ผลของระบบการคงรูปด้วยกำมะถันและสารคู่ควบไซเลนต่อ
สมบัติของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา

EFFECTS OF SULFUR VULCANIZATION SYSTEMS AND SILANE COUPLING AGENTS ON PROPERTIES OF SILICA-FILLED NATURAL RUBBER

ภัทรภูมิ สุพรรณสมบูรณ์

PATTARAPHUM SUPANNASOMBOON

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1747-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของระบบการคงรูปด้วยกำมะถันและสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา

EFFECTS OF SULFUR VULCANIZATION SYSTEMS AND SILANE COUPLING AGENTS ON PROPERTIES OF SILICA-FILLED NATURAL RUBBER

T061039

ภัทรภูมิ สุพรรณสมบูรณ์

PATTARAPHUM SUPANNASOMBOON

เลขหมู่.......
เลขทะเบียน 61039
วัน,เดือน,ปี - 7 ก.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1747-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

b.......
i.......

EFFECTS OF SULFUR VULCANIZATION SYSTEMS AND SILANE COUPLING AGENTS ON PROPERTIES OF SILICA-FILLED NATURAL RUBBER

PATTARAPHUM SUPANNASOMBOON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2005

ISBN 974-15-1747-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของระบบการคงรูปด้วยกำมะถันและสารคู่ควบไซเลน ต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา
นักศึกษา	นายภัทรภูมิ สุพรรณสมบูรณ์
รหัสประจำตัว	43065616
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พงษ์ธร แซ่อุย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของระบบการคงรูปด้วยกำมะถันและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา โดยได้มีการศึกษาประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารคู่ควบไซเลน 2 ชนิดคือ Si-69 (Bis-triethoxysilylpropyl tetrasulfide, TESPT) และ Si-264 (3-Thiocyanatopropyl-triethoxy silane, TCPTS) ในระบบการคงรูป 3 ระบบ คือ ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (CV) ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV) นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยางคงรูปอีกด้วย การผสมยางคอมพาวด์ใช้เครื่องผสมยางแบบปิดโดยใช้สัดส่วนการเติม (Fill factor) เท่ากับ 0.7 ความเร็วโรเตอร์ 40 รอบต่อนาที อุณหภูมิเริ่มต้น 40 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการผสม 12 นาที จากนั้นจึงนำยางคอมพาวด์ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ เช่น ความหนืดมูนนี่ เวลาในการคงรูปที่เหมาะสม และท้ายสุดก็นำยางคอมพาวด์ไปขึ้นรูปและอบคงรูปเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัต

จากการศึกษา พบว่า ระบบการคงรูปแบบ Semi-EV จะให้ยางคงรูปที่มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับระบบการคงรูปแบบ CV และสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนนอกจากจะช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต (เช่น ลดค่าความหนืดมูนนี่ และเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม) แล้ว ยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางคงรูปอีกด้วย โดยในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV พบว่า Si-264 จะให้ระดับการเสริมแรงที่สูงกว่า Si-69 เนื่องจาก Si-264 เข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิกาได้ง่ายกว่า ทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ดีกว่า รวมทั้งยังทำให้ยางมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่าเมื่อเปรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับ Si-69 อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบการคงรูปแบบ EV กลับพบว่า Si-69 จะให้ระดับของการเสริมแรงที่สูงกว่า Si-264 ทั้งนี้ เนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางในระหว่างการคงรูป (Sulfur contribution effect) นอกจากสมบัติเชิงกลแล้ว สารคู่ควบไซเลนยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัตของยางคงรูปอีกด้วย โดยพบว่า Si-264 จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัตของยางได้ดีกว่า Si-69 (ยางมีค่าความร้อนสะสมและค่า tan δ ต่ำกว่า)

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติต่าง ๆ ของยาง พบว่าการเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนจะส่งผลทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ง่ายขึ้น อย่างไรก็ดี การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่มากเกินไป (> 4.5 phr) ก็อาจก่อให้เกิดผลในทางลบต่อสมบัติเชิงกลของยางได้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนส่วนที่มากเกินพอจะส่งผลทำให้ยางนิ่ม (เกิด Plasticizing effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effects of Sulfur Vulcanization Systems and Silane Coupling Agents on Properties of Silica-Filled Natural Rubber
Student	Mr. Pattaraphum Supannasomboon
Student ID.	43065616
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2005
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Suparat Rukchonlatee
Thesis Co-advisor	Dr. Pongdhorn Sae-oui

ABSTRACT

This research studied the effects of sulfur vulcanization system and silane coupling agent types on properties of silica-filled natural rubber (NR). The reinforcing efficiency of coupling agents was studied using two silane types, Si-69 (Bis-triethoxysilylpropyl tetrasulfide, TESPT) and Si-264 (3-Thiocyanatopropyl-triethoxy silane, TCPTS). The vulcanization systems investigated were conventional (CV), semi-efficient (Semi-EV), and efficient (EV) vulcanization systems. Moreover, the effect of silane loading on properties of rubber vulcanizates was included in this research. The rubber compounds were prepared using an internal mixer with fill factor of 0.7, a rotor speed of 40 rpm, an initial temperature of 40 °C and mixing time of 12 minutes. After mixing, the properties of the rubber compounds were tested, i.e., mooney viscosity, cure characteristic. Finally, forming and vulcanization of rubber compounds were performed for further testing such as mechanical and dynamic properties.

The results revealed that the mechanical properties of silica-filled NR using the Semi-EV system were close to those using CV system and higher than those using EV system. The addition of silane coupling agents could improve not only compound processability (such as lower mooney viscosity and cure time), but also enhance the mechanical properties of the rubber vulcanizates. For CV and Semi-EV systems, Si-264 imparted greater degree of reinforcement than Si-69 and this might be attributed to the combined effects of improved wetting on silica surface, better filler dispersion and higher degree of crosslink density. However, for the EV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

system, contrary results were obtained, i.e., Si-69 provided better reinforcement than Si-264. Explanation was given to the effect of sulfur contribution of Si-69 which was dominant only in the EV system. In addition to the mechanical properties, the dynamic properties of the rubber vulcanizates were also improved with the presence of silane coupling agents. In this aspect, Si-264 performed better than Si-69 as it provided rubber vulcanizates with lower heat buiid up and tan δ.

The effects of silane loading on properties of rubber compounds were also examined and it was found that the higher the silane loading, the better the compound processability. However, at high silane contents (more than 4.5 phr), the poorer mechanical properties were observed due to plasticizing effect from excessive silane coupling agents.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำ และคำปรึกษาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างสูงต่อผู้วิจัยจากบุคคล และองค์กรต่าง ๆ ซึ่งข้าพเจ้าผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาและนายณชล สุพรรณสมบูรณ์ (พี่ชาย) อย่างที่สุด ที่ให้ชีวิต ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน และให้ทุกสิ่งทุกอย่างกับข้าพเจ้าอย่างสุดที่จะบรรยายได้ ขอกราบขอบพระคุณ นางสาวปราณีต สุพรรณสมบูรณ์ (อา) ที่คอยดูแลและห่วงใยข้าพเจ้าตลอดมา ขอขอบพระคุณ นางสาวจุฑฤดี สุพรรณสมบูรณ์ (พี่สาว) และญาติ ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจตลอดมา จนทำให้มีวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และดร.พงษ์ธร แซ่อุย อย่างสูงสำหรับความกรุณาที่ให้ความรู้ อบรมเอาใจใส่เป็นอย่างดีตลอดมา ให้คำปรึกษาในทุก ๆ ด้านและกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อย่างละเอียดตลอดมาด้วยความอดทน จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณรศ.ดร. อิทธิพล แจ้งชัด ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ และ รศ.ดร. ชาคริต สิริสิงห อาจารย์คณะกรรมการที่ช่วยกรุณาตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน เจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ขอขอบคุณ คุณอุทัย เทพสุวรรณ คุณกรรณิกา หัตถะปะนิตย์ และคุณวุฒิชัย ไทยเจริญ ที่เอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์ สารเคมี และอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ โดยเฉพาะ นางสาวสุภาณี ชนะวงศ์ และ นางสาววราภรณ์ พุทธัสสะ และน้อง ๆ ภาคเคมีที่แสนดีสำหรับกำลังใจและสิ่งดี ๆ ที่มอบให้ข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลืออีกมากมายที่ทำให้การดำเนินงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ซึ่งผู้วิจัยต้องขออภัยหากมิได้กล่าวถึงมา ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ภัทรภูมิ สุพรรณสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XII
คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ	XVI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ยางธรรมชาติ	3
2.2 การบดยาง	4
2.3 การผสมยาง	4
2.4 กลไกการผสม	5
2.4.1 การเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติม	6
2.4.2 การกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง	7
2.4.3 การแตกตัวของสารตัวเติม	8
2.5 การคงรูปยาง	9
2.5.1 การคงรูปด้วยกำมะถัน	10
2.5.2 ผลของการเพิ่มปริมาณกำมะถัน	10
2.5.3 ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง	11
2.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของยางที่เกิดการเชื่อมโยงและปริมาณของการเชื่อมโยง	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5.5 ชนิดของการเชื่อมโยงและผลของโครงสร้างของการเชื่อมโยง
ต่อสมบัติของยางคงรูป........... 13
2.5.5.1 สมบัติเชิงกล... 15
2.5.5.2 สมบัติเชิงพลวัต... 15
2.5.6 ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงซัลฟิดิกชนิดต่าง ๆ......................... 16
2.6 สารตัวเติมเสริมแรง.. 16
2.6.1 สารตัวเติมเสริมแรงสำหรับยาง 16
2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมแรง 17
2.6.3 อันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม.. 18
2.7 ซิลิกา.. 18
2.7.1 ซิลิกาจากธรรมชาติหรือซิลิกาชนิดบด 19
2.7.2 ซิลิกาชนิดสังเคราะห์ 19
2.7.3 ปัญหาของการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวติม.. 22
2.8 สารคู่ควบไซเลน.. 23
2.8.1 สมบัติทั่วไป.. 23
2.8.2 บทบาทของสารคู่ควบไซเลน.. 24
2.8.3 หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของสารคู่ควบไซเลน.. 24
2.8.4 ปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับสารคู่ควบไซเลน....................................... 25

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย... 30
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.. 30
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.. 31
3.3 การออกแบบสูตรผสมยาง... 31
3.3.1 การออกแบบสูตรผสมยางสำหรับการทดลองในส่วนที่ 1 32
3.3.2 การออกแบบสูตรผสมยางสำหรับการทดลองในส่วนที่ 2 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4 การผสมยาง.. 38

3.5 การทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์.. 38

3.5.1 การหาเวลาที่เหมาะสมในการคงรูป.. 38

3.5.2 การวัดค่าความหนืดมูนนี่ 39

3.6 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติของยางคงรูป.. 40

3.7 การทดสมบัติของยางคงรูป.. 41

3.7.1 การหาค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยง.. 41

3.7.2 การศึกษาระดับการแตกตัวของซิลิกา.. 41

3.7.3 การทดสอบสมบัติแรงดึง 42

3.7.4 การทดสอบความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน............ 42

3.7.5 การทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด 43

3.7.6 การทดสอบค่าการเสียรูปหลังการกดอัด 43

3.7.7 การทดสอบความแข็งแกร่งกดอัด 44

3.7.8 การทดสอบค่าความต้านทานต่อการขัดถู 44

3.7.9 ความแข็งกด 45

3.7.10 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต.. 45

3.7.11 การทดสอบค่าความร้อนสะสมความร้อน.. 45

บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล.. 46

4.1 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยาง

ธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา.. 46

4.1.1 ผลต่อพฤติกรรมของการผสมและสมบัติต่าง ๆ ของยางคอมพาวด์............ 46

4.1.1.1 ค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม.. 46

4.1.1.2 ค่าความหนืดมูนนี่... 48

4.1.1.3 ค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ... 50

4.1.1.4 เวลาในการเริ่มสุกตัวของยางและเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม.. 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.2 ผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูป.. 55
4.1.2.1 ค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย.. 55
4.1.2.2 ระดับในการแตกตัวของซิลิกา.. 57
4.1.2.3 สมบัติแรงดึง.. 64
4.1.2.4 ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน.. 69
4.1.2.5 ค่าความแข็งแรงฉีกขาด.. 72
4.1.2.6 ค่าการเสียรูปหลังการกดอัด.. 74
4.1.2.7 ค่าความต้านทานต่อการขัดถู.. 75
4.1.2.8 ค่าความแข็งแกร่งกดอัด.. 77
4.1.2.9 ค่าความแข็งกด.. 80
4.2 ผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา.. 81
4.2.1 ผลต่อพฤติกรรมของการผสมและสมบัติต่าง ๆ ของยางคอมพาวด์.. 81
4.2.1.1 ค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ และค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ.. 81
4.2.1.2 ค่าเวลาที่ใช้ในการเริ่มสุกตัวของยางและเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม.. 83
4.2.2 ผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูป.. 84
4.2.2.1 ค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย.. 84
4.2.2.2 ระดับในการแตกตัวของซิลิกา.. 85
4.2.2.3 สมบัติแรงดึง.. 88
4.2.3.4 ค่าความแข็งแรงฉีกขาด.. 90
4.2.3.5 ค่าการเสียรูปหลังการกดอัด.. 90
4.2.3.6 ค่าความต้านทานต่อการขัดถู.. 91
4.2.3.7 ค่าความแข็งกด.. 92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.3 ผลต่อสมบัติเชิงพลวัตต่าง ๆ ของยางคงรูป.. 92

4.2.3.1 ค่ามอดุลัสสะสม.. 92

4.2.3.2 ค่า tan δ.. 93

4.2.3.3 ค่าความร้อนสะสม.. 94

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.. 95

เอกสารอ้างอิง 98

ประวัติผู้เขียน.. 101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน ……………………………………………..	13
2.2 โครงสร้างของการคงรูปกับสมบัติทางฟิสิกส์ของยางที่เชื่อมโยงในระบบต่าง ๆ ……….	14
2.3 ค่าพลังงานพันธะของพันธะเชื่อมโยงต่าง ๆ ……………………………………	14
2.4 องค์ประกอบของซิลิกาชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการสังเคราะห์……………………………	21
2.5 สมบัติของซิลิกาชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการสังเคราะห์ ………………………………..	21
2.6 หมู่ฟังก์ชันออกาโนไซเลนชนิดต่างๆ………………………………………………	25
2.7 พีกสเปกตรัมและพันธะระหว่างซิลิกากับ Si-69…………………………………….	27
3.1 สารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ทดลอง…………………………………………………………	30
3.2 เครื่องมือชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ทดลอง……………………………………………………	31
3.3 สูตรการผสมเคมียางสำหรับการทดลองในส่วนที่ 1………………………………	33
3.4 การออกแบบเคมียาง……………………………………………………………….	34
3.5 สูตรการผสมเคมียางสำหรับการทดลองในส่วนที่ 2………………………………	36
3.6 ลักษณะของชิ้นงานและเวลาที่ใช้ในการคงรูปชิ้นทดสอบต่าง ๆ………………………	40
4.1 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของยางสูตรต่าง ๆ ก่อนและหลังการบ่มเร่ง………....	70
4.2 การเปรียบเทียบค่า 100% มอดุลัสของยางสูตรต่าง ๆ ก่อนและหลังการบ่มเร่ง…………	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 โครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติ 3

2.2 เครื่องผสมแบบปิด.. 5

2.3 แบบจำลองลักษณะของสารตัวเติมเสริมแรง.. 6

2.4 กลไกการเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติม ทั้ง 2 แบบ......... 7

2.5 ลักษณะการผสม (ก) แบบการกระจายตัวที่ไม่ดี และ (ข) แบบการกระจายตัวที่ดี........ 7

2.6 ลักษณะการผสม (ก) แบบการกระจายตัวที่ดีแต่ไม่มีการแตกตัว และ (ข) แบบการกระจายตัวและการแตกตัวที่ดี (ค) แบบการกระจายตัวไม่ดีแต่การแตกตัวที่ดี........ 8

2.7 โครงสร้างโมเลกุลของยางเพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งและปริมาณของ Allylic hydrogen (เส้นปะ) (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางบิวตะไดอีน.. 10

2.8 ผลของปริมาณกำมะถันต่อลักษณะการคงรูปของยาง.................................... 11

2.9 โครงสร้างของยางเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยกำมะถัน (1) มอนอซัลฟิดิก (2) ไดซัลฟิดิก (3) พอลิซัลฟิดิก (4) การเชื่อมโยงโดย C-C (5) สายโซ่ซัลเฟอร์ (6) สายโซ่ไทออล (7) เกิดพันธะกับตัวเร่งที่เหลือ (8) โครงสร้างแบบวง.. 11

2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเชื่อมโยงต่อสมบัติเชิงกลของยาง..................... 12

2.11 ชนิดของหมู่ไซลานอลบนผิวซิลิกา.. 19

2.12 ^{29}Si-CP/MAS พีกสเปกตรัมของซิลิกา.. 26

2.13 ^{29}Si-CP/MAS พีกสเปกตรัมของซิลิกาที่ใส่ Si-69 ลงไป 8 %wt ของซิลิกา............... 26

2.14 โมเดล 1 ของปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับ Si-69.. 27

2.15 โมเดล 2 ของปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับ Si-69.. 28

2.16 โมเดล 3 ของปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับ Si-69.. 28

2.17 ปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับไซเลน.. 29

3.1 โครงสร้างของ Si-69 (1) และ Si-264 (2)... 32

3.2 แผนผังการทดสอบต่าง ๆ (ในส่วนที่ 1).. 35

3.3 แผนผังการทดสอบต่าง ๆ (ในส่วนที่ 2)... 37

3.4 กราฟแสดงลักษณะของการคงรูปทั่วไป.. 39

3.5 ภาพตัดขวางของเครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่.. 40

3.6 รูปร่างของชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึง..................................... 42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.7 รูปร่างของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด………………………………… 43
3.8 ลักษณะเครื่องมือและการทดสอบการเสียรูปหลังการกดอัด………………………………… 44
4.1 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อพลังงานที่ใช้ในการผสม
(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3………………………………………………… 47
4.2 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความหนืดมูนนี่
(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3………………………………………………… 49
4.3 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ
(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3………………………………………………… 51
4.4 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อเวลาในการเริ่มสุกตัวของยาง
(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3………………………………………………… 52
4.5 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่
เหมาะสม (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3……………………………………… 53
4.6 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย
(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3………………………………………………… 56
4.7 ภาพ SEM ของ Ultrasil VN2 ในระบบการคงรูปแบบ CV……………………………… 58
4.8 ภาพ SEM ของ Ultrasil VN3 ในระบบการคงรูปแบบ CV……………………………… 59
4.9 ภาพ SEM ของ Ultrasil VN 2 ในระบบการคงรูปแบบ Semi-EV………………………… 60
4.10 ภาพ SEM ของ Ultrasil VN 3 ในระบบการคงรูปแบบ Semi-EV……………………… 61
4.11 ภาพ SEM ของ Ultrasil VN2 ในระบบการคงรูปแบบ EV……………………………… 62
4.12 ภาพ SEM ของ Ultrasil VN 3 ในระบบการคงรูปแบบ EV……………………………… 63
4.13 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแรงดึง
(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3……………………………………… 65
4.14 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่า100 % มอดุลัส
(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3……………………………………… 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.15 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3.. 68

4.16 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาด (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3.. 73

4.17 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าการเสียรูปหลังการกดอัด (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3.. 75

4.18 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความต้านทานต่อการขัดถู (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3.. 76

4.19 ผลของชนิดระบบการคงรูปต่อค่าความแข็งแกร่งกดอัดของ Ultrasil VN2.............. 77

4.20 ผลของชนิดในระบบการคงรูปต่าง ๆ ของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแกร่งกดอัดของ Ultrasil VN2.. 78

4.21 ผลของชนิดในระบบการคงรูปต่าง ๆ ของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแกร่งกดอัดของ Ultrasil VN3.. 79

4.22 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งกด (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3.. 80

4.23 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อพลังงานที่ใช้ในการผสม.......................... 82

4.24 ผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความหนืดมูนนี่.......................... 82

4.25 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ.......................... 83

4.26 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเวลาที่ใช้ในการเริ่มสุกตัวของยาง.......................... 83

4.27 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม.......................... 84

4.28 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย.......................... 84

4.29 ภาพถ่าย SEM ของยางคงรูปสูตรที่ใช้ Ultrasil VN 2 โดยใส่ Si-69 ปริมาณต่าง ๆ ในระบบการคงรูปแบบ Semi-EV ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.......................... 86

4.30 ภาพถ่าย SEM ของยางคงรูปสูตรที่ใช้ Ultrasil VN 2 โดยใส่ Si-264 ปริมาณต่าง ๆ ในระบบการคงรูปแบบ Semi-EV ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.......................... 87

4.31 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแรงดึง.......................... 88

4.32 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่า100% มอดุลัส.......................... 89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด……………………	89
4.34 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อความแข็งแรงต่อการฉีกขาด…………………………	90
4.35 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าการเสียรูปหลังการกดอัด…………………….....	91
4.36 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความต้านทานต่อการขัดถู………………………	91
4.37 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งกด………………………………………	92
4.38 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่ามอดุลัสสะสม………………………………………	93
4.39 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่า tan δ……………………………………………	93
4.40 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความร้อนสะสม………………………………………	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

CV	ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization system)
Semi-EV	ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization system)
EV	ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization system)
phr	parts per hundred of rubber
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
Si-69	Bis-triethoxysilylpropyl tetrasulfide, TESPT
Si-264	3-Thiocyanatopropyl-triethoxy silane, TCPTS
Ultrasil VN2	ซิลิกาซึ่งมีพื้นที่ผิว 125 m^2/g
Ultrasil VN3	ซิลิกาซึ่งมีพื้นที่ผิว 175 m^2/g
TMTM	Tetramethylthiuram monosulfide
TBBS	N-t-butyl-2-benzothiazole sulfenamide
PEG	Poly(ethylene glycol)
t_{S2}	เวลาในการเริ่มสุกตัวของยาง (Scorch time) เป็นเวลาที่ใช้ในการคงรูปจนกระทั่งแรงบิดเพิ่มขึ้น 2 ปอนด์-นิ้ว เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด
t_{C90}	เวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม (Cure time) คือ เวลาจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการคงรูป 90 เปอร์เซ็นต์
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)
DMTA	เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical thermal analyser)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เนื่องจากในประเทศไทยมีการปลูกยางพาราเป็นจำนวนมาก และมีการแปรรูปเป็นยางแผ่นดิบซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของประเทศ แต่ราคาของยางดิบนั้นค่อนข้างต่ำจึงมีความพยายามแปรรูปยางดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่ามากขึ้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมักนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น รองเท้า ถุงมือ ถุงน้ำร้อน ชิ้นส่วนรถยนต์ ยางล้อรถยนต์ ฯลฯ โดยปกติในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้งานในทางวิศวกรรมนั้นจะต้องมีการเติมสารเติมแต่ง (Additives) ต่างๆ ลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางประการของยางให้เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ ซึ่งสารตัวเติมเสริมแรงที่นิยมใช้ ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) เนื่องจากมีราคาถูกสามารถหาได้ง่าย และยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางคงรูปได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม เขม่าดำก็มีข้อเสีย คือ นอกจากจะทำให้ยางมีสีดำแล้ว ในกรณีที่ใช้เป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางล้อรถยนต์เขม่าดำจะทำให้ยางล้อมีค่าความต้านทานต่อการหมุน (Rolling resistance) สูง[1-3] ทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงาน ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีความพยายามศึกษาเพื่อหาสารตัวเติมเสริมแรงตัวอื่นๆ เพื่อใช้แทนเขม่าดำในการปรับปรุงสมบัติดังกล่าว จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่น ๆ ซิลิกามีลักษณะเป็นผงสีขาวและมีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เนื่องจากซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็กจึงสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของยางได้ เช่น ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ความต้านทานต่อการหมุน ความร้อนสะสม (Heat buildup) และสมบัติเชิงพลวัต[1-10] ซึ่งการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในยางนั้นมักใช้ร่วมกับสารคู่ควบ (Coupling agent) เพื่อช่วยเชื่อมพันธะระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้เพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัฏภาค ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น และสารคู่ควบที่นิยมใช้คู่กับซิลิกา ได้แก่ สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent)[1,5,6]

งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาผลของระบบการคงรูป และชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา โดยได้ทำการศึกษาในระบบการคงรูปทั้ง 3 ระบบ ได้แก่ ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization system, CV) ระบบการคงรูปกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization system, Semi-EV) และระบบการคงรูปประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization system, EV) ส่วนสารคู่ควบไซเลน 2 ชนิดที่นำมาใช้ในการศึกษา คือ Si-69 (Bis-triethoxysilylpropyl tetrasulfide, TESPT) และ Si-264 (3-Thiocyanatopropyl-triethoxy silane, TCPTS) นอกจากนี้ ยังได้มีการศึกษาผลของชนิดของซิลิกาต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติในขบวนการผลิตและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติอีกด้วย โดยซิลิกาที่นำมาใช้ในการศึกษามี 2 ชนิด คือ ซิลิกา Ultrasil ® VN2 และ ซิลิกา Ultrasil® VN3

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษาผลของระบบการคงรูป ผลของชนิดและปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตของยางธรรมชาติที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการผสมยางธรรมชาติที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ 40 phr โดยทำการศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น ความหนืดมูนนี่ ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด เป็นต้น ปัจจัยที่ศึกษามีดังนี้

1. ศึกษาผลของระบบการคงรูป 3 ระบบ คือ ระบบคงรูปแบบดั้งเดิม (Conventional vulcanization system, CV) ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-efficient vulcanization system, Semi-EV) และระบบคงรูปแบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanization system, EV)
2. ศึกษาผลของชนิดและปริมาณของสารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด คือ Si-69 และ Si-264
3. ศึกษาผลของซิลิกา 2 ชนิดซึ่งมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิต่างกัน คือ Ultrasil® VN2 และ Ultrasil® VN3

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการเลือกใช้ชนิดของซิลิกาและสารคู่ควบไซเลนที่เหมาะสมกับยางธรรมชาติที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรง

2. เข้าใจถึงอิทธิพลของระบบการคงรูปต่อประสิทธิภาพในการทำงานของสารคู่ควบไซเลนแต่ละชนิด

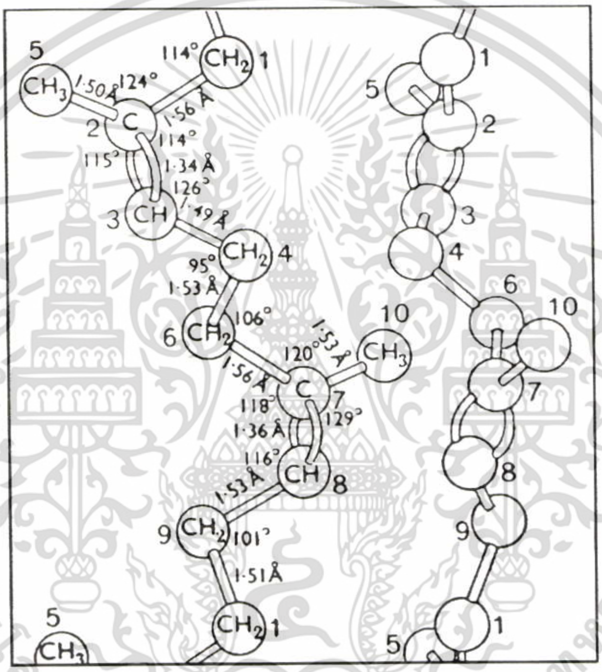
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) โดยทั่วไป 99 เปอร์เซ็นต์ประกอบด้วย ซีส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 Polyisoprene, PI) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงยาว มีหน่วยซ้ำ ๆ กันคือ ไอโซพรีน (C_5H_8) มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 200,000-400,000 หรือ 3,000-5,000 หน่วยไอโซพรีน โครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโมเลกุลยางธรรมชาติ[11]

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีพันธะคู่อยู่ในทุก ๆ หน่วยไอโซพรีน จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย โดยทั่วไป พบว่ายางธรรมชาติสามารถถูกทำให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูปร่างแหสามมิติได้ด้วยกำมะถัน ทำให้ยางธรรมชาติที่ปกติมีความเหนียว ยืดหยุ่น ไม่คงรูป กลายเป็นยางคงรูปที่มีความแข็งและความแข็งแรงสูงขึ้น[12] นอกจากจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับกำมะถันแล้วพันธะคู่ในยางธรรมชาติยังสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับออกซิเจนหรือโอโซนในอากาศ ซึ่งจะทำให้ยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การบดยาง

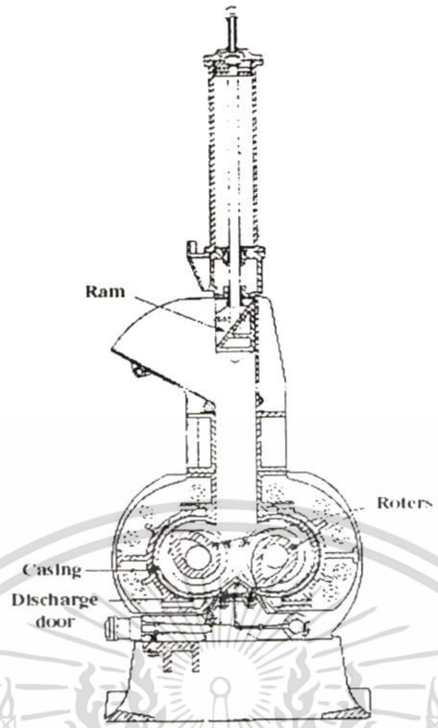
การบดยาง (Mastication) คือ การให้แรงเฉือนกับยางก่อนทำการผสม โดยทั่วไป ขั้นตอนการบดยางมีความจำเป็นสำหรับการผสมยางธรรมชาติเท่านั้น เพราะยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางมีความหนืดสูงมาก องค์ประกอบต่าง ๆ ก็จะผสมเข้ากับยางได้ยาก จึงต้องทำการบดยางให้มีความหนืดลดลง (ยางอ่อนลงและไหลได้มากขึ้น) ก่อนที่จะทำการเติมสารอื่น ๆ ลงไป ขั้นตอนการบดยางไม่ค่อยมีบทบาทสำคัญในการผสมยางสังเคราะห์ เพราะยางสังเคราะห์มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดเริ่มต้นไม่สูงมากนัก จึงผสมเข้ากับองค์ประกอบต่าง ๆ ได้ง่ายกว่า ในการผสมยางถ้าเติมสารเติมแต่งลงไปเลยโดยไม่มีการบดยางก่อน ก็จะส่งผลทำให้ความหนืดเริ่มต้นในการผสมสูงเกินไป สารเติมแต่งต่าง ๆ ที่เติมลงไปก็จะกระจายตัวได้ไม่ทั่วถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการผสมมากก็ตาม เมื่อผสมเสร็จแล้วจะสังเกตเห็นเศษของสารตัวเติมแยกออกจากยางผสมอย่างชัดเจน แต่ถ้ามีการบดยางก่อนประมาณ 1-2 นาที (แล้วแต่ชนิดของยาง) จะทำให้ความหนืดเริ่มต้นในการผสมไม่สูงเกินไป ส่งผลทำให้สารเติมแต่งต่าง ๆ ที่เติมลงไปสามารถเข้าและกระจายตัวในยางได้อย่างทั่วถึงและใช้เวลาในการผสมไม่นานมาก[13]

2.3 การผสมยาง

การผสมยาง คือ กระบวนการผสมยางดิบกับสารเติมแต่งต่าง ๆ การผสมที่ดีจะทำให้สารเติมแต่งต่าง ๆ ที่เติมลงไปแตกตัวและกระจายตัวในยางได้อย่างทั่วถึง เมื่อผสมเสร็จแล้วยางผสมจะเข้าเป็นเนื้อเดียวกันถือว่าการผสมนั้นสมบูรณ์ จะทำให้สมบัติของยางผสมในแต่ละจุดเหมือนกัน และการผสมที่ดีจะต้องไม่ทำให้เกิดการคงรูปก่อนเวลา ซึ่งจะทำให้สมบัติของยางไม่เป็นไปตามต้องการ นอกจากนี้ ลำดับการเติมสารเติมแต่งและเทคนิคในการผสมก็ยังมีผลต่อสมบัติของยางเช่นกัน[14]

เครื่องผสมที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางมีหลายชนิด เช่น เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และ เครื่องผสมแบบปิดชนิดแบนบูรี (Banbury mixer) เป็นต้น เครื่องผสมแบบปิดมีข้อดี คือ สามารถควบคุมการฟุ้งกระจายของสารเติมแต่งต่าง ๆ ได้ดี และใช้เวลาในการผสมน้อยกว่าเครื่องผสมแบบเปิด ปัจจุบันเครื่องผสมแบบปิดได้มีการพัฒนาการออกแบบโรเตอร์ รวมทั้งลักษณะการหมุนให้เหมาะกับการผสมการใช้งานที่ต่างกันไป[15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 เครื่องผสมแบบปิด[16]

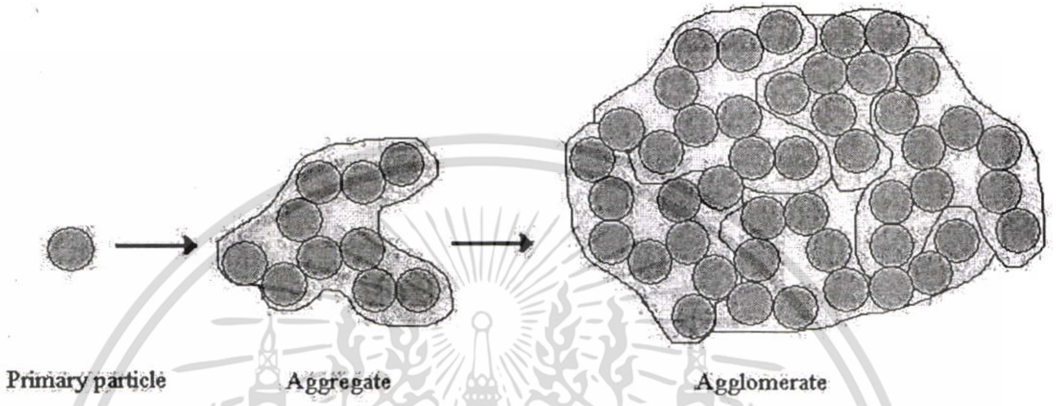
2.4 กลไกการผสม

กลไกการผสมสารเคมีลงไปในยางก็เพื่อให้สารเคมีที่เป็นองค์ประกอบต่าง ๆ ผสมเข้าไปในยางได้อย่างทั่วถึงและกระจายตัวในยางได้ดี สารเคมีที่มักเติมลงในยางคือ สารตัวเติม ดังนั้นการผสมยางส่วนใหญ่จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะให้สารตัวเติมกระจายตัวและแตกตัวได้ดี โดยเฉพาะสารตัวเติมเสริมแรง เช่น เขม่าดำ และซิลิกา เพราะสารตัวเติมเหล่านี้มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กมาก (มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง) ทำให้แตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยาก ดังนั้นเมื่อสารตัวเติมเหล่านี้แตกตัวและกระจายตัวได้ดี สารเคมีตัวอื่น ๆ ก็จะสามารถกระจายตัวได้ดีตามไปด้วย เนื่องจากสารตัวเติมเสริมแรงมักจะชอบอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็ก เรียกกลุ่มก้อนขนาดเล็กนี้ว่า แอกกรีเกต (Aggregate) โดยที่ แอกกรีเกต 1 ก้อนจะเกิดจากอนุภาคปฐมภูมิหลาย ๆ อนุภาคมาอยู่รวมกันด้วยพันธะทางเคมีที่แข็งแรง หรือเกิดการหลอมรวมกันที่บริเวณพื้นผิวของอนุภาคปฐมภูมิ นอกจากนั้นกลุ่มก้อนขนาดเล็กหลาย ๆ ก้อนมาเกาะกันอยู่อย่างหลวม ๆ ด้วยแรง Van der waal's เป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า แอกโกลเมอเรต (Agglomerate) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการผสมยางกับสารตัวเติมเสริมแรง (รวมถึงสารตัวเติมและสารเคมีอื่น ๆ) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้[17-18]

1) การเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติม (Incorporation หรือ Wetting)
2) การกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง (Distribution)
3) การแตกตัวของสารตัวเติม (Dispersion)

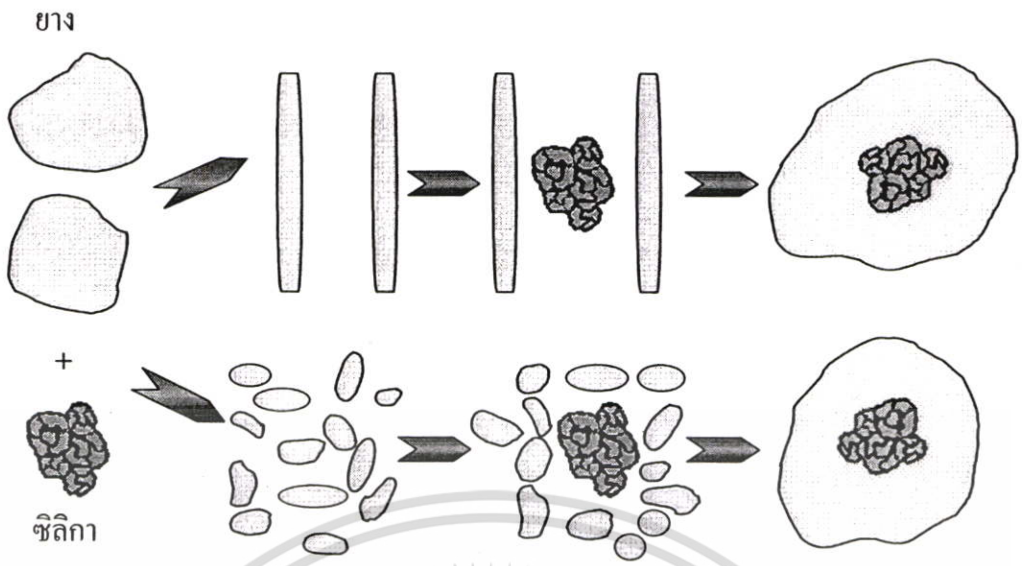


รูปที่ 2.3 แบบจำลองลักษณะของสารตัวเติมเสริมแรง[19]

2.4.1 การเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติม

การเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติม (Incorporation หรือ Wetting) เมื่อยางถูกบดจนมีค่าความหนืดต่ำลงเพียงพอที่จะรับสารตัวเติม จึงเริ่มผสมสารตัวเติมต่าง ๆ ลงไป โดยที่สารตัวเติมที่เติมลงไปนี้จะเข้าไปรวมกับยางโดยผ่านกลไก 2 แบบคือ กลไกที่ 1 ยางที่ได้แรงเฉือนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม ทำให้พื้นที่ผิวของยางที่จะสัมผัสและโอบล้อมสารตัวเติมสูงขึ้น และเมื่อแรงเฉือนที่มากระทำกับยางหมดไปยางก็จะคืนตัวและโอบล้อมเอาสารตัวเติมไว้ภายในยาง ส่วนในกลไกที่ 2 ยางชิ้นขนาดใหญ่ที่ได้รับแรงเฉือนสูง ๆ เกิดการฉีกขาด ได้เป็นยางชิ้นที่มีขนาดเล็กลง จากนั้นยางชิ้นเล็ก ๆ เหล่านี้ก็จะเข้าไปผสมกับสารตัวเติมและโอบล้อมเอาสารตัวเติมไว้ภายในยางเช่นกัน กลไกแบบแรกเป็นกลไกในระดับมหภาคจึงสามารถสังเกตเห็นได้โดยง่าย แต่กลไกแบบหลังเป็นกลไกในระดับจุลภาคจึงไม่สามารถสังเกตเห็นได้

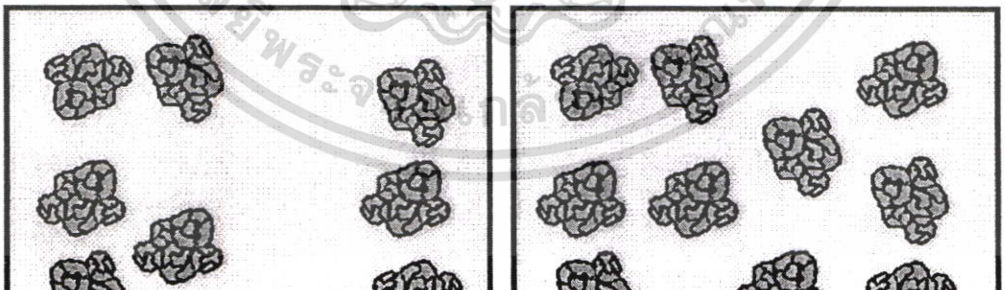
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 กลไกการเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติม ทั้ง 2 แบบ

2.4.2 การกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง

การกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง (Distribution) คือกระบวนการที่ทำให้สารตัวเติมที่ถูกโอบล้อมโดยยางกระจายตัวในเนื้อยางได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาการผสม ในกรณีที่กระบวนการกระจายตัวของสารตัวเติมในยางเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ยางคอมพาวด์ที่ได้มีสมบัติไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยางคอมพาวด์ดังกล่าวมีคุณภาพไม่คงที่



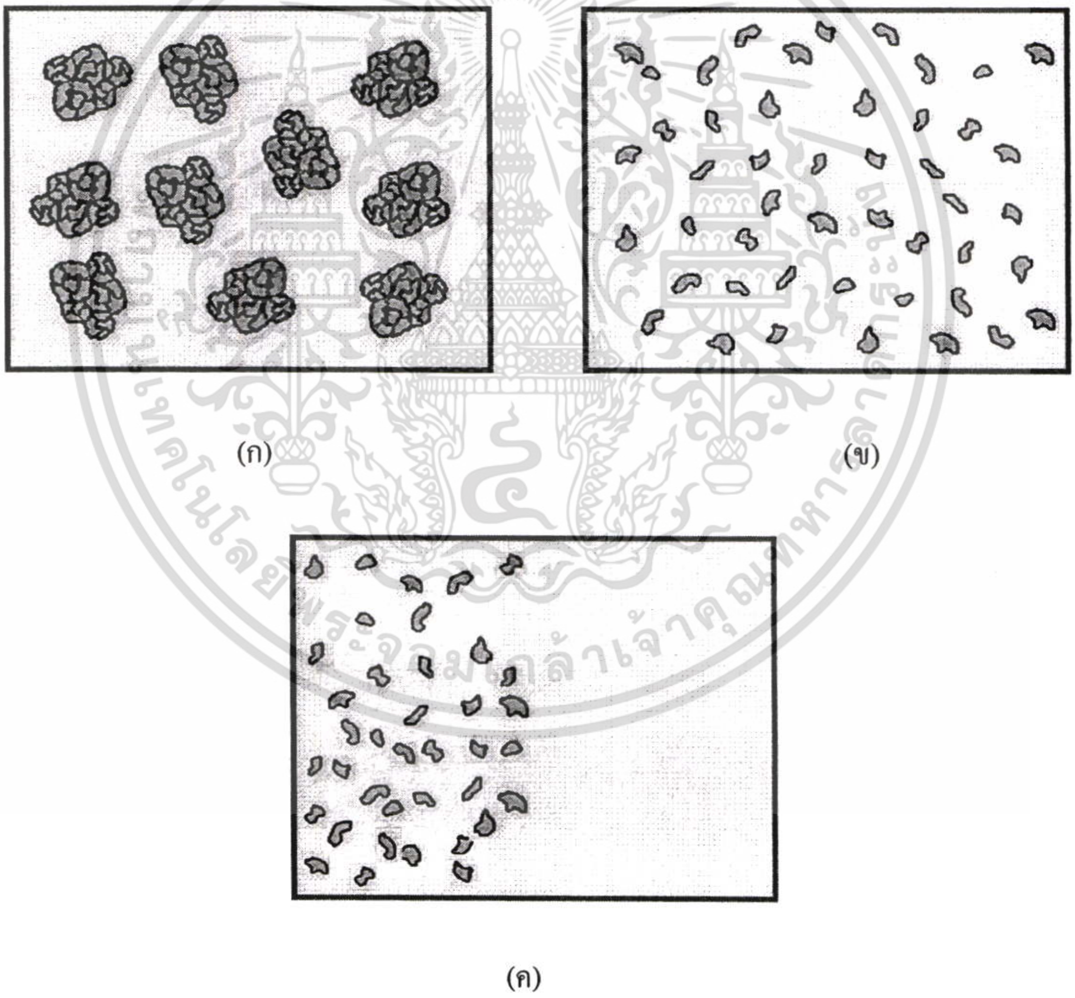
(ก) (ข)

รูปที่ 2.5 ลักษณะการผสม (ก) แบบการกระจายตัวที่ไม่ดี และ (ข) แบบการกระจายตัวที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 การแตกตัวของสารตัวเติม

การแตกตัวของสารตัวเติม (Dispersion) เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมากในการผสมสารตัวเติมให้เข้ากับยาง โดยสารตัวเติมที่อยู่ในรูปของแอกโกลเมอเรตขนาดใหญ่ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยยางเมื่อถูกแรงเฉือนจะค่อย ๆ แตกออกเป็นแอกโกลเมอเรตที่มีขนาดเล็กลง จากนั้นแอกโกลเมอเรตขนาดเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ก็จะกระจายตัวไปในเนื้อยางโดยกระบวนการกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง และเมื่อการผสมดำเนินต่อไปจะมีแรงเฉือนมากระทำกับแอกโกลเมอเรตขนาดเล็กเหล่านี้อยู่เรื่อย ๆ ก็สามารถแตกตัวต่อไปจนได้เป็นแอกกรีเกต ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของสารตัวเติมที่ได้จากการผสม ในขั้นนี้จะถือว่าการผสมเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ กระบวนการแตกตัวจะเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อกระบวนการการเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติมเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ และกระบวนการนี้มักเกิดขึ้นพร้อม ๆ กับกระบวนการกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง



รูปที่ 2.6 ลักษณะการผสม (ก) แบบการกระจายตัวที่ดีแต่ไม่มีการแตกตัว และ (ข) แบบการกระจายตัวและการแตกตัวที่ดี (ค) แบบการกระจายตัวไม่ดีแต่การแตกตัวที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้สารตัวเติมแตกตัวเป็นหน่วยที่เล็กลงมีความสำคัญมากต่อสมบัติของยางคอมพาวด์โดยเฉพาะยางที่มีเขม่าดำและซิลิกาเป็นสารตัวเติม เพราะถ้าหากการแตกตัวเกิดขึ้นได้ไม่ดี (อาจเนื่องจากสภาวะการผสมไม่ดีพอ เช่น ใช้ระยะเวลาในการผสมน้อยไปหรือแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในเครื่องผสมมีค่าต่ำเกินไป ฯลฯ) จะส่งผลเสียโดยตรงต่อสมบัติของยางที่ได้ กล่าวคือ ยางคอมพาวด์จะมีความหนืดสูง และยางคงรูปที่ได้จะมีค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด และความต้านทานการสึกหรอต่ำ เป็นต้น

2.5 การคงรูปยาง

การคงรูป (Vulcanization) หรือการเชื่อมโยง (Crosslink) เป็นสิ่งที่จำเป็นมากในกระบวนการผลิตขึ้นรูปยาง เนื่องจากยางที่ยังไม่ผ่านการคงรูปจะไม่คงรูป ไหลได้ และเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระทำ ซึ่งไม่เหมาะในการนำยางไปใช้ประโยชน์ ในการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์จำเป็นต้องทำให้ยางเกิดการคงรูป หรือบางครั้งเรียกว่าการทำให้ยางสุกตัว (Curing) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างยางจากสายโซ่ตรง เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ หรือเทอร์โมเซต (Thermosets) ยางจะมีสมบัติดีขึ้นคือเปลี่ยนจากวัสดุที่อ่อนนิ่มไหลได้ มีความยืดหยุ่นต่ำและไม่แข็งแรงกลายเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีเสถียรภาพต่อรูปร่างและสามารถทนทานต่อความร้อนได้ดีขึ้นอีกด้วย ซึ่งการเปลี่ยนโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลของยางธรรมชาตินี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ยางที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยาคงรูปจะสามารถละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม แต่ถ้าเป็นยางที่เกิดการคงรูปแล้วจะไม่ถูกละลายด้วยตัวทำละลายจะเกิดเพียงแค่การบวมตัว (Swelling) เท่านั้น

การคงรูปสามารถทำได้โดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปซึ่งเรียกว่า "สารทำให้ยางคงรูปหรือสารเชื่อมโยง" เช่น กำมะถัน สารประกอบเปอร์ออกไซด์ (Peroxide compound)[20] หรือสารประกอบออกไซด์ของโลหะบางชนิด โดยกำมะถันจัดเป็นสารทำให้ยางคงรูปที่นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมเพราะมีราคาถูก สามารถหาได้ง่ายและยังให้ประสิทธิภาพในการคงรูปสูงอีกด้วย โดยมักใช้ควบคู่กับสารเร่งปฏิกิริยาคงรูปและสารกระตุ้นปฏิกิริยาคงรูป เพื่อให้เกิดการคงรูปที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

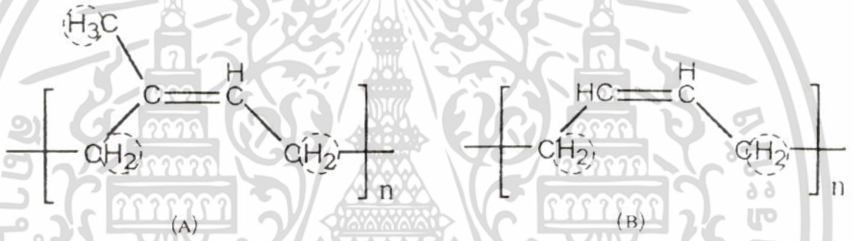
เมื่อเกิดการคงรูป สมบัติเชิงกลและสมบัติต่าง ๆ ของยางจะเปลี่ยนแปลงไปในแนวทางที่ดีขึ้น กล่าวคือ ยางคงรูปจะมีสมบัติเหล่านี้สูงขึ้น คือ ความแข็งแรงการดึง (Tensile strength) ความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) มอดุลัส (Modulus) ความยืดหยุ่น (Elasticity) ความเสถียรต่อรูปร่าง ความทนทานต่อตัวทำละลาย ความทนทานต่อความร้อนอีกทั้งยังทำให้ยางมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ส่วนสมบัติอื่น ๆ เช่น ฮีสเตอรีซีส (Hysteresis) การเสียรูปภายหลังการกดอัด (Compression set) และความเหนียวติด (Tack) จะมีค่าลดลง[15,29,30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 การคงรูปด้วยกำมะถัน

การคงรูปสามารถทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมที่สุดคือการใช้กำมะถันเป็นสารทำให้ยางคงรูป เนื่องจากกำมะถันมีราคาถูกสามารถละลายได้ดีในยาง ส่วนมากนิยมใช้กับยางไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่จำนวนมาก เช่น ยางธรรมชาติ (NR) ยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR) และยางบิวตะไดอีน (BR) ฯลฯ โดยทั่วไปนิยมใช้กำมะถันร่วมกับสารเร่งปฏิกิริยาคงรูปและสารกระตุ้นปฏิกิริยาคงรูป ได้แก่ กรดสเตียริกและซิงค์ออกไซด์ (Stearic acid/ZnO) โดยปกติจะใส่กำมะถันในขั้นตอนหลังสุดของการผสมเพื่อป้องกันการสุกตัวก่อนกำหนด ยกเว้นยางไนไตรล์ ซึ่งการกระจายตัวของกำมะถันไม่ดีจึงต้องใส่กำมะถันตั้งแต่เริ่มต้นแทน

กำมะถันสามารถเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้ดีกับยางที่ไม่อิ่มตัวมีพันธะคู่และมีอะตอมของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งอัลไลลิก (Allylic hydrogen) หรือตำแหน่งคาร์บอนที่ถัดจากตำแหน่งพันธะคู่ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ยางที่มีไฮโดรเจนในตำแหน่งอัลไลลิกมากก็จะมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปสูงกว่ายางที่มีไฮโดรเจนในตำแหน่งอะไลลิกน้อย

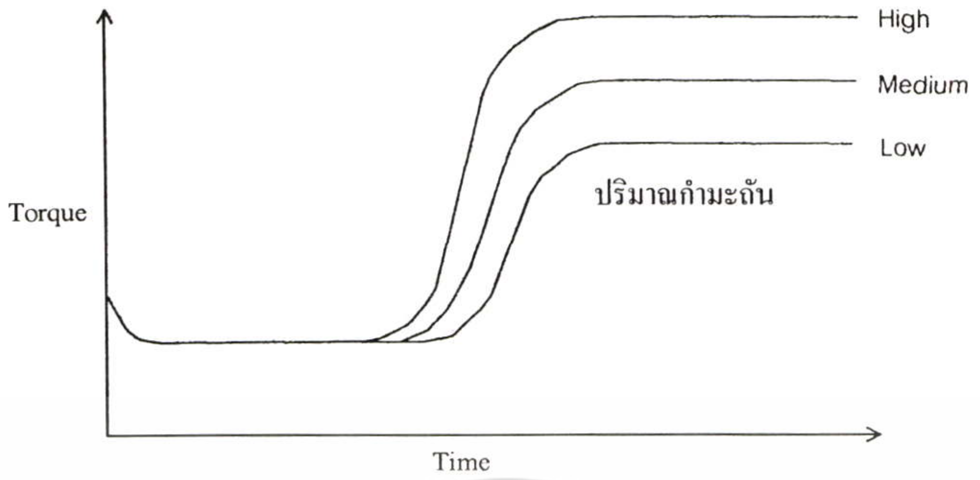


รูปที่ 2.7 โครงสร้างโมเลกุลของยางเพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งและปริมาณของ Allylic hydrogen (เส้นปะ) (A) ยางธรรมชาติ (B) ยางบิวตะไดอีน

2.5.2 ผลของการเพิ่มปริมาณกำมะถัน

การเพิ่มปริมาณของกำมะถันในการคงรูปยาง ส่งผลให้ยางมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น อีกทั้งยังทำให้ยางมีแนวโน้มที่จะเกิดการเชื่อมโยงผ่านพันธะแบบพอลิซัลฟิดิกมากขึ้นด้วย ซึ่งความหนาแน่นของการเชื่อมโยงนี้มีผลอย่างมากต่อสมบัติของยาง เช่น สมบัติเชิงกล การบวมตัว (Swelling) ในตัวทำละลาย เป็นต้น จากรูปที่ 2.8 เมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันจะส่งผลให้เวลาเริ่มการคงรูปหรือเวลาที่ยางเริ่มสุก (Scorch time) ลดลง และค่าความแข็งมอดุลัสเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

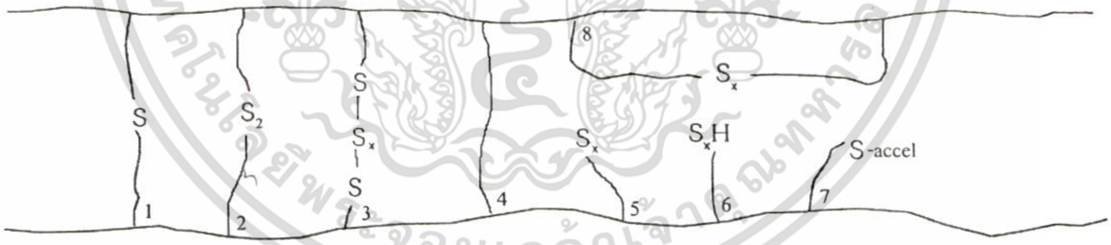
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ผลของปริมาณกำมะถันต่อลักษณะการคงรูปของยาง

2.5.3 ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) หรือ องศาการเชื่อมโยง (Degree of vulcanization) คือ ปริมาณการเกิดพันธะเชื่อมโยงในยางต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ซึ่งการคงรูปที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลหรือการเชื่อมโยงภายในสายโซ่โมเลกุลเดียวกันก็ได้ แต่การเชื่อมโยงที่มีผลสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของยางก็คือเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุล[21]



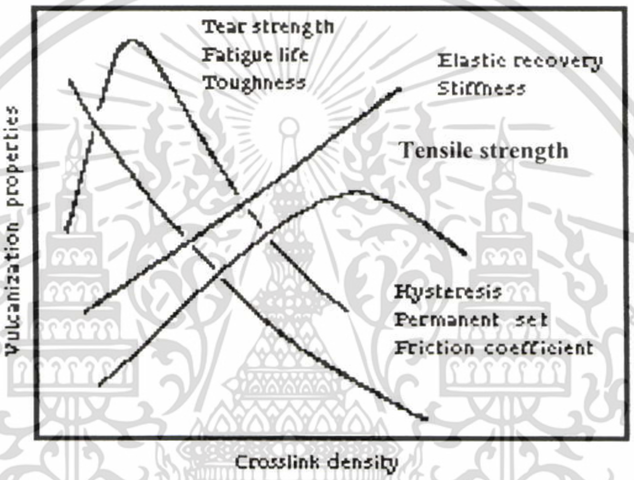
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของยางเมื่อทำการคงรูปด้วยกำมะถัน (1) มอนอซัลฟิดิก (2) ไดซัลฟิดิก (3) พอลิซัลฟิดิก (4) การคงรูปโดย C-C (5) สายโซ่ซัลเฟอร์ (6) สายโซ่ไทออล (7) กำมะถันที่เกิดพันธะกับตัวเร่งปฏิกิริยา (8) โครงสร้างแบบวง[22]

ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณของสารเชื่อมโยง ปริมาณของสารทำให้ยางคงรูป อัตราส่วนของสารเชื่อมโยงต่อสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป และเวลาในการคงรูป นอกจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงแล้ว ชนิดของพันธะเชื่อมโยงก็มีความสำคัญต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลของยางและความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่อสมบัติเชิงกลของยางดังแสดงในรูปที่ 2.10[22-24] พบว่าค่าความแข็งแรงดึงจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ตามความหนาแน่นของการเชื่อมโยงจนถึงจุดที่มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้ยางคงรูปมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด หลังจากนั้นถึงแม้ว่าจะเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยงอีก แต่ค่าความแข็งแรงดึงจะลดลง ซึ่งคล้ายกับสมบัติความแข็งแรงฉีกขาด ค่าความทนทานต่อการล้าตัว (Fatigue life) และความเหนียว (Toughness) ซึ่งสมบัติทั้ง 3 เหล่านี้ก็จะสูงขึ้นตามความหนาแน่นของการเชื่อมโยงจนกระทั่งถึงจุดสูงสุดก่อนที่สมบัติดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากนั้น



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและสมบัติเชิงกลของยาง[23,24]

ค่ามอดุลัส ค่าความแข็งกด และการคืนตัวแบบยืดหยุ่น (Elastic recovery) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ซึ่งต่างจากค่าฮีสเตอร์ไรซีส ค่าการเสียรูปถาวร (Permanent set) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient) ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 ชนิดของการเชื่อมโยงและผลของโครงสร้างของการเชื่อมโยงต่อสมบัติของยางคงรูป

การเกิดพันธะเชื่อมโยงโดยใช้กำมะถันเป็นสารทำให้ยางคงรูปสามารถเกิดพันธเชื่อมโยงได้หลายรูปแบบ คือ

1. **พันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมเดี่ยว หรือมอนอซัลฟิดิก (Monosulfidic)**
2. **พันธะเชื่อมโยงกำมะถันอะตอมคู่ หรือไดซัลฟิดิก (Disulfidic)**
3. **พันธะเชื่อมโยงกำมะถันหลายอะตอม หรือพอลิซัลฟิดิก (Polysulfidic)**

การคงรูปในยางโดยใช้กำมะถันเป็นสารทำให้ยางคงรูปนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบ โดยความแตกต่างของแต่ละระบบขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปริมาณกำมะถันต่อสารเร่งปฏิกิริยาคงรูป[25,26]

ตารางที่ 2.1 การจำแนกระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน[27]

ระบบการคงรูป	ปริมาณกำมะถัน :S (phr)	ปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยาคงรูป :A (phr)	A/S
ระบบปกติ (CV)	2.0-3.5	0.4-1.2	0.1-0.6
ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV)	1.0-1.7	1.2-2.5	0.7-2.5
ระบบประสิทธิภาพ (EV)	0.4-0.8	2.0-5.0	2.5-12

ระบบที่ใช้ปริมาณกำมะถันมากและใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาคงรูปน้อย คือ ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (CV) เมื่อเกิดการเชื่อมโยงแล้วจะได้พันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นพันธะแบบพอลิซัลฟิดิก ซึ่งหมายถึง พันธะเชื่อมโยงที่มีกำมะถันมากกว่าสองตัวอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของการเชื่อมโยง ($C-S_x-C$, เมื่อ x มีค่ามากกว่า 2)

ระบบต่อมาคือระบบที่ใช้ทั้งกำมะถันและสารเร่งปฏิกิริยาคงรูปในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน คือ ระบบการคงรูปกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) เมื่อเกิดการเชื่อมโยงแล้วจะได้พันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นมอนอฟิดิกและพันธะไดซัลฟิดิก ซึ่งหมายถึง พันธะเชื่อมโยงที่มีกำมะถันหนึ่งถึงสองตัวอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของการเชื่อมโยง (C-S-S-C)

ระบบสุดท้าย เป็นระบบที่มีการใช้ปริมาณกำมะถันน้อยมากแต่ใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปมาก เรียกว่า ระบบการคงรูปประสิทธิภาพ (EV) เมื่อเกิดการคงรูปแล้วจะได้พันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นพันธะมอนอซัลฟิดิก หมายถึง พันธะเชื่อมโยงที่มีกำมะถันตัวเดียวอยู่ในสายโซ่โมเลกุลของการเชื่อมโยง (C-S-C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างของการคงรูปกับสมบัติทางฟิสิกส์ของยางที่เชื่อมโยงในระบบต่าง ๆ[28]

	ระบบการคงรูป		
	ระบบดั้งเดิม (CV)	ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV)	ระบบประสิทธิภาพ (EV)
สัดส่วนพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกและไดซัลฟิดิก (%)	95	50	20
สัดส่วนพันธะเชื่อมโยงแบบมอนอซัลฟิดิก (%)	5	50	80
ความทนทานต่อความร้อน	ต่ำ	ปานกลาง	สูง
% การเสียรูปหลังการกดอัด 22 ช.ม. 70 °C	สูง	ปานกลาง	ต่ำ

จากตารางที่ 2.2 พบว่าการคงรูปทั้ง 3 ระบบ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงที่แตกต่างกัน ดังนั้นระบบการคงรูปจึงส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการทนทานต่อการเสื่อมสภาพ ทั้งนี้เนื่องจากพันธะการเชื่อมโยงแต่ละชนิดมีพลังงานพันธะหรือมีความแข็งแรงของพันธะที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าพลังงานพันธะของพันธะเชื่อมโยงต่าง ๆ[29]

ชนิดของพันธะเชื่อมโยง	พลังงานพันธะ (กิโลแคลอรี/โมล)
-C-C-	80
-C-S-C-	74
-C-S-S-C-	74
-C-S-S-S-C-	54
-C-S-S-S-S-C-	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5.1 สมบัติเชิงกล

สำหรับยางคงรูปที่มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเท่ากัน พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของยางที่มีพันธะเชื่อมโยงเป็นแบบพันธะพอลิซัลฟิดิก จะมีค่าสูงกว่ายางที่มีพันธะเชื่อมโยงเป็นแบบไดซัลฟิดิก และมอนอซัลฟิดิก ตามลำดับ[21]

ความยืดหยุ่น (Elastic behaviour) ที่อุณหภูมิห้องของยางคงรูปจะสูงตามความยาวของพันธะเชื่อมโยงนั่นคือยางที่มีพันธการเชื่อมโยงแบบพันธะพอลิซัลฟิดิกจะมีความยืดหยุ่นสูงกว่ายางที่มีพันธะการเชื่อมโยงแบบไดหรือมอนอซัลฟิดิก เพราะเมื่อความยาวของสายโซ่เพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น

การเสียรูปถาวร (Permanent set) มีแนวโน้มลดลงเมื่อพันธะเชื่อมโยงเป็นแบบพอลิซัลฟิดิกตามค่า x ของ $C\text{-}S_x\text{-}C$ ถ้า x มีค่ามาก ค่าการเสียรูปถาวรก็จะมีค่าต่ำลง ส่วนค่าความต้านทานต่อการขัดถูไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนักไม่ว่าการคงรูปจะเป็นแบบใด จากตารางที่ 2.4 พบว่าความแข็งแรงของพันธะ (C-C) มีความแข็งแรงมากกว่า (C-S) และ (S-S) ตามลำดับ ดังนั้นสามารถบอกได้ว่ายางที่เกิดการเชื่อมโยงผ่านพันธะมอนอซัลฟิดิกหรือไดซัลฟิดิกจะมีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่ายางที่เกิดการเชื่อมโยงผ่านพันธะพอลิซัลฟิดิก

นอกจากนี้ในระบบที่เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบสายโซ่สั้น ทำให้ยางมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดที่อุณหภูมิสูง (High temperature compression set) ต่ำ เนื่องจากยางมีความเสถียรทางความร้อนดี ซึ่งสมบัติที่อุณหภูมิสูงจะดีมากก็ต่อเมื่อ ค่า x ของ $C\text{-}S_x\text{-}C$ มีค่าน้อยหรือเท่ากับ 1

2.5.5.2 สมบัติเชิงพลวัต

นอกจากชนิดของการเชื่อมโยงจะมีผลสำคัญต่อสมบัติเชิงกลของยางแล้ว ยังส่งผลถึงสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) อีกด้วย โดยทั่วไปค่า Dynamic damping มีค่าที่ดีในยางที่เกิดมีการเชื่อมโยงเป็นแบบพันธะพอลิซัลฟิดิก (ให้ค่าต่ำกว่าในยางที่เกิดการคงรูปเป็นแบบพันธะไดซัลฟิดิกและมอนอซัลฟิดิก) เนื่องจากในยางที่เกิดการคงรูปเป็นแบบพันธะพอลิซัลฟิดิกจะมีระยะห่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่ยาวกว่า ทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเคลื่อนที่ในระดับอนุภาคแบบบาวด์เนียน (Micro-Brownian motion) ได้ง่ายกว่าจึงทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าต้องการทั้งสมบัติเชิงพลวัตที่ดี และทนทานต่ออุณหภูมิได้ดีด้วย ก็ควรเลือกใช้ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และระบบการคงรูปประสิทธิภาพ (EV) จะเหมาะสมกว่า

ค่าสัมประสิทธิ์การหมุน พบว่าขึ้นอยู่กับชนิดของการเชื่อมโยง คือในระบบที่มีชนิดของการเชื่อมโยงเป็นแบบมอนอซัลฟิดิกก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์การหมุนต่ำกว่าการเชื่อมโยงที่เป็นแบบพันธะพอลิซัลฟิดิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ ยังพบว่ายางคงรูปที่มีการเชื่อมโยงเป็นแบบพอลิซัลฟิดิกจะมีสมบัติความทนทานต่อความล้า (Fatigue life) สูงกว่ายางคงรูปที่มีการเชื่อมโยงเป็นแบบไดซัลฟิดิกและมอนอซัลฟิดิกตามลำดับ[30]

2.5.6 ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดพันธะการเชื่อมโยงแบบซัลฟิดิกชนิดต่าง ๆ

ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดพันธะการเชื่อมโยงแบบซัลฟิดิกชนิดต่าง ๆ ได้แก่

1. อัตราส่วนระหว่างปริมาณของกำมะถันต่อสารเร่งปฏิกิริยา (Sulfur/Accelerators ratio) พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างปริมาณของกำมะถันต่อสารเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิก
2. เวลาเชื่อมโยง (Cure time) ถ้ายิ่งใช้เวลาในการคงรูปนานขึ้นมีผลทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบมอนอซัลฟิดิกมากขึ้น[21,25] เนื่องจากยิ่งเมื่อใช้เวลาในการคงรูปมากขึ้น ก็ยิ่งทำให้กำมะถันสามารถแตกตัวต่อไปได้อีก จากพันธะการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกก็จะค่อย ๆ แตกตัวและเกิดการจัดรูปใหม่ (Rearrange) เป็นพันธะเชื่อมโยงแบบไดซัลฟิดิกและมอนอซัลฟิดิกในที่สุด

2.6 สารตัวเติมเสริมแรง

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางนั้น การเติมสารเติมแต่ง (Additives) ลงไปในยางเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพื่อปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของยางให้เหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการ ซึ่งชนิดและปริมาณของสารเคมีที่เติมลงไปก็จะมีผลโดยตรงต่อสมบัติของยาง สารตัวเติม (Fillers) ก็เป็นสารเติมแต่งสำคัญที่เติมลงไปในยางเพื่อลดต้นทุนเนื่องจากมีราคาถูก นอกจากนี้ยังมีสารตัวเติมบางชนิดที่สามารถทำหน้าที่ช่วยเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยาง ซึ่งการเติมสารตัวเติมเสริมแรงลงไปสามารถทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้นมาก

2.6.1 สารตัวเติมเสริมแรงสำหรับยาง

สารตัวเติมเสริมแรง หมายถึง สารตัวเติมที่เมื่อเติมลงไปในยางแล้วสามารถช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงต่าง ๆให้กับคงรูป เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความต้านทานต่อการขัดถู ค่าความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งกด ส่วนสมบัติอื่น ๆ เช่น เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และสมบัติการกระเด้ง (Rebound) จะด้อยลง

สารตัวเติมเสริมแรงที่เป็นที่รู้จักกันและนิยมใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) และ ซิลิกา (Silica) ซึ่งสารตัวเติมทั้งสองชนิดนี้เป็นสารตัวเติมสารเสริมแรงที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับผลิตภัณฑ์ยางได้มากที่สุด ปัจจุบันเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำเสริมแรงให้แก่ยางได้ดี มีราคาถูก และสามารถผสมให้เข้ากับยางได้ง่าย อย่างไรก็ตาม เขม่าดำก็มีข้อจำกัดด้านการใช้งาน กล่าวคือ ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ภัณฑ์ที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมจะมีสีดำ ด้วยเหตุนี้ เขม่าดำจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภทที่ต้องการทั้งสมบัติที่ดีและความมีสีสรรในตัว ซึ่งในกรณีนี้การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมแทนเขม่าดำจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้

2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสริมแรง

ความสามารถในการเสริมแรงของสารตัวเติมเสริมแรงขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญหลายอย่างดังต่อไปนี้[21, 31]

1. ขนาดอนุภาคปฐมภูมิ (Primary particle size) หรือพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีผลต่อการเสริมแรง เพราะในการเสริมแรงถ้าสารตัวเติมเสริมแรงมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากก็จะยิ่งเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างยางได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่อใช้สารเสริมแรงที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะทำให้สมบัติต่าง ๆ ของยาง เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความต้านทานต่อการขัดถู ค่าความแข็งแรงฉีกขาด ความแข็งกดสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ในทางตรงกันข้ามเมื่อขนาดอนุภาคยิ่งเล็กมากการแตกตัวเมื่อทำการผสมก็จะยากตามไปด้วย ซึ่งถ้าการแตกตัวในการผสมไม่ดีพอ ก็จะส่งผลทำให้สมบัติต่าง ๆ ลดลงได้เช่นกัน

2. โครงสร้างของสารตัวเติม (Filler structure) หมายถึง ลักษณะการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน (แอกกรีเกต) ของอนุภาคปฐมภูมิ ในสารตัวเติมเสริมแรงที่มีโครงสร้างแบบสูง (High structure) มักจะมีรูปทรงไม่แน่นอน (Irregularity) ทำให้มีปริมาตรช่องว่าง (Void volume) สูง ส่งผลให้ยางสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในสารตัวเติมได้มากกว่าสารตัวเติมที่มีโครงสร้างน้อย (Low structure) โครงสร้างของสารตัวเติมเสริมแรงนี้มีผลอย่างมากต่อกระบวนการผลิตมากกว่าสมบัติของยางคงรูป แต่ก็พบว่าในสารตัวเติมที่มีโครงสร้างแบบสูงจะช่วยเพิ่มค่ามอดุลัส (Modulus) ส่วนค่าความแข็งแรงอื่น ๆ ไม่ค่อยมีผลมากนัก

3. เคมีพื้นผิว (Surface chemistry) หรือหมู่ฟังก์ชัน (Functional groups) โดยปกติแล้วเคมีพื้นผิวหรือหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของสารตัวเติมเสริมแรงมีมากมายหลายชนิด เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl) หมู่ควินโนน (Quinone) และหมู่แลคโตน (Lactone) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันแต่ละชนิดก็จะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีแตกต่างกัน หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อกิ่ง (Grafting) ทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสารตัวเติมเสริมแรงกับสายโซ่โมเลกุลของยาง ระหว่างการผสม (Compounding) เนื่องจากการผสมมีแรงเฉือนสูง ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยาง เกิดเป็นอนุมูลอิสระซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของสารตัวเติมได้ หรืออาจเกิดระหว่างการคงรูปหรือระหว่างการขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
61039

2.6.3 อันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติม

อันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคของสารตัวเติม (Rubber-filler interaction) มีผลโดยตรงต่อสมบัติทั้งของยางคอมพาวด์และยางคงรูป กล่าวคือถ้ามีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยางสูงจะทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มมากกว่ายางที่มีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับยางต่ำ

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของอันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติมเสริมแรง[32] โดยใช้วิธีการหายางบาวด์[33] ซึ่งยางบาวด์ คือส่วนของยางคอมพาวด์ที่ติดอยู่กับอนุภาคของสารตัวเติมเสริมแรงที่ไม่สามารถละลายออกมากับตัวทำละลายที่ดีได้ เนื่องจากมีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมเสริมแรง ปริมาณของยางบาวด์มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวจำเพาะและความว่องไวของพื้นผิวของสารตัวเติมเสริมแรง กล่าวคือ สารตัวเติมเสริมแรงที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กก็มีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก ปริมาณของยางบาวด์ก็จะมากขึ้นด้วย ส่งผลทำให้สารตัวเติมชนิดนั้น ๆ เสริมแรงได้ดีขึ้น

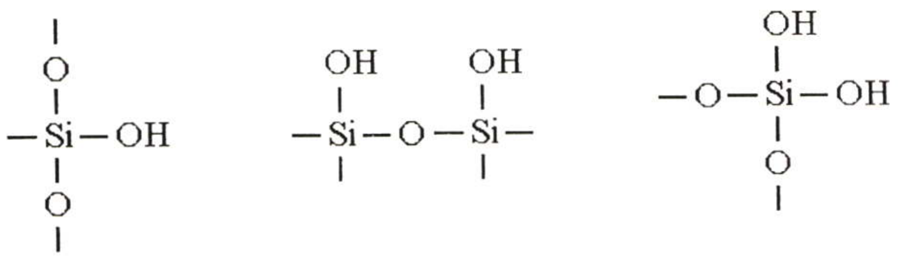
2.7 ซิลิกา

ซิลิกาจัดเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวเติมเสริมแรงสีไม่ดำอื่น ๆ โดยซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ความสามารถในการเสริมแรงของซิลิกาขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคปฐมภูมิ ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กจะช่วยเสริมแรงในยางได้ดีขึ้น[1,7,34] จากงานวิจัยที่ผ่านมา[1] พบว่าซิลิกาสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยางคงรูป เช่น เพิ่มความต้านทานต่อการขัดถู เพิ่มความแข็งแรงฉีกขาด เพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) ลดความร้อนสะสม และยังลดฮีสเทอร์ริซีสอีกด้วย

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ได้จากธรรมชาติและสามารถสังเคราะห์ขึ้นเองได้ การเสริมแรงของซิลิกาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิว ปริมาณน้ำในโครงสร้าง (Extent of hydration) สมบัติทางกายภาพ การใช้สารคู่ควบร่วมกับซิลิกาช่วยเพิ่มความสามารถในการเสริมแรงในยาง เนื่องจากสารคู่ควบจะทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างส่วนของยางกับอนุภาคซิลิกา ทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้น

โดยทั่วไป ซิลิกาประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) และมีหมู่ไซลานอล (Silanol groups, -Si-OH) อยู่ที่บริเวณพื้นผิว ซึ่งหมู่ไซลานอลที่อยู่บนพื้นผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ ไอโซเลท (Isolate) วิซินอล (Vicinal) และเจมินอล (Geminal) ดังแสดงในรูปที่ 2.19[8,23] ปริมาณหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวมีผลโดยตรงต่อปริมาณน้ำที่สามารถเกาะติดบนพื้นผิว และยังมีผลต่อความเป็นกรดบนพื้นผิวของซิลิกาอีกด้วย เนื่องจากซิลิกามีความเป็นขั้ว (Polarity) หรือชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้สารตัวเติมเสริมแรงชนิดนี้สามารถเสริมแรงได้ดีในยางที่มีขั้ว เช่น ยางไนไตรล์ (NBR) ยางคลอโรพรีน (CR) มากกว่ายางที่ไม่มีขั้ว เช่น ยางธรรมชาติ (NR) และยางเอสบีอาร์ (SBR) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ไอโซเลท วิซินอล เจมินอล

รูปที่ 2.11 ชนิดของหมู่ไซลานอลบนผิวซิลิกา

2.7.1 ซิลิกาจากธรรมชาติหรือซิลิกาชนิดบด

ซิลิกาที่ได้จากธรรมชาติหรือซิลิกาชนิดบด (Ground silica) ได้จากการขุดจากเหมืองแล้วมาทำการบดให้มีขนาดเล็ก ซิลิกาชนิดนี้มีความเป็นผลึก โดยปกติมักใช้เติมลงไปในยางคอมพาวด์เพื่อลดต้นทุนเนื่องจากมีราคาถูกและยังสามารถช่วยเพิ่มสมบัติความทนทานต่อความร้อน (Heat resistance) ให้กับยาง ซิลิกาจากธรรมชาติสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 3 ชนิด

- ซิลิกาชนิดผลึก (Crystalline silica) คือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่อยู่ในรูปผลึกควอร์ทไซท์ (Quartzite) ซึ่งเป็นสินแร่ที่ขุดพบได้จากเหมืองแล้วทำการล้าง บด และแยกขนาด (ด้วยตะแกรงร่อนหรือลมเป่า) ซิลิกาชนิดนี้มีสิ่งเจือปนสูง มีพื้นที่ผิวที่เกิดจากการแตกหัก จึงมีความขรุขระและมีขอบของอนุภาคแหลมคม จึงทำให้มีสมบัติความเสียดทานสูง
- ซิลิกาผลึกเล็ก (Microcrystalline silica) บางครั้งอาจเรียกว่าคริปโตคริสเตอร์ไลน์ควอร์ซ (Cryptocrystalline quartz) หรือซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) สามารถผลิตได้โดยวิธีการบดเช่นเดียวกับซิลิกาชนิดผลึก แต่จะได้อนุภาคที่มีผิวเรียบ มีขอบอนุภาคกลมมน สามารถนำไปใช้ในการผลิตซิลิกาชนิดที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก (Ultrafine silica) ได้
- ซิลิกาไดอะโตเมเชียส (Diatomaceous silica) ผลิตได้จากไดอะโตไมต์ (Diatomite) ซึ่งเป็นหินอ่อนคล้ายชอล์คที่เกิดจากซากกระดูกฟอสซิลเรียกว่า ไดอะตอม (Diatom) สามารถผลิตได้โดยการบดและแยกได้โดยใช้ลมหมุน

2.7.2 ซิลิกาชนิดสังเคราะห์

ซิลิกาชนิดสังเคราะห์ (Synthetic silica) **มีลักษณะเป็นผงสีขาวขนาดเล็ก สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ ซิลิกาชนิดไอ** (Fumed silica) **ซิลิกาชนิดตกตะกอน** (Precipitated silica) **และซิลิกาชนิดเจล** (Gel silica) **แต่ชนิดที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางคือ ซิลิกาชนิดตกตะกอนซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายเกรด ซิลิกาชนิดตกตะกอนแต่ละเกรดจะแตกต่างกันที่ขนาดของอนุภาคปฐมภูมิหรือพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยทั่วไป ซิลิกาเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กหรือมีพื้นที่**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวจำเพาะสูงจะช่วยเสริมแรงให้แก่ยางได้ดีกว่าซิลิกาเกรดที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิใหญ่หรือมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ นอกจากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีปัจจัยสำคัญอีกอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเสริมแรงของซิลิกา นั่นคือ ลักษณะทางเคมีพื้นผิวของซิลิกา เพราะซิลิกาทุกเกรดที่นำมาใช้เป็นสารตัวเติมในยางล้วนแล้วแต่มีหมู่ไซลานอลอยู่ที่พื้นผิวในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไซลานอลนี้ค่อนข้างว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและมีความเป็นขั้วค่อนข้างสูง ซิลิกาจึงมีความเป็นขั้วสูง ทำให้เข้า (Compatible) กับยางชนิดต่าง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นยางที่ไม่มีขั้วหรือมีความเป็นขั้วค่อนข้างต่ำได้ยาก ด้วยเหตุนี้ เมื่อผสมลงไปในยางจึงทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกามีค่าค่อนข้างต่ำ ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาจึงด้อยกว่าเขม่าดำเมื่อเปรียบเทียบที่พื้นที่ผิวเท่ากัน

ซิลิกาชนิดตกตะกอนเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงสูงและมีราคาไม่แพงมาก มีสมบัติพิเศษคือ เมื่อผสมในยางจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงฉีกขาด ความต้านทานต่อการขัดถูและความแข็งกด เป็นต้น การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงร่วมกับเขม่าดำ พบว่าจะช่วยปรับปรุงค่าความแข็งแรงฉีกขาดและการยึดเกาะให้กับผลิตภัณฑ์ และยังทำให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติบางประการที่ดีกว่าการใช้เขม่าดำอย่างเดียว เช่น ความทนทานต่อความร้อนและความแข็งแรงฉีกขาด เป็นต้น

ซิลิกาชนิดตกตะกอนสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาในสภาวะของเหลว โดยซิลิกาชนิดนี้ได้จากการตกตะกอนของสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid solution) หรือของผสมของกรดเกลือแร่กับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งซิลิกาชนิดตกตะกอนนี้จะมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าซิลิกาชนิดไอ สมการการเตรียมซิลิกาชนิดตกตะกอนสามารถแสดงดังต่อไปนี้

$$Na_2.n.SiO_2 + H_2SO_4 \longrightarrow n.SiO_2 + Na_2SO_4 + H_2O$$

หรือ

$$Na_2.n.SiO_2 + CO_2 \longrightarrow n.SiO_2 + Na_2CO_3 + H_2O$$

$$Na_2CO_3 + HCl \longrightarrow 2NaCl + CO_2 + H_2O$$

สมบัติของซิลิกาชนิดนี้สามารถควบคุมได้จากความเข้มข้นของสารตั้งต้น อัตราการใส่สารตั้งต้น อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่าง ซิลิกาที่ได้จะถูกนำไปกรอง ล้างทำความสะอาด ทำให้แห้งแล้วบดให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ ซิลิกาชนิดตกตะกอนนี้จะมีปริมาณตะกอนของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) น้อยกว่า 94 เปอร์เซ็นต์และมีปริมาณความชื้นสูงประมาณ 3-9 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของซิลิกาชนิดต่าง ๆที่ได้จากการสังเคราะห์[12]

องค์ประกอบ	Fumed silica	Precipitated silica	Gel silica
SiO_2	> 98.3%	94.0%	99.6%
Al_2O_3	0.3-1.3%	-	0.06%
CaO	-	0.63%	0.08%
Na_2O	-	0-1.5%	0.10%
NaCl	-	1.7%	-
LiO	2%	5%	5.14%

ตารางที่ 2.5 สมบัติของซิลิกาชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการสังเคราะห์[12]

สมบัติ	Fumed silica	Precipitated silica	Gel silica
ขนาดอนุภาคปฐมภูมิ (ไมครอน)	0.007-0.04	0.01-0.30	-
ขนาดอนุภาคแอกกรีเกต (ไมครอน)	0.8	8-10	4-8
ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซ็นติเมตร)	2.2	2.0	2.2
พื้นที่ผิว, BET N_2 (ตารางเมตร/กรัม)	50-400	60-300	100-800
การดูดซับน้ำมัน (ลูกบาศก์เซ็นติเมตร/100 กรัม)	150-250	160-200	150-250
ความแข็งกด (Mohs)	6.5-7	6.5-7	6.5-7
ความชื้น (%)	<1.5	6.0	5.0
หมู่ไซลานอล (หมู่/ตารางนาโนเมตร)	2.4	1.5-10	4-10

ลักษณะโดยทั่วไปของซิลิกาชนิดตกตะกอน

- โครงสร้าง : ซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร ซิลิกาจะไม่อยู่อย่างเดี่ยว ๆ ในรูปของอนุภาคปฐมภูมิ แต่จะจับกลุ่มรวมกันเป็นก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกต (เช่นเดียวกับเขม่าดำ) เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary structure) ขึ้น ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม นอกจากนี้ แอกกรีเกตของซิลิกายังชอบจับกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่มากขึ้นเรียกว่าแอกโกลเมอเรต เกิดเป็นโครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary structure)

- พื้นที่ผิว : พื้นที่ผิวเป็นปัจจัยที่สำคัญในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเสริมแรงในยาง ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงและให้การเสริมแรงที่ดี เทคนิคที่นิยมใช้ในการวัดขนาดของพื้นที่ผิวทั้งหมด (Total surface area) ของสารตัวเติมคือเทคนิคการดูดซับไนโตรเจน หรือที่รู้จักกันดีว่าเทคนิค BET (พัฒนาขึ้นโดย Brunauer Emmett และ Teller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลักษณะทางเคมีของพื้นผิว : ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเป็นปัจจัยสำคัญอีกอย่างที่ควบคุม ระดับการเสริมแรงของซิลิกาเพราะลักษณะทางเคมีของพื้นผิวจะเป็นตัวบ่งชี้ระดับของอันตรกิริยา ระหว่างยางกับซิลิกา โดยทั่วไป บนพื้นผิวของซิลิกาจะประกอบด้วยหมู่ไซลานอล (Si-OH) ปกคลุมอยู่อย่างหนาแน่น (4 - 5 หมู่ต่อ 100 $Å^2$) ซึ่งหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกานี้จะเกาะอยู่ใน หลายลักษณะ หมู่ไซลานอลจะทำให้พื้นผิวซิลิกามีความเป็นกรดและมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หมู่ไซลานอลสามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีต่าง ๆ ที่มีอยู่ในยางคอมพาวด์ได้ เช่น สารคู่ควบไซเลน น้ำ หรือ ไกลคอล เป็นต้น

2.7.3 ปัญหาของการใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม

เนื่องจากบนพื้นผิวซิลิกามีหมู่ไซลานอลในปริมาณมาก ซึ่งหมู่ไซลานอลนี้จะทำให้อนุภาค ของซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกัน (Filler-filler interaction) สูง ซิลิกาจึงอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน ขนาดใหญ่อย่างเหนียวแน่น เพราะอันตรกิริยาหรือแรงดึงดูดที่ยึดกลุ่มก้อนซิลิกาเข้าด้วยกันคือ พันธะไฮโดรเจน (H-bonds) ซึ่งมีความแข็งแรงค่อนข้างมาก ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาจึงเกิดการแตกตัว (Disperse) และกระจายตัว (Distribute) ในยางได้ยากกว่าเขม่าดำ และในกรณีที่เติมซิลิกาลงไปใน ยางในปริมาณค่อนข้างมาก กลุ่มก้อนของซิลิกายังมีแนวโน้มที่จะดึงดูดกันเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย ได้ง่าย เรียกว่า "โครงสร้างตาข่ายของสารตัวเติม (Filler-filler network)" ซึ่งโครงสร้างที่แข็งแรงนี้ จะทำให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดสูง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปด้วยความยากลำบาก และทำ ให้สิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตมากยิ่งขึ้น การเติมสารเติมแต่งบางชนิดที่สามารถเข้าไปจับกับหมู่ ไซลานอลได้ง่ายลงไป จะช่วยทำให้กลุ่มก้อนของซิลิกาแตกตัวออกได้ง่ายยิ่งขึ้น ความหนืดของยาง คอมพาวด์จะลดลง ทำให้กระบวนการผสมและการขึ้นรูปเป็นไปได้ง่าย ตัวอย่างของสารเติมแต่งดัง กล่าว ได้แก่ Zinc octoate (3 phr) หรือ Hexamethylene tetramine (HEXA) (0.5phr) รวมถึงสารตัว เร่งปฏิกิริยาคงรูปในกลุ่มกัวนิดีน เช่น DPG หรือ DOTG เป็นต้น[6]

นอกจากนี้ หมู่ไซลานอลบนพื้นผิวซิลิกายังสามารถดูดความชื้นจากอากาศได้ดี ในสภาพ การเก็บรักษาโดยทั่วไปแล้ว ซิลิกาจะมีความชื้นประมาณ 4-7% (ปริมาณความชื้นสามารถเปลี่ยน แปลงได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชื้นของสิ่งแวดล้อม) ซึ่งความชื้นที่จับอยู่กับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิว ซิลิกานี้จะทำให้ซิลิกาแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยากขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ดี ความชื้นบางส่วน จะถูกไล่ออกไปในระหว่างกระบวนการผสมเคมียาง เพราะอุณหภูมิของยางในระหว่างการผสมเคมี จะสูงมาก (>100 $^{\circ}C$) ทำให้น้ำหรือความชื้นบางส่วนระเหยออกไป

ปัญหาสำคัญอีกอย่างที่มักพบเมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมคือปัญหาเรื่องอัตราเร็วในการเกิด ปฏิกิริยาการคงรูป ทั้งนี้เนื่องจากบนพื้นผิวซิลิกามีหมู่ไซลานอลที่สามารถดูดซับสารเร่งปฏิกิริยา คงรูปที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เช่น DPG หรือ DOTG รวมถึงสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสี (Zinc complex) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน ทำให้ในเนื้อยางมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารตัวเร่งหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีลดลง ระดับของการคงรูปจึงค่อนข้างต่ำ ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยางคงรูปที่ได้ โดยทั่วไป สามารถลดปัญหาดังกล่าวได้โดยการเติมสารประกอบในกลุ่ม Glycol เช่น Diethylene glycol (DEG) หรือ Poly(ethylene glycol) (PEG) หรืออาจเติมสารประกอบกลุ่มเอมีน เช่น Triethanolamine หรือ Hexamethylene tetramine ลงไป เพราะสารประกอบเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา ทำให้สารตัวเร่งหรือสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีที่ถูกดูดซับโดยหมู่ไซลานอลมีปริมาณลดลง ปฏิกิริยาคงรูปก็จะเกิดได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ การปรับลำดับการเติมสารเคมีลงไปในเครื่องผสม เช่น การเติม ZnO ลงไปในช่วงท้ายของการผสมจะช่วยลดปัญหาการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีได้ เช่นกัน

การเติมสารเคมีในกลุ่มดังกล่าวนอกจากจะช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปแล้ว ยังช่วยทำให้อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาลดลง (ช่วยให้โครงสร้างตติยภูมิของซิลิกาถูกทำลายได้ง่ายขึ้น) ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวได้ง่ายขึ้น ความหนืดของยางคอมพาวด์ก็จะลดลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น ปริมาณของสารเคมีดังกล่าวที่แนะนำให้ใช้นั้นจะขึ้นอยู่โดยตรงกับปริมาณของซิลิกา เช่น ใช้ PEG ประมาณ 8-10 ส่วนโดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับปริมาณของซิลิกา

2.8 สารคู่ควบไซเลน

2.8.1 สมบัติทั่วไป

สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agents) เช่น Oranofunctional silane ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติการยึดติดระหว่างเส้นใยแก้ว (Glass fiber) กับพอลิเมอร์หลากหลายชนิด และยังถูกใช้ในการปรับปรุงความสามารถในการเข้ากัน (Compatibility) ของ Siliceous fillers ในพวกเรซิน (Resin) และพอลิเมอร์

การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในยางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมจะช่วยทำให้ยางมีสมบัติต่าง ๆ ดีขึ้น จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาเกรด HS-200 และเขม่าดำเกรด N-285 ซึ่งมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน คือประมาณ 20-22 นาโนเมตร พบว่าเมื่อไม่ได้ใส่สารคู่ควบ Mercaptosilane ในยาง SBR ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงจะมีค่าความร้อนสะสมสูง ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดสูง ค่ามอดุลัสต่ำและค่าความต้านทานต่อการขัดถูต่ำกว่ายาง SBR ที่ใช้ผงเขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรง แต่ถ้ามีการเติม Merceptosilane ลงไปเพียง 1.5 phr หรือประมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักซิลิกาจะช่วยทำให้ค่าความร้อนสะสมและค่าการคงรูปแบบกดอัดต่ำลง ในขณะที่มีค่ามวดุลัสและค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้นใกล้เคียงกับเมื่อใช้เขม่าดำ[35,36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2. บทบาทของสารคู่ควบไซเลน

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาและลดปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตเมื่อใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือการใช้สารคู่ควบไซเลน โดยทั่วไปการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาสูงขึ้น เพราะสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมี 2 หมู่ที่แตกต่างกัน คือหมู่อัลคอกซี (Alkoxy group) เช่น หมู่เมทอกซี ($-OCH_3$) หรือ หมู่เอทอกซี ($-OC_2H_5$) และหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ (Organo-functional group) เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป หมู่อัลคอกซีซึ่งอยู่ที่ปลายด้านหนึ่งของโมเลกุลจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาในระหว่างกระบวนการผสมเกิดเป็นพันธะไซลอกเซนที่มีความเสถียรและมีการปลดปล่อยแอลอฮอล์ออกมา ทำให้ซิลิกามีความเป็นขั้วและมีอันตรกิริยาระหว่างกันลดลง ซิลิกาจึงเข้ากับยางได้ดีขึ้นและสามารถแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น ยางคอมพาวด์ที่ได้จะมีความหนืดลดลง สามารถไหลและขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ส่วนหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งอยู่ที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะช่วยทำให้ซิลิกาเข้ากับยางได้ง่ายในระหว่างกระบวนการผสมเพราะหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์นี้มีความเป็นขั้วต่ำจึงเข้ากับยางได้ง่าย นอกจากนี้ ในหมู่ที่เป็นสารอินทรีย์ยังมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งในระหว่างการอบคงรูป กำมะถันในสารคู่ควบไซเลนจะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถัน เกิดเป็นการคงรูปทางเคมีขึ้น ด้วยเหตุนี้สารคู่ควบไซเลนจึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมระหว่างซิลิกากับยาง ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาจึงสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจึงส่งผลให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะค่ามอดุลัส ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถูเป็นต้น นอกจากสมบัติเชิงกลแล้ว สารคู่ควบไซเลนยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัตของยางคงรูปอีกด้วย ตัวอย่างของสารคู่ควบไซเลนที่ใช้กันมาก ได้แก่ bis-(3-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide (หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า Si-69)

2.8.3 หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของสารคู่ควบไซเลน

เป็นที่ทราบกันดีว่าซิลิกามีหมู่ไซลานอลอยู่ที่พื้นผิวเป็นจำนวนมากซึ่งซิลิกาจัดอยู่ในสารเคมีที่มีความเป็นขั้วสูงจึงมีความเข้ากันได้ไม่ค่อยดีกับพอลิเมอร์ซึ่งมักจะมีความเป็นขั้วต่ำโดยเฉพาะยางธรรมชาติ จึงจำเป็นที่จะต้องใส่สารเคมีบางชนิดลงไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพซิลิกาในการเข้ากันกับยางได้มากขึ้นเรียกสารชนิดนี้ว่า " สารคู่ควบไซเลน " ตารางที่ 2.6 แสดงตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันออกาโนไซเลนชนิดต่าง ๆ

สารคู่ควบไซเลนที่เป็นที่รู้จักกันดี ได้แก่ สารคู่ควบไซเลน Si-69 (Bis-triethoxysilylpropyl tetrasulfide, TESPT) และ Si-264 (3-Thiocyanatopropyl-triethoxy silane, TCPTS)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

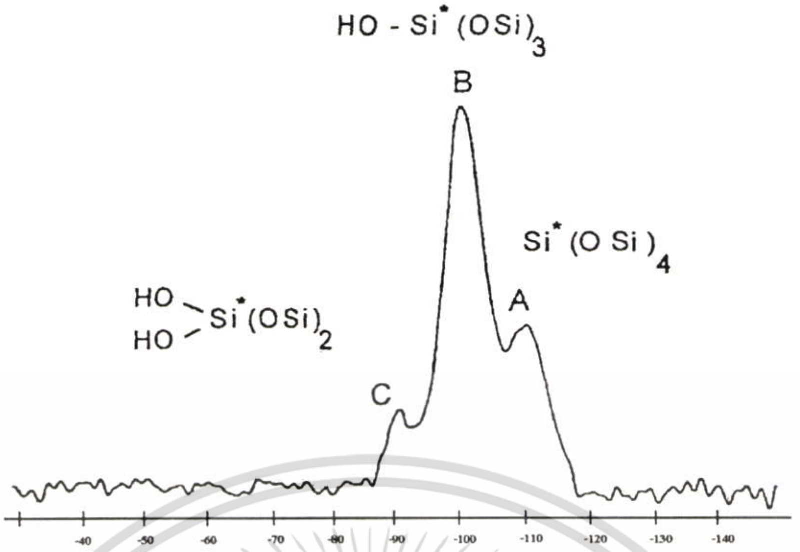
ตารางที่ 2.6 หมู่ฟังก์ชันออกาโนไซเลนชนิดต่าง ๆ

หมู่ฟังชันต่าง ๆ	โครงสร้างทางเคมี
ไวนิล	$CH_2{=}CHSi(OCH_3)_3$
คลอโรโพรพิล	$ClCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
อีพอกซี	O $CH_2\text{-}CHCH_2OCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
เมทาไครเรต	CH_3 $CH_2{=}C\text{-}COOCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
โพรมารีเอมีน	$NH_2CH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
ไดเอมีน	$NH_2CH_2CH_2NHCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
เมอร์แคปโต	$HSCH_2CH_2CH_2Si(OCH_3)_3$
แคทอิออนิกสไตริล	$CH_2{=}CHC_6H_4CH_2NHCH_2CH_2NH(CH_2)_3Si(OCH_3)_3.HCl$

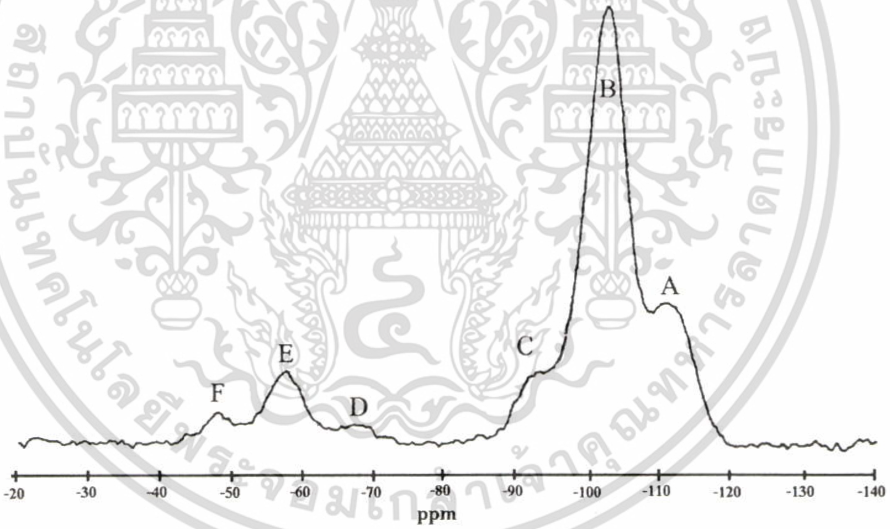
2.8.4 ปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับสารคู่ควบไซเลน

จากการศึกษาอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับสารคู่ควบไซเลนโดยใช้ซิลิกากับ Si-69 และติดตามการเกิดปฏิกิริยาด้วยเครื่อง ^{29}Si-CP/MAS solid state NMR พบว่าซิลิกาที่ไม่ได้ผสมสารคู่ควบไซเลน (ดูรูปที่ 2.12) จะมีพีกหลัก ๆ อยู่ 3 พีกคือ พีกที่ -111 ppm (A) พีกที่ -100 ppm (B) และพีกที่ -90 ppm (C) แต่เมื่อนำซิลิกามาผสมกับสารคู่ควบไซเลน (Si-69) ที่ 0-12% โดยน้ำหนักของซิลิกา จะพบพีกหลักทั้ง 3 พีก และพีกใหม่เพิ่มขึ้นมาอีก 3 พีกคือพีกที่ -67 ppm (D) พีกที่ -58 ppm (E) และพีกที่ -67 ppm (F) ซึ่งพีกทั้ง 3 นี้แสดงถึงปฏิกิริยาระหว่างหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของซิลิกากับหมู่อัลคอกซีของสารคู่ควบไซเลน ดังรูปที่ 2.13 และแสดงพันธะที่เกิดขึ้นในตารางที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ^{29}Si-CP/MAS พีกสเปกตรัมของซิลิกา[37]



รูปที่ 2.13 ^{29}Si-CP/MAS สเปกตรัมของซิลิกาที่ใส่ Si-69 ลงไป 8 %wt ของซิลิกา[37]

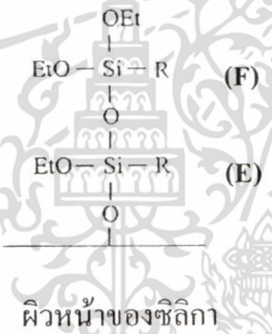
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 พีกสเปกตรัมและพันธะระหว่างซิลิกากับ Si-69

พีก	Si อะตอม
D	$(-O)_3$-Si-$(CH_2)_3$-S-
E	$(-O)_2(RO)$-Si-$(CH_2)_3$-S-
F	(-O)-Si-$(CH_2)_3$-S-

การเกิดพันธะระหว่างหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของซิลิกากับหมู่อัลคอกซีของ Si-69 ถูกนำเสนอในรูปโมเดลทั้งหมด 3 แบบ

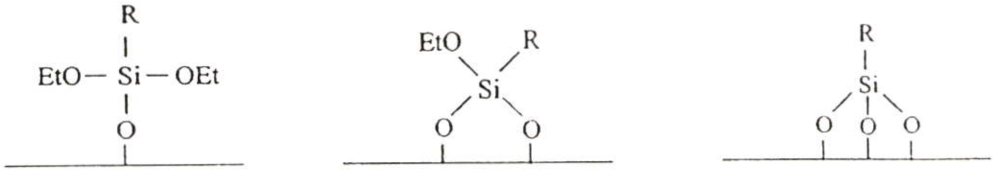
โมเดล 1 หรืออาจเรียกว่าโมเดลแนวตั้ง (Vertical model) ในรูปที่ 2.14 เกิดจากสมมุติฐานที่ว่ามีการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับสารคู่ควบไซเลนที่พื้นผิวของซิลิกา และนอกจากนี้ยังเป็นไปได้ว่าสารคู่ควบไซเลนโมเลกุลอื่นจะมารวมตัวกับไซเลนที่พื้นผิวของซิลิกา ซึ่งสามารถใช้อธิบายพีก (E) และ (F) ได้แต่ไม่สามารถอธิบายพีก (D) ในรูปที่ 2.13 ได้



รูปที่ 2.14 โมเดล 1 ของปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับ Si-69

โมเดล 2 เป็นสมมุติฐานที่ว่าสารคู่ควบไซเลนเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลของซิลิกาแล้วทั้งหมดอยู่ในรูปพันธะไซลอกเซนดังแสดงในรูปที่ 2.15 แต่อย่างไรก็ตาม มันเป็นการยากที่จะบอกได้ว่าสมมุติฐานนี้ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(F) (E) (D)

ผิวหน้าของซิลิกา ผิวหน้าของซิลิกา ผิวหน้าของซิลิกา

รูปที่ 2.15 โมเดล 2 ของปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับ Si-69

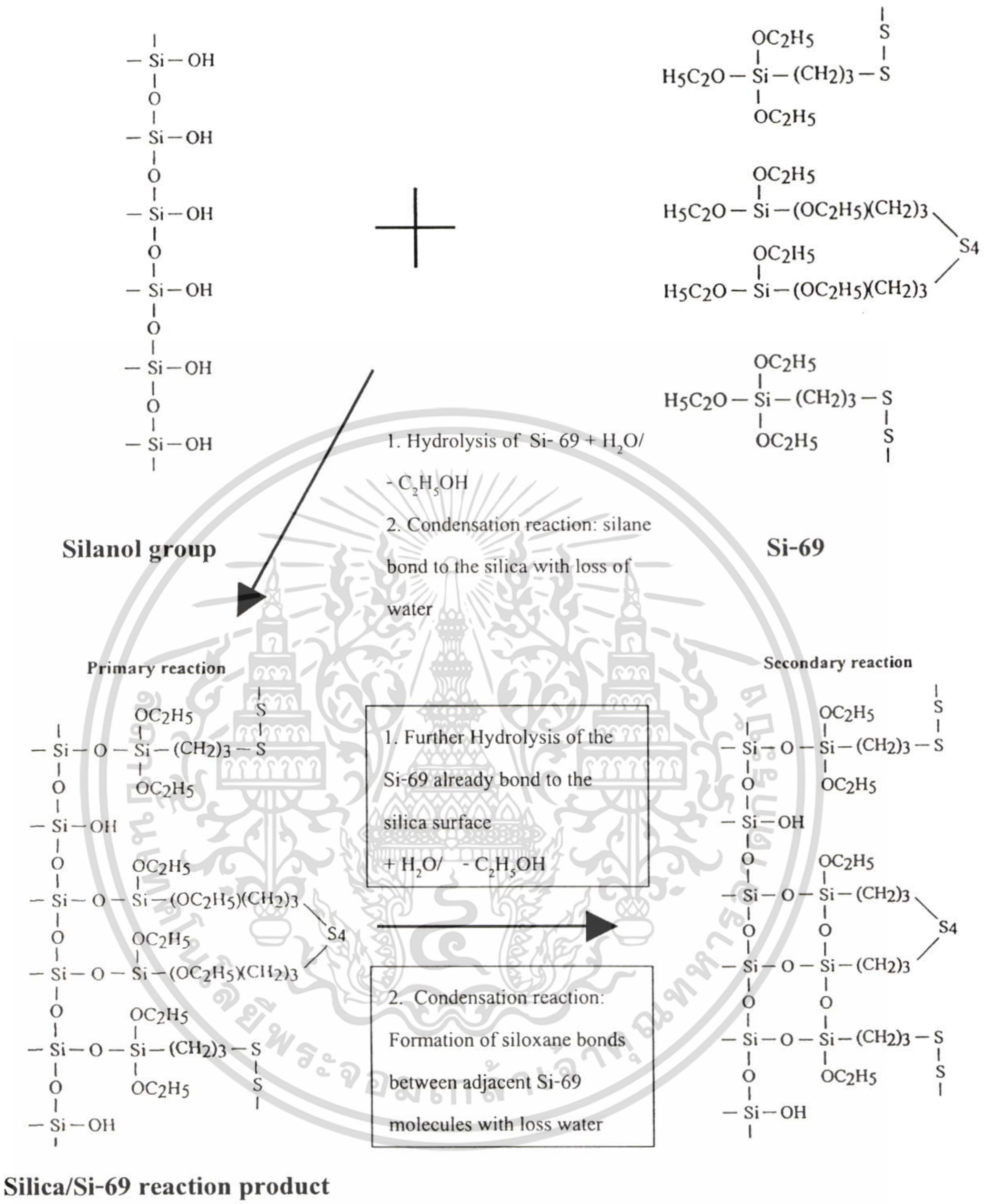
โมเดล 3 เป็นสมมุติฐานที่ว่าขั้นแรกไซเลนเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาเกิดเป็นพันธะไซลอกเซน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาปฐมภูมิ หลังจากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสและปฏิกิริยาควบแน่นระหว่างคู่โมเลกุลของไซเลนที่ติดกัน เรียกปฏิกิริยาหลังนี้ว่าเป็นปฏิกิริยาทุติยภูมิ สามารถอธิบายโมเดลได้ตามปฏิกิริยาในรูปที่ 2.17

(F) (E) (E) (D) (E)

ผิวหน้าของซิลิกา ผิวหน้าของซิลิกา ผิวหน้าของซิลิกา

รูปที่ 2.16 โมเดล 3 ของปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับ Si-69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ปฏิกิริยาระหว่างซิลิกากับ Si-69[37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองรวมทั้งบริษัทผู้ผลิตแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	บริษัท
ยางธรรมชาติ (NR-STR 5 L)	Union Rubber Product Corp., Ltd. (Thailand)
ซิงค์ออกไซด์ เกรดวิเคราะห์	Chemmin Corporation., Ltd
กรดสเตียริก (ST-DDK)	Chemmin Corporation., Ltd
ซิลิกา (Ultrasil® VN2) พื้นที่ผิวจำเพาะ 125 m^2/g pH 6.9	J.J. Degussa (Thailand) Ltd
ซิลิกา (Ultrasil® VN3) พื้นที่ผิวจำเพาะ 175 m^2/g pH 6.2	J.J. Degussa (Thailand) Ltd
Si-69 (Bis-triethoxysilylpropyl tetrasulfide, TESPT)	J.J. Degussa (Thailand) Ltd
Si-264 (thiocynatopropyl triethoxy silane, TCPTS)	J.J. Degussa (Thailand) Ltd
TMTM (Tetramethylthiuram monosulfide) Perkacit® TMTM	Reliance Technochem (Flexsys) Co., Ltd.
TBBS (N-t-butyl-2-benzothiazole sulfenamide)	Reliance Technochem (Flexsys) Co., Ltd.
พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polidac® 4000)	Condea Chemical D.A.C. Co., Ltd
กำมะถัน	Chemmin Corporation., Ltd
เฮกเซน เกรดการค้า	Lab-scan Co., Ltd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

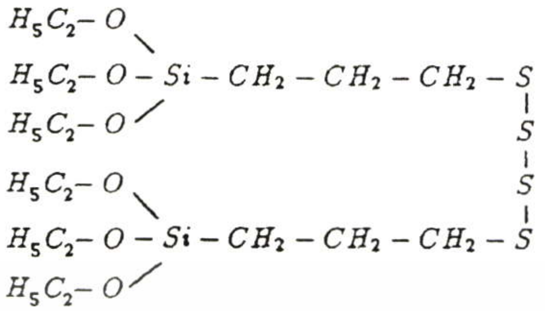
เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง	บริษัทผู้ผลิตหรือชื่อรุ่นเครื่องมือ
เครื่องผสมยางแบบปิด	Torque Rheometer Haake Rheomix 3000p
เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง	Two-roll mill Labtech Model LRM150
เครื่องวัดการคงรูปแบบไร้จานหมุน	Rheo TECH MD+ Moving Die Rheometer
เครื่องอัดขึ้นรูปร้อน	Labtech Engineering Co.,Ltd.
ตู้อบร้อน	Elastocon EB10
เครื่องทดสอบความแข็งกด	Instron Shore A Durometer
เครื่องทดสอบแรงดึง	Instron Universal Testing Machine 4500 Series
เครื่องวัดความหนืดมูนนี่	Monsanto Rheometer Model 1500
เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขัดถู	Zwick Abrasion tester Zwick 6120
เครื่องทดสอบการเสียรูปหลังการกดอัด	Compression set tester CEAST 6425/000
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	Scanning Electron Microscopy (SEM)
เครื่องวัดความร้อนสะสม	Goodrich Flexometer Model II
เครื่องทดสอบสมบัติเชิงพลวัต	Gabo DMTA Eplexor 8 25N

3.3 การออกแบบสูตรผสมยาง

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 คือการศึกษาผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยางธรรมชาติ โดยทำการศึกษาในระบบการคงรูปทั้ง 3 ระบบ คือ ระบบคงรูปแบบดั้งเดิม (CV) ระบบคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV) และระบบคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV) ซึ่งแต่ละระบบเมื่อเกิดการคงรูปแล้วจะทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงต่างชนิดกัน สารคู่ควบไซเลนที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Si-69 และ Si-264 นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของซิลิกา 2 ชนิดที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิที่ต่างกัน โดยซิลิกาที่ใช้ ได้แก่ Ultrasil VN2 และ Ultrasil VN3

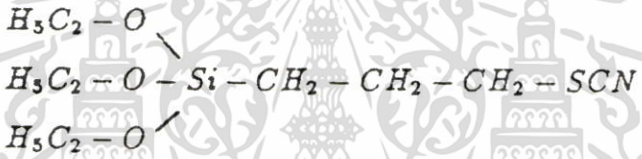
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TMSPT



(1)

TCPTES



(2)

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของ Si-69 (1) และ Si-264 (2)

3.3.1 การออกแบบสูตรผสมยางสำหรับการทดลองในส่วนที่ 1

ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาผลของระบบการคงรูป 3 ระบบ และสารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด คือ Si-69 และ Si-264 ต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมแรงโดยมีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมเคมียางโดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าของปริมาณกำมะถันและ TMTM จนเหมาะสมสำหรับการทดลองในส่วนที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สูตรการผสมเคมียางสำหรับการทดลองในส่วนที่ 1

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)		
	CV	Semi-EV	EV
ยางธรรมชาติ	100.0	100.0	100.0
ซิลิกา	40.0	40.0	40.0
ซิงค์ออกไซด์	5.0	5.0	5.0
กรดสเตียริก	2.0	2.0	2.0
TBBS	1.0	1.0	1.0
TMTM	**0.1**	**0.8**	**4**
กำมะถัน	**2.5**	**1**	**0.2**
พอลิเอทิลีนไกลคอล	0.5	0.5	0.5
สารคู่ควบไซเลน	2.0	2.0	2.0

จึงได้สูตรยางคอมพาวด์ในระบบการคงรูปต่าง ๆ ทั้ง 18 สูตรที่จะนำไปทำการผสมและทดสอบต่อไป แสดงดังตารางที่ 3.4

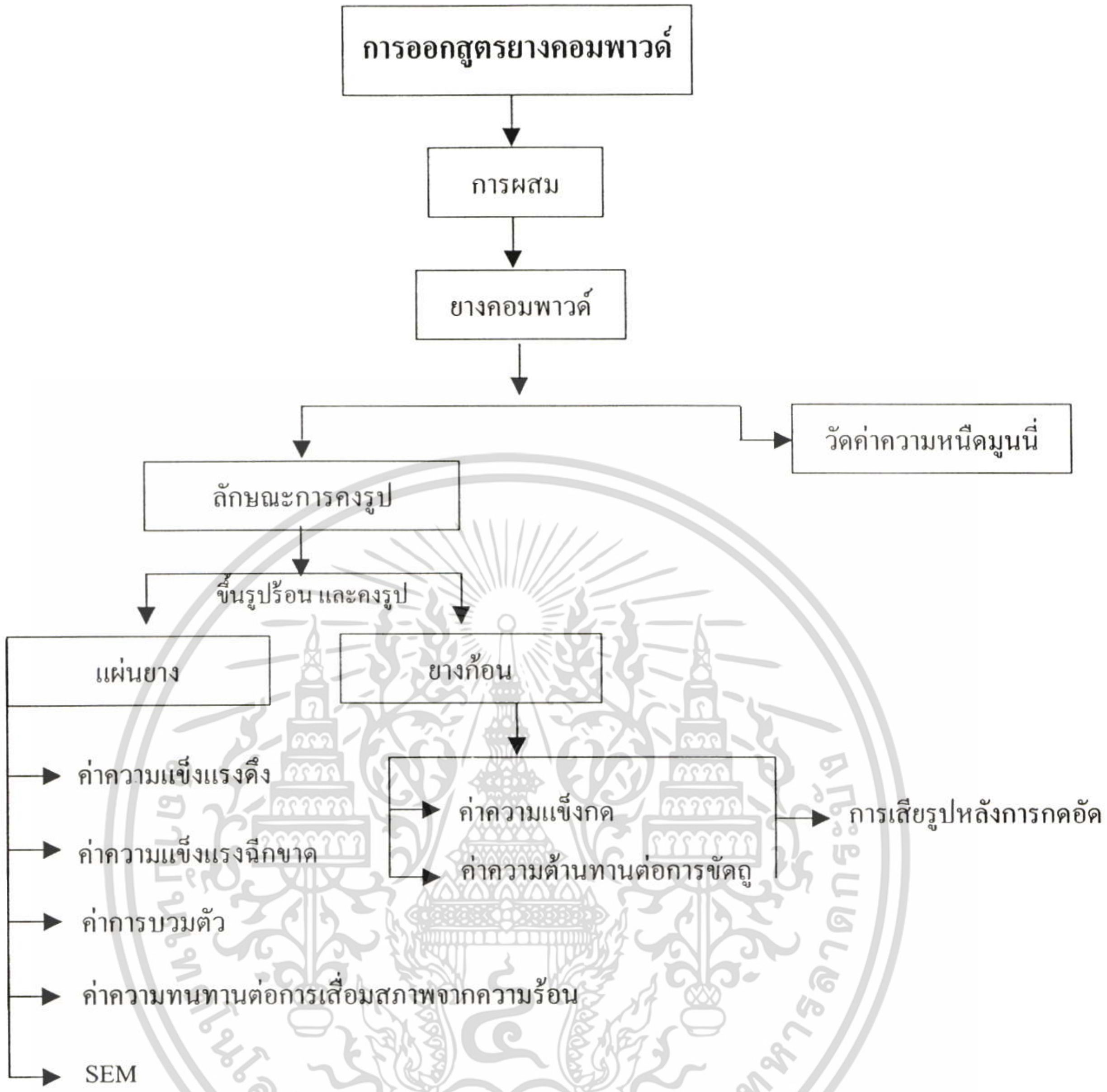
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 การออกแบบเคมียาง

สูตรที่	ชนิดของซิลิกา	ระบบการคงรูป	สารคู่ควบไซเลน
1	Ultrasil VN2	CV	-
2	Ultrasil VN2	CV	Si-69
3	Ultrasil VN2	CV	Si-264
4	Ultrasil VN2	Semi-EV	-
5	Ultrasil VN2	Semi-EV	Si-69
6	Ultrasil VN2	Semi-EV	Si-264
7	Ultrasil VN2	EV	-
8	Ultrasil VN2	EV	Si-69
9	Ultrasil VN2	EV	Si-264
10	Ultrasil VN3	CV	-
11	Ultrasil VN3	CV	Si-69
12	Ultrasil VN3	CV	Si-264
13	Ultrasil VN3	Semi-EV	-
14	Ultrasil VN3	Semi-EV	Si-69
15	Ultrasil VN3	Semi-EV	Si-264
16	Ultrasil VN3	EV	-
17	Ultrasil VN3	EV	Si-69
18	Ultrasil VN3	EV	Si-264

หลังจากออกสูตรยางคอมพาวด์และทำการผสมยางทั้ง 18 สูตรเรียบร้อยแล้วจึงนำยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังการทดสอบต่าง ๆ (ในส่วนที่ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การออกแบบสูตรผสมยางสำหรับการทดลองในส่วนที่ 2

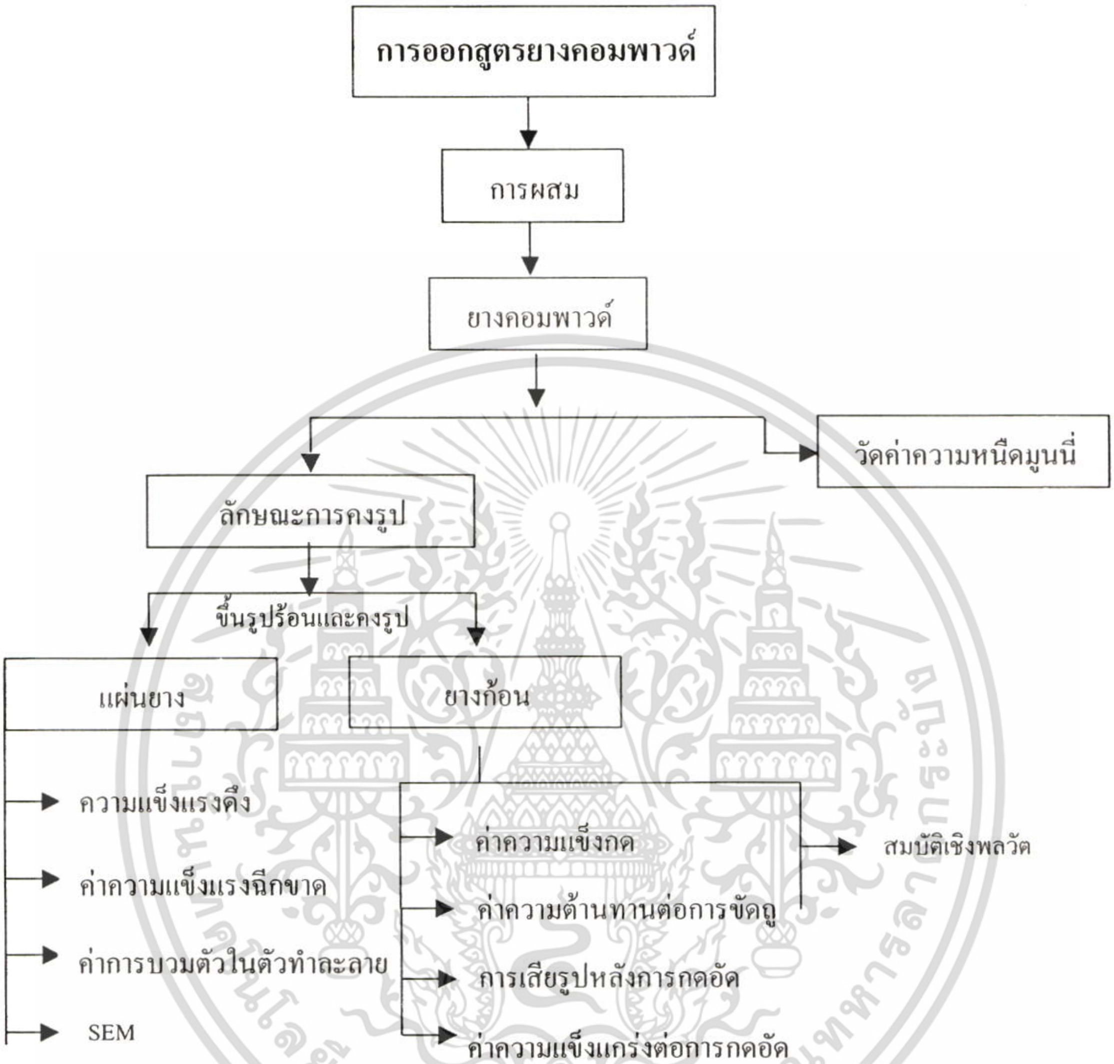
ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตของยางคงรูปโดยสารคู่ควบไซเลนที่ใช้ ได้แก่ Si-69 และ Si-264 ซึ่งจะทำการปรับเปลี่ยนปริมาณสารคู่ควบไซเลนตั้งแต่ 0-6phr โดยในทุกสูตรยางจะมีส่วนประกอบดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สูตรการผสมเคมียางสำหรับการทดลองในส่วนที่ 2

ส่วนผสม	ปริมาณ (phr)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ยางธรรมชาติ	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ultrasil VN2	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Si-69	0	1.5	3.0	4.5	6.0	0	0	0	0
Si-264	0	0	0	0	0	1.5	3.0	4.5	6.0
ซิงค์ออกไซด์	5	5	5	5	5	5	5	5	5
กรดสเตียริก	2	2	2	2	2	2	2	2	2
TBBS	1	1	1	1	1	1	1	1	1
TMTM	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
กำมะถัน	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PEG	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากออกสูตรยางคอมพาวด์และทำการผสมยางทั้ง 9 สูตรเรียบร้อยแล้วจึงนำยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังการทดลอง (ในส่วนที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การผสมยาง

การผสมยางโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Torque Rheometer Haake Rheomix 3000p) ที่มีปริมาตร 355 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้โรเตอร์แบบ Banbury 2000 ใช้ค่าสัดส่วนการเติม (Fill factor) 0.7 จะได้ยางผสมน้ำหนักประมาณ 280 กรัมต่อการผสม 1 ครั้ง ความเร็วในการหมุนโรเตอร์ 40 รอบ/นาที อุณหภูมิตั้งต้นในการผสมเท่ากับ 40 °C และใช้เวลาในการผสมทั้งหมด 12 นาที ก่อนเริ่มการผสมนำยางธรรมชาติที่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ใส่ในเครื่องผสม ทำการบดยางก่อนประมาณ 1 นาที ที่ความเร็วในการหมุน 13-15 รอบ/นาที เพื่อให้สายโซ่โมเลกุลของยางขาดออกจากกัน ทำให้ยางมีความหนืดลดลง จากนั้นจึงเริ่มผสมตามสภาวะที่กำหนด โดยใส่ซิงค์ออกไซด์และกรดสเตียริกลงไป เมื่อผ่านไป 2 นาทีจึงใส่ซิลิกาที่แบ่งไว้ครึ่งแรกพร้อมกับสารคู่ควบไซเลน (ในสูตรที่ต้องใช้) เมื่อผ่านไป 4 นาทีใส่ซิลิกาที่เหลือกับพอลิเอทีลีนไกลคอล ถึงนาทีที่ 10 จึงใส่กำมะถันพร้อมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาคงรูป ต่าง ๆ ลงไปและทำการผสมต่อจนถึง 12 นาทีจึงหยุดการผสมและบันทึกค่าแรงบิด และค่าอุณหภูมิสุดท้ายของการผสม

หลังจากนั้นนำยางคอมพาวด์ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดผสม 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เนื่องจากยางคอมพาวด์ที่ได้จากเครื่องผสมแบบปิด 1 สูตรจะต้องผสม 2 ครั้งการนำยางไปรีดรวมกันจะช่วยให้สมบัติของยางคอมพาวด์ในแต่ละส่วนใกล้เคียงกัน รีดยางพับกลับไปกลับมาประมาณ 1 นาที ปรับระยะห่างของเครื่องรีดยางจนได้แผ่นยางผสมหนาประมาณ 3-5 มิลลิเมตร แบ่งยางออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปวัดสมบัติของยางคอมพาวด์ เช่น ค่าความหนืด ค่ายางบาวด์ และค่าเวลาในการคงรูป ส่วนที่ 2 เมื่อรู้ค่าเวลาในการคงรูปแล้วนำไปขึ้นรูปชิ้นงานแบบต่าง ๆ เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงพลวัตต่อไป

3.5 การทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

3.5.1 การหาเวลาที่เหมาะสมในการคงรูป

การหาค่าเวลาที่เหมาะสมในการคงรูป (Cure characteristic test) ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-97 โดยเครื่อง Rheo TECH MD+ Moving Die Rheometer ทำได้โดยตัดชิ้นยางคอมพาวด์ขนาดประมาณ 2x2 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักประมาณ 3-5 กรัม ตั้งอุณหภูมิการทดสอบที่ 150 °C ตั้งค่าในเครื่องทดสอบเพื่อวัดค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque) แรงบิดสูงสุด (Maximum torque) เวลาในการเริ่มสุกตัว (Scorch time, t_{S2}) และเวลาที่เหมาะสมในการสุกตัว (Optimum curing time, t_{C90}) นำชิ้นตัวอย่างประกบด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกทั้ง 2 ด้านก่อนที่จะใส่เข้าไปในเบ้าทดสอบเพื่อป้องกันยางติดเบ้าทดสอบ เมื่อเริ่มการทดสอบจะเห็นว่าค่าแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงบิดเริ่มคงที่หรือลดลงแสดงว่ายางเกิดการคงรูปที่สมบูรณ์แล้ว ก็จะสามารถคำนวณหาค่า t_{S2} และ t_{C90} จากกราฟโดยใช้สมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_{90} = M_L + 0.9(M_{HF} - M_L)$$

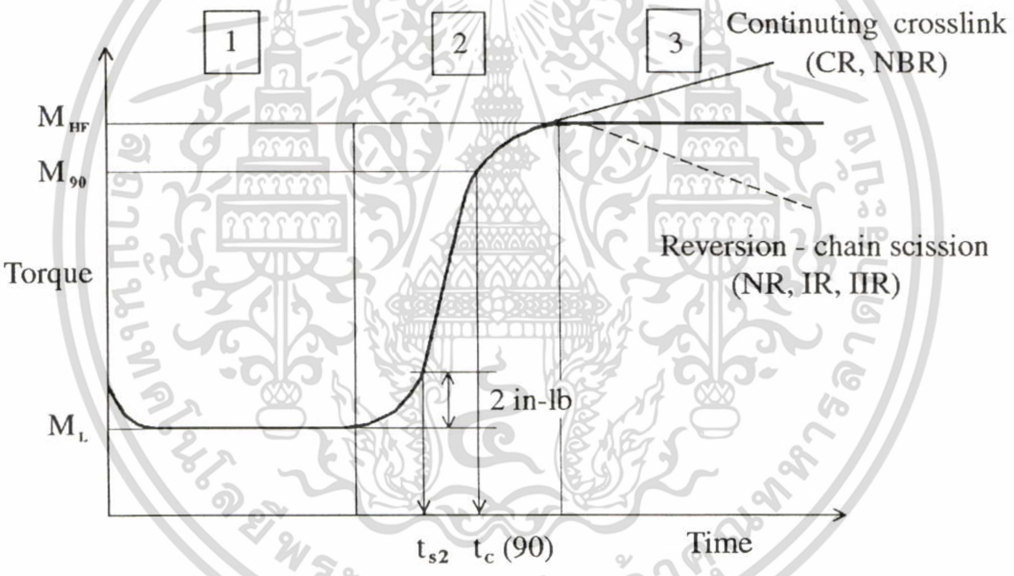
M_{90} = ค่าแรงบิด 90 เปอร์เซ็นต์ของการคงรูป

M_L = ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)

M_{HF} = ค่าแรงบิดสูงสุดเมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)

t_{S2} = เวลาในการเริ่มสุกตัวของยาง (Scorch time) เป็นเวลาที่ใช้ในการคงรูปจนกระทั่งแรงบิดเพิ่มขึ้น 2 ปอนด์-นิ้ว เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด

t_{C90} = เวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม คือเวลาจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการคงรูป 90 เปอร์เซ็นต์



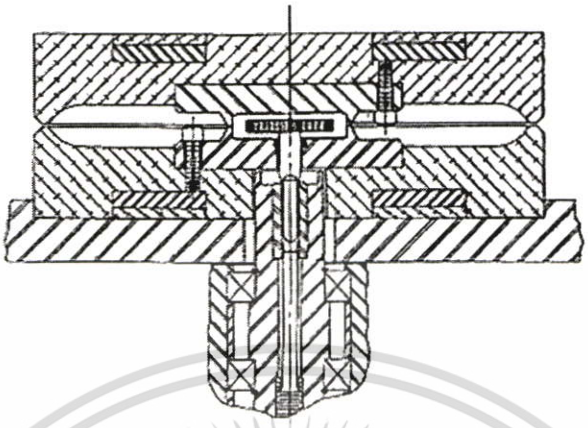
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงลักษณะของการคงรูปทั่วไป

3.5.2 การวัดค่าความหนืดมูนนี่

การวัดค่าความหนืดมูนนี่ได้ดำเนินการตามมาตรฐาน (ASTM D1646-00) ด้วยเครื่องรุ่น Monsanto Rheometer model 1500 โดยใช้สัญญลักษณ์ ML 1+4 @ 100 °C ซึ่ง M หมายถึงความหนืดมูนนี่ L หมายถึงโรเตอร์ขนาดใหญ่ 1+4 หมายถึงทำการให้อุณหภูมิก่อน 1 นาทีก่อนที่โรเตอร์จะหมุนและทำการอ่านค่าความหนืดเมื่อเวลาผ่านไปอีก 4 นาที เตรียมชิ้นงานโดยการตัดยางผสมขนาด 4x4 เซนติเมตร 2 ชิ้น รวมน้ำหนักประมาณ 25 กรัม ประกบกับตัวโรเตอร์ทั้ง 2 ด้าน แล้วหุ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยแผ่นฟิล์มพลาสติกกันติดแม่พิมพ์ รอจนอุณหภูมิถึง 100 °C แล้วจึงเริ่มทำการทดสอบและอ่านค่าความหนืดจากกราฟ



รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางของเครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่

3.6 การเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติของยางคงรูป

นำยางคอมพาวด์ต่าง ๆ มาตัดและชั่งน้ำหนักให้มากกว่าน้ำหนักของชิ้นงานหลังจากขึ้นรูปร้อนแล้วประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์แล้วแต่ขนาดของชิ้นงานเนื่องจากจะมียางบางส่วนล้นเกินแม่แบบขึ้นรูปออกมา ตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องอัดขึ้นรูปร้อนที่ 150 °C แรงกด 15-20 ตัน กำหนดให้เครื่องมีการกดอัด 3 ครั้งก่อนการกดอัดจริง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟองอากาศภายในชิ้นงาน ตั้งเวลาในการขึ้นรูปร้อน สำหรับชิ้นงานที่มีความหนามากกว่า 2 มิลลิเมตรจะบวกเพิ่มจากเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม ไปอีกประมาณ 10 นาทีต่อความหนาที่เพิ่มขึ้นครึ่งนิ้ว[16] เพื่อให้ยางที่อยู่บริเวณด้านในสุดเกิดการคงรูปอย่างสมบูรณ์ ตารางที่ 3.6 แสดงลักษณะของชิ้นงานและเวลาที่ใช้ในการคงรูปของชิ้นงานแต่ละชนิด

ตารางที่ 3.6 ลักษณะของชิ้นงานและเวลาที่ใช้ในการคงรูปชิ้นทดสอบต่าง ๆ

ชนิดของการทดสอบ	ลักษณะของชิ้นงาน	เวลาที่ใช้ในการคงรูป (นาที)
ความแข็งแรงดึง	รูปดัมเบลล์	t_{C90}
ความแข็งแรงฉีกขาด	รูปปีกนก	t_{C90}
ความแข็งแกร่งกดอัด	ทรงกระบอก	$t_{C90}+5$
การเสียรูปหลังการกดอัด	ทรงกระบอก	$t_{C90}+2$
ความต้านทานต่อการขัดถู	ทรงกระบอก	t_{C90}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 ลักษณะของชิ้นงานและเวลาที่ใช้ในการคงรูปชิ้นทดสอบต่าง ๆ (ต่อ)

ชนิดของการทดสอบ	ลักษณะของชิ้นงาน	เวลาที่ใช้ในการคงรูป (นาที)
ความแข็งกด	แผ่น	t_{C90}
ความหนาแน่นการคงรูป	แผ่น	t_{C90}
ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ	รูปดัมเบลล์	t_{C90}
การสะสมความร้อน	ทรงกระบอก	t_{C90}+ 10
สมบัติเชิงพลวัต	แผ่น	t_{C90}

3.7 การทดสอบสมบัติของยางคงรูป

3.7.1 การหาค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) สามารถหาค่าได้ทางอ้อมจากการคำนวนค่าการบวมตัวในตัวทำละลายของยางขึ้นรูป เพราะค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงจะแปรผกผันกับค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวในตัวทำละลาย การทดสอบเริ่มต้นด้วยการตัดชิ้นงานขนาด 1x1 เซนติเมตรจากแผ่นยางขึ้นรูปหนา 2 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักอย่างละเอียดก่อนแช่ในตัวทำละลายเฮกเซนเป็นเวลา 3 วัน ชิ้นงานจะเกิดการบวมตัว หลังจากนั้นจึงนำชิ้นยางมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง และสามารถคำนวนหาค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัว} = (W_a - W_b)\text{x}100/W_b$$

W_b = น้ำหนักของยางขึ้นรูปก่อนแช่ในตัวทำละลายเฮกเซน (กรัม)

W_a = น้ำหนักของยางขึ้นรูปหลังแช่ในตัวทำละลายเฮกเซน (กรัม)

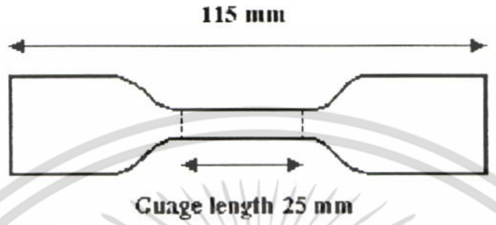
3.7.2 การศึกษาระดับการแตกตัวของซิลิกา

เตรียมชิ้นทดสอบโดยนำชิ้นงานที่เหลือจากการวัดค่าความแข็งแรงดึงมาแช่ในไนโตรเจนเหลวเป็นเวลาประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นใช้คีมหักชิ้นงานทันทีขณะที่ยางยังแข็งอยู่ และนำพื้นผิวตรงที่เกิดใหม่นั้นมาศึกษาระดับการแตกตัวของซิลิกาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน แบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 การทดสอบสมบัติแรงดึง

การทดสอบสมบัติความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 412 สามารถวัดได้โดย Universal testing machine ใช้ชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์ที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ตั้งค่าความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาที โหลดเซลล์ 1 กิโลนิวตัน ตั้งให้เครื่องวัดค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด และค่ามอดุลัสที่ 100 เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ทำการทดสอบชิ้นงานอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อตัวอย่างยาง 1 สูตร



รูปที่ 3.6 รูปร่างของชิ้นงานสำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึง

ค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

ความเค้นดึง (Tensile stress), $\sigma = F/A$

ความเครียดดึง (Tensile strain), $\varepsilon = (l-l_o)/l_o$

100 %มอดุลัส = ค่าความเค้นดึงที่ 100 %ความเครียด

เมื่อ F = แรงที่ใช้ในการยืดตัวอย่าง (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางมิลลิเมตร)

l = ระยะห่างระหว่างขีดสองเส้นระหว่างดึง (มิลลิเมตร)

l_o = ระยะห่างระหว่างขีดสองเส้นก่อนดึง (มิลลิเมตร)

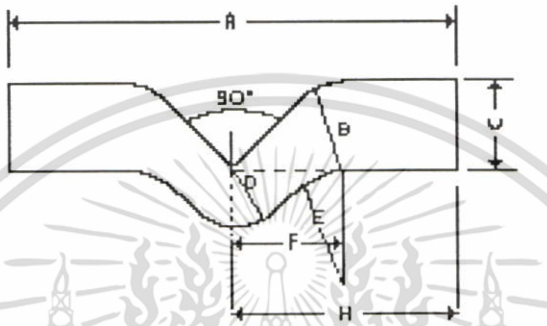
3.7.4 การทดสอบความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

การทดสอบค่าความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนของยาง (Aging properties) ตามมาตรฐาน ASTM D 573 ทำโดยการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลระหว่างชิ้นงานที่ไม่ได้รับการบ่มเร่งด้วยความร้อนกับชิ้นงานที่ได้รับการบ่มเร่งด้วยความร้อน ในการทดสอบนี้จะเป็นการวัดสมบัติความแข็งแรงดึง โดยชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง ก่อนที่จะทำการวัดค่าความแข็งแรงดึงด้วย Universal testing machine ตามวิธีการที่ระบุไว้ในหัวข้อ 3.7.1 ทำการทดสอบชิ้นงานอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อตัวอย่างยาง 1 สูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.5 การทดสอบค่าความแข็งแรงฉีกขาด

การวัดค่าความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D 624-00 สามารถวัดได้โดย Universal testing machine ใช้ชิ้นงานตัวอย่างรูปปีกนกดายน์ C (Right angle) ที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร ตั้งค่าความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาที โหลดเซลล์ 1 กิโลนิวตัน ทำการทดสอบชิ้นงานอย่างน้อย 5 ชิ้นต่อตัวอย่าง 1 สูตร



รูปที่ 3.7 **รูปร่างของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงฉีกขาด**

ค่าความแข็งแรงฉีกขาด T_s สามารถคำนวณ ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$T_s\ (kN/m) = F/D$$

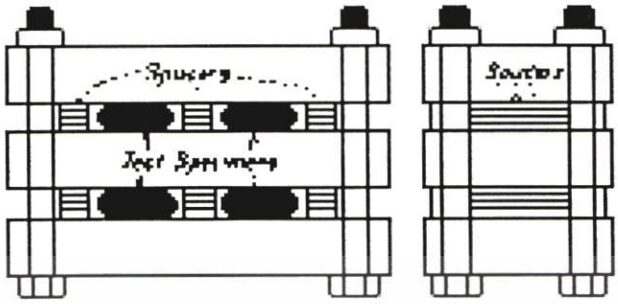
F = แรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงชิ้นงาน หน่วยกิโลนิวตัน (kN)

D = ค่าเฉลี่ยของความหนาชิ้นงาน หน่วยเมตร (m)

3.7.6 การทดสอบค่าการเสียรูปหลังการกดอัด

การวัดค่าการเสียรูปหลังการกดอัด (Compression set) ตามมาตรฐาน ASTM D 395 (method B) โดยใช้ Compression set tester โดยนำชิ้นทดสอบรูปทรงกระบอกมาวัดความสูงที่แน่นอนด้วยไมโครมิเตอร์ จากนั้นนำชิ้นงานมาวางไว้บนเครื่องทดสอบและทำการอัดชิ้นงานลงไปให้เหลือความสูงประมาณ 4.5 มิลลิเมตร ก่อนที่จะนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเครื่องทดสอบออกจากตู้อบ นำชิ้นทดสอบออกมาจากเครื่องแล้วทิ้งไว้บนพื้นราบที่เป็นฉนวนเป็นเวลาประมาณ 30 นาที วัดค่าความสูงของชิ้นงานหลังจากอบแล้วคำนวนหาค่าเปอร์เซ็นต์การเสียรูปหลังการกดอัด ในกรณีนี้ได้ทำการทดสอบ 6 ชิ้นทดสอบต่อตัวอย่าง 1 สูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ลักษณะเครื่องมือและการทดสอบการเสียรูปหลังการกดอัด

ค่าการเสียรูปหลังการกดอัดสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

ค่าเปอร์เซ็นต์การเสียรูปหลังการกดอัด $= [(H_b-H_a)/(H_b-4.5)] \times 100$

เมื่อ H_a = ค่าความสูงของชิ้นงานหลังการทดสอบ (มิลลิเมตร)

H_b = ค่าความสูงของชิ้นงานก่อนการทดสอบ (มิลลิเมตร)

3.7.7 การทดสอบความแข็งแกร่งกดอัด

การทดสอบความแข็งแกร่งกดอัด (Compressive stiffness) ตามมาตรฐาน ASTM D575 (method A) โดยใช้ Universal testing machine โดยนำตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 29 มิลลิเมตร สูง 13 มิลลิเมตร น้ำหนักประมาณ 10 กรัม วัดความสูงที่แน่นอนของชิ้นงานด้วยไมโครมิเตอร์ จากนั้นนำชิ้นงานมาวางไว้บน Universal testing machine ใช้หัวกดกดอัดชิ้นงานลงไป 5 เปอร์เซ็นต์ของความสูงของชิ้นงาน โดยใช้ความเร็วในการกดที่ 15 มิลลิเมตรต่อนาที วัดค่าแรงที่ใช้ในการกดชิ้นงาน ทำการทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สูตร

3.7.8 การทดสอบค่าความต้านทานต่อการขัดถู

การวัดค่าความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ตามมาตรฐาน DIN 53516 สามารถวัดได้โดยใช้ Zwick abrasion tester ใช้ชิ้นงานตัวอย่างรูปทรงกระบอกที่มีความยาวประมาณ 16 มิลลิเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ชิ้นงานจะถูกกดลงบนกระดาษทราย corundum เกรด 60 ใช้แรงกดคงที่ 10 นิวตัน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน 0.32 เมตร/นาที ทำการวัดเป็นระยะทาง 40 เมตร ทำการทดสอบชิ้นงานอย่างน้อย 4 ชิ้นต่อตัวอย่างยาง 1 สูตร

ค่าความต้านทานต่อการขัดถูสามารถคำนวนได้จากค่าเฉลี่ย Abrasion loss จากสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Abrasion loss } (\Delta V) = \Delta m \times S_o / (\rho \times S)$$

ΔV = ปริมาตรที่หายไป (ลูกบาศก์มิลลิเมตร)

Δm = น้ำหนักที่หายไป (มิลลิกรัม)

ρ = ความหนาแน่น (มิลลิกรัม/ลูกบาศก์มิลลิเมตร)

S_o = value of nominal abrasive power (200 มิลลิกรัม)

S = average abrasive power (200 มิลลิกรัม)

3.7.9 ความแข็งกด

การวัดค่าความแข็งกด (Hardness Shore A) ตามมาตรฐาน ASTM 2240 ด้วยเครื่อง Instron Shore A durometer โดยใช้ชิ้นงานที่มีความหนาอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร โดยการนำยางแผ่นเรียบหนาประมาณ 2 มิลลิเมตรมาวางทับกัน 3 ชิ้นและทำการทดสอบที่บริเวณตรงกลางชิ้นตัวอย่างห่างจากขอบของตัวชิ้นงานอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร วางชิ้นงานลงบนพื้นรองที่ราบเรียบ จากนั้นจึงกดแท่นกดลงจนสุดเพื่อให้เข็มกดลงบนชิ้นงานยาง รักษาแรงกดให้คงที่ อ่านค่าความแข็งจากเครื่องเมื่อค่าเริ่มคงที่ ทำการวัดชิ้นงานอย่างน้อย 3 จุดต่อ 1 ชิ้นตัวอย่าง ทำการทดสอบชิ้นงานทำการทดสอบ 6 ชิ้นต่อตัวอย่างยาง 1 สูตร

3.7.10 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต

การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) โดยใช้เครื่อง Gabo DMTA Eplexor 8 25N นำชิ้นงานขนาดประมาณ 2x5x50 มิลลิเมตร มาทดสอบที่ความถี่ 10 HZ และ2 %ความเครียด โดยใช้ (Tension mode) หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาพลอตกราฟระหว่างค่ามอดุลัสสะสม (E') และ tan δ กับปริมาณของสารคู่ควบไซเลน

3.7.11 การทดสอบค่าความร้อนสะสม

การทดสอบค่าความร้อนสะสม (Heat build up) ตามมาตรฐาน ASTM D623 โดยการเตรียมตัวอย่างรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 17.9 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตร อบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลาประมาณ 25 นาที หลังจากนั้นทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 °C ใช้เวลาในการวัด 25 นาที ที่ Force 245 (N) Stroke 4.45 (mm) Cycle rate 30 รอบต่อวินาที หลังจากที่วัดเสร็จแล้วเครื่องจะอ่านค่าออกมา แกน X จะเป็นค่าอุณหภูมิที่จานรอง แกน Y จะเป็นเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

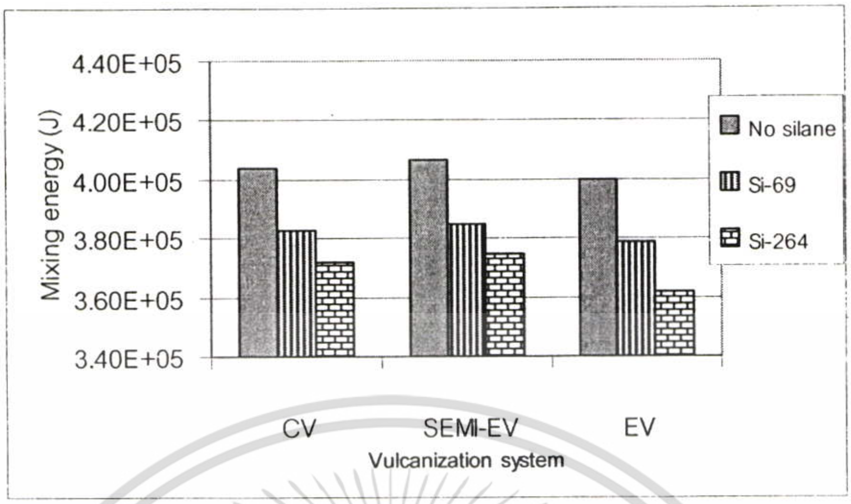
4.1 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา

4.1.1 ผลต่อพฤติกรรมการผสมและสมบัติต่าง ๆ ของยางคอมพาวด์

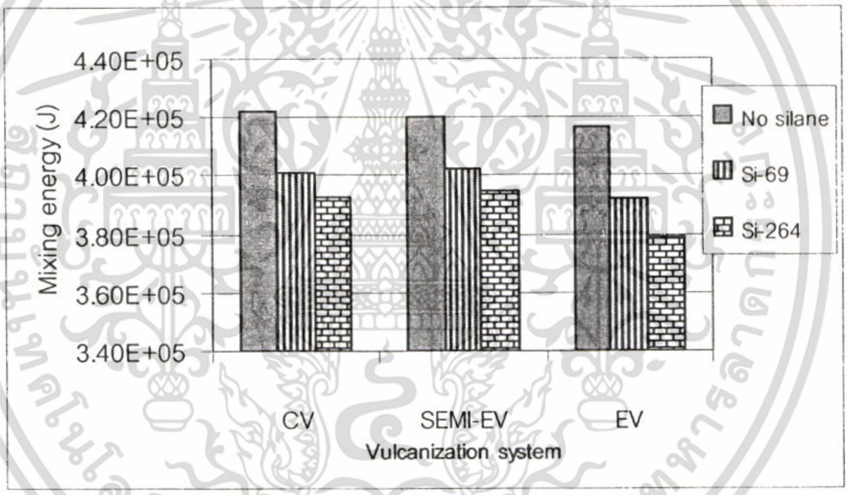
4.1.1.1 ค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม

รูปที่ 4.1 แสดงผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อพลังงานที่ใช้ในการผสมยางในระบบการคงรูปแบบต่าง ๆ ทั้ง 3 ระบบ ได้แก่ ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (ระบบการคงรูปแบบ CV) ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (ระบบการคงรูปแบบ Semi-EV) และระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (ระบบการคงรูปแบบ EV) โดยใช้ซิลิกา 2 ชนิด คือ Ultrasil VN2 และUltrasil VN3 (สมบัติดังตารางที่ 3.1) จากรูปพบว่า ระบบการคงรูปแบบ CV และระบบการคงรูปแบบ Semi-EV มีค่าพลังงานที่ใช้ในการผสมสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระบบการคงรูปแบบ EV มี TMTM ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปอยู่ในปริมาณมาก (สูงถึง 4 phr) ซึ่งคาดว่า TMTM ที่มีอยู่นี้อาจเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของซิลิกา ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาต่อกันลดลง ซิลิกาจึงแตกตัวในยางได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ ในระหว่างกระบวนการผสมเคมียาง อุณหภูมิของการผสมในช่วงท้ายมีค่าค่อนข้างสูง (> 100 °C) ดังนั้นอาจมีความเป็นไปได้ที่ว่า TMTM ส่วนที่มากเกินพอจะเกิดการหลอมเหลว จึงช่วยทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความนิ่ม (Plasticizing effect) ส่งผลทำให้ยางมีความหนืดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)

รูปที่ 4.1 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อพลังงานที่ใช้ในการผสม (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

เมื่อพิจารณาในระบบการคงรูปแบบเดียวกัน พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนเข้าไปในปริมาณ 2 phr จะทำให้พลังงานที่ใช้ในการผสมลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนมีหมู่อัลคอกซี (Alkoxy) ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา จึงทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาระหว่างกันลดลง ซึ่งโดยปกติซิลิกามีความเป็นขั้วสูงเพราะมีหมู่ไซลานอลอยู่บนพื้นผิวปริมาณมาก และมักจะจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่แข็งแรง เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างก้อนแอกกรีเกตเป็นพันธะไฮโดรเจน (H-bonds) การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปทำให้ซิลิกามีความเป็นขั้วลดลง จึงส่งผลทำให้ซิลิกาสามารถแตกตัวและกระจายตัวในเนื้อยางได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้... ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ การที่สารคู่ควบไซเลนมีปลายด้านหนึ่งที่สามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกา และมีส่วนปลายอีกด้านหนึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว ซึ่งปลายด้านที่ไม่มีขั้วนี้จะหันเข้าหายาง ด้วยเหตุนี้ สารคู่ควบไซเลนจึงทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างซิลิกากับยาง ทำให้ซิลิกาและยางเข้ากันได้ง่ายยิ่งขึ้น การเติมสารคู่ควบไซเลนจึงช่วยทำให้กระบวนการเข้ากันได้ของยางและซิลิกา (Wetting process) ในระหว่างการผสมเกิดได้ดียิ่งขึ้น สารคู่ควบไซเลนจึงช่วยทำให้กระบวนการผสมเกิดได้ดียิ่งขึ้น จึงส่งผลทำให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดและมีพลังงานที่ใช้ในการผสมลดลง

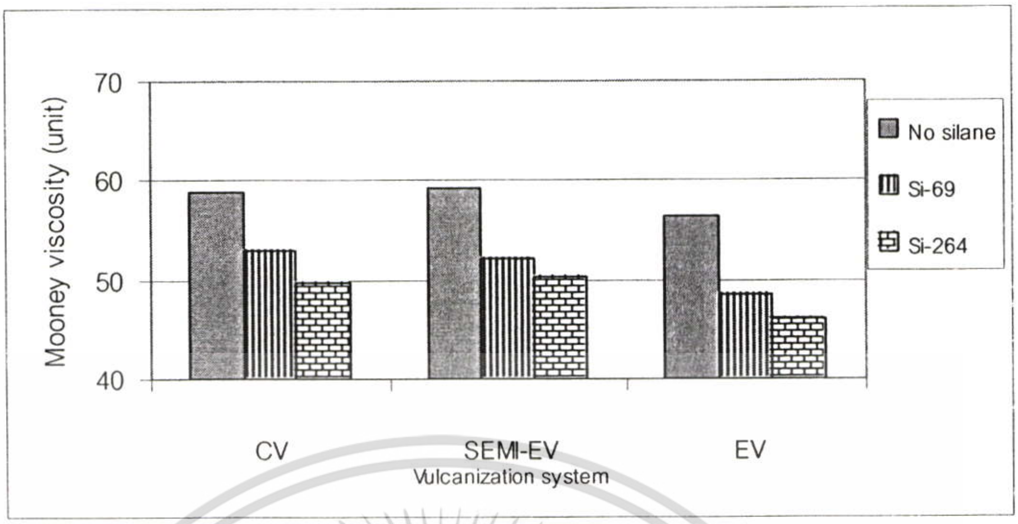
เมื่อพิจารณายางคอมพาวด์ที่ใช้สารคู่ควบไซเลนต่างชนิดกัน คือ Si-69 และ Si-264 พบว่า ในยางคอมพาวด์สูตรที่ใช้ Si-264 จะมีค่าพลังงานที่ใช้ในการผสมต่ำกว่ายางคอมพาวด์สูตรที่ใช้ Si-69 เนื่องจาก Si-264 มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่าและมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่เล็กกว่า ด้วยเหตุนี้ Si-264 จึงเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวซิลิกาได้ง่ายกว่า จึงช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกาได้มากกว่า ส่งผลให้มีพลังงานที่ใช้ในการผสมต่ำกว่า

เมื่อพิจารณาผลของขนาดอนุภาคปฐมภูมิของซิลิกาต่อค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม จะพบว่า ยางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN2 เป็นสารตัวเติมเสริมแรงจะมีพลังงานที่ใช้ในการผสมต่ำกว่ายางคอมพาวด์สูตรที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN3 เนื่องจาก Ultrasil VN2 มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิใหญ่กว่าและมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่า Ultrasil VN3 เมื่อเติมลงไปในยาง Ultrasil VN2 จะทำให้ยางคอมพาวด์มีปริมาณของยางส่วนที่ไหลได้ (Mobilised rubber) สูงกว่า Ultrasil VN3 ยางคอมพาวด์ที่ได้จึงมีค่าความหนืดต่ำกว่า ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการผสมมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ Ultrasil VN3

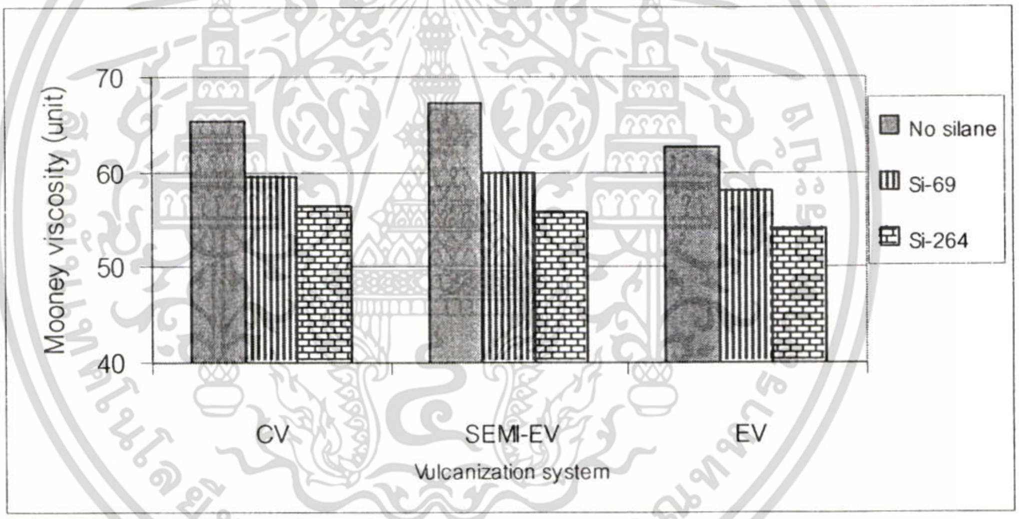
4.1.1.2 ค่าความหนืดมูนนี่

รูปที่ 4.2 แสดงผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อความหนืดมูนนี่ (ML 1+4 @ 100°C) จากรูปพบว่า ระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ให้ยางคอมพาวด์ที่มีค่าความหนืดมูนนี่สูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV อย่างชัดเจน เนื่องมาจากในระบบการคงรูปแบบ EV มี TMTM อยู่ในปริมาณมาก ซึ่ง TMTM ที่มีอยู่นี้อาจเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของซิลิกา ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาต่อกันลดลง ซิลิกาจึงแตกตัวได้ดีขึ้น ส่งผลให้ความหนืดของยางมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)

รูปที่ 4.2 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความหนืดมูนนี่

(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

เมื่อพิจารณาในระบบการคงรูปแบบเดียวกัน พบว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนเข้าไปในยางคอมพาวด์ปริมาณ 2 phr จะทำให้ยางมีค่าความหนืดมูนนี่ลดลงอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาหรือมีแรงดึงดูดต่อกันลดลง[38] ซิลิกาจึงสามารถแตกตัวเนื้อยางได้ดีขึ้น รวมทั้งตัวไซเลนอาจเป็นสารเพิ่มความนิ่มด้วย

เมื่อพิจารณาผลของสารคู่ควบไซเลน Si-69 และ Si-264 ต่อค่าความหนืดมูนนี่ของยางคอมพาวด์ พบว่า ค่าความหนืดมูนนี่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือ ยางคอมพาวด์สูตรที่ใช้ Si-264 จะมีค่าความหนืดมูนนี่ต่ำกว่ายางคอมพาวด์สูตรที่ใช้ Si-69 เนื่องจาก Si-264 มีสูตรโครงสร้างที่เล็กกว่า จึงเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวซิลิกาได้ดีกว่า ด้วยเหตุนี้ Si-264 จึงช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกาได้มากกว่า Si-69 ทำให้ยางคอมพาวด์ที่ได้มีค่าความหนืดมูนนี่ต่ำกว่า

เมื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคปฐมภูมิของซิลิกาต่อค่าความหนืดมูนนี่ จะพบว่า ยางคอมพาวด์แต่ละสูตรที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN2 เป็นสารตัวเติมเสริมแรงจะมีความหนืดมูนนี่ต่ำกว่ายางคอมพาวด์สูตรที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN3 เนื่องจาก Ultrasil VN2 มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิใหญ่กว่าและมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่า จึงเกิดอันตรกิริยากับยางได้น้อยกว่า (มีปริมาณยางที่ไหลได้สูงกว่า)

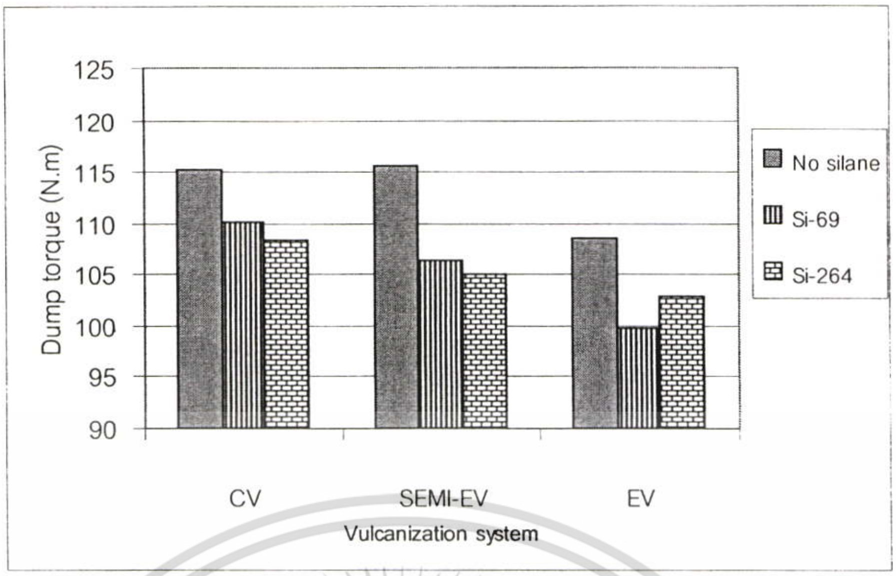
4.1.1.3 ค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ

เมื่อเปรียบเทียบผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าแรงบิดสุดท้ายผสมเสร็จ พบว่า ระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV จะให้ค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV ทั้งนี้เนื่องจากในระบบการคงรูปแบบ EV มีสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TMTM อยู่ในปริมาณมาก ซึ่ง TMTM สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของ ซิลิกา ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาต่อกันลดลง นอกจากนี้ เนื่องจากอุณหภูมิในการผสมช่วงสุดท้ายสูงประมาณ 100 °C จึงอาจทำให้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป TMTM เกิดการหลอมเหลวและทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความนิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.3

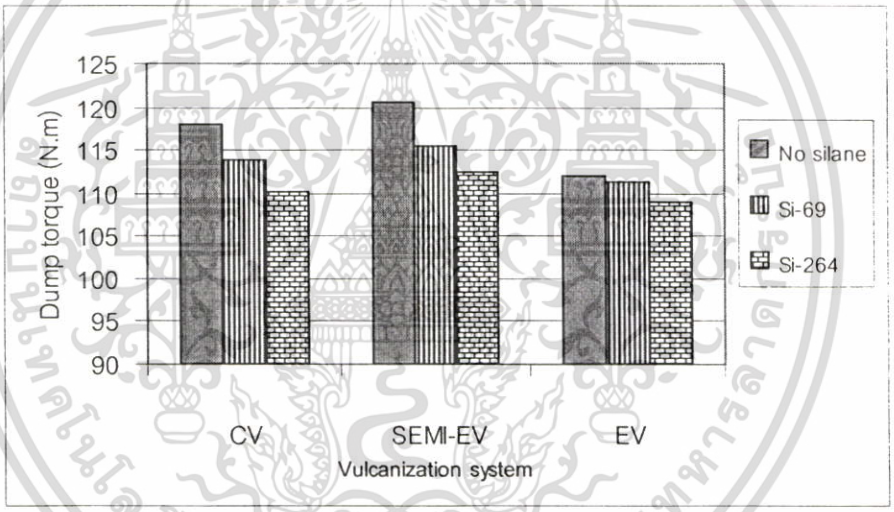
เมื่อพิจารณาในระบบการคงรูปแบบเดียวกัน พบว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนเข้าไปในยางคอมพาวด์จะทำให้ค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จลดลง เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาต่อกันลดลง ซิลิกาจึงสามารถแตกตัวในเนื้อยางได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของสารคู่ควบไซเลน Si-69 และ Si-264 ต่อค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ พบว่า ในยางคอมพาวด์สูตรที่ใช้ Si-264 จะมีค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จต่ำกว่ายางคอมพาวด์สูตรที่ใช้ Si-69 ทั้งนี้เนื่องจาก Si-264 สามารถลดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกาได้มากกว่า Si-69 ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วก่อนหน้านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)

รูปที่ 4.3 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ

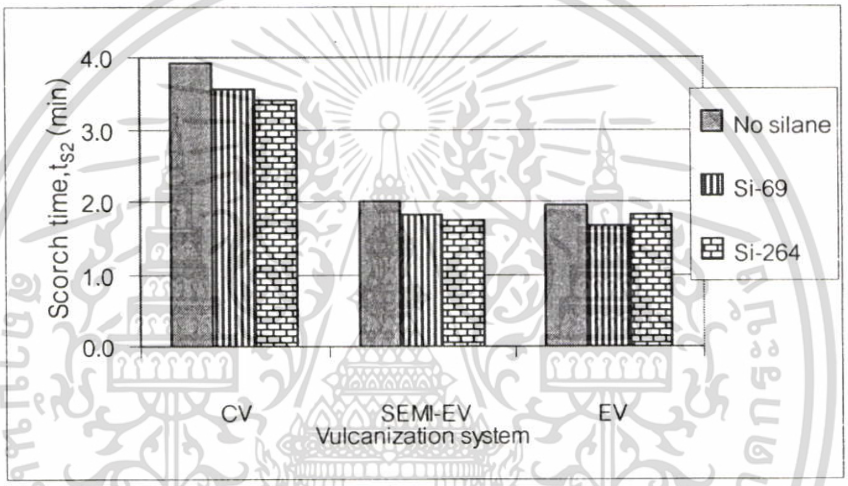
(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

นอกจากนี้ รูปที่ 4.3 ยังชี้ให้เห็นว่าขนาดอนุภาคปฐมภูมิของซิลิกายังมีอิทธิพลต่อค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ กล่าวคือ ยางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN2 จะมีแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จต่ำกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN3 ทั้งนี้เนื่องจาก Ultrasil VN2 มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิใหญ่กว่าและมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่า ด้วยเหตุนี้ Ultrasil VN2 จึงเกิดอันตรกิริยาโดยรวมกับยางได้ต่ำกว่า Ultrasil VN3

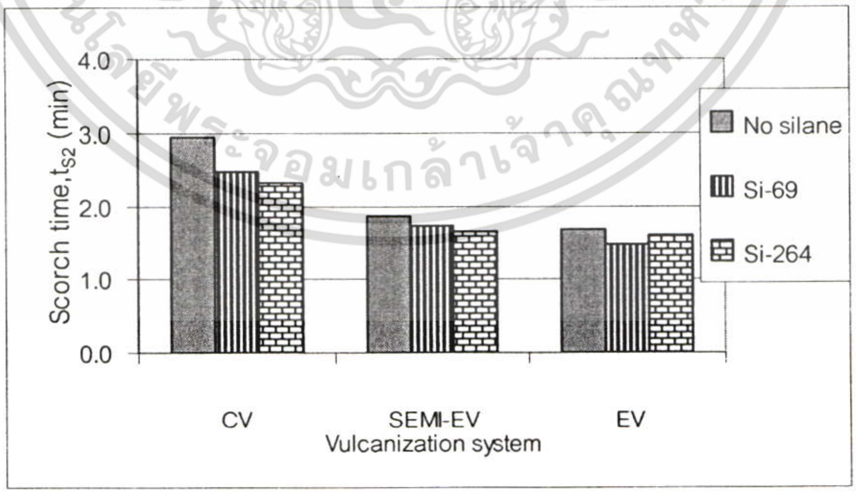
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.4 เวลาในการเริ่มสุกตัวของยาง (t_{S2}) และเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม (tc_{90})

เมื่อพิจารณาผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อเวลาในการเริ่มสุกตัวของยาง พบว่า ระบบการคงรูปแบบ EV จะทำให้ยางมีเวลาในการเริ่มสุกตัวใกล้เคียงกับระบบการคงรูปแบบ Semi-EV และต่ำกว่าระบบ CV ทั้งนี้เนื่องจากในระบบการคงรูปแบบ CV มีปริมาณ TMTM ต่ำมากเพียงแค่ 0.1 phr ซึ่ง TMTM ที่มีอยู่ในปริมาณเล็กน้อยนี้อาจถูกดูดซับบนพื้นผิวของซิลิกาทั้งหมด ดังนั้นในเนื้อยางจึงอาจมีเพียง TBBS ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาคงรูป และเนื่องจาก TBBS เป็นสารเร่งปฏิกิริยาคงรูปแบบ (Delayed action) ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ยางมีค่าระยะเวลาในการเริ่มสุกตัวสูงกว่าระบบอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



(1)

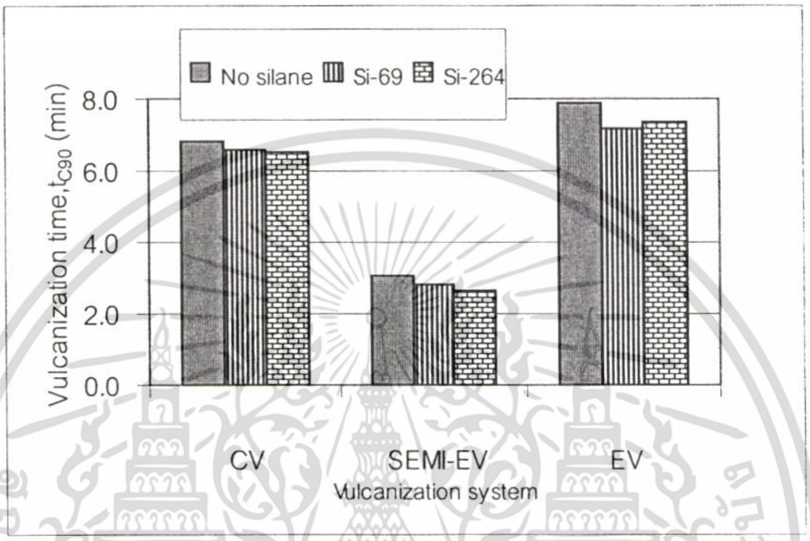


(2)

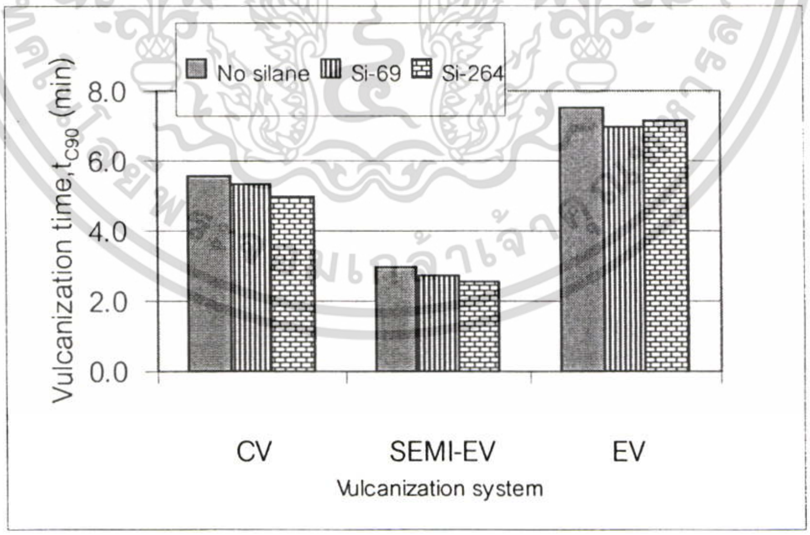
รูปที่ 4.4 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อเวลาในการเริ่มสุกตัวของยาง (1)Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มีลิขสิทธิ์เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาในระบบการคงรูปแบบเดียวกัน พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนส่งผลทำให้เวลาในการเริ่มสุกตัวของยางและเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสมลดต่ำลง[39] เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของซิลิกากลายเป็นหมู่ไซลอกเซนที่เสถียร ทำให้หมู่ไซลานอลบนผิวของซิลิกามีปริมาณลดลง ซิลิกาจึงดูดซับสารกระตุ้นปฏิกิริยาคงรูปและสารเร่งปฏิกิริยาคงรูปได้น้อยลง ทำให้ปฏิกิริยาคงรูปเกิดได้เร็วขึ้น



(1)



(2)

รูปที่ 4.5 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผลของสารคู่ควบไซเลน Si-69 และ Si-264 ต่อเวลาในการเริ่มสุกตัวและเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสมของยางคอมพาวด์ (ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5) พบว่า Si-264 จะให้ค่าดังกล่าวต่ำกว่า Si-69 ในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ทั้งนี้เนื่องจาก Si-264 มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดที่ต่ำกว่า จึงเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลของซิลิกาได้ง่ายกว่า ด้วยเหตุนี้ Si-264 จึงทำให้พื้นผิวของซิลิกามีปริมาณของหมู่ไซลานอลต่ำกว่า Si-69 ส่งผลให้ซิลิกาดูดซับสารตัวเร่งและสารกระตุ้นปฏิกิริยาได้น้อยลง ยางจึงมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ในระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งเป็นระบบที่มีกำมะถันอิสระน้อยมาก กลับพบว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้ Si-69 มีค่าเวลาในการเริ่มสุกตัวของยางและเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสมต่ำกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้ Si-264 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางได้ในระหว่างกระบวนการอบคงรูป (เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า "Sulfur contribution effect")[6] ทั้งนี้เป็นที่ทราบกันดีว่า Si-69 มีกำมะถันอยู่ในโครงสร้างโมเลกุลสูงถึง 4 อะตอมซึ่งกำมะถันเหล่านี้สามารถถูกปลดปล่อยให้แก่ยางได้ในระหว่างกระบวนการคงรูป โดยเฉพาะในระบบที่มีสารตัวเร่งปฏิกิริยายิ่งยวดในปริมาณมาก แต่สำหรับ Si-264 ซึ่งมีปริมาณกำมะถันเพียง 1 อะตอมอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล จึงไม่สามารถให้กำมะถันอิสระกับระบบได้ในระหว่างกระบวนการคงรูป ด้วยเหตุนี้ Si-69 จึงทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาคงรูปได้เร็วกว่า Si-264 ในระบบการคงรูปแบบ EV

รูปที่ 4.5 แสดงผลของระบบการคงรูปต่อเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม จากรูปพบว่า เวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสมของระบบการคงรูปแบบ Semi-EV<CV<EV ตามลำดับ สาเหตุที่ระบบการคงรูป Semi-EV มีเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสมต่ำที่สุด เนื่องมาจากในระบบการคงรูปแบบ Semi-EV มีการใส่สารเร่งปฏิกิริยาคงรูป TBBS 1 phr และ TMTM 0.8 phr ซึ่งถึงแม้ว่า TMTM บางส่วนอาจถูกดูดซับไปที่พื้นผิวของซิลิกา แต่ในระบบก็ยังมีปริมาณ TMTM มากพอที่จะสามารถเข้าไปทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาคงรูปได้ โดยมี TBBS เป็นสารเร่งปฐมภูมิ และ TMTM เป็นสารเร่งทุติยภูมิ ซึ่งสารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดดังกล่าวจะทำหน้าที่ร่วมกันแบบเสริม (Synergistic effect) จึงทำให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปของยางในระบบการคงรูปแบบ Semi-EV สูงกว่าระบบการคงรูปแบบอื่น ๆ ส่วนในระบบการคงรูปแบบ CV ซึ่งมีระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ Semi-EV ก็เนื่องมาจากในระบบนี้มีการเติม TBBS 1 phr และมีกำมะถัน 2.5 phr แต่เนื่องจากในระบบนี้มีการเติม TMTM ลงไปในปริมาณที่น้อยมาก (0.1 phr) ด้วยเหตุนี้ จึงอาจมีความเป็นไปได้ที่ว่า TMTM ที่เติมลงไปเกือบทั้งหมดอาจถูกดูดซับที่พื้นผิวของซิลิกา ทำให้ในระบบมี TMTM ปริมาณน้อยเกินไปที่จะไปทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาคงรูปร่วมกับ TBBS ได้ ดังนั้นระบบการคงรูปแบบ CV จึงมีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาคงรูปต่ำกว่าระบบการคงรูปแบบ Semi-EV แม้ว่าในระบบการคงรูปแบบนี้จะมีปริมาณกำมะถันอิสระอยู่มากกว่าก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูป

4.1.2.1 ค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย

เป็นที่ทราบกันดีว่าค่าอัตราส่วนการบวมตัว (Swelling ratio) ของยางคงรูปในตัวทำละลายมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยง กล่าวคือ ถ้ายางมีค่าอัตราส่วนของการบวมตัวในตัวทำละลายต่ำแสดงว่ายางคงรูปสูตรนั้นมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสามารถหาได้จากสมการฟลอรี-ไรเนอร์ ดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยง} = -1/2V_s[(\ln(1-V_r)+V_r+\chi_1 V_r^2)/(V_r^{1/3}-V_r/2)]$$

V_r = สัดส่วนเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ในน้ำหนักยางหลังการบวมตัว

V_s = ปริมาตรเชิงโมลของตัวทำละลาย

χ_1 = ค่าตัวแปรอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และตัวทำละลาย

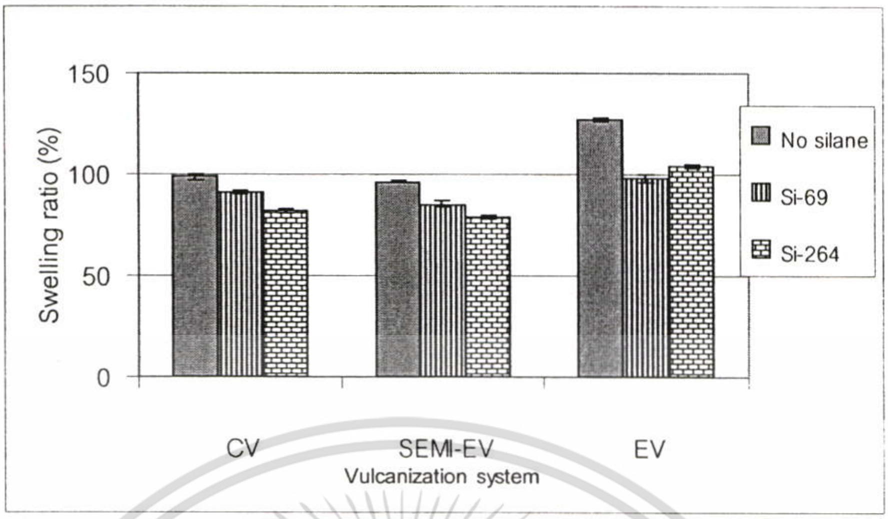
แต่เนื่องจากเป็นวิธีที่มีความซับซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่าอัตราส่วนการบวมตัวในตัวทำละลายเป็นค่าเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในแต่ละสูตรยางแทน

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าอัตราส่วนการบวมตัวในตัวทำละลาย พบว่า ระบบการคงรูปแบบ EV มีค่าอัตราส่วนการบวมตัวในตัวทำละลายสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ตามลำดับ สาเหตุที่ยางคงรูปในระบบการคงรูปแบบ EV มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำที่สุด ก็เนื่องจากในระบบการคงรูปแบบ EV นั้นมีการเติมกำมะถันอิสระเพียง 0.2 phr การมีกำมะถันอิสระในปริมาณที่น้อยมาก ประกอบกับ TMTM ที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่สามารถให้กำมะถันแก่ระบบได้ในระหว่างกระบวนการคงรูป ดังนั้น ยางคงรูปที่ได้จากระบบการคงรูปแบบ EV จึงมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำกว่ายางคงรูปที่ได้จากระบบการคงรูปแบบอื่น ๆ

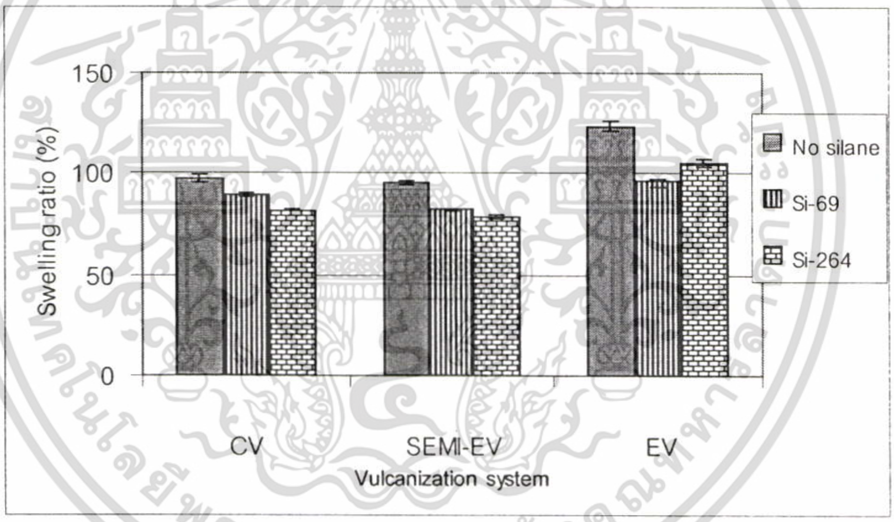
เมื่อพิจารณาในระบบการคงรูปแบบเดียวกัน พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนเข้าไปในยางคงรูป จะทำให้ค่าการบวมตัวในตัวทำละลายลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของซิลิกา จึงช่วยลดการดูดซับสารกระตุ้นและสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป ทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของ Si-69 และ Si-264 ต่อค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย พบว่า ในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ซึ่งเป็นระบบที่มีกำมะถันมากพอ ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 จะมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 เล็กน้อย เนื่องจาก Si-264 จะช่วยลดการดูดซับสารตัวเร่งและกระตุ้นปฏิกิริยาคงรูปได้มากกว่า Si-69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)

รูปที่ 4.6 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

อย่างไรก็ดี ในระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งเป็นระบบการคงรูปที่มีกำมะถันอิสระอยู่ในปริมาณที่ต่ำมาก กลับพบว่า ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของการให้กำมะถันของ Si-69 ซึ่งจะเกิดได้ดีในระบบการคงรูปแบบ EV เพราะในระบบนี้นอกจากจะมีกำมะถันอิสระอยู่น้อยมากแล้ว ยังมีปริมาณของสารตัวเร่งปฏิกิริยายิ่งยวด (TMTM) ในปริมาณที่สูงมากอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

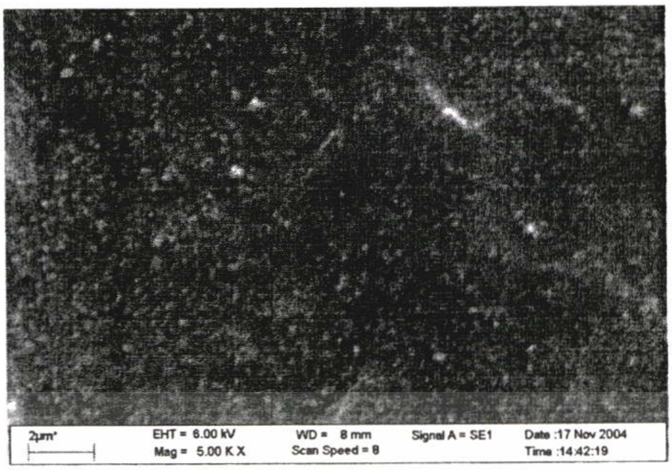
4.1.2.2 ระดับในการแตกตัวของซิลิกา

รูปที่ 4.7 – 4.12 แสดงผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อระดับในการแตกตัวของซิลิกา เมื่อพิจารณาผลของสารคู่ควบไซเลนต่อระดับในการแตกตัวของซิลิกา พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนเข้าไปในยางคอมพาวด์จะทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนมีหมู่อัลคอกซีที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา จึงส่งผลให้ซิลิกามีอันตรกิริยาหรือมีแรงดึงดูดต่อกันลดลง ซิลิกาจึงสามารถแตกตัวและกระจายตัวในเนื้อยางได้ดียิ่งขึ้น และเนื่องจาก Si-264 สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลได้ดีกว่า Si-69 ดังนั้น จึงพบว่า Si-264 จะให้ระดับในการแตกตัวของซิลิกาที่สูงกว่า

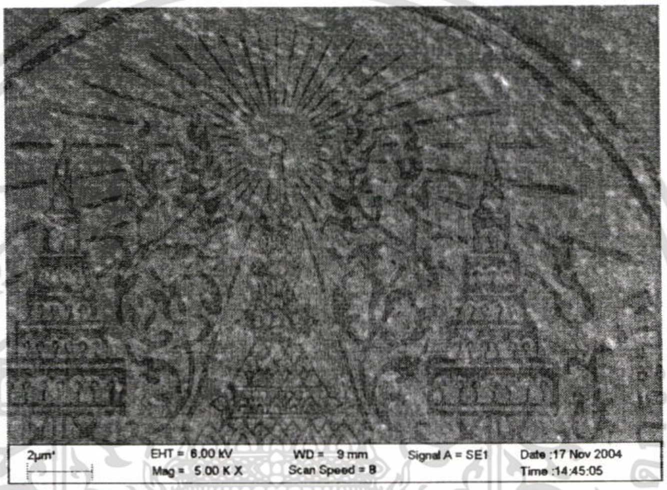
เมื่อพิจารณาผลของขนาดของซิลิกาต่อระดับในการแตกตัวของซิลิกา พบว่า ซิลิกา Ultrasil VN2 ซึ่งมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิใหญ่กว่า (มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่า) ดังนั้น เมื่อเติมลงในยางจึงทำให้ยางเข้าไปโอบล้อมซิลิกาได้เร็ว (เกิด Wetting process ได้ง่าย) ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องทำให้กระบวนการกระจายตัว (Distribution process) และกระบวนการแตกตัว (Dispersion process) เกิดขึ้นได้ดีกว่า (เมื่อเทียบกับซิลิกา Ultrasil VN3 ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

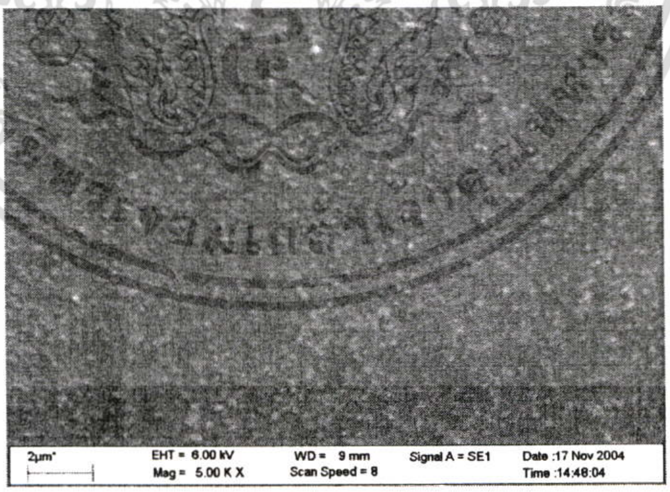
(1)
ไม่ใส่สารคู่ควบ
ไซเลน



(2)
ใส่ Si-69



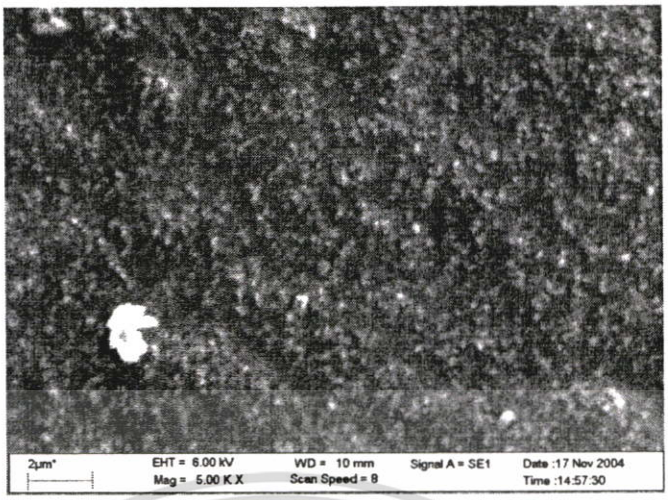
(3)
ใส่ Si-264



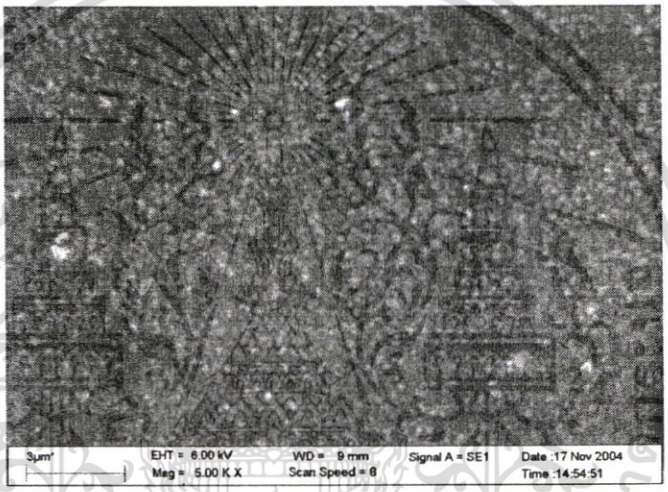
รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของ Ultrasil VN2 ในระบบการคงรูปแบบ CV
ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1)
ไม่ใส่สารคู่ควบไซเลน



(2)
ใส่ Si-69

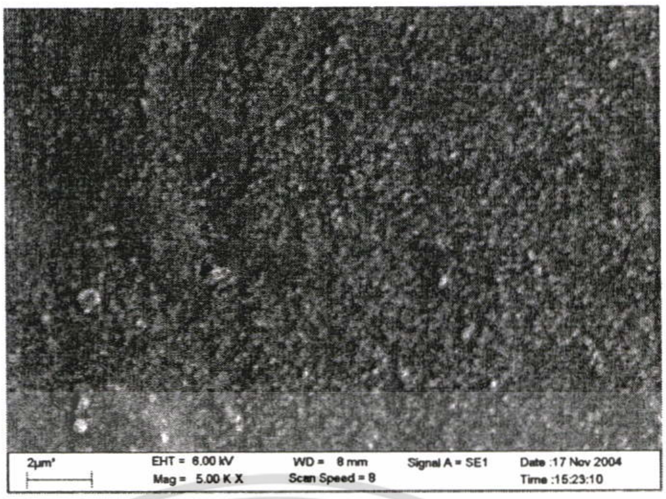


(3)
ใส่ Si-264

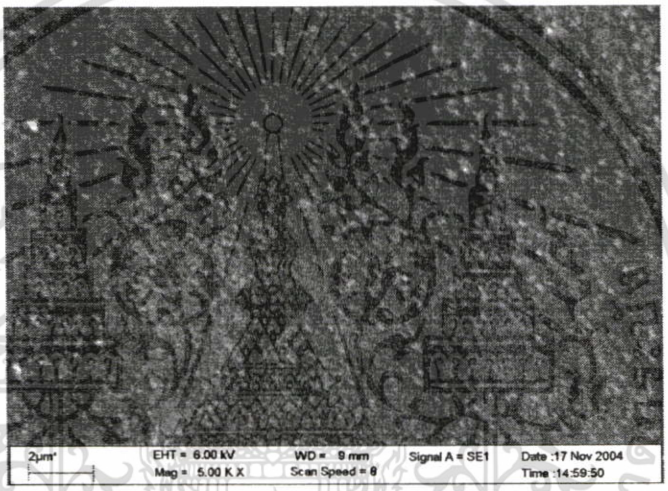
รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ของ Ultrasil VN3 ในระบบการคงรูปแบบ CV ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

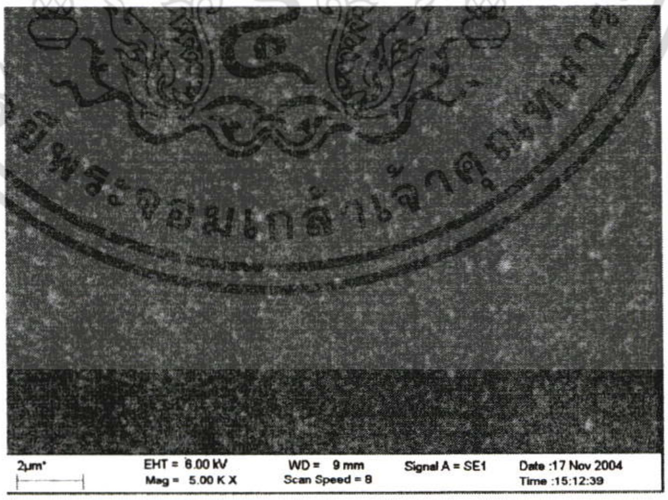
(1)
ไม่ใส่สารคู่ควบ
ไซเลน



(2)
ใส่ Si-69



(3)
ใส่ Si-264



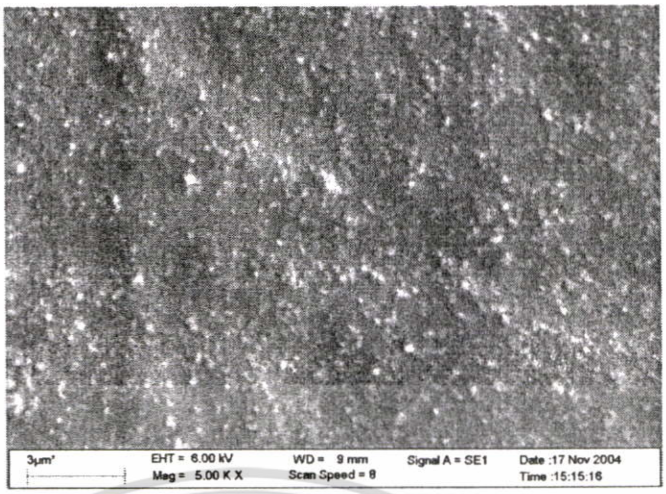
รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของ Ultrasil VN 2 ในระบบการคงรูปแบบ Semi-EV
ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1)

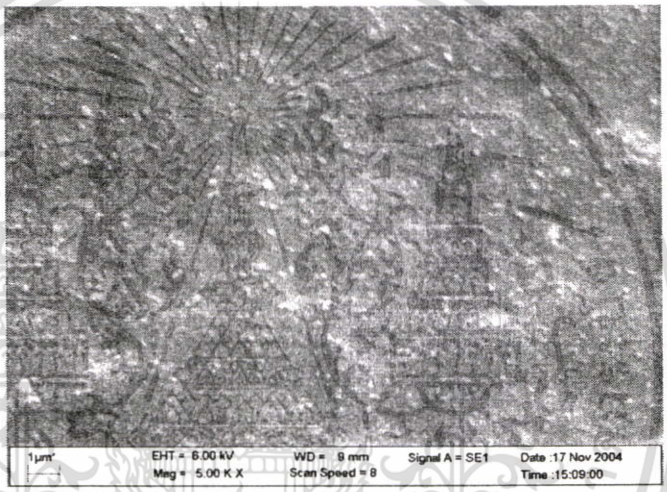
ไม่ใส่สารคู่ควบ

ไซเลน



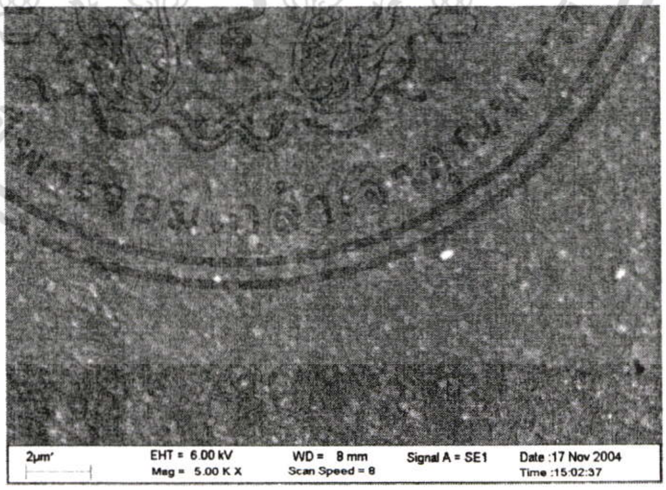
(2)

ใส่ Si-69



(3)

ใส่ Si-264



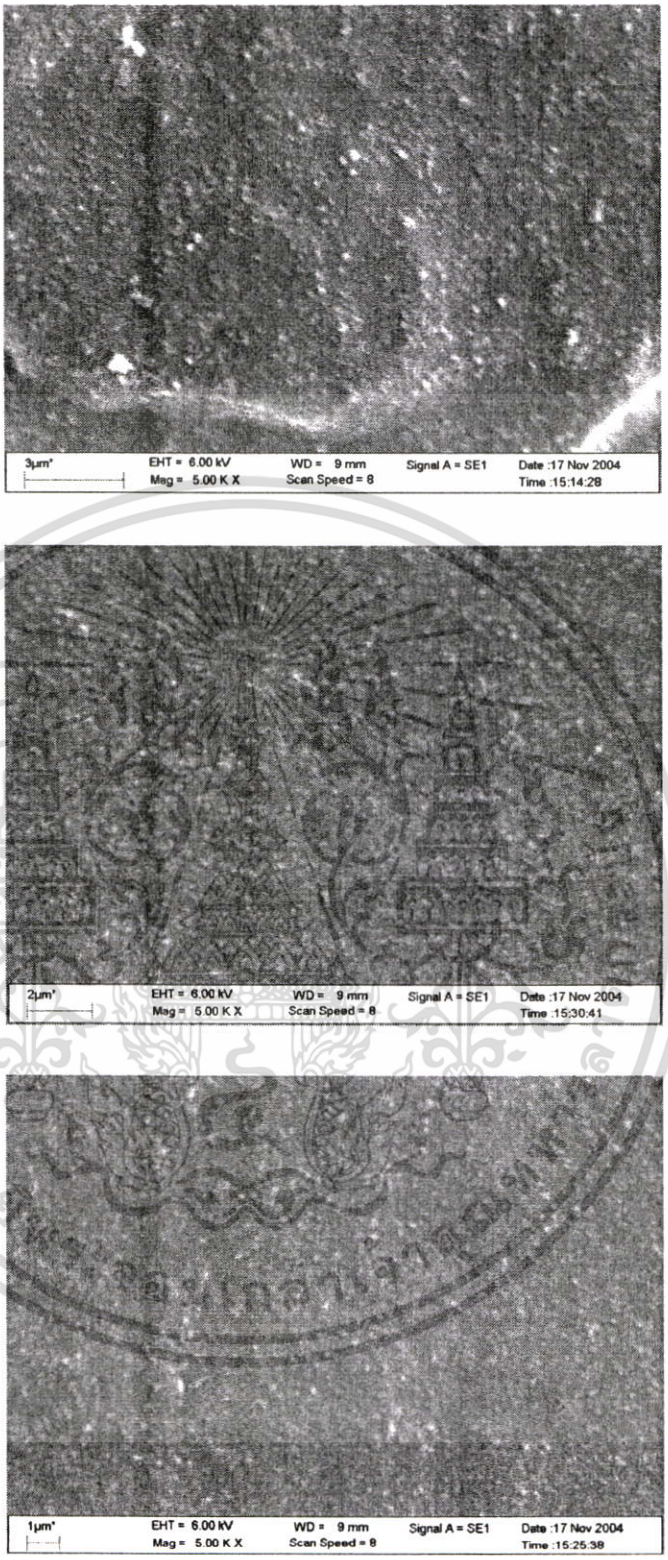
รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของซิลิกา Ultrasil VN 3 ในระบบการคงรูปแบบ Semi-EV ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) ไม่ใส่สารคู่ควบไซเลน

(2) ใส่ Si-69

(3) ใส่ Si-264



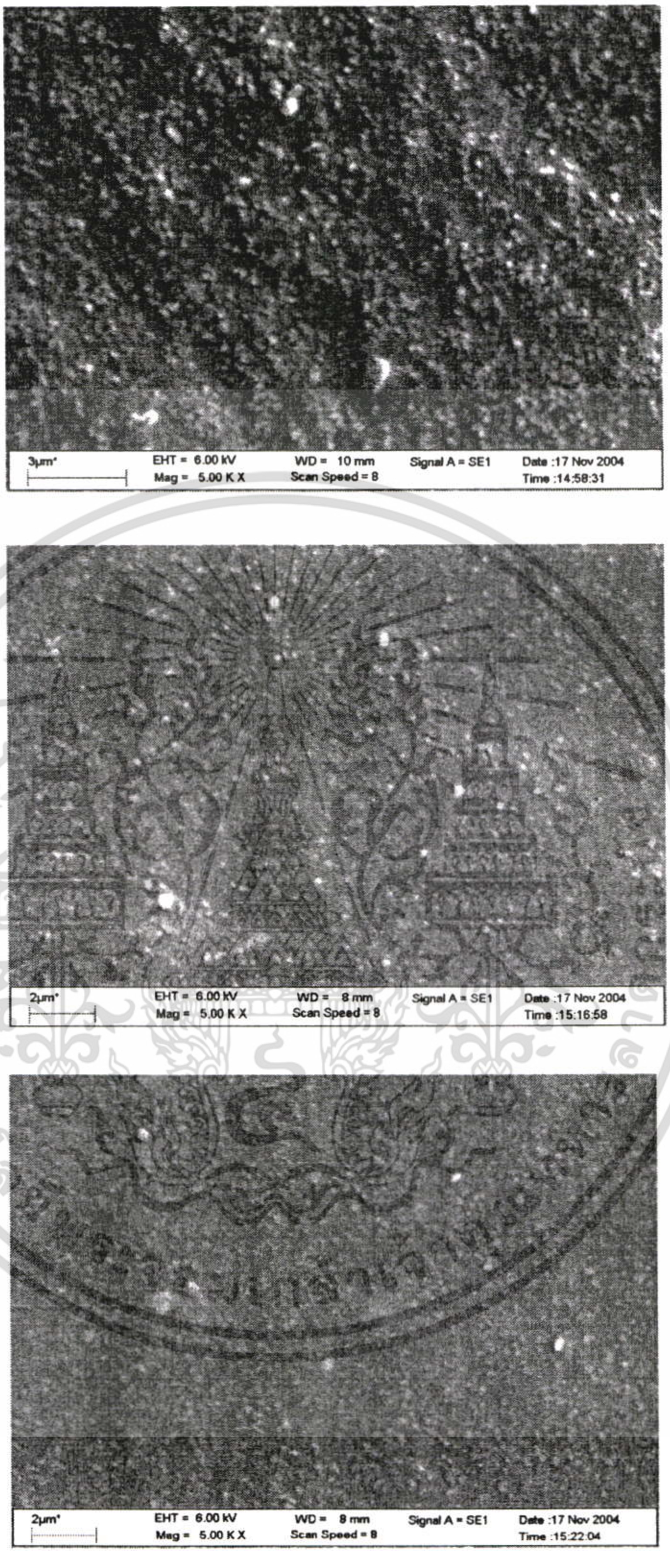
รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของซิลิกา Ultrasil VN2 ในระบบการคงรูปแบบ EV ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1)
ไม่ใส่สารคู่ควบไซเลน

(2)
ใส่ Si-69

(3)
ใส่ Si-264



รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของซิลิกา Ultrasil VN 3 ในระบบการคงรูปแบบ EV ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

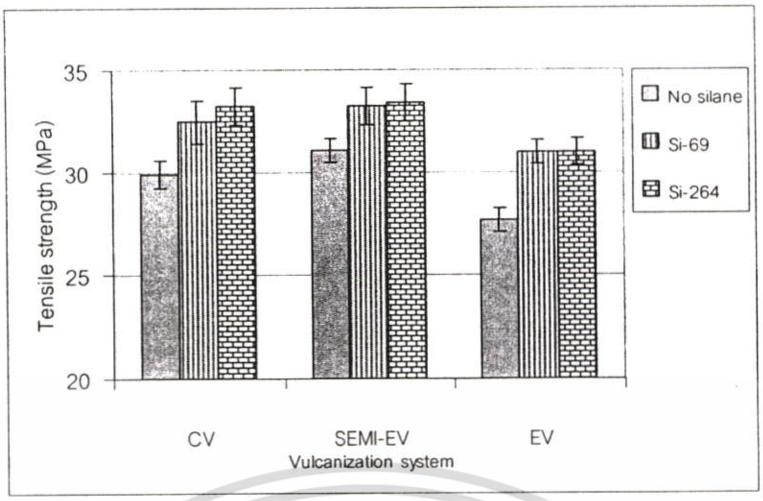
4.1.2.3 สมบัติแรงดึง

รูปที่ 4.13 แสดงผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแรงดึง ในทางทฤษฎีแล้วเมื่อยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเท่ากัน ระบบการคงรูปแบบ CV จะให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ Semi-EV เนื่องจากมีชนิดของสายโซ่การเชื่อมโยงเป็นแบบพอลิซัลฟิดิก ซึ่งการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกสามารถเกิดการเปลี่ยนรูปแบบสายโซ่ (Reform) ได้เมื่อถูกแรงดึง ทำให้สามารถรับแรงดึงได้สูงกว่า แต่ในการทดลองนี้ กลับพบว่าระบบการคงรูปแบบ Semi-EV มีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกับระบบการคงรูปแบบ CV ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในการทดลองนี้ ระบบการคงรูปแบบ Semi-EV มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ CV เล็กน้อย (ดูรูปที่ 4.7ประกอบ) และเนื่องจากทั้งระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ต่างก็มีชนิดของสายโซ่การเชื่อมโยงเป็นแบบพอลิซัลฟิดิกและความหนาแน่นในการเชื่อมโยงปริมาณมากกว่าระบบการคงรูปแบบ EV ดังนั้นยางคงรูปที่ได้จึงมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่ายางที่ได้จากการคงรูปด้วยระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมโยงแบบมอนอซัลฟิดิกและความหนาแน่นในการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า

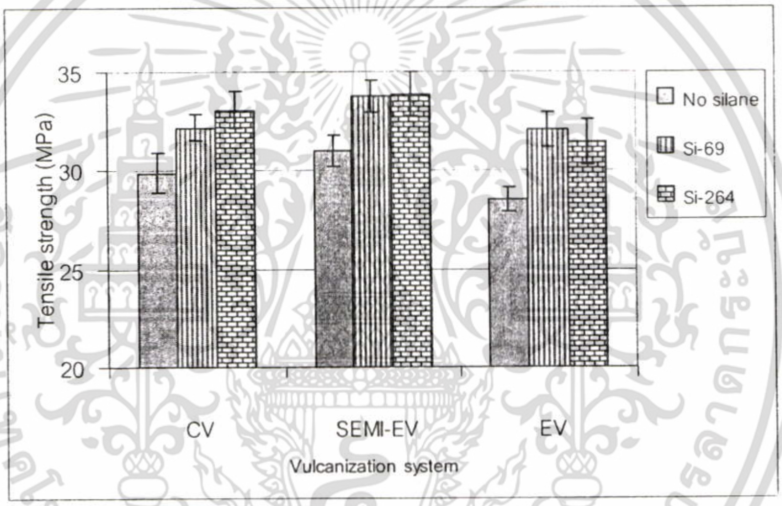
เมื่อพิจารณาในระบบการคงรูปแบบเดียวกัน พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปนอกจากจะช่วยให้ซิลิกาแตกตัวได้ดีขึ้นแล้ว ยังทำให้ซิลิกากับยางเกิดอันตรกิริยากันได้มากขึ้น ดังนั้น การใส่สารคู่ควบไซเลนลงไปจึงทำให้ยางมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้ Si-69 กับ Si-264 ต่อค่าความแข็งแรงดึง พบว่า ในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ซึ่งเป็นระบบที่มีกำมะถันมากพอในการคงรูป ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 เนื่องจาก Si-264 ช่วยในการแตกตัวของซิลิกาได้ดีกว่า รวมทั้งให้ยางคงรูปที่มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 อย่างไรก็ตาม สำหรับระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งเป็นระบบการคงรูปที่มีกำมะถันน้อยมาก ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 กลับมีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 ทั้งนี้เนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางในระหว่างการคงรูปได้ ทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดได้ดีกว่า ซึ่งอาจทำให้เกิดการคงรูปผ่านการเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกมากขึ้นอีกด้วย จึงส่งผลให้ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)

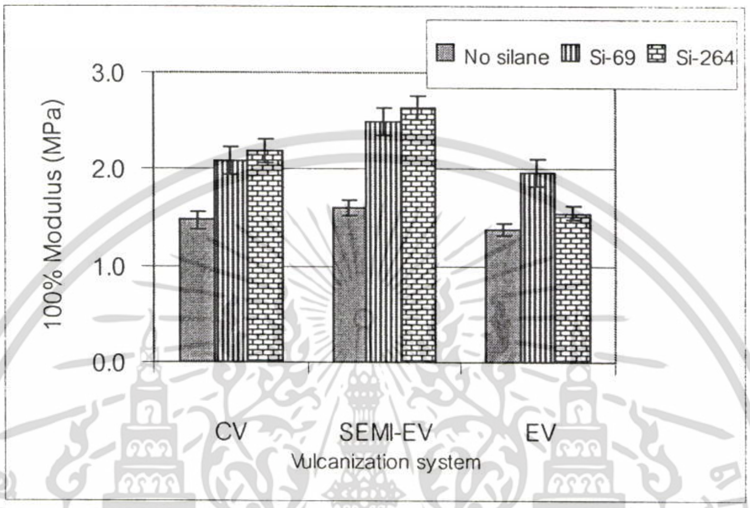
รูปที่ 4.13 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแรงดึง
(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดของซิลิกาต่อค่าความแข็งแรงดึง พบว่า ซิลิกาทั้ง 2 ชนิดให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน แม้ในทางทฤษฎีแล้วซิลิกา Ultrasil VN2 ซึ่งเป็นซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิใหญ่ (มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย) ควรจะมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่ายางสูตรที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN3 แต่เนื่องจากในการทดลองนี้ Ultrasil VN2 มีระดับการแตกตัวที่สูงกว่า Ultrasil VN3 ซึ่งผลของขนาดอนุภาคปฐมภูมิอาจจะหักล้างกันกับผลของระดับการแตกตัวของซิลิกา ด้วยเหตุนี้ ซิลิกาทั้ง 2 ชนิดจึงให้ค่าความแข็งแรงดึงที่ใกล้เคียงกัน

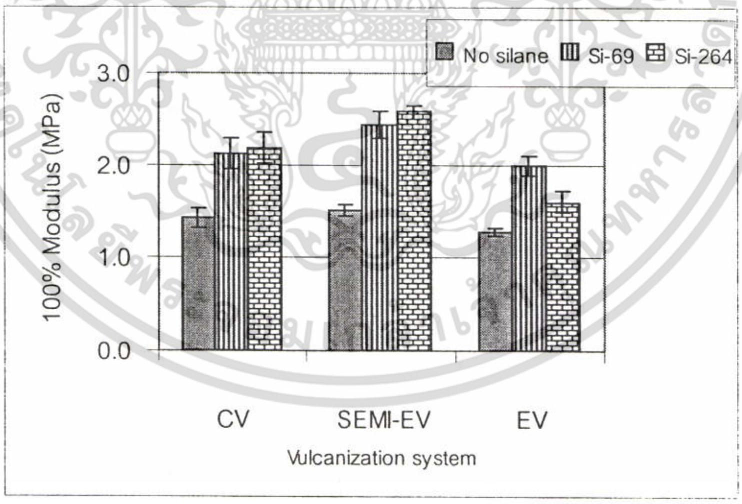
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 100 % มอดุลัส

รูปที่ 4.14 แสดงผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่า 100 % มอดุลัส จากผลการทดลองพบว่า ระบบการคงรูปแบบ Semi-EV จะให้ยางคงรูปที่มีค่ามอดุลัสสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ CV และ EV ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (ดูรูปที่ 4.7 ประกอบ)



(1)



(2)

รูปที่ 4.14 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่า 100 % มอดุลัส (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารคู่ควบไซเลนต่อค่า 100 % มอดุลัส พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะทำให้ยางมีค่ามอดุลัสสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยาง อีกทั้งยังเพิ่มค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงอีกด้วย

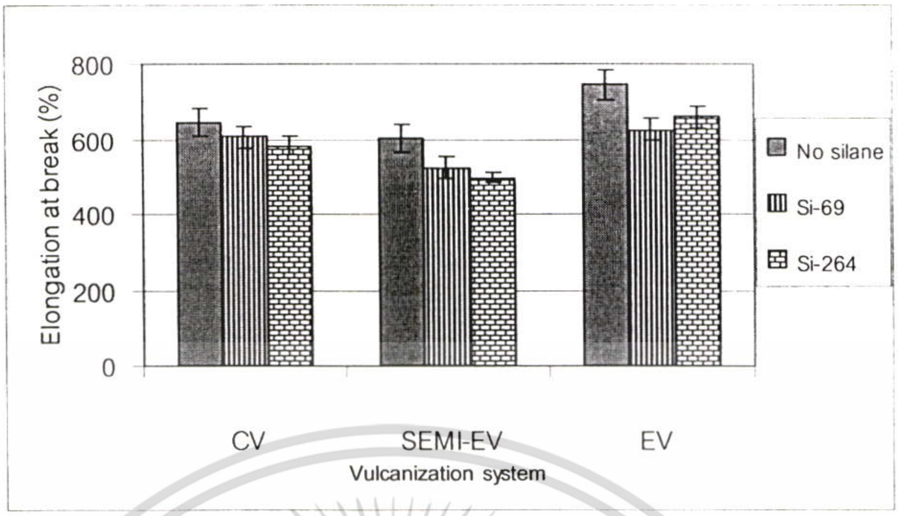
เมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้ Si-69 และ Si-264 ต่อค่า100 % มอดุลัสของยางคงรูป พบว่า ในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ซึ่งเป็นระบบที่มีกำมะถันมากพอ ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่ามอดุลัสต่ำกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 เนื่องจากโมเลกุลของ Si-69 มีขนาดใหญ่กว่า Si-264 จึงมีความเกะกะมากกว่าในการเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของซิลิกา ทำให้ยางกับซิลิกาเกิดอันตรกิริยากันได้น้อยกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 รวมทั้งยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 ก็มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 อีกด้วย ซึ่งตรงกันข้ามกับระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งเป็นระบบการคงรูปที่มีปริมาณกำมะถันอิสระน้อยมาก ในกรณีนี้ Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปได้ แต่ Si-264 ไม่สามารถให้กำมะถันได้ ดังนั้นในระบบการคงรูปแบบ EV ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 จึงเกิดปฏิกิริยาการคงรูปมากกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 ส่งผลทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่า ด้วยเหตุนี้ ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 จึงมีค่า 100 % มอดุลัสที่สูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264

- ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

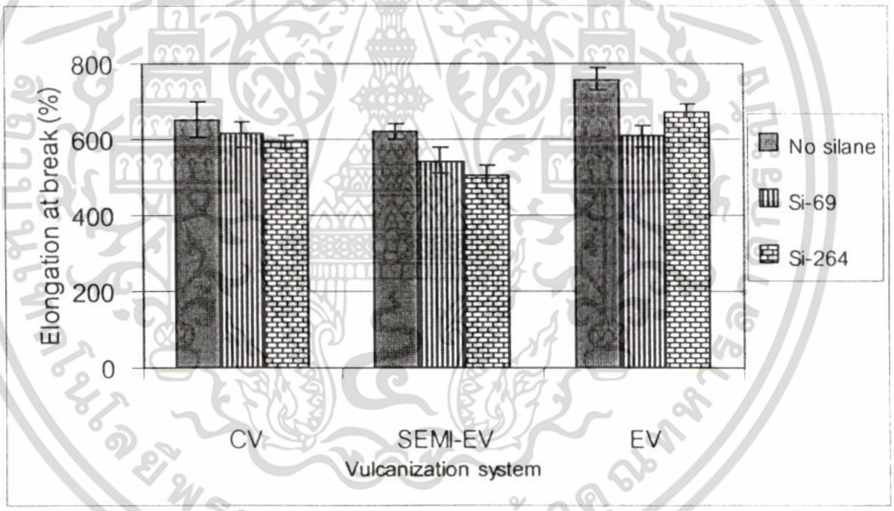
รูปที่ 4.15 แสดงผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด จากรูปพบว่า ระบบการคงรูปแบบ EV จะทำให้ยางมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยางที่ได้จากการคงรูปด้วยระบบการคงรูปแบบ EV จะมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและค่ามอดุลัสที่ต่ำกว่ายางที่ได้จากการคงรูปด้วยระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ตามลำดับ

เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนช่วยทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น รวมทั้งช่วยทำให้ซิลิกาเกิดอันตรกิริยากับยางได้มากขึ้น ดังนั้น การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจึงส่งผลให้ยางคงรูปมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดต่ำลง และจากการทดลองยังพบว่าในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 เนื่องจากความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่าต่ำกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)

รูปที่ 4.15 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

อย่างไรก็ตาม ในระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งเป็นระบบการคงรูปที่มีกำมะถันน้อยมาก ในระบบนี้ Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางในปฏิกิริยาการคงรูปได้ดี ทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดได้มากกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่าทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 ต่ำกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.4 ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติความทนทานต่อความร้อนของยาง จากตารางพบว่า ยางคงรูปมีค่าความแข็งแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนลดลงเพราะเกิดการออกซิเดชัน โดยระบบการคงรูปแบบ EV จะให้ยางคงรูปที่มีความทนทานต่อความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากมีพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบมอนอซัลฟิดิกที่มีพลังงานพันธะ C-S-C สูงที่สุดถึง 74 kcal/mol[19] ทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่การเชื่อมโยงยากกว่าระบบการคงรูปแบบ Semi-EV และ CV ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงดึงในระบบการคงรูปแบบ EV จึงลดลงเป็นเปอร์เซ็นต์น้อยที่สุด ส่วนในระบบการคงรูปแบบ CV ที่มีสายโซ่การเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิซัลฟิดิก ซึ่งมีพลังงานพันธะของ S-S ต่ำที่สุดเพียง 34 kcal/mol[19] ดังนั้นเมื่อได้รับความร้อนพันธะพอลิซัลฟิดิกจะเกิดการแตกตัวได้ง่ายกว่า ด้วยเหตุนี้ ค่าความแข็งแรงดึงของยางในระบบการคงรูปแบบ CV จึงลดต่ำลงเป็นเปอร์เซ็นต์สูงที่สุดหลังการบ่มเร่ง

เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติความทนทานต่อความร้อน พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะไม่มีผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าดังกล่าวแต่จากการเปรียบเทียบผลของการใช้ Si-69 กับ Si-264 ต่อสมบัติความทนทานต่อความร้อน พบว่า ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 จะมีความแข็งแรงดึงหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนต่ำกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางได้ ดังนั้นยางคงรูปที่ได้จึงมีพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกในสัดส่วนที่สูงกว่า Si-264 จึงทำให้ยางคงรูปมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนด้อยกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 เล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงของยางสูตรต่าง ๆ ก่อนและหลังการบ่มเร่ง

ชนิดของซิลิกา	ระบบการคงรูป	สารคู่ควบไซเลน	ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)		
			*ก่อนบ่มเร่ง	*หลังบ่มเร่ง	%ความต่าง
Ultrasil VN2	CV	-	29.89	28.15	-6.17
		Si-69	32.47	30.68	-5.83
		Si-264	33.25	31.49	-5.58
	Semi-EV	-	31.08	29.71	-4.62
		Si-69	33.28	31.73	-4.88
		Si-264	33.4	32.21	-3.69
	EV	-	27.68	27.13	-2.04
		Si-69	31.02	30.48	-1.78
		Si-264	30.99	30.45	-1.77
Ultrasil VN3	CV	-	28.87	28.08	-6.37
		Si-69	32.2	30.28	-6.35
		Si-264	33.09	31.39	-5.43
	Semi-EV	-	31.04	29.79	-4.21
		Si-69	33.78	32.46	-4.08
		Si-264	33.98	32.95	-2.85
	EV	-	28.53	28.23	-1.08
		Si-69	32.06	31.92	-0.45
		Si-264	31.42	31.26	-0.51

* หมายถึง การบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่า100% มอดุลัส หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่า100 % มอดุลัส ของยางคงรูปหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน จากตารางพบว่า ยางมีค่า100% มอดุลัสสูงขึ้น หลังจากที่ได้รับการบ่มเร่ง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อยิ่งให้ความร้อนกับยางคงรูปนานขึ้นก็จะเกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น ส่งผลให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น (เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "Post curing")

เมื่อเปรียบเทียบผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่า100 % มอดุลัส หลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่า ระบบการคงรูปแบบ CV จะมีค่า100 % มอดุลัสหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนสูงขึ้นเป็นเปอร์เซ็นต์ที่มากกว่าระบบการคงรูปแบบ Semi-EV และ EV อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมโยงของสายโซ่โมเลกุลในระบบการคงรูปแบบ CV ส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิซัลฟิดิก ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานานอาจทำให้พันธะพอลิซัลฟิดิกบางส่วนเกิดการแตกตัวและอาจเกิดการเชื่อมโยงกลับมาใหม่ในรูปของพันธะไดซัลฟิกดิกและมอนอซัลฟิดิก จึงทำให้ยางมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นหลังจากได้รับการบ่มเร่ง แต่ในกรณีของระบบการคงรูปแบบ Semi-EV และ EV ซึ่งมีการเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบไดซัลฟิดิกและ มอนอซัลฟิดิก ที่มีพลังงานพันธะสูงและทนต่อความร้อนได้ดีกว่า พันธะการเชื่อมโยงจึงเกิดการแตกและเกิดการกลับมาเชื่อมโยงใหม่ได้น้อยกว่า

เมื่อพิจารณาผลของการเติมสารคู่ควบไซเลนต่อค่า100 % มอดุลัสหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะไม่มีผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าดังกล่าว และยังพบว่า ยางคงรูปที่ใส่ Si-69 ทำให้ยางคงรูปเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า "Post curing" ได้มากกว่ายางคงรูปที่ไม่ใส่ไซเลนและยางคงรูปที่ใส่ Si-264 ทั้งนี้อาจเนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางในระหว่างกระบวนการคงรูป เมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้ Si-69 กับ Si-264 ต่อค่า100 % มอดุลัสหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่า Si-69 ทำให้ยางคงรูปเกิด "Post curing" ได้มากกว่า Si-264 ทั้งนี้อาจเนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางในระหว่างกระบวนการคงรูปได้ ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น (ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในระบบการคงรูปแบบ EV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่า 100 % มอดุลัสของยางสูตรต่าง ๆ ก่อนและหลังการบ่มเร่ง

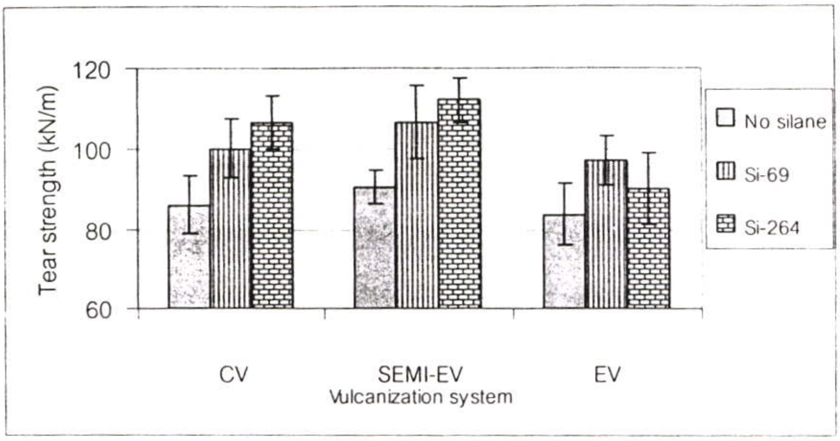
ชนิดของซิลิกา	ระบบการคงรูป	สารคู่ควบไซเลน	100 % มอดุลัส (MPa)		
			*ก่อนบ่มเร่ง	*หลังบ่มเร่ง	%ความต่าง
Ultrasil VN2	CV	-	1.47	1.81	18.90
		Si-69	2.09	2.64	20.76
		Si-264	2.19	2.62	16.31
	Semi-EV	-	1.60	1.77	9.60
		Si-69	2.49	2.79	10.67
		Si-264	2.63	2.81	6.49
	EV	-	1.37	1.45	5.52
		Si-69	1.97	2.21	10.99
		Si-264	1.55	1.65	6.06
Ultrasil VN3	CV	-	1.43	1.73	17.10
		Si-69	2.12	2.58	17.75
		Si-264	2.19	2.49	12.17
	Semi-EV	-	1.51	1.72	11.95
		Si-69	2.43	2.78	12.59
		Si-264	2.57	2.85	9.67
	EV	-	1.38	1.43	3.50
		Si-69	1.99	2.22	10.45
		Si-264	1.60	1.69	5.19

* หมายถึง การบ่มเร่งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

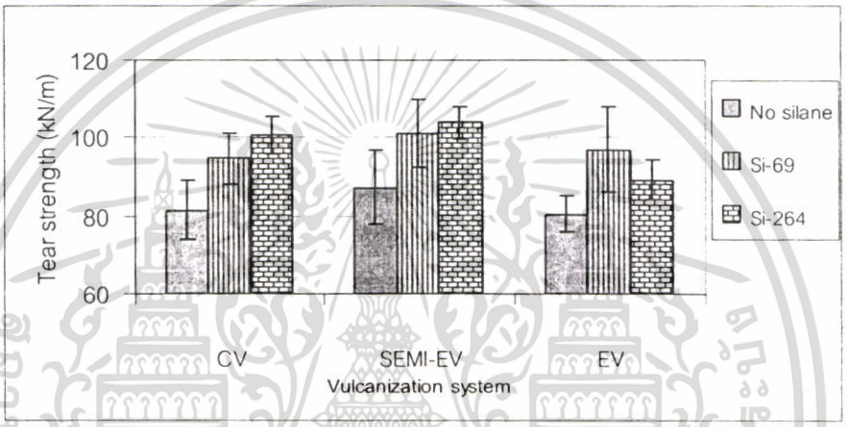
4.1.2.5 ค่าความแข็งแรงฉีกขาด

รูปที่ 4.16 แสดงผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาด จากรูปพบว่า ระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV จะให้ยางคงรูปที่มีค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV ทั้งนี้เนื่องจาก ระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV มีชนิดการเชื่อมโยงของสายโซ่เป็นแบบพอลิซัลฟิดิกในสัดส่วนที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระบบการคงรูปแบบ EV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)

รูปที่ 4.16 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (1)Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

เมื่อพิจารณาในระบบการคงรูปแบบเดียวกัน พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะทำให้ยางมีค่าความแข็งแรงต่อฉีกขาดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพราะสารคู่ควบไซเลนนอกจากจะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยางแล้ว ยังเพิ่มระดับในการแตกตัวของซิลิกาอีกด้วย จากผลการทดลองยังพบว่า สำหรับระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 จะมีค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาดต่ำกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 เนื่องจากยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีระดับการแตกตัวของซิลิกาต่ำกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 เล็กน้อย ส่วนในระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งเป็นระบบการคงรูปที่มีกำมะถันน้อยมาก ยางจึงมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำมาก ในกรณีนี้ ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 จะมีค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 ทั้งนี้เนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางได้ แต่ Si-264 ไม่สามารถให้กำมะถันได้ ดังนั้น ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 จึงมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่าและมีความเป็นไปได้ว่าอาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายโซ่การเชื่อมโยงเป็นแบบพอลิซัลฟิดิกและไดซัลฟิดิกในปริมาณที่มากกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264

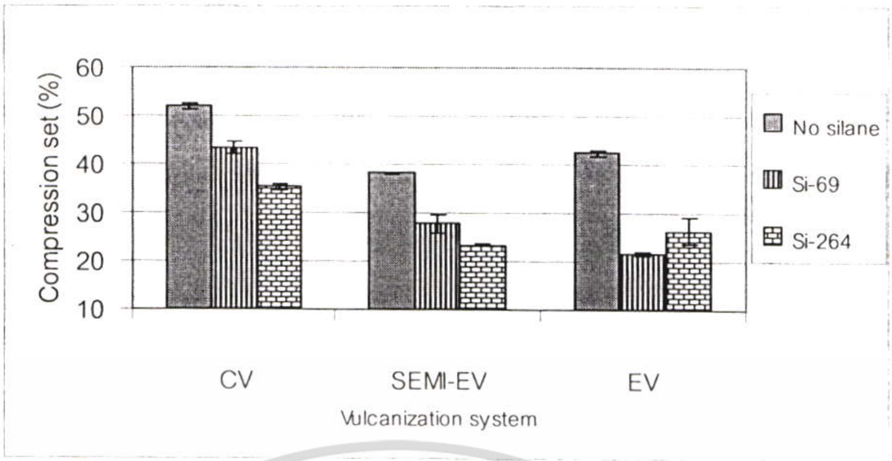
เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็กจะให้ค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงกว่าซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิใหญ่กว่า (ถ้ามีระดับการกระจายตัวและการแตกตัวที่เท่ากัน) แต่จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบผลของขนาดซิลิกาต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาด พบว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN2 กลับมีค่าความแข็งแรงฉีกขาดสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN3 เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุที่ว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN2 มีระดับของการแตกตัวที่สูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ซิลิกา Ultrasil VN3

4.1.2.6 ค่าการเสียรูปหลังการกดอัด

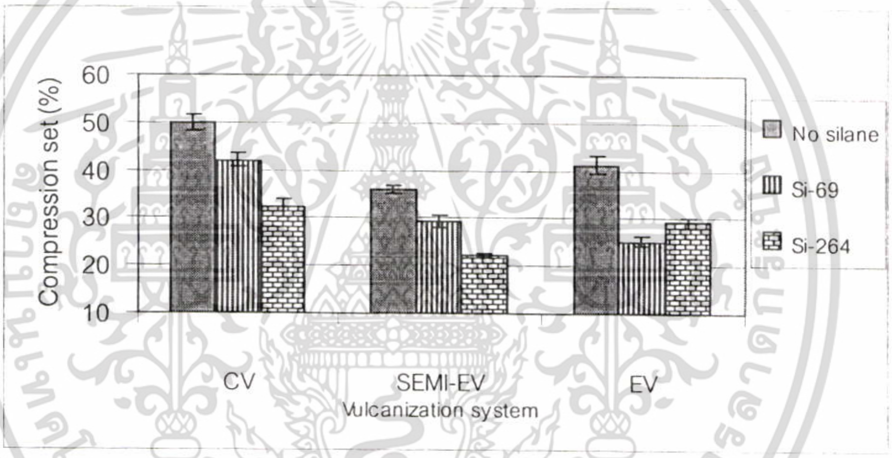
เมื่อศึกษาผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อการเสียรูปหลังการกดอัดของยางที่อุณหภูมิ 70° C พบว่า ระบบการคงรูปแบบ CV จะมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดสูงที่สุด เนื่องจาก การเชื่อมโยงของโมเลกุลส่วนใหญ่เป็นแบบพอลิซัลฟิดิก ซึ่งมีความแข็งแรงของพันธะต่ำ เมื่อได้รับความร้อนและการกดอัดเป็นเวลานาน ยางก็จะเกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย จึงส่งผลทำให้ยางคงรูปมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดสูง สำหรับระบบการคงรูปแบบ Semi-EV และ EV ที่ส่วนมากการเชื่อมโยงในสายโซ่โมเลกุลเป็นแบบ ไดซัลฟิดิกและมอนอซัลฟิดิกที่มีความแข็งแรงของพันธะสูง ยางที่ได้จากการคงรูปด้วยระบบเหล่านี้จึงทนต่อความร้อนได้ดี ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดต่ำกว่าระบบการคงรูปแบบ CV (ดังแสดงในรูปที่ 4.17)

เมื่อพิจารณาภายในระบบการคงรูปแบบเดียวกัน พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะทำให้การเสียรูปหลังการกดอัดจะมีค่าต่ำลงมาก ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนนอกจากจะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาแล้ว ยังทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ดียิ่งขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงอีกด้วย นอกจากนี้ในการทดลองยังพบว่า สำหรับระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 จะมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 เนื่องจาก Si-264 ทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ดีกว่า รวมทั้งยังทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่า Si-69 ซึ่งตรงกันข้ามกับในระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งเป็นระบบการคงรูปที่มีกำมะถันอิสระน้อยมาก ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 กลับมีค่าการเสียรูปหลังการกดอัดต่ำกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 ทั้งนี้เนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันอิสระในการคงรูปได้ จึงส่งผลทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(1)



(2)

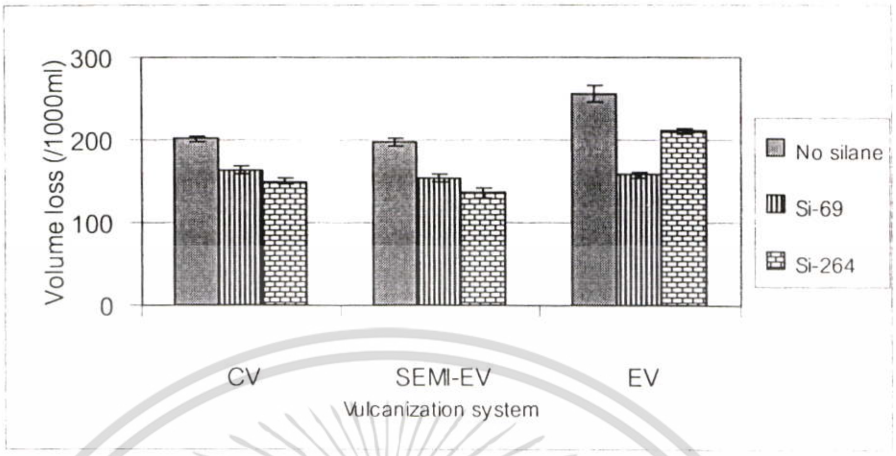
รูปที่ 4.17 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าการเสียรูปหลังการกดอัด (1)Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

4.1.2.7 ค่าความต้านทานต่อการขัดถู

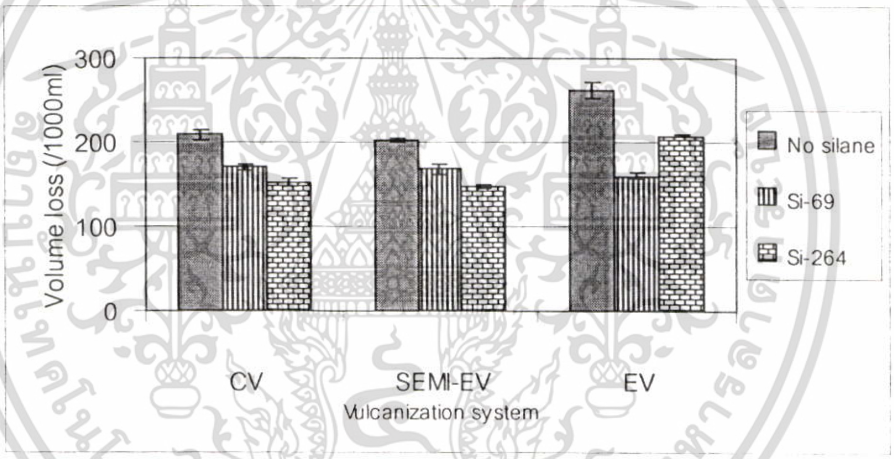
ค่าความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าปริมาตรที่สูญเสียไป (Volume loss) ในระหว่างการทดสอบ กล่าวคือ ถ้าปริมาตรที่สูญเสียไปมีค่าน้อย แสดงว่ายางมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูง รูปที่ 4.18 แสดงผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความต้านทานต่อการขัดถู จากรูปพบว่า ระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV จะให้ยางคงรูปที่มีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV เนื่องจากได้มีการรายงานว่าชนิดของการเชื่อมโยงไม่มีผลต่อค่าความต้านทานต่อการขัดถูอย่างมีนัยสำคัญ[14] ดังนั้น ค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่าจึงน่าเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ยางที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับการคงรูปด้วยระบบ CV และ Semi-EV มีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูงกว่ายางที่ได้รับการคงรูปด้วยระบบ EV



(1)



(2)

รูปที่ 4.18 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความต้านทานต่อการขัดถู

(1) Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

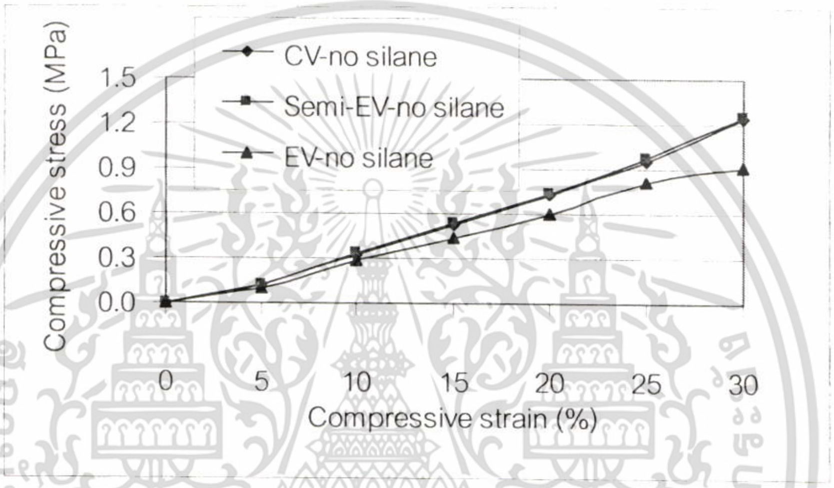
เมื่อพิจารณาในระบบการคงรูปแบบเดียวกัน พบว่า การเติมสารคู่ควบใส่ไซเลนลงไปทำให้ความต้านทานต่อการขัดถูของยางคงรูปมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะสารคู่ควบไซเลนช่วยทำให้ซิลิกากับยางมีอันตรกิริยาต่อกันสูงขึ้น และช่วยทำให้ซิลิกาแตกตัวได้มากขึ้น รวมทั้งยังช่วยเพิ่มค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงอีกด้วย และจากผลการทดลองยังพบว่า ในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่าความต้านทานต่อการขัดถูต่ำกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 เนื่องจากยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 ซึ่งจะแตกต่างจากในระบบการคงรูปแบบ EV ที่กลับพบว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Si-69 จะมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 ทั้งนี้เนื่องจากยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่าความหนาแน่นในการเชื่อมโยงที่สูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264

4.1.3.8 ค่าความแข็งแกร่งกดอัด

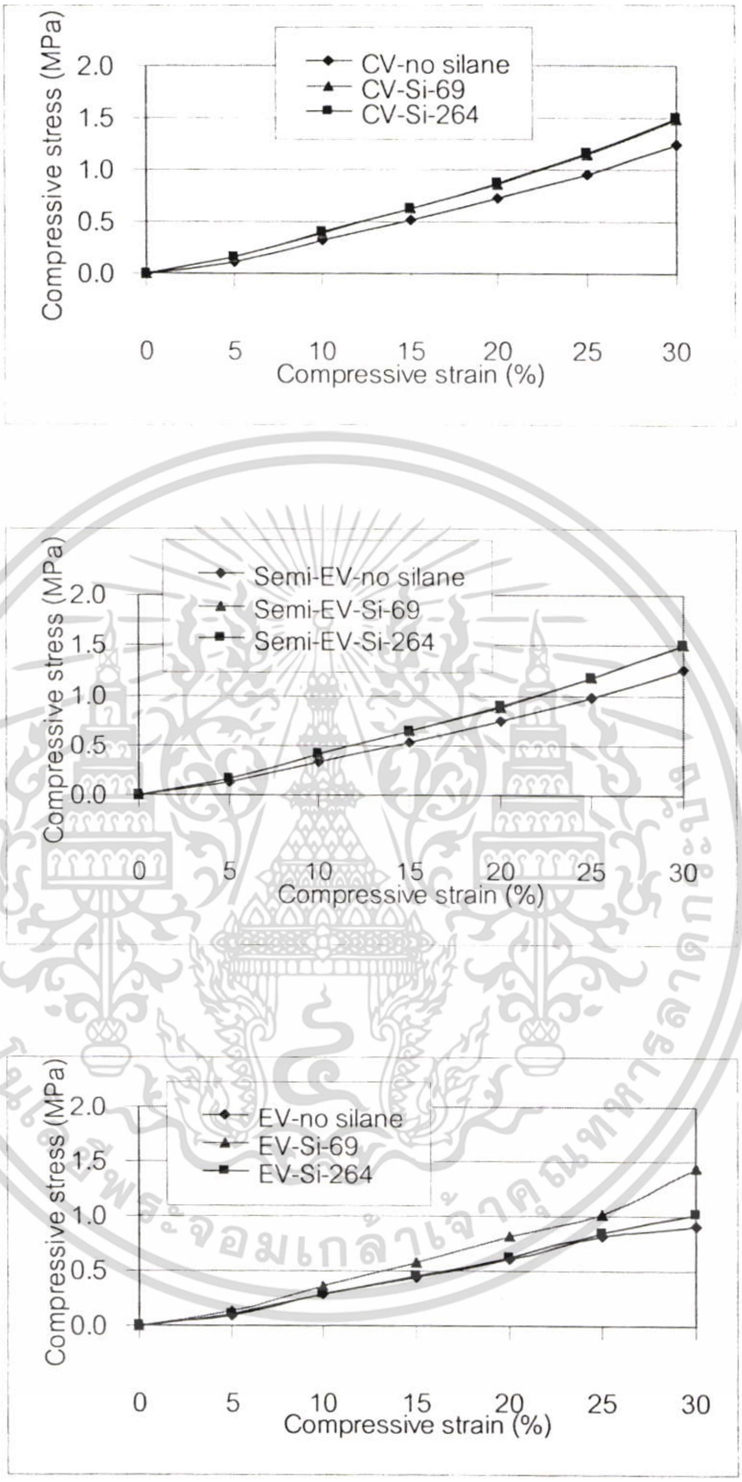
รูปที่ 4.19 แสดงผลของระบบการคงรูปต่อค่าความแข็งแกร่งกดอัด จากรูปพบว่าระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV มีค่าความแข็งแกร่งกดอัดสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV อย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยางที่ได้รับการคงรูปด้วยระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่ายางที่ได้รับการคงรูปด้วยระบบการคงรูปแบบ EV



รูปที่ 4.19 ผลของชนิดระบบการคงรูปต่อค่าความแข็งแกร่งกดอัดของ Ultrasil VN2

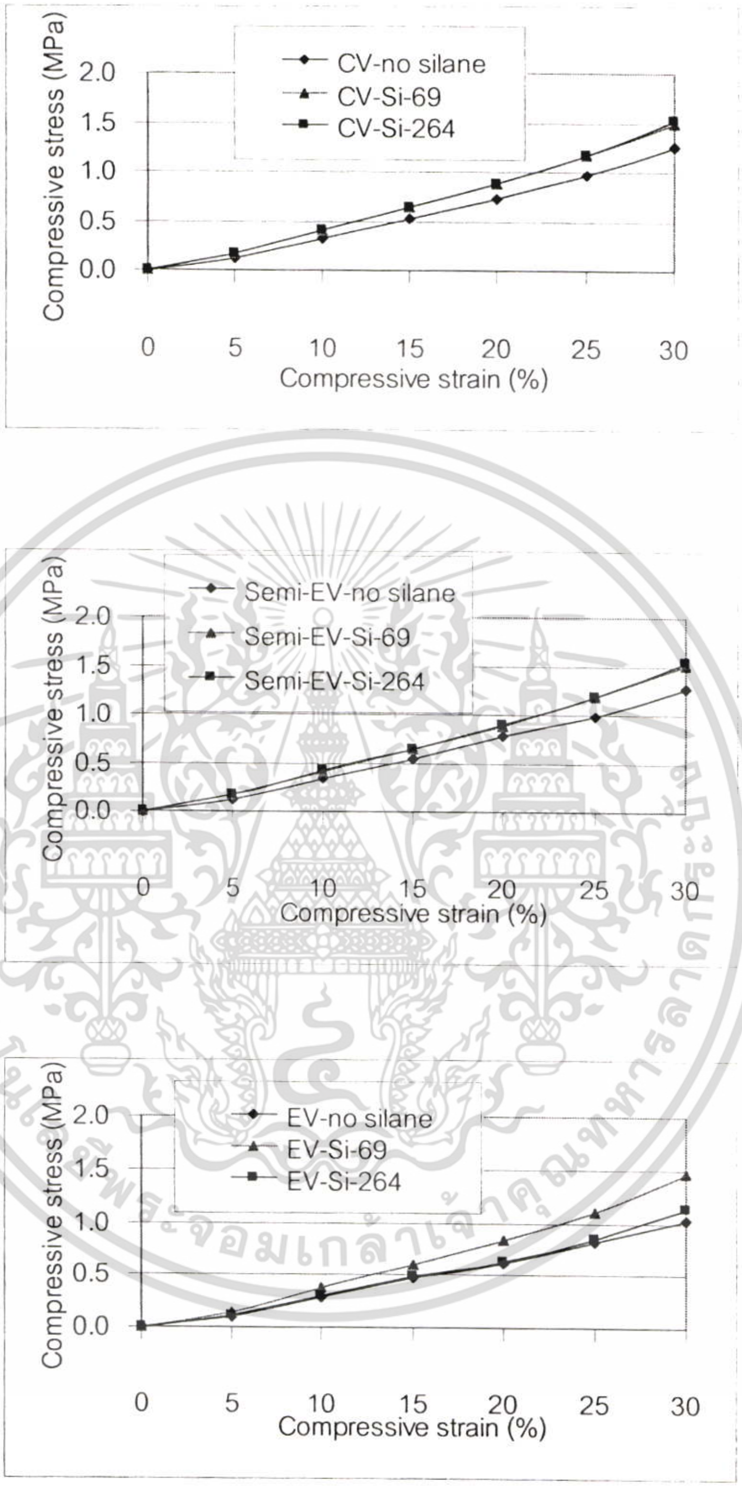
รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงผลของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแกร่งกดอัดในระบบการคงรูปแบบต่าง ๆ จากผลการทดลองพบว่า ยางคงรูปสูตรที่เติมสารคู่ควบไซเลนลงไปมีค่าความแข็งแกร่งกดอัดสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ไม่เติมสารคู่ควบไซเลน ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนนอกจากจะช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาแล้ว ยังทำให้ยางคงรูปที่ได้มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงขึ้น และยังพบว่า ประสิทธิภาพการทำงานของสารคู่ควบไซเลนทั้ง 2 ชนิดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระบบการคงรูป กล่าวคือในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 มีค่าความแข็งแกร่งกดอัดสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 เนื่องจากยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 ช่วยให้ซิลิกาสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางได้มากกว่า และทำยางคงรูปมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่า อย่างไรก็ตาม ในระบบการคงรูปแบบ EV กลับพบว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่าความแข็งแกร่งกดอัดที่สูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 ทั้งนี้เนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางได้ จึงช่วยให้ยางคงรูปทีได้มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ผลของชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแกร่งกดอัดในระบบการคงรูปต่าง ๆ (ในกรณีที่ใช้ Ultrasil VN2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

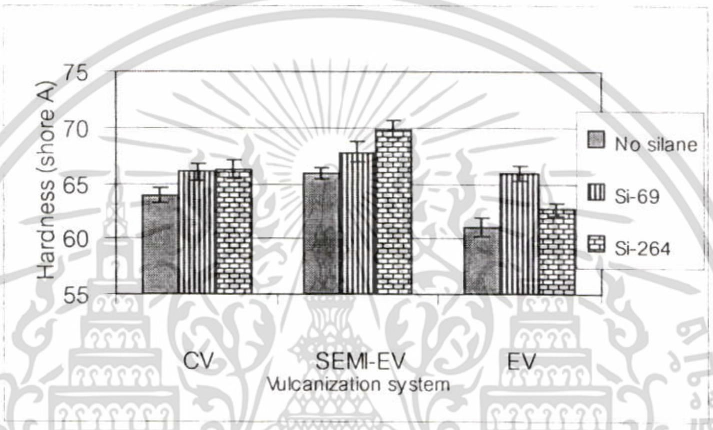


รูปที่ 4.21 ผลของชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแกร่งกดอัดในระบบการคงรูปต่าง ๆ (ในกรณีที่ใช้ Ultrasil VN3)

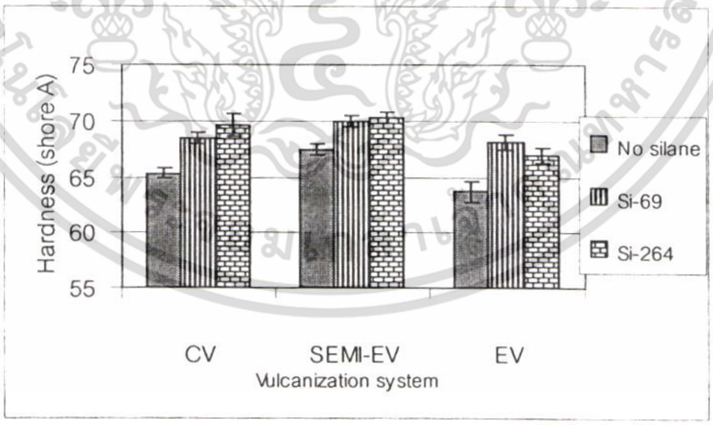
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.9 ค่าความแข็งกด

เมื่อพิจารณาผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งกด พบว่า ระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ให้ยางที่มีค่าความแข็งกดสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV ทั้งนี้เนื่องจากยางที่ได้จากระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV จะมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่ายางที่ได้จากระบบการคงรูปแบบ EV นอกจากนี้ ยังคาดว่าอาจเนื่องมาจากในระบบการคงรูปแบบ EV มี TMTM อยู่ในปริมาณมากถึง 4 phr ซึ่ง TMTM ที่มีอยู่นี้อาจเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของซิลิกา ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาต่อกันลดลง ซิลิกาจึงแตกตัวในยางได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้ระบบการคงรูปแบบ EV มีค่าความแข็งกดต่ำที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.22



(1)



(2)

รูปที่ 4.22 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งกด (1)Ultrasil VN2 และ (2) Ultrasil VN3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาในระบบการคงรูปแบบเดียวกัน พบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะทำให้ยางมีค่าความแข็งกดสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะช่วยทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264 มีค่าความแข็งกดสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 เนื่องจาก Si-264 ช่วยทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่า Si-69 อย่างไรก็ตาม ในระบบการคงรูปแบบ EV กลับพบว่า Si-69 ทำให้ยางมีค่าความแข็งกดสูงกว่า Si-264 ทั้งนี้เนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางได้ จึงทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นในการเชื่อมโยงสูงกว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264

4.2 ผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา

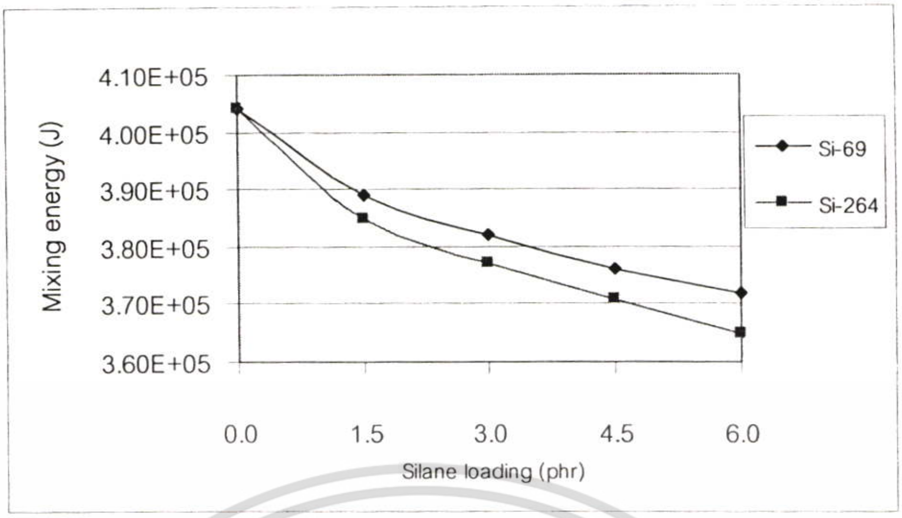
การศึกษาผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่เชื่อมโยงด้วยระบบกึ่งประสิทธิภาพและเสริมแรงด้วยซิลิกา Ultrasil VN2 ได้ทำการศึกษาโดยใช้สารคู่ควบไซเลน 2 ชนิด คือ Si-69 และ Si-264 ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่าชนิดของสารคู่ควบไซเลนให้ผลสอดคล้องเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.1 ซึ่งพบว่าโดยภาพรวม การใช้ Si-264 ให้ผลการทดลองที่ดีกว่าการใช้ Si-69 ทั้งนี้เนื่องจาก Si-264 มีสูตรโครงสร้างที่เล็กกว่า จึงเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวซิลิกาได้ดีกว่า Si-69 จึงส่งผลทำให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้มากกว่า และมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่า ดังนั้นการอภิปรายผลการทดลองในหัวข้อนี้จึงเน้นที่ประเด็นการเพิ่มปริมาณของสารคู่ควบไซเลนเป็นหลัก

4.2.1 ผลต่อพฤติกรรมการผสมและสมบัติต่าง ๆ ของยางคอมพาวด์

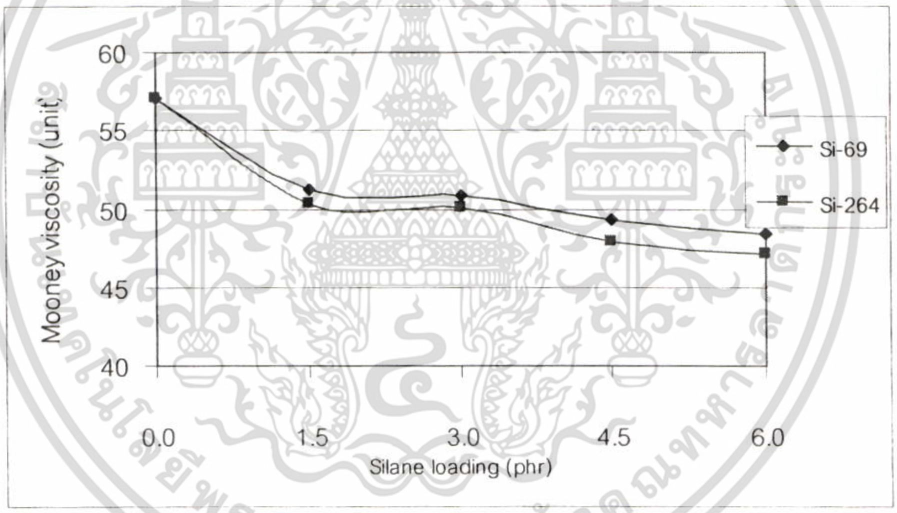
4.2.1.1 ค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ และค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ

รูปที่ 4.23-4.25 แสดงผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนต่อค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ และค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จตามลำดับ จากรูปพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในยางคอมพาวด์ จะทำให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ และค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนมีหมู่อัลคอกซีที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ง่ายขึ้น สารคู่ควบไซเลนจึงช่วยทำให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดและมีพลังงานที่ใช้ในการผสมลดลง นอกจากนี้ สารคู่ควบไซเลนยังทำให้ซิลิกาและยางเข้ากันได้ง่ายยิ่งขึ้น การเติมสารคู่ควบไซเลนจึงช่วยทำให้กระบวนการเข้ากันได้ของยางและซิลิกาในระหว่างการผสมเกิดได้ง่ายยิ่งขึ้น ซิลิกาจึงแตกตัวได้ดีขึ้น ทำค่าให้พลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ และค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



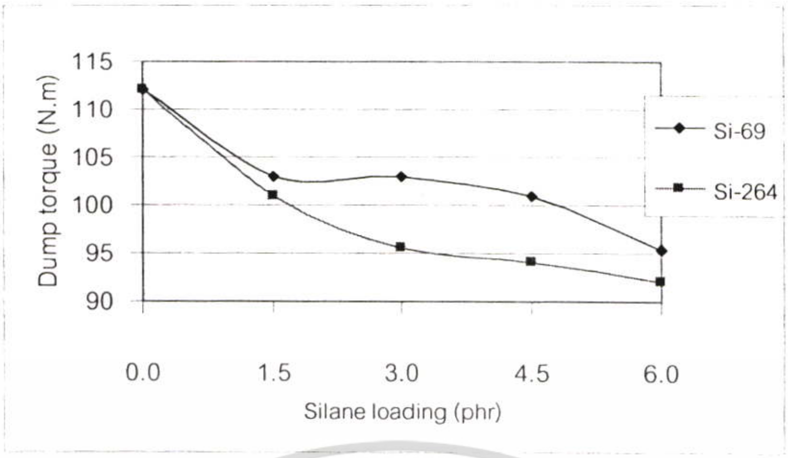
รูปที่ 4.23 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อพลังงานที่ใช้ในการผสม



รูปที่ 4.24 ผลของปริมาณสารคู่ควบ ไซเลนต่อค่าความหนืดมูนนี่

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ และค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ พบว่า ค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ และค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของสารคู่ควบไซเลน ทั้งนี้เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนจะทำให้อัตรกิริยาระหว่างซิลิกาลดลง นอกจากนี้ สารคู่ควบไซเลนส่วนที่มากเกินพอยังช่วยทำให้ยางนิ่มขึ้น (Plasticizing effect) จึงช่วยทำให้กระบวนการเข้ากันได้ของยางและซิลิกาในระหว่างการผสมเกิดได้ดียิ่งขึ้น

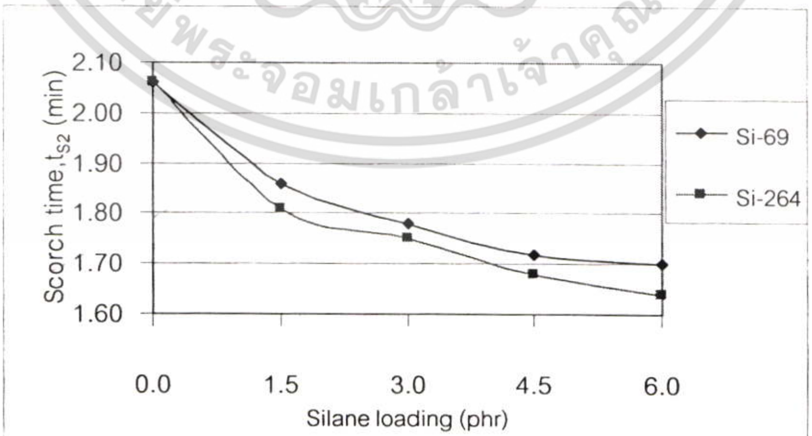
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าแรงบิดสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จ

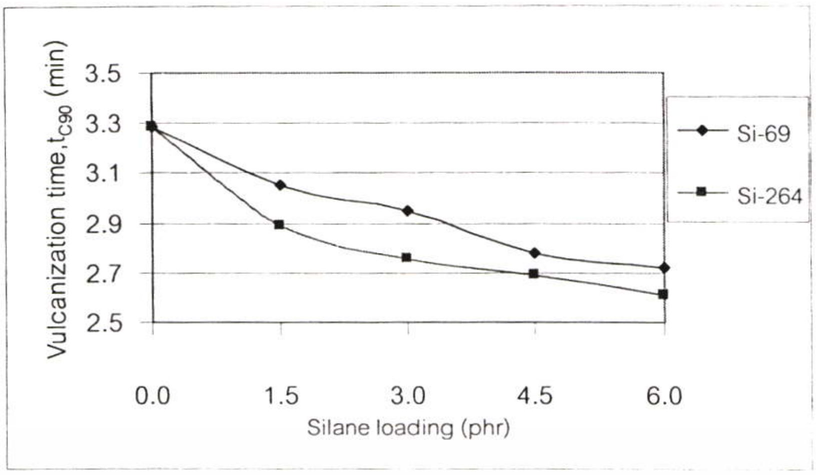
4.2.1.2 ค่าเวลาที่ใช้ในการเริ่มสุกตัวของยางและค่าเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อเวลาที่ใช้ในการเริ่มสุกตัวของยางและเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม พบว่า เวลาที่ใช้ในการเริ่มสุกตัวของยางและเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสมมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของสารคู่ควบไซเลน เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของซิลิกา จึงช่วยลดการดูดซับสารกระตุ้นและสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป ทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการเริ่มสุกตัวและเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสมมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ



รูปที่ 4.26 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเวลาที่ใช้ในการเริ่มสุกตัวของยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

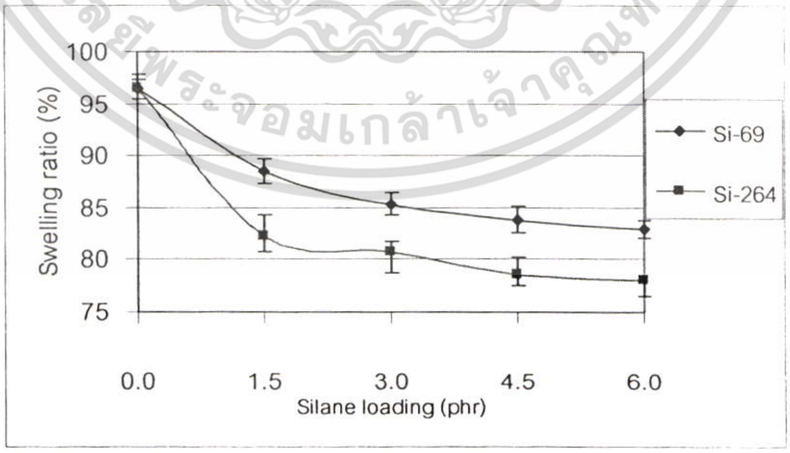


รูปที่ 4.27 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสม

4.2.2 ผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางคงรูป

4.2.2.1 ค่าการบวมตัวในตัวทำละลาย

รูปที่ 4.28 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าอัตราส่วนการบวมตัวในตัวทำละลาย จากรูปพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนเข้าไปในยางคงรูป จะทำให้ค่าอัตราส่วนการบวมตัวในตัวทำละลายมีค่าลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของสารคู่ควบไซเลนอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวของซิลิกา จึงช่วยลดการดูดซับสารกระตุ้นและสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป ทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ส่งผลทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น



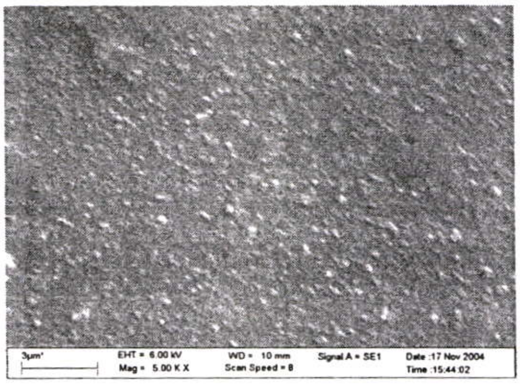
รูปที่ 4.28 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเปอร์เซ็นการบวมตัวในตัวทำละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

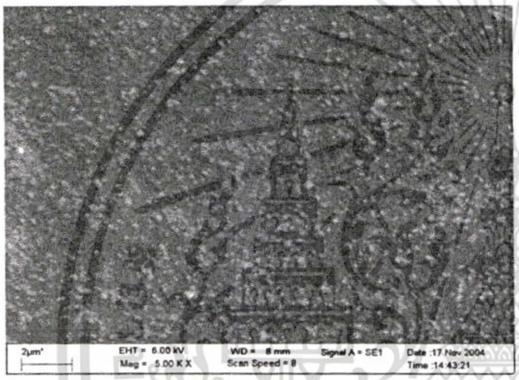
4.2.2.2 ระดับการแตกตัวของซิลิกา

เมื่อศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าระดับในการแตกตัวของซิลิกา พบว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนเข้าไปในยางคงรูปทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ดีขึ้นและยังพบว่าระดับการแตกตัวของซิลิกามีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของสารคู่ควบไซเลน ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนมีหมู่อัลคอกซีที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกาได้ จึงส่งผลให้ซิลิกามีอันตรกิริยาต่อกันลดลง ทำให้ซิลิกาสามารถแตกตัวในเนื้อยางได้ง่ายยิ่งขึ้น แต่จากการทดลองพบว่าระดับการแตกตัวของซิลิกาจะมีค่าสูงสุดเมื่อมีการใส่สารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณ 4.5 phr สังเกตได้จากรูปที่ 4.29-4.30 จากรูปจะเห็นว่าการใส่สารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณ 4.5 phr จะมีระดับการแตกตัวของซิลิกาสูงกว่าการใส่สารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณ 6 phr ดังนั้น การใส่สารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่มากเกินไป กลับส่งผลทำให้ซิลิกาแตกตัวได้น้อยลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารคู่ควบไซเลนส่วนที่มากเกินพอจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความนิ่ม ทำให้ความหนืดของยางในระหว่างกระบวนการผสมลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

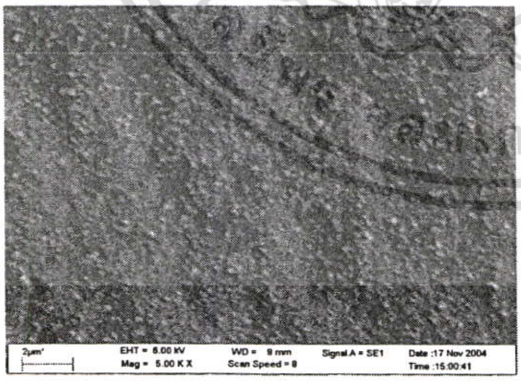


(1) ไม่ใส่สารคู่ควบไซเลน

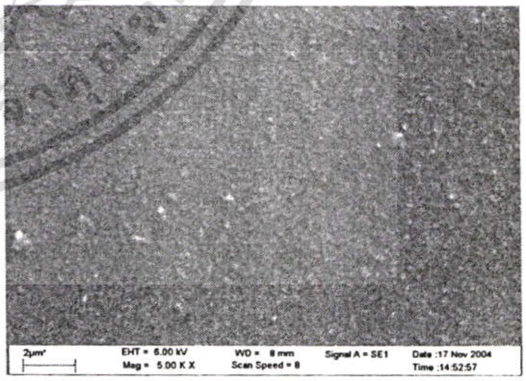


(2) ใส่ Si-69 1.5 phr

(3) ใส่ Si-69 3 phr



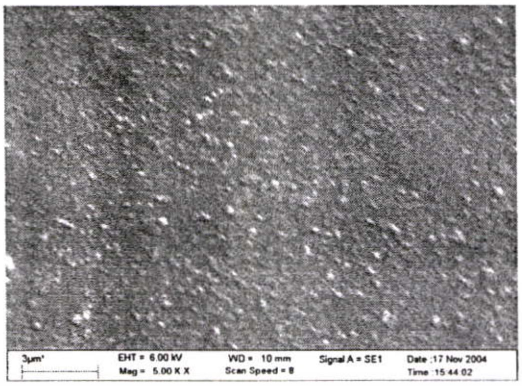
(4)ใส่ Si-69 4.5 phr



(5) ใส่ Si-69 6 phr

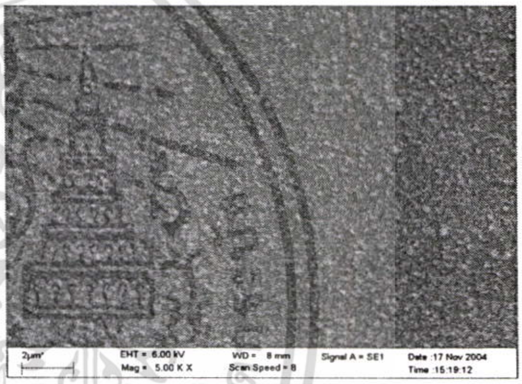
รูปที่ 4.29 ภาพถ่าย SEM ของยางคงรูปสูตรที่ใช้ Ultrasil VN 2 โดยใส่ Si-69 ปริมาณต่าง ๆ ในระบบการคงรูปแบบ Semi-EV ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

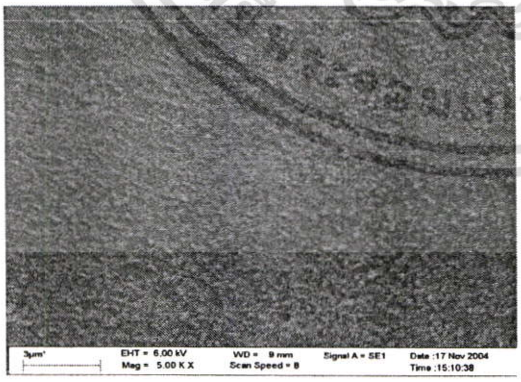


(1) ไม่ใส่สารคู่ควบไซเลน

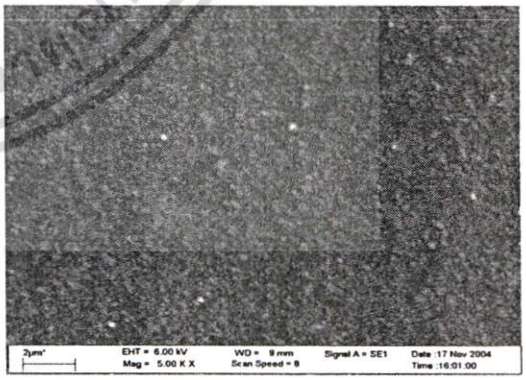
(2) ใส่ Si-264 1.5 phr



(3) ใส่ Si-264 3 phr



(4)ใส่ Si-264 4.5 phr



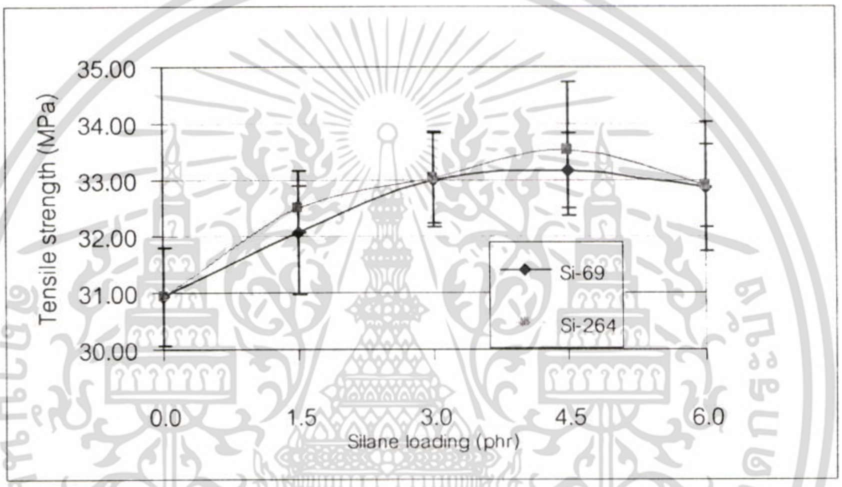
(5) ใส่ Si-264 6 phr

รูปที่ 4.30 ภาพถ่าย SEM ของยางคงรูปสูตรที่ใช้ Ultrasil VN 2 โดยใส่ Si-264 ปริมาณต่าง ๆ ในระบบการคงรูปแบบ Semi-EV ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 สมบัติแรงดึง

รูปที่ 4.31 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแรงดึง จากรูปพบว่า การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนตั้งแต่ 0 – 4.5 phr ทำให้ยางมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณไซเลนจะทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 4.31) นอกจากนี้ สารคู่ควบไซเลนยังช่วยทำให้ซิลิกากับยางเกิดอันตรกิริยาต่อกันได้มากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่ม ความสามารถในการแตกตัวของซิลิกา แต่เมื่อใส่สารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 4.5 phr สารคู่ควบไซเลนส่วนที่มากเกินพอจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความนิ่ม ทำให้ยางคอมพาวด์มีความ หนืดลดลง ซิลิกาจึงมีระดับการแตกตัวได้ต่ำลง จึงส่งผลทำให้ยางคงรูปมีค่าความแข็งแรงดึง ลดลงด้วย

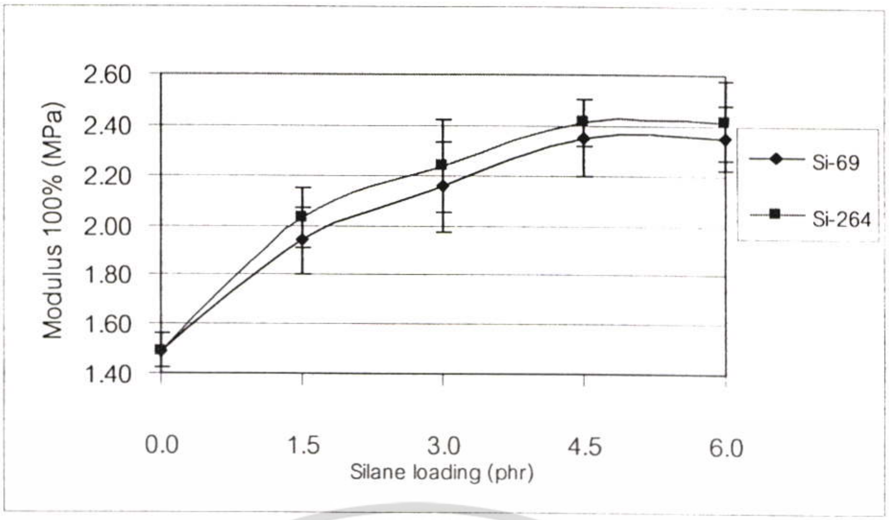


รูปที่ 4.31 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแรงดึง

- ค่า 100% มอดุลัส

จากการศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่า100% มอดุลัส (รูปที่ 4.32) พบว่า ค่า 100% มอดุลัสของยางจะเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณสารคู่ควบไซเลนจนถึง 4.5 phr ทั้งนี้เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนนอกจากจะทำให้ยางมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นแล้ว ยังทำให้อันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยางสูงขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ดี ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเติม สารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 4.5 phr จะไม่ทำให้ยางมีค่า100% มอดุลัสสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนส่วนที่มากเกินพออาจทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางนิ่ม

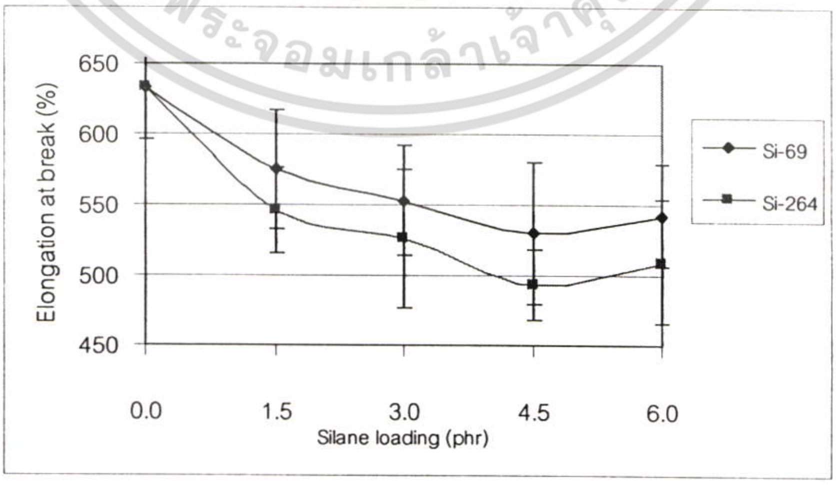
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่า100 % มอดุลัส

- ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.33) พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุด ขาดมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของสารคู่ควบไซเลน เพราะการเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยางด้วย อย่างไรก็ตาม การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่มากกว่า 4.5 phr ก็จะส่งผลทำให้ยางเริ่มมีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความนิ่มของสารคู่ควบไซเลนส่วนที่มากเกินพอ ดังแสดงในรูปที่ 4.33

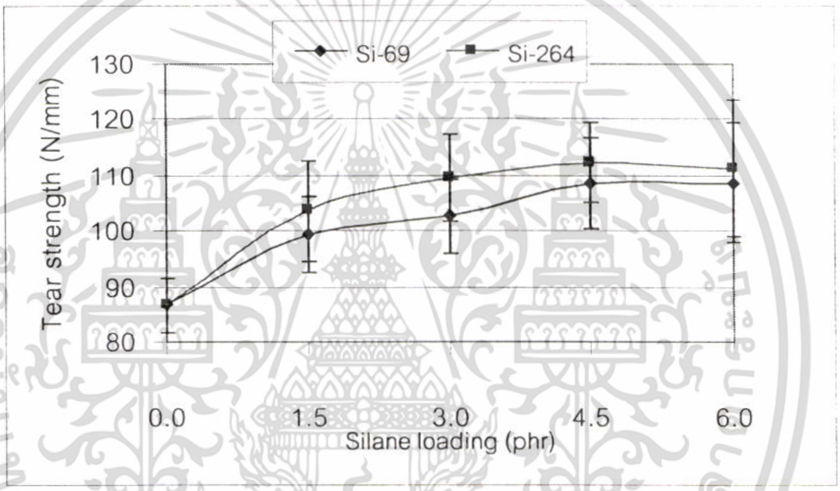


รูปที่ 4.33 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.4 ค่าความแข็งแรงฉีกขาด

รูปที่ 3.34 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งแรงฉีกขาด จากรูป พบว่า ค่าความแข็งแรงฉีกขาดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณสารคู่ควบไซเลนจนถึง 4.5 phr ก่อนที่จะเริ่มคงที่หลังจากนั้น สาเหตุที่ค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณสารคู่ควบไซเลนเนื่องจาก การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ดีขึ้น ซิลิกากับยางมีอันตรกิริยาต่อกันสูงขึ้น อย่างไรก็ดี การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 4.5 phr กลับทำให้ยางมีค่าความแข็งแรงฉีกขาดคงที่หรือมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของสารคู่ควบไซเลนส่วนที่มากกว่า 4.5 phr จะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความนิ่ม ส่งผลในทางตรงกันข้าม กล่าวคือทำให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้น้อยลง

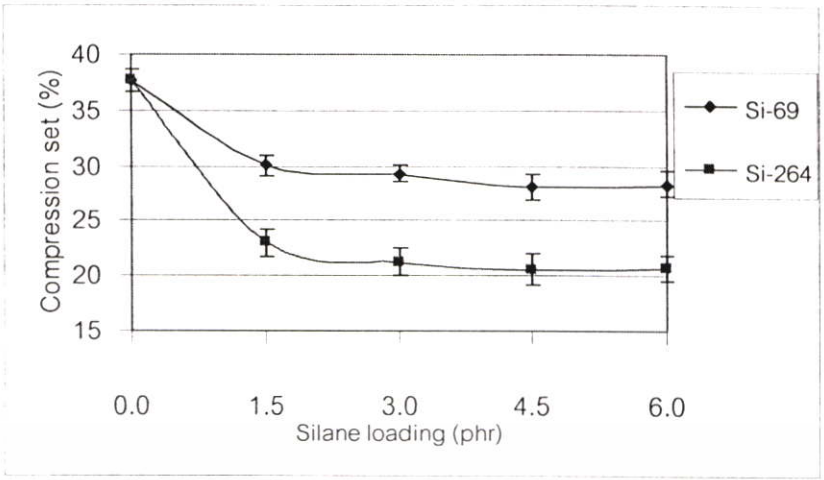


รูปที่ 4.34 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อความแข็งแรงฉีกขาด

4.2.3.5 ค่าการเสียรูปหลังการกดอัด

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าการเสียรูปหลังการกดอัด (ดูรูปที่ 4.35) พบว่า การเสียรูปหลังการกดอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณ 1.5 phr ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น และยังทำให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ดี เป็นที่น่าสังเกตว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 1.5 phr กลับมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าการเสียรูปหลังการกดอัดของยาง

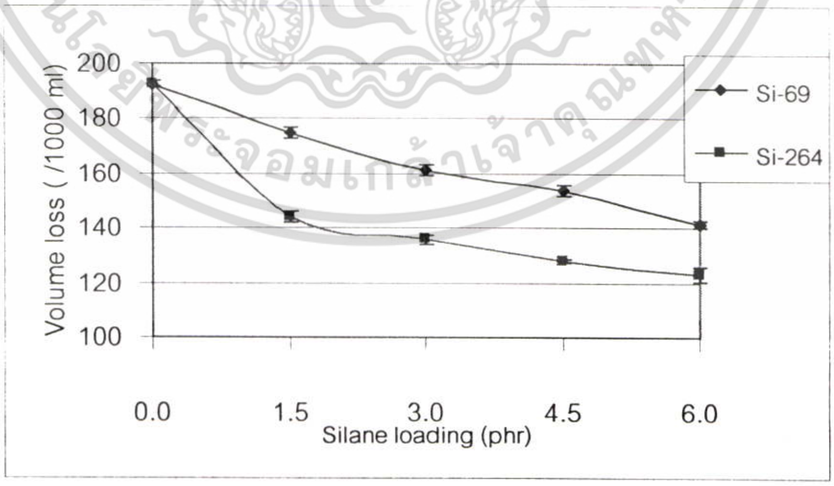
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าการเสียรูปหลังการกดอัด

4.2.3.6 ค่าความต้านทานต่อการขัดถู

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความต้านทานต่อการขัดถูของยาง พบว่า ความต้านทานต่อการขัดถูของยางเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของสารคู่ควบไซเลน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น (ยางแข็งมากขึ้น) ทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ดียิ่งขึ้น และยังทำให้ยางกับซิลิกามีอันตรกิริยาต่อกันสูงขึ้นอีกด้วย ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าในกรณีที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 4.5 phr แต่ก็ไม่มีผลกระทบต่อค่าความต้านทานต่อการขัดถูมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.36

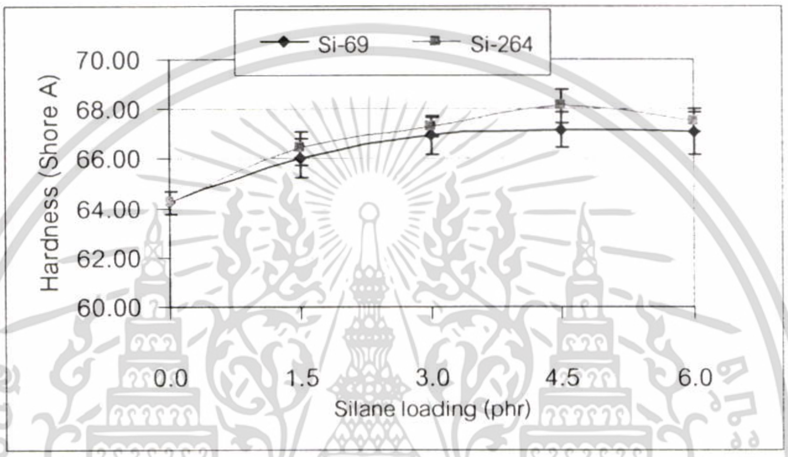


รูปที่ 4.36 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความต้านทานต่อการขัดถู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.7 ค่าความแข็งกด

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งกด (รูปที่ 4.37) พบว่า การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนตั้งแต่ 0 – 4.5 phr ส่งผลทำให้ยางมีค่าความแข็งกดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยางอีกด้วย อย่างไรก็ดี การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่มากเกินพอ (คือมากกว่า 4.5 phr) กลับส่งผลทำให้ยางมีค่าความแข็งกดลดต่ำลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากสารคู่ควบไซเลนส่วนที่มากเกินพอจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความนิ่ม



รูปที่ 4.37 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความแข็งกด

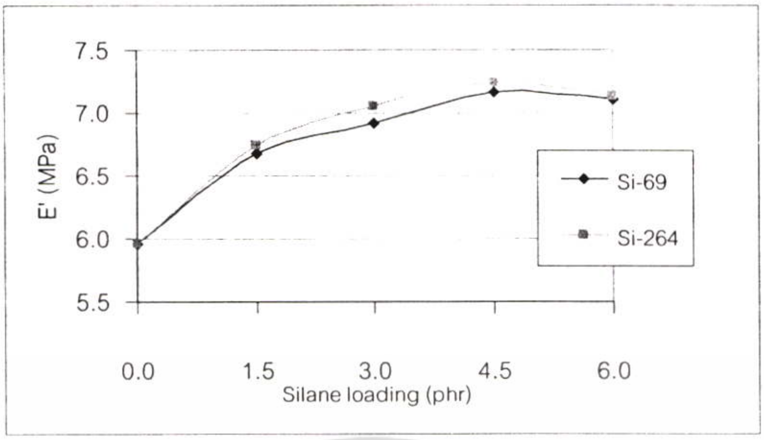
4.2.3 ผลต่อสมบัติเชิงพลวัตต่าง ๆ ของยางคงรูป

4.2.3.1 ค่ามอดุลัสสะสม

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, E') (ดูรูปที่ 4.38) พบว่า ค่ามอดุลัสสะสมมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น และยังช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยางอีกด้วย อย่างไรก็ดี ยังพบว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 4.5 phr กลับมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่ามอดุลัสสะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.39

เมื่อเปรียบเทียบค่ามอดุลัสสะสมของยางที่มีการเติม Si-69 และ Si-264 พบว่า ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่ามอดุลัสสะสมต่ำกว่า Si-264 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก Si-69 ทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-264

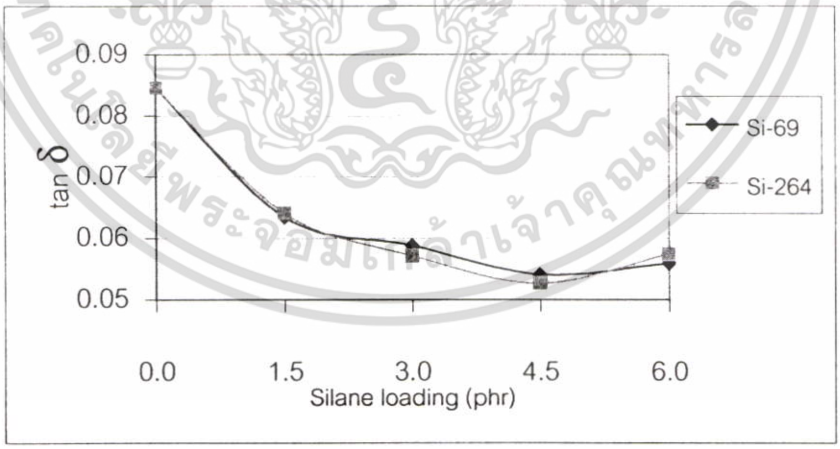
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.38 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่ามอดุลัสสะสม

4.2.3.2 ค่า tan δ

รูปที่ 4.39 แสดงผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่า tan δ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่า tan δ มีค่าต่ำลงเมื่อมีการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป ดังที่ให้เหตุผลไว้ในหัวข้อ 4.2.3.1 นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 4.5 phr กลับมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่า tan δ เมื่อเปรียบเทียบค่า tan δ ของยางที่ได้จากการเติม Si-69 และ Si-264 พบว่ายางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่า tan δ สูงกว่า Si-264 ทั้งนี้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.3.1

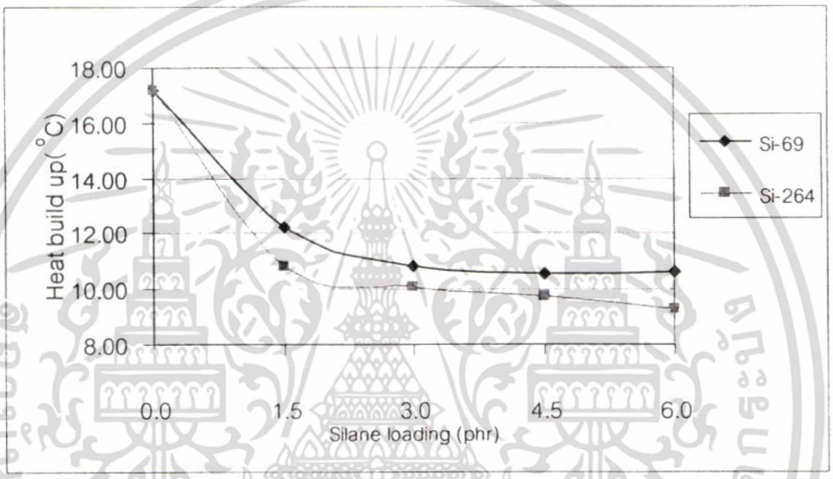


รูปที่ 4.39 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่า tan δ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.3 ค่าความร้อนสะสม

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความร้อนสะสม พบว่าการเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนจาก 0- 3.0 phr จะทำให้ยางมีค่าความร้อนสะสมลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว (ดังแสดงในรูปที่ 4.40) ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนจะทำให้มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นและเพิ่มระดับในการแตกตัวของซิลิกา อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยาง อย่างไรก็ดี การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 3.0 phr กลับมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าค่าความร้อนสะสม และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนสะสมของ Si-69 และ Si-264 พบว่า ยางคงรูปสูตรที่ใช้ Si-69 มีค่าความร้อนสะสมสูงกว่า Si-264 ทั้งนี้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2.3.1



รูปที่ 4.40 ผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความร้อนสะสม

ในทางทฤษฎีแล้วเมื่อยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและระดับการแตกตัวที่เท่ากัน Si-69 จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัตได้ดีกว่า Si-264 เนื่องจาก Si-69 มีกำมะถันอยู่ในโครงสร้างสูงกว่าจึงมีโอกาสที่ทำให้การเชื่อมโยงเกิดผ่านพันธะพอลิซัลฟิดิกมากกว่า ส่วน Si-264 ซึ่งมีกำมะถันเพียงแค่ 1 อะตอมใน โครงสร้างโมเลกุล การเชื่อมโยงจึงเกิดผ่านพันธะแบบมอนอซัลฟิดิกเท่านั้น แต่ในการทดลองนี้ กลับพบว่า Si-264 ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัตได้ดีกว่า Si-69 ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าที่ผลการทดลองเป็นเช่นนี้เนื่องจาก Si-264 ทำให้ซิลิกามีระดับการแตกตัวที่สูงกว่า และยังทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่า Si-69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ส่วนที่ 1 ผลของระบบการคงรูปและชนิดของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา

จากผลการวิจัยพบว่าค่าพลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ ค่าแรงบิดสุดท้าย และค่าอุณหภูมิสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV จะมีค่าสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV เล็กน้อย เนื่องมาจากในระบบการคงรูปแบบ EV มี TMTM มากถึง4 phr ซึ่ง TMTM ส่วนที่มากเกินพอนี้อาจทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความนิ่ม (Plasticizing effect) ให้แก่ยาง

การใช้สารคู่ควบไซเลน (Si-69 และ Si-264) ทำให้พลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ ค่าแรงบิดสุดท้าย และค่าอุณหภูมิสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จของยางคอมพาวด์มีค่าลดลงอย่างชัดเจน และพบว่าSi-264 จะช่วยทำให้มีสมบัติข้างต้นต่ำกว่า Si-69 เนื่องจาก Si-264 มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำกว่าจึงเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลที่พื้นผิวซิลิกาได้ง่ายกว่า จึงช่วยลดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกาได้มากกว่า ส่วนการใช้ซิลิกา Ultrasil VN2 ให้ค่าสมบัติข้างต้นที่กล่าวมาต่ำกว่าการใช้ซิลิกา Ultrasil VN3 เนื่องจากซิลิกา Ultrasil VN2 มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิใหญ่กว่าและมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าซิลิกา Ultrasil VN3

เวลาในการเริ่มสุกตัวของยางในระบบการคงรูปแบบ CV มีค่าสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ Semi-EV และ EV เนื่องจากในระบบการคงรูปแบบ CV มีปริมาณ TMTM ในปริมาณต่ำมากเพียง 0.1 phr จึงคาดว่า TMTM ที่มีอยู่ทั้งหมดอาจถูกดูดซับโดยซิลิกา ส่งผลทำให้ไม่เกิดการทำงานแบบเสริมกันกับ TBBS ผลการทดลองยังแสดงว่า ระบบการคงรูปแบบ Semi-EV ให้เวลาในการคงรูปที่เหมาะสมต่ำกว่าระบบการคงรูปแบบ CV และ EV ตามลำดับ ส่วนการใช้เติมสารคู่ควบไซเลนลงไปก็จะส่งผลทำให้เวลาในการเริ่มสุกตัวของยางและเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสมมีค่าลดลงเนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลของซิลิกา ทำให้ซิลิกาดูดซับสารกระตุ้นปฏิกิริยาคงรูปและสารเร่งปฏิกิริยาคงรูปได้น้อยลง

ในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV พบว่า Si-264 จะทำให้ยางมีระยะเวลาในการเริ่มสุกตัวและระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสมต่ำกว่า Si-69 เนื่องจาก Si-264 มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดที่ต่ำกว่า แต่ในระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งเป็นระบบที่มีปริมาณกำมะถันอิสระน้อยมากกลับพบว่า Si-69 ทำให้ยางมีค่าระยะเวลาดังกล่าวต่ำกว่า Si-264 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางได้ในระหว่างกระบวนการอบคงรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกันและสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV เนื่องจากระบบการคงรูปแบบ Semi-EV มีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ CV เล็กน้อย และสูงกว่าระบบการคงรูปแบบ EV นอกจากนี้ยัง มีชนิดของสายโซ่การเชื่อมโยงเป็นแบบพอลิซัลฟิดิกปริมาณที่มากกว่าจึงมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเชื่อมโยงแบบมอนอซัลฟิดิก

การใช้สารคู่ควบไซเลนช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ให้ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงดึง มอดุลัส ความแข็งกด ความแข็งแรงต่อการฉีกขาด การเสียรูปหลังการกดอัด ความแข็งแกร่งกดอัด ความต้านทานต่อการขัดถู เพราะสารคู่ควบไซเลนทำให้ซิลิกากับยางเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้มากขึ้น ช่วยให้ซิลิกาแตกตัวได้ดีขึ้น และทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น

ในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV พบว่า Si-264 จะให้ระดับการเสริมแรงที่สูงกว่า Si-69 เนื่องจาก Si-264 ช่วยในการแตกตัวของซิลิกาได้ดีกว่า และทำให้ยางคงรูปมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่า แต่ในระบบการคงรูปแบบ EV ซึ่งเป็นระบบที่มีปริมาณกำมะถันอิสระต่ำมาก กลับพบว่า Si-69 จะให้ระดับของการเสริมแรงที่สูงกว่า Si-264 เนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันแก่ยางในระหว่างกระบวนการคงรูปได้ ทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น

จากผลการทดลองยังพบว่า ยางที่ได้จากการคงรูปด้วยระบบการคงรูปแบบ EV มีความทนทานต่อความร้อนสูงที่สุด เนื่องจากมีพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบมอนอซัลฟิดิกที่มีพลังงานพันธะ C-S-C สูงที่สุด ทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่การเชื่อมโยงยากกว่าระบบการคงรูปแบบ Semi-EV และ CV ตามลำดับ และพบว่าสำหรับการคงรูปในระบบนี้นั้น Si-69 จะทำให้ยางมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนด้อยกว่า Si-264 เนื่องจาก Si-69 สามารถให้กำมะถันอิสระแก่ยางได้ ดังนั้น จึงสามารถคาดหวังได้ว่ายางคงรูปที่ได้จะมีพันธะเชื่อมโยงแบบพอลิซัลฟิดิกในสัดส่วนที่สูงกว่า จึงทำให้ยางคงรูปมีสมบัติความทนทานต่อความร้อนด้อยกว่า

ส่วนที่ 2 ผลของปริมาณของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยซิลิกา

การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนทำให้ซิลิกาและยางเข้ากันได้ง่ายยิ่งขึ้น จึงช่วยทำให้กระบวนการเข้ากันได้ของยางและซิลิกาในระหว่างการผสมเกิดได้ดียิ่งขึ้น ซิลิกาจึงมีระดับการแตกตัวสูงขึ้น ส่งผลทำค่าให้พลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ ค่าแรงบิดสุดท้าย และค่าอุณหภูมิสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของสารคู่ควบไซเลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลทำค่าให้พลังงานที่ใช้ในการผสม ค่าความหนืดมูนนี่ ค่าแรงบิดสุดท้าย และค่าอุณหภูมิสุดท้ายเมื่อผสมเสร็จมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของสารคู่ควบไซเลน

นอกจากนี้ ยังพบว่าระยะเวลาในการเริ่มสุกตัวของยางและระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปที่เหมาะสมก็มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของสารคู่ควบไซเลนด้วยเช่นกัน

การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนลงไปจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ให้ดียิ่งขึ้น เช่น ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส ค่าความแข็งกด ค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาด ค่าการเสียรูปหลังการกดอัด ค่าความแข็งแกร่งกดอัด และค่าความต้านทานต่อการขัดถู เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนจะทำให้ซิลิกากับยางเกิดอันตรกิริยาต่อกันได้มากขึ้น ช่วยให้ซิลิกาแตกตัวได้ดีขึ้น และยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น แต่เมื่อใส่สารคู่ควบไซเลนทั้ง Si-69 และSi-264 ลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 4.5 phr (หรือปริมาณที่สูงกว่า 10 % โดยน้ำหนักของซิลิกา) สารคู่ควบไซเลนส่วนที่มากเกินพอจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความนิ่ม ส่งผลในเชิงลบทำให้สมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของยางคงรูปมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยหรือเกือบคงที่

การเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนจาก 0-4.5 phr จะทำให้ยางมีค่ามอดุลัสสะสมสูงขึ้น ส่วนค่า tan delta กลับมีแนวโน้มต่ำลง อย่างไรก็ดี หากทำการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 4.5 phr กลับพบว่าค่ามอดุลัสสะสมและค่า tan δ จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาผลของปริมาณสารคู่ควบไซเลนต่อค่าความร้อนสะสม พบว่าการเพิ่มปริมาณสารคู่ควบไซเลนจาก 0-3.0 phr จะทำให้ยางมีค่าความร้อนสะสมลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ดี การผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้สารคู่ควบไซเลนในปริมาณที่สูงกว่า 3.0 phr กลับไม่มีผลกระทบมากนักต่อค่าความร้อนสะสมของยาง

ในการทดลองนี้ พบว่า Si-264 จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงพลวัตได้ดีกว่า Si-69 เนื่องจาก Si-264 ทำให้ซิลิกามีระดับในการแตกตัวที่สูงกว่า รวมทั้งยังทำให้ยางมีค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่า Si-69 อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Fultz W.C., Evans L.R. "Tire tread compounds with silica/CB blends." Rubber World. vol. 218, 1998. pp. 39-43.
2. Varughese S., Tripathy D.K. "Chemical interaction between epoxidize natural rubber and silica: studies on cure characteristics and low-temperature dynamic mechanical properties." Journal of Applied Polymer Science. vol. 44, 1992. pp. 1847-1852.
3. Dutta K.N., Tripathy D.K. "Effect of types of fillers on the molecular rexation characteristics, dynamic mechanical and physical properties rubber vulcanizates." Journal of Applied Polymer Science. vol. 44, 1992. pp. 1635-1648.
4. Waddell W.H., Douglas B.J. "Improved black sidewall compound performance using precipitated silica." Rubber World. vol. 208, 1993. pp. 21-25.
5. Wolff S. "Chemical aspects of rubber reinforcement by fillers." Rubber Chemistry and Technology. vol. 69, 1996. pp. 325-346.
6. Byers J. "Silane coupling agents for enchanced silica performance." Rubber World. vol. 218, 1998. pp. 38-47.
7. Nakamura M., Takagishi Y. and Nokuchi K. "Effects of filler on compatibility of NR." Rubber World. vol. 218, 1998. pp. 30-34.
8. Patkar S.D., Bice J.E. and Okel T.A. "Effect of silica on the viscoelastic properties of model tread compound." Rubber World. vol. 218, 1998. pp. 21-28.
9. Manna J.K., De P.P., Tripathy D.K., De S.K. and Peiffer D.G. "Bonding between precipitated silica and epoxidized natural rubber in the presence of silane coupling agent." Journal of Applied Polymer Science. vol. 74, 1999. pp. 389-398.
10. Kraus G. **Reinforcement of Elastomer.** Interscience. New York. 1965.
11. Brydson J.A. **Rubber Chemistry.** London : Applied Science Publishers Ltd.1978.
12. อิทธิพล แจ้งชัด. **เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีการยาง.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545.
13. Grossman R.F. **The mixing of rubber.** Chapman & Hall. London. 1997.
14. Bomal Y., Cochet P., Dejean B. and Machurat J. "Influence of mixing procedures on the properties of a silica reinforced agricultural tire tread." Rubber World. vol. 208, 1993. pp. 33-41.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. Pohl J. W. "Trends in rubber mixing." Rubber World. vol. 217, 1998. pp. 21-27.

16. Blow C.M., Hepburn C. **Rubber Technology and Manufacture.** Butterworth Scientific. London. 1983.

17. Nakajima N. **The Science and Plastic of Rubber Mixing.** :Rapra Technology Limited 2000.

18. Coran A.Y., and Donnet J. B. "The dispersion of carbon in rubber part II the kenetic of dispersion in natural rubber." Rubber Chemistry and Technology.vol. 65, 1991. pp. 998 Part 2.

19. Thammathadanukul V.,O'haver J. H., Harwell J. H., Osuwan S,. Na-ranong N. and Waddell W. H. " Comparision of rubber reinforcement using various surface-modifield precipitated silicas. " Journal of Applied Polymer Science. vol. 59, 1996. pp. 1741-1750.

20. Fath A.M. "Vulcanization of elastomer." Rubber World. vol. 209, 1993. pp. 17-20.

21. Hoffmann W. **Rubber Technology Handbook.** Hanser Publishers. Mnchen. 1989.

22. Fath A.M. "Vulcanization of elastomer." Rubber World. vol. 209, 1994. pp. 18.

23. Hamed G.R. "Fundamental characteristics and properties of crosslinked elastomer." Rubber World. vol. 211, 1994. pp. 25-28.

24. Fath A.M. "Vulcanization of elastomer." Rubber World. vol. 208, 1993. pp. 15-18.

25. Holfmann W. **Vulcanization and Vulcanizing agents.** Maclalen and Sons Ltd. London. 1967.

26. AlliGer G., Sjothun I.J. **Vulcanization of elastomers.** Chapman & Hall. London. 1978.

27. พรพรรณ นิธิอุทัย. **สารเคมีสำหรับยาง.** คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี พ.ศ.2531.

28. บุญธรรม นิธิอุทัย พรพรรณ นิธิอุทัย ปรีชา ป้องภัย. **สารเคมีสำหรับยางและเทคนิคการออกสูตรยาง.** คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี พ.ศ.2531.

29. Fath A.M. "Vulcanization of elastomer." Rubber World. vol. 209, 1993. pp. 22-25.

30. Sommer J.G. "Effect of crosslinking systems on fatigue life" Rubber World. vol. 217, 1997. pp. 39-44.

31. Wang M.J. and Wolff S. "Filler-elastomer interactions part I :investigation of the surface energys and interactions with model compounds." Rubber Chemistry and Technology. vol. 64, 1991. pp. 549-576.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

32. Dannenberg E.M."The effects of surface chemical interactions on the properties of filler-reinforced rubber"Rubber Chemistry and Technology., vol. 48, 1975 pp. 410.

33. Blow C.M., Hepburn C. **Rubber Technology and Manufacture.** London : Butterworth Scientific. 1983.

34. Wagner M.P. "Reinforcing silica and silicates." Rubber Chemistry and Technology. vol. 49, 1976. pp. 703-774.

35. Dannenberg E.M. "Filler choices in the rubber industry." Rubber Chemistry and Technology. vol. 55, 1982. pp. 860-880.

36. Patkar S. D., Bice J. E. and Okel T. A. " Effect of silica on The vis coelastic properties of model tread compound." Rubber World. vol. 218, 1998. pp. 21-28.

37. Goerl U., Hunsche A., Mueller A. and Koban H.G. "Investigation into the silica/silane reaction system." Rubber Chemistry and Technology. vol. 70, 1997. pp. 608-623.

38. Wang M.J. and Wolff S. "Filler-elastomer interactions part V :investigation of the surface energys of silane-modified silicas." Rubber Chemistry and Technology. vol. 65, 1992. pp. 715.

39. Vondracek P. and Hradec M. "The effect of the structure of surface-containing silane coupling agents of their activity in silica-filled NR." Rubber Chemistry and Technology. vol. 57, 1991. pp. 675-685.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายภัทรภูมิ สุพรรณสมบูรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม 2521 จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2542 จากนั้นศึกษาต่อปริญญาโท สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้