

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 5

สารเคมีสำหรับยาง

เนื้อหาประจำบท

- 5.1 สารวัลคาไนซ์
- 5.2 สารตัวเร่ง
- 5.3 สารกระตุ้น
- 5.4 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ
- 5.5 สารตัวเติม
- 5.6 สารเคมีอื่น ๆ
- 5.7 บทสรุป

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เมื่อศึกษาจบบทนี้แล้ว นักศึกษาสามารถ

1. อธิบายความจำเป็นของการใช้สารเคมีในยางได้
2. อธิบายหน้าที่ของสารเคมีแต่ละชนิด
3. ยกตัวอย่างสารเคมีที่ใช้และปริมาณที่เหมาะสมในยางได้

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอนประจำบท

1. การบรรยาย
2. การศึกษาเอกสารประกอบการสอน
3. การศึกษาสืบค้นด้วยตนเอง
4. การอภิปรายและซักถาม
5. การทำแบบฝึกหัดท้ายบท

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเคมีของยางธรรมชาติ
2. สไลด์ประกอบการสอนวิชาเคมีของยางธรรมชาติ บทที่ 5 สารเคมีสำหรับยาง
3. วิดีโอที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีสำหรับยาง
4. ระบบ e-Learning ของมหาวิทยาลัย

การวัดผลและประเมินผล

1. สังเกตจากการมีส่วนร่วมในการอภิปรายและเสนอความคิดเห็นที่เหมาะสม
2. สังเกตความน่าสนใจของสารเคมีสำหรับยางที่นักศึกษานำมาอภิปราย
3. ตรวจสอบความถูกต้องจากการทำแบบฝึกหัด

บทที่ 5

สารเคมีสำหรับยาง

สารเคมีสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมลงไปนยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการ ยางที่ผสมสารเคมีจะนำไปใช้งานได้ก็ต่อเมื่อสารเคมีเหล่านี้ได้ทำปฏิกิริยากับยางแล้ว โดยสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่สารเคมีทำปฏิกิริยากับยางแล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanized rubber หรือ Cured rubber) จุดประสงค์ของการเติมสารเคมีลงไปในยางเพื่อทำผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป มีดังนี้

1) เพื่อแก้ข้อด้อยของยางดิบ ได้แก่

- ยางดิบมีสมบัติความเป็นพลาสติกที่มากกว่าอีลาสติก สมบัติที่เป็นพลาสติกคือ การสูญเสียรูปร่างของยางอย่างถาวรตามแนวแรงกระทำ ในขณะที่สมบัติความเป็นอีลาสติก คือความสามารถในการคืนรูปกลับของยาง เมื่อปราศจากแรงกระทำการที่ยางมีสมบัติความเป็นพลาสติกที่มากกว่าอีลาสติกทำให้ไม่สามารถนำยางดิบไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรงโดยไม่ผ่านการทำให้ยางคงรูปก่อน
- ยางดิบใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัดกล่าวคือที่อุณหภูมิต่ำยางจะมีลักษณะแข็งกระด้าง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นยางจะมีลักษณะอ่อนตัวหรือไหลเยิ้ม
- ยางดิบมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ และความต้านทานต่อการขีดสีต่ำ เนื่องจากระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางไม่มีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันไว้
- ยางดิบสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายหลายชนิด

2) เพื่อเป็นตัวช่วยในกระบวนการแปรรูปยาง เนื่องจากการที่ยางมีน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้ยางมีความหนืดมาก ส่งผลให้กระบวนการแปรรูปยางจำเป็นต้องใช้พลังงานที่เพิ่มมากขึ้นด้วย แต่การเติมสารเคมีจำพวกสารหล่อลื่น (Lubricant) จะช่วยให้ยางแปรรูปได้ง่ายขึ้น

3) ทำให้ยางมีขอบเขตการใช้งานกว้างขึ้น จากความเหมาะสมในการเลือกสารเคมีผสมในยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางอย่างมาก เช่น เพิ่มความแข็ง และเพิ่มความสามารถในการทนความร้อน เป็นต้น

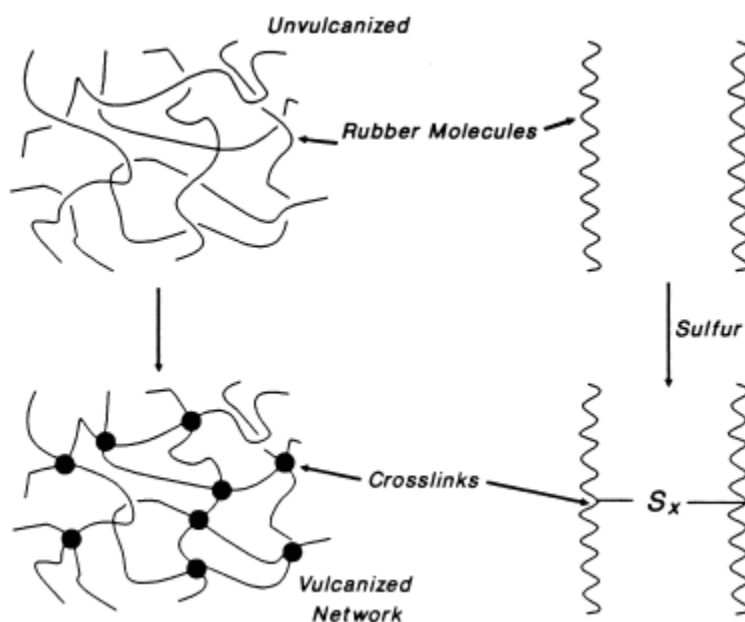
4) เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต โดยการผสมสารตัวเติมที่มีราคาถูกกว่าลงไปในเนื้อยางโดยคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ ของยาง ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก

5.1 สารวัลคาไนซ์

สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agents) เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (crosslink) ตรงตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อการปรับปรุงสมบัติของ

ผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้นและสารที่ทำให้ยางคงรูปนับว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ต้องผสมลงไปในยางเพื่อให้ยางเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น เรียกว่า การคงรูป หรือ การวัลคาไนซ์ (Cure หรือ Vulcanization)

การคงรูปหรือวัลคาไนเซชัน (อังกฤษ: vulcanization) คือ การที่ยางทำปฏิกิริยากับกำมะถันในปริมาณที่พอเหมาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของกำมะถัน โดยกำมะถันที่นำมาทำปฏิกิริยาดังนี้ จะสร้างพันธะโคเวเลนต์เชื่อมระหว่างโซ่พอลิเมอร์ให้เป็นโมเลกุลเดียวกัน ดังภาพที่ 5.1 ทำให้ยางมีคุณภาพคงตัวในอุณหภูมิต่าง ๆ มีความยืดหยุ่นได้ดีมากขึ้น ทนความร้อนและแสงแดด ละลายในตัวทำละลายได้ยากขึ้น เช่น ปกติยางธรรมชาติเมื่อได้รับความร้อนจะเหนียวและอ่อนตัว แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจะแข็งและเปราะ ฉะนั้นจึงต้องปรับคุณภาพของยางธรรมชาติ ก่อนนำมาใช้ประโยชน์ ปฏิกิริยานี้ถูกค้นพบโดยบังเอิญโดย ชาลส์ กู๊ดเยียร์ (Charles Goodyear)



ภาพที่ 5.1 การเชื่อมโยงพันธะทางเคมีด้วยกำมะถัน

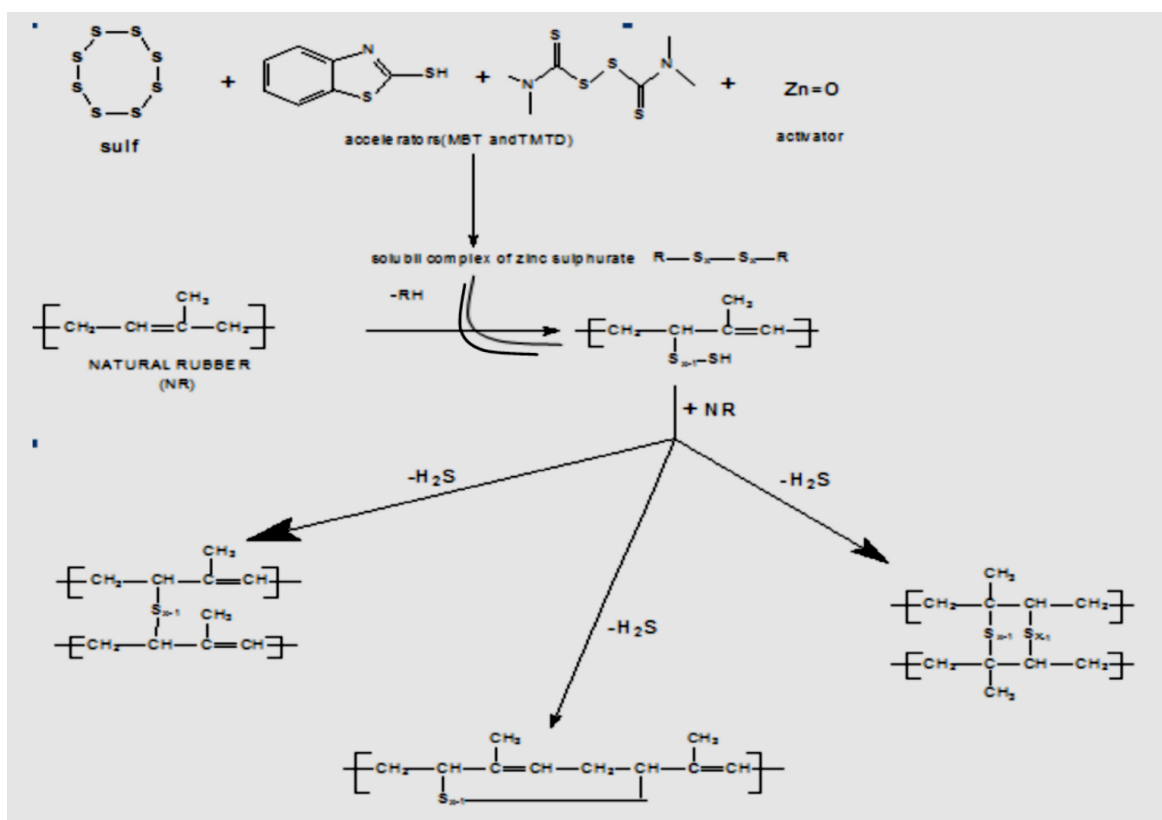
ที่มา : Coran (2013)

การคงรูปยางสามารถใช้สารเคมีร่วมกับความร้อน หรืออาจจะใช้รังสีหรือคลื่นพลังงาน เช่น รังสีแกมมา ลำอเล็คตรอน คลื่นไมโครเวฟ เป็นต้น แต่การคงรูปโดยใช้รังสีจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้ได้ดีในกรณีที่เป็นชิ้นงานบาง ๆ ดังนั้นการคงรูปที่ใช้สารเคมีแบ่งออกเป็น 3 ระบบหลัก ได้แก่

1. ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน (Sulfur vulcanization)
2. ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide vulcanization)

3.ระบบการคงรูปด้วยสารอื่น ๆ

อย่างไรก็ตามระบบการคงรูปด้วยกำมะถันเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ การคงรูปสามารถเกิดขึ้นได้เร็ว และยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีระบบนี้นิยมใช้กับยางทุกชนิดที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลโดยเฉพาะยางธรรมชาติ สำหรับระบบการคงรูปด้วยกำมะถันและให้ความร้อน ปฏิกิริยาการคงรูปเริ่มเกิดขึ้นผ่านอนุภาคอิสระ ซึ่งเกิดจากการที่กำมะถันที่มีโครงสร้างแบบวงแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ อิเล็กตรอนของอนุภาคอิสระซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาโมเลกุลของยาง ซึ่งมีพันธะคู่ ในขณะที่อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของอนุภาคอิสระก็จะเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของยางอีกสายโซ่หนึ่ง เกิดเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีขึ้น แต่ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ช้ามาก จึงต้องอาศัยสารเคมีอื่นเข้ามาทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) และสารกระตุ้นปฏิกิริยา คงรูปโดยตรง ส่วนสารกระตุ้นปฏิกิริยาเป็นสารเคมีที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สารตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น ดังกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 5.2

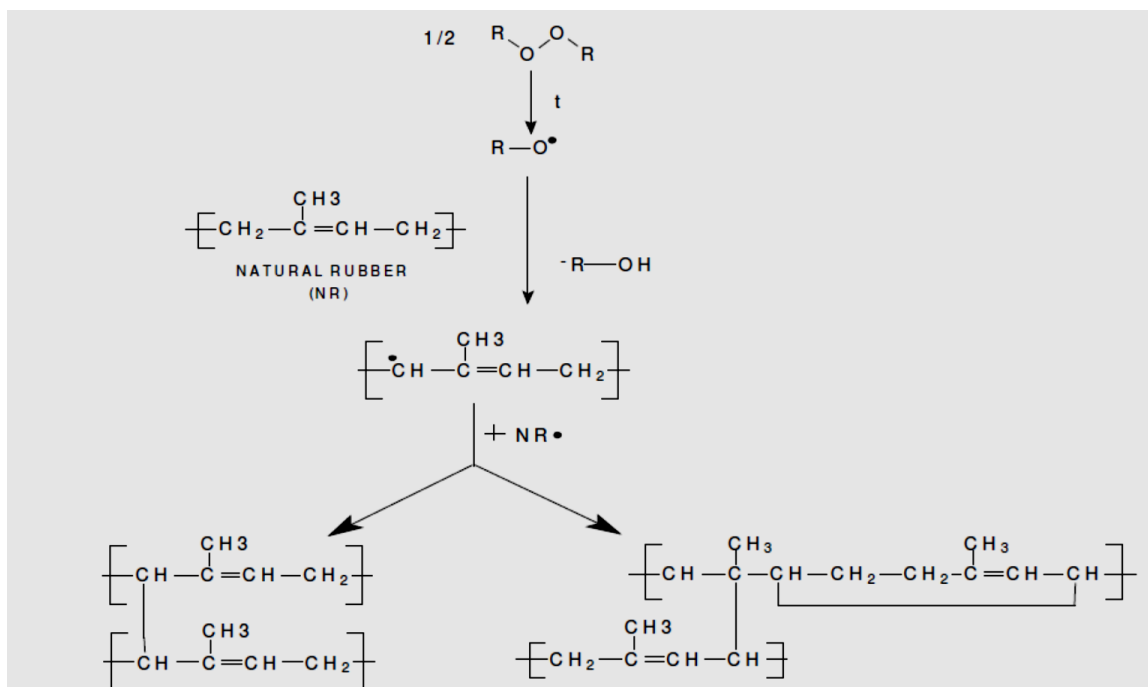


ภาพที่ 5.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยวัลคาไนเซชันระหว่างยางธรรมชาติ กำมะถันและสารตัวเร่ง
ที่มา : Stelescu et al. (2010)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช่วยทำให้ยางมีระดับการคงรูปสูงและมีสมบัติเชิงกลที่ดี การเชื่อมโยงทางเคมีอาจเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบ เช่น การเชื่อมโยงที่เกิดผ่านพันธะมอนอซัลฟิดิก (Monosulfidic crosslinks) พันธะไดซัลฟิดิก (Disulfidic crosslinks) หรือการเชื่อมโยงผ่านพันธะพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic crosslinks) โดยในทางทฤษฎี รูปแบบหรือโครงสร้างของการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นในระหว่างการคงรูปขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น อัตราส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ชนิดและปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา สารกระตุ้นปฏิกิริยา และระยะเวลาการคงรูป เป็นต้น

สารทำให้ยางคงรูปหรือสารวัลคาไนซ์ แบ่งได้เป็น 3 พวก ได้แก่

1. กำมะถัน (Sulfur, S) และธาตุที่คล้ายกำมะถัน กำมะถันนิยมใช้มากที่สุดประมาณ 90 % ส่วนซีลีเนียม (Selenium) และ เทลลูเรียม (Tellurium) สามารถใช้แทนกำมะถันได้ แต่ปฏิกิริยาที่ทำกับยางไม่ดีเท่ากับกำมะถันและยังเป็นพิษอีกด้วย
2. สารที่ให้กำมะถัน (Sulfur donor) หมายถึง สารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ และสลายให้กำมะถัน อุณหภูมิของการคงรูป ได้แก่ ทีเอ็มทีดี (Tetramethyl thiuram disulphide; TMTD) ดีทีดีเอ็ม (Dimorpholine disulphide หรือ Dithiodimorpholine; DTDM) ดีพีทีที (Dipebtamethylene thiuramtetrasulphide; DPTT)
3. สารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน เช่น โลหะออกไซด์ (Metallic oxides) ได้แก่ พวกซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide; MgO) ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide; PbO) และสารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ได้แก่ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (Dicumyl peroxide; DCP) เบนซิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) ถึงแม้ว่าการวัลคาไนซ์ด้วยสารเปอร์ออกไซด์จะสามารถใช้ได้ดีกับยางส่วนใหญ่ (ทั้งที่มีพันธะคู่และไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล) แต่เนื่องจากระบบนี้มีต้นทุนสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตต่ำกว่ายางที่ได้จากการวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถัน ประกอบกับเปอร์ออกไซด์จัดเป็นสารเคมีที่ค่อนข้างอันตราย การขนย้ายและการเก็บรักษาต้องทำด้วยความระมัดระวัง ดังนั้นการวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์นั้นจึงนิยมใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล (เช่น EPM, EVA, CPE หรือ Q เป็นต้น) หรือยางที่มีปริมาณพันธะคู่ในโมเลกุลต่ำมากเท่านั้น (เช่น HNBR, EPDM) สำหรับยางอื่น ๆ นิยมวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันมากกว่า ยกเว้นกรณีที่ต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ทนต่อความร้อนได้ดีหรือมีค่าการเสียรูปถาวรหลังกด (compression set) ต่ำเท่านั้น ซึ่งในกรณีการวัลคาไนซ์ด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ในยางธรรมชาติ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นเมื่อความร้อนทำให้เปอร์ออกไซด์เกิดการแตกตัวและเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของสายโซ่โมเลกุลยางที่เกิดขึ้นจากความร้อนเกิดเป็นพันธะเชื่อมโยงระหว่างอะตอม C-C ดังกลไกที่เกิดขึ้นแสดงในภาพที่ 5.3



ภาพที่ 5.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาลูกาโนเซชันระหว่างยางธรรมชาติกับเปอร์ออกไซด์
ที่มา : Stelescu et al. (2010)

5.2 สารตัวเร่ง

สารตัวเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) หรือ ยาสุก คือ สารเคมีที่เติมลงไปในยางปริมาณเล็กน้อยเพื่อเร่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ยางวัลคาไนซ์ให้เร็วขึ้น ทำให้ลดเวลาที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ลง และทำให้ยางวัลคาไนซ์มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ซึ่งการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยานี้เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถัน สารตัวเร่งที่ดีควรมีสมบัติในการเป็นสารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยายางคงรูปหรือปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ของยางให้เกิดเร็วขึ้น นอกจากนั้นยังช่วยลดการใช้กำมะถันให้น้อยลงและให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสม่ำเสมอขึ้น สารตัวเร่งที่ดีจะสามารถทำให้ยางคงรูปได้เร็ว มีความว่องไวในการเร่งให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางสูง ละลายได้ดีในยางมีความปลอดภัยในกระบวนการผลิต สามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสื่อม ใช้งานได้ช่วงอุณหภูมิกว้าง เข้ากันได้ดีกับสารเคมีอื่น ๆ ที่ใส่เข้าไปในยาง และไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ อย่างไรก็ตามในการใช้สารตัวเร่งในยางจะมีหลักการที่ปฏิบัติกัน สรุปได้ดังนี้คือ

1. ระบบการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาลูกาไนซ์เพียงชนิดเดียว (primary accelerators) ให้พอเพียงที่จะวัลคาไนซ์ยางตามเวลาที่ต้องการ

2. ระบบการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาลูกาไนซ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งประกอบด้วยชนิดหนึ่งใช้ในปริมาณมาก (primary accelerator) และอีกชนิดหนึ่งใช้ในปริมาณน้อย (secondary accelerator) (10-

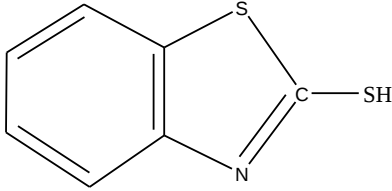
20% of the total) เพื่อช่วยเสริมและปรับปรุงคุณสมบัติของผลผลิตการใช้ระบบวัลคาไนซ์โดยสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปดังกล่าวนี้จะได้อย่างที่มีคุณสมบัติดีกว่าการใช้ระบบสารใดสารหนึ่งเพียงอย่างเดียว

3. ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่มีปฏิกิริยาช้า (delayed action accelerators) กล่าวคือ สารประกอบนี้จะไม่เกิดปฏิกิริยาขณะกรรมวิธีก่อนการวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหาการเกิดยางวัลคาไนซ์ก่อนเวลา อย่างไรก็ตามสารดังกล่าวนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เมื่อถึงอุณหภูมิของการวัลคาไนซ์

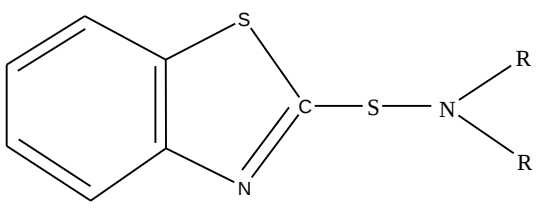
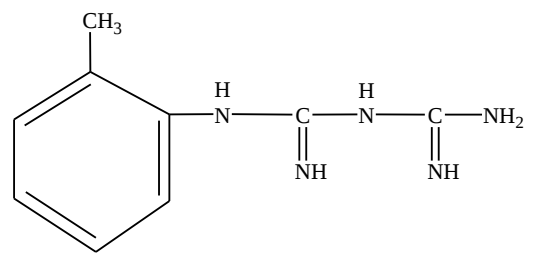
5.2.1 ชนิดของสารตัวเร่ง

เนื่องจากสารตัวเร่งที่ใช้ในยางมีหลายชนิด จึงมีการจัดหมวดหมู่ขึ้นตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีของตัวเร่งนั้น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างและสูตรโครงสร้างของสารตัวเร่งปฏิกิริยา

หมู่	สูตรโครงสร้าง
หมู่แซนเตท	$\begin{array}{c} \text{S} \\ \\ (\text{R} - \text{O} - \text{C} - \text{S})_n \text{M}^{n+} \end{array}$
หมู่ไดไฮโอคาร์บาเมต	$\begin{array}{c} \text{R} \quad \text{S} \\ \diagdown \quad \\ \text{N} - \text{C} - \text{S}_n^- \text{M}^{n+} \\ \diagup \\ \text{R} \end{array}$
หมู่ไธยูแรม	$\begin{array}{c} \text{R} \quad \quad \text{R}'' \\ \diagdown \quad \quad \diagup \\ \text{N} - \text{C} - \text{S}_x - \text{C} - \text{N} \\ \diagup \quad \quad \diagdown \\ \text{R}' \quad \quad \text{R}''' \end{array}$
หมู่ไธอาโซล	

ตารางที่ 5.1 แสดงตัวอย่างและสูตรโครงสร้างของสารตัวเร่งปฏิกิริยา (ต่อ)

หมู่	สูตรโครงสร้าง
หมู่ซัลฟิनाไมด์	
หมู่กัวนิดีน	

ที่มา : พรพรรณ (2528)

1) หมู่แซนเทท (Xanthate) เป็นสารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็วมาก (เร็วกว่ากลุ่มเกลือแอมโมเนียของไดไธโอคาร์บาเมต) ส่วนใหญ่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยาง ไม่นิยมใช้ในยางแท่ง อุณหภูมิที่ใช้วัลคาไนซ์ประมาณ 80-100°C เพื่อให้ได้การวัลคาไนซ์แบบพลาโต (Plateau curve) ตัวอย่างสารตัวเร่งกลุ่มนี้ได้แก่ SIX, ZIX, ZBX

2) หมู่ไดไธโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate) ได้แก่ ซิงก์ไดเมทิลไดไธโอคาร์บาเมต (Zinc dimethyldithiocarbamate; ZDMC), ซิงก์ไดเอทิลไดไธโอคาร์บาเมต (Zinc diethyldithiocarbamate; ZDEC), และซิงก์ไดเบนซิลไดไธโอคาร์บาเมต (zinc dibenzylthiocarbamate; ZBEC) เป็นต้น สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพสูงมากในการเร่งอัตราเร็วของการวัลคาไนซ์ ทำให้ยางมีระยะเวลาสกอร์ชสั้นและเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อได้รับการ วัลคาไนซ์นานเกินไป ยางวัลคาไนซ์ที่ได้มีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูงมากและไม่ทำให้สีของยางเปลี่ยนแปลงไป จึงสามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลาย รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานในทางการแพทย์ เกษษกรรม หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร

3) หมู่ไธยูรัม (Thiuram) ได้แก่ เตตระเมทิลไธยูรัมโมโนซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram monosulphide; TMTM), ทีเตตระเมทิลไธยูรัมไดซัลไฟด์ (Tetramethyl thiuram disulphide; TMT หรือ TMTD), เตตระเอทิลไธยูรัมไดซัลไฟด์ (Tetraethyl thiuram disulphide; TET หรือ TETD) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไธยูรัม มีประสิทธิภาพในการเร่งอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูงมากในขณะที่ยังให้ระยะเวลาสกอร์ชที่ยาวกว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มไดไธโอคาร์บาเมต

4) หมู่ไธอาโซล (Thiazole) ได้แก่ เมอร์แคปโตเบนโซไธอาโซล (2-mercaptobenzothiazole; MBT), ไดเบนโซไธอาซอิลไดซัลไฟด์ (2,2 - dibenzothiazyl disulphide; MBTS), ซิงค์เมอร์แคปโตเบนโซไธอาโซล (Zinc-2-mercaptobenzothiazole; ZMBT) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ใช้ได้กับยางแทบทุกประเภท ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอชสั้นและมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ปานกลาง ยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความทนทานต่อความร้อนสูง

5) หมู่ซัลฟีนามิด (Sulphenamide) ได้แก่ ไซโคลเฮกซิลเบนโซไธอาโซลซัลฟีนามิด (N-cyclohexyl-2-benzthiazyl sulphenamide; CBS), บิวทิลเบนโซไธอาโซลซัลฟีนามิด (N-tert-butyl-2-benzthiazyl sulphenamide; TBBS), ไดไซโคลเฮกซิลเบนโซไธอาโซลซัลฟีนามิด (N,N - dicyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide; DCBS) และ มอร์โฟลิโนไธโอเบนโซไธอาโซล (2-(4-morpholinothio) benzothiazole; MBS) เป็นต้น สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอชที่ยาวขึ้น แต่ให้อัตราเร็วในการวัลคาไนซ์ที่สูง และให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ดังนั้นยางวัลคาไนซ์ที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูง มีความยืดหยุ่นดี และมีความต้านทานต่อการล้าตัวสูง

6) หมู่กวานิดีน (Guanidine) สารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้มีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำจึงไม่นิยมนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ แต่จะนำไปใช้เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิในกลุ่มอื่น ๆ ตัวอย่างที่สำคัญที่สุดของสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไดฟีนิลกวานิดีน (diphenylguanidine; DPG) ไดโทลิลกวานิดีน (dio-tolylguanidine; DOTG) และโทลิลไบกวานิดีน (o-tolylbiguanide; OTBG) อย่างไรก็ตาม ผู้ออกสูตรเคมียางส่วนใหญ่มักใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดหรือมากกว่า เพื่อให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดทำงานแบบเสริมกัน (synergistic effect) ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีอัตราเร็วในการวัลคาไนซ์สูงขึ้น

5.3 สารกระตุ้น

สารกระตุ้น (Activator) คือสารที่ช่วยเสริมให้สารตัวเร่งทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงขึ้น อาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ โดยที่สารกระตุ้นปฏิกิริยาจะเป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) มีผลทำให้อัตราการทำให้ยางสุก (Rate of curing) สูงขึ้นและช่วยเพิ่มสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของยางด้วย ซึ่งโดยบางครั้งถ้าไม่มีสารกระตุ้น การวัลคาไนซ์ของยางก็อาจไม่เกิดขึ้นด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใส่สารกระตุ้นเพื่อให้ยางวัลคาไนซ์ได้อย่างสมบูรณ์ โดยทั่วไปสารกระตุ้นปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ดังนี้

1) สารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic compounds) ส่วนใหญ่เป็นสารพวกออกไซด์ของโลหะ เช่น ออกไซด์ของสังกะสี (Zinc oxide) ออกไซด์ของแมกนีเซียม (Magnesium oxide) อัลคาไลคาร์บอเนต (Alkali carbonate) และไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) โดยออกไซด์ของสังกะสีเป็นสารกระตุ้นเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้มากที่สุด โดยทั่วไปจะใช้ร่วมกับกรดไขมัน (Fatty acid) ปริมาณของสารกระตุ้นเร่งปฏิกิริยาพวกอนินทรีย์จะใช้ผสมในยางปริมาณ 2 ถึง 5 phr

2) กรดอินทรีย์ (Organic acid) หรือกรดไขมัน มักใช้ร่วมกับออกไซด์ของโลหะ ซึ่งเป็นกรดที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูง เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดโอเลอิก (Oleic acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) กรดมายริสติก (Myristic acid) น้ำมันจากปาล์ม ซึ่งเป็นสารที่จำเป็นในการใช้เป็นสารกระตุ้นเร่งสำหรับสารเร่งบางตัว โดยเฉพาะพวกไฮดรอกไซด์ กรดไขมันที่นิยมใช้เป็นสารกระตุ้นเร่งมากที่สุดคือ กรดสเตียริก (Stearic acid) ปริมาณการใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ถ้ายางมีกรดไขมันอยู่แล้ว ก็ไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ปริมาณน้อย โดยทั่ว ๆ ไปในการผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติ จะใส่กรดสเตียริก ในปริมาณ 1 ถึง 3 phr เพื่อลดความแตกต่างของอัตราการทำให้ยางสุกภายในเนื้อยาง และเป็นการป้องกันการขาดกรดไขมันภายในเนื้อยาง เพราะอาจส่งผลให้สมบัติทางกายภาพภายในเนื้อยางแตกต่างกันได้

5.4 สารป้องกันการเสื่อม

เมื่อยางถูกตั้งทิ้งไว้นาน ๆ หรือในสถานะของการใช้งาน O_2 และ O_3 ในบรรยากาศจะทำปฏิกิริยากับยาง ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางที่มีพันธะคู่ในโครงสร้างโมเลกุลจะเสื่อมสภาพได้ง่าย ซึ่งการเสื่อมของยางเกิดจากปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- 1) การใช้งานยางที่ต้องสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ แสง ความร้อน และโอโซน เป็นตัวกระตุ้นให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ
- 2) โลหะบางชนิดมีผลในการเร่งปฏิกิริยาการออกซิเดชันในยาง ทำให้ยางเกิดการเสื่อมเร็วขึ้น เช่น แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) เป็นต้น
- 3) ลักษณะการใช้งานยางที่อาจทำให้เกิดความเครียด (Stress) ขึ้นในยาง เช่น การใช้งานในลักษณะการยืด การทำให้ยางเกิดการหักงอขณะใช้งาน

ดังนั้นการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพในยาง ซึ่งมักจะเป็นสารป้องกันการเสื่อมจากออกซิเจน (Antioxidant) และสารป้องกันการเสื่อมจากโอโซน (Antiozonant) จึงเป็นสิ่งที่สำคัญในการรักษาสมบัติของยางให้คงสภาพตลอดอายุการใช้งาน ไม่เกิดการแข็งตัว อ่อนตัว เกิดการล้า เกิดการแตกที่ผิวหรือเกิดการขยายตัวของรอยแตก ในระหว่างการใช้งาน

Antioxidant แบ่งได้ 3 ประเภท ตามลักษณะโครงสร้าง

- 1) สารประกอบอะมีนและอนุพันธ์ เช่น 2,2,4 - trimethyl-1, 3 - dihydroquinoline (ชื่อทางการค้า คือ Frectol-H) หรือ N- isopropyl - N - phenyl - p - phenylene (IPPD) สารในกลุ่มนี้จะเป็น aromatic ทำให้ยางมีสีคล้ำและตกสี ส่วนใหญ่ให้ประสิทธิภาพสูงกว่ากลุ่มฟีนอลและอนุพันธ์
- 2) สารประกอบฟีนอลและอนุพันธ์ เช่น 2, 6 - di - ter - butyl - 4 - methyl phenol (BHT) สารกลุ่มนี้จะให้สมบัติการเป็น antioxidant ที่ไม่ค่อยดี แต่ไม่เกิดการตกสีหรือตกสีน้อยมากจึงไม่เปลี่ยนสีของยาง

3) อนุพันธ์ของอิมิดาซอล (imidazyl derivative) ตัวอย่างสารในกลุ่มนี้ คือ 2-mercaptobenzimidazole หรือ MBI โดย antioxidant ที่นิยมใช้เป็น secondary antioxidant ซึ่งมีประสิทธิภาพปานกลาง ไม่ตกสีและทำให้ยางสีสดยิ่งขึ้น

Antiozonant จะเป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปยาง เนื่องจากยางเมื่อยืดแล้วตั้งทิ้งไว้จะเกิดรอยแตกในแนวตั้งฉากกับแนวยางยืด ซึ่งรอยแตกที่เกิดเนื่องจากยางทำปฏิกิริยากับโอโซน (O_3) เกิดเป็นสารโอโซนไนด์ (Ozonide) ซึ่งไม่ยืดหยุ่น และเมื่อความเข้มข้นของโอโซนมาก ยางก็จะเกิดรอยแตกเร็วขึ้น และถึงแม้ว่าความเข้มข้นโอโซนต่ำเพียง 1-10 pphm ก็สามารถทำให้ยางเกิดรอยแตกได้ โดยสาร antiozonant ที่ป้องกันโอโซนได้ดีคือ กลุ่ม p-phenylene diamine และ petroleum wax หรือซีฟี่ ซึ่งการใช้ซีฟี่เป็นสารป้องกันโอโซนในยางได้ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1881 โดยที่ซีฟี่ที่เติมลงในปริมาณที่มากเพียงพอ จะซึมออกมาที่ผิวของยางที่วัลคาไนซ์แล้ว ทำหน้าที่เคลือบยางไว้ ป้องกันไม่ให้โอโซนเข้าสัมผัสกับผิวยาง ทำให้ยางทนทานต่อโอโซนได้ ซึ่งซีฟี่ที่เติมลงไปยางจะต้องมีสมบัติสำคัญ 3 ประการ คือ

- 1) ต้องซึมออกมาที่ผิวได้เร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม คือ ถ้าที่อุณหภูมิต่ำจะซึมออกมาช้า แต่ถ้าที่อุณหภูมิสูงเกินไปจะไม่เคลือบที่ผิว แต่จะละลายกลับเข้าไปอยู่ในเนื้อยาง
- 2) ซีฟี่ต้องเกาะยึดแน่นกับผิวยาง และยืดหยุ่นไม่หลุดจากผิวยางได้ง่าย
- 3) ปริมาณซีฟี่ต้องมีมากพอที่จะเคลือบผิวยางได้ตลอดเวลา ถ้าบางส่วนถูกชะล้างออกไปขณะใช้งาน ส่วนที่อยู่ในเนื้อยางต้องซึมออกมาแทนที่

5.5 สารตัวเติม

สารตัวเติม หมายถึง สารเคมีที่ผสมกับยางและพอลิเมอร์ เช่น เซม่าดำ ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และทัลคัม เป็นต้น สารเหล่านี้ใส่ลงไปเพื่อวัตถุประสงค์ดังนี้

- 1) เพื่อลดต้นทุน โดยทั่วไปสารตัวเติมจะมีราคาถูกกว่าพอลิเมอร์ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต
- 2) เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ สารตัวเติมบางชนิดจะให้ความแข็งแรงแก่ยางและพอลิเมอร์ ทำให้โมดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติด้านอื่น ๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ อาจจะเพิ่มหรือลดขึ้นอยู่กับชนิดของสารตัวเติม
- 3) เพื่อช่วยกระบวนการผลิตให้ทำได้ง่ายขึ้น กล่าวคือถ้าไม่มีการใช้สารตัวเติมอาจทำให้แปรรูปได้ยากกว่า เช่น การรีดแผ่นยางและการเอ็กซ์ทรูดยาง ถ้าเป็นยางล้วน ๆ หรือมีสารตัวเติมปริมาณน้อย การเอ็กซ์ทรูดจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ผิวไม่เรียบหรือการรีดยางอาจมีปัญหาบางอย่างหนาทึบไม่เท่ากันโดยไม่สามารถควบคุมได้ การใส่สารตัวเติมจะช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้
- 4) ลดการพองตัวของยางและพอลิเมอร์ในน้ำมัน

5) เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า พอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งอาจทำให้มีไฟฟ้าสถิตย์เกิดขึ้นได้สูง การใส่สารตัวเติมที่สามารถนำไฟฟ้าลงไป เช่น เขม่าดำ จะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติป้องกันไฟฟ้าสถิตย์หรือนำไฟฟ้าได้

6) เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของพอลิเมอร์ โดยปกติยางและพอลิเมอร์บางชนิดจะสลายตัวได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดซึ่งมีรังสีอัลตราไวโอเล็ตอยู่ การใส่สารตัวเติมที่ไม่ให้แสงส่องผ่าน เช่น เขม่าดำ สามารถช่วยเพิ่มอายุการใช้งานได้

สารตัวเติมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

1. สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (Reinforcing filler) คือสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในพอลิเมอร์แล้วทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง เป็นต้น ส่วนใหญ่จะมีขนาดอนุภาคเล็ก เช่น เขม่าดำและซิลิกา

2. สารตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพ (non-reinforcing filler) สารตัวเติมประเภทนี้จะมีราคาถูก มีขนาดอนุภาคใหญ่ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ทัลคัม เป็นต้น สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อลูมิเนียมซิลิเคตและแคลเซียมซิลิเคตซึ่งจัดอยู่ในสารตัวเติมกึ่งเสริมประสิทธิภาพ (Semi-reinforcing filler)

ปัจจุบันสารตัวเติมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางและพอลิเมอร์มากที่สุด คือ เขม่าดำและซิลิกา เนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพ

5.5.1 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำเตรียมจากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของสารอินทรีย์หลายสถานะ เช่น ของแข็งของเหลว ก๊าซ แต่ในปัจจุบันเขม่าดำส่วนใหญ่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมหรือก๊าซธรรมชาติ กระบวนการผลิตเขม่าดำทำได้หลายรูปแบบได้แก่

1) Furnace process ทำโดยการเผาก๊าซธรรมชาติผสมอากาศที่อุณหภูมิสูง 1,450 – 1,800 °C จากนั้นจะทำให้เย็นทันทีด้วยละอองน้ำ เขม่าดำจะถูกแยกออกจากโดยการกรองและปั่น วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

2) Channel process ทำโดยการเผาก๊าซธรรมชาติในเตาเผาที่ทำด้วยเหล็กไร้สนิม เขม่าดำจะเกาะอยู่ที่ช่องของเหล็กไร้สนิมนี้ วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากก๊าซธรรมชาติมีราคาแพง ประสิทธิภาพต่ำ และเกิดควันพิษ เขม่าดำที่ได้จากกระบวนการนี้มีความเป็นรูพรุนต่ำและพื้นผิวจะเกิดการออกซิเดชันสูง

3) Lamp process เป็นกระบวนการที่เก่าแก่ที่สุด วัตถุดิบที่ใช้คือ น้ำมันพืช (Vegetable oil) โดยเผาน้ำมันพืชในเตา (Lamp) เขม่าดำที่ได้จากการผลิตวิธีนี้ผลิตได้ในปริมาณน้อย

4) Thermal process ใช้ก๊าซเฉื่อยเป็นวัตถุดิบ ทำการเผาก๊าซที่อุณหภูมิ 1,300 °C ซึ่งจะเกิดไอน้ำที่มีเขม่าดำ ไฮโดรเจน มีเทนและสารไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ผสมอยู่ จากนั้นไอน้ำดังกล่าวจะถูกทำให้เย็นและเขม่าดำจะถูกกรองแยกออกมา

5) Acetylene process กระบวนการนี้จะเริ่มจากการเผาไหม้อะเซทิลีนในท่อถลุงโลหะ ที่อุณหภูมิ 800 – 1,000 °C ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน วิธีนี้จะเกิดปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (exothermic reaction) ซึ่งจะมีการใช้ระบบน้ำหล่อเย็น เขม่าดำที่ได้จากวิธีนี้มีความหนาแน่นและพื้นที่ผิว (surface area) ต่ำ

Furnace black และ Channel black เป็นเขม่าดำที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางและพอลิเมอร์ ส่วนการผลิต อีก 3 วิธีที่เหลือนั้นมีใช้น้อยมากจะใช้งานเฉพาะทางเท่านั้น สมบัติของเขม่าดำที่ผลิตโดยวิธีการต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สมบัติของเขม่าดำที่ผลิตโดยวิธีการต่าง ๆ

Properties	Furnace	Thermal	Acetylene	Channel	Lamp
	HAF	MT		EPC	Lb
	N-330	N-990		S300	
Av. particle diameter, nm	28	250	40	28	65
BET surface area, m ² /g	75	7-12	65	115	22
DBP adsorption, mL/100 g	103	44	250	100	130
Toluene extract, %	0.06	0.5	0.1	0.0	0.2
pH	7.5	9-11	4.8	3.8	3.0
Volatile material, %	1.0	0.1	0.3	5.0	1.5
Composition, %					
C	97.9	99.6	99.7	95.6	98.0
H	0.4	0.2	0.1	0.6	0.2
S	0.6	0.01	0.02	0.2	0.8
O	0.7	0.1	0.2	3.5	0.8
Raw material	oil or gas	gas	acetylene	gas	coal tar

ที่มา : Wypych (1999)

เนื่องจากเขม่าดำที่ผลิตในปัจจุบันมีสมบัติใกล้เคียงกัน การแบ่งเกรดเขม่าดำตามวิธีการผลิตจึงไม่สามารถแยกเขม่าดำได้ จึงได้มีการแบ่งเกรดเขม่าดำด้วยวิธีใหม่ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ คือ การแบ่งเกรดตามมาตรฐาน ASTM D-1765 ซึ่งในระบบนี้จะประกอบด้วยตัวอักษรภาษาอังกฤษ 1 ตัว และตามด้วยตัวเลข 3 ตัว (ตารางที่ 5.3) โดยตัวอักษรจะบอกถึงอิทธิพลของเขม่าดำต่ออัตราการวัลคาไนซ์ เช่น N (normal)

หมายถึง ปกติ และ S (slow) หมายถึง ช้า ส่วนตัวเลข 3 ตัวที่ตามมามีความหมายดังนี้ ตัวเลขตัวแรก หมายถึง ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ตัวเลขน้อย หมายถึง มีขนาดอนุภาคเล็ก ตัวอย่างเช่น 1 หมายถึง มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 11-19 nm ในขณะที่เลข 9 หมายถึง มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 201-500 nm

ตารางที่ 5.3 การแบ่งเกรดเขม่าดำ

ASTM N-type	Designation
N100 to N199	super abrasion furnace, SAF
N200 to N299	intermediate super abrasion furnace, ISAF
N300 to N399	high aggregate furnace
N400 to N499	fine furnace, FF, and conductive furnace, XCF
N500 to N599	fast extrusion furnace, FEF
N600 to N699	high modulus furnace, HMF, general purpose furnace, GPF, and all-purpose
N700 to N799	semi-reinforcing furnace, SFR
N800	fine thermal, FT
N907	medium thermal non-staining, MT-NS
N990	medium thermal, MT

ที่มา : Wypych (1999)

สมบัติเขม่าดำขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1) ขนาดอนุภาค (Particle size) โดยทั่วไปแล้วการผสมเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะส่งผลให้ยางและพอลิเมอร์มีความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึงและความทนทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น แต่กระบวนการผสมจะทำได้ยากขึ้น

2) โครงสร้างของเขม่าดำ (Structure) หมายถึง การจัดตัวระหว่างอนุภาคของเขม่าดำให้มีรูปโครงสร้าง ถ้าเขม่าดำมีการจัดตัวต่อกันเป็นเส้นสายมาก แสดงว่ามีโครงสร้างสูง ถ้ามีการจัดตัวไม่ต่อกันหรือต่อกันน้อยแสดงว่ามีโครงสร้างต่ำ เขม่าดำจะมีโครงสร้างต่างกันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต โครงสร้างของเขม่าดำส่วนใหญ่จะมีอิทธิพลต่อการแปรรูป เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงจะกระจายตัวได้ดี แต่เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงจะผสมได้น้อยกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคและโครงสร้างของเขม่าดำต่อการแปรรูปแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคและโครงสร้างของเขม่าดำต่อการแปรรูป

Processing Properties	Decreasing particle size	Increasing structure
Loading capacity	Decreasing	Decreasing
Incorporation time	Increasing	Increasing
Oil extension potential	Little	Increasing
Dispersability	Decreasing	Increasing
Mill bagging	Increasing	Increasing
Viscosity	Increasing	Increasing
Scorch time	Decreasing	Decreasing
Extrusion shrinkage	Decreasing	Decreasing
Extrusion smoothness	Increasing	Increasing
Extrusion rate	Decreasing	Little

ที่มา : Horn (1969)

3) สมบัติทางเคมีของผิว เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจนมาจากไฮโดรคาร์บอนเดิม (จากน้ำมันและก๊าซ) ส่วนออกซิเจนมาจากการกระบวนการผลิตเขม่าดำ ดังนั้นออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผิวเขม่าดำ โดยออกซิเจนจะอยู่ในรูปของ คาร์บอกซิล ควิโนน แลคโตนและหมู่ฟีนอลิก ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีผลต่อการดูดความชื้นและการกระจายตัวของเขม่าดำและเกิดอันตรกิริยากับยางและพอลิเมอร์ที่มีสภาพขี้

4) ความเป็นรุกรุ่นของเขม่าดำ ตรงผิวของเขม่าดำจะไม่เรียบเนื่องจากในกระบวนการผลิตเขม่าดำทำโดยการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง การเกิดการออกซิเดชันจะทำให้เกิดรุกรุ่นขึ้นในอนุภาคเขม่าดำได้ การมีรุกรุ่นอาจมีผลต่อความเร็วในการวัลคาไนซ์ได้ เนื่องจากรุกรุ่นอาจดูดสารตัวเร่งเข้าไปส่งผลให้การวัลคาไนซ์ช้าลง

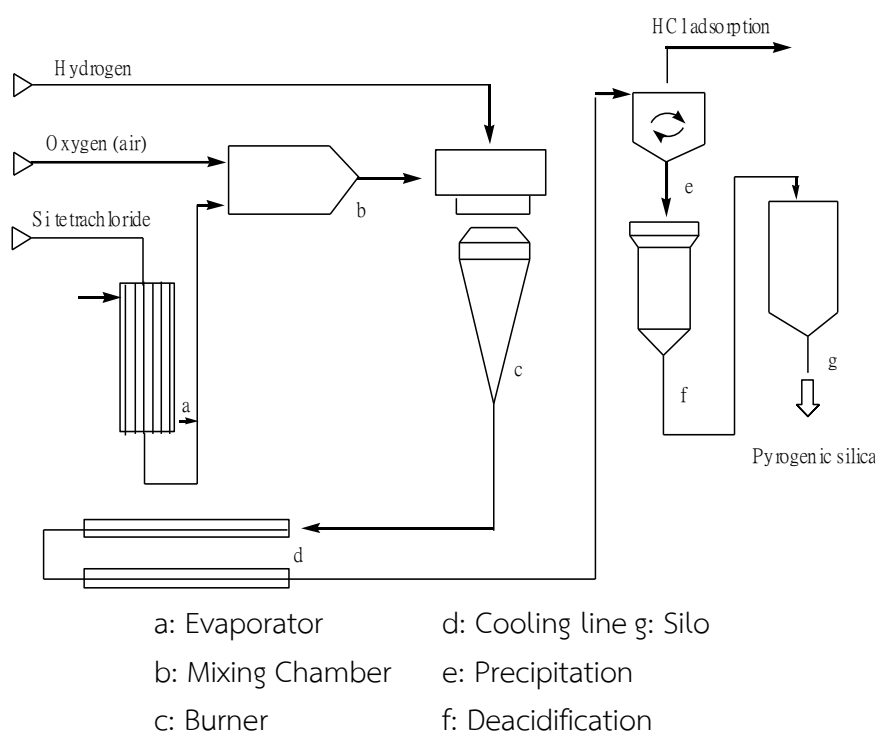
สมบัติของเขม่าดำขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคมากที่สุด รองลงมาคือโครงสร้างและความเป็นรุกรุ่น ส่วนลักษณะผิวจะมีผลน้อย

5.5.2 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพและเป็นสารตัวเติมที่ดีที่สุดในบรรดาสารตัวเติมที่ไม่มีสีดำ มีสูตรโครงสร้างเป็น SiO_2 ซิลิกาที่ใช้อาจอยู่ในรูปที่พบในธรรมชาติแล้วนำมาบดหรือเป็นซิลิกาที่เตรียมขึ้นมาวิธีการเตรียมซิลิกาสามารถเตรียมจากกระบวนการผลิต 2 วิธี คือ การเผาหรือการให้ความร้อนซึ่งใช้ในการผลิต fumed silica และ wet process ใช้ในการผลิตตะกอนซิลิกา

1) Fumed silica

การผลิต Fumed silica เริ่มจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอนเตตระคลอไรด์ผสมอากาศ จากนั้นนำของผสมดังกล่าวผสมกับไฮโดรเจนแล้วเผาที่อุณหภูมิ $1,800^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ซิลิกาอยู่ในสถานะหลอม (molten state) จากนั้นทำการหล่อเย็นโดยลดอุณหภูมิลงเหลือ $1,710^{\circ}\text{C}$ ซิลิกาจะกลายเป็นของแข็ง โดยซิลิกาที่ได้จากกระบวนการนี้มีฤทธิ์เป็นกรดที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก กระบวนการผลิต Fumed silica แสดงดังในภาพที่ 5.4

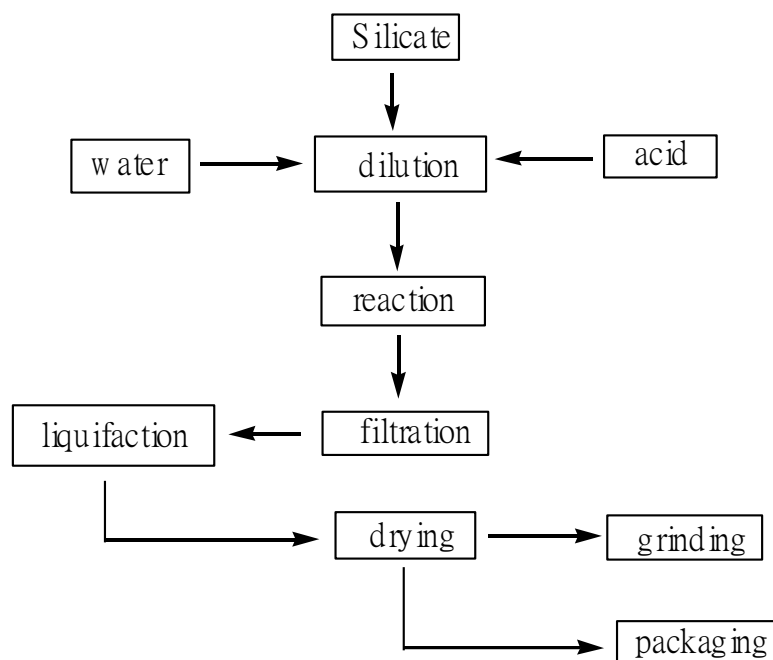


ภาพที่ 5.4 กระบวนการผลิต Fumed silica

ที่มา : Degussa (1997)

2) ตะกอนซิลิกา (Precipitated silica)

ตะกอนซิลิกาเตรียมจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซิลิเคต (sodium silicate) กับกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) และกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) กระบวนการผลิตตะกอนซิลิกา แสดงดังในภาพที่ 5.5



ภาพที่ 5.5 กระบวนการผลิตตะกอนซิลิกา
ที่มา : Bomo (1996)

สมบัติของตะกอนซิลิกาสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นของสารที่ใช้ อัตราเร็วในการเติมและอุณหภูมิในการเตรียม โดยซิลิกาที่ได้จะแยกเป็นเกรดดังนี้ เกรดโครงสร้างสูงมาก (very high structure, VHS) เกรดโครงสร้างสูง (high structure, HS) โครงสร้างปานกลาง (medium structure, MS) โครงสร้างต่ำ (low structure, LS) และโครงสร้างต่ำมาก (very low structure, VLS) ซึ่งตะกอนซิลิกาจะมีหมู่ซิลานอล (silanol group) มากกว่า fumed silica

5.5.3 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)

ในอุตสาหกรรมยางและพลาสติก ได้มีการนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาใช้เป็นสารตัวเติม เนื่องจากมีราคาถูกจึงใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต และเป็นสารไม่มีพิษ ไม่มีกลิ่นเหม็น มีความชื้นต่ำ มีความเสถียรสูง อีกทั้งช่วยให้กระบวนการแปรรูปง่ายขึ้น แต่อาจมีผลให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างลดลง เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการขีดสี เป็นต้น โดยทั่วไปได้มีการแบ่งแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นหลายชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับกรรมวิธีการผลิตและการปรับปรุงประสิทธิภาพ โดยแคลเซียมคาร์บอเนตที่นิยมใช้นั้นอยู่ในรูปของหินปูนบริสุทธิ์ (Purified ground; CaCO_3) และในการนำแคลเซียมคาร์บอเนตไปใช้เป็นสารตัวเติมในการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดนั้น พิจารณาจากขนาดที่สามารถผ่านตะแกรงตั้งแต่ขนาด 3 inch mesh จนถึง 100 μm หรือมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 1 ถึง 10 μm

5.6 สารเคมีอื่น ๆ

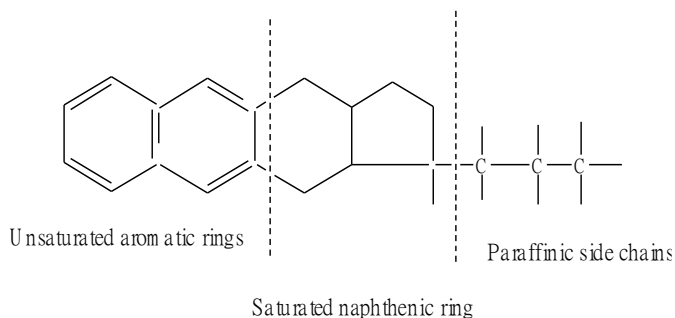
สารเคมีอื่น ๆ นี้ ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งจะใส่ลงไปในยางเมื่อต้องการให้สามารถแปรรูปได้ง่ายยิ่งขึ้นเช่นสารในกลุ่มพวกน้ำมัน หรือเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารเชื่อมประสาน (Coupling agent) สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) สารหน่วงปฏิกิริยาอย่างคงรูป (Retarder) เป็นต้น

5.6.1 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer)

พลาสติไซเซอร์ คือ สารที่เติมลงในพอลิเมอร์แล้วทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวเพิ่มขึ้น โดยทำให้ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) ลดลง เนื่องจากพลาสติไซเซอร์เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้แรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ลดลง นอกจากนี้พลาสติไซเซอร์ยังมีผลต่อสมบัติเชิงฟิสิกส์ด้วย เช่น ทำให้ความแข็งลดลง พอลิเมอร์หลอมไหลได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์ มีหลายชนิด ซึ่งแบ่งออกเป็นกลุ่มได้ดังนี้

5.6.1.1 น้ำมันปิโตรเลียม

พลาสติไซเซอร์ที่เป็นน้ำมันปิโตรเลียมมีโครงสร้างที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้ คือ วงแหวนไม่อิ่มตัว (วงแหวนอะโรมาติก) วงแหวนอิ่มตัว (วงแหวนแนฟเทนิค) และสายโซ่ตรงที่เป็นส่วนของพาราฟินิก โครงสร้างของน้ำมันปิโตรเลียมแสดงดังในภาพที่ 5.6



ภาพที่ 5.6 โครงสร้างของน้ำมันปิโตรเลียม

ที่มา : Brydson (1988)

การแบ่งประเภทน้ำมันแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ น้ำมันอะโรมาติก น้ำมันแนฟเทนิคและน้ำมันพาราฟินิก การแบ่งประเภทจะแบ่งตามอัตราส่วนของโครงสร้างทั้ง 3 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.5 สมบัติทั่วไปของน้ำมันปิโตรเลียม

Properties	Paraffinic	Naphthenic	Aromatic
Viscosity, CST			
At 40°C	19.7	110.2	763.5
At 100°C	4	8	17
Specific gravity at 15°C	0.861	0.932	1.018
Carbon-type analysis, %			
C _{Aromatic}	3.5	21	45
C _{Naphthenic}	31	37	18
C _{Paraffinic}	65.5	42	37
Molecular-type analysis, %			
Polar compounds	0.4	2.8	7.8
Aromatics	12.1	42.8	80
Saturates	87.5	54.4	12.2
Aniline point, °C	96	75	38.2

ที่มา : Morria (1979)

นอกจากส่วนประกอบหลักทั้ง 3 ชนิด แล้วน้ำมันทางการค้ายังมีสารประกอบอื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน กำมะถันหรือออกซิเจนปนอยู่บ้างเล็กน้อย

5.6.1.2 น้ำมันเอสเทอร์

ยางทนน้ำมันทั่วไปมักหมายถึงยางที่ไม่บวมพองในน้ำมันปิโตรเลียม ยางเหล่านี้เป็นยางที่มีสมบัติมีขั้วในโมเลกุล เช่น ยางไนไตรล์ ยางคลอโรพรีน เป็นต้น ยางเหล่านี้มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูงทำให้แข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำได้ง่าย ดังนั้นจึงมักใช้น้ำมันใส่เข้าไปเพื่อทำให้ยางอ่อนตัวและช่วยขยายช่วงการใช้งานของยางให้ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น เนื่องจากยางทนน้ำมันเหล่านี้เป็นยางมีขั้ว น้ำมันที่ใช้จึงควรเป็นน้ำมันมีขั้วด้วย ดังนั้นส่วนใหญ่จึงใช้น้ำมันเอสเทอร์ น้ำมันเอสเทอร์ที่ใช้งานโดยทั่วไปได้แก่

- ฟอสเฟต (Phosphates) เป็นสารที่ผลิตจากกรดฟอสเฟอริก ฟอสเฟตมีคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าพทาเลท นอกจากนี้ยังมีสมบัติเด่นในด้านการทนไฟ ตัวที่นิยมใช้กัน คือ tri-isopropylphenol phosphates ข้อเสียของน้ำมันชนิดนี้คือไม่มีความทนทานต่อแสงและความร้อน นอกจากนี้ยังมีราคาแพง

● พะทาเลท (Phthalates) น้ำมันเหล่านี้ผลิตจากการรวมตัวของ Phthalic anhydride กับแอลกอฮอล์ โดยแอลกอฮอล์ที่ใช้จะมีคาร์บอนตั้งแต่ 1 ถึง 13 ตัว ถ้าคาร์บอนในแอลกอฮอล์น้อยจะส่งผลให้มีความสามารถในการเข้ากับยางสูง แต่น้ำมันชนิดนี้จะระเหยง่ายส่งผลให้การใช้งานของยางที่อุณหภูมิต่ำไม่ค่อยดี ดังนั้นโดยทั่วไปแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการผลิตน้ำมันชนิดนี้จะมีคาร์บอนอะตอมประมาณ 4-10

ประสิทธิภาพการใช้ของพลาสติกไซเซอรในพอลิเมอร์มีปัจจัยพื้นฐานอยู่ 4 ลักษณะคือ

1) Solvent power คือความสามารถในการละลายตัวหรือแทรกตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ (polymer matrix) สามารถมีแรงกระทำต่อกันระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซอร ลักษณะของแรงจะเป็นเช่นใดขึ้นกับโครงสร้างและธาตุองค์ประกอบของทั้งพอลิเมอร์และพลาสติกไซเซอร ซึ่งพลาสติกไซเซอรที่ดีควรมีประสิทธิภาพในการละลายในพอลิเมอร์ได้ดี มีค่าประสิทธิภาพการละลาย (degree of solvent power) สูง ซึ่งจะทำให้ทราบแนวโน้มความสามารถในการแทรกซึมตัวของพลาสติกไซเซอรเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ได้ ซึ่งอาจจะสามารถเข้าไปได้อย่างทั่วถึงทุกส่วน ทั้งในส่วนผลึกและอสัณฐานแต่หากค่าประสิทธิภาพการละลายต่ำ การแทรกซึมตัวเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์จะมีได้เฉพาะบางส่วน เช่น ส่วนอสัณฐานเพียงส่วนเดียวเท่านั้น

2) Compatibility คือ ความเข้ากันได้ ความคล้ายคลึงกันของโครงสร้างโมเลกุลระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซอรจะเกิดความเข้ากันได้มากขึ้น สามารถเกิดแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์กับพลาสติกไซเซอรได้ดีขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อเนื่องในแง่ของประสิทธิภาพการละลายมีค่าสูง

3) Efficiency หมายถึงประสิทธิภาพการละลายของพลาสติกไซเซอรในพอลิเมอร์ การละลายได้ในปริมาณสูงหรือมีขีดจำกัดของการละลายสูง ทำให้สามารถกระจายตัวได้ดีในเนื้อพอลิเมอร์ ค่าประสิทธิภาพการละลาย (efficiency value) สามารถพิจารณาโดยใช้พอลิเมอร์เป็นฐานคำนวณ เช่น การศึกษาเปรียบเทียบค่า T_g กับปริมาณการดูดซับพลาสติกไซเซอรของพอลิเมอร์ (volume fraction of plasticizer) หรือศึกษาอัตราเร็วการแพร่ของพลาสติกไซเซอรเข้าสู่เนื้อพอลิเมอร์ (rate of diffusion of plasticizer into polymer matrix) สามารถเชื่อมโยงผลถึงความสามารถในการละลายและการไม่ละลายของพลาสติกไซเซอรในพอลิเมอร์ (solvation-desolvation effect)

4) Permanance or Migration การดำรงอยู่ได้ในเนื้อพอลิเมอร์ โดยไม่เกิดการเคลื่อนตัวออกจากพอลิเมอร์ การเคลื่อนตัวจะแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ เคลื่อนตัวจากด้านในมาสู่ด้านนอก เรียกว่า “migration” และเคลื่อนตัวจากผิวด้านนอกสู่อากาศหรือสิ่งแวดล้อมข้างเคียงได้ พลาสติกไซเซอรในลักษณะอิสระ เรียกว่า “exudation”

5.6.2 สารเชื่อมประสาน (Coupling agent)

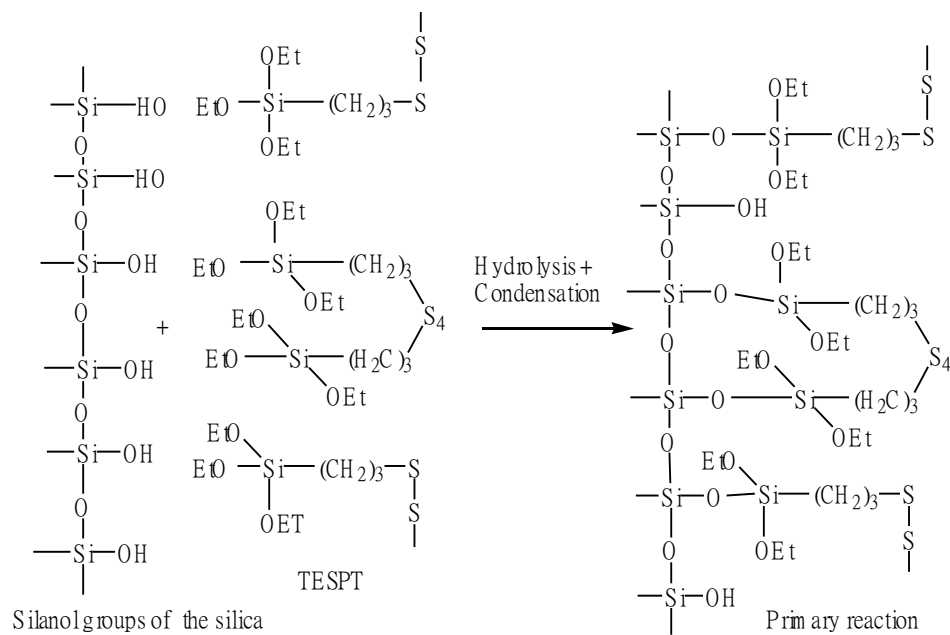
โดยทั่วไปการใช้สารตัวเติมเขม่าดำสามารถเสริมประสิทธิภาพให้กับพอลิเมอร์ได้โดยไม่ต้องใช้สารเชื่อมประสาน ส่วนการใช้ซิลิกาต้องมีการใช้สารเชื่อมประสาน เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยา

ระหว่างซิลิกากับพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากบริเวณผิวของซิลิกามีหมู่ที่มีขั้วอยู่ ด้วยเหตุนี้ซิลิกาจึงเกิดอันตรกิริยาระหว่าง filler-filler ได้มากกว่าเขม่าดำ การเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดการรวมตัว (aggregate) และการเกาะกันเป็นกลุ่ม (agglomerate) ของซิลิกาในขณะผสม เพื่อลดการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงมีการใช้สารเชื่อมประสานซึ่งเป็นสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ที่มีขั้วที่ผิวของ ซิลิกาและพอลิเมอร์ได้

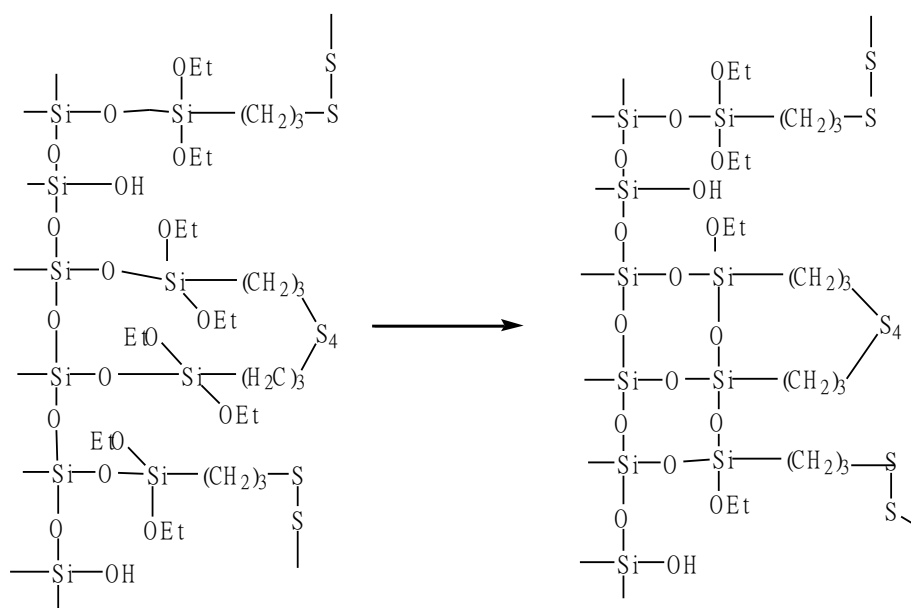
สารเชื่อมประสานที่ใช้จะต้องสามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาและพอลิเมอร์ได้ โดยทั่วไปจะใช้สารออกาโนซิลเลนที่มีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ (bifunctional organosilanes) ซึ่งเป็นสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของซิลิกาและสามารถเกิดปฏิกิริยากับส่วนโมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ด้วย โดยสารเชื่อมประสานที่ใช้จะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างซิลิกาและพอลิเมอร์ ดังนั้นการใช้สารเชื่อมประสานจะช่วยปรับปรุงสมบัติการเข้ากันของซิลิกากับพอลิเมอร์ได้

สารเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันในการวัลคาไนซ์ยางด้วยระบบกำมะถัน คือ 3-mercaptopropyltrimethoxysilane สารเชื่อมประสานชนิดนี้นิยมใช้ในยางธรรมชาติและยาง SBR ซึ่งการใช้สารเชื่อมประสานชนิดนี้จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความสามารถในการยืดจนขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด โมดูลัส และการผิดรูปอย่างถาวร (permanent set) แต่การใช้สารเชื่อมประสานชนิดนี้จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาก่อน (premature reaction) ในขณะผสมส่งผลให้แปรรูปยาก เช่น เกิดการสก๊อชและความหนืดเพิ่มขึ้น

เพื่อเป็นการแก้ปัญหการแปรรูปยากจึงมีการคิดค้นสารเชื่อมประสานตัวใหม่ ซึ่งสารเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน คือ Bis(triethoxysilylpropyl)tetrasulfide (TESPT) หมู่เอทอกซีไฮลิล (ethoxysilyl group) ซึ่งมีความว่องไวต่อซิลิกาดำกว่าหมู่เมทอกซีไฮลิล (methoxysilyl group) สารเชื่อมประสาน TESPT เป็นสารที่มีกำมะถันอยู่ในโครงสร้าง ส่งผลให้ TESPT เป็นสารที่ไม่เสถียรในสภาวะที่มีแรงเฉือนสูงและอุณหภูมิสูงดังนั้น TESPT จะเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผสม พันธะ S-S ในพอลิซิลเฟนเกิดการแตกออกได้ง่ายในสภาวะที่มีแรงเฉือนสูงเนื่องจากเป็นพันธะที่มีพลังงานพันธะต่ำ (286 kJ/mol) กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง TESPT กับซิลิกาแสดงดังในภาพที่ 5.7



(ก) Primary reaction



(ข) Secondary reaction

ภาพที่ 5.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับไซเลน (ก) การเกิดปฏิกิริยาแบบ primary reaction และ (ข) การเกิดปฏิกิริยาแบบ secondary reaction

ที่มา : Joseph et al. (2004)

ต่อมา มีการทดลองใช้สารเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่มีชื่อว่า bis(triethoxysilylpropyl)disulfane (TESPD : Si266/Si75) ซึ่งมีข้อดีคือ TESP เป็นสารที่เสถียรต่อสภาวะที่มีแรงเฉือนสูงกว่า TESPT แต่ว่าในโครงสร้างของ TESP จะมีปริมาณกำมะถันอยู่น้อยกว่า TESPT จึงส่งผลให้ความสามารถในการเสริมแรงต่ำกว่าการใช้ TESPT ส่วนใหญ่สารเชื่อมประสานชนิดนี้จะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์

5.6.3 สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สีที่ใส่ลงไปในยางควรเป็นสีที่มีประสิทธิภาพทนทานต่อแสง ทนทานต่อความร้อน ไม่ตกสี ไม่เป็นพิษ มีราคาถูก ไม่มีผลต่ออายุของยางและอัตราความเร็วในการทำให้ยางคงรูป แบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1) สีอินทรีย์ เป็นสีที่สังเคราะห์ขึ้น และเป็นสีค่อนข้างมีประสิทธิภาพดี ให้สีที่เห็นชัด สีสดสวย แต่มีราคาแพง สีอินทรีย์บางตัวจะเปลี่ยนสีหรือสีจางลงได้ง่าย ถ้าถูกแสงนาน ๆ หรือถูกสารเคมี และสีไม่ทนทานต่อการแปรรูปที่อุณหภูมิสูง สีอินทรีย์นี้เมื่อนำไปใช้อาจจะใช้ในรูปของผง หรือในรูปของส่วนผสมของยางกับสารเคมี (Masterbatch)

2) สีอนินทรีย์ เป็นสีที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าพวกสีอินทรีย์ ราคาค่อนข้างถูก แต่ต้องใช้ปริมาณมาก สีค่อนข้างทึบไม่ใส แต่มีความคงตัวอยู่นาน สีมักไม่จาง และยังทนได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ ตัวอย่างสารอนินทรีย์ เช่น สีขาวใช้ติตาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) สีแดงใช้เหล็กออกไซด์ (Iron oxide) สีน้ำเงินใช้อัลตร้ามารินบลู (Ultramarine blue) สีเขียวค่อนข้างทึบใช้โครเมียมออกไซด์ (Chromium oxide)

5.6.4 สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agents) เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปนยางและช่วยให้เกิดรูพรุนในยาง โดยโมเลกุลของสารที่ทำให้เกิดฟองจะแตกสลายเมื่อได้รับความร้อน และให้แก๊สออกมา ทำใหยางเป็นรูพรุนในรูปแบบของฟองน้ำ (Sponge) หรือ ยางไมโครเซลลูลาร์ (Microcellular rubber) สารทำให้เกิดฟองสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1) ชนิดอนินทรีย์ มีประสิทธิภาพต่ำ ต้องใช้ปริมาณมาก การกระจายตัวไม่ดี ราคาค่อนข้างถูก สารอนินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้คือ แอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium carbonate) แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium bicarbonate) โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate) สารเคมีเหล่านี้จะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)

2) ชนิดอินทรีย์ เป็นสารที่ให้แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen) เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถละลายในยางได้ดี การกระจายตัวดี ทำให้เกิดฟองขนาดเล็กและสม่ำเสมอ มีราค่อนข้างแพง ได้แก่สารพวกอะโซคอมพาวด์ (Azocompounds) ไนโตรโซคอมพาวด์ (Nitroso compound) ซัลโฟนิล ไฮไดรไรด์ (Sulfonyl hydrazide)

5.6.5 สารหน่วงปฏิกิริยายางคงรูป (Retarders) เป็นสารที่ช่วยลดหรือชะลอความว่องไวของสารเร่งระหว่างกระบวนการเก็บรักษา หรือระหว่างกระบวนการผลิต จุดมุ่งหมายของการใช้สารนี้เพื่อป้องกันการเกิดยางคงรูประหว่างกรรมวิธีการผลิตและระหว่างการเก็บรักษา สารชนิดนี้ต้องสลายตัวและไม่ขัดขวางปฏิกิริยาของสารเร่งที่อุณหภูมิปกติ หรือที่อุณหภูมิสูงขึ้น และต้องไม่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของยาง

ได้แก่ กรดซาลิไซลิก (Salicylic acid) กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) แนนพธาไลน์ แอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride)

5.6.6 สารขัดสี (Abrasive) เป็นสารที่ใส่ลงไปในยางเพื่อเพิ่มสมบัติการขัดสี วัสดุบางอย่าง เช่น ยางลบ ลูกกลิ้งขัดสี จำเป็นต้องมีสมบัตินี้ ซึ่งสารพวกพูมิตซ์ (Pumice) และผงแก้ว นิยมใช้ในการทำยางลบ ส่วนลูกกลิ้งขัดสีมักใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide)

5.6.7 สารป้องกันรังสี โดยการใช้ผงตะกั่ว (Litharge) ผสมเข้าไปในยาง จะทำให้ได้ยางที่รังสีผ่านได้ยากขึ้น ใช้สำหรับทำชุดพนักงานที่ทำงานเกี่ยวกับสารกัมมันตรังสีต่าง ๆ

5.6.8 สารลดไฟฟ้าสถิตของยาง ผลิตภัณฑ์ยางบางประเภท เช่น ล้อที่ใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า และด้าย ล้อเข็นในโรงพยาบาล สายพานลำเลียง มักใส่สารที่ลดไฟฟ้าสถิตของยาง คือใช้เขม่าดำ (Carbon black) ชนิดเป็นสื่อกระแสไฟฟ้าสีดำ (Conductive channel black) หรือ ใช้สารลดไฟฟ้าสถิต (Antistatic agent)

5.6.9 สารลดความเสียดทาน ผงแกรไฟต์ (Graphite powder) มักใช้ผสมยางเพื่อให้ยางมีความเสียดทานของผิวต่ำลง โดยเฉพาะมักจะทาผิวของยางก่อนนำไปคงรูป นอกจากนี้แกรไฟต์ยังใช้เป็นสารทนความร้อนได้อีกด้วย

5.6.10 สารที่ทำให้ยางมีสมบัติเป็นแม่เหล็ก ได้แก่ การใช้แบเรียมเฟอร์ไรท์ (Barium ferrite) ผสมในยาง ซึ่งทำให้ยางมีสมบัติเป็นแม่เหล็ก

5.6.11 สารลดการติดไฟ (Flame retarder) เป็นสารที่ช่วยให้ยางมีความทนทานต่อการลุกไหม้ เช่น แอนติโมนีออกไซด์ (Antimonyoxide, Sb_2O_3) เป็นสารที่ใส่เข้าไปในยาง และถ้ายางมีพวกลอเจน (Halogen) อยู่จะทำให้ยางมีความทนทานต่อการลุกไหม้ได้ดี แต่ถ้ายางไม่มีพวกลอเจนอยู่จะไม่มีความต้านทานการลุกไหม้เลย

5.6.12 ขี้ผึ้งฮาโลจีเนต (Halogenated wax) สารนี้เมื่อใส่เข้าไปในยางแล้วถ้าเกิดไฟลุกไหม้ จะให้แก๊สฮาโลเจนหรือไฮโดรเจนฮาไลด์ (Hydrogen halide) คลุมผิวยาง ทำให้ยางลุกไหม้ได้ช้าลง

5.7 บทสรุป

สารเคมีสำหรับยาง คือสารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมลงไปในยางเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่คุณสมบัติตามต้องการ โดยยางที่ผสมสารเคมีแล้วไม่อาจนำไปใช้งานได้เว้นแต่สารเคมีเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับยางก่อน ซึ่งสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วนยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้วเรียกว่ายางคงรูป (Vulcanised rubber หรือ Cured rubber) โดยเหตุผลหลักของการผสมยางกับสารเคมีคือ

1. เพื่อแก้ไขข้อเสียของยาง
2. เพื่อเป็นตัวช่วยในกระบวนการแปรรูปยาง
3. ทำให้ยางมีขอบเขตการใช้งานกว้างขึ้น
4. เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต

สารเคมีที่ใส่ผสมลงไปในยางเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์ยางอาจจำแนกเป็นพวก ๆ ได้ดังนี้

1. สารทำให้ยางคงรูป หรือสารวัลคาไนซ์ (Vulcanising agent) เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (crosslink) ตรงตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ได้แก่สารกำมะถัน สารที่มีส่วนประกอบของกำมะถัน สารเปอร์ออกไซด์

2. สารเร่ง (Accelerator) ได้แก่ สารเร่งการเกิดปฏิกิริยาให้เกิดช้า ปานกลาง หรือเร็ว เช่น Guanidine, Thiazole, Sulphenamide, Thiuram

3. สารกระตุ้น หรือสารเสริมตัวเร่ง (Activator) เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้นโดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อจะได้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น เร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้นโดยทำให้ยางมีความอดุลสูงขึ้น ได้แก่ Stearic acid และ Zinc oxide

4. สารตัวเติม (Filler) เป็นสารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยางเพื่อลดต้นทุนในการผลิตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น Carbon black, Calcium Carbonate และ Silica เป็นต้น

5. สารช่วยในการแปรรูปยาง หรือสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticiser) เป็นสารทำให้ยางนิ่ม

6. สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Antidegradant) ได้แก่สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) หรือสารต้านทานปฏิกิริยาโอโซน (Antiozonant) ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดจะทำให้ยางมีอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางยาวนานขึ้น

7. สารพิเศษอื่น ๆ (Miscellaneous ingredient) ไม่ถือว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้สำหรับยางทั่วไปแต่บางครั้งจะใส่ลงไปในยางเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) สารหน่วง (Retarder) เป็นต้น

แบบฝึกหัด

1. จงบอกจุดประสงค์ของการเติมสารเคมีลงไปในยางเพื่อทำผลิตภัณฑ์
2. เพราะเหตุใดระบบการคงรูปด้วยกำมะถันจึงเป็นระบบที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน
3. Secondary accelerator คืออะไร
4. จงเรียงลำดับการจัดหมวดหมู่ของสารตัวเร่งตามความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาจากเร็วไปช้า
5. เมื่อต้องการบดยางธรรมชาติกับสารตัวเติมซิลิกา จะต้องมีการเติมสารเคมีชนิดเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้

เอกสารอ้างอิง

- พงษ์ธร แซ่อู่. (2548). *สารเคมียาง*. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พิมพ์ครั้งที่ 1 มิถุนายน 2548.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. (2528). *สารเคมีสำหรับยาง*. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. หน้า 42-343.
- วิภา เศวกนิษฐ์. (2544). *สารเคมีสำหรับยาง*. ส่วนอุตสาหกรรมยาง. สถาบันวิจัยยาง. กรมวิชาการเกษตร. หน้า 1-49.
- เสาวนีย์ ก่ออุทัยกุลรังสี. (2547). *ยางธรรมชาติ*. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Bomo, F. (1996). *Meeting of Rubber Devision*. ACS, Montreal. May 5-8, Paper E.
- Brydson, J.A. (1988). *Rubbery Materials and Their Compounds*. Elsevier Science Publishers LTD.
- Coran, A.Y. (2013). *Vulcanization. The Science and Technology of Rubber (Fourth Edition)*. Academic Press. 337-381.
- Degussa. (1997). *Basic Characteristics of Aerosil*. Frankfurt/Main.
- Horn, J.B. (1969). *Rubber Plast*. Age. 50, 457.
- Joseph, R., Alex, R., Madhusoodanan, K.N., Premalatha, C.K. and Kuriakos, B. (2004). *Used of Epoxidized Rubber Seed oil as a Coupling Agent and a Plasticizer in Silica-Filled Natural Rubber Compounds*. J. Appl. Polym. Sci. 92, 3531-3536.
- Stelescu, M.D., Georgescu, M. and MANAILA, E. (2010). *Aspects regarding crosslinking of a natural rubber blend*. Proceedings of the 3rd International Conference Advanced Materials and Systems, ICAMS 2010, PP. 313-318, Bucharest, Romania, 16-18 September 2010.
- Wypych, G. (1999). *Handbook of Filler*. Chem Tech Publishing.