

โดย ดร.ตุลย์พงษ์ ตูลย์พิทักษ์ และคณะ

กรกฎาคม 2553

อิทธิพลของสารต้านรีเวอร์ชั่นต่อสมบัติของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

คณะผู้วิจัย

1. ดร.ตุลยพงษ์ ตูลยพิทักษ์
2. นายลูกมาน หะยีดาโอ๊ะ

สังกัด

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร

1. ชื่อโครงการ

ภาษาไทย

อิทธิพลของสารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

ภาษาอังกฤษ

Influence of Anti-reversion Agents on Properties of Natural Rubber Vulcanizates

2. ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และE-mail

ชื่อ-สกุล

นายตุลยพงษ์ ตูลยพิทักษ์

หน่วยงาน

ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี
อ.เมือง จ.ปัตตานี 94000

ที่อยู่

181/419 ถ.เจริญประดิษฐ์ ตรูสะมิแล อ.เมือง จ.ปัตตานี 94000

โทรศัพท์

086-5663720

โทรสาร

073-331099

E-mail

ttulyapo@bunga.pn.psu.ac.th

3. นักศึกษา/ผู้ร่วมวิจัย นายลูกมาน หะยีดาโอ๊ะ

4. งบประมาณทั้งโครงการ 120,000 บาท

5. ระยะเวลาดำเนินการ 12 เดือน ตั้งแต่วันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2552 ถึงวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2553

6. ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

ยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์โดยใช้ระบบกำมะถันและสารเร่งมักเกิดปัญหาการเกิดรีเวอร์ชัน (reversion) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้อัตราส่วนของกำมะถันต่อสารเร่งสูงหรือระบบปกติ (conventional vulcanization, CV) รีเวอร์ชันทำให้สมบัติของยางวัลคาไนซ์ด้อยลงเนื่องจากสาเหตุหลายประการได้แก่ การลดลงของปริมาณพันธะเชื่อมโยง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพันธะเชื่อมโยง การเพิ่มโครงสร้างที่เป็นวงบนสายโซ่หลักของยาง (cyclization) การเกิดพันธะคู่คอนจูเกต (conjugated double bond) บนสายโซ่หลัก ฯลฯ

งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการรีเวอร์ชันของยางธรรมชาติคอมเปาต์ และผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยางและความคุ้มค่าของการใช้สารประเภทนี้ในสูตรยาง

7. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการรีเวอร์ชันของยางธรรมชาติและศึกษาผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยางธรรมชาติและประเมินความคุ้มค่าของการใช้สารประเภทนี้ในสูตรยางคอมเปาต์

8. ผลการดำเนินงาน

วิธีการวิจัย (โดยย่อ)

งานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดรีเวอร์ชันและสมบัติหลังการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติคอมเปาต์ รวมทั้งศึกษาปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยาง โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. ยางธรรมชาติไม่ผสมสารตัวเติม โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1.1 ระบบของการวัลคาไนซ์และชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ได้แก่ สารตัวเร่งกลุ่มไธอะโซล (thiazole accelerators) คือ MBT และ MBTS และสารตัวเร่งกลุ่มซัลฟิनाไมด์ (sulfenamide accelerators) คือ CBS และ TBBS

1.2 อุณหภูมิ

1.3 สารป้องกันกันเสื่อมสภาพ N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) โดยแปรปริมาณในช่วง 0.0-1.5 phr

1.4 สารต้านรีเวอร์ชัน 4 ชนิด ได้แก่ trimethylolpropane triacrylate (TMPTA), 1,3-bis(citraconimidomethyl)benzene (BCIMX), hexamethylene-1,6-bis(thiosulfate), disodium salt, dihydrate (HTS), และ 1,6-bis(N,N-dibenzylthiocarbamoylthio)hexane (KA) โดยแปรปริมาณในช่วง 0.0-3.0 phr

2. ยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารเร่งในระบบปกติ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ดังนี้

2.1 ชนิดของสารตัวเติม ได้แก่ เซม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต

2.2 ปริมาณของสารตัวเติมในช่วง 0-60 phr

2.3 สารต้านรีเวอร์ชัน 4 ชนิด ได้แก่ TMPTA, BCIMX, HTS, และ KA ปริมาณ 2.0 phr

3. วิเคราะห์ต้นทุนของยางคอมเปาต์ที่ใช้และไม่ใช้สารต้านรีเวอร์ชัน

การรีเวอร์ชันของยางคอมเปาต์สามารถศึกษาได้จากกราฟแสดงพฤติกรรมของการวัลคาไนซ์ที่ได้จากเครื่อง oscillating disk rheometer (ODR) และการเปรียบเทียบสมบัติทางฟิสิกส์ของยางซึ่งวัลคาไนซ์ที่ optimum cure time (t_c) และที่ 1 ชั่วโมง โดยสมบัติทางฟิสิกส์ที่วัดได้แก่ ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง โมดูลัสที่ระยะยืดต่างๆ ความทนแรงดึง ระยะยืดขณะขาด และพลังงานการฉีกขาด

ผลการวิจัยและอภิปรายผล (โดยย่อ)

ยางคอมเปาต์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติมและวัลคาไนซ์ในระบบปกติจะเกิดรีเวอร์ชันมากที่สุด ส่วนระบบประสิทธิภาพจะไม่เกิดรีเวอร์ชัน แต่ค่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่ายางคอมเปาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ในระบบอื่นๆ นอกจากนี้ยางคอมเปาต์จะเกิดรีเวอร์ชันมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การวัลคาไนซ์ยางที่ระยะเวลามากกว่า optimum cure time ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลง และปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติจะลดลงมากกว่ายางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าการเกิดรีเวอร์ชันสัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณพันธะเชื่อมโยง การใช้สาร 6PPD ไม่สามารถป้องกันการเกิดรีเวอร์ชันได้ ซึ่งให้เห็นว่าการเสื่อมสภาพของยางโดยออกซิเจนหรือโอโซนไม่ใช่สาเหตุหลักของการเกิดรีเวอร์ชัน นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณสาร 6PPD (0-1.5 phr) ไม่ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลง การใช้สารต้านรีเวอร์ชัน BCIMX, TMPTA, และ HTS ในปริมาณ 0.5-3.0 phr จะช่วยรักษาระดับปริมาณพันธะเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยางไว้ เนื่องจากสารทั้ง 3

ชนิดจะทำหน้าที่ชดเชยพันธะเชื่อมโยงที่ลดลงในระหว่างการเกิดรีเวอร์ชัน ในขณะที่สาร KA จะทำให้ปริมาณของพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ซึ่งเห็นว่าสาร KA ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงที่นอกเหนือจากก้ามะถัน และทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลงเนื่องจากยางมีปริมาณพันธะเชื่อมโยงมากเกินไป

ยางคอมปาวด์ซึ่งผสมเขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตยังคงเกิดการรีเวอร์ชัน แต่อย่างไรก็ตามระดับการเกิดรีเวอร์ชันไม่ขึ้นกับปริมาณของสารตัวเติม การวัลคาไนซ์ที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณพันธะเชื่อมโยงกับปริมาณของสารตัวเติมของยางซึ่งวัลคาไนซ์ที่ cure time และ 1 hr มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นว่าการเกิดรีเวอร์ชันไม่มีความสัมพันธ์กับอันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติม เช่นเดียวกับยางซึ่งไม่ผสมสารตัวเติมการใช้สารต้านรีเวอร์ชัน KA ทำให้ยางมีปริมาณพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นประมาณหนึ่งเท่าของยางซึ่งไม่ผสมสารต้านรีเวอร์ชัน ขณะที่ยางซึ่งผสม BCIMX, TMPTA, และ HTS มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงใกล้เคียงกัน สาร KA เป็นสารทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงนอกเหนือจากก้ามะถัน ในขณะที่ BCIMX, TMPTA, และ HTS ทำหน้าที่ชดเชยพันธะเชื่อมโยงที่ลดลงเมื่อยางเกิดรีเวอร์ชัน การใช้สาร KA ทำให้ยางมีค่ามอดูลัสสูงกว่าการใช้สารต้านรีเวอร์ชันชนิดอื่นๆ แต่มีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำกว่า จากผลการทดลองพบว่าสาร BCIMX และ TMPTA เป็นสารต้านรีเวอร์ชันที่มีประสิทธิภาพดีกว่า KA และ HTS

9. สรุปผลการวิจัย

1. ยางคอมปาวด์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยก้ามะถันในระบบปกติจะเกิดรีเวอร์ชันมากกว่ายางคอมปาวด์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบกึ่งประสิทธิภาพและระบบประสิทธิภาพ และรีเวอร์ชันจะเกิดมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง
2. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ไม่สามารถป้องกันการเกิดรีเวอร์ชันในยางคอมปาวด์
3. สารตัวเติมเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ช่วยป้องกันการเกิดรีเวอร์ชันในยางคอมปาวด์ และระดับของการเกิดรีเวอร์ชันไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตัวเติม
4. สารต้านรีเวอร์ชัน KA ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์เสริมนอกเหนือจากก้ามะถัน ในขณะที่สาร BCIMX, TMPTA, และ HTS ทำหน้าที่ชดเชยพันธะเชื่อมโยงที่ลดลงในระหว่างการเกิดรีเวอร์ชัน
5. สาร BCIMX และ TMPTA เป็นสารต้านรีเวอร์ชันที่มีประสิทธิภาพสำหรับยางคอมปาวด์ผสมเขม่าดำและวัลคาไนซ์โดยใช้สารเร่งกลุ่มโรอะโซล รวมทั้งซัลฟิनाไมด์

10. ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษา การป้องกันการรีเวอร์ชันสามารถทำได้ทั้งการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพและการใช้สารต้านรีเวอร์ชัน แต่การใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลงเนื่องจากปริมาณของพันธะเชื่อมโยงลดลง ในขณะที่การใช้สารต้านรีเวอร์ชันจะช่วยรักษาระดับของปริมาณพันธะเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยาง วิธีการป้องกันการรีเวอร์ชันที่ดีคือ การใช้สาร BCIMX และ TMPTA ปริมาณ 1.0-2.0 phr ในสูตรยางปกติ

นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่าสาร KA ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์นอกเหนือจากก้ามะถัน ดังนั้น การศึกษาการใช้สาร KA เป็นสารวัลคาไนซ์ เพื่อให้ได้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีและมีความเสถียรต่อความร้อน จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

11. ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

การนำเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หรือการเผยแพร่ผลงานในวารสารวิชาการที่มี peer review

บทคัดย่อ

ยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารเร่งในระบบปกติมักเกิดรีเวอร์ชันซึ่งทำให้สมบัติของยางด้อยลง งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรีเวอร์ชันและผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยางธรรมชาติคอมเพาต์ จากการศึกษพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นรีเวอร์ชันจะมากขึ้น การใช้สารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ไม่ช่วยป้องกันการเกิดรีเวอร์ชัน แสดงให้เห็นว่ารีเวอร์ชันไม่ได้เกิดจากการออกซิเดชันของยางรีเวอร์ชันยังคงเกิดขึ้นในยางซึ่งผสมเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต อย่างไรก็ตามระดับของรีเวอร์ชันไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติมในยาง แสดงให้เห็นว่ารีเวอร์ชันไม่มีความสัมพันธ์กับอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยาง สารต้านรีเวอร์ชัน Vulcuren KA9188 (KA) ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์นอกเหนือจากกำมะถัน ในขณะที่สาร BCIMX, HTS, และ TMPTA ทำหน้าที่ลดเซพันชะเชื่อมโยงซึ่งลดลงในระหว่างการรีเวอร์ชัน BCIMX และ TMPTA เป็นสารต้านรีเวอร์ชันที่มีประสิทธิภาพสำหรับยางธรรมชาติซึ่งผสมเขม่าดำ

Abstract

Natural rubber vulcanized by sulfur-accelerator conventional vulcanization system always faces reversion which leads to inferior properties. This research studied factors affecting reversion and effects of antireversion agents on properties of natural rubber compounds. It was found that reversion increased with increasing temperature. The use of antidegradant 6PPD could not prevent reversion suggesting that reversion was not caused by oxidation of rubber. Reversion also occurred in rubber filled with N330 carbon black and calcium carbonate. Degree of reversion is, however, independent of filler content in the rubber indicating that reversion was not related to interactions between rubber and filler. Vulcuren KA9188 (KA) antireversion agents acted as additional curing agent other than sulfur, whereas BCIMX, HTS, and TMPTA compensated chemical crosslinks decreased during reversion. BCIMX and TMPTA were effective antireversion agents for natural rubber filled with carbon black.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุน (สกว.) ซึ่งให้การสนับสนุนทุนวิจัย (สัญญาเลขที่ RDG 5250026) นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้อำนวยการโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา ผู้ประสานงานชุดโครงการวิจัย และผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้คำแนะนำและข้อคิดซึ่งเป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย

คำนำ

รีเวอร์ชันเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่เกิดขึ้นเสมอในยางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์โดยใช้ระบบกำมะถันและสารเร่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้อัตราส่วนของกำมะถันต่อสารเร่งสูงหรือระบบปกติ (conventional vulcanization, CV) รีเวอร์ชันทำให้สมบัติของยางวัลคาไนซ์ด้อยลงเนื่องจากสาเหตุหลายประการได้แก่ การลดลงของปริมาณพันธะเชื่อมโยง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพันธะเชื่อมโยง การเพิ่มโครงสร้างที่เป็นวงบนสายโซ่หลักของยาง (cyclization) การเกิดพันธะคู่คอนจูเกต (conjugated double bond) บนสายโซ่หลัก ฯลฯ

งานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการรีเวอร์ชันของยางธรรมชาติคอมพาต์ และผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยาง เพื่อให้ได้มาซึ่งวิธีการป้องกันการรีเวอร์ชันในยางที่มีประสิทธิภาพ

ตุลยพงษ์ ตุลยพิทักษ์
ลูกมาน หะยีดาโอ๊ะ

สารบัญ

บทสรุปย่อรายงานสำหรับผู้บริหาร	ii
บทคัดย่อ	v
Abstract	vi
กิตติกรรมประกาศ	vii
คำนำ	viii
สารบัญ	iii
สารบัญรูป	iv
สารบัญตาราง	vi
1. บทนำ	1
2. วิธีการทดลอง	6
2.1 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรีเวอร์ชั่นและสมบัติของยางคอมเพาต์	6
2.2 การเตรียมยางคอมเพาต์	9
2.3 การวัดสมบัติการวัลคาไนซ์	9
2.4 การวัดสมบัติทางฟิสิกส์	
2.5 การหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงโดยวัดการบวมพองของยาง	11
3. ผลการทดลอง	14
3.1 ยางธรรมชาติซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม	14
3.2 ยางธรรมชาติซึ่งผสมสารตัวเติม	21
3.3 การวิเคราะห์ต้นทุน	28
4. สรุปผลการทดลอง	30
5. เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก สรุปข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ	33

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	สูตรโครงสร้างของ 1,3-bis-(citraconimidomethyl)benzene (BCIMX)	1
รูปที่ 1.2	ปฏิกิริยา Diels-Alder ระหว่าง BCIMX และพันธะคู่คอนจูเกตซึ่งเกิดขึ้นจากการเกิดรีเวอร์ชัน	2
รูปที่ 1.3	เปรียบเทียบความยาวของพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟด์และโมเลกุลของ BCIMX	3
รูปที่ 1.4	สูตรโครงสร้างของ hexamethylene-1,6-bis(thiosulfate), disodium salt, dihydrate (HTS)	3
รูปที่ 1.5	พันธะเชื่อมโยงลูกผสมซึ่งเกิดจาก HTS	4
รูปที่ 1.6	สูตรโครงสร้างของ 1,6-Bis(dibenzylthiocarbamoyldithio)hexane (Vulcuren KA 9188)	5
รูปที่ 1.7	สูตรโครงสร้างของ trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) และ pentaerythritol triacrylate (PETA)	5
รูปที่ 2.1	ขั้นตอนทดสอบแบบทางแกว่ง	11
รูปที่ 3.1	กราฟการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารเร่ง MBT	14
รูปที่ 3.2	กราฟการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของยางคอมเพาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารเร่ง MBT	15
รูปที่ 3.3	ผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ต่อการสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ในระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่อุณหภูมิ 160°C	17
รูปที่ 3.4	ผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ต่อปริมาณของพันธะเชื่อมโยงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง CBS และ MBT ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นระยะเวลาต่างๆ กัน	18
รูปที่ 3.5	ผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ต่อสมบัติการดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง CBS ที่อุณหภูมิ 150°C และวัลคาไนซ์ที่เวลาต่างกัน	18
รูปที่ 3.6	ผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ต่อสมบัติการดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่งกลุ่มไอโซโซลและซัลฟิโนไมด์ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	19
รูปที่ 3.7	ผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่อุณหภูมิ 170°C	19
รูปที่ 3.8	ผลของปริมาณสารต้านรีเวอร์ชันต่อปริมาณของพันธะเชื่อมโยงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่อุณหภูมิ 150°C ที่ t_c	20
รูปที่ 3.9	ผลของปริมาณสาร HTS ต่อปริมาณของพันธะเชื่อมโยงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่อุณหภูมิ 150°C และวัลคาไนซ์ที่เวลาต่างกัน	21
รูปที่ 3.10	ผลของปริมาณสารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติการดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่ 150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	22
รูปที่ 3.11	ผลของปริมาณสารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติการดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่ 150°C และวัลคาไนซ์ที่เวลาต่างกัน	22
รูปที่ 3.12	ผลของปริมาณเขม่าดำต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่ 160°C (รูปเล็ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Reversion และปริมาณของเขม่าดำ)	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.13 ผลของปริมาณ CaCO_3 ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่ 160°C (รูปเล็ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Reversion และปริมาณของ CaCO_3)	23
รูปที่ 3.14 ผลของปริมาณขี้เถ้าและแคลเซียมคาร์บอเนตต่อเศษส่วนปริมาตร (ϕ) ของยางในเจลที่บวมพอง (●) N330 วัลคาไนซ์ที่ cure time, (○) N330 วัลคาไนซ์ 1 ชั่วโมง, (▲) CaCO_3 วัลคาไนซ์ที่ cure time, และ (Δ) CaCO_3 วัลคาไนซ์ 1 ชั่วโมง	24
รูปที่ 3.15 ผลของปริมาณขี้เถ้าต่อค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% และความทนทานต่อแรงดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและใช้สารเร่ง MBT ที่ cure time และ 1 ชั่วโมง	25
รูปที่ 3.16 ผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่อค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% และความทนทานต่อแรงดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและใช้สารเร่ง MBT ที่ cure time และ 1 ชั่วโมง	25
รูปที่ 3.17 สมบัติการวัลคาไนซ์ที่ 150°C ของยางผสมขี้เถ้า 40 phr ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT และใช้สารต้านรีเวอร์ชัน 2.0 phr	26
รูปที่ 3.18 ปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยางผสมขี้เถ้า 40 phr ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT และใช้สารต้านรีเวอร์ชัน 2.0 phr (วัลคาไนซ์ที่ 150°C ที่ cure time และ 1 ชั่วโมง)	27
รูปที่ 3.19 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 200% ของยางผสมขี้เถ้า 40 phr ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT และใช้สารต้านรีเวอร์ชัน 2.0 phr (วัลคาไนซ์ที่ 150°C ที่ cure time และ 1 ชั่วโมง)	27
รูปที่ 3.20 ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางผสมขี้เถ้า 40 phr ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT และใช้สารต้านรีเวอร์ชัน 2.0 phr (วัลคาไนซ์ที่ 150°C ที่ cure time และ 1 ชั่วโมง)	28

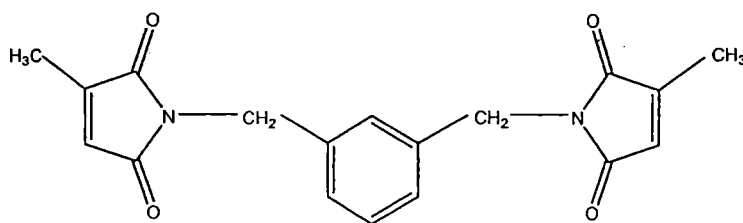
สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์ต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมปาวด์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม	6
ตารางที่ 2.2	สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมปาวด์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม	7
ตารางที่ 2.3	สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของสารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยางคอมปาวด์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม	7
ตารางที่ 2.4	สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมปาวด์	8
ตารางที่ 2.5	สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของสารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติยางคอมปาวด์ซึ่งผสมสารตัวเติม	8
ตารางที่ 2.6	ลำดับการผสมยางคอมปาวด์บนเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง	9
ตารางที่ 3.1	ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติไม่ผสมสารตัวเติมซึ่งวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C โดยใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ที่ 100% cure time และ 1 ชั่วโมง	15
ตารางที่ 3.2	สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติไม่ผสมสารตัวเติมซึ่งวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C โดยใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ที่ 100% cure time และ 1 ชั่วโมง	16
ตารางที่ 3.3	การวิเคราะห์ต้นทุนของยางคอมปาวด์	29

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่ายางธรรมชาติซึ่งวัลคาไนซ์โดยใช้ระบบกำมะถันและสารเร่งมักจะเกิดการรีเวอร์ชัน (reversion) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้อัตราส่วนของกำมะถันต่อสารเร่งสูงหรือระบบปกติ (conventional vulcanization, CV) การเพิ่มอุณหภูมิวัลคาไนซ์ทำให้ยางเกิดการรีเวอร์ชันมากขึ้น รีเวอร์ชันทำให้สมบัติของยางวัลคาไนซ์ด้อยลงเนื่องจากสาเหตุหลายประการได้แก่ การลดลงของปริมาณพันธะเชื่อมโยง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพันธะเชื่อมโยง การเพิ่มโครงสร้างที่เป็นวงบนสายโซ่หลักของยาง (cyclization) การเกิดพันธะคู่คอนจูเกต (conjugated double bond) บนสายโซ่หลัก ฯลฯ การแก้ปัญหาการเกิดรีเวอร์ชันสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ระบบวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพ (efficient vulcanization system) การลดขนาดของปริมาณพันธะเชื่อมโยงที่ลดลงด้วยการทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงใหม่ในอัตราที่เท่ากันโดยใช้ระบบสารเร่งการวัลคาไนซ์อย่างช้า (slow curing accelerator system) การใช้ประโยชน์จากพันธะคู่คอนจูเกตซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการรีเวอร์ชันโดยการทำให้เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงแบบคาร์บอน-คาร์บอน การเพิ่มความเสถียรต่อความร้อนของโครงข่ายโมเลกุลยางทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงลูกผสม (hybrid crosslink) ฯลฯ การใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพทำให้ได้พันธะเชื่อมโยงแบบมอนอซัลไฟด์และไดซัลไฟด์ (mono- and disulfidic crosslinks) ซึ่งมีความเสถียรต่อความร้อนมากกว่าพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟด์ (polysulfidic crosslink) แต่มีข้อเสียคือ ทำให้ยางมีสมบัติเชิงพลวัตและสมบัติด้านการฉีกขาดด้อยลง รวมทั้งทำให้ระยะเวลาที่ยางเริ่มเกิดการวัลคาไนซ์ (scorch time) สั้นลงด้วย ในราวทศวรรษ 1990 ได้มีการผลิตสารเคมีที่เรียกว่า สารต้านรีเวอร์ชัน (anti-reversion agents) ออกจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ สารประเภทนี้ทำให้โครงข่ายโมเลกุลยางมีพันธะเชื่อมโยงลูกผสม ซึ่งจะช่วยให้ยางมีความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสารประเภทนี้ไม่ได้เป็นสารที่ใช้ทดแทนระบบสารวัลคาไนซ์หลัก แต่เป็นสารที่ใส่เพิ่มเติมลงไปในสูตรยางในปริมาณ 0.5-3.0 phr ขึ้นอยู่กับคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตยางคอมปาวด์ นอกจากนี้ข้อมูลทางวิชาการของสารเคมีประเภทนี้มักจะมาจากทางบริษัทผู้ผลิตเป็นส่วนใหญ่

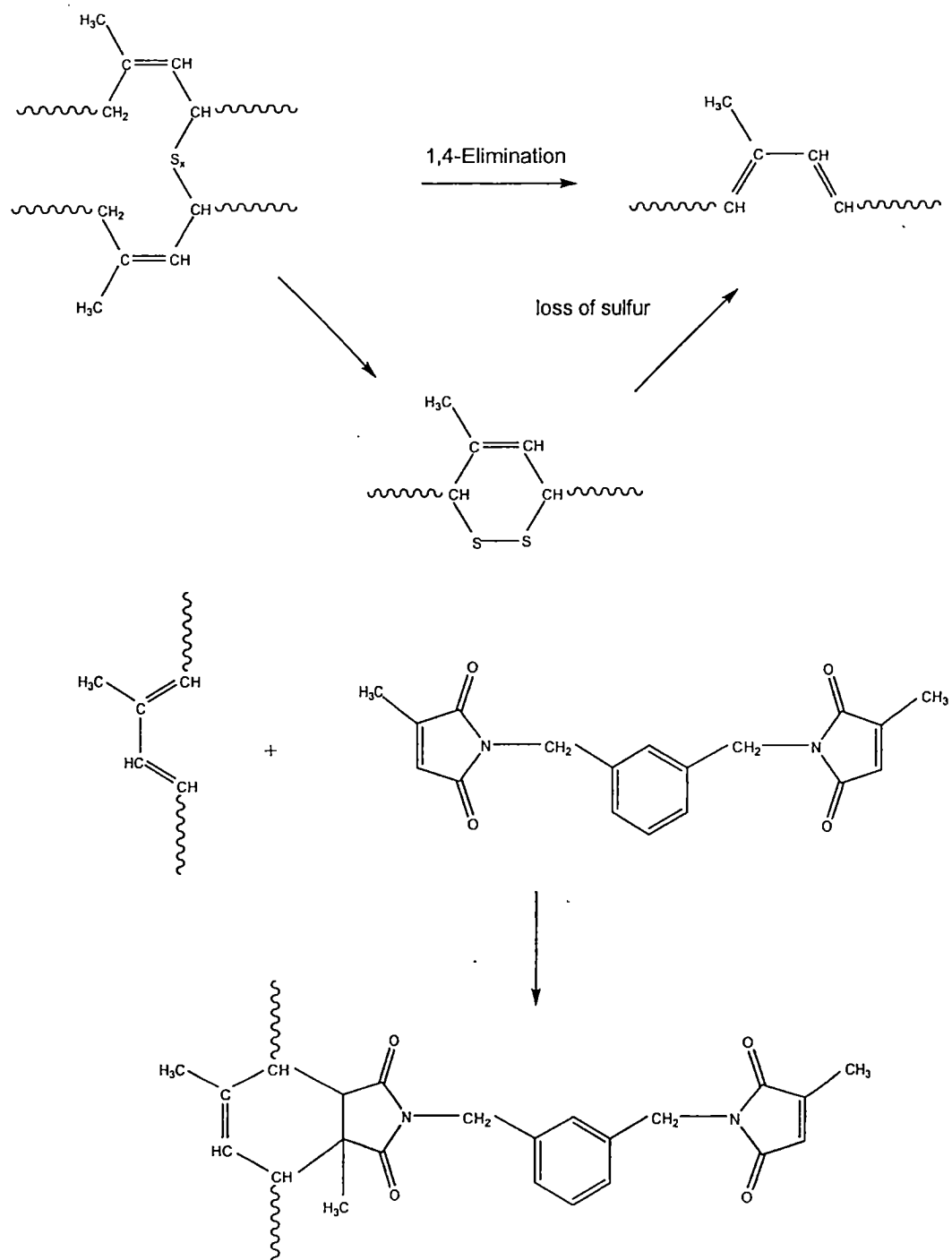
1,3-bis-(citraconimidomethyl)benzene (BCIMX) เป็นสารต้านรีเวอร์ชันซึ่งคิดค้นและจำหน่ายเชิงพาณิชย์โดย Flexsys สูตรโครงสร้างทางเคมีของสารชนิดนี้แสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 สูตรโครงสร้างของ 1,3-bis-(citraconimidomethyl)benzene (BCIMX)

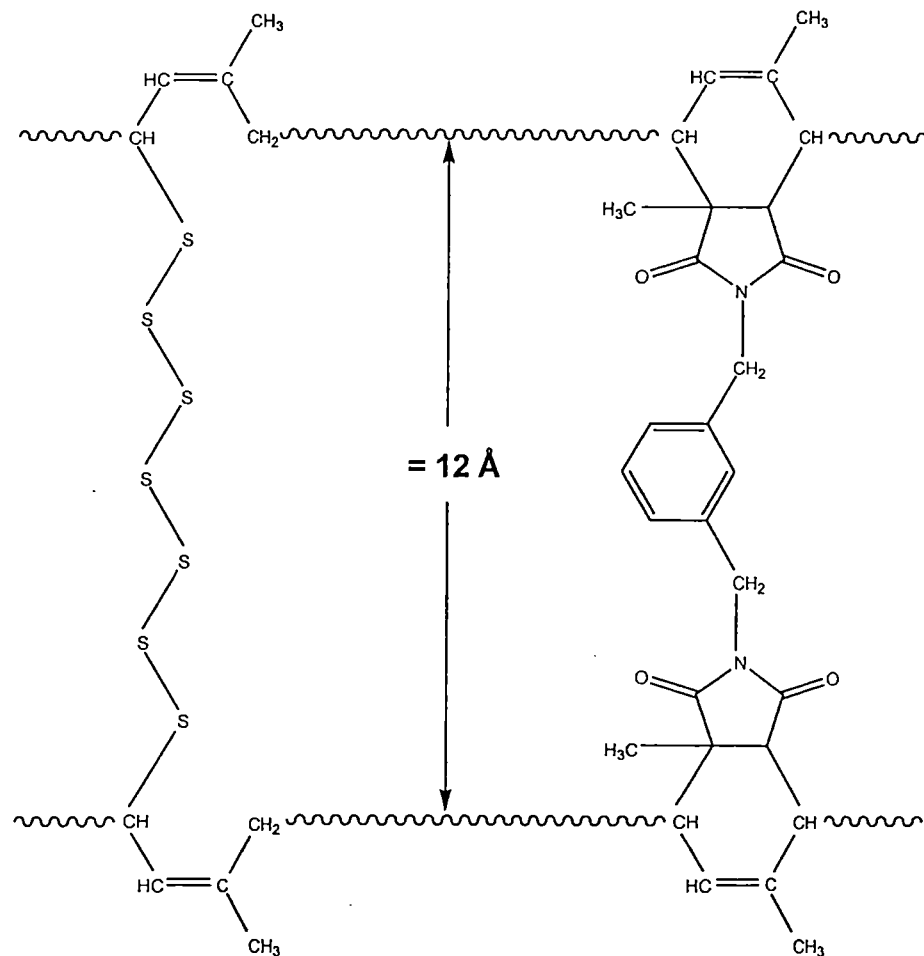
BCIMX ทำหน้าที่ช่วยขจัดเศษปริมาณพันธะเชื่อมโยงซึ่งลดลงระหว่างการรีเวอร์ชัน (Datta and Ivany, 1995; To, 1998; To *et al.*, 2006a; To *et al.*, 2006b) และจะทำงานเมื่อมีพันธะคู่คอนจูเกตเกิดขึ้นในกระบวนการรีเวอร์ชัน

(Schotman *et al.*, 1996) BCIMX จะทำปฏิกิริยากับพันธะคู่คอนจูเกตที่เกิดขึ้นโดยผ่านปฏิกิริยา Diels-Alder (รูปที่ 1.2)



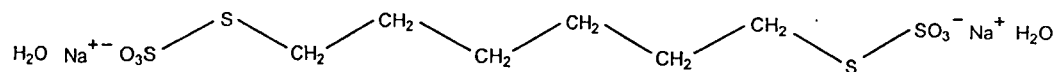
รูปที่ 1.2 ปฏิกิริยา Diels-Alder ระหว่าง BCIMX และพันธะคู่คอนจูเกตซึ่งเกิดขึ้นจากการเกิดรีเวอร์ชัน

ความยาวของโมเลกุล BCIMX จะใกล้เคียงกับความยาวของพันธะเชื่อมโยงบแบบพอลิซัลไฟด์ (รูปที่ 1.3) ดังนั้น BCIMX จึงช่วยให้ยางวัลคาไนซ์ยังคงสมบัติความแข็งแรงไว้ได้ และมีความเสถียรต่อความร้อนเพิ่มขึ้น



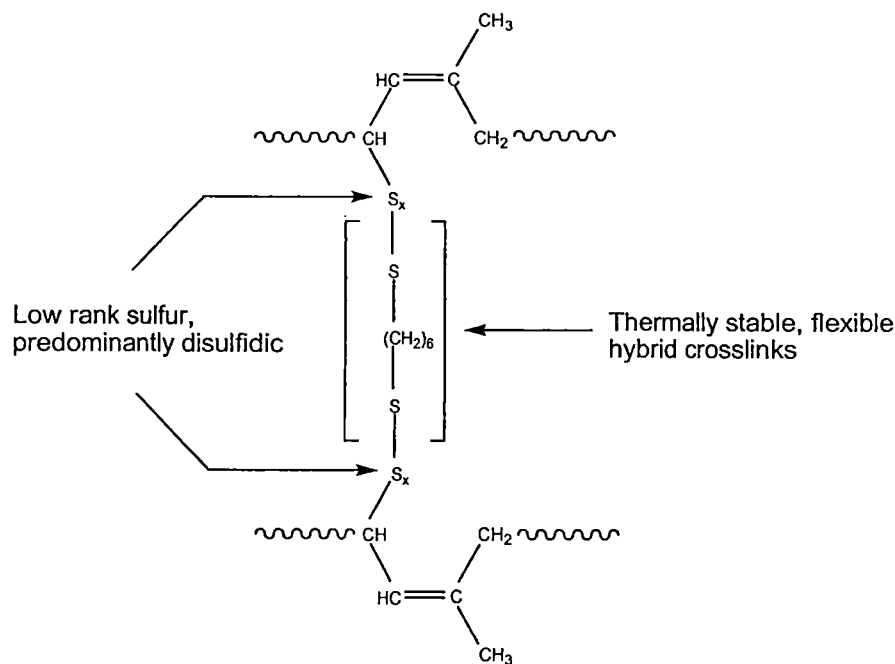
รูปที่ 1.3 เปรียบเทียบความยาวของพันธะเชื่อมโยงบแบบพอลิซัลไฟด์และโมเลกุลของ BCIMX
(Schotman *et al.*, 1996)

สารต้านรีเวอร์ชันชนิดที่สองที่จะกล่าวถึงคือ hexamethylene-1,6-bis(thiosulfate), disodium salt, dihydrate (HTS) สารต้านรีเวอร์ชันชนิดนี้ผลิตโดย Flexsys มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 สูตรโครงสร้างของ hexamethylene-1,6-bis(thiosulfate), disodium salt, dihydrate (HTS)

ในระหว่างการเกิดรีเวอร์ชันพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลไฟด์จะแตกออก สาร HTS จะเข้าไปจับพันธะที่แตกออกนี้ เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงลูกผสมซึ่งมีความยืดหยุ่นสูง (รูปที่ 1.5) พันธะเชื่อมโยงลูกผสมจะประกอบด้วยอะตอมของกำมะถันยึดติดกับสายโซ่โมเลกุลของยาง ส่วนตรงกลางจะเป็นสายโซ่เฮกซะเมทิลีนซึ่งมีความยืดหยุ่นและความเสถียรต่อความร้อนสูง (To *et al.*, 2006a; To *et al.*, 2006b)



รูปที่ 1.5 พันธะเชื่อมโยงลูกผสมซึ่งเกิดจาก HTS

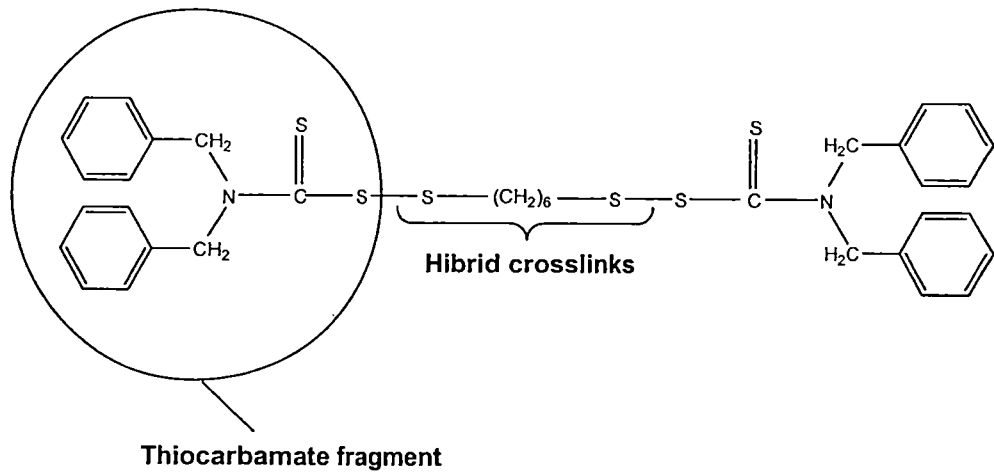
สารต้านรีเวอร์ชันอีกชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายคลึงกับ HTS คือ 1,6-Bis(dibenzylthiocarbamoyldithio)hexane (รูปที่ 1.6) ซึ่งเป็นสารที่ผลิตและจำหน่ายเชิงพาณิชย์โดย Lanxess และใช้ชื่อในทางการค้าว่า Vulcuren KA 9188 โครงสร้างโมเลกุลของสารชนิดนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

1. ส่วนที่มีโครงสร้างคล้ายสารเร่งปฏิกิริยาลูกปืน ซึ่งจะช่วยปรับปรุงการวัลคาไนซ์
2. ส่วนที่เป็นสายโซ่ของเฮกเซน ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบลูกผสมคล้ายกับสาร HTS

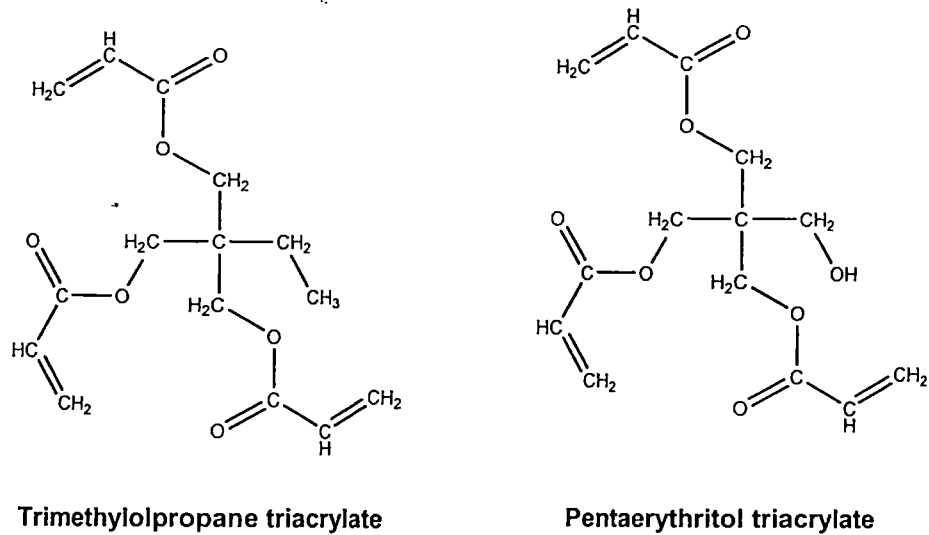
(Buding *et al.*, 2001; Kleiner *et al.*, 2002a; Kleiner *et al.*, 2002b;)

นอกจากนี้สารชนิดนี้ยังช่วยให้ยางคอมปาวด์สามารถวัลคาไนซ์ได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่สมบัติของยางวัลคาไนซ์ไม่ลดลงมากนัก

เมื่อไม่นานมานี้มีรายงานการใช้สารอะครีเลทหลายหมู่ฟังก์ชัน (multifunctional acrylates) เป็นสารต้านรีเวอร์ชัน (Blok *et al.*, 2000; Henning, 2008; Monsallier, 2009) สารอะครีเลทหลายหมู่ฟังก์ชันที่ใช้เป็นสารต้านรีเวอร์ชัน ได้แก่ trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) และ pentaerythritol triacrylate (PETA) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 1.7 สารอะครีเลทหลายหมู่ฟังก์ชันจะให้ผลคล้ายคลึงกับ BCIMX ดังนั้นสารในกลุ่มนี้อาจมีกลไกในการทำงานคล้ายคลึงกับ BCIMX



รูปที่ 1.6 สูตรโครงสร้างของ 1,6-Bis(dibenzylthiocarbamoyldithio)hexane (Vulcuren KA 9188)



รูปที่ 1.7 สูตรโครงสร้างของ trimethylolpropane triacrylate (TMPTA) และ pentaerythritol triacrylate (PETA)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางธรรมชาติคอมพอสต์ และผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยางและความคุ้มค่าของการใช้สารประเภทนี้ในสูตรยาง

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดรีเวอร์ชันและสมบัติหลังการวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติคอมเปาต์ รวมทั้งศึกษาตัวแปรที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยาง ได้แก่

- ระบบของการวัลคาไนซ์และชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ ได้แก่ สารตัวเร่งกลุ่มไธอะโซล (thiazole accelerators) และสารตัวเร่งกลุ่มซัลฟิनाไมด์ (sulfenamide accelerators)
- สารตัวเติมเขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต
- สารป้องกันกันเสื่อมสภาพ (antidegradants) ได้แก่ N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD)

จากนั้นจะศึกษาผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชัน 4 ชนิด ได้แก่ trimethylolpropane triacrylate (TMPTA), 1,3-bis(citraconimidomethyl)benzene (BCIMX), hexamethylene-1,6-bis(thiosulfate), disodium salt, dihydrate (HTS), และ 1,6-bis(N,N-dibenzylthiocarbamoyldithio)hexane (KA) และวัดสมบัติทางฟิสิกส์ของยางหลังการวัลคาไนซ์ หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์ต้นทุนของยางคอมเปาต์

2.1 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดรีเวอร์ชันและสมบัติของยางคอมเปาต์

2.1.1 อิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์ต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมเปาต์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์ต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมเปาต์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม โดยใช้สารเร่งในกลุ่มไธอะโซล (MBT และ MBTS) และกลุ่มซัลฟิनाไมด์ (CBS และ TBBS) โดยใช้สูตรยางตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์ต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมเปาต์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม

สารเคมี	phr		
	Efficient vulcanization (EV)	Semi-efficient vulcanization (Semi-EV)	Conventional vulcanization (CV)
RSS 3	100.0	100.0	100.0
Zinc oxide	5.0	5.0	5.0
Stearic acid	1.0	1.0	1.0
Sulfur	0.5	1.5	2.5
Accelerators			
- MBT, MBTS	2.5	1.5	0.5
- CBS, TBBS			

2.1.2 อิทธิพลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมปาวด์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม

สูตรยางที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมปาวด์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม และใช้สารเร่ง MBT, MBTS, CBS, และ TBBS แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมปาวด์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม

Ingredients	phr		
	EV	Semi-EV	CV
RSS 3	100	100	100
Zinc oxide	5.0	5.0	5.0
Stearic acid	1.0	1.0	1.0
Sulfur	0.5	1.5	2.5
Accelerators - MBT, MBTS - CBS, TBBS	2.5	1.5	0.5
6PPD	0, 1.5	0, 1.5	0, 0.5, 1.0, 1.5

2.1.3 ผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยางคอมปาวด์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติมและสมบัติทางฟิสิกส์ของยางหลังการวัลคาไนซ์ โดยใช้สูตรยางตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของสารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยางคอมปาวด์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม

Ingredients	phr		
	EV	Semi-EV	CV
RSS 3	100	100	100
Zinc oxide	5.0	5.0	5.0
Stearic acid	1.0	1.0	1.0
Sulfur	0.5	1.5	2.5
Accelerators MBT & CBS	2.5	1.5	0.5
Anti-reversion agents TMPTA, BCIMX, HTS, KA	0	0	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0

2.1.4 อิทธิพลของสารตัวเติมต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมปาวด์

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมปาวด์ซึ่งวัลคาไนซ์ในระบบปกติ สารตัวเติมที่ใช้ในการศึกษามี 2 ชนิดได้แก่ เขม่าดำ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต โดยใช้สูตรยางตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมต่อการเกิดรีเวอร์ชันของยางคอมปาวด์

Ingredients	phr		
	EV	Semi-EV	CV
RSS 3	100	100	100
Zinc oxide	5.0	5.0	5.0
Stearic acid	1.0	1.0	1.0
Sulfur	0.5	1.5	2.5
6PPD	1.0	1.0	1.0
MBT (or CBS)	2.5	1.5	0.5
N330 (or calcium carbonate)	40	40	0, 20, 40, 60

2.1.5 ผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยางคอมปาวด์ซึ่งผสมสารตัวเติม

การศึกษาผลของสารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติยางคอมปาวด์ซึ่งผสมสารตัวเติมจะใช้สูตรยางตามตารางที่ 2.5 ปริมาณของสารตัวเติม N330 ที่ใช้คือ 40 phr และปริมาณสารต้านรีเวอร์ชันที่ใช้คือ 2 phr

ตารางที่ 2.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของสารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติยางคอมปาวด์ซึ่งผสมสารตัวเติม

Ingredients	CV
RSS 3	100
Zinc oxide	5.0
Stearic acid	1.0
Sulfur	2.5
6PPD	1.0
MBT (or CBS)	0.5
N330	40
Anti-reversion agents TMPTA, BCIMX, HTS, KA	2.0

2.2 การเตรียมยางคอมเพาต์

ยางคอมเพาต์ที่ใช้ในการทดลองถูกเตรียมโดยการบดผสมบนเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (two roll mill) โดยมีลำดับการผสมดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ลำดับการผสมยางคอมเพาต์บนเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง

เวลา (นาที)	ลำดับการผสม
0	บดยาง
5	กรดสเตียริก
7	ซิงค์ออกไซด์ (6PPD หรือสารต้านรีเวอร์ชัน ถ้ามี)
14	สารตัวเติม (เขม่าดำหรือแคลเซียมคาร์บอเนต)
29	สารเร่งและก้ำมะถัน
34	ม้วนยาง 6 ครั้ง ก่อนออกแผ่นตามความหนาที่ต้องการ

ยางคอมเพาต์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติมก็จะใช้เวลาในการผสมเท่ากับยางที่ผสมสารตัวเติม หลังจากผสมเสร็จแล้วยางคอมเพาต์จะถูกพักไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปวัดสมบัติการวัลคาไนซ์ หรือเตรียมขึ้นทดสอบโดยการอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์

2.3 การวัดสมบัติการวัลคาไนซ์

สมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพาต์สามารถวัดได้โดยใช้เครื่อง Oscillating Disk Rheometer 2000 (ODR 2000) โดยตัดตัวอย่างยางคอมเพาต์เป็นรูปวงกลมหนาประมาณ 10 g แล้ววางบนโรเตอร์ ซึ่งตั้งค่าอุณหภูมิตามที่กำหนด โรเตอร์จะแกว่งเป็นมุม 1 องศา และมีความถี่ในการแกว่ง 100 รอบ/นาที ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 60 นาที ค่าทอร์คจะถูกวัดเป็นฟังก์ชันกับเวลา เรียกว่า กราฟการวัลคาไนซ์ (cure curve) สมบัติที่วัดได้จากกราฟการวัลคาไนซ์ ได้แก่ ทอร์คต่ำสุด (minimum torque, M_L), ทอร์คสูงสุด (maximum torque, M_H), เวลาในการวัลคาไนซ์ (cure time, $t_{c,100}$), ระยะเวลาที่ย่างเกิดการวัลคาไนซ์ก่อนกำหนด (scorch time, t_{s2}) ร้อยละของการรีเวอร์ชันสามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{Reversion} = \left(\frac{M_H - M_{60}}{M_H - M_L} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

เมื่อ M_{60} คือ ค่าแรงบิดที่ระยะเวลา 60 นาที

2.4 การวัดสมบัติทางฟิสิกส์

2.4.1 การวัดสมบัติการดึง

ตัดชิ้นทดสอบจากแผ่นยางวัลคาไนซ์ความหนาประมาณ 1.0 mm เป็นรูปดัมป์เบลล์โดยใช้ Die Type II (ISO 37) ทำเครื่องหมาย 2 ตำแหน่งบนชิ้นทดสอบโดยมีระยะห่างประมาณ 10.0 mm แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Hounsfield tensile testing machine โดยใช้อัตราเร็วของการดึง 100 mm/min ระยะยืดของยางสามารถ

ติดตามได้โดยอุปกรณ์วัดแบบเลเซอร์ (laser extensometer) การวัดสมบัติการดึงจะใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 5 ชิ้น และสมบัติการดึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

(1) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength, σ_b) ในหน่วย MPa

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_o} \quad (2.2)$$

เมื่อ F_b คือ แรงที่ใช้ดึงยางจนขาด (N) และ A_o คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (mm^2)

(2) ความเค้นที่ระยะยืดต่างๆ (stress at specified strain, σ)

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (2.3)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยางจนมีระยะยืดตามที่กำหนด (N) และ A_o คือ ขนาดพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ (mm^2)

(3) ระยะยืดขาด (ultimate strain, ε_b)

$$\varepsilon_b = \left(\frac{l_b - l_o}{l_o} \right) \times 100 \quad (2.4)$$

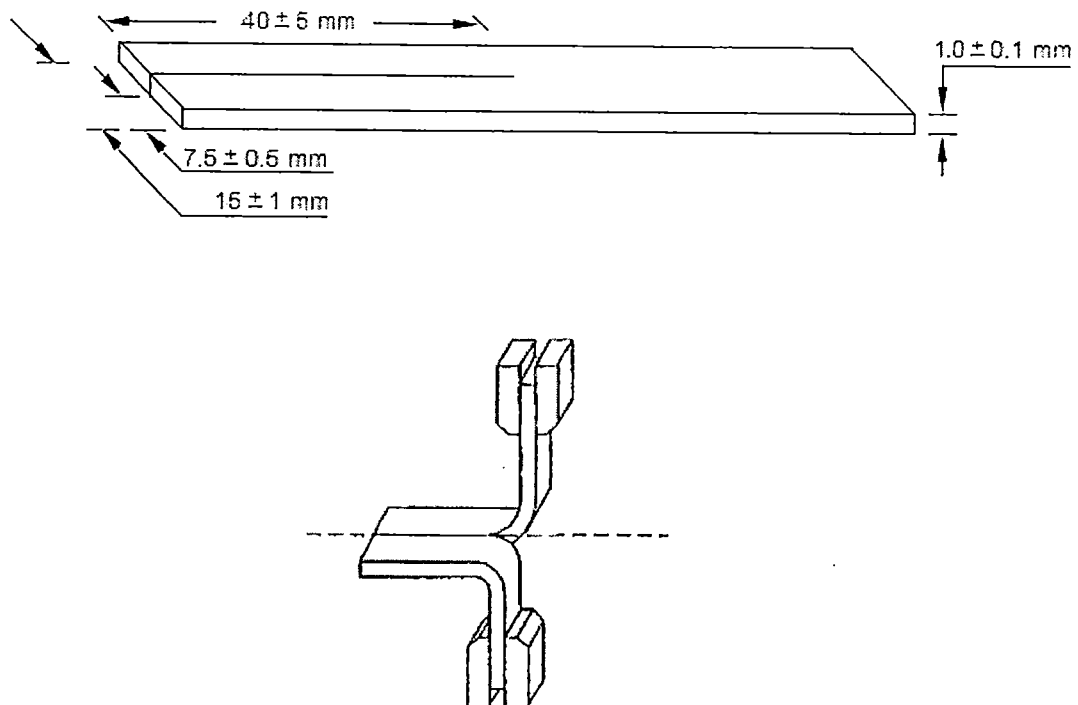
เมื่อ l_b คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบขณะยางถูกยืดจนขาด และ l_o คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องหมายบนชิ้นทดสอบในตอนเริ่มต้น

2.4.2 การวัดสมบัติการฉีกขาด

การวัดสมบัติการฉีกขาดของยางจะใช้ชิ้นทดสอบแบบกางเกง (trousers specimen) โดยชิ้นทดสอบจะเป็นแถบยางยาว 100 mm หนา 1.0 mm และกว้าง 15 mm บากชิ้นทดสอบจากปลายด้านหนึ่งเป็นระยะ 40 ± 5 mm (รูปที่ 2.1) ชิ้นทดสอบจะถูกหุ้มด้วยสก็อตซ์เทปเพื่อป้องกันการยืดในส่วนขาและป้องกันไม่ให้รอยฉีกเบนไปจากแนวของรอยตัดบนชิ้นทดสอบ พลังงานการฉีกขาด (tearing energy, G) ในหน่วย J/m^2 สามารถคำนวณได้จาก

$$G = \frac{2F}{t} \quad (2.5)$$

เมื่อ F คือ ค่าแรงที่ใช้ในการฉีกยาง (N) และ t คือ ความหนาของชิ้นทดสอบ ใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้น



รูปที่ 2.1 ชิ้นทดสอบแบบก้างเข่ง

2.5 การหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงโดยวัดการบวมพองของยาง

2.5.1 การหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางวัลคาไนซ์ซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม

ตัดชิ้นตัวอย่างยางขนาด $25 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ ชั่งน้ำหนัก M_i จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ในโทลูอีน 30 ml ในขวดที่มีฝาปิด เก็บไว้ในตู้มืดเป็นเวลา 7 วันเพื่อให้ชิ้นตัวอย่างอยู่ในสมดุลของการบวมพอง จากนั้นชั่งน้ำหนักชิ้นตัวอย่างซึ่งบวมพองด้วยโทลูอีน M_{gel} นำชิ้นตัวอย่างไปอบในตู้อบลดความดันที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก M_{dry} คำนวณหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (ν) จากสมการของ Flory-Rehner (Flory and Rehner, 1943)

$$\nu = -\frac{1}{2\bar{V}_s} \frac{[\ln(1 - \phi_{ro}) + \phi_{ro} + \chi\phi_r^2]}{\left(\phi_{ro}^{1/3} - \frac{\phi_{ro}}{2}\right)} \quad (2.6)$$

โดยที่

$$\phi_{ro} = \frac{(M_{dry} / \rho_r)}{[(M_{gel} - M_{dry}) / \rho_s] + (M_{dry} / \rho_r)} \quad (2.7)$$

เมื่อ ϕ_{ro} คือ เศษส่วนปริมาตรของยางในเจลที่บวมพอง χ คือ พารามิเตอร์อันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและ โทลูอินซึ่งเท่ากับ $0.39 \bar{V}_s$ คือ ปริมาตรของโทลูอิน 1 โมลซึ่งเท่ากับ $106.25 \text{ cm}^3/\text{mol}$ ρ_s คือ ความหนาแน่นของ โทลูอินซึ่งเท่ากับ 0.866 g/cm^3 และ ρ_r คือ ความหนาแน่นของยางวัลคาไนซ์ซึ่งวัดโดยใช้เครื่อง Density gravimeter การวัดความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางวัลคาไนซ์ไม่ผสมสารตัวเติมใช้ขั้นตอนทดสอบจำนวน 3 ขั้นตอน

2.5.2 การหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางวัลคาไนซ์ซึ่งผสมสารตัวเติม

ตัดชิ้นตัวอย่างยางขนาด $25 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ ชั่งน้ำหนัก M_i จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างไปแช่ในโทลูอิน 30 ml ในขวดที่มีฝาปิด เก็บไว้ในตู้มืดเป็นเวลา 7 วันเพื่อให้ชิ้นตัวอย่างอยู่ในสมดุลของการบวมพอง จากนั้นชั่งน้ำหนัก ชิ้นตัวอย่างซึ่งบวมพองด้วยโทลูอิน M_{gel} นำชิ้นตัวอย่างไปอบในตู้อบลดความดันที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก M_{dry} คำนวณหาเศษส่วนปริมาตรของยาง (ϕ'_r) ในเจลที่บวมพองดังนี้

$$\phi'_r = \frac{V_r}{V_s + V_r} \quad (2.8)$$

$$\text{โดยที่} \quad V_s = \frac{M_{gel} - M_{dry}}{\rho_s} \quad (2.9)$$

$$V_r = \frac{M_{dry}}{\rho_r} - M_i \left(\frac{phr_{CB} / phr_{tot}}{\rho_{CB}} \right) \quad (2.10)$$

เมื่อ V_s คือ ปริมาตรของโทลูอินในเจลที่บวมพอง V_r คือ ปริมาตรของยางในเจลที่บวมพอง phr_{CB} คือ phr ของ เขม่าดำในสูตรยาง phr_{tot} คือ phr รวมของสูตรยาง และ ρ_{CB} คือ ความหนาแน่นของเขม่าดำเท่ากับ 1.85 g/cm^3

เพื่อแก้ไขค่าเศษส่วนปริมาตรของยางซึ่งเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำ นำค่า ϕ'_r ไปแทนใน สมการที่ (2.10) (Kraus, 1963) เพื่อหาค่าเศษส่วนปริมาตรที่แท้จริง (ϕ_{ro}) ของยางในเจลที่บวมพอง แล้วนำค่า ϕ_{ro} ไปคำนวณหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงโดยใช้สมการที่ (2.6) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์อันตรกิริยา (χ) เท่ากับ 0.42

$$\frac{\phi'_r}{\phi_{ro}} = 1 - \left[3c(1 - \phi_r'^{1/3}) + \phi'_r - 1 \right] \left(\frac{\phi_{CB}}{1 - \phi_{CB}} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ c คือ ค่าคงที่ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.17 สำหรับเขม่าดำ และ ϕ_{CB} คือ เศษส่วนปริมาตรของเขม่าดำซึ่งคำนวณได้จาก

$$\phi_{CB} = \frac{(phr_{CB} / \rho_{CB})}{(phr_{CB} / \rho_{CB}) + (100 / \rho_r)} \quad (2.12)$$

การวัดความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางวัลคาไนซ์ผสมสารตัวเติมใช้ขั้นตอนทดสอบจำนวน 3 ขั้นตอน

2.5.3 การหาความถ่วงจำเพาะของยางวัลคาไนซ์

ตัดชิ้นตัวอย่างขนาด $5 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ แล้วชั่งน้ำหนักในอากาศ M_1 จากนั้นนำชิ้นตัวอย่างและตุ้มถ่วงซึ่งหนัก M_2 ไปชั่งน้ำหนักในน้ำ M_3 แล้วคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะ ($S.G.$) จากสมการที่ (2.13)

$$S.G. = \frac{M_1}{(M_1 + M_2) - M_3} \quad (2.13)$$

การวัดความถ่วงจำเพาะของยางวัลคาไนซ์ใช้ชิ้นทดสอบจำนวน 3 ชิ้น

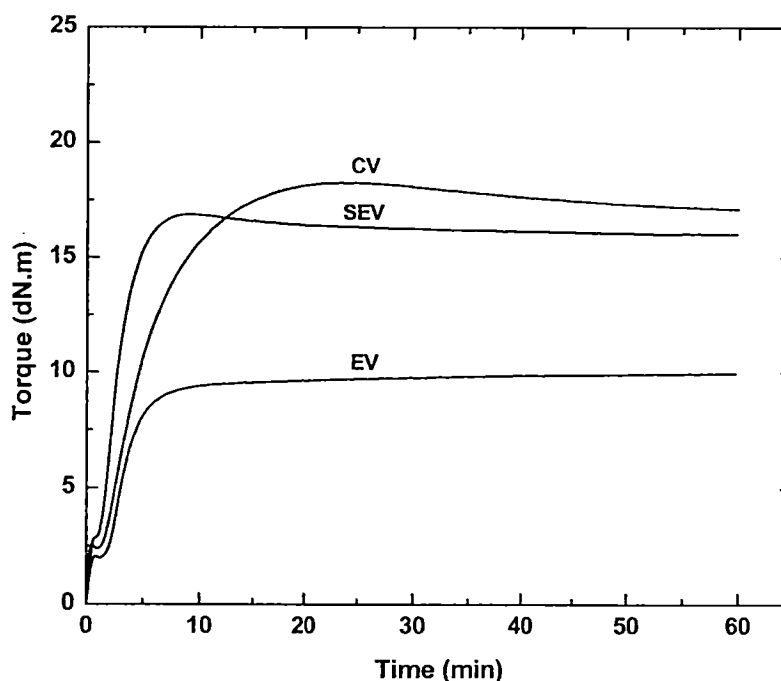
3. ผลการทดลอง

3.1 ยางธรรมชาติซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม

3.1.1 ผลของระบบการวัลคาไนซ์และอุณหภูมิ

3.1.1.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

กราฟการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารเร่ง MBT ในระบบปกติ (CV) ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (SEV) และระบบประสิทธิภาพ (EV) ที่อุณหภูมิ 150°C แสดงดังรูปที่ 3.1

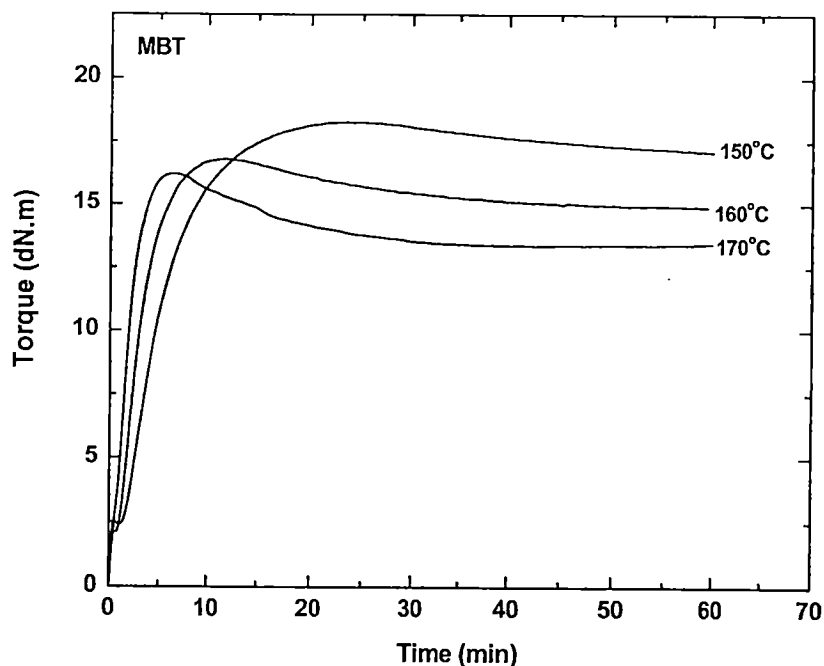


รูปที่ 3.1 กราฟการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารเร่ง MBT

จากรูปจะเห็นว่ายางคอมปาวด์ซึ่งวัลคาไนซ์ในระบบปกติจะเกิดรีเวอร์ชันมากที่สุด ส่วนระบบประสิทธิภาพจะไม่เกิดรีเวอร์ชัน แต่ค่าแรงบิดสูงสุดจะมีค่าต่ำกว่ายางคอมปาวด์ซึ่งวัลคาไนซ์ในระบบอื่นๆ นอกจากนี้ยางคอมปาวด์จะเกิดรีเวอร์ชันมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (รูปที่ 3.2)

3.1.1.2 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง

การวัลคาไนซ์ยางที่ระยะเวลามากกว่า optimum cure time ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลง (ตารางที่ 3.1) และปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติจะลดลงมากกว่ายางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าการเกิดรีเวอร์ชันสัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณพันธะเชื่อมโยงและโครงสร้างของพันธะเชื่อมโยง



รูปที่ 3.2 กราฟการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของยางคอมเพาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารเร่ง MBT

ตารางที่ 3.1 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยางธรรมชาติไม่ผสมสารตัวเติมซึ่งวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C โดยใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ที่ 100% cure time และ 1 ชั่วโมง

ชนิดของสารเร่ง	ระบบการวัลคาไนซ์	ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง (mol/m^3)	
		วัลคาไนซ์ที่ t_c	วัลคาไนซ์ 1 ชั่วโมง
MBT	EV	17.2 ± 0.4	16.7 ± 0.2
	Semi-EV	53.6 ± 0.6	41.1 ± 0.3
	CV	56.6 ± 0.8	45.0 ± 1.6
MBTS	EV	40.2 ± 1.9	41.0 ± 1.3
	Semi-EV	56.6 ± 0.1	47.3 ± 1.4
	CV	54.6 ± 0.1	44.9 ± 1.5
CBS	EV	44.3 ± 1.6	42.3 ± 1.0
	Semi-EV	66.5 ± 1.8	60.7 ± 1.7
	CV	61.9 ± 0.5	49.1 ± 0.7
TBBS	EV	47.1 ± 0.5	47.3 ± 0.3
	Semi-EV	75.4 ± 0.2	71.3 ± 1.9
	CV	53.8 ± 1.4	49.6 ± 0.9

3.1.1.3 สมบัติเชิงกล

สมบัติการดึงและสมบัติการฉีกขาดของยางไม่ผสมสารตัวเติมซึ่งวัลคาไนซ์ที่ระยะเวลา 100% cure time และ 1 ชั่วโมงแสดงในตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าสมบัติเชิงกลของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติจะลดลงมากกว่าระบบกึ่งประสิทธิภาพเมื่อวัลคาไนซ์ที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณพันธะเชื่อมโยง ในขณะที่สมบัติของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างของพันธะเชื่อมโยงมีความเสถียรมากกว่ายางซึ่งวัลคาไนซ์ในระบบปกติและกึ่งประสิทธิภาพ

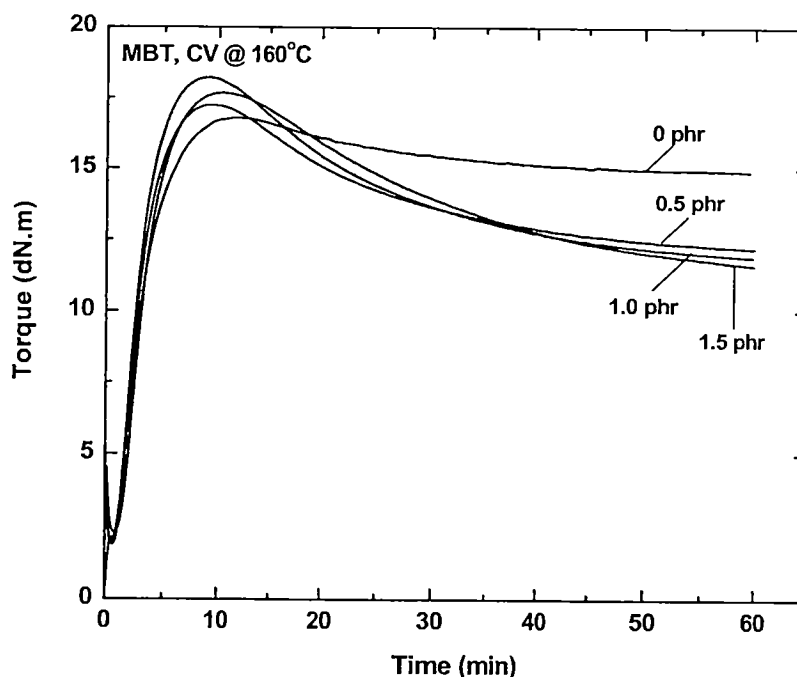
ตารางที่ 3.2 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติไม่ผสมสารตัวเติมซึ่งวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิ 150°C โดยใช้เวลาในการวัลคาไนซ์ที่ 100% cure time และ 1 ชั่วโมง

ชนิดของสารเร่ง	สมบัติ	วัลคาไนซ์ที่ t_c			วัลคาไนซ์ 1 ชั่วโมง		
		EV	Semi-EV	CV	EV	Semi-EV	CV
MBT	100%Modulus (MPa)	0.34 ± 0.01	0.65 ± 0.01	0.67 ± 0.01	0.32 ± 0.01	0.55 ± 0.00	0.58 ± 0.00
	300%Modulus (MPa)	0.57 ± 0.01	1.55 ± 0.02	1.44 ± 0.01	0.56 ± 0.01	1.14 ± 0.02	1.21 ± 0.04
	Tensile strength (MPa)	7.73 ± 0.95	16.2 ± 0.2	18.3 ± 1.2	5.7 ± 1.1	16.5 ± 0.8	14.4 ± 1.0
	Ultimate strain (%)	886 ± 28	706 ± 2	761 ± 10	836 ± 37	791 ± 8	781 ± 21
	Tearing energy (kJ/m ²)	8.1 ± 0.2	13.7 ± 0.4	17.7 ± 0.8	8.2 ± 0.4	15.2 ± 0.7	15.6 ± 0.4
MBTS	100%Modulus (MPa)	0.52 ± 0.01	0.64 ± 0.00	0.66 ± 0.01	0.53 ± 0.01	0.59 ± 0.01	0.59 ± 0.02
	300%Modulus (MPa)	1.08 ± 0.05	1.41 ± 0.01	1.44 ± 0.02	1.11 ± 0.02	1.28 ± 0.00	1.26 ± 0.03
	Tensile strength (MPa)	18.3 ± 0.3	21.9 ± 0.8	20.9 ± 0.7	16.9 ± 2.2	15.8 ± 1.4	16.4 ± 1.9
	Ultimate strain (%)	796 ± 4	780 ± 4	775 ± 8	775 ± 17	759 ± 8	783 ± 11
	Tearing energy (kJ/m ²)	13.8 ± 0.4	13.3 ± 0.4	16.8 ± 0.5	14.2 ± 0.1	13.4 ± 0.3	15.5 ± 0.5
CBS	100%Modulus (MPa)	0.53 ± 0.01	0.74 ± 0.04	0.72 ± 0.01	0.55 ± 0.01	0.66 ± 0.02	0.61 ± 0.10
	300%Modulus (MPa)	1.17 ± 0.02	1.73 ± 0.10	1.71 ± 0.01	1.22 ± 0.03	1.54 ± 0.01	1.40 ± 0.03
	Tensile strength (MPa)	17.7 ± 0.8	25.9 ± 0.5	19.1 ± 0.8	15.9 ± 0.4	19.9 ± 0.9	16.8 ± 1.8
	Ultimate strain (%)	768 ± 12	752 ± 3	699 ± 10	740 ± 17	722 ± 8	736 ± 10
	Tearing energy (kJ/m ²)	13.9 ± 0.1	16.5 ± 0.6	15.3 ± 0.6	14.0 ± 0.1	13.7 ± 0.3	13.2 ± 0.3
TBBS	100%Modulus (MPa)	0.54 ± 0.01	0.79 ± 0.01	0.62 ± 0.02	0.55 ± 0.01	0.72 ± 0.01	0.51 ± 0.02
	300%Modulus (MPa)	1.24 ± 0.03	1.99 ± 0.02	1.42 ± 0.05	1.24 ± 0.01	1.72 ± 0.01	1.36 ± 0.06
	Tensile strength (MPa)	13.2 ± 0.3	21.0 ± 1.4	19.7 ± 0.3	13.1 ± 1.1	17.9 ± 0.4	12.4 ± 0.7
	Ultimate strain (%)	675 ± 4	653 ± 9	756 ± 28	696 ± 6	671 ± 6	701 ± 14
	Tearing energy (kJ/m ²)	14.2 ± 0.2	13.6 ± 0.4	17.0 ± 0.8	13.6 ± 0.2	12.6 ± 0.3	15.6 ± 0.3

3.1.2 อิทธิพลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD

3.1.2.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

ผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางซึ่งวัลคาไนซ์ในระบบปกติและใช้สารเร่ง MBT แสดงในรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าการใช้สาร 6PPD ไม่สามารถป้องกันการเกิดรีเวอร์ชันได้ ซึ่งเห็นว่าการเสื่อมสภาพของยางโดยออกซิเจนหรือโอโซนไม่ใช่สาเหตุหลักของการเกิดรีเวอร์ชัน และการเพิ่มปริมาณของ 6PPD ทำให้เกิดการรีเวอร์ชันมากขึ้น นอกจากนี้สารเร่ง MBTS, CBS, และ TBBS ก็ให้ผลการทดลองคล้ายคลึงกัน



รูปที่ 3.3 ผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ต่อการสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ในระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่อุณหภูมิ 160°C

3.1.2.2 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง

ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ 6PPD ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.4) แสดงให้เห็นว่า 6PPD ไม่มีผลต่อการเกิดพันธะเชื่อมโยงของยาง และสารเร่งกลุ่มซัลฟิโนไมด์จะให้ยางที่มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงมากกว่าสารเร่งกลุ่มโซอะโซล การวัลคาไนซ์ยางนานกว่าเวลา cure time ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยางลดลง

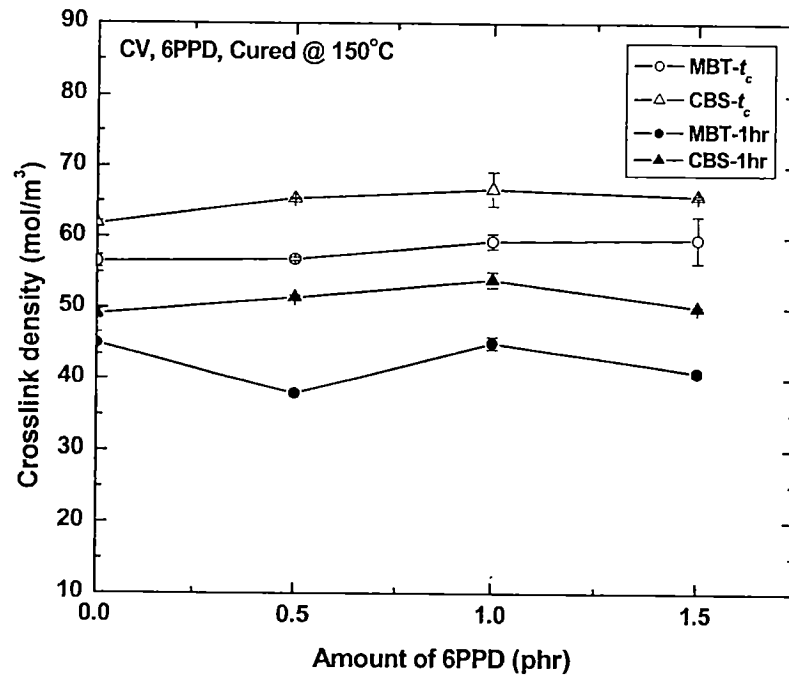
3.1.2.3 สมบัติเชิงกล

การเพิ่มปริมาณ 6PPD ไม่ทำให้ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 300% ความทนทานต่อแรงดึง และระยะยืดขาดเปลี่ยนแปลง เนื่องจากปริมาณของพันธะเชื่อมโยงไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณ 6PPD ที่เพิ่มขึ้น การวัลคาไนซ์ยางมากเกินไปจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลง (รูปที่ 3.5) เนื่องจากปริมาณของพันธะเชื่อมโยงลดลง นอกจากนี้จะเห็นว่าสารเร่งกลุ่มซัลฟิโนไมด์จะให้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าสารเร่งกลุ่มโซอะโซล (รูปที่ 3.6)

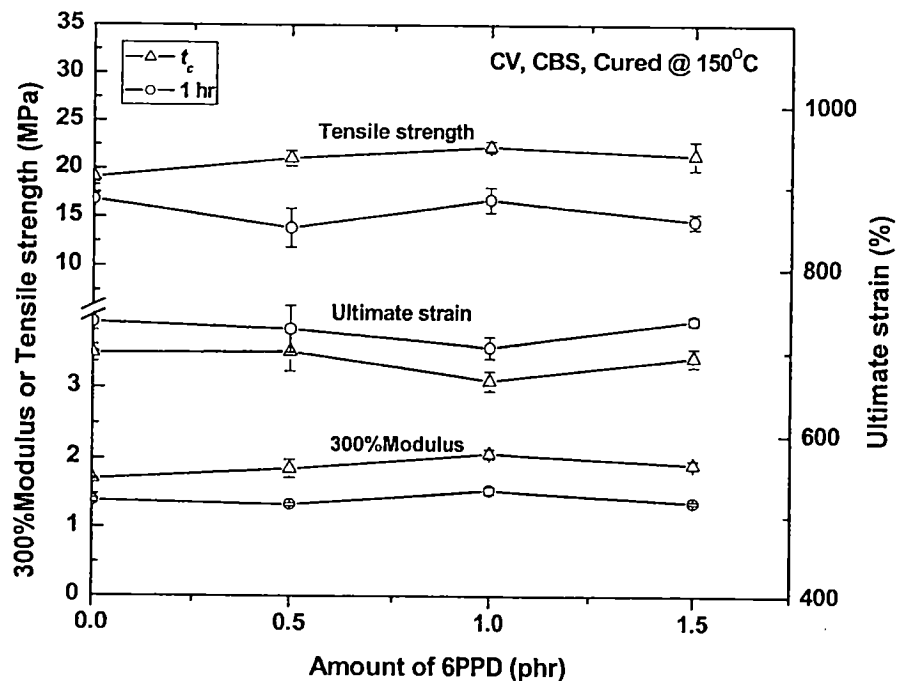
3.1.3 อิทธิพลของสารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติของยางธรรมชาติซึ่งไม่ผสมสารตัวเติม

3.1.3.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

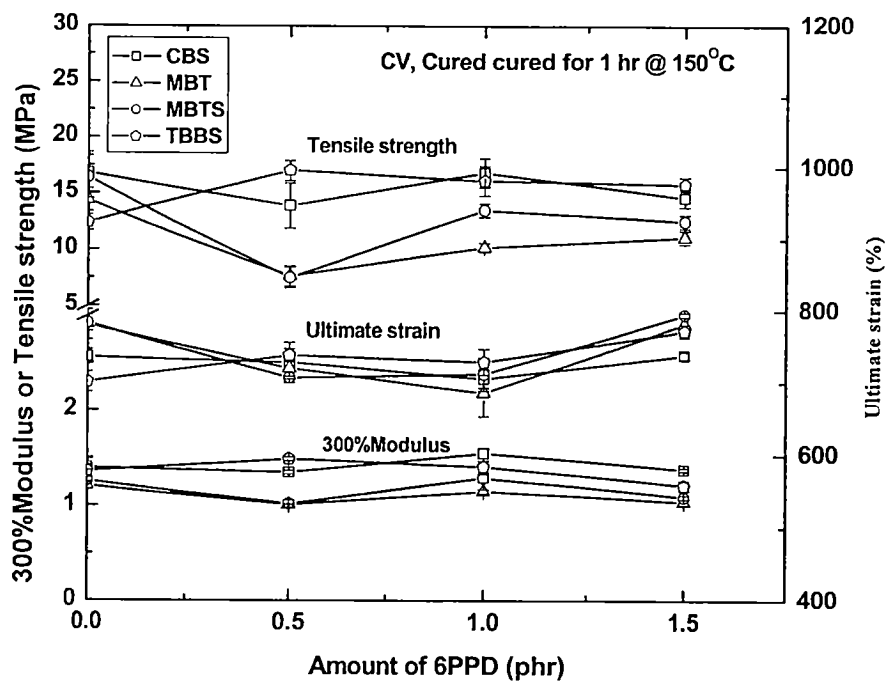
การใช้สารต้านรีเวอร์ชัน BCIMX, HTS, และ TMPTA ช่วยป้องกันการเกิดรีเวอร์ชันได้ แต่ยางคอมเพาต์ซึ่งใช้สาร KA ยังคงเกิดรีเวอร์ชัน (รูปที่ 3.7) อย่างไรก็ตามการใช้สาร KA จะทำให้ยางที่มีค่าทอร์คสูงกว่าการใช้สารต้านรีเวอร์ชันชนิดอื่นๆ ประมาณ 2 เท่า และเปราะ (brittle)



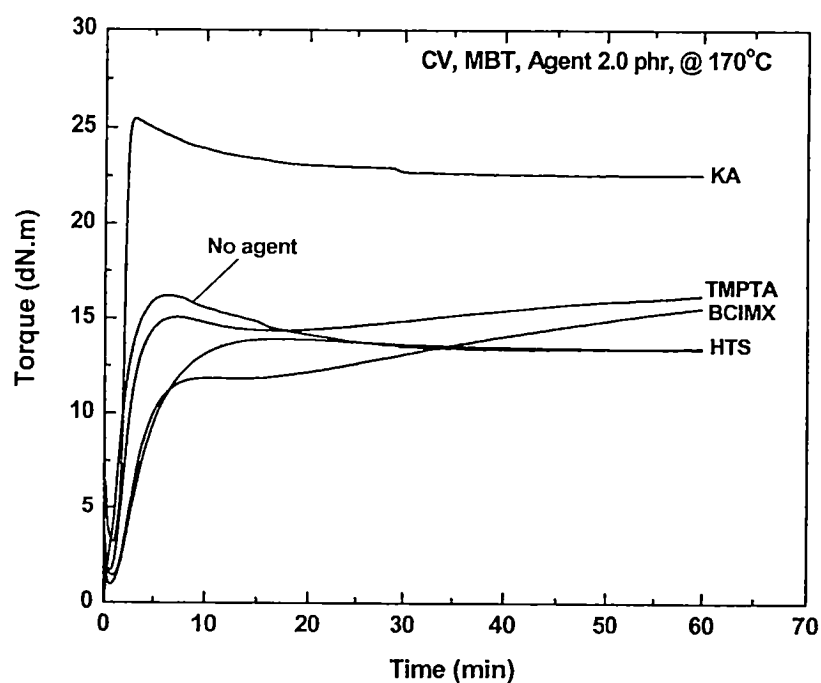
รูปที่ 3.4 ผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ต่อปริมาณของพันธะเชื่อมโยงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง CBS และ MBT ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นระยะเวลาต่างๆ กัน



รูปที่ 3.5 ผลของสารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ต่อสมบัติการดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง CBS ที่อุณหภูมิ 150°C และวัลคาไนซ์ที่เวลาต่างกัน



รูปที่ 3.6 ผลของการป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ต่อสมบัติการดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่งกลุ่มโรอะโซลและซัลฟิโนไมด์ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

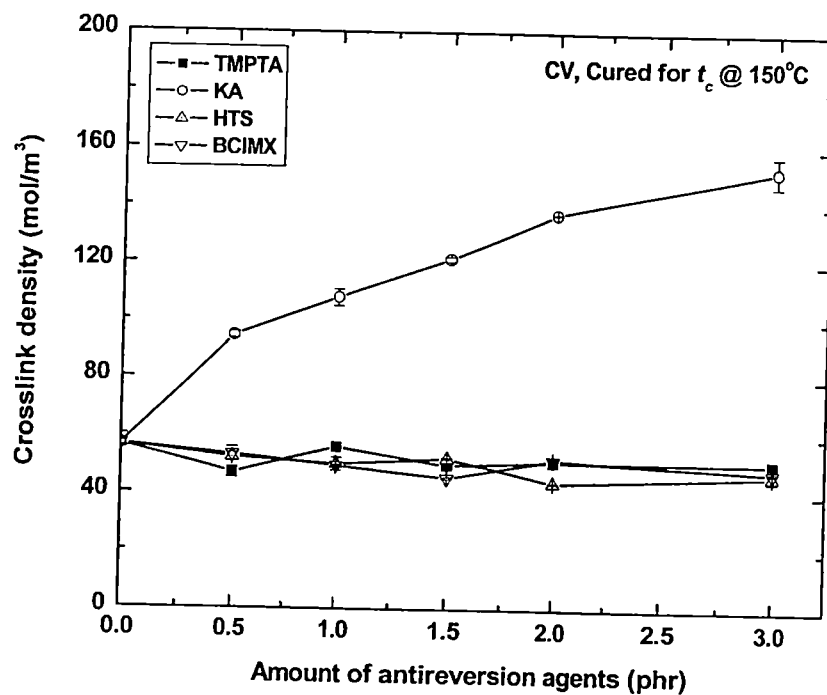


รูปที่ 3.7 ผลของการใช้สารต้านรีเวอร์ชันต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่อุณหภูมิ 170°C

สาร KA มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับ sulfuring agent ซึ่งเป็นสารตัวกลางที่ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลยาง ดังนั้นสาร KA จึงทำหน้าที่เสมือนสารที่ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงอีกแหล่งหนึ่งนอกเหนือจากกำมะถัน สารต้านรีเวอร์ชันทั้ง 4 ชนิดมีผลต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมปาวด์ซึ่งใช้สารเร่ง MBT และ CBS ในลักษณะคล้ายคลึงกัน

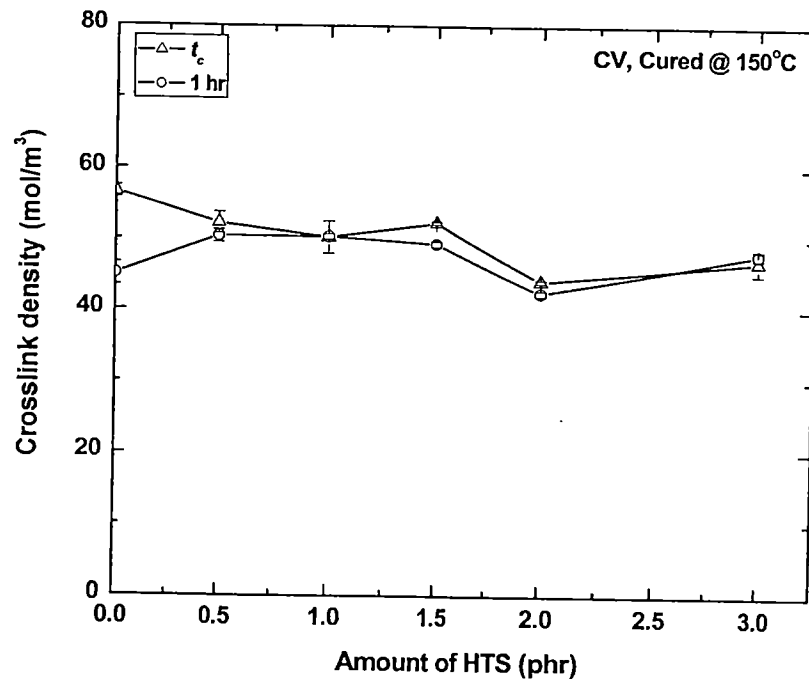
3.1.3.2 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง

การเพิ่มปริมาณสารต้านรีเวอร์ชัน BCIMX, HTS, และ TMPTA ในช่วง 0.5-3.0 phr ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงของยาง (รูปที่ 3.8) แสดงให้เห็นว่าสารต้านรีเวอร์ชัน BCIMX, HTS, และ TMPTA ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์เสริมนอกเหนือจากกำมะถัน ในขณะที่ปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยางจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสาร KA ซึ่งยืนยันว่าสาร KA ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์เสริม



รูปที่ 3.8 ผลของปริมาณสารต้านรีเวอร์ชันต่อปริมาณของพันธะเชื่อมโยงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่อุณหภูมิ 150°C ที่ t_c

เวลาในการวัลคาไนซ์ที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยางซึ่งใช้สาร HTS เปลี่ยนแปลง (รูปที่ 3.9) ซึ่งสาร BCIMX และ TMPTA ก็ให้ผลในลักษณะคล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นว่าสารทั้ง 3 ชนิดทำหน้าที่ขัดเซพพันธะเชื่อมโยงซึ่งลดลงในระหว่างการเกิดรีเวอร์ชัน



รูปที่ 3.9 ผลของปริมาณสาร HTS ต่อปริมาณของพันธะเชื่อมโยงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่อุณหภูมิ 150°C และวัลคาไนซ์ที่เวลาต่างกัน

3.1.3.3 สมบัติเชิงกล

การใช้สารต้านรีเวอร์ชัน BCIMX, HTS, และ TMPTA ทำให้สมบัติการฉีกขาดของยางวัลคาไนซ์ลดลงเล็กน้อย และไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้สารต้านรีเวอร์ชันดังกล่าว (รูปที่ 3.10) ในขณะที่ความทนทานต่อการฉีกขาดของยางที่ใช้สาร KA จะลดลงอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของ KA ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิสโคอิลาสติกของยาง

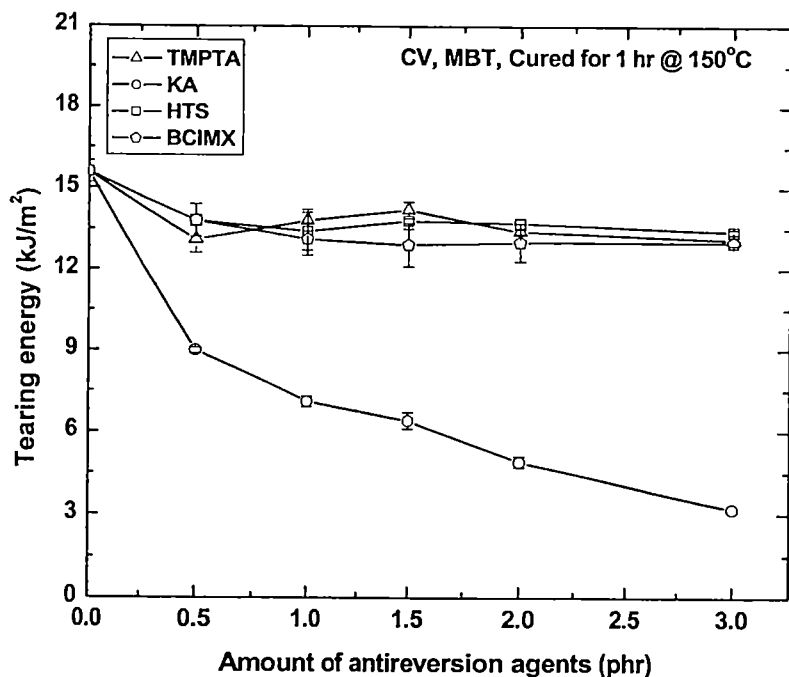
สมบัติการดึงของยางซึ่งผสมสารต้านรีเวอร์ชัน BCIMX ลดลงเล็กน้อยเมื่อเวลาการวัลคาไนซ์มากกว่า t_c (รูปที่ 3.11) และสมบัติการดึงของยางเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณสาร BCIMX ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการฉีกขาดของยาง สาร HTS และ TMPTA ให้ผลการทดลองคล้ายคลึงกับ BCIMX

3.2 ยางธรรมชาติซึ่งผสมสารตัวเติม

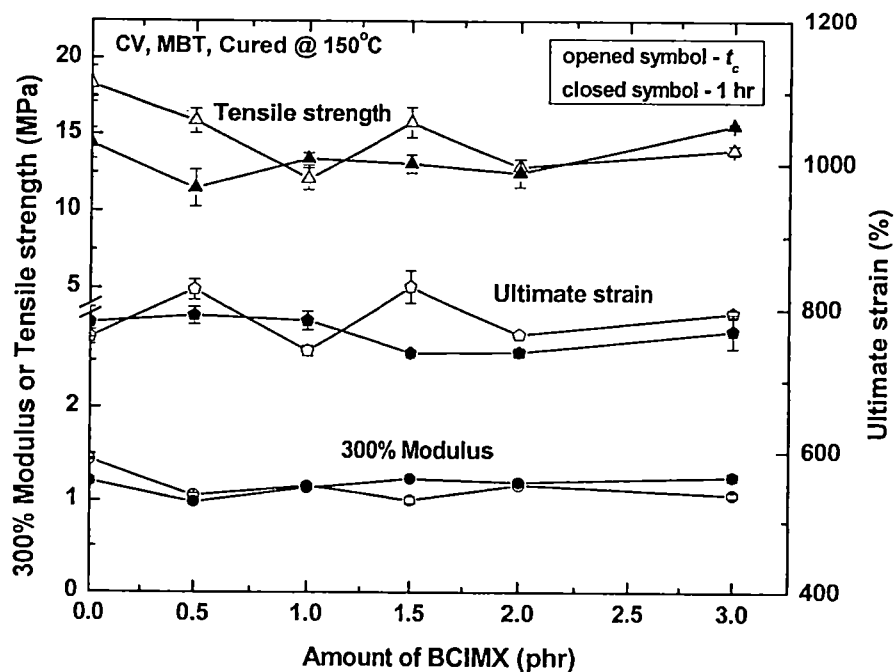
3.2.1 ผลของปริมาณและชนิดของสารตัวเติม

3.2.1.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

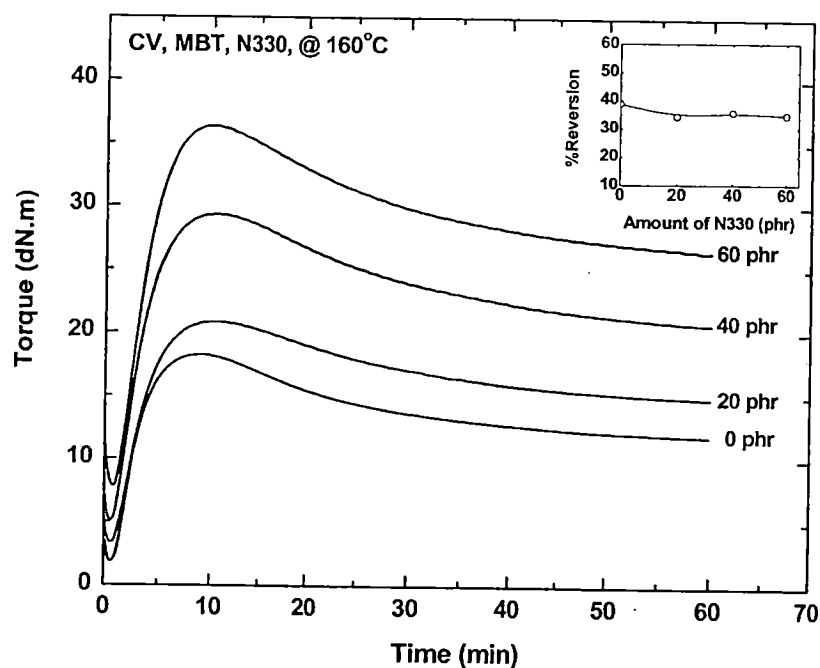
การใช้เขม่าดำและแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ช่วยป้องกันการเกิดรีเวอร์ชันของยาง (รูปที่ 3.12 และ 3.13) อย่างไรก็ตามระดับการเกิดรีเวอร์ชันจะไม่ขึ้นกับปริมาณของสารตัวเติม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเกิดรีเวอร์ชันไม่มีความสัมพันธ์กับอันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติม ยางที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนตจะเกิดรีเวอร์ชันสูงกว่ายางที่ผสมเขม่าดำเล็กน้อย



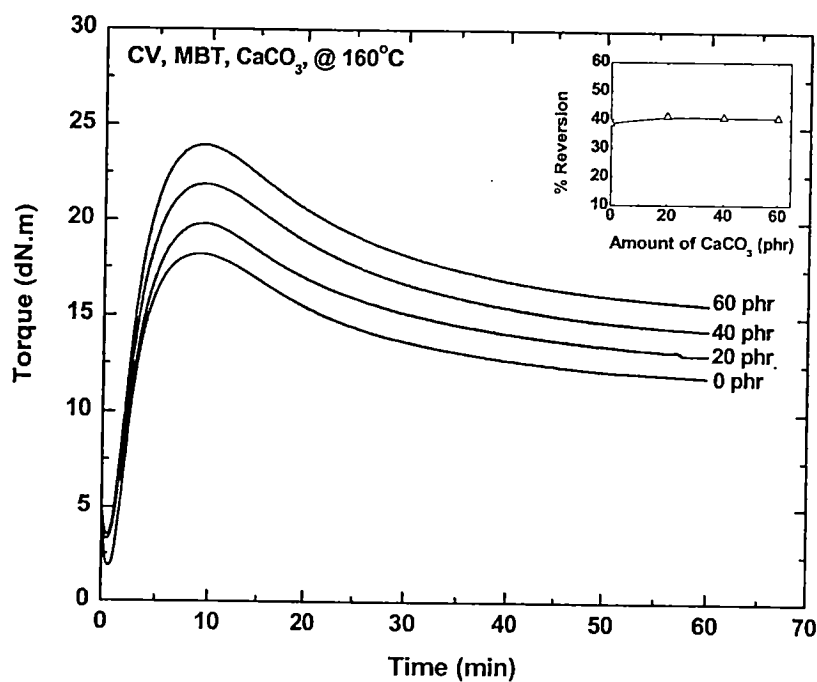
รูปที่ 3.10 ผลของปริมาณสารต้านรีเวอร์ชั่นต่อสมบัติการฉีกขาดของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่ 150°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.11 ผลของปริมาณสารต้านรีเวอร์ชั่นต่อสมบัติการดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่ 150°C และวัลคาไนซ์ที่เวลาต่างกัน



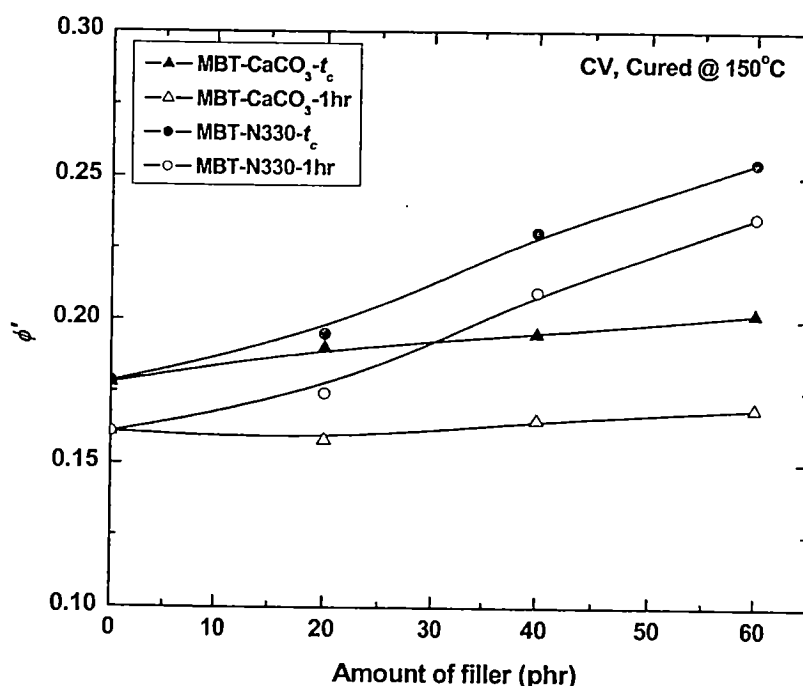
รูปที่ 3.12 ผลของปริมาณเคมีดำต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่ 160°C (รูปเล็ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Reversion และปริมาณของเคมีดำ)



รูปที่ 3.13 ผลของปริมาณ CaCO₃ ต่อสมบัติการวัลคาไนซ์ของยางคอมเพาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT ที่ 160°C (รูปเล็ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Reversion และปริมาณของ CaCO₃)

3.2.1.2 ปริมาณพันธะเชื่อมโยง

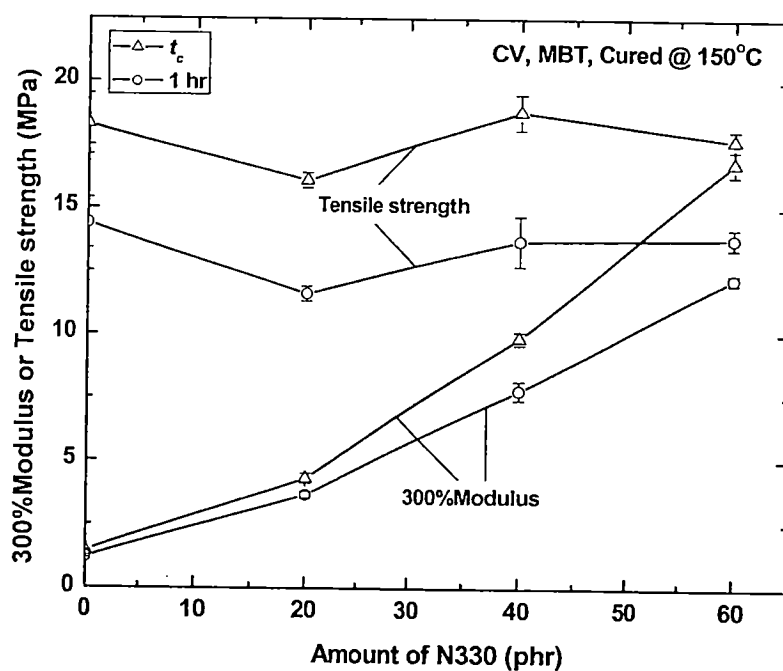
การเพิ่มปริมาณขี้เถ้าทำให้เศษส่วนปริมาตรของยาง (ϕ') ในเจลเพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.14) เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางและขี้เถ้า ในขณะที่การเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้เศษส่วนปริมาตรของยาง (ϕ') ในเจลเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดอันตรกิริยากับยางได้น้อยและน้อยกว่าขี้เถ้ามาก การวัลคาไนซ์ที่มากเกินไปจะทำให้ปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณพันธะเชื่อมโยงกับปริมาณของสารตัวเติมของยางซึ่งวัลคาไนซ์ที่ cure time และ 1 hr มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แสดงให้เห็นว่าการลดลงของพันธะเชื่อมโยงไม่ได้เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติม



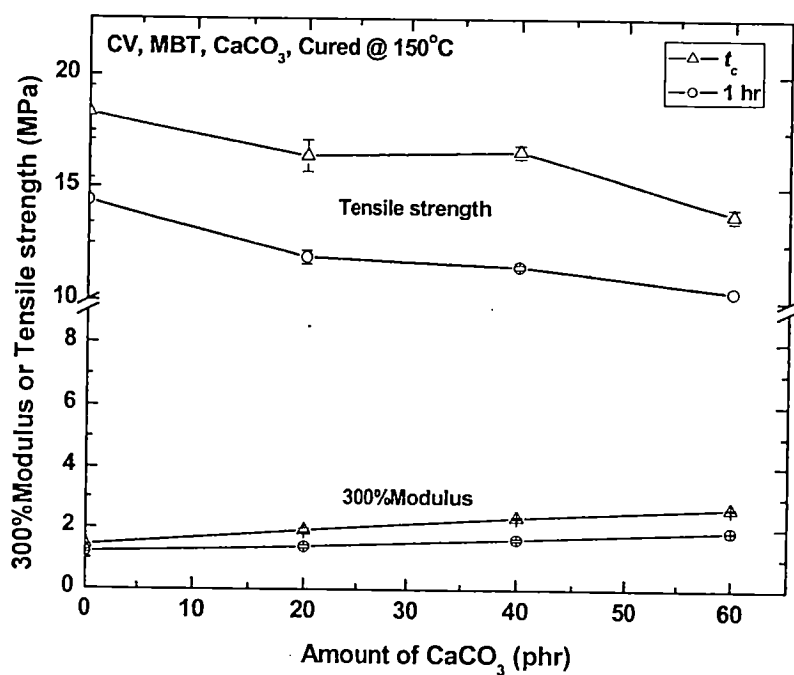
รูปที่ 3.14 ผลของปริมาณขี้เถ้าและแคลเซียมคาร์บอเนตต่อเศษส่วนปริมาตร (ϕ') ของยางในเจลที่บวมพอง (●) N330 วัลคาไนซ์ที่ cure time, (○) N330 วัลคาไนซ์ 1 ชั่วโมง, (▲) CaCO₃ วัลคาไนซ์ที่ cure time, และ (△) CaCO₃ วัลคาไนซ์ 1 ชั่วโมง

3.2.1.3 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของยางซึ่งผสมขี้เถ้าและแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงในรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ การเพิ่มปริมาณขี้เถ้าและแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามขี้เถ้าช่วยเพิ่มค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% ได้มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างยางและขี้เถ้า การวัลคาไนซ์ที่มากเกินไปทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลลดลงเนื่องจากปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลง และยางเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิสโคอีลาสติก



รูปที่ 3.15 ผลของปริมาณเขม่าดำต่อค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% และความทนทานต่อแรงดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและใช้สารเร่ง MBT ที่ cure time และ 1 ชั่วโมง

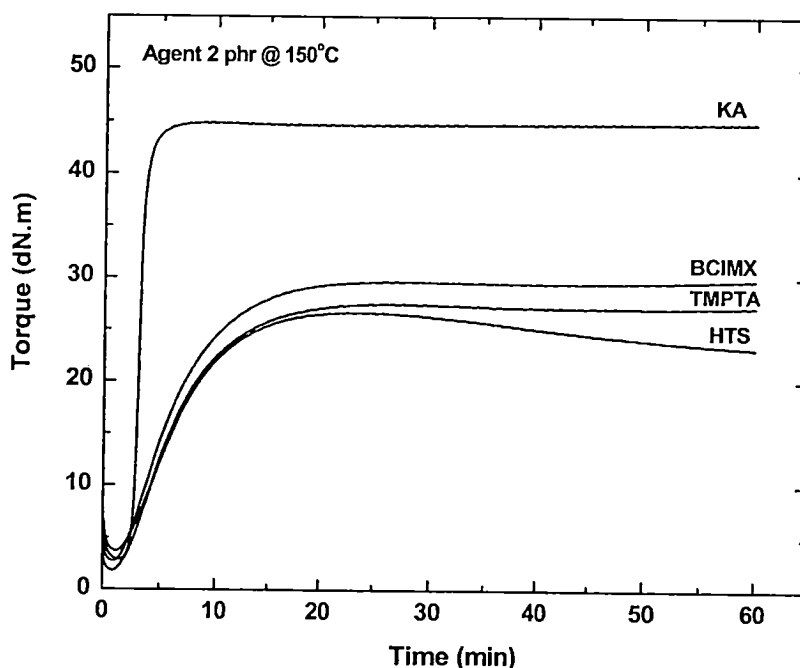


รูปที่ 3.16 ผลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตต่อค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 300% และความทนทานต่อแรงดึงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและใช้สารเร่ง MBT ที่ cure time และ 1 ชั่วโมง

3.2.2 ผลของสารต้านรีเวอร์ชัน

3.2.2.1 สมบัติการวัลคาไนซ์

การใช้สารต้านรีเวอร์ชันในยางผสมเขม่าดำซึ่งวัลคาไนซ์ในระบบปกติและใช้สารเร่ง MBT ช่วยป้องกันการเกิดรีเวอร์ชันได้ (รูปที่ 3.17) สาร KA ทำหยาบมีค่าทอร์กสูงสุดมากกว่าการใช้สารต้านรีเวอร์ชันชนิดอื่นๆ เกือบหนึ่งเท่าตัว ขณะที่ค่าทอร์กสูงสุดของยางผสม BCIMX และ TMPTA มีค่าใกล้เคียงกัน และยางซึ่งผสม HTS เกิดรีเวอร์ชันเล็กน้อย



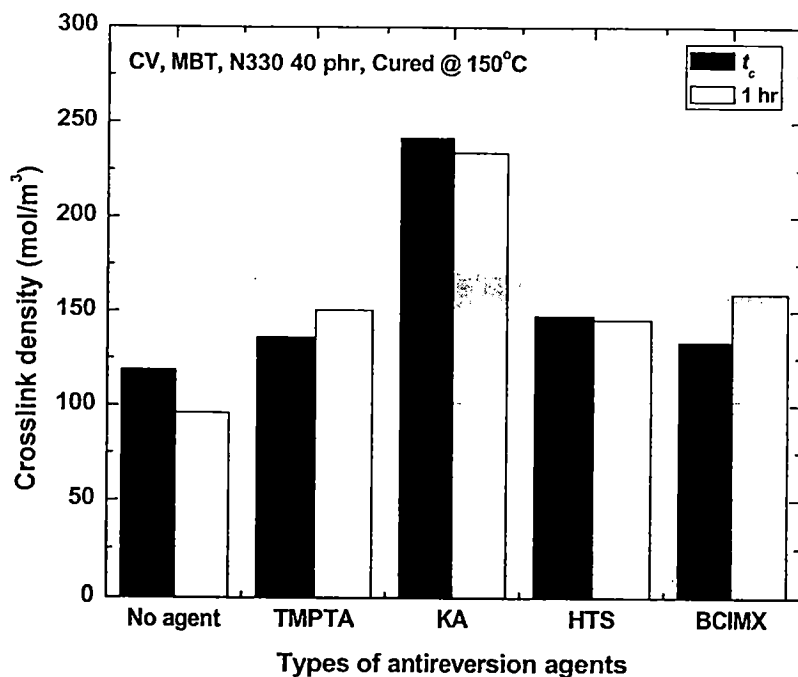
รูปที่ 3.17 สมบัติการวัลคาไนซ์ที่ 150°C ของยางผสมเขม่าดำ 40 phr ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT และใช้สารต้านรีเวอร์ชัน 2.0 phr

3.2.2.2 ปริมาณพันธะเชื่อมโยง

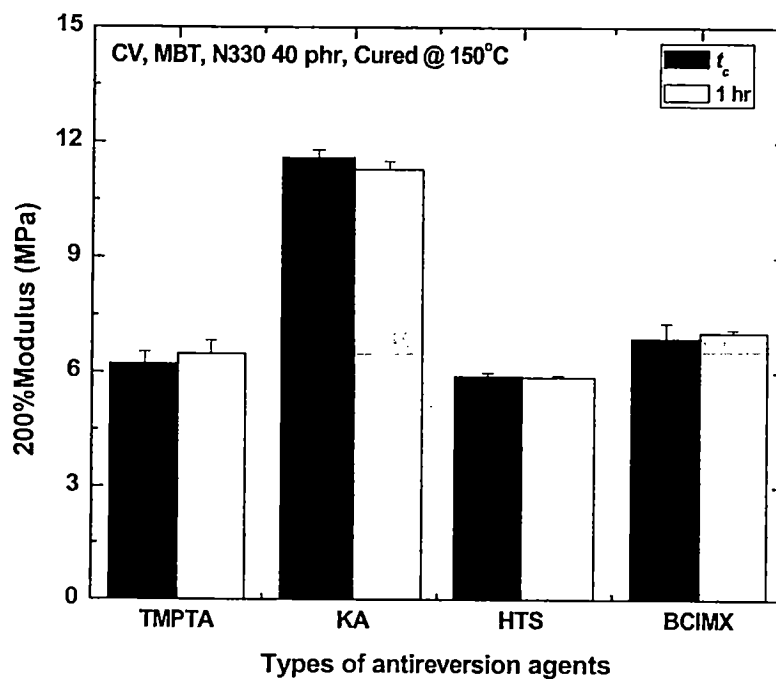
เช่นเดียวกับยางซึ่งไม่ผสมสารตัวเติมการใช้สารต้านรีเวอร์ชัน KA ทำหยาบมีปริมาณพันธะเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นประมาณหนึ่งเท่าของยางซึ่งไม่ผสมสารต้านรีเวอร์ชัน (รูปที่ 3.18) ขณะที่ยางซึ่งผสม BCIMX, TMPTA, และ HTS มีปริมาณพันธะเชื่อมโยงใกล้เคียงกัน สาร KA เป็นสารทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงนอกเหนือจากกำมะถัน ในขณะที่ BCIMX, TMPTA, และ HTS ทำหน้าที่ขัดเซย์พันธะเชื่อมโยงที่ลดลงเมื่อยางเกิดรีเวอร์ชัน ซึ่งจะเห็นได้จากปริมาณพันธะเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นของยางซึ่งวัลคาไนซ์เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในกรณีที่ใช้สาร BCIMX และ TMPTA และปริมาณพันธะเชื่อมโยงที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อใช้สาร HTS

3.2.2.3 สมบัติเชิงกล

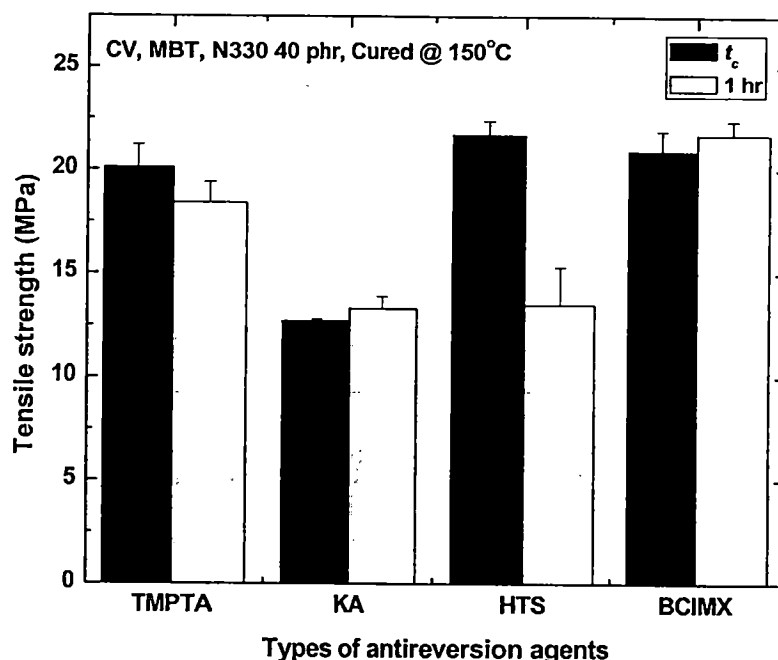
การใช้สาร KA ทำหยาบมีค่ามอดุลัสสูงกว่าการใช้สารต้านรีเวอร์ชันชนิดอื่นๆ (รูปที่ 3.19) แต่มีค่าความทนทานต่อแรงดึงต่ำกว่า จากผลการทดลองจะเห็นว่าสาร BCIMX และ TMPTA เป็นสารต้านรีเวอร์ชันที่มีประสิทธิภาพดีกว่า KA และ HTS



รูปที่ 3.18 ปริมาณพันธะเชื่อมโยงของยางผสมเขม่าดำ 40 phr ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT และใช้สารต้านรีเวอร์ชัน 2.0 phr (วัลคาไนซ์ที่ 150°C ที่ cure time และ 1 ชั่วโมง)



รูปที่ 3.19 ค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 200% ของยางผสมเขม่าดำ 40 phr ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT และใช้สารต้านรีเวอร์ชัน 2.0 phr (วัลคาไนซ์ที่ 150°C ที่ cure time และ 1 ชั่วโมง)



รูปที่ 3.20 ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางผสมเขม่าดำ 40 phr ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติและสารเร่ง MBT และใช้สารต้านรีเวอร์ชัน 2.0 phr (วัลคาไนซ์ที่ 150°C ที่ cure time และ 1 ชั่วโมง)

3.3 การวิเคราะห์ต้นทุน

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าสารต้านรีเวอร์ชันสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในกรณีที่เกิดการวัลคาไนซ์มากเกินไป หรือในกรณีที่ที่มีการสะสมความร้อนสูงแล้วทำให้พันธะเชื่อมโยงแตกออกและปริมาณพันธะเชื่อมโยงลดลง อย่างไรก็ตามในกรณีที่วัลคาไนซ์ไม่เกินไปจุด optimum cure สารต้านรีเวอร์ชันแทบไม่มีความจำเป็น จากผลการทดลอง BCIMX และ TMPTA เป็นสารต้านรีเวอร์ชันที่มีประสิทธิภาพดีกว่าสารชนิดอื่น รวมทั้งราคาของสารทั้งสองชนิดนี้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงแสดงตัวอย่างของการวิเคราะห์ต้นทุนเฉพาะสาร BCIMX

ตารางที่ 3.3 แสดงการวิเคราะห์ต้นทุนของยางคอมปาวด์ซึ่งใช้สาร BCIMX 2.0 phr เปรียบเทียบกับยางคอมปาวด์ซึ่งไม่ใช้ BCIMX จากตารางจะเห็นว่าการใช้สาร BCIMX ในปริมาณ 2.0 phr จะทำให้ต้นทุนของยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้น 9.44 บาทต่อกิโลกรัม และการใช้สาร BCIMX ในช่วง 1.0-2.0 phr จะทำให้ต้นทุนของยางคอมปาวด์เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 4.75-9.44 บาทต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 3.3 การวิเคราะห์ต้นทุนของยางคอมเพาต์

Ingredients	No. 1 (kg)	No. 2 (kg)	Price (baht/kg)	No. 1 (baht)	No. 2 (baht)
RSS 3	100	100	150	15,000	15,000
Zinc oxide	5.0	5.0	100	500	500
Stearic acid	1.0	1.0	50	50	50
Sulfur	2.5	2.5	32	80	80
6PPD	1.0	1.0	250	250	250
MBT	0.5	0.5	220	110	110
N330	40	40	60	2,400	2,400
BCIMX	-	2.0	840	-	1,680
Total	150.0	152.0		18,390	20,070
Price of compounds (baht/kg)				122.60	132.04

4. สรุปผลการทดลอง

1. ยางคอมเปาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันในระบบปกติจะเกิดรีเวอร์ชันมากกว่ายางคอมเปาต์ซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบกึ่งประสิทธิภาพและระบบประสิทธิภาพ และรีเวอร์ชันจะเกิดมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง
2. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ 6PPD ไม่สามารถป้องกันการเกิดรีเวอร์ชันในยางคอมเปาต์
3. สารตัวเติมเซมาต้า N330 และแคลเซียมคาร์บอเนตไม่ช่วยป้องกันการเกิดรีเวอร์ชันในยางคอมเปาต์ และระดับของการเกิดรีเวอร์ชันไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตัวเติม
4. สารต้านรีเวอร์ชัน KA ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์เสริมนอกเหนือจากกำมะถัน ในขณะที่สาร BCIMX, TMPTA, และ HTS ทำหน้าที่ขัดเซพันระหว่างชั้นเชื่อมโยงที่ลดลงในระหว่างการเกิดรีเวอร์ชัน
5. สาร BCIMX และ TMPTA เป็นสารต้านรีเวอร์ชันที่มีประสิทธิภาพสำหรับยางคอมเปาต์ผสมเซมาต้าและวัลคาไนซ์โดยใช้สารเร่งกลุ่มโรอะโซล รวมทั้งซัลฟิनाไมด์

ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษา การป้องกันการรีเวอร์ชันสามารถทำได้ทั้งการใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพและการใช้สารต้านรีเวอร์ชัน แต่การใช้ระบบการวัลคาไนซ์แบบประสิทธิภาพจะทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลงเนื่องจากปริมาณของพันธะเชื่อมโยงลดลง ในขณะที่การใช้สารต้านรีเวอร์ชันจะช่วยรักษาระดับของปริมาณพันธะเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยาง จากผลการศึกษาวิธีการป้องกันการรีเวอร์ชันที่ดีคือ การใช้สาร BCIMX และ TMPTA ในสูตรยางปกติในปริมาณ 1.0-2.0 phr

นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบว่าสาร KA ทำหน้าที่เป็นสารวัลคาไนซ์เสริมนอกเหนือจากกำมะถัน ดังนั้น การศึกษาการใช้สาร KA เป็นสารวัลคาไนซ์ เพื่อให้ได้ยางที่มีสมบัติเชิงกลดีและมีความเสถียรต่อความร้อน จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

5. เอกสารอ้างอิง

- Blok, E. J., Kraleovich, M. L., and Varner, J. E., 2000. Preliminary studies on new anti-reversion agents for the sulfur vulcanization of diene rubbers. *Rubber Chemistry and Technology*, 73: 114-120.
- Buding, H., Jeske, W., and Weidenhaupt, H. -J., 2001. Vulcuren trial product KA9188 – a new bifunctional crosslinker for diene rubber. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 54(1&2): 8-13.
- Datta, R. N., and Ivany, M. S., 1995. A chemical for reversion resistant compounding. *Rubber World*, 212(5): 24-29, 81.
- Flory, P. J., and Rehner, Jr., J., 1943. Statistical mechanics of crosslinked polymer networks II. Swelling. *The Journal of Chemical Physics*, 11(11): 521-526.
- Henning, S. K., 2008. Performance of acrylates as anti-reversion agents. *Rubber and Plastics News*, September 22, p14-18.
- Kleiner, T., Neilsen, J., Weidenhaupt, H. -J., Jeske, W., and Buding, H., 2002a. Agent hikes cure temperatures, reduces reversion. *Rubber and Plastics News*, January 14, p14-21.
- Kleiner, T., Jeske, W., and Loreth, W., 2002b. New crosslinking agent increases stability. *Rubber and Plastics News*, October 7, p29-36.
- Kraus, G., 1963. Swelling of filler-reinforced vulcanizates. *Journal of Applied Polymer Science*, 7: 861-868.
- Monsallier, J. -M., 2009. Multifunctional acrylates as anti-reversion agents in sulfur cured systems. *Kautschuk Gummi Kunststoffe*, 62(9): 442-447.
- Schotman, A. H. M., van Haeran, P. J. C., Weber, A. J. M., van Wijk, F. G. H., Hofstraat, J. W., Talma, A. G., Steenbergen, A., and Datta, R. N., 1996. Studies on a new antireversion agent for sulfur vulcanization of diene rubbers. *Rubber Chemistry and Technology*, 69: 727-741.
- To, B. H., 1998. High temperature curing and high heat resistant compounding. *Rubber World*, 218(5): 19-23, 29.

To, B. H., Ignatz-Hoover, F., and Anthoine, G., 2006a. Better thermal and thermal oxidative aging resistance; part I. *Rubber and Plastics News*, October 16, p14-16.

To, B. H., Ignatz-Hoover, F., and Anthoine, G., 2006b. Better thermal and thermal oxidative aging resistance; part II. *Rubber and Plastics News*, October 30, p17-20.

ภาคผนวก สรุปรายข้อคิดเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิต่อโครงการ

ข้อคิดเห็น/ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ	ชี้แจงโดยนักวิจัย
<u>ความเห็นด้านการพิมพ์ (Editorial)</u> 1. ทบทวนการเขียนบทคัดย่ออีกครั้ง เนื่องจากยังกล่าวถึงผลการศึกษาในประเด็นต่าง ๆ ไม่ครบสมบูรณ์ ควรอิงการสรุปประเด็นจากกิจกรรมหลาย ๆ รายการที่เสนอไว้ว่าได้ผลเป็นเช่นไร และควรเขียนบทคัดย่อเพื่อก่อให้เกิดการสนใจต่อผู้อ่าน	1. การศึกษาในประเด็นต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นผลของอุณหภูมิ ปริมาณของ 6PPD ปริมาณของ N330 และแคลเซียมคาร์บอเนต และปริมาณของสารต้านรีเวอร์ชันแต่ละชนิดนั้นเพื่อต้องการทราบว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการรีเวอร์ชันอย่างไร ดังนั้นในบทคัดย่อจึงกล่าวถึงผลโดยรวมที่เกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ที่กล่าวมา นักวิจัยเห็นว่าบทคัดย่อมีความกระชับ และมีความสมบูรณ์ในตัวอยู่แล้ว
<u>ความเห็นด้านวิชาการ (Technical)</u> 1. ตารางที่ 3.2 หน้า 16 ตรวจสอบผลการทดลองค่า tensile strength ของสารเร่ง MBT ในระบบ EV เนื่องจากค่าที่รายงานนั้นต่ำกว่าความเป็นจริง ทั้งกรณีการวัลคาไนซ์ที่ t_c และวัลคาไนซ์ 1 ชั่วโมง ควรอธิบายเหตุผลเพิ่มเติม 2. ข้อ 3.1.1.3 หน้า 16 ในการอธิบายผลการทดลองที่ระบุว่า สมบัติเชิงกลของยางที่ใช้ระบบ EV ลดลงมากกว่าระบบกึ่งประสิทธิภาพเมื่อวัลคาไนซ์ที่ 1 ชั่วโมงนั้น ควรอธิบายในเชิงสถิติว่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ อย่างไร ทั้งนี้ควรอธิบายเหตุผลในเชิงสถิติในประเด็นการทดสอบสมบัติอื่นๆ ด้วย 3. ข้อ 3.3 หน้า 28 ควรระบุเหตุผลว่าเพราะเหตุใดจึงเลือกเฉพาะสาร BCIMX ในการวิเคราะห์	1. ค่าที่วัดได้เป็นค่าจริงจากการทดลองภายใต้สภาวะของการทดลองนี้ การที่ค่า tensile strength ของยางซึ่งวัลคาไนซ์โดยใช้สารเร่ง MBT ในระบบ EV ทั้งกรณีการวัลคาไนซ์ที่ t_c และวัลคาไนซ์ 1 ชั่วโมง มีค่าต่ำนั้นเนื่องจากปริมาณของพันธะเชื่อมโยงของยางซึ่งวัลคาไนซ์ในระบบดังกล่าวต่ำกว่าในระบบอื่นๆ ประมาณ 3 เท่า ดังตารางที่ 3.1 หน้า 15 2. ข้อ 3.1.1.3 หน้า 16 ในรายงานวิจัยระบุว่า "สมบัติเชิงกลของยางซึ่งวัลคาไนซ์ด้วยระบบปกติจะลดลงมากกว่าระบบกึ่งประสิทธิภาพเมื่อวัลคาไนซ์ที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง" ไม่ใช่ "ระบบ EV" ในงานวิจัยนี้ค่าทางสถิติที่ใช้มีเพียงค่าเฉลี่ย (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation, SD) เท่านั้น เนื่องจากการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางจะใช้ชิ้นทดสอบอย่างน้อยจำนวน 3 ชิ้น และได้รายงานผลในรูปแบบของ mean $\pm$ SD 3. ได้ระบุเหตุผลแล้วใน ข้อ 3.3 หน้า 28

ต้นทุน 4. ควรระบุจำนวนที่ทำการทดสอบซ้ำในแต่ละประเด็นที่ศึกษา เนื่องจากหากไม่ระบุจำนวนซ้ำในการทดลอง ผลการทดลองที่รายงานมานั้นอาจไม่ก่อให้เกิดความน่าเชื่อถือ และไม่สามารถยอมรับได้	4. ได้ระบุจำนวนของขั้นตอนทดสอบในการทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางแล้วในหัวข้อ 2.4 หน้า 9-13
<u>ความเห็นเพิ่มเติม/ข้อเสนอแนะ/ข้อสังเกต</u> 1. นักวิจัยแปรอุณหภูมิเพียง 2 ระดับ ดังนั้นอาจยังไม่สรุปได้ว่าที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อการรีเวอร์ชัน 2. ในรายงานควรมีข้อเสนอแนะ หรือเทคนิคในการป้องกันการเกิดรีเวอร์ชัน และวิธีการ เพื่อให้รายงานมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น	1. รูปที่ 3.2 หน้า 15 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการรีเวอร์ชันจะมากขึ้น 2. ได้ดำเนินการตามที่เสนอแล้วในหน้า 30