

อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และ สารตัวเติมผสม ที่มีต่อสมบัติของยางโฟมธรรมชาติ

สมเจตน์ พัชรพันธ์¹ วีรเดช พิณเสนาะ² ศิริพงษ์ จันทร์พูนทรัพย์² และ
ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ³

Abstract

Pacharaphun, S.¹, Pinsanor, V.¹, Junpoonsup, S.¹, and Sombatsompop, N.²
Effects of silica, calcium carbonate, and SiO₂/CaCO₃ blends on
some properties of cellular NR compounds
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2003, 25(1) : 75-90

The objective of this work was to study the effect of silica (SiO₂) and calcium carbonate (CaCO₃) on compounding torque, mechanical, physical, morphological properties, and swelling behaviour of cellular natural rubber, using a compression moulding and conventional vulcanisation (CV) system with oxybisbenzenesulphonylhydrazine (OBSH) as a blowing agent, the moulding cure temperature and time being 160°C and 7 mins respectively. The cellular rubber vulcanisates were characterised with respect to tensile strength, abrasion resistance, thermal aging, swelling and deswelling behaviours. The results in-

¹Department of Material Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, ²Material Technology, School of Energy and Materials, King Mongkul's University of Technology Thonburi (KMUTT), Tungkru, Bangmod, Bangkok 10140 Thailand.

¹M.Eng. (Materials Technology) อาจารย์ ²นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900 ³Ph.D. (Polymer Processing and Rheology) รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Corresponding e-mail : narongrit.som@kmutt.ac.th

รับต้นฉบับ 22 กรกฎาคม 2545 รับลงพิมพ์ 7 พฤศจิกายน 2545

indicated that the addition of 20 phr SiO₂ in the rubber compound was the most preferable for the tensile strength and abrasion resistance, this being associated with reinforcing effects between the silica and rubber molecules, which also promoted the swelling resistance in toluene during equilibrium state. In the case of CaCO₃ filler, added into the rubber compounds having 20 phr SiO₂, the optimum CaCO₃ content to maintain the overall properties was between 20 and 30 phr. The CaCO₃ above 30 phr reduced the tensile and abrasive properties of the compounds due to the excessive fillers (silica and calcium carbonate) contents being greater than 50 phr. Addition of CaCO₃ had no effect on the swelling behaviour of the compounds. Considering the effect of thermal aging in the SiO₂ filled rubber compounds, it was observed that the mechanical properties of non-filler cellular rubber tended to decrease whereas the swelling resistance increased with aging, this being due to the desulphuration of the sulphur crosslinks. However, the properties of the NR compounds containing 20 phr SiO₂ and various contents of CaCO₃ were unaffected by thermal aging. In summary, the recommended mixed fillers contents for SiO₂ and CaCO₃ in this work were 20 phr and 20-30 phr, respectively.

Key words : natural rubber, cellular rubber, silica, calcium carbonate, blowing agent

บทคัดย่อ

สมเจตน์ พัชรพันธ์ วีระเดช พิณเสนาะ ศิริพงษ์ จันทร์พูนทรัพย์ และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต และสารตัวเติมผสม
ที่มีต่อสมบัติของยางโฟมธรรมชาติ

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2546 25(1) : 75-90

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกา (silica; SiO₂) และแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate; CaCO₃) ที่มีต่อสมบัติการผสม สมบัติเชิงกล กายภาพและโครงสร้างจุลภาค รวมถึงปริมาณการดูดซับโทลูอีนของยางธรรมชาติที่มีลักษณะโฟม (cellular natural rubber) ซึ่งผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป (compression moulding) ในระบบวัลคาไนซ์แบบทั่วไป (conventional vulcanisation; CV) ที่อุณหภูมิคงรูปเท่ากับ 160 °C และเวลาให้ยางคงรูปที่ 7 นาที และใช้สารพองฟูชนิด oxybisbenzenesulphonylhydrazide (OBSH) ผลการทดลอง พบว่ายางโฟมที่ผสมซิลิกาในปริมาณเท่ากับ 20 phr ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการขาดสูงสุด อย่างไรก็ตามสมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาสูงกว่า 20 phr และพบว่าปริมาณการดูดซับสารละลายที่สภาวะสมดุลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น สำหรับในกรณีของยางโฟมที่ผสมซิลิกาในปริมาณ 20 phr และปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตในช่วงระหว่าง 0 ถึง 30 phr พบว่า ปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมไม่เปลี่ยนแปลงมากนักอยู่ระหว่าง 20-30 phr และเมื่อผสมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากกว่า 30 phr พบว่าสมบัติโดยรวมลดลง เนื่องจากในระบบมีปริมาณสารตัวเติมมากเกินไป (สูงกว่า 50 phr) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผสมไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการดูดซับสารละลายที่สภาวะสมดุล เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน พบว่ายางโฟมที่มีซิลิกาผสมในปริมาณ 20 phr ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง สมบัติความต้านทานต่อการขาด และปริมาณการดูดซับสารละลายที่สภาวะสมดุลดีขึ้น และเริ่มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาสูงกว่า 20 phr และในกรณีของยางโฟมที่มีปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตต่าง ๆ ที่มีซิลิกา 20 phr การบ่มเร่งด้วยความร้อนไม่มีผลต่อสมบัติโดยรวมของยางโฟม โดยสรุป ผลงานวิจัยให้ข้อเสนอแนะว่า ปริมาณการเติมซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมคือ 20 phr และ 20-30 phr ตามลำดับ

ยางโฟม (cellular rubber) เป็นผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อการ

ใช้งานในลักษณะต่างๆ เช่น ท่อฉนวนยาง ปะเก็น ที่นุ่นลอย ฉนวนกันกระแทกและกันเสียง รองเท้า บรรจุก๊าซ

ประเภทต่างๆ เป็นต้น เนื่องจากสมบัติความเป็นฉนวน น้ำหนักเบา และมีความยืดหยุ่นสูง โดยภายในเนื้อยางมีลักษณะเป็นรูพรุน ในกระบวนการผลิตยางโพลีเอทิลีนทำได้โดยการนำ ยางธรรมชาติ (natural rubber) หรือ ยางสังเคราะห์ (synthetic rubber) ไปผสมกับสารเติมแต่ง (additives) ประเภทต่างๆ เช่น สารทำให้ยางคงรูป (vulcanising agents) สารตัวเร่ง (accelerators) สารกระตุ้นเร่ง (activators) สารตัวเติม (fillers) เป็นต้น ได้เป็นยางคอมปาวด์ (rubber compound) ซึ่งลักษณะที่เป็นยางโพลีเอทิลีน เกิดจากการเติมสารพองฟู (blowing agent) ลงไปในยางคอมปาวด์ แล้วนำยางคอมปาวด์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการคงรูปยาง (vulcanisation) ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยาง และสารพองฟูเกิดการสลายตัวเป็นก๊าซให้โครงสร้างที่เป็นรูพรุนภายในเนื้อยาง

จากการศึกษางานวิจัยในอดีต พบว่า ได้มีการศึกษาอิทธิพลของสารตัวเติมและสารเติมแต่งประเภทต่างๆ ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติการไหลของยาง ดังเช่น งานวิจัยของ Wang (1982) ได้ศึกษาปัจจัยของการเกิดโฟม คือ เวลาที่ยางอยู่ในระบบ (residence time) อุณหภูมิในการเกิดโฟม (foaming temperature) และความเข้มข้นของสารพองฟู ที่มีผลต่อความหนาแน่นและโครงสร้างของยางโพลีเอทิลีน ethylene-propylene diene terpolymer (EPDM) คือ ความหนาแน่นของโพลีเอทิลีน ความหนาแน่นของชั้นผิว ขนาดรูพรุนภายในโดยเฉลี่ยและจำนวนรูพรุนที่เกิดขึ้น จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดโฟมหรือเพิ่มความเข้มข้นของสารพองฟูส่งผลให้ความหนาแน่นของยางโพลีเอทิลีนและความหนาแน่นของชั้นผิวมีค่าลดลง รวมถึงขนาดและปริมาณรูพรุนโดยเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม อิทธิพลของการเพิ่มอุณหภูมิในการเกิดโฟมจะไม่ส่งผลต่อปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นมากนัก และหากพิจารณาอิทธิพลของเวลาในการคงรูปของยางจะพบว่าไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นและความหนาแน่นของชั้นผิวตลอดจนขนาดและปริมาณที่เกิดขึ้น

Ismail และคณะ (1995) ได้ศึกษาอิทธิพลของเกลือไดอะซีนในกรดไขมันที่มีต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผสมซิลิกา จากผลการทดลองโดยทั่วไปพบว่าสมบัติเชิงกล และความต้านทานต่อการบวมตัวของยางมี

ค่าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ปริมาณเกลือไดอะซีนในช่วงที่เหมาะสมระหว่าง 5-7 phr และ 1-3 phr ตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของซิลิกาและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง Unnikrishnan และคณะ (1996) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของสารตัวเติมประเภทเขม่าดำ (carbon black) และซิลิกาในปริมาณที่เท่ากัน ที่มีต่อพฤติกรรมดูดซับ (absorption) และการแพร่ (diffusion) ของสารละลายไฮโดรคาร์บอนในยางธรรมชาติ ผลการทดลองโดยทั่วไปพบว่า ยางที่ผสมสารตัวเติมประเภทเขม่าดำดูดซับสารละลายได้ในปริมาณที่น้อยกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมประเภทซิลิกา เนื่องจากมีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงสูงกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) แปรผกผันกับเวลาในการคงรูป (cure time) และน้ำหนักโมเลกุล (molar mass) ของยาง กล่าวคือ หากเวลาในการคงรูป หรือน้ำหนักโมเลกุลของยางเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ปริมาณการดูดซับของสารละลายที่จุดสมดุลมีค่าลดลง

Sombatsompop และ Lertkamolsin (2000) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารพองฟูประเภท azodicarbonamide (ADC) และ oxybisbenzenesulphonylhydrazide (OBSH) ที่มีต่อสมบัติของยางโพลีเอทิลีน คือ ความหนาแน่นของปริมาณรูพรุนภายในยางโพลีเอทิลีน ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และพฤติกรรมบวมตัวของยางโพลีเอทิลีน ผลการทดลองโดยทั่วไปพบว่า ความหนาแน่นของปริมาณรูพรุนภายในยางโพลีเอทิลีนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารพองฟู ซึ่งยางโพลีเอทิลีนที่ใช้สารพองฟูประเภท OBSH มีอิทธิพลต่อการเกิดปริมาณรูพรุนภายในมากกว่า ADC ส่งผลให้การบวมตัวหรือปริมาณการดูดซับสารละลายมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงพบว่า ADC มีความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงมากกว่าในระบบของ OBSH ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยงในยางโพลีเอทิลีนมีผลมาจาก 2 ประการคือ การที่พันธะเชื่อมโยงถูกทำลาย และความรุนแรงของระบบวัลคาไนซ์ ในขณะที่สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงไม่อาจสรุปแนวโน้มที่ชัดเจนได้

อย่างไรก็ตามจะพบว่างานวิจัยที่ทำการศึกษาคืออิทธิพลผสมของสารตัวเติมระหว่าง 2 ประเภทในยางธรรมชาติ ยังมีน้อยมาก ดังเช่นงานวิจัยของ Saad และ Younan

(1995) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยในลอน 6 (short fiber) ที่มีต่อสมบัติการไหล สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และสมบัติทางไฟฟ้า ของยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 40 phr จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณเส้นใยในลอน 6 เท่ากับ 25 phr ให้สมบัติในด้านต่างๆ เหมาะสมที่สุด และจากงานวิจัยของ Sirisinha และคณะ (2001) ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของสารตัวเติมผสมระหว่าง ซิลิกาและเขม่าดำที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของยางไอโซพรีน (isoprene rubber) จากผลการทดลองพบว่าค่าความหนืดเฉือน (shear viscosity) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของซิลิกาเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการรวมกลุ่มกันระหว่างอนุภาคซิลิกา และค่ามอดูลัสเฉือน (shear modulus) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเสริมแรงของซิลิกา และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ โดยรวม พบว่าอัตราส่วนระหว่างซิลิกา/เขม่าดำที่ 50/50 มีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจากให้สมบัติเชิงกลโดยรวมที่ดีกว่าการใช้ซิลิกาหรือเขม่าดำเพียงชนิดเดียว

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมผสมระหว่างซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติที่มีลักษณะโฟม โดยสมบัติเชิงกลที่ทดสอบได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการขาด ในขณะที่ยังคงมีสมบัติทางกายภาพที่ทำการทดสอบคือความต้านทานต่อความร้อน พฤติกรรมการบวมตัวและยุบตัวในสารละลายโทลูอีน เพื่อให้เป็นแนวทางในการนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางโฟมในการเพิ่มสมบัติในด้านต่างๆ ของยาง

โฟม อีกทั้งสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ ตลอดจนเป็นการสนับสนุนการพัฒนาและเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์จากยางพาราของประเทศไทยต่อไปในอนาคต

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

1. วัสดุและสารเคมี

สูตรยางที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้แสดงรายละเอียดดัง Table 1

2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานและทดสอบสมบัติของยางโฟม แสดงรายละเอียดดัง Table 2

3. การทดสอบสมบัติของยาง

3.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานยางทดสอบ

นำยางธรรมชาติมาบดด้วยเครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 200 มม. เป็นเวลาประมาณ 10 นาที โดยใช้อุณหภูมิลูกกลิ้งเท่ากับ 70 °C และใช้อัตราส่วนความเร็วของลูกกลิ้งชุดหน้าและหลังเท่ากับ 1/1.25 เพื่อลดน้ำหนักโมเลกุลหรือความหนืดของยาง โดยใส่ยางผ่านลูกกลิ้ง 6 ครั้ง จากนั้นจึงทำการผสมสารเคมีและสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ดังแสดงใน Table 1 ขณะทำการบดผสม จะใช้มีดตัดยาง (milling knife) กรีดและม้วนยาง จนกระทั่งสารเคมีและสารตัวเติมเข้ากับเนื้อยางจนทั่วถึง โดยใช้เวลาในการบดผสม

Table 1. Materials and chemical compositions in parts per hundred rubber (phr)

Materials and Chemicals	Grade	Trade name and manufacturers	Contents (phr)
Natural rubber	STR5L	SMP Rubber Co., Ltd.	100
Sulfur	commercial	SMP Rubber Co.,Ltd.	2.5
Stearic acid	rubber	Acidchem International	2.0
Zinc oxide (ZnO)	commercial	Zinkoxid aktiv, Bayer Co.,Ltd.	4.0
CBS	commercial	Vulkacit CZ, Bayer Co.,Ltd	1.5
DPG	commercial	Vulkacit F, Bayer Co.,Ltd	0.5
Blowing agent (OBSH)	commercial	Porofor OBSH, Bayer Co.,Ltd.	3.0
SiO ₂	Preciptate 255S	Silica Co., Ltd	0-40
CaCO ₃	Light	Siam Calcium Co., Ltd.	0-40

Table 2. Instruments for mechanical and physical testings

Instruments	Model
Hydraulic press	Daina HD-30
Two-roll mill	Kodair seisakusho R11-3FF
Vulcanizing press	WABASH V75H-18-BPX
Compress air sample cutting	Dumbbell
Geers rubber aging oven	Ueshima 900626
Mooney viscometer	TECHPRO-visTECH 123103
Rhoemeter : rotor type	TECHPRO-rheoTECH 121105
Tensile testing machine	Instron 1011
Scanning electron microscope	JSM-5900LV
Abrasion testing machine	Hampden APH-40
Precise weighing density balance	GT-125A
Thickness gauge	SAGInoMIYA

ประมาณ 15 นาที จากนั้นจึงปรับช่องระหว่างลูกกลิ้งให้กว้างออก 3 มม. เพื่ออัดรีดยางคอมปาวด์ (unvulcanized rubber compound) ออกมาให้มีความหนา 3 มม. และตั้งยางคอมปาวด์ทิ้งไว้ประมาณ 12 ชั่วโมง ก่อนนำไปทดสอบสมบัติการไหล (rheological properties) ของยางคอมปาวด์และสมบัติในด้านต่างๆ ของยางวัลคาไนซ์

3.2 การทดสอบสมบัติการไหลของยางคอมปาวด์ก่อนการวัลคาไนซ์

3.2.1 การทดสอบค่าความหนืดของยางก่อนที่จะทำการบดและหลังทำการบด

ทำการตัดยางก่อนที่จะทำการบดและหลังจากที่ทำการบดแล้ว 10 นาที อย่างละ 2 ชิ้นให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมประมาณ 44.5 มม. และเจาะรูตรงกลาง โดยให้ปริมาตรของยางคอมปาวด์ทั้งสองชิ้นรวมกันประมาณ 25 ลบ.ซม. เพื่อนำไปทดสอบความหนืดของยาง โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจานหมุนเท่ากับ 38.10 ± 0.03 มม. ด้วยความเร็วรอบในการหมุน 2 ± 0.02 รอบ/นาที และใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 100°C ซึ่งในการทดสอบยางคอมปาวด์จะได้รับความร้อน 1 นาที ก่อนเริ่มหมุนจานโลหะ โดยทำการอ่านค่าความหนืด Mooney ที่เวลา 4 นาที โดยยางธรรมชาติที่ผ่านการบดแล้ว 10 นาที ค่าความหนืด Mooney ลดลงจาก $77.19 \text{ ML } 1 + 4$ (100°C) เป็น $42.33 \text{ ML } 1 + 4$ (100°C)

3.2.2 ทดสอบความหนืดของยางคอมปาวด์ก่อนการวัลคาไนซ์

นำยางคอมปาวด์ที่มีปริมาณซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตต่างๆ กัน ไปทดสอบความหนืดของยาง โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer ซึ่งมีหลักการและขั้นตอนการดำเนินงานดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

3.2.3 การทดสอบหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางคอมปาวด์ที่เหมาะสม

ทำการตัดยางคอมปาวด์ดังกล่าว ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาดประมาณ 5×5 ซม. เพื่อนำไปทดสอบหาอุณหภูมิและเวลาคงรูปของยางคอมปาวด์ที่เหมาะสม โดยใช้เครื่อง oscillating disk rheometer (ODR) เพื่อหาเวลาที่ยางสุกเหมาะสม (optimum cure) ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 160°C เป็นเวลา 20 นาที โดยพิจารณาจากเส้นกราฟการไหล และทำการเลือกค่าแรงบิดที่ 90% (T_{90}) จากนั้นตีเส้นขนานกับแกนเวลาเพื่อหาค่าเวลาที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปที่ 90% (T_{90}) ซึ่งได้ค่าประมาณ 7 นาที

3.3 การทดสอบสมบัติของยางวัลคาไนซ์

3.3.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์

1) การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงของยางวัลคาไนซ์

การเตรียมชิ้นงานยางวัลคาไนซ์สำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึง โดยนำยางคอม-

ปาวด์ที่มีปริมาณซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตต่างๆ กัน ที่ถูกรีดเป็นแผ่นหนา 3 มม. มาตัดเป็นแผ่นขนาด 11.2×12.8 ซม. ใส่ในแม่พิมพ์ 4 ชั้น โดยใช้กระบวนการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160°C และใช้ความดันในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 500 กิโลนิวตัน/ตร.มม. เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 7 นาที แผ่นขึ้นงานยางวัลคาไนซ์ที่ได้จะมีขนาด 14×16 ซม. หนา 2 มม. และนำไปตัดด้วยเครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม (compress air sample cutting) ที่มีหัวคายเป็นรูปดัมเบลล์ เพื่อนำไปทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงตามมาตรฐาน ISO R 37 -1968 ที่อัตราเร็วในการทดสอบ 500 มม./นาที

2) การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการขัดถูของยางวัลคาไนซ์

การเตรียมชิ้นงานยางวัลคาไนซ์สำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการขัดถู โดยนำยางคอมปาวด์ที่รีดเป็นแผ่นมาฉนวนให้เป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.0 ซม. แล้วนำไปตัดเป็น 6 ชั้นโดยทำการชั่งชิ้นละ 1.7 กรัม จากนั้นนำไปอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดยางคงรูปที่ความดัน 1.5 กิโลนิวตัน/ตร.ซม. ที่อุณหภูมิ 160°C เวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากับ 7 นาที ชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.0 มม. และหนา 9.7 มม. จากนั้นนำชิ้นงานยางวัลคาไนซ์ไปชั่งน้ำหนักและหาปริมาตรโดยใช้เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะของยาง เพื่อหาค่าความหนาแน่นจากสมการที่ 1

$$D = \frac{m}{V} \quad (1)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่น (mg/mm^3)

m คือ น้ำหนักเริ่มต้น (mg)

V คือ ปริมาตร (mm^3)

นำชิ้นงานไปทดสอบความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion test) ตามมาตรฐาน DIN 53516 แรงที่ใช้ในการกด เท่ากับ 12.5 นิวตัน ที่ความเร็วในการขัดถู (abrasion speed) เท่ากับ 0.32 ม./วินาที และนำชิ้นงานมาชั่งหาน้ำหนักสุดท้าย เพื่อนำไปคำนวณหาพื้นที่สูญเสีย (m) และค่าปริมาตรการสูญเสียเนื้อยาง (volume loss) จากสมการที่ 2 และ 3

$$m = \text{Original mass} - \text{Final mass} \quad (2)$$

$$\text{Volume loss} = \frac{\Delta m}{D} \quad (3)$$

3.3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางวัลคาไนซ์

1) การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวและการยุบตัวในโทลูอีน

ทำการทดสอบตามวิธี sorption method โดยนำแผ่นยางวัลคาไนซ์ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นมาตัดเป็นชิ้นทดสอบขนาด กว้าง 2 ซม. ยาว 2 ซม. และหนา 3 มม. จำนวน 3 ชิ้นในแต่ละสูตร ชั่งน้ำหนักและนำไปแช่ในโทลูอีน เพื่อให้เกิดการบวมตัว และชั่งน้ำหนักของยางโพลีที่แช่ในโทลูอีน ที่เวลาต่างๆ กันทุก 3 ชั่วโมง จนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านน้ำหนักหรือเข้าสู่จุดอิ่มตัว (equilibrium) ส่วนในกรณีของการทดสอบพฤติกรรมการยุบตัวทำได้โดย นำยางที่ผ่านการแช่ในโทลูอีน จนกระทั่งอิ่มตัวสมบูรณ์แล้ว มาชั่งน้ำหนักและนำไปวางในบริเวณที่มีอากาศถ่ายเท ภาชนะที่แห้ง เพื่อให้เกิดการระเหยไปของโทลูอีน และชั่งน้ำหนักของยางโพลีที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการยุบตัว ณ เวลาต่างๆ ทุก 1 ชั่วโมง โดยที่ในช่วง 1 ชั่วโมงแรก จะทำการชั่งน้ำหนักทุก 15 นาที เพราะน้ำหนักของยางลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งยางไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านน้ำหนักหรือเข้าสู่สภาพเดิม โดยการแทรกซึมหรือการหายไปของตัวทำละลายที่เวลาต่างๆ กัน (Q_t) สามารถหาได้จากสมการที่ 4 (Sombatsompop, 1998)

$$Q_t = \frac{\left(\frac{W_\alpha - W_0}{W_0} \right)}{M_w} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ Q_t คือ เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของยางที่เวลาต่างๆ กัน

W_0 คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่แห้ง

W_α คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่เกิดการบวม(หรือการยุบตัว)

M_w คือ น้ำหนักโมเลกุลของตัวทำละลาย

2) การทดสอบความต้านทานต่อความร้อน (thermal aging resistance)

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 573-78 โดยการนำชิ้นงานทดสอบ เข้าตู้อบสำหรับบ่มเร่งยาง (rubber aging oven) ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อน แล้วไปทดสอบสมบัติเชิงกลในด้านต่างๆ และพฤติกรรมรวมตัวและการยุบตัวในโทลูอีน เช่นเดียวกัน

ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. อิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อสมบัติของยางโพลี

เมื่อพิจารณาค่าความหนืด Mooney และเวลาที่ได้จากเครื่อง Mooney viscometer ของยางคอมปาวด์ที่ผสมซิลิกาในปริมาณต่างๆ กัน ดังแสดงใน Figure 1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาในยางคอมปาวด์ ส่งผลให้ค่าความหนืด Mooney มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Blow and Hepburn, 1982; Sirisinha *et al.*, 2001) เมื่อกระจายอยู่ในยางคอมปาวด์ จึงทำให้ความหนืดของยางคอมปาวด์เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ยางคอมปาวด์ที่มีปริมาณซิลิกาเท่ากับ 60 และ 80 phr ค่าความหนืด Mooney ที่ได้มีค่าสูงมาก ส่งผลให้ความ

สามารถในการผสมยาง (mixability) ในยางคอมปาวด์ลดลงอย่างมาก เนื่องจากซิลิกาไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในเนื้อยางได้แต่เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อน (agglomerate) (Hofmann, 1988) ทำให้ต้องใช้เวลาในการบดผสมนานขึ้นและอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจากการบดผสมนี้อาจทำให้ยางคอมปาวด์มีน้ำหนักโมเลกุลลดลงและอาจก่อให้เกิดการสูกของยางก่อนเวลา (premature crosslink) ดังนั้นจึงไม่สามารถนำยางคอมปาวด์ที่มีปริมาณซิลิกาเท่ากับ 60 และ 80 phr มาผ่านกระบวนการคงรูปเพื่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบสมบัติ ได้

เมื่อนำชิ้นงานยางวัลคาไนซ์ไปทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อการขัดถูของยางโพลีที่ผสมปริมาณซิลิกาต่างๆ กัน ดังแสดงใน Figure 2 พบว่า เมื่อผสมปริมาณซิลิกาในยางโพลีเท่ากับ 20 phr ค่าความเค้นดึงสูงสุด (stress at maximum load) ของยางโพลีมีค่าเพิ่มขึ้นและปริมาตรการสูญเสียเนื้อยางโพลี (abrasion volume loss) มีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ซิลิกาเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing filler) (Hofmann, 1988) ทำให้ความแข็งแรงของเนื้อยางเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาจนถึง 40 phr พบว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดของยางโพลีมีค่าลดลง และมีปริมาตรการสูญเสียเนื้อยางเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของซิลิกา

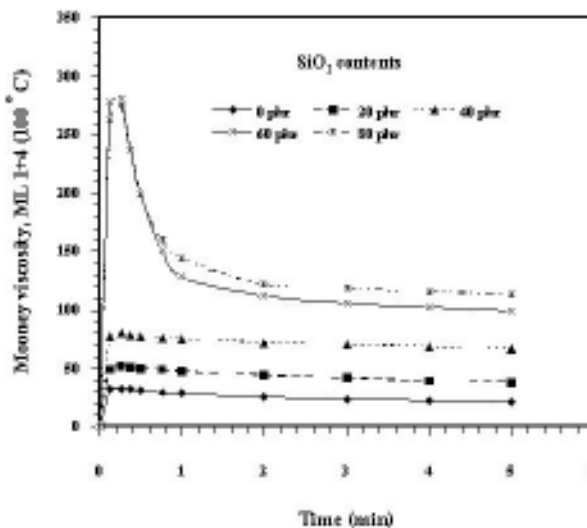


Figure 1. Mooney viscosity of unvulcanized rubber compound of different SiO₂ contents

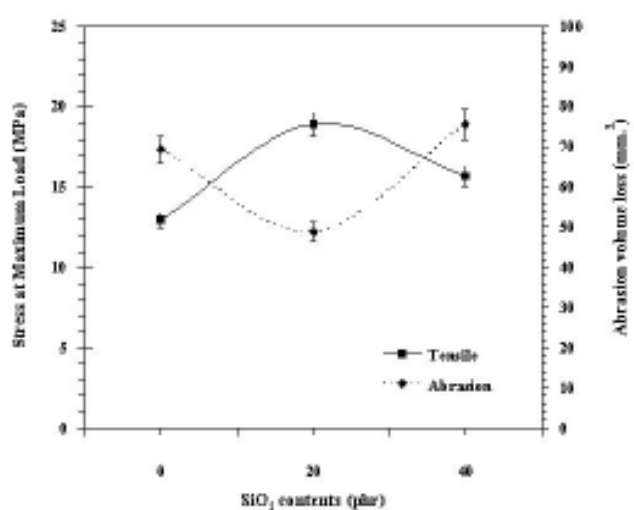


Figure 2. Tensile and abrasive curves of cellular NR vulcanisates of different SiO₂ contents

ณ ความเข้มข้นนี้ไม่แยกกันอยู่อย่างเป็นอิสระแต่เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อน ไม่สามารถกระจายตัวภายในเนื้อยางได้อย่างทั่วถึง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงภายในเนื้อยางลดต่ำลง ซึ่งเป็นเหตุให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการขีดฉีกมีค่าลดลง

หากพิจารณาลักษณะรูพรุนภายในของยางโฟมที่ผสมซิลิกาในปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ที่กำลังขยาย 70 และ 170 เท่า ดังแสดงใน Figure 3 พบว่ายางโฟมที่ไม่มีการผสมซิลิกา (Figure 3a และ 3b) รูพรุนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก ซึ่งทำให้นเนื้อยางมีความหนาแน่นหรือมีพื้นที่ในการรับแรงลดน้อยลง ส่งผลให้

ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับยางโฟมที่มีซิลิกาเท่ากับ 20 phr (Figure 3c และ 3d) ในขณะที่หากพิจารณาลักษณะของรูพรุนภายในยางโฟมที่มีปริมาณซิลิกาเท่ากับ 40 phr (Figure 3e และ 3f) พบว่า ปริมาตรรูพรุนที่เกิดขึ้นมีน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากความหนืดของยางที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดรูพรุนเป็นไปได้ยาก และการที่ยางโฟมมีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงอย่างมาก เนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนของซิลิกามากกว่าที่ 20 phr ดังแสดงในภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 170 เท่า (Figure 3d และ 3f) ทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของซิลิกาภายในเนื้อยางลดต่ำลง ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการขีดฉีกมีค่าลดลง

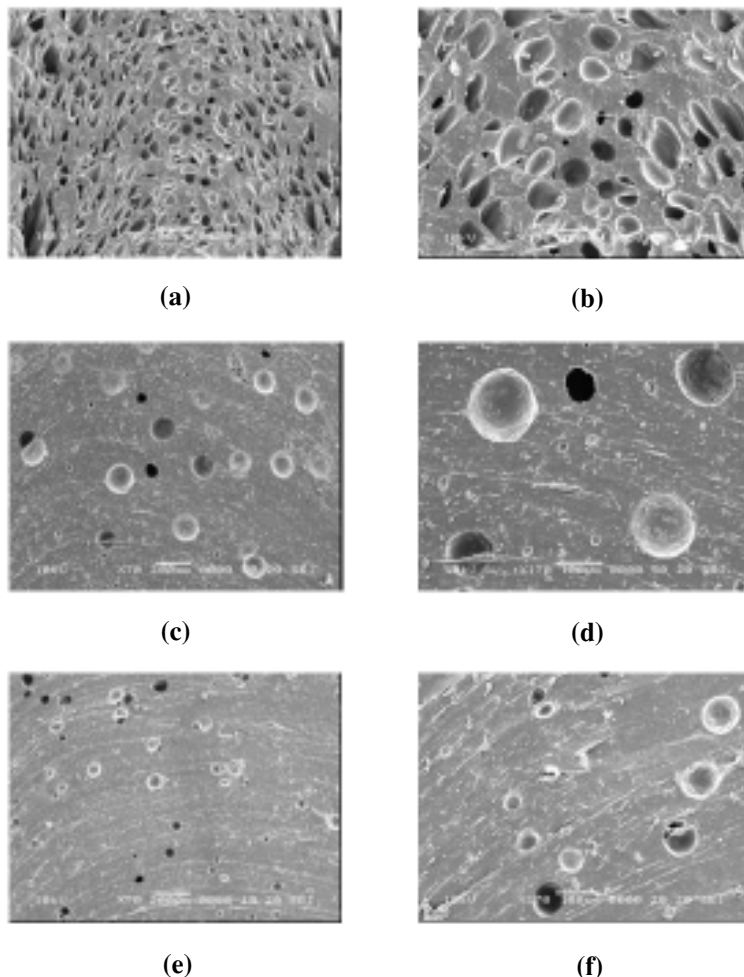


Figure 3. SEM micrograph of cellular NR vulcanisates containing different SiO_2 contents : (a) 0 phr ($\times 70$), (b) 0 phr ($\times 170$), (c) 20 phr ($\times 70$), (d) 20 phr ($\times 170$), (e) 40 phr ($\times 70$) and (f) 40 phr ($\times 170$)

เมื่อนำยางโฟมที่ผสมปริมาณซิลิกาต่างๆ กัน ไปทดสอบพฤติกรรมกรรมการบวมตัวและการยุบตัวในโทลูอีน ซึ่งแสดงใน Figure 4 พบว่าอัตราการบวมตัว (swelling rate) ในสารละลายก่อนเข้าสู่ภาวะสมดุล และอัตราการยุบตัว (deswelling rate) ภายหลังสภาวะสมดุลมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารตัวเติมประเภทซิลิกาไม่มีอิทธิพลต่ออัตราการบวมตัวและการยุบตัวของยางโฟมอย่างไรก็ตาม หากพิจารณาปริมาณการดูดซับโทลูอีน เมื่อเข้าสู่สมดุล (equilibrium state) พบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มมากขึ้น จะมีปริมาณการดูดซับโทลูอีน หรือการบวมตัวลดลงเนื่องจากปริมาณรูพรุนที่ลดลง และซิลิกาทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวสายโซ่โพลิเมอร์ของยางไว้ ส่งผลให้โทลูอีนแทรกตัวเข้าไปในสายโซ่โพลิเมอร์ของยางได้ลดลง (Unnikrishnan *et al.*, 1996) และหากพิจารณาประสิทธิภาพของการลดการบวมตัวในโทลูอีนของยางโฟมที่มีปริมาณซิลิกาเท่ากับ 20 และ 40 phr เปรียบเทียบกัน โดยการพิจารณาจากการลดลงของปริมาณการดูดซับโทลูอีน เมื่อเข้าสู่สมดุลเมื่อเทียบกับยางโฟมที่ไม่มีการผสมซิลิกา พบว่ายางโฟมที่ผสมซิลิกาเท่ากับ 20 phr มีแนวโน้มที่ให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงได้ดีกว่าที่ 40 phr โดยพิจารณาปริมาณการลดลงของ

การบวมตัวของชิ้นงานด้วยการเติมซิลิกาจาก 0-20 ซึ่งมากกว่าในกรณีของการเติมจาก 20-40 phr อย่างไรก็ตาม พบว่ายางโฟมที่ผสมซิลิกาเท่ากับ 40 phr จะมีปริมาณการดูดซับโทลูอีน เมื่อเข้าสู่สมดุลน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากยางโฟมที่ผสมซิลิกาเท่ากับ 40 phr มีปริมาณเนื้อยางที่น้อยกว่าและอนุภาคซิลิกาที่ผสมเพิ่มมากขึ้นนั้นไม่ได้เกิดการบวมตัวในสารละลาย

จากผลการทดลองที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า ยางโฟมที่ผสมซิลิกาในปริมาณเท่ากับ 20 phr ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการขาดสูงสุด อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงหรือลดการบวมตัวได้ดี ดังนั้นจึงนำยางโฟมที่มีซิลิกาในปริมาณ 20 phr ไปทำการทดลองเพื่อหาอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อสมบัติของยางโฟมต่อไป

2. อิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อสมบัติของยางโฟมที่มีซิลิกา 20 phr ผสมอยู่

เมื่อพิจารณาค่าความหนืด Mooney และเวลาที่ได้จากเครื่อง Mooney viscometer ของยางคอมปาวด์ที่ผสมซิลิกาในปริมาณเท่ากับ 20 phr และปริมาณแคลเซียม

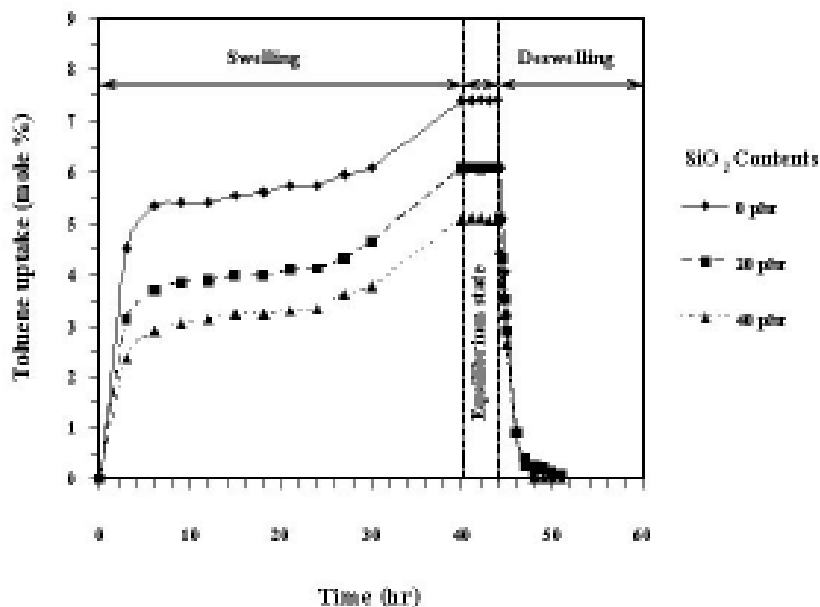


Figure 4. Swelling and deswelling curves of cellular NR vulcanisates of different SiO₂ contents

คาร์บอนเนตต่างๆ กันดังแสดงใน Figure 5 พบว่า ค่าความหนืด Mooney ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตที่ผสมในยางคอมปาวด์ไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติการไหล ทั้งนี้เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอนเนตเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (non-reinforcing filler) และมีวัตถุประสงค์การใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต (Blow and Hepburn, 1982)

เมื่อนำชิ้นงานยางวัลคาไนซ์ที่ผสมซิลิกาในปริมาณเท่ากับ 20 phr และปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตต่างๆ กันไปทดสอบสมบัติความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อการขีดถู พบว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดและปริมาตรการสูญเสียเนื้อของยางโฟม ดังแสดงใน Figure 6 พบว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตที่ 10 20 และ 30 phr ให้ค่าความเค้นดึงสูงสุดใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตมากกว่า 30 phr พบว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดเริ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารตัวเติมโดยรวมซึ่งประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอนเนตและซิลิกาที่มากเกินไป (สูงกว่า 50 phr) ส่งผลให้เนื้อยางโฟมมีความแข็งแรงลดลงเนื่องจากอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอนเนตเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางทำให้สายโซ่โมเลกุลอยู่ห่างกันมากขึ้น ส่งผลทำให้แรงยึด

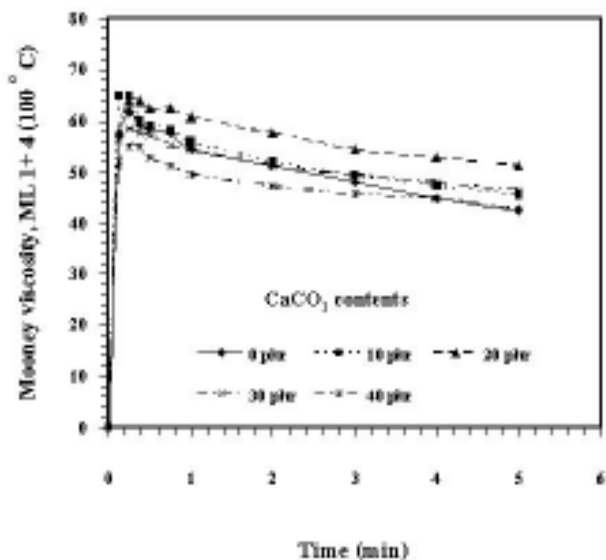


Figure 5. Mooney viscosity of unvulcanized rubber compound containing 20 phr SiO₂ and different CaCO₃ contents

เหนียวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางลดลง ดังนั้นความแข็งแรงของเนื้อยางจึงลดลงตามไปด้วย ในขณะที่หากพิจารณาปริมาตรการสูญเสียเนื้อของยางโฟมที่ปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตต่างๆ กัน พบว่าผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบความเค้นดึงสูงสุด

หากพิจารณาลักษณะของรูพรุนภายในยางโฟมที่ผสมซิลิกาในปริมาณเท่ากับ 20 phr และปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตต่างๆ กัน ดังแสดงใน Figure 7 พบว่าปริมาณและขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นเมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอนเนตเท่ากับ 10 phr (Figure 7a และ 7b) และ 30 phr (Figure 7c และ 7d) มีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ความต้านทานต่อแรงดึงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่เมื่อพิจารณาปริมาณและขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้นเมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอนเนตเท่ากับ 40 phr (Figure 7e และ 7f) ปรากฏว่าปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณสารตัวเติมโดยรวมซึ่งประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอนเนตและซิลิกาที่มากถึง 60 phr ทำให้วัสดุผสมมีความหนาแน่นมาก รวมทั้งผลของการที่แคลเซียมคาร์บอนเนต เป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรงที่มีมากถึง 40 phr จึงส่งผลให้เนื้อยางโฟมมีความแข็งแรงลดลง และเกิดปริมาณรูพรุนภายในได้น้อย

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการบวมตัวและยุบตัวของยางโฟมที่ผสมซิลิกา 20 phr และปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตต่างๆ กัน ในโทลูอีน ดังแสดงใน Figure 8 พบว่าอัตราการบวมตัวก่อนเข้าสู่สภาวะสมดุล และอัตราการยุบตัวภายหลังสภาวะสมดุล ตลอดจนปริมาณการดูดซับโทลูอีนเมื่อเข้าสู่สมดุลของยางโฟม มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าซิลิกามีอิทธิพลในการเสริมแรงหรือลดการบวมตัวได้ดีกว่าแคลเซียมคาร์บอนเนต โดยพิจารณาจากปริมาณการดูดซับโทลูอีน เมื่อเข้าสู่สมดุล ยังคงมีค่าเท่าเดิมในขณะที่ปริมาณซิลิกาไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปริมาณแคลเซียมคาร์บอนเนตที่ผสมในยางโฟมนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการบวมตัวและยุบตัวของยางโฟม

3. อิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อน

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่มีต่อสมบัติของยางโฟมที่ผสมสารตัวเติมประเภทซิลิกาในปริมาณต่างๆ กันดังแสดงใน Figure 9 และ Figure 10

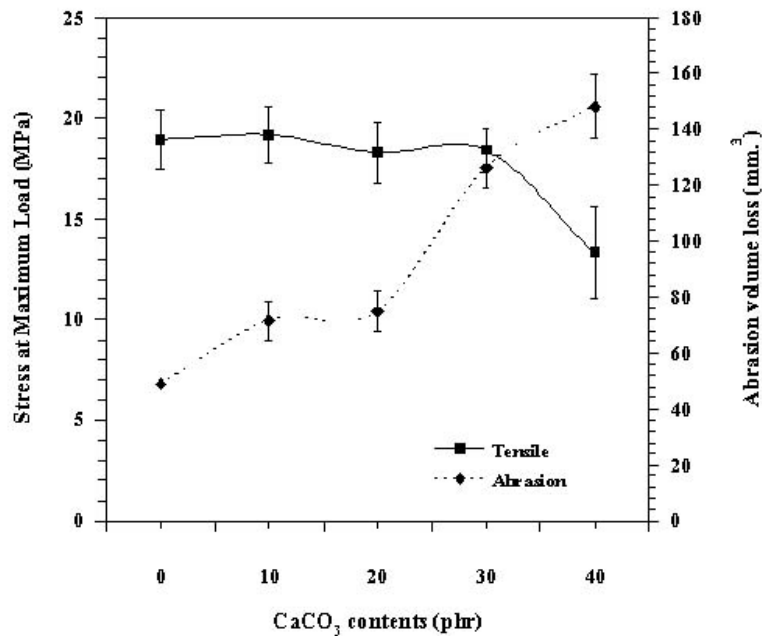


Figure 6. Tensile and abrasive curves of cellular NR vulcanisates containing 20 phr SiO₂ and different CaCO₃ contents

พบว่า ยางโฟมที่ไม่มีการผสมซิลิกา ยาง เมื่อผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อน ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการขัดถูลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากความไม่เสถียรของพันธะโพลีซัลไฟด์ที่ติดต่อความร้อนจึงเกิดการสลายตัว ส่งผลให้ยางสูญเสียสมบัติความแข็งแรงไป (วรภกรณ, 2541) สำหรับในกรณีที่มีซิลิกาผสมอยู่ พบว่าการบ่มแรงด้วยความร้อนพบว่าไม่มีผลมากนักต่อสมบัติการต้านทานแรงดึง ซึ่งอาจเนื่องมาจากซิลิกาซึ่งทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางไว้ อย่างไรก็ตาม การบ่มแรงมีผลทำให้การต้านทานต่อการขัดถูลดลง

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการขัดถูของยางโฟมที่ผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อนเมื่อผสมซิลิกาในปริมาณเท่ากับ 20 phr และแคลเซียมคาร์บอเนตในช่วงระหว่าง 10 ถึง 30 phr ดังแสดงใน Figure 11 และ Figure 12 พบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดและความต้านทานต่อการขัดถูก่อนและหลังการบ่มแรงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรงและไม่ได้รับอิทธิพลจากการบ่มแรงด้วยความร้อน อย่างไรก็ตาม หากเพิ่ม

ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่า 30 phr พบว่าค่าความเค้นดึงสูงสุดและความต้านทานต่อการขัดถูเริ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารตัวเติมโดยรวมระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาที่มากเกินไปกว่า 50 phr ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการบวมตัวและการยุบตัวของยางโฟมที่ผสมสารตัวเติมประเภทซิลิกาในปริมาณต่างกัน ที่ผ่านการบ่มแรงและไม่ได้ผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อนเปรียบเทียบกัน ดังแสดงใน Figure 13 พบว่าอัตราการบวมตัวก่อนสภาวะสมดุลและอัตราการยุบตัวหลังสภาวะสมดุลของยางโฟมที่ผสมและไม่ผสมซิลิกามีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ยางโฟมที่ไม่ได้ผสมซิลิกาและผ่านการบ่มแรง มีปริมาณการดูดซับไอลูอิน ที่สภาวะสมดุลลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของสายพันธะเชื่อมโยงที่ยาวเป็นพันธะที่สั้นลง (desulphuration) ทำให้ช่องว่างระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง (free volume) ลดลง ส่งผลให้โมเลกุลของสารละลายเข้าไปแทรกตัวได้น้อยลง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณซิลิกาที่มีต่อการดูดซับไอลูอิน ที่สภาวะสมดุลของยางโฟมเมื่อผ่านการบ่มแรงและไม่ผ่านการบ่ม

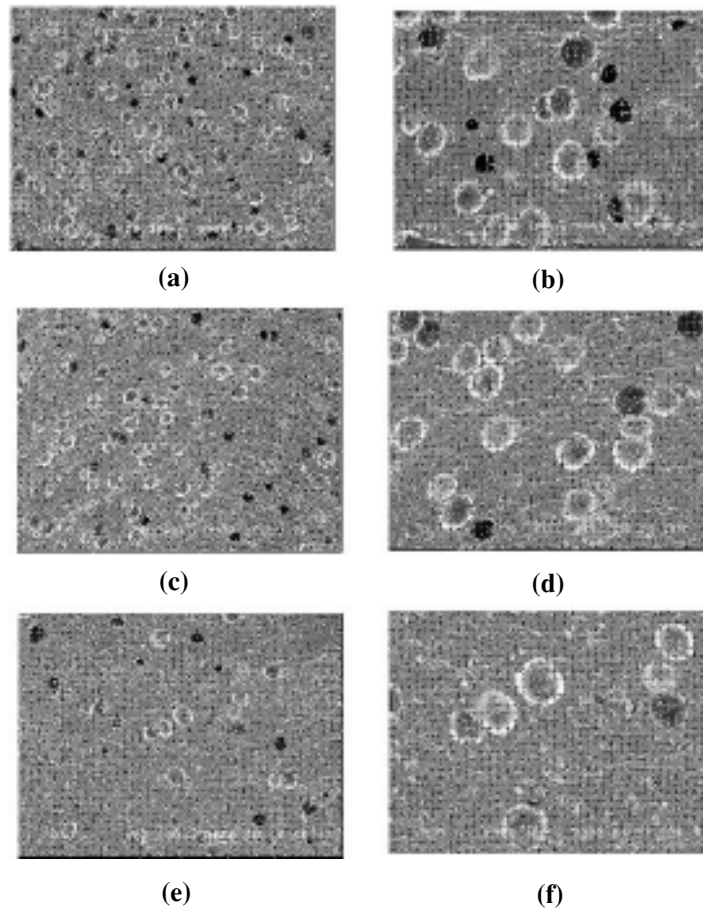


Figure 7. SEM micrograph of cellular NR vulcanisate containing 20 phr SiO_2 and different CaCO_3 contents : (a) 10 phr, (b) 10 phr ($\times 170$) (c) 30 phr, (d) 30 phr ($\times 170$), (e) 40 phr and (f) 40 phr ($\times 170$)

เร่งด้วยความร้อนเปรียบเทียบกัน พบว่า การลดลงของปริมาณการดูดซับโทลูอีน เมื่อผสมซิลิกาเท่ากับ 20 phr มีค่าน้อยกว่ายางโฟมที่ไม่ได้ผสมซิลิกาอย่างมาก เนื่องมาจากซิลิกายังคงทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงของเนื้อยางไว้ ในขณะที่ 40 phr มีค่าปริมาณการดูดซับสารละลายเมื่อเข้าสู่สมดุลเนื่องมาจากการบ่มเร่งไม่แตกต่างกันเป็นนัยสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายางโฟมที่ผสมซิลิกาเท่ากับ 20 phr ให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงได้ดีกว่าที่ 40 phr

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการบวมตัวและการยุบตัวของยางโฟมที่ผสมซิลิกาเท่ากับ 20 phr และแคลเซียมคาร์บอเนตต่างๆ กัน ที่ผ่านการบ่มเร่งและไม่ได้ผ่านการบ่มเร่งด้วยความร้อนเปรียบเทียบกัน ดังแสดงใน Figure

14 พบว่า อัตราการบวมตัวก่อนเข้าสู่ภาวะสมดุลและอัตราการยุบตัวหลังสภาวะสมดุลยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ปริมาณการดูดซับสารละลายที่จุดสมดุลลดลงเมื่อผ่านการบ่มเร่ง ทั้งนี้เนื่องมาจากผลจากการเสริมแรงของซิลิกาในปริมาณ 20 phr ที่ยังคงมีอยู่ในเนื้อยาง ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับอิทธิพลของปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต เนื่องจากปริมาณการดูดซับสารละลายที่จุดสมดุลไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของแคลเซียมคาร์บอเนต

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึง

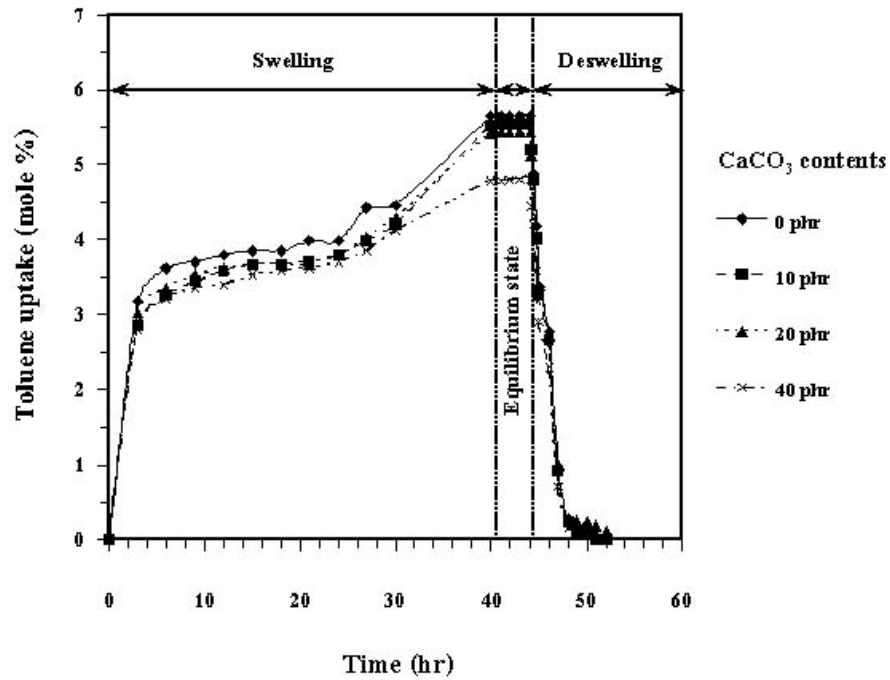


Figure 8. Swelling and deswelling curves of cellular NR vulcanisates containing 20 phr SiO₂ and different CaCO₃ contents

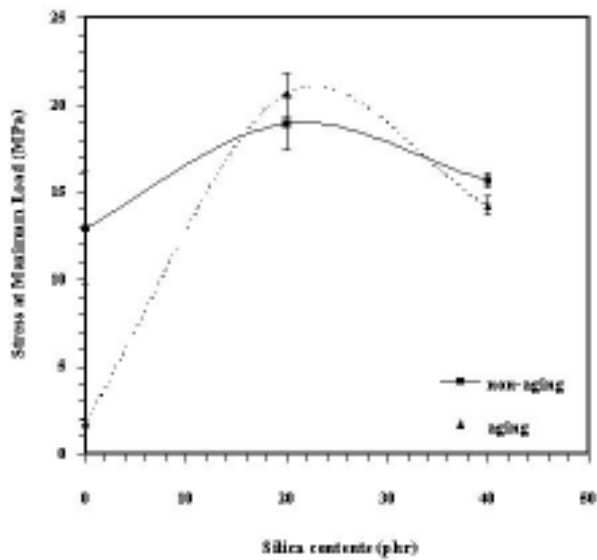


Figure 9. Tensile curves for aging and non-aging of cellular NR vulcanisates with different SiO₂ contents

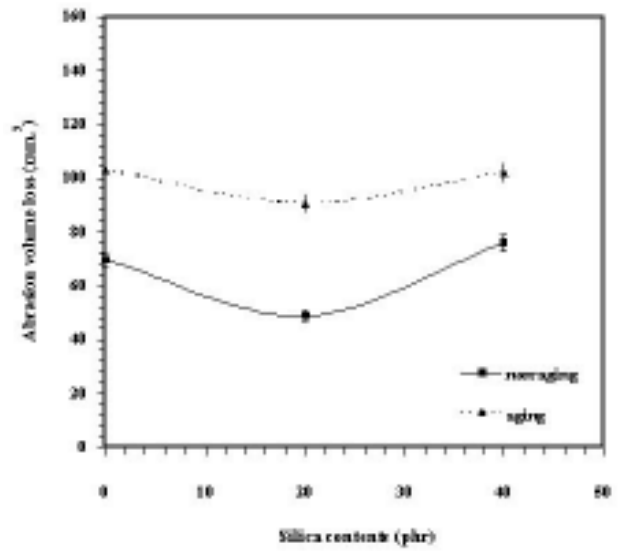


Figure 10. Abrasive curves for aging and non-aging of cellular NR vulcanisates of different SiO₂ contents

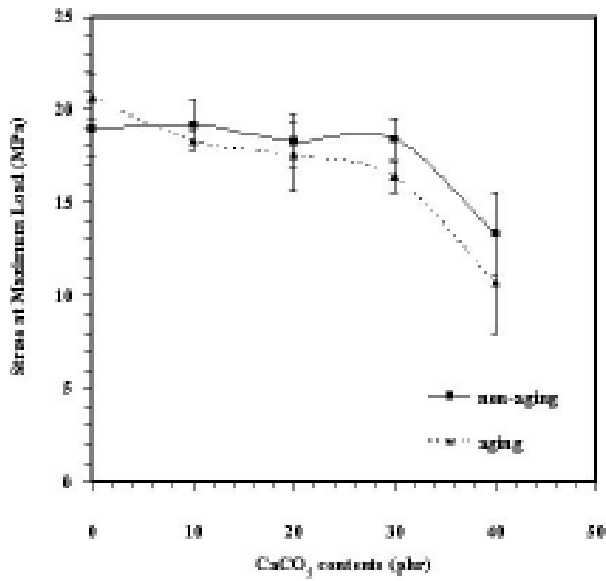


Figure 11. Tensile curves for aging and non-aging of cellular NR vulcanisates containing 20 phr SiO₂ and different CaCO₃ contents

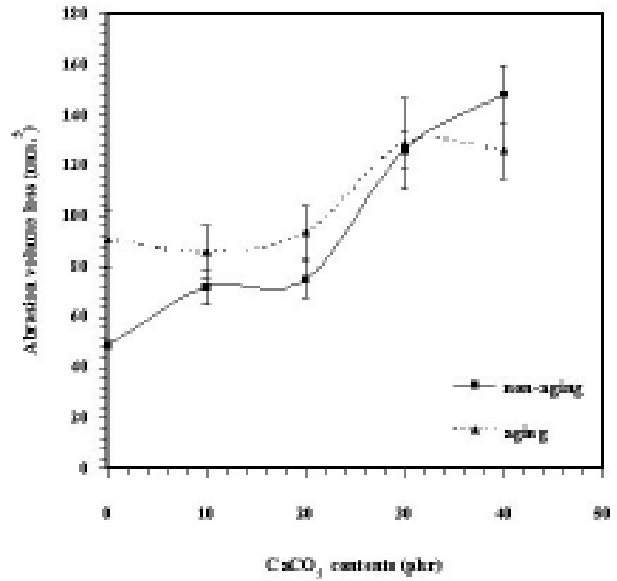


Figure 12. Abrasive curves for aging and non-aging of cellular NR vulcanisates containing 20 phr SiO₂ and different CaCO₃ contents

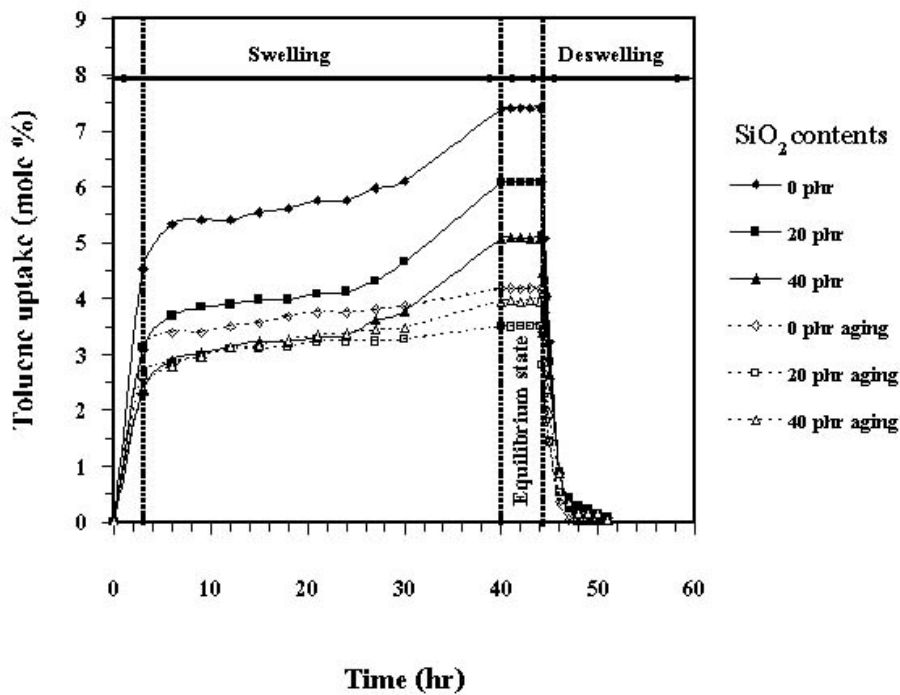


Figure 13. Swelling and deswelling curves for aging and non-aging of cellular NR vulcanisates with different SiO₂ contents

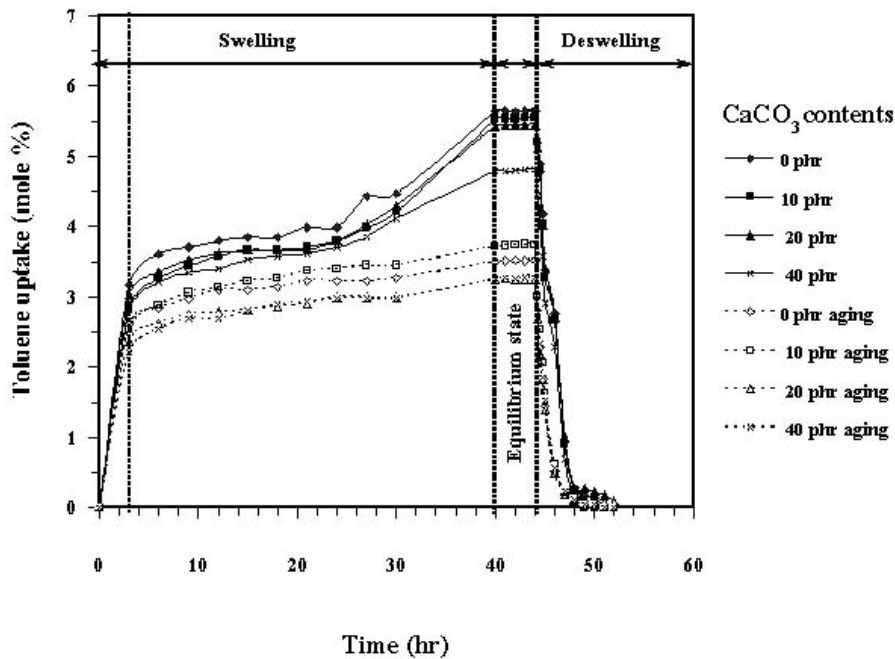


Figure 14. Swelling and deswelling curves for aging and non-aging of cellular NR vulcanisates containing 20 phr SiO_2 and different CaCO_3 contents

อิทธิพลของปริมาณสารตัวเติมประเภทซิลิกาและแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีต่อสมบัติเชิงกลและกายภาพในด้านต่างๆ ของยางธรรมชาติที่มีลักษณะโฟม โดยสามารถสรุปเป็นสาระสำคัญได้ดังต่อไปนี้

1. ยางโฟมที่ผสมซิลิกาในปริมาณเท่ากับ 20 phr ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการขาดสูงที่สุด อย่างไรก็ตามสมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาสูงกว่า 20 phr ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มกันของซิลิกาทำให้ประสิทธิภาพการกระจายตัวและการเสริมแรงภายในเนื้อยางลดลง และพบว่าปริมาณการดูดซับสารละลายที่สภาวะสมดุลมีค่าลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น

2. สำหรับในกรณีของยางโฟมที่ผสมซิลิกาในปริมาณ 20 phr และปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตในช่วงระหว่าง 0 ถึง 30 phr พบว่า ปริมาณที่เหมาะสมที่ให้สมบัติเชิงกลโดยรวมไม่เปลี่ยนแปลงมากนักอยู่ระหว่าง 20-30 phr และเมื่อผสมปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่มากกว่า 30 phr พบว่า สมบัติโดยรวมลดลง เนื่องจากในระบบมีปริมาณสารตัวเติมมากเกินไป (สูงกว่า 50 phr) นอกจากนี้ยังพบ

ว่าปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ผสมไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการดูดซับสารละลายที่สภาวะสมดุล

3. เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการบ่มเร่งด้วยความร้อนพบว่ายางโฟมที่มีซิลิกาผสมในปริมาณ 20 phr ให้สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง สมบัติความต้านทานต่อการขาด และปริมาณการดูดซับสารละลายที่สภาวะสมดุลดีขึ้น และเริ่มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาสูงกว่า 20 phr และในกรณีของยางโฟมที่มีปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตต่างๆ ที่มีซิลิกา 20 phr การบ่มเร่งด้วยความร้อนไม่มีผลต่อสมบัติโดยรวมของยางโฟม

4. ผลงานวิจัยให้ข้อสรุปที่สำคัญคือ ปริมาณการเติมซิลิกาผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมคือซิลิกา 20 phr และแคลเซียมคาร์บอเนต 20-30 phr ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ และส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชา-

การเกษตร กระบวนการเกษตรและสหกรณ์ สำหรับการให้ความ
ความอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือชิ้นรูปและอุปกรณ์ทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

วารสารณ์ ขจรไชยกูล. 2541. เทคโนโลยียาง. ส่วนอุตสาหกรรม
ยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวง
เกษตรและสหกรณ์

วารสารณ์ ขจรไชยกูล. 2541. ระบบการคงรูปของยาง. ส่วน
อุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

Blow, C.M. and Hepburn, C. 1982. Rubber Technology
and Manufacture, 2nd, London, Butterworth
Scientific.

Hofmann, W. 1988. Rubber Technology Handbook,
New York, Hanser Publishers.

Ismail, H., Freakley, P.K., Sutherland, I., and Sheng,
E. 1995. Effect of multifunctional additive on
mechanical properties of silica filled natural
rubber compound, Eur. Polym. J., 31(1) :1109-
1117.

Sadd, A.L.G. and Younan, A.F. 1995. Rheological,
mechanical and electrical properties of natural
rubber-white filler mixtures reinforced with
nylon 6 short fibers, Polymer Degradation and
Stability, 50 : 133-140

Sirisinha, C., Jitkanakarn, J. and Sae-Oui, P. 2001.
The effect of mixed silica and carbon black
on mechanical properties of isoprene rubber,
27th Congress on Science and Technology of
Thailand : 868.

Sombatsompop, N. and Lertkamolsin, P. 2000. Effect
of Chemical Blowing Agent on Swelling Prop-
erties of Expanded Elastomer, J. of Elastomers
and Plastics, 32 : 311-328.

Sombatsompop, N. 1998. Investigation of swelling
behaviour of NR vulcanisates, Polym. Plast.
Technol. Eng., 37(1) : 19-39.

Unnikrishnan, G., Thomas, G. and Varghese, S. 1996.
Sorption and diffusion of aromatic hydrocarbons
through filled natural rubber, Polymer, 37(13) :
2687-2693.

Wang, C.S. 1982. Effect of Variables on Density and
Morphology of Expanded Ethylene-Propylene
Terpolymer, J. Applied Polymer Science, 27,
pp. 1205-1215.