียดในยางเป็นตัวเร่งให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น สารแอนติออกซิ-แดนท์ช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ ได้แก่ 6PPD, BHT, Winstay S, PBN เป็นต้น ส่วนสารแอนติโอโซแนนท์ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับผิวยาง ตัวอย่างสารกลุ่มนี้ ได้แก่ ขี้ผึ้ง (wax) และสารเคมีกลุ่มพารา-ฟีนิลลีนไดอะมีน (p-phenylene diamine) เป็นต้น

- สารพลาสติไซเซอร์ (plasticizers) คือ สารที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและเพิ่มความสามารถในการใช้งาน ทำให้ความแข็งของยางลดลงและช่วยให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น บางครั้งมีชื่อเรียกต่างกันขึ้นอยู่กับหน้าที่และปริมาณการใช้ เช่น ถ้าใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 phr เรียกว่า สารช่วยในการผลิต (processing aid) ทำหน้าที่ช่วยในการแปรรูป ช่วยให้ผสมสารเคมีเข้าไปในยางได้ง่ายขึ้น ถ้าใช้ปริมาณ 5 – 15 phr เรียกว่า ซอฟท์เทนเนอร์ (softener) ทำหน้าที่ช่วยทำให้ยางนิ่มลงทั้งในขณะที่ยังไม่วัลคาไนซ์และวัลคาไนซ์แล้ว ช่วยให้ลดพลังงานในการแปรรูป และถ้าใช้มากกว่า 15 phr เรียกว่า เอกซ์เทนเดอร์ (extender) เพื่อลดต้นทุน เพราะสามารถเติมสารตัวเติมลงในยางได้มากขึ้น ตัวอย่างสารพลาสติไซเซอร์ ได้แก่ ผลิตภัณฑ์จากถ่านหิน เช่น คิวมาโรนอินดีน- เรซิน

(coumarone idene resin) หรือผลิตภัณฑ์จากน้ำมันปิโตรเลียม เช่น น้ำมันพาราฟินิก น้ำมันแนฟทีนิก น้ำมันอะโรมาติก หรือน้ำมันเอสเทอร์ เช่น DOP เป็นต้น

- สารตัวเติม (fillers) คือสารอื่นๆที่ไม่ใช่ยางที่เติมลงไปในยาง ซึ่งมีจุดประสงค์ต่างๆ ได้แก่เพื่อลดต้นทุน เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของยาง เพื่อช่วยในขบวนการผลิต ลดการบวมตัวของยางในน้ำมัน เพิ่มการนำไฟฟ้าของยาง และเพื่อเพิ่มการใช้งานของยาง สารตัวเติมแบ่งออกเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพ (reinforcing filler) ตัวอย่างเช่น เขม่าดำ ซิลิกา และสารตัวเติมชนิดไม่เสริมประสิทธิภาพ (non-reinforcing filler) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมซิลิเกต ดินขาว เป็นต้น

- สารอื่นๆ ได้แก่ สารหน่วง (retarder) ใช้เพื่อช่วยให้เวลาสก๊อชยาวขึ้น แต่เวลาการวัลคาไนซ์ยางยังคงเท่าเดิม ในกรณีการขึ้นรูปที่ต้องการให้ยางไหลได้เต็มเบ้าก่อนเกิดการวัลคา-ไนซ์ สารลดการติดไฟ (flame retarder) เพื่อให้ยางติดไฟได้ช้าลงหรือเพื่อไม่ให้ยางติดไฟลุกไหม้เอง และควรดับเมื่อเอาเปลวไฟออก สารทำให้เกิดฟอง (foaming agent) เพื่อใช้ในกรณีที่ต้องการใช้ยางเป็นฟอง สารแต่งสี (pigment) เพื่อให้ยางมีสีสัน เป็นต้น

1.3 สมบัติของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

1) ความแข็ง

ยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ให้มีความแข็งต่างๆกันได้มาก ตั้งแต่นิ่มมาก (เช่น 30 – 50 IRHD) ไปจนถึงความแข็งของอีโบไนต์ (98+ IRHD) การปรับความแข็งของยางธรรมชาติทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติมหรือเปลี่ยนปริมาณกำมะถัน ในช่วงของการใช้ปริมาณกำมะถัน 10 – 20 phr จะให้ยางที่มีความแข็งคล้ายหนัง เหมาะสำหรับงานกระเบื้องยางปูพื้นและยางลูกกลิ้ง แต่จะมีความแข็งต่ำและเสื่อมสภาพได้ง่าย

2) ความทนทานต่อแรงดึง

ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ จึงสามารถเกิดผลึกได้เมื่อถูกดึงยืด ทำให้ยางธรรมชาติมีความทนทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง แม้ไม่มีสารตัวเติมยางธรรมชาติยังคงมีความแข็งแรงสูง (ถึงประมาณ 30 MPa) ทำให้ยางธรรมชาติมีความเหมาะสมในการทำผลิตภัณฑ์ที่มีความบาง นิ่มและแข็งแรงได้ เช่น ถุงมือผ่าตัด ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย สาย-ยางยืด และยางรัด เป็นต้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีความแข็งแรงในตัวมันเองสูง จึงสามารถใช้สารตัวเติมราคาถูก เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตและดินขาว ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการความแข็งแรงเป็นสมบัติหลัก เช่น ยางรองพื้นรถ ยางปูพื้น และยางรองขาเก้าอี้ เป็นต้น ทำให้ยางธรรมชาติมีต้น

ทุนในการผลิตต่ำกว่ายางชนิดอื่น สำหรับการใช้สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพที่มีราคาแพง เช่น เขม่าดำและซิลิกา จะใช้ในกรณีที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น ดอกยางรถยนต์ พื้นและส้นรองเท้าที่มีคุณภาพสูง ยางหุ้มสายพานลำเลียงที่ใช้ลำเลียงสารที่ทำให้ยางมีความสึกหรอสูง เช่น แร่โลหะหรือกรวด เป็นต้น

3) ความสามารถในการยืด

ยางธรรมชาติที่ไม่ใส่สารตัวเติม สามารถยืดได้ถึงประมาณ 1,000% หรือมากกว่านั้น ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติจะลดลงตามปริมาณของสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้นและตามปริมาณของพันธะเชื่อมโยง สมบัติในการยืดได้สูงนี้ ทำให้ยางธรรมชาติสามารถใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดสูง เช่น เส้นยางยืด ยางรัดของและลูกโป่ง เป็นต้น

4) ความต้านทานต่อการฉีกขาด

ยางธรรมชาติมีความสามารถในการเกิดผลึกได้ดี ทำให้มีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ ยกเว้นยางพอลิยูรีเทนที่เชื่อมโยงด้วยพันธะไอโซไซยาเนต ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางธรรมชาติจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพร่วมด้วย

5) ความสามารถในการกระเด้งตัวและฮิสเทอร์รีซิสลอส (hysteresis loss)

ยางธรรมชาติมีความกระเด้งตัวสูงกว่ายางอื่นๆ ยกเว้นยางบิวทาไดอีนเท่านั้น ยางธรรมชาติมีความกระเด้งตัวสูงถึงประมาณร้อยละ 70 เมื่อไม่มีสารตัวเติม และจะมีค่าลดลงตามปริมาณสารตัวเติมที่เพิ่มขึ้น ความกระเด้งตัวสูงของยางธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่า ยางธรรมชาติไม่สะสมพลังงานไว้ในตัวเมื่อได้รับแรงกระทำ ทำให้ความร้อนสะสมในยางธรรมชาติน้อยกว่ายางอื่นๆ จึงเหมาะสมในการใช้ทำดอกยางรถบรรทุก ซึ่งมีความหนามาก ถ่ายเทความร้อนได้ยาก นอกจากนี้ความกระเด้งตัวสูงและฮิสเทอร์รีซิสต่ำของยางธรรมชาติ สามารถทำให้ลดลงได้โดยการใส่สารตัวเติม

6) การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

ยางธรรมชาติสามารถหักงอได้แม้อยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจะใช้ได้ในช่วงสั้นๆ แต่ถ้าเป็นเวลานาน เช่น มากกว่า 1 – 2 วัน จะเกิดผลึกขึ้น อัตราการเกิดผลึกจะสูงสุดที่อุณหภูมิ 26°C การใส่น้ำมันลงในยางธรรมชาติ ทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำลงไปจากเดิมได้อีก

7) ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ

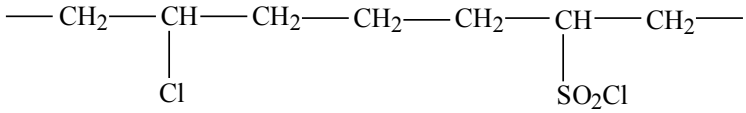
พันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาซึ่งทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อใช้กำมะถัน เป็นจุดอ่อนที่ทำให้ออกซิเจนและโอโซนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติไม่เหมาะกับงานหลายชนิดที่ต้องการความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูงและมีโอโซนอยู่ด้วย จึงมีการเติมสารแอนติออกซิแดนท์และสารตัวเร่งประเภทไธอาโซลลงในยางธรรมชาติ และอบในระยะเวลาสั้นที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป เพื่อให้ยางมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพดีขึ้น แต่ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติก็ยังด้อยกว่ายางสังเคราะห์

8) ความทนทานต่อความร้อน

สภาวะการใช้งานยางธรรมชาติค่อนข้างจะจำกัด เพราะในสภาวะที่รุนแรง จะทำให้อายุการใช้งานของยางธรรมชาติสั้นลง ยางธรรมชาติไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 7°C เป็นระยะเวลานานโดยเฉพาะยางบาง ซึ่งมีพื้นที่ที่ต้องสัมผัสกับบรรยากาศเป็นบริเวณกว้าง และยางธรรมชาติไม่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องดึงยืดยางในบรรยากาศที่มีโอโซนอยู่ จึงมีการใช้สารแอนติออกซิแดนท์และสารแอนติโอโซแนนท์เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติ ในกรณีที่ยางต้องสัมผัสกับออกซิเจนและโอโซน และการทำให้ยางธรรมชาติทนทานต่อความร้อนดีขึ้น สามารถทำได้หลายวิธี เช่น เลือกระบบและวิธีการวัลคาไนซ์ ระบบสารตัวเติม และระบบแอนติออกซิแดนท์ หรืออาจใช้ทั้ง 3 วิธีพร้อมๆกันได้ กล่าวคือ ใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบอีวีหรือเปอร์-ออกไซด์หรือยูรีเทน ทำให้ยางมีความทนทานต่อความร้อนดีขึ้น รวมทั้งการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำลง จะทำให้ยางสุกน้อยลง และการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม จะทำให้ยางทนต่อความร้อนได้มากขึ้น และการใช้แอนติออกซิแดนท์ผสมกัน จะทำให้ยางธรรมชาติทนต่อความร้อนได้นานขึ้น

2. ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน (Chlorosulfonated polyethylene : CSM)

ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเป็นยางสังเคราะห์ ที่สังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาพร้อมกันของ 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาคลอริเนชันและปฏิกิริยาคลอโรซัลโฟเนชันของพอลิเอทธิลีนในสภาวะสารละลาย (มีชื่อทางการค้าว่า ไฮพาลอน® (HYPALON®) ซึ่งผลิตโดยบริษัท Dupont Dow Chemical) มีโครงสร้างทางเคมีดังนี้ (Morton, 1987)



Chlorosulfonated polyethylene (HYPALON®)

จากลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่มีอะตอมคลอรีนอยู่บนสายโซ่โมเลกุลของพอลิ-เอทธิลีน ทำให้สายโซ่โมเลกุลไม่สม่ำเสมอ เป็นการยับยั้งการเกิดผลึกของพอลิเอทธิลีนและทำให้พอลิเอทธิลีนมีสมบัติเป็นอิลาสโตเมอร์มากขึ้น และการมีคลอรีนอยู่บนสายโซ่พอลิเอทธิลีน ทำให้มีความทนทานต่อน้ำมันและเปลวไฟได้ดีขึ้นด้วย ส่วนหมู่ซัลโฟนิลคลอไรด์ (sulfonyl chloride) เป็นบริเวณที่เกิดการเชื่อมโยงขึ้น ในกรณีที่ไม่ได้วัลคาไนซ์ยางด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีนกับยางเอทธิลีน-โพรพิลีน (EPDM) พบว่ายางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีนมีความทนทานต่อน้ำมันและเปลวไฟได้ดีกว่ายาง EPDM

ยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีนแบ่งได้หลายเกรด โดยแต่ละเกรดมีปริมาณคลอรีนแตกต่างกัน สมบัติส่วนใหญ่ของยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีนขึ้นอยู่กับปริมาณคลอรีนที่อยู่บนสายโซ่โมเลกุล กล่าวคือ เกรดที่มีปริมาณคลอรีนน้อย จะมีสมบัติคล้ายกับพอลิเอท-ธิลีน คือ แข็ง เพราะเกิดผลึกขึ้นในบางส่วน มีสมบัติทางไฟฟ้าดี ทนต่อความร้อนได้ดี และมีความยืดหยุ่นดีที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อปริมาณคลอรีนเพิ่มขึ้น จะมีความเป็นอิลาสโตเมอร์มากขึ้น แต่เกรดที่มีปริมาณคลอรีนสูงๆ จะมีความแข็งสูงกว่าในกรณีที่มีคลอรีนน้อย เพราะมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูงขึ้น และมีความทนทานต่อน้ำมันและเปลวไฟได้ดียิ่งขึ้น

2.1 สมบัติของยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีน

ยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีนที่ผลิตได้อยู่ในลักษณะเป็นชิ้นหรือแผ่นเล็กๆ มีสีขาวครีม ไม่มีกลิ่น สามารถเก็บรักษาไว้ได้โดยไม่เสียสมบัติที่ดีไป แบ่งได้หลายเกรด ตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ซึ่งสามารถสรุปลักษณะและสมบัติต่างๆของยางคลอโรซัลโฟเนตเตด-พอลิเอทธิลีนที่ยังไม่ได้วัลคาไนซ์ ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะและสมบัติของยางไฮพาลอนที่ยังไม่วัลคาไนซ์ (Dupont, 2003)

Description	Grade							
	20	30	45	HPG-6525	40S	40	4085	48
Chlorine content, %	29	43	24	27	35	35	36	43
Sulfur content, %	1.4	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Physical form	Chips	Chips	Chips	Chips	Chips	Chips	Chips	Chips
Color	White	White	White	White	White	White	White	White
Odor	None	None	None	None	None	None	None	None
Specific gravity	1.12	1.27	1.07	1.10	1.18	1.18	1.19	1.27
Mooney viscosity, ML 1+4 at 100°C (212°F)	28	30	37	90	46	56	94	78
Storage stability	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
Distinguishing features	Readily soluble in common solvent. Good low-temperature flexibility.	Readily soluble in common solvent. Forms hard, glossy films.	High uncured strength. Good heat resistance. Good low-temperature flexibility.	High polymer viscosity. Good low-temperature and heat resistance. Good processing at high extension.	Low polymer viscosity. Improves processing of dry, stiff stocks.	Medium polymer viscosity. Versatile, suitable for many application.	High polymer viscosity. Good green strength. Improves processing of soft or highly extended stocks.	High polymer viscosity. Excellent oil and fluids resistance. High uncured strength.

จากตารางที่ 2.3 สามารถแบ่งชนิดของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนตามลักษณะการนำไปใช้งานได้ดังนี้

2.1.1 เกรดสำหรับการใช้งานทั่วไป (Dupont, 2003)

ไฮพาลอน 40 เป็นเกรดที่สามารถนำไปแปรรูป แล้วให้ชิ้นงานที่มีสมบัติที่ดี โดยเฉพาะด้านความต้านทานต่อน้ำมันและสารเคมี และมีสมบัติดีปานกลางที่อุณหภูมิต่ำ

ไฮพาลอน 4085 มีความหนืดสูงกว่าไฮพาลอน 40 มีความสามารถในการแปรรูปดี มักนำไปใช้กับงานที่ต้องการค่าความแข็งแรงขณะไม่วัลคาไนซ์สูง

ไฮพาลอน 40S มีความหนืดต่ำ ไม่แข็ง สามารถนำไปแปรรูปได้ง่าย

ไฮพาลอน 40 และ 40S มีความหนืดปานกลาง ทนต่อความร้อนและน้ำมันได้ดี ถ้านำไปใช้ในงานเอกซทรูด จะให้ชิ้นงานที่มีลักษณะที่ดี การใช้งานส่วนใหญ่ นำไปหุ้มท่อ สายไฟฟ้า สายเคเบิล ใช้ทำลูกกลิ้งและชิ้นส่วนในการสปาร์กในรถยนต์ (Morton, 1987)

2.1.2 เกรดสำหรับใช้ในงาน Dry application

ไฮพาลอน 45 เป็นเกรดที่มีความเป็นเทอร์โมพลาสติกมากกว่าไฮพาลอน 40 ที่อุณหภูมิที่ขึ้นรูปมีความหนืดต่ำกว่าไฮพาลอน 40 แต่ที่อุณหภูมิห้องมีความแข็งแรงขณะไม่วัลคา-ไนซ์และมีความแข็งสูงกว่าไฮพาลอน 45 มีปริมาณคลอรีนน้อยกว่าไฮพาลอน 40 ที่อุณหภูมิต่ำ จึงมีความยืดหยุ่นสูงกว่า แต่ทนต่อน้ำมันและสารเคมีได้น้อยลง นอกจากนี้แล้วไฮพาลอน 45 ยังมีความทนต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อความร้อนได้ดีกว่าเกรดสำหรับใช้งานทั่วไป (ไฮพาลอน 45 เป็นพอลิเมอร์ผลึก)

HPG-6525 มีความหนืดสูง สามารถยืดได้มากเช่นเดียวกับไฮพาลอน 45 มีปริมาณคลอรีนต่ำกว่าไฮพาลอน 40 ทำให้มีสมบัติที่อุณหภูมิต่ำดีเยี่ยมและมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งดี มีต้นทุนในการผสมต่ำกว่า เพราะสามารถเติมสารตัวเติมได้มากและใช้สารพลาสติไซเซอร์เพียงเล็กน้อย แต่จะมีความต้านทานน้ำมันและเปลวไฟได้น้อยลง

ไฮพาลอน 48 เป็นเกรดที่มีปริมาณคลอรีนสูง มีความเป็นเทอร์โมพลาสติกอยู่ระหว่างไฮพาลอน 40 และไฮพาลอน 45 มีความต้านทานต่อน้ำมันได้ดีมาก แต่สมบัติที่อุณหภูมิต่ำด้อยกว่าไฮพาลอน 40 ต้านทานต่อการซึมผ่านของก๊าซและฟรีออนได้ดีมาก จึงนำไปใช้ในงานหุ้มท่อน้ำในเครื่องปรับอากาศ (Morton, 1987) ไฮพาลอน 48 มีสมบัติของยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์ดี (แต่ยังด้อยกว่าไฮพาลอน 45) จึงสามารถนำไปใช้งานในขณะที่ยังไม่วัลคาไนซ์ได้ ซึ่งให้สมบัติที่ทนต่อน้ำมันและเปลวไฟดีกว่าไฮพาลอน 45 แต่ที่อุณหภูมิต่ำ มีความยืดหยุ่นต่ำ

2.1.3 เกรดที่นำไปใช้งานที่เป็นสารละลาย

ไฮพาลอน 20 และไฮพาลอน 30 ละลายได้ง่ายในตัวทำละลายอินทรีย์ และสารละลายที่ได้มีความหนืดสูง แม้ว่าจะมีปริมาณของแข็งสูงก็ตาม สารละลายที่ได้นำไปใช้ในการเคลือบผืนผ้า ใช้เคลือบหลังคา และใช้เคลือบผลิตภัณฑ์อิลาสโตเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อความสวยงาม ป้องกันโอโซนและสารเคมีต่างๆ ฟิล์มไฮพาลอน 20 มีความยืดหยุ่นและยืดได้สูงกว่าไฮพาลอน 30 ที่อุณหภูมิต่ำ แต่ฟิล์มไฮพาลอน 30 ทนต่อน้ำมันและสารเคมีได้ดีกว่า มีความแข็งและเป็นมันวาวมากกว่าไฮพาลอน 20 แต่ทั้งยางไฮพาลอน 20 และไฮพาลอน 30 ไม่เหมาะที่นำไปใช้เป็นยางแห้ง เพราะขึ้นรูปได้ยากและให้สมบัติเชิงกลต่ำ

ไฮพาลอน 48 สามารถใช้ในงานที่เป็นสารละลายได้เช่นกัน เพราะทนต่อน้ำมันและสารเคมีได้ดี สารละลายที่ได้มีความหนืดสูงกว่าสารละลายของไฮพาลอน 20 และไฮพาลอน 30 ฟิล์มที่ได้มีลักษณะเหมือนกับฟิล์มไฮพาลอน 30 แต่ยืดได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ

นอกจากเกรดต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมียางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเกรดอื่นๆอีกได้แก่ (Morton, 1987)

LD-999 มีความหนืดใกล้เคียงกับไฮพาลอน 40 จึงนิยมนำไปใช้ในงานวัสดุหุ้มสายไฟและสายเคเบิล และผสมกับไฮพาลอน 48 และ 48S เพื่อลดความหนืดให้น้อยลงในการทำท่อ (hose)

ไฮพาลอน 623 (มีความหนืดต่ำกว่า ไฮพาลอน 45) เป็นพอลิเมอร์ผลึกมีความทนทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนได้ดีมาก มีความยืดหยุ่นดีที่อุณหภูมิต่ำ และมีสมบัติทางไฟฟ้าดี นำไปใช้เป็นยางปูพื้นสระว่ายน้ำ หลังคา และใช้หุ้มสายไฟฟ้า

ยางไฮพาลอน 48S ใช้เป็นสารเคลือบ เพราะเมื่ออยู่ในสภาวะสารละลายมีความหนืดสูงกว่าไฮพาลอน 30 แต่มีการแตกหักได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ (ฟิล์มมีความเสียดทานต่ำ)

2.2 การวัลคาไนซ์ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน

สารเคมีที่ใช้ในการผสมยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน แบ่งได้เป็นดังนี้

2.2.1 สารจับกรดและสารกระตุ้น (acid acceptor/activator)

การเลือกใช้สารจับกรดขึ้นอยู่กับสารวัลคาไนซ์ที่ใช้และลักษณะการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่ได้ สารจับกรดทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความเสถียรทางความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ โดยจะดูดซับกรดที่ถูกปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการวัลคาไนซ์ และเนื่องจากมีความเป็นด่างที่เพียงพอทำให้เกิดปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ขึ้น สารจับกรดที่นำมาใช้เป็นสารพวกโลหะออกไซด์ ที่ใช้ในการ

วัลคาไนซ์ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน คือ แมกนีเซีย (magnesia) และลิตทาร์ด (litharge) โดยใช้ลิตทาร์ดในชิ้นงานที่ต้องการความต้านทานต่อน้ำ สารเคมี และสมบัติการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดดี (compression set) แต่ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีสีขาวหรือมีสีสัน เพราะเลดซัลไฟด์ (lead sulfide) ในลิตทาร์ดทำให้ชิ้นงานมีสีเข้ม แต่ในปัจจุบันไม่นิยมนำลิตทาร์ดมาใช้ เพราะเป็นสารประกอบของตะกั่ว ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกาย ส่วนแมกนีเซียมีราคาถูกกว่า มีความปลอดภัยก่อนขึ้นรูป (processing safety) และชิ้นงานมีการยืดได้มากกว่าการใช้ลิตทาร์ด จึงนิยมนำมาใช้กับงานทั่วๆไป ที่ไม่ต้องการความต้านทานต่อน้ำ สารเคมีและการคงตัวที่สูงมากนัก ถ้าหากใช้สารทั้งสองชนิดร่วมกัน ทำให้มีความต้านทานต่อความร้อนได้ดีมาก ในการเก็บรักษาแมกนีเซียต้องอยู่ในสภาวะที่แห้ง เพราะความชื้นจะทำให้ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาลดลง นอกจากนี้ยังมีสารอีก 2 ชนิด ที่นำมาใช้เป็นสารจับกรด คือ อีพ๊อกซีเรซิน (epoxy resin) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium hydroxide) (Dupont, 2003) ยกเว้นซิงค์ออกไซด์และสารประกอบของซิงค์ออกไซด์ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ เพราะปฏิกิริยาของซิงค์ออกไซด์ ทำให้เกิดซิงค์คลอไรด์ขึ้น ซึ่งจะทำให้พอลิ-เมอร์เกิดการเสื่อมสภาพ เมื่อถูกบ่มเร่งด้วยความร้อนหรือสภาวะอากาศปกติ

ส่วนสารกระตุ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารจับกรด ทำให้ปริมาณสารจับกรดที่ต้องใช้ลดลง และยังช่วยลดต้นทุน ทำให้ความหนืดลดลง ช่วยให้เก็บยางคอมปาวด์ได้นานขึ้น

2.2.2 สารตัวเติม

สารตัวเติมที่นิยมใช้มาก คือ เขม่าดำ เพราะชิ้นงานที่มีเขม่า จะมีสมบัติทางกายภาพดี มีความต้านทานต่อสารเคมี มีการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) และมีความต้านทานการดูดซับน้ำได้ดี SRF เป็นเขม่าดำที่ใช้สำหรับงานทั่วไป เพราะให้สมบัติต่างๆดี ในชิ้นงานที่ไม่มีสี ใช้สารตัวเติมพวก mineral fillers เช่น ซิลิกา อะลูมินา ดินขาว แบเรียมซัลเฟตชนิดตกตะกอน (blanc fixe) โดยในการเลือกใช้ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น ถ้าต้องการให้ชิ้นงานมีความต้านทานต่อความร้อนได้ดี นิยมใช้แบเรียมซัลเฟตชนิดตกตะกอน ส่วนดินขาวชนิดให้ความร้อน (calcined clay) ให้ชิ้นงานที่มีสมบัติทางไฟฟ้าดีและมีความทนต่อน้ำได้ดีมาก เป็นต้น

2.2.3 พลาสติไซเซอร์ (plasticizers)

การเลือกใช้พลาสติไซเซอร์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้ากัน กระบวนการขึ้นรูป ราคาและสมบัติที่ต้องการของชิ้นงาน (Dupont, 2003) น้ำมันปิโตรเลียมชนิดอะโรมาติก (aromatic petroleum oil) เป็นที่นิยมนำมาใช้มาก เพราะมีราคาถูก พลาสติไซเซอร์ชนิดเอสเทอร์จะใช้กับชิ้นงานที่มีสีอ่อนและมีสมบัติที่อุณหภูมิต่ำดี และพลาสติไซเซอร์ชนิด liquid chlorinated

paraffins ให้ชิ้นงานที่มีสมบัติทนต่อเปลวไฟและสภาพแวดล้อมได้ดี ส่วนพลาสติไซเซอร์ชนิดพอลิเมอร์ เกิดการระเหยได้น้อยกว่าพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่นๆ และให้ชิ้นงานที่ทนต่อความร้อนได้ดี

2.2.4 สารช่วยในการแปรรูป (processing aids)

สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดสเตียริก ขี้ผึ้งชนิดพาราฟิน พอลิเอทธิลีนไกลคอล พอลิเอทธิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นต้น กรดสเตียริกสามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่เหมาะกับยางที่ใช้ลิตทาร์ดและมาลีอิไมด์ (maleimide) เป็นสารวัลคาไนซ์ เพราะในยางที่ใช้ลิตทาร์ด จะมีเวลาสก๊อชสั้นลง และในยางที่ใช้มาลีอิไมด์จะวัลคาไนซ์ช้าลง ส่วนขี้ผึ้งชนิดพาราฟินพอลิเอทธิลีนไกลคอล และพอลิเอทธิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นสารช่วยในการแปรรูปที่มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน โดยในยางที่ใช้ลิตทาร์ดจะไม่มีผลต่อเวลาสก๊อช แต่จะมีประสิทธิภาพต่ำ เมื่อใช้ในยางที่มีมาลีอิไมด์เป็นสารวัลคาไนซ์

2.2.5 สารวัลคาไนซ์ (vulcanizing agents)

สารที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางคลอโรซัลโฟเนเตดพอลิเอทธิลีนมี 2 ระบบ ดังนี้

ก) การวัลคาไนซ์แบบอิออนิก (ionic cure) ระบบนี้ใช้สารจับกรดที่เป็นโลหะออกไซด์ที่เป็นไดวาเลนต์ (divalent metal oxide) และวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีความชื้นเป็นตัวเร่งให้เกิดการวัลคาไนซ์ ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีค่ามอดุลัสสูง ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น การวัลคาไนซ์จะช้าลง การวัลคาไนซ์ด้วยวิธีนี้มักใช้ในการวัลคาไนซ์ยางปูพื้นสระว่ายน้ำและวัสดุสำหรับมุงหลังคา

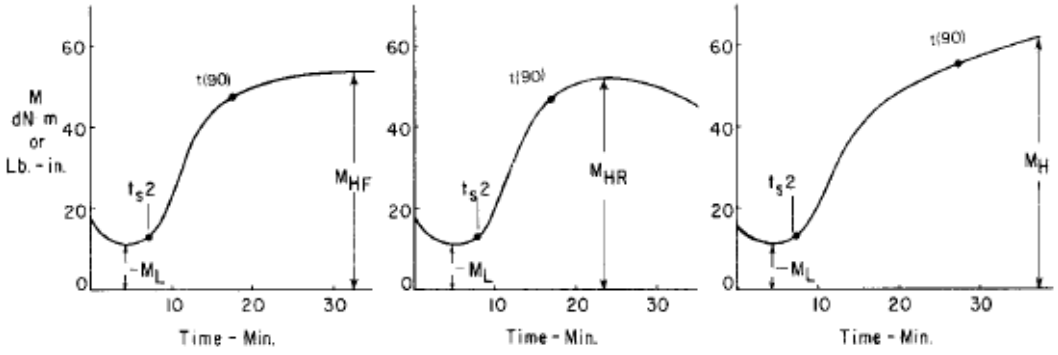
ข) การวัลคาไนซ์แบบโควาเลนต์ (covalent cure) เป็นระบบที่ใช้มากในการวัลคาไนซ์ยางชนิดนี้ โดยแบ่งได้เป็น 3 ระบบ คือ การวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ การวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ และการวัลคาไนซ์ด้วยมาลีอิไมด์

การวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ (sulfur cure) เป็นระบบที่ใช้มาก เพราะมีต้นทุนต่ำ และยางคอมปาวด์สามารถนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง ระบบนี้สามารถใช้สารที่ให้ซัลเฟอร์ในการวัลคาไนซ์ได้และอาจใช้สารเคมีต่างๆร่วมกัน เช่น ใช้ลิตทาร์ดร่วมกับ TMTD และซัลเฟอร์ ในยางดำ จะได้ยางที่เวลาสก๊อชยาว มีการวัลคาไนซ์ได้อย่างสมบูรณ์ มีความต้านทานต่อการกดอัดดี ทนต่อน้ำและสารเคมีได้ดี แต่ถ้าต้องการให้วัลคาไนซ์เร็วขึ้น จะใช้ TETD กับซัลเฟอร์ หรือ Tetrone®A กับ MBTS ร่วมกับ TMTD และซัลเฟอร์ วิธีนี้ทำให้ยางทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยความร้อนได้ดีขึ้น แต่มีราคาแพงและทำให้เวลาสก๊อชสั้นลง ส่วนการใช้เพนตะอีริไทรทอล (pentaerythritol) ร่วมกับแมกนีเซีย จะช่วยให้เริ่มวัลคาไนซ์เร็วขึ้นและวัลคาไนซ์ได้สมบูรณ์มากขึ้น (Dupont, 2003)

การวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ (peroxide cure) จะได้ยางที่ทนต่อความร้อนได้ดี ความต้านทานต่อการกดอัดดี และไม่ทำให้สีเปลี่ยน ระบบนี้จำเป็นต้องมีสารจับกรด เมื่อเติมสารพวกไตรอัลลิลไซยานูเรต (triallyl cyanurate) ลงในยางคอมปาวด์ จะทำให้ประสิทธิภาพของเปอร์-ออกไซด์ดีขึ้น และถ้าเติมพลาสติไซเซอร์พวกคลอริเนตพาราฟิน (chlorinated paraffin) ในปริมาณไม่เกิน 40 phr จะทำให้วัลคาไนซ์ได้เร็วขึ้น แต่น้ำมันอะโรติกทำให้ยางวัลคาไนซ์ช้าลง

การวัลคาไนซ์ด้วยมาลีอิไมด์ (maleimide cure) สารที่ใช้เป็นสารวัลคาไนซ์ คือ HVA-2 (N,N′-m-phenylenedimaleimide) โดยมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารจับกรด และสารกลุ่มเอมีนเป็นสารตัวเร่ง ยางที่ได้จะมีเวลาสก๊อชยาว ทนต่อน้ำและการบ่มเร่งด้วยความร้อนได้ดี มีความต้านทานต่อการกดอัดดี ระบบนี้จะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อวัลคาไนซ์ด้วยไอน้ำความดันสูง (high-pressure steam) แต่การวัลคาไนซ์ด้วยไอน้ำความดันต่ำ (low-pressure steam) จะทำให้วัลคา-ไนซ์ช้าลง

ลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเป็นแบบมาร์ชชิ่ง (marching cure) แต่ในการลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางชนิดอื่นๆ เช่น ยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอิพ็อกไซด์ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน เป็นต้น มีลักษณะการวัลคาไนซ์ได้ 3 แบบ คือ แบบพลาโต (plateau cure หรือ flat cure) แบบรีเวอร์ชั่น (reversion cure หรือ peaky cure) และแบบมาร์ชชิ่ง ซึ่งกราฟการวัลคาไนซ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



(a) (b) (c)

รูปที่ 2.2 กราฟแสดงลักษณะการวัลคาไนซ์แบบต่างๆ (a) แบบพลาโต, (b) แบบรีเวอร์ชั่น และ (c) แบบมาร์ชชิ่ง (ASTM D2084)

2.3 สมบัติของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนที่วัลคาไนซ์แล้ว

1) ความต้านทานต่อน้ำมันและสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ ขึ้นอยู่กับปริมาณคลอรีนในยางคลอโร-ซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 (Morton, 1987) สมบัติที่อุณหภูมิต่ำสามารถควบคุมได้ โดยชนิดของพลาสติไซเซอร์ที่เลือกใช้

ตารางที่ 2.4 ผลของปริมาณคลอรีนต่อสมบัติที่อุณหภูมิต่ำและความต้านทานต่อน้ำมัน

	% Chlorine	Glass-transition temperature, °C	% Swell[a]	Brittleness temperature, °C[b]
Hypalon 45	24	-30	86	-65
Hypalon 40	36	-20	38	-60
Hypalon 48	43	0	13	-14

[a]แช่ในน้ำมัน ASTM เบอร์ 3 ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

[b]ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D746

2) ความต้านทานต่อความร้อน ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีความต้านทานต่อความร้อนได้ดีถึงดีเยี่ยม ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการผสม แต่ยางคลอโรซัลโฟเนตเตต-พอลิเอทธิลีนเกรดที่มีปริมาณคลอรีนต่ำทนความร้อนได้ดีกว่าเกรดที่ปริมาณคลอรีนสูงเล็กน้อย

3) ความต้านทานต่อเปลวไฟ เกรดที่มีปริมาณคลอรีนสูงๆจะทนต่อเปลวไฟได้ดี และถ้าเติมสารเคมีพวกคลอริเนตพลาสติไซเซอร์ (chlorinated plasticizers) โบรมิเนตเรซิน (brominated resins) แอนติมอนิไทรออกไซด์ (antimony trioxide) และสารตัวเติมพวกคาร์บอเนต จะทำให้ทนต่อเปลว-ไฟได้ดียิ่งขึ้น แต่ถ้าเติมสารไฮเดรตอะลูมินา (hydrated alumina) จะช่วยลดปริมาณควันให้น้อยลง

4) ความต้านทานต่อน้ำ แมกนีเซียที่มีในยางคอมปาวด์มีความว่องไวต่อน้ำมาก จึงใช้ลิตทาร์ดแทนแมกนีเซียในยางดำที่วัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ ส่วนในระบบอื่นๆใช้ไดเบสิกเลดพาธาเลท (dibasic lead phthalate) แทนแมกนีเซีย ทำให้ยางทนต่อน้ำได้ดีขึ้น และความต้านทานต่อน้ำยังขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวเติม กล่าวคือ เขม่าดำให้ความต้านทานต่อน้ำได้ดีที่สุด ส่วนในยางสีอื่นๆ จะใช้ดินขาวชนิดให้ความร้อน

5) ความต้านทานต่อสภาวะอากาศ ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนที่วัลคาไนซ์แล้วและเกรดที่มีความเป็นผลึกสูงที่ยังไม่วัลคาไนซ์ ทนต่อสภาวะอากาศได้ดีและยางเปลี่ยนสีได้ยาก และสารเคมีในยางคอมปาวด์ยังช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา

6) ความต้านทานต่อออกซิเจนและโอโซน ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนที่วัลคาไนซ์แล้ว มีความต้านทานโอโซนและปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ไม่จำเป็นต้องเติมสารแอนติโอโซแนนท์ แต่ในกรณีที่เติมสารแอนติโอโซแนนท์ จะทำให้ทนต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนในสภาวะที่รุนแรงได้ดีขึ้น

7) สมบัติทางไฟฟ้า เกรดที่มีปริมาณคลอรีนต่ำๆ มีความเป็นฉนวนที่ดีมาก ในยางคอมปาวด์ที่มีเขม่าดำเล็กน้อยหรือไม่มีเขม่าดำ และทนต่อน้ำได้ดี จะมีสมบัติทางไฟฟ้าดีเช่นกัน เมื่อเกิดการเผาไหม้ ยางมีควันและก๊าซที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเกิดขึ้นน้อย

8) ความต้านทานต่อสารเคมี ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนที่วัลคาไนซ์แล้วทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากการกัดกร่อนของสารเคมีได้ดี โดยในชิ้นงานที่ต้องการให้ทนต่อสารเคมีได้ดี จะเติมลิตทาร์ด แมกนีเซีย และสารตัวเติมพวกแบเรียมซัลเฟตชนิดตกตะกอน และแบไรท์ ความต้านทานต่อตัวทำละลายสังเกตจากความต้านทานต่อการบวมตัวของยางวัลคาไนซ์

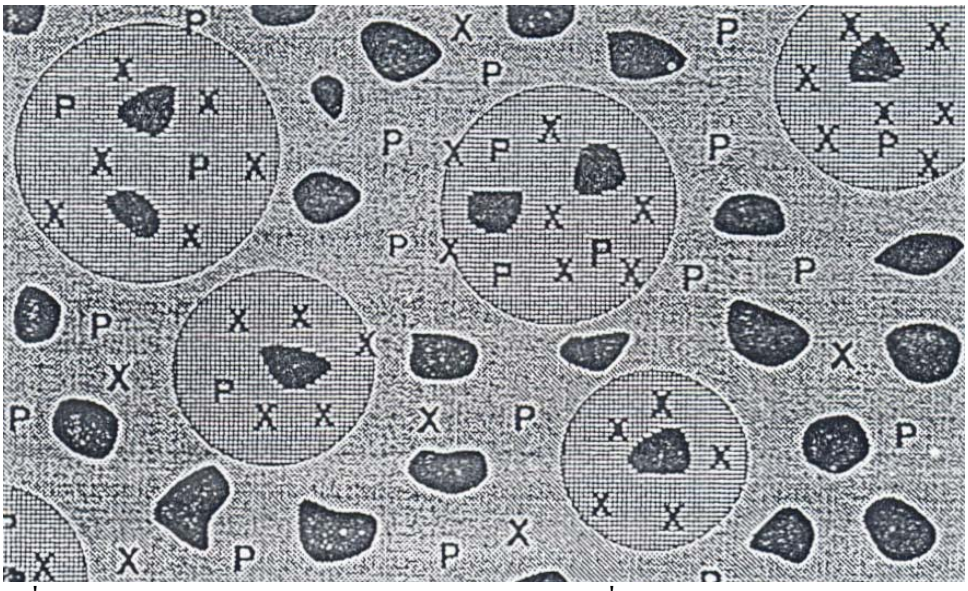
9) การกระดอนตัว ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนที่มีปริมาณต่ำหรือปานกลาง มีค่าการกระดอนตัวประมาณ 55 – 75% แต่ในเกรดที่มีปริมาณคลอรีนสูงๆ จะมีการกระดอนตัวต่ำ

3. ยางผสม (Rubber blend) (Tinker and Jones, 1998)

การเตรียมยางผสมเป็นการปรับปรุงหรือพัฒนาให้ได้ยางที่มีสมบัติดีขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในงานเฉพาะด้านได้ ซึ่งในการเตรียมยางผสมนั้น จะเป็นการนำยางสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดมาผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยใช้เครื่องผสมแบบเปิดหรือแบบปิด แล้วนำยางผสมที่ได้ไปวัลคาไนซ์ เพื่อให้ยางคงรูปหรือให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยาง ซึ่งในการเตรียมยางผสมจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อลักษณะเฉพาะและสมบัติของยางผสม ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของยางผสมได้แก่

1) อัตราส่วนของยางแต่ละชนิดในยางผสม สามารถควบคุมได้ง่าย โดยจะแบ่งลักษณะสัณฐานวิทยา (phase morphology) ได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1.1) ชนิดของเฟส (phase type) จะมี 2 ชนิด คือ เฟสต่อเนื่อง (continuous phase) และเฟสกระจาย (dispersion phase) กล่าวคือ ยางชนิดหนึ่งจะกระจายตัวอยู่ในยางอีกชนิดหนึ่ง โดยจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยางแต่ละชนิดที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รูปแบบของลักษณะทางสัณฐานของยางผสมที่ประกอบด้วยยางสองชนิด คือ A และ B, ที่มีทั้งสารตัวเติม, พลาสติไซเซอร์ (P) และการเชื่อมโยง (X) ที่เกิดขึ้น (Tinker and Jones, 1998)

1.2) ขนาดของเฟส (phase size) จะควบคุมได้ค่อนข้างยาก ขึ้นอยู่กับการเตรียมยางผสม โดยในการผสมจะใช้แรงเฉือนสูง เพื่อให้ได้ เฟสกระจายที่มีขนาดเล็ก แต่ในยางบางชนิดสายโซ่จะขาดในระหว่างที่ทำการผสม ซึ่งจะทำให้ผสมได้ง่ายขึ้น (แต่เมื่อผสมนานขึ้นเฟสกระจายจะมีขนาดเพิ่มขึ้น) ในทางปฏิบัติจึงต้องมีการกำหนดเวลาในการผสม เพราะในขณะที่ทำการผสมอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้น

2) แรงตึงผิวระหว่างเฟส (interfacial tension) จะเป็นตัวกำหนดขนาดของเฟสกระจาย กล่าวคือ ถ้าแรงตึงระหว่างผิวมีค่าต่ำ เฟสกระจายก็จะมีขนาดเล็ก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงเฉือนที่ใช้ ยางบางชนิด (เช่น NR, SBR, BR) เป็นยางที่ไม่มีขั้ว มีค่าคงที่ของการละลาย (solubility parameter) ใกล้เคียงกัน และมีค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสต่ำ ถ้าค่าคงที่ของการละลายของยาง 2 ชนิด มีค่าแตกต่างกันมาก จะมีค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสสูง และเฟสกระจายจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถผสมยางทั้งสองชนิดนี้เข้าด้วยกันได้

การยึดติดระหว่างเฟส (interfacial adhesion) และการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางทั้งสองชนิด ขึ้นอยู่กับแรงตึงผิวระหว่างเฟส ถ้าค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟสมีค่าสูงจะทำให้การผสมยางทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันทำได้ยาก และโอกาสที่จะเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางทั้งสองชนิดก็จะน้อยลง ทำให้ยางทั้งสองชนิดหลุดหรือแยกจากกันได้ง่ายขึ้น

3) การกระจายตัวของสารตัวเติม สารตัวเติมจะกระจายตัวอยู่ระหว่างทั้งสองเฟสอย่างสม่ำเสมอ สารตัวเติมที่ใช้ทั่วไป เช่น เขม่าดำ จะเตรียมให้อยู่ในลักษณะของมาสเตอร์แบทช์ ซึ่งจะควบคุมปริมาณของเขม่าดำได้ง่าย โดยปกติยางจะทำปฏิกิริยากับผิวของเขม่าดำได้ดีมาก แต่ในยางผสมบางชนิดเขม่าดำจะกระจายได้ค่อนข้างยาก

4) การกระจายตัวของพลาสติไซเซอร์ จะมีผลต่อสมบัติของยางผสมเช่นกัน โดยที่พลาสติไซเซอร์จะกระจายตัวอย่างไม่อย่างสม่ำเสมอ แต่จะกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่องมากกว่า

5) การกระจายตัวของการเชื่อมโยง ถ้าการเชื่อมโยงระหว่างเฟสในยางผสมไม่สม่ำเสมอ จะทำให้สมบัติทางกายภาพของยางผสมมีค่าต่ำ สาเหตุที่ทำให้การเชื่อมโยงเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีตำแหน่งที่จะเกิดการเชื่อมโยงแตกต่างกันมากเกินไป ดังนั้นในยางที่มีความไม่อิ่มตัวสูง จึงต้องเติมซัลเฟอร์ลงไปเพื่อช่วยในการวัลคาไนซ์ นอกจากนี้ปริมาณสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง เช่น ซัลเฟอร์ สารตัวเร่ง และสารประกอบอื่นๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการวัลคาไนซ์ ยังเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ผลต่อความสม่ำเสมอของการเชื่อมโยง (การกระจายตัวของการเชื่อมโยงสามารถนำไปศึกษาลักษณะความหนาแน่นของการเชื่อมโยงได้)

3.1 ยางธรรมชาติผสม (Natural rubber blends)

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีข้อดีในหลายๆด้าน แต่ยางธรรมชาติยังมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานบางประเภท เช่น ในงานที่ต้องสัมผัสกับแสงแดด และความร้อนสูง หรือในงานที่ต้องสัมผัสกับน้ำมัน เนื่องจากยางธรรมชาติมีข้อด้อย คือ จะเสื่อมสภาพได้เร็วภายใต้โอโซน แสงแดด ความร้อนสูง และจะไม่ทนต่อสารละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น น้ำมัน ก๊าซโซลีน เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงข้อด้อยของยางธรรมชาติ โดยนำยางธรรมชาติไปผสมกับยางสังเคราะห์ เพื่อให้ได้ยางผสมที่มีสมบัติเช่นเดียวกับสมบัติเด่นของยางธรรมชาติและสมบัติของยางสังเคราะห์ ทำให้สามารถนำยางผสมที่ได้ไปใช้งานได้หลากหลายขึ้น ตัวอย่างเช่น ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ นำไปใช้กับงานที่ต้องการให้ความต้านทานต่อน้ำมันและมีสมบัติทางกายภาพดี หรือยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอทธิลีน-โพรพิลีน (EPM) นำไปใช้ในงานที่ต้องสัมผัสกับโอโซน ส่วนยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางธรรมชาติอิพ๊อกซิไดซ์ (ENR) ใช้กับงานที่ต้องการให้มีสมบัติการหน่วง (damping) สูงและมีสมบัติทางกายภาพดี เป็นต้น

3.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้องกับยางธรรมชาติผสม

Okwu และ Okieimen (1999) ทำการเตรียม FC-ENR (formic acid crosslinked epoxidized natural rubber) ที่มีปริมาณหมู่อิพ๊อกไซด์ 33 โมลเปอร์เซ็นต์ ในสภาวะ pre-crosslinking แล้วนำไปผสม โดยไม่เติมสารวัลคาไนซ์ และนำไปผสมกับยางธรรมชาติ ได้ยางคอมปาวด์ 4 สูตร คือ FC-ENR (K), NR (L), FC-ENR/NR blend 25/75 (M), FC-ENR/NR blend 50/50 (N) ทุกสูตรเติมเขม่าดำชนิด ISAF 30 phr และวัลคาไนซ์ด้วยระบบเซมิอีวี ยกเว้นสูตร FC-ENR แล้วทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของยางแต่ละสูตร พบว่า ในระหว่างที่บดยางด้วยลูกกลิ้ง การเติม FC-ENR ลงในยางธรรมชาติ ทำให้ยางธรรมชาติมีความเป็นพลาสติกมากขึ้น และการเติม FC-ENR 25 phr ทำให้สมบัติต่างๆของยางธรรมชาติ เช่น ค่ามอดุลัส ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดดีขึ้น ค่ามอดุลัสและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมีผลต่อความต้านทานต่อการสึกหรอ แต่สภาวะการเตรียมยางผสมไม่มีผลต่อความต้านทานต่อการสึกหรอ

Ismail และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสม 2 ชนิด คือ ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพ๊อกซิไดซ์ 25 (ENR 25) กับยางธรรมชาติ (SMR L) และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพ๊อกซิไดซ์ 50 (ENR 50) กับยางธรรมชาติ (SMR L) ด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) โดยในยางผสมจะแปรปริมาณยาง ENR ตั้งแต่ 0 – 100% และทำการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาดทั้งก่อนและหลังอบที่อุณหภูมิ 100˚C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างแบบรูปจันทร์เสี้ยว (die A ตามมาตรฐาน ASTM D624) และดึงชิ้นตัวอย่างด้วยความเร็ว 50 cm/min พบว่า เมื่อ ENR เพิ่มขึ้น เวลาสก๊อชและเวลาวัลคาไนซ์จะสั้นลง แต่ค่าทอร์คสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พันธะคู่ถูกกระตุ้นด้วยหมู่อิพ๊อกไซด์ในยาง ENR และยังทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้นเช่นกัน โดยยาง ENR 50 จะค่าที่มากกว่ายาง ENR 25 เพราะมีหมู่อิพ๊อกไซด์มากกว่า กล่าวคือ ยางผสมระหว่างยาง ENR 25 กับยางธรรมชาติมีเวลาสก๊อชและเวลาวัลคาไนซ์นานกว่ายางผสมระหว่างยาง ENR 50 กับยางธรรมชาติ และจากค่าทอร์คกับค่า loss tangent ที่ได้ ทำให้ทราบว่า ยางผสมจะมีสมบัติการกระดอนตัวดี เมื่อมีปริมาณยาง ENR น้อยกว่า 25% หรือมากกว่า 50% ส่วนค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้น เมื่อยาง ENR เพิ่มขึ้นถึง 50% เนื่องจากมีการกระจายพลังงานมากขึ้นตามปริมาณยาง ENR ซึ่งสังเกตได้จากค่า loss tangent ที่เพิ่มขึ้น แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนมีค่าลดลง เพราะยาง ENR มีสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนไม่ดี และยางผสมระหว่างยาง ENR 25 กับยางธรรมชาติ มีการเปลี่ยนแปลงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนน้อยกว่ายางผสมระหว่างยาง ENR 50 กับยางธรรมชาติ เพราะยาง ENR 25 มีความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนดีกว่ายาง ENR 50

Zaharescu และคณะ (2000) ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM) ด้วยเครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) ใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 335 – 435 K แล้วคำนวณหาค่าความจุความร้อนจำเพาะตามวิธี O'Neill 's method ซึ่งจะใช้อะลูมิเนียมเป็นสารมาตรฐาน พบว่า ความเสถียรทางความร้อนจะลดลง ถ้ามียางธรรมชาติอยู่ เพราะในยางธรรมชาติมีปริมาณของพันธะคู่อยู่มาก และในการจะดูผลของยางธรรมชาติต่อพฤติกรรมทางความร้อนของยางผสม สามารถทำได้อีกคือ วัดการดึงออกซิเจน ผลจากการทดลองนี้พบว่า สูตรของยางผสมที่ใช้จะมีผลต่อค่าความจุความร้อนจำเพาะและความเสถียรทางความร้อน และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC และการวัดการดึงออกซิเจน จะทำให้ได้ข้อมูลที่เกี่ยวกับผลของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลต่อพฤติกรรมทางเทอร์โม-ไดนามิกส์ของยางผสม

Boochathum และคณะ (2001) ศึกษาลักษณะความเป็นผลึกของยางธรรมชาติ (cis-1,4-polyisoprene) trans-1,4-polyisoprene (TPI) และยางผสมของยางทั้งสองชนิด พบว่า การเชื่อมโยงด้วยซัลเฟอร์ในยางธรรมชาติ จะไปยับยั้งการเกิดผลึก (cold crystallization) แต่การดึงยืดจะทำให้เกิดผลึกขึ้น ส่วนในยาง TPI ทั้งพันธะซัลเฟอร์และพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอน จะทำให้ความเป็นผลึกลดลง แต่การดึงยืดก็จะทำให้เกิดความเป็นผลึกเช่นกัน ดังนั้นความทนต่อแรงดึงของยางทั้งสองชนิดจึงขึ้นอยู่กับความเป็นผลึก กล่าวคือ ถ้ามีความเป็นผลึกสูง ก็จะทำให้ความทนต่อแรงดึงสูง ในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง TPI สมบัติด้านความทนต่อแรงดึงและ มอดุลัสจะด้อยลง เนื่องจากสารช่วยในการวัลคาไนซ์มีไม่พอสำหรับยางทั้งสองชนิด

Ismail และคณะ (2001) ได้กล่าวถึงลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางคลอโรพรีน (CR) และยางผสมระหว่างยาง ENR กับยาง CR โดยจะแปรค่าปริมาณของยาง NR และยาง ENR ตั้งแต่ 0 – 100% แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าต่างๆ จะได้ว่า ค่า Mooney scorch time, t_5, cure index และ Δt_L จะมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้ (ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่างค่านี้ของยางที่เป็นองค์ประกอบ) เพราะโมเลกุลของยาง ENR และยาง NR ทำให้อัตราการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ส่วนค่ามอดุลัสแบบดึง ความแข็งและความทนต่อแรงดึงจะมีค่าสูง โดยที่ค่ามอดุลัสแบบดึงและความแข็ง จะมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 25/75 (ของยางผสม ENR/CR และ NR/CR) ในขณะที่ค่าความทนแรงดึงจะมีค่าสูงสุดที่อัตราส่วน 75/25 (ของยางผสม ENR/CR และ NR/CR) และพบว่า ที่อัตราส่วนเดียวกัน ยางผสม ENR/CR มีสมบัติดีกว่ายางผสม NR/CR

Okwu และ Okieimen (2001) ทำการปรับปรุงยางธรรมชาติอิพ๊อกซิไดซ์ (ENR) ด้วยกรดไธโอไกลคอลลิก (TGA) โดยเตรียมในสภาวะที่เป็นสารละลาย ได้สารที่ต้องการ คือ ENR-TGA 17%ของยางธรรมชาติอิพ๊อกซิไดซ์เริ่มต้น แล้วนำ ENR-TGA และยางผสมระหว่าง ENR-

TGA กับยางธรรมชาติ มาเติมเขม่าดำและวัลคาไนซ์ด้วยระบบเซมิอีวี ยาง ENR-TGA มีความทนต่อแรงดึงต่ำ แต่มีความต้านทานต่อตัวทำละลายและน้ำมันได้ดีกว่ายางธรรมชาติ ส่วนยางผสมระหว่าง ENR-TGA กับยางธรรมชาติ ที่มี ENR-TGA 10 phr สามารถเพิ่มค่ามอดุลัสได้ถึง 40% และที่อัตราส่วนดังกล่าว ยางผสมมีความแข็งและความต้านทานต่อการบวมตัวในตัวทำละลายและน้ำมันได้ดีขึ้น แต่ความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาด มีค่าต่ำลง

Tanrattanakul และ Udomkichdecha (2001) ทำการเตรียมอิลาสโตเมอร์ชนิดใหม่โดยนำยางธรรมชาติมาผสมกับพอลิเอทธิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำพิเศษ (ULDPE) ในอัตราส่วนต่างกัน 3 อัตราส่วน คือ 70/30, 60/40 และ 50/50 ผสมด้วยเครื่องสองลูกกลิ้งและขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดความดัน วัลคาไนซ์ยางผสมด้วยระบบกำมะถันปกติ แล้วทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ASTM และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสไตรีน-บิวตะไดอีน (SBR) จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ULDPE สามารถเข้ากันได้กับยางธรรมชาติ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และยางผสมมีลักษณะเป็น co-continuous phase เมื่อมียางธรรมชาติ 50 และ 60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ ULDPE มีความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการบ่มเร่งดีกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง SBR แต่มีความต้านทานต่อการสึกหรอและความต้านทานต่อการแตกเนื่องจากการหักงอด้อยกว่า ส่วนค่าความหนืดมูนี่ (Mooney) ความแข็งและการกระดอนตัวมีค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อเติม DCP ลงในยางผสม จะทำให้ ULDPE เกิดการเชื่อมโยง ส่งผลให้มีความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอและความต้านทานต่อการบ่มเร่งมีค่าสูงขึ้น ส่วนในกรณีที่นำยางทั้งสามชนิดมาผสมกับ (NR/SBR/ULDPE blend) ยางผสมที่ได้มีสมบัติด้อยกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ ULDPE

El-Sabbagh (2003) ได้ทำการศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM) โดยในการผสมยางจะใช้การฉายรังสีพลังงานสูง (รังสีแกมมา) เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงขึ้นระหว่างโมเลกุลของยาง และทำการผสมโดยใช้สารพวก EPDM–g–MAH เป็นสารช่วยให้ยางเข้ากันได้ (compatibilizer) หรือใช้ยางชนิดอื่นเป็นตัวช่วยให้เข้ากันได้ เช่น ยางบิวตะไดอีน (BR) ยางคลอริเนเตด และยางคลอโรซัลโฟเนตเตดพอลิเอทธิลีน (CSM) เป็นต้น ซึ่งในการศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่าง NR/EPDM จะใช้เครื่อง DSC เครื่อง SEM และการวัดความหนืดของยางผสม จากผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) เพียงเล็กน้อย จะทำให้ยางเข้ากันได้มากขึ้นและสมบัติของยางผสมจะดีขึ้น

Kumnuantip และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกลเชิงพลวัต (dynamic mechanical properties) ของยางธรรมชาติ 2 ชนิด คือ ยาง STRVS 60 กับยาง STR20CV ที่มีการเติมยางรีเคลมในปริมาณต่างๆ ลงไป โดยทำการศึกษาค่า loss tangent และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน พบว่า เมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าลอสแทนเจนต์ (loss tangent) ที่ตำแหน่งสูงสุด เลื่อนตำแหน่งไปด้านที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น และความกว้างของพีคลอสแทนเจนต์ที่ตำแหน่งสูงสุด จะมีค่าลดลง ซึ่งเนื่องมาจากเขม่าดำที่มีในยางรีเคลม และถ้าในยางรีเคลมมียาง SBR เล็กน้อย จะทำให้พีคลอสแทนเจนต์ที่ตำแหน่งสูงสุด มีความกว้างเพิ่มขึ้น และการที่ปริมาณยาง รีเคลมเพิ่มขึ้นนี้ เป็นผลให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากผลของเขม่าดำในยางรีเคลม และอัตราการบวมตัวของยางวัลคาไนซ์จะถึงจุดอิ่มตัวเร็วขึ้น เมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์กับตัวทำละลายที่เพิ่มขึ้น

Sirqueira และคณะ (2003) ทำการศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอทธิลีนโพรพิลีนเอทธิลิดีนนอร์บอร์นีน (EPDM) ที่มี thioacetate-modified EPDM (EPDMTA) หรือ mercapto- thioacetate-modified EPDM (EPDMSH) ด้วยเครื่อง oscillating disk rheometer (ODR) เพื่อศึกษาผลของยาง EPDM ที่ถูกปรับปรุงโครงสร้างต่อระบบการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ที่มีการเติม MBTS 0.4 และ 0.8 phr และระบบที่ไม่เติมสารตัวเร่ง EPDMTA และ EPDMSH จะทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งในกระบวนการวัลคาไนซ์ สังเกตได้จากอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ (cure rate index) ที่มีค่าสูงขึ้น ค่าคงที่อัตราของการวัลคาไนซ์ (rate constant) และค่าพลังงานกระตุ้นในกระบวนการวัลคาไนซ์ที่ลดลง ในระบบการวัลคาไนซ์ที่ไม่มีสารตัวเร่งได้ศึกษาผลของ EPDMTA และ EPDMSH เมื่อมีการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูงๆ ซึ่งพบว่า EPDMSH ให้ผลที่ดีที่สุด จากผลการทดสอบด้วยเครื่อง ODR พบว่า การเติม EPDMTA และ EPDMSH ที่มีหมู่ฟังก์ชัน ทำให้ค่าทอร์คสูงสุดมีค่าสูงขึ้น และค่า Volume fraction (Vr) มีค่าสูงขึ้น ทำให้ทราบว่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ EPDMTA และ EPDMSH ทำให้ยางผสมมีค่าความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น โดย EPDMSH ให้ค่าที่ดีกว่า EPDMTA ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เกิดการวัลคาไนซ์ขึ้นในบางส่วนของเฟส EPDM เกิดเป็น co-vulcanization ขึ้น และมีความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมี ระหว่างหมู่เมอร์แคปโต (mercapto) กับเฟสยาง ส่วน EPDMTA ไม่ช่วยให้สมบัติเชิงกลและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของยางผสมสูงขึ้น เพราะหมู่ไธโออะซีเตต (thioacetate) ทำปฏิกิริยาได้ต่ำ แต่ EPDMTA ทำให้ยางผสมมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งได้ดีขึ้น

Akinlabi และคณะ (2005) ศึกษาผลของวิธีการ 3 วิธีที่มีผลต่อสมบัติการไหล (rheological property) การเชื่อมโยง และสมบัติทางกายเชิงกล (physico-mechanical properties) ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง ELMWNR (epoxidized low molecular weight natural rubber) โดยใช้วิธีการเติมสารเคมีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ลงในยางผสม และใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบเซมิอีวี โดยวิธีที่ 1 จะทำการผสมยางธรรมชาติกับยาง ELMWNR ก่อน แล้วจึงเติมสารเคมีอื่นๆลงไป ส่วนวิธีที่ 2 ผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติก่อน แล้วนำยาง ELMWNR มาผสม และวิธีที่ 3 ผสมสารเคมีกับยาง ELMWNR ก่อน แล้วจึงผสมกับยางธรรมชาติ จากการทดสอบสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกล พบว่า การเปลี่ยนแปลงวิธีการผสมมีผลต่ออัตราการวัลคาไนซ์ (cure rate) และสมบัติความทนต่อแรงดึงของยางผสม โดยค่าความทนต่อแรงดึงของยางผสมที่ได้จากวิธีที่ 2 มีค่าต่ำกว่าวิธีที่ 1 ประมาณ 2 MPa แต่วิธีที่ 3 มีค่าต่ำกว่าวิธีที่ 1 ประมาณ 5 MPa ส่วนค่าการยืด ณ จุดขาดและค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของยางผสมที่ได้จากวิธีที่ 1 ให้ค่าสูงสุด แสดงว่า วิธีการผสมวิธีนี้ ยางผสมเกิดการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลดีที่สุด

Phewthogin และคณะ (2005) ได้ศึกษาสมบัติการไหล (rheology property) ของยางผสมระหว่างยางคลอริเนตเตตพอลิเอทธิลีน (CPE) กับยางธรรมชาติ ซึ่งทำการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ และศึกษาสมบัติดังกล่าวด้วยเครื่อง capillary rheometer และเครื่อง ODR พบว่า พฤติกรรมวิสโคอิลาสติก (viscoelastic behavior) ของยาง CPE และยางผสมที่มีส่วนของยาง CPE มากกว่า จะแสดงพฤติกรรมแบบของไหลหนืด (viscous response) ซึ่งเป็นสมบัติที่ขึ้นอยู่กับเวลา แต่ในยางธรรมชาติและยางผสมที่มียางธรรมชาติมากกว่า พฤติกรรมวิสโคอิลาสติกจะขึ้นอยู่กับการวัลคาไนซ์ที่เกิดขึ้นในส่วนของเฟสยางธรรมชาติ และการวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติด้วยซัลเฟอร์ จะทำให้สมบัติที่ขึ้นอยู่กับเวลาเปลี่ยนไปเป็นสมบัติที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลา และจากการทดลองพบว่า Santogard – PVI® ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารยับยั้งการวัลคาไนซ์ (pre-vulcanization inhibitor) จะช่วยเพิ่มเวลาสก๊อชของยางพรีวัลคาไนซ์ให้นานขึ้น ซึ่งสามารถใช้ PVI ได้ถึง 1.0 phr ส่วนผลจากเครื่อง ODR พบว่า กราฟของยางผสมทุกอัตราส่วน มีช่วงวิสโคอิลาสติกที่กว้าง โดยก่อนที่จะเกิดการวัล-คาไนซ์ของเฟสยางธรรมชาติ ยางผสมจะมีพฤติกรรมแบบของไหลหนืด กล่าวคือ ความถี่ที่ใช้ในการทดสอบจะมีผลต่อค่ามอดุลัสสะสม (storage modulus) ของยางผสม แต่เมื่อเกิดการวัลคาไนซ์แล้วค่ามอดุลัสสะสมจะไม่ขึ้นอยู่กับเวลาที่ทดสอบ ในขณะที่ยางผสมที่มียาง CPE มากกว่า ค่ามอ-ดุลัสสะสมจะขึ้นอยู่กับเวลา สรุปคือ สมบัติวิสโคอิลาสติกของยางผสมจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของยางธรรมชาติในยางผสม สำหรับผลที่ได้จากเครื่อง capillary rheometer นั้น ทำให้ทราบว่า เมื่ออัตราส่วนของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดแบบเฉือนของยางผสมลดลง เนื่องจากยางธรรมชาติที่มีความหนืดต่ำกว่ายาง CPE

Ramensan และคณะ (2005) ศึกษาลักษณะการวัลคาไนซ์และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) ที่มีหมู่ไดคลอโรคาร์บีน (dichlorocarbene) (DCSBR) แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง DCSBR มีค่า mooney scorch time และค่าดัชนีการวัลคาไนซ์ (cure index) ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและต่ำกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีน เพราะพันธะคู่ถูกกระตุ้นด้วยหมู่ไดคลอโรคาร์บีน แต่จะมีค่ามอดุลัสและความแข็งสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณและต่ำกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอโรพรีนเพราะเกิดการเสริมประสิทธิภาพ (synergism) ขึ้นในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง DCSBR นอกจากนี้ยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง DCSBR มีความต้านทานต่อความร้อน เปลวไฟ น้ำมัน โอโซน และมีสมบัติเชิงกลดีกว่ายางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางคลอ-โรพรีน แต่ความต้านทานต่อความร้อน เปลวไฟ น้ำมัน และโอโซนมีค่าลดลง เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น และหลังจากแช่ในน้ำมัน สมบัติเชิงกล เช่น ค่ามอดุลัสและความแข็ง มีค่าลดลง เมื่อปริมาณยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

Rattanasom และคณะ (2005) ศึกษาผลของระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน เช่น ระบบกำมะถันปกติ และระบบอีวี ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางรีเคลม (จากยางรถยนต์) โดยแปรปริมาณยางรีเคลมตั้งแต่ 10 phr ถึง 50 phr แล้วทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ เช่น ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอ พบว่า ในยางผสมทั้งสองระบบ เมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น ทำให้ความแข็งและค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น แต่ความทนต่อแรงดึง ความทนต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานการสะสมความร้อนลดลง และในระบบกำมะถันปกติให้สมบัติเชิงกลดีกว่าระบบอีวี แต่ถ้ามีปริมาณยางรีเคลมมาก สมบัติความทนต่อแรงดึงและความทนต่อการฉีกขาดของยางผสมไม่ขึ้นอยู่กับระบบการวัลคาไนซ์ ส่วนระบบอีวีมีความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนดีกว่าระบบกำมะถันปกติ เมื่อมีปริมาณยางรีเคลมน้อยกว่า 50 phr เพราะการเชื่อมโยงแบบมอนอซัลฟิดิกและไดซัลฟิดิก มีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าแบบพอลิซัลฟิ-ดิก แต่สมบัติส่วนใหญ่ของยางผสมมีค่าลดลง เมื่อปริมาณยางรีเคลมเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางรีเคลมที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่อัตราส่วน 80/20

3.2 ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนผสม (Chlorosulfonated polyethylene blend)

ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีสมบัติดีหลายประการดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จึงมีการนำยางชนิดนี้ไปใช้ในงานต่างๆมากมาย โดยอาจจะใช้งานยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนเพียงอย่างเดียวหรือนำไปผสมกับยางชนิดอื่น การนำยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนไปผสมกับยางชนิดอื่นหรือพอลิเมอร์อื่น มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนหรือยางที่นำมาผสม ซึ่งยางผสมที่ได้จะมีสมบัติเด่นที่ได้จากยางที่เป็นองค์ประกอบ ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขึ้น ตัวอย่างยางผสมระหว่างยางคลอโรซัลโฟเนต-เตตพอลิเอทธิลีนกับยางชนิดอื่น เช่น นำยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนผสมกับยางไนไตรล์เพื่อปรับปรุงสมบัติความต้านทานต่อตัวทำละลายประเภทอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน น้ำมันและก๊าซโซลีนของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน สำหรับใช้งานเป็นยางปูพื้นในสระน้ำหรือใช้บุถังบรรจุสารเคมี (Schwarz, 1983) หรือนำไปผสมกับพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน (เกรดที่มีปริมาณคลอรีนสูง) เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ เพราะที่อุณหภูมิต่ำยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนมีลักษณะเปราะ (Chen, 1988) และการผสมกับ PVC ยังทำให้ PVC มีสมบัติความต้านทานต่อการบวมตัวในน้ำมันและสมบัติเชิงกลดีขึ้น เมื่อต้องอยู่ในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ ซึ่งในกรณีนี้ PVC จะเป็นองค์ประกอบหลักของยางผสม (Chen, 1990) เป็นต้น

3.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้องกับยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีนผสม

De และคณะ (1991) ทำการศึกษายางผสมระหว่างยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทธิลีน (CSM) และยางคาร์บอกซิเลทไนไตรล์ (XNBR) พบว่า ยางผสมระหว่างยาง CSM กับยาง XNBR สามารถเกิดการเชื่อมโยงระหว่างยางทั้งสองชนิดได้ในขณะที่กำลังขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง โดยไม่ต้องใช้สารช่วยในการคงรูป (curing agent) ซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ผลได้ด้วยเครื่อง Monsanto rheometer เครื่อง fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และทดสอบการบวมตัว ส่วนการทดสอบความเข้ากันได้ (miscible blend) สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบเชิงพลวัต และเครื่อง DSC ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ต่างๆดังกล่าว พบว่า ยางทั้งสองชนิดสามารถเข้ากันได้ดี และสามารถเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางทั้งสองชนิดนี้ได้ และเมื่อนำไปศึกษาสมบัติทางกายภาพ จะพบว่า สมบัติทางกายภาพของยางผสมจะมีค่าอยู่ระหว่างสมบัติทางกายภาพของยางทั้งสองชนิด และในการทดลองได้มีการเสริมแรงด้วยเขม่าดำ

Mukhopadhyay (1991) ได้เตรียมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติอิพ๊อกไซด์ (ENR) และยาง CSM โดยใช้เครื่องบดสองลูกกลิ้ง แล้วนำไปวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดการวัลคา-

ไนซ์ด้วยตัวเอง (self – vulcanizable) โดยที่ไม่มีสารช่วยในการคงรูป (vulcanizing agent) แล้วนำไปศึกษาด้วยเครื่อง FTIR ซึ่งพบว่า ปฏิกิริยาการเชื่อมโยงจะขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาอิพ๊อกซิเดชันในยาง ENR และสัดส่วนของยางทั้งสองชนิดในยางผสม จากนั้นจะนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลเปรียบเทียบกับยางที่วัลคาไนซ์ในระบบปกติ และอาจเสริมแรงด้วยเขม่าดำ ซึ่งผลจากการทดสอบสมบัติเชิงกลจะพบว่า ยางผสมที่เกิดการวัลคาไนซ์ด้วยตนเอง จะให้ค่าความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอดีกว่ายาง ENR และสมบัติการคงตัวจะดีกว่ายาง CSM

Nichols และคณะ (1994) กล่าวถึง ผลของการบ่มเร่งที่มีต่อพฤติกรรมการแตกหักของยางคลอริเนตเตตพอลิเอทธิลีน (CPE) และยาง CSM โดยวิเคราะห์พฤติกรรมการบ่มเร่งแบบเทอร์โมออกซิเดทีฟ (thermooxidative aging) ของยาง CSM และยาง CPE ด้วยเครื่อง DSC และการทดสอบการฉีกขาด ซึ่งสามารถนำค่า thermal induction time และค่าพลังงานการฉีกขาด มาคำนวณหาค่าอัตราการบ่มเร่งและค่าคงที่อัตรา (rate constant) ได้ ซึ่งจากการทดสอบพบว่า พลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้แสดงเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของกลไกการสลายตัวของวัสดุที่อุณหภูมิประมาณ 240° C และค่า thermal induction time สำหรับค่าพลังงานการฉีกขาดสามารถนำมาทำนายหาอายุของวัสดุพวกอิลาสโตเมอร์ได้ ในกรณีที่ยางเกิดการเสียรูปขึ้นจะทำให้การขยายตัวของรอยแตกช้าลง และการลดลงของพลังงานการฉีกขาดทำให้ทราบว่า มีการเชื่อมโยงเกิดขึ้นในระหว่างการบ่มเร่ง

Roychoudhury (1992) กล่าวถึงการเชื่อมโยงด้วยตัวเองของยางผสม 3 ชนิด คือ ยาง CSM ยางคาร์บอกซิเลทไนไตรล์ (XNBR) และยางธรรมชาติอิพ๊อกซิไดซ์ (ENR) โดยได้กล่าวไว้ว่า ยาง XNBR จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันและไม่เกิดการเชื่อมโยงด้วยตัวเอง กับยางผสมระหว่างยาง CSM และยาง ENR (ซึ่งยางทั้งสองชนิดนี้จะผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ และเกิดการเชื่อมโยงด้วยตัวเอง) ซึ่งในการศึกษาความเข้ากันได้ของยางทั้งสามชนิด จะใช้การวิเคราะห์สมบัติเชิงพลวัต (dynamic mechanical) (โดยในระบบที่ทำการทดลองจะมีอัตราส่วนระหว่าง CSM : ENR เท่ากับ 1 : 1) พบว่า ยางผสมที่มียาง XNBR มากกว่า 50% จะมีสมบัติเชิงพลวัตดี โดยที่ยาง XNBR จะทำหน้าที่เหมือนพลาสติไซเซอร์ ส่วนในการศึกษาลักษณะการเกิดการเชื่อมโยงตัวเอง จะใช้เครื่อง Monsanto rheometer เครื่อง differential thermal analysis (DTA) และทดสอบการบวมตัว และสำหรับการศึกษาความเป็นเนื้อเดียวกันของยางผสม จะศึกษาสมบัติความเค้น – ความเครียด

Roychoudhury (1993) ศึกษาปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างยาง CSM กับยางธรรมชาติอิพ๊อกซิไดซ์ (ENR) โดยใช้เครื่อง FTIR และเครื่อง nuclear magnetic resonance spectroscopy (NMR) พบว่า ยางผสมระหว่างยาง CSM กับยาง ENR สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ด้วยตัวเองที่อุณหภูมิสูงๆ โดยหมู่ $–SO_2Cl$ ของยาง CSM จะทำปฏิกิริยากับหมู่อิพ๊อกซีของยาง ENR เกิดพันธะอี

เธอร์ ขึ้นระหว่างยางทั้งสองชนิด นอกจากนี้ยังเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ซึ่งสามารถตรวจสอบหรือศึกษาได้จากเทคนิคสเปกโตรสโคปี แต่ยังมีความเห็นที่ขัดแย้งในเรื่องปฏิกิริยาการเชื่อมโยงของหมู่ $–SO_2Cl$ ในยาง CSM อยู่ เนื่องจากที่ผ่านมาพบว่า ไม่มีพันธะซัลโฟเนทเอสเทอร์เกิดขึ้น แต่ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยตัวเองขึ้น จะเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดอ๊อกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ขึ้นพร้อมกันอีกด้วย ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดนี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นในระบบ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้แก่ ปฏิกิริยาการเปิดวงแหวน ปฏิกิริยาฟิว-แรนไนเซชัน และเกิด cis – trans isomerization ของพันธะของยางผสม ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยเครื่อง FTIR และเครื่อง NMR ส่วนความเป็นเนื้อเดียวกันของยางผสม จะขึ้นอยู่กับจำนวนการเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง

Roychoudhury (1994) กล่าวถึงปฏิกิริยาเคมีระหว่างเขม่าดำกับยาง CSM โดยศึกษาการเชื่อมโยงระหว่างยาง CSM กับเขม่าดำ ซึ่งได้กล่าวว่า ผิวเขม่าดำที่ปรับผิวโดยการเกิดปฏิกิริยาอ๊อกซิเดชันที่ผิว จะทำให้เกิดพันธะระหว่างยางกับสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณและความไวของออกซิเจนที่อยู่ในเขม่าดำเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการดูดความชื้นและการไตเตรต สำหรับยางที่มีความเป็นขั้วสูง เช่น ยาง CSM แรงดึงดูดทางเคมีจะเป็นตัวหลักที่ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม และถ้าเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันอยู่มาก ก็จะเกิดอันตรกิริยากับยางได้มาก ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของยาง เมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

Shah (1994) กล่าวถึงการคงสภาพของยาง CSM เมื่อถูกฉายด้วยรังสีแกมมา โดยการใช้สารตัวเติมที่ใช้ในการคงสภาพ (antirads) ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ โดยสังเคราะห์ได้จากสารพวก polynuclear aromatic เมื่อนำมาใช้กับยาง antirads จะทำหน้าที่เป็นตัวจับพลังงานและอนุมูลอิสระ (free radical) เมื่อถูกฉายด้วยรังสีพลังงานสูง และเมื่อใช้ antirads ร่วมกับสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antioxidants) จะไปหน่วงการสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยา oxidative radiation ได้ และสามารถช่วยให้ยางคงสภาพเมื่อถูกฉายรังสีได้ถึง 200 Mrad

Roychoudhury (1995) ทำการศึกษาปฏิกิริยาเคมีระหว่างยาง CSM กับซิลิกา ซึ่งได้ทดลองปรับผิวของซิลิกาด้วยความร้อนที่ 800°C เป็นเวลา 4 ชม. และทดลองใช้เฮกซะเดคานอล (hexadecanol) แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DRIFTS พบว่า ถ้าปรับผิวด้วยความร้อน ไซลานอล (silanol) ที่ผิวของซิลิการจะเปลี่ยนเป็นพันธะไซลอกเซน (siloxane linkage) แต่ถ้าปรับผิวด้วยเฮก-ซะเดคานอล จะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันขึ้น ทำให้ปริมาณไซลานอลลดลง และจากการปรับผิวจะทำให้ซิลิกาทำปฏิกิริยากับโมเลกุลที่มีขั้วน้อยลง ในการทำ bound rubber ถ้าใช้ยาง CSM ร่วมกับซิลิกาที่ผ่านการปรับผิวแล้ว จะทำ bound rubber ได้ยาก เพราะยาง CSM จะสูญเสียหมู่ $–SO_2Cl$ ไป และการปรับผิวด้วยความร้อนจะทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างยาง CSM กับซิลิกาขึ้น

Giurginca (2000) ศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนและการถูกฉายด้วยรังสีของยางผสมระหว่างยาง CSM กับยาง XNBR โดยจะเป็นการวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของการเชื่อมโยง ปริมาณคลอรีน ปริมาณซัลเฟอร์ และความไม่อิ่มตัวในยางผสม (ซึ่งมี 3 อัตราส่วน คือ 25 : 75, 50 : 50 และ 75 : 25) และยางแต่ละชนิด โดยการทดสอบการสลายตัวทางความร้อนจะทดลองตั้งแต่อุณหภูมิ 150°C ถึง 190°C ส่วนการฉายรังสีจะทดลองที่ความเข้มข้นของรังสี 3 ค่า คือ 100, 200 และ 300 kGy ซึ่งจะทำให้ทราบถึงกลไกการบ่มเร่งด้วยความร้อนและการฉายรังสี และพบว่า จะต้องใช้พลังงานกระตุ้นสูงในระหว่างทดสอบการสลายตัวทางความร้อนของระบบ ซึ่งเกิด ปฏิกิริยาระหว่างกันของของผสมแต่ละชนิด โดยพลังงานกระตุ้นที่ใช้ในการสลายตัวของยางผสมจะมีค่าสูงกว่ายางทั้งสองชนิด แสดงว่า ยางผสมสามารถคงสภาพได้ดีกว่า และในขณะที่เกิดการสลายตัวจะมีกรดไฮโดรคลอริกเกิดขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของหมู่อะคริโลไนไตรล์ นอกจากนี้แล้วการฉายรังสียังทำให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยตัวเองได้อีกด้วย และวิธีการฉายรังสียังสามารถนำไปใช้ในการศึกษาอายุของยางได้อีกด้วย

Gupta (2000) ได้เตรียมยางผสมระหว่างยาง CSM และยางเอทธิลีนโพรพิลีน (EPR) โดยใช้ตัวเชื่อมโยง (grafting agent) ที่แตกต่างกันหลายชนิด เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างยาง EPR ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันกับยาง CSM โดยตัวเชื่อมโยงที่นำมาใช้นั้นจะมี 5 ชนิด (เพื่อทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันขึ้นในยาง EPR) ยางผสมระหว่างยาง CSM และ EPR จะมีสมบัติความต้านทานการหดตัวดีขึ้น ซึ่งสมบัติการหดตัวไม่ได้ขึ้นอยู่การเชื่อมโยงเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับความเป็นผลึกอีกด้วย และพบว่า การเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่จะเกิดขึ้นผ่านการกราฟท์ (grafting) ส่วนจำนวนการเชื่อมโยงจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเชื่อมโยงที่ใช้ และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X – ray diffraction พบว่าสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางความร้อน ซึ่งทำให้ทราบว่า ทุกตัวอย่างจะมีค่า T_g เพียงค่าเดียว ซึ่งเป็นการสนับสนุนว่า จำนวนการเชื่อมโยงขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเชื่อมโยงที่ใช้

Calmet (2002) จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยืด ณ จุดขาดกับปฏิกิริยาออกซิเดชันของยาง CSM และยาง EPR โดยการฉายรังสีให้แก่ยางในปริมาณต่างๆ ในระหว่างที่มีการฉายรังสีออกซิเจนจะถูกใช้มากขึ้น สมบัติเชิงกลจะถูกทำลาย และค่า oxidation induction time (OIT) ของยาง EPR จะมีค่าลดลง ในการทดลองนี้จะทำการทดลองที่มีการฉายรังสีในปริมาณต่ำๆ ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของกระบวนการสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน เมื่อได้รับการฉายรังสีในปริมาณที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างการยืด ณ จุดขาดและการใช้ออกซิเจนของยาง CSM และยาง EPR เป็นตัวที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างการสลายตัวเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันกับการเชื่อมโยง เมื่อถูกฉายด้วยรังสีในปริมาณ

ต่างๆ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง OIT กับการยืด ณ จุดขาด จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นที่อัตราการฉายรังสีต่างๆ

3.3 ความเข้ากันได้ของยางผสม (Folkes and Hope, 1993)

ความเข้ากันได้เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม ดังที่กล่าวในข้างต้นว่า พอลิเมอร์ผสมแยกเป็นสองเฟส คือ เฟสกระจายและเฟสต่อเนื่อง โดยที่เฟสกระจายจะกระจายตัวอยู่ในเฟสต่อเนื่อง โดยที่สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมสามารถวิเคราะห์ได้จากสมบัติของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (phase morphology) ของพอลิเมอร์ผสม และค่าการยึดติดระหว่างเฟส ในการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสม มีวิธีการที่ใช้โดยทั่วไป 2 วิธี คือ เติมพอลิเมอร์ชนิดที่ 3 ที่เรียกว่า สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (compatibilizer) และให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นในขณะที่ทำการผสม จากทั้งสองวิธีนี้ ทำให้โครงสร้างเฟสและสมบัติเปลี่ยนแปลงไป และทำให้ค่าการยึดติดระหว่างเฟสมีค่าสูงขึ้น วิธีการเพิ่มความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมที่มีได้มีผู้ทำการศึกษามาแล้ว มีวิธีการดังนี้

1) การเพิ่มความเข้ากันได้โดยใช้กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic miscibility)

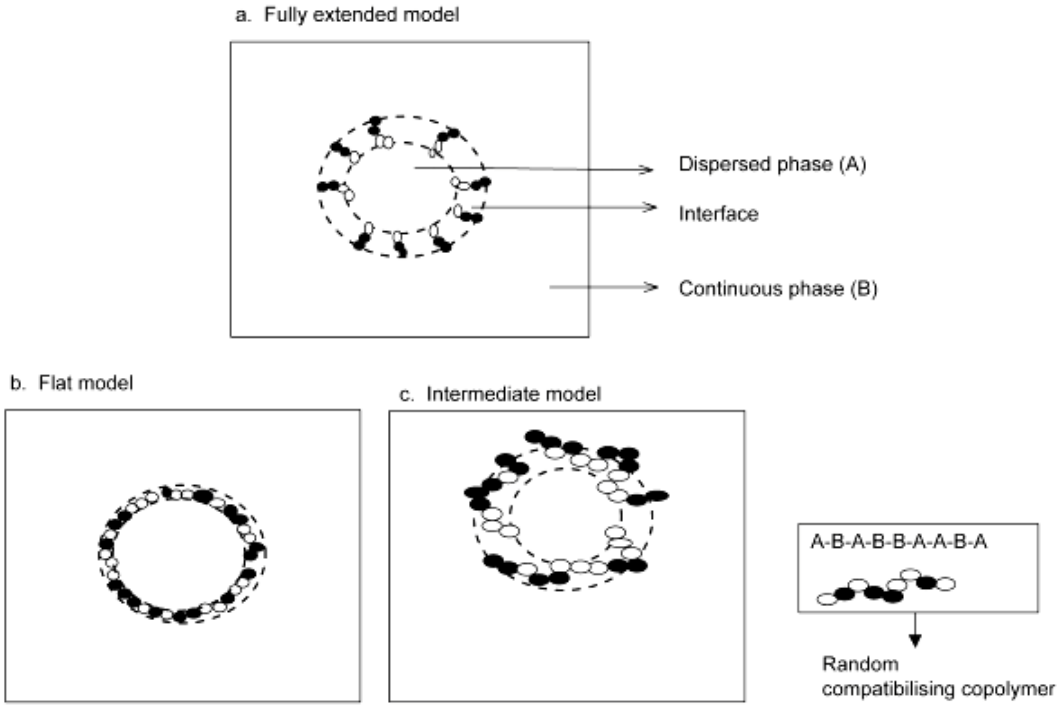
2) การเติมบล็อคหรือกราฟโคพอลิเมอร์ โดยที่บล็อคหรือกราฟโคพอลิเมอร์มีโครงสร้างโมเลกุลบางส่วนเหมือนกับพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม โคพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลหรือน้ำหนักโมเลกุลสอดคล้องกับองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม ทำให้พอลิเมอร์ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น โดยโคพอลิเมอร์ที่เติมลงไปจะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ

ประสิทธิภาพของความเข้ากันได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของโค-พอลิเมอร์ โดยพบว่า บล๊อคโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่ากราฟโคพอลิเมอร์ ไดบล็อคโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพสูงกว่าไตรบล็อคโคพอลิเมอร์ และไดบล็อคโคพอลิเมอร์ชนิดเทเปอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าไดบล็อคโคพอลิเมอร์ชนิดบริสุทธิ์ ส่วนน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์มีผลต่อการละลายได้ของโคพอลิเมอร์ในแต่ละเฟสของพอลิเมอร์ผสม และมีผลต่อความเร็วในการกระจายตัวของโคพอลิเมอร์ไปยังบริเวณระหว่างเฟสทั้งสอง (ถ้ามีน้ำหนักโมเลกุลสูง การกระจายตัวไปยังบริเวณระหว่างเฟสต้องใช้เวลานาน)

3) การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน (Funtional polymer) โดยปรับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบชนิดใดชนิดหนึ่งให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือให้มีพันธะที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ที่คล้ายกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์อีกชนิด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

4) การเพิ่มความเข้ากันได้โดยกระบวนการ Reactive blending นิยมใช้ในการผสมที่เป็นแบบ melt mixing โดยในระหว่างที่ทำการผสม จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ วิธีนี้มักใช้กับการขึ้นรูปที่เป็นกระบวนการต่อเนื่อง เช่น ใช้กับเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ชนิดสกรูเดียวหรือสองสกรู

ในกรณีที่มีการเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ จะมีผลต่อพอลิเมอร์ผสม คือ จะทำให้ค่าแรงตึงระหว่างผิว (interfacial tension) มีค่าต่ำลง และสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ทำหน้าที่คล้ายกับอิมัลซิไฟเออร์ ซึ่งทำให้เฟสกระจายมีขนาดเล็กลงเป็นอย่างมาก เพราะเกิดการรวมกันของเฟสกระจายได้น้อยลง และมีความเสถียรเพิ่มขึ้น (Sirisinha, 2004) ทำให้ไม่เพิ่มขนาดขึ้นในระหว่างที่อบ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มการยึดติดระหว่างเฟส ทำให้มีการถ่ายเทแรงที่ได้รับได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ใช้ กล่าวคือ สมบัติต่างๆของยางผสมดีขึ้นเมื่อปริมาณสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น แต่ถ้าความเข้มข้นของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้มากกว่าความเข้มข้นที่จุดวิกฤต (critical micelle concentration หรือ CMC) สมบัติต่างๆ เช่น ความทนต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการบ่มเร่ง และขนาดของเฟสกระจายเริ่มมีค่าคงที่หรือมีค่าลดลง สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้อาจเป็นบล็อกหรือกราฟโคพอลิเมอร์ เมื่อเติมลงในยางผสม สารดังกล่าวจะไปอยู่บริเวณระหว่างเฟสต่อเนื่องและเฟสกระจาย การจัดเรียงตัวของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้แบ่งได้เป็น 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยแบบ a เรียกว่า fully extended model โมเลกุลของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะวางตัวในลักษณะที่หันบางส่วนของโมเลกุลเข้าหาเฟสที่มีลักษณะโมเลกุลเหมือนกัน ส่วนแบบ b เรียกว่า flat model โมเลกุลของสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะเรียงตัวในลักษณะที่อยู่ในแนวนอนระหว่างเฟสทั้งสอง และแบบ c เรียกว่า intermediate model (Mathew and Thomas, 2003) นอกจากสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ยังช่วยลดพลังงานและเวลาในการผสมให้น้อยลง ช่วยให้มีความเหนียว ยึดติดดีขึ้น และช่วยให้สารตัวเติมกระจายตัวได้ดี



รูปที่ 2.4 แสดงบริเวณที่สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ (Mathew and Thomas, 2003)

3.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความเข้ากันได้ของยางผสมต่างๆ

Mukhopadhyay (1991) ศึกษาการวัลคาไนซ์ด้วยตัวเอง (self – vulcanizable) ของยางผสมระหว่างยางนีโอพรีน (CR) กับยางคาร์บอกซิเลทไนไตรล์ (XNBR) โดยจะอธิบายถึงผลของอัตราส่วนของยางผสมต่อความเข้ากันได้และสมบัติเชิงฟิสิกส์ของยางผสม ซึ่งในการทดลองจะผสมยางด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง แล้วนำไปขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง (~180˚C) จะสามารถวัลคาไนซ์ได้โดยที่ไม่ต้องใช้สารวัลคาไนซ์ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง FTIR ปริมาณการวัลคาไนซ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับเวลาและอัตราส่วนยางทั้งสองชนิดในยางผสม เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DMA และเครื่อง DSC พบว่า ยางทั้งสองชนิดไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับการวิเคราะห์การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้น จะใช้เครื่อง Monsanto rheometer, เครื่อง FTIR และทดสอบการบวมตัว ส่วนสมบัติเชิงฟิสิกส์ของยางผสม จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของยางผสม ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับการวัล-คาไนซ์ยางในระบบปกติ

Zanzig และคณะ (1993) ศึกษาผลของ 1,4-polyisoprene-1,4-polybutadiene (IBR) ที่ใช้เป็นตัวช่วยเพิ่มความเข้ากันได้และสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอีน (cis-1,4-polybutadiene : BR) โดยใช้เครื่อง DSC และกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนแบบส่อง

ผ่าน (TEM) ในการตรวจสอบระดับความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ยางผสมจะวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ และมีการเติมเขม่าดำลงในยางผสมด้วย แต่ปริมาณ IBR ที่เติมลงไป จะเติมได้ในปริมาณที่จำกัด และพบว่า ความเข้ากันได้และสมบัติของยางผสมจะดีขึ้น เมื่อเติม IBR ในปริมาณน้อยๆ และยังช่วยให้การยึดเกาะของเขม่าดำในยางคอมปาวด์ดีขึ้นด้วย

Asaletha และคณะ (1995) พบว่า ยางธรรมชาติกับพอลิสไตรีน (PS) ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ยาก แต่สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ให้ดีขึ้น โดยการเติม NR-g-PS ซึ่งผลของน้ำหนักโมเลกุลของโฮโมพอลิเมอร์ น้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ ความเข้มข้นของโคพอลิเมอร์ สภาวะการแปรรูปและวิธีการเติม จะมีผลต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของเฟสกระจาย ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง SEM การเติมสารช่วยความเข้ากันได้ (compatibilizers) ลงไปในปริมาณน้อยๆ จะช่วยลดขนาดของเฟสกระจายให้เล็กลง ผลที่ได้จากการทดลองนี้นำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีของ Noolandi และ Hong การเติม NR-g-PS ลงไป ทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสมดีขึ้น และสมบัติเชิงกลจะสัมพันธ์กับลักษณะสัณฐานวิทยาของระบบอีกด้วย ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะที่เป็นอยู่ของ NR-g-PS ระหว่างเฟสทั้งสอง

Jansen และ Soares (1996) ศึกษาผลของอัตราส่วนของยางผสม ความเข้ากันได้ และขั้นตอนการวัลคาไนซ์ที่มีต่อสมบัติการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอทธิลีนไวนิลอะซีเตต (EVA) โดยใช้ EVASH (poly (ethylene-co-vinyl alcohol-co-vinyl mercaptoacetate)) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ และใช้ dicumylperoxide (DCP) เป็นสารวัลคาไนซ์ พบว่า การเติม EVASH หรือ DCP ลงในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง EVA ทำให้ความทนต่อแรงดึงของยางผสมหลังการบ่มเร่งที่ 70°C เป็นเวลา 1 วัน มีค่าสูงขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการบ่มเร่งให้นานขึ้น สมบัติเชิงกลจะมีค่าลดลง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลเกิดการสลายตัว แต่กระบวนการนี้จะเกิดช้าลง เมื่อเติม EVASH ลงในยางผสม และการเติม EVASH ลงในยาง ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติลดลงเล็กน้อย

Soares และคณะ (2001) เตรียมยางผสมระหว่างยางสไตรีนบิวตาไดอีน (SBR) กับยางเอทธิลีนไวนิลอะซีเตต (EVA) ด้วยเครื่องผสมแบบปิด และเพิ่มความเข้ากันได้ด้วยการเติม mercapto-modified EVA (EVALSH) ทำให้เกิดพันธะการเชื่อมโยงระหว่างเฟสของยาง SBR กับ EVALSH โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่เมอแคบโต (mercapto) ของ EVALSH กับพันธะคู่ในยาง SBR การเติม EVALSH ทำให้ความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยาง SBR กับ EVA ที่ยังไม่วัลคาไนซ์มีค่าสูงขึ้น และช่วยให้เฟสของ EVA กระจายตัวในยาง SBR ได้อย่างสม่ำเสมอมากขึ้น สารเคมีที่ไม่สามารถละลายได้ในยางผสมที่มี EVALSH จะเป็นตัวบอกถึงความเข้ากัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง FTIR และเทคนิควิเคราะห์ทางกลศาสตร์ความร้อนเชิงพลวัต (DMTA) ใน

กรณีที่ยางผสมเข้ากันได้ดี สายโซ่โมเลกุลจะเคลื่อนไหวได้น้อยลง ทำให้สมบัติการหน่วง (damping) ของเฟสยาง SBR ลดลงด้วย เมื่อมีปริมาณยาง EVA 20% และ EVALSH จะทำให้ความเป็นผลึกของเฟส EVA ลดลง ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง DSC และจากผลการทดลอง พบว่า ความทนต่อแรงดึงของยางผสมดังกล่าว เพิ่มขึ้นตามปริมาณยาง EVA ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อยาง EVA มากกว่า 40%โดยน้ำหนัก และการเติม EVALSH ลงในยางผสมที่มีปริมาณยาง EVA 30 – 50 % ทำให้ความทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเช่นกัน และการเติม EVALSH 5%โดยน้ำหนัก ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงของยางผสมดีขึ้นมาก และทำให้ EVA กระจายอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดของเฟสเล็กลง

Mathew และ Thomas (2003) พบว่า ยางผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) กับยางไนไตรล์ (NBR) มีความเข้ากันได้ต่ำและมีสมบัติเชิงกลต่ำ เพราะมีการยึดติดระหว่างผิวต่ำและเฟสกระจายมีขนาดใหญ่ จึงได้ทำการเติมสไตรีน-อะคริโลไนไตรล์ โคพอลิเมอร์ (SAN) ลงในยางผสมดังกล่าว เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสม แล้วศึกษาผลของความเข้ากันได้ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลของยางผสม พบว่า การเติม SAN สามารถลดขนาดของเฟสกระจายของยางผสมระหว่าง PS กับยาง NBR ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องใช้ SAN ในปริมาณน้อยๆ และผลการทดลองสอดคล้องกับทฤษฎีของ Noolandi และ Hong ที่ว่า เมื่อเติมสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ถึงจุดวิกฤต (critical micelle concentration : CMC) สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะไปอยู่จนเต็มบริเวณผิวระหว่าง PS กับยาง NBR ในกรณีที่เป็นสารละลาย ใช้ SAN 1 – 2 % จึงจะเพียงพอ ส่วนระบบที่เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ การมีชั้นของโคพอลิเมอร์ จะช่วยยับยั้งการรวมกันของเฟสกระจาย และทำให้ขนาดของเฟสกระจายมีขนาดใกล้เคียงกันมากขึ้น ทั้งในระบบสารละลาย (solution-casted) และระบบยางเหลว (melt-mixed) การเติม SAN จะช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น เช่น ค่ามอดุลัสของยัง (Young ’s modulus) ค่าความทนต่อแรงดึง และค่าความทนทานต่อการฉีกขาด ซึ่งสมบัติต่างๆจะมีค่าดีที่สุด เมื่อขนาดของเฟสกระจายลดลงมากที่สุด และความเข้ากันได้ยังทำให้สมบัติการทนต่อแรงกระแทกดีขึ้นเช่นกัน ที่อัตราส่วน 50/50 และ 70/30 ค่าความทนต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้นถึง 70% และเปลี่ยนไปเป็นวัสดุที่มีความเหนียวมากเป็นพิเศษ ในระบบยางเหลว วิธีการผสมที่ต่างกัน จะให้สมบัติความทนต่อแรงดึงที่ต่างกัน SAN ช่วยเพิ่มความทนต่อแรงดึงให้สูงขึ้น เมื่อส่วนที่เป็นเฟสต่อเนื่องมีสมบัติเป็นพลาสติก และ SAN ที่มีการจัดเรียงตัวแบบอิสระ (random) ช่วยให้สมบัติต่างๆของยางผสมระหว่าง PS กับ NBR เพิ่มขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Aravind และคณะ (2004) ศึกษาความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางเอทธิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (EPDM) กับ poly(trimethylene terephthalate) (PTT) ทั้งที่ใช้และไม่ใช้ maleic anhydride-g-ethylene propylene rubber (EPM-g-MA) เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ ยาง

ผสมที่ได้มีลักษณะแยกเป็น 2 เฟส สมบัติทางกายและอันตรกิริยาเคมีระหว่างเฟสมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสมด้วยการเติม EPM-g-MA โดยเตรียมยางผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด และตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง SEM ซึ่งต้องสกัดเอาเฟสกระจายที่มีปริมาณน้อยกว่าออกก่อน เพื่อให้สามารถวัดขนาดของเฟสกระจายได้ พบว่า ถ้าปริมาณยาง EPDM น้อยกว่า 30% เฟสของยาง EPDM จะกระจายอยู่ในเฟสต่อเนื่องของ PTT และเมื่อปริมาณยาง EPDM มากกว่า 30% ถึง 60% จะมีลักษณะเป็น co-continuous phase แต่ถ้ายาง EPDM มากกว่า 60% ยาง EPDM จะเป็นเฟสต่อเนื่อง เนื่องจากยาง EPDM มีความหนืดสูงกว่า PTT ทำให้เกิดการรวมตัวกันของเฟสกระจาย เมื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้น และในการศึกษาผลของ EPM-g-MA ต่อลักษณะสัณฐานวิทยา พบว่า การเติม EPM-g-MA ทำให้เฟสกระจายมีขนาดเล็กลง แต่เมื่อ EPM-g-MA เพิ่มมากขึ้น การลดขนาดของเฟสกระจายจะเริ่มคงที่ (ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แรงดึงดูดระหว่างผิวมีค่าคงที่) เมื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับทฤษฎี พบว่า สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้จะไปอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด และเมื่อใช้เครื่อง PALS (positron annihilation lifetime spectroscopy) ในการหาค่า free volume เพื่อวิเคราะห์อันตรกิริยาของยางผสม พบว่า ในกรณีที่ยางผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ค่า free volume เพิ่มขึ้นตามปริมาณยาง EPDM ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ความเข้ากันได้ลดลง และการเติม EPM-g-MA ทำให้ค่า free volume ลดลง และความเข้ากันได้เพิ่มขึ้น เพราะเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่แอนไฮไดรด์ใน EPM-g-MA กับหมู่ไฮดรอกซิลใน PTT เกิดเป็นกราฟโคพอลิเมอร์ขึ้นระหว่างทั้งสองเฟส

Soares และคณะ (2004) ทำการเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสมระหว่างยางไนไตรล์ (NBR) กับยางเอทธิลีนไวนิลอะซีเตต (EVA) โดยใช้ hydrolyzed EVA (EVALVA) รวมกับ oxazoline-functionalized NBR (NBROX) จากการทดลอง พบว่า การเติม EVALVA ลงในยางผสมทำให้สมบัติเชิงกลของยางผสมทั้งที่วัลคาไนซ์และไม่วัลคาไนซ์ดีขึ้น และสมบัติดังกล่าวจะดียิ่งขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับ NBROX เพราะหมู่ออกซาโซลีน (oxazoline) ใน NBROX ทำปฏิกิริยาเกิดพันธะเคมีกับหมู่ฟังก์ชันใน EVALVA และการใช้ NBROX ในปริมาณน้อยๆ จะทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าการยืด ณ จุดขาดของยางผสมทั้งที่วัลคาไนซ์และไม่วัลคาไนซ์ดีขึ้น ความเข้ากันได้มีผลต่อการยืด ณ จุดขาดของยางผสมที่ไม่วัลคาไนซ์มากกว่ายางผสมที่วัลคาไนซ์แล้ว ของผสมระหว่าง NBROX กับ EVALVA เป็นสารที่ไม่สามารถละลายได้ (สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่อง FTIR ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่ออกซาโซลีน) จากการที่มีสารที่ไม่ละลายเกิดขึ้นในยางผสมที่ยังไม่วัลคาไนซ์ และลักษณะสัณฐานวิทยาที่สม่ำเสมอ ที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง SEM (ตรวจสอบทั้งยางที่วัลคาไนซ์และไม่วัลคาไนซ์) เป็นสิ่งยืนยันถึงความเข้ากันได้ของยางผสม

Sirisinha และคณะ (2004) ศึกษาผลของ maleic anhydride-g-ethylene propylene diene rubber (EPDM-g-MA) (ใช้เป็นสารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้) และสารแอนติออกซิแดนท์ประเภทฟีนอลิก (phenolic) ต่อความต้านทานต่อน้ำมันและความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนของยางผสมระหว่างยางคลอริเนเตดพอลิเอทธิลีน (CPE) กับยางธรรมชาติ ที่อัตราส่วน 50/50 ซึ่งพบว่า EPDM-g-MA จะทำให้ขนาดเฟสของยางผสมมีขนาดเล็กลง เพราะ EPDM-g-MA จะช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของยางผสมให้ดีขึ้น โดยสามารถใช้ได้สูงถึง 1.0 phr แต่ถ้าปริมาณมากกว่านี้ขนาดของเฟสก็จะเริ่มใหญ่ขึ้น ส่วนการเติมสารแอนติออกซิแดนท์ประเภทฟีนอลิก ทำให้ขนาดของเฟสลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากสารแอนติออกซิแดนท์จะไปทำให้เฟสของยางธรรมชาติเสถียรต่อความร้อนได้ดีขึ้น ทำให้การรวมกันของเฟสยางธรรมชาติลดลง สำหรับความต้านทานต่อน้ำมันและความต้านทานการบ่มเร่งด้วยความร้อน จะสัมพันธ์กับความทนต่อแรงดึงของยางผสมระหว่างยาง CPE กับยางธรรมชาติ ที่อัตราส่วน 50/50 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของเฟสยางธรรมชาติที่กระจายอยู่ในยาง CPE โดยที่ถ้าเฟสยางธรรมชาติมีขนาดเล็กกว่า ก็จะมีความต้านทานต่อน้ำมันและความต้านทานการบ่มเร่งด้วยความร้อนสูงกว่า