

บทความวิจัย

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงระหว่าง
นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกาในยางธรรมชาติอุษณีย์ ทับทอง^{1,2*} ชคริต สิริสิงห์^{2,3} และ พงษ์ธร แซ่ฮ้อย^{1,2}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเสริมแรงระหว่างนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกา (ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีสารตัวเติมตัวเสริมตั้งแต่ 0 ถึง 40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (phr) สำหรับในกรณีที่มีการใช้ซิลิการ่วมกับสารตัวเติมตัวเสริมตั้งแต่ 0 ถึง 40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (phr) สำหรับการเติมสารตัวเติมตัวเสริมลงไปในปริมาณร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักของซิลิกา) หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผสม ได้นำยางคอมพาวด์ส่วนหนึ่งไปทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต และนำยางคอมพาวด์ส่วนที่เหลือไปขึ้นรูปและคงรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ต่อไป จากการศึกษาพบว่าสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดส่งผลต่อสมบัติในกระบวนการผลิตของยางในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมจะส่งผลทำให้พลังงานที่ใช้ในการผสมและความหนืดของยางคอมพาวด์มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ ยังพบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมดังกล่าวส่งผลทำให้ยางมีระยะเวลาสกรอซ ($t_{s,1}$) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม ($t_{c,90}$) สั้นลงอีกด้วย อย่างไรก็ตาม เนื่องจากนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีสภาพเป็นด่าง จึงส่งผลทำให้ยางคงรูปที่ได้มีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ในขณะที่ซิลิกากลับส่งผลต่อระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในทิศทางตรงกันข้าม ทั้งนี้เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปนั่นเอง จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของยางคงรูปพบว่า การเพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจะทำให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ของยางด้อยลง (ยกเว้นสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกาจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น จากการศึกษาพบว่าพื้นผิวจำเพาะสูงกว่านาโนแคลเซียมคาร์บอเนตค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณการเติมเท่ากันจึงพบว่าซิลิกาสามารถเสริมแรงให้กับยางได้ดีกว่านาโนแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้ซิลิการ่วมกับสารตัวเติมตัวเสริมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาให้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพราะสารตัวเติมตัวเสริมนอกจากจะช่วยลดการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปและทำให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้นแล้ว ยังช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาให้สูงขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ซิลิกา ยางธรรมชาติ สมบัติเชิงกล การเสริมแรง

¹ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จ.ปทุมธานี

² ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จ.นครปฐม

³ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: puchongt@mtec.or.th

Comparison of Reinforcing Efficiency between Nano-Calcium Carbonate and Silica in Natural Rubber Vulcanizates

Puchong Thaptong^{1,2*}, Chakrit Sirisinha^{2,3} and Pongdhorn Sae-oui^{1,2}

ABSTRACT

This paper compares reinforcing efficiency between nano-calcium carbonate and silica (with and without the presence of silane coupling agent) in natural rubber. During mixing, the filler content was varied from 0 to 40 parts per hundred of rubber (phr). In the case of silane-treated silica, 8% (by weight of silica) of silane coupling agent was added into the rubber compound. After mixing, a portion of the rubber compound was used for the processability determination. The rest of the compound was then shaped and vulcanized for further tests. The results reveal that both types of filler affect processability in the same manners, i.e., increasing filler content would lead to increases in mixing energy and compound viscosity. In addition, both scorch time and optimum curing time are found to decrease continuously with increasing filler content. However, the two types of filler affect crosslink density differently. Since nano-calcium carbonate is basic in nature, it enhances crosslink density whereas silica gives opposite results due to the retardation effect given by the presence of silanol groups on its surface leads to accelerator adsorption. According to the mechanical property results, it is found that the addition of nano-calcium carbonate gives rise to the deterioration of most properties (except tear strength) whereas the addition of silica leads to property improvement. At a given loading, silica gives significantly greater reinforcement than nano-calcium carbonate due to its higher specific surface area. The results also reveal that the reinforcing efficiency of silica is significantly increased in the presence of silane coupling agent. This is simply due to the ability of silane coupling agent to reduce accelerator adsorption and enhance both filler dispersion and rubber-filler interaction.

Keywords: nano-calcium carbonate, silica, natural rubber, mechanical properties, reinforcement

¹National Metal and Materials Technology Center, Thailand Science Park, Pathumthani

²Research and Development Center for Thai Rubber Industry, Faculty of Science, Mahidol University, Salaya Campus, Nakornprathom

³Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahidol University

*Corresponding author, e-mail: puchongt@mtec.or.th

บทนำ

สารตัวเติม (filler) คือ องค์ประกอบที่เติมเข้าไปในยางเพื่อจุดประสงค์หลายอย่าง เช่น เสริมแรงเพื่อให้ยางมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ปรับปรุงกระบวนการผลิต และลดต้นทุนในการผลิต ในส่วนของการเสริมแรงนั้น สารตัวเติมที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงและใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ เขม่าดำ (carbon black) และซิลิกา (silica) โดยประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารตัวเติมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติม (rubber-filler interaction) ขนาดอนุภาคปฐมภูมิและพื้นที่ผิวจำเพาะ (primary particle size and specific surface area) โครงสร้างของสารตัวเติม (filler structure) ความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิว (specific surface activity) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH value) [1] แม้ว่าเขม่าดำจะเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เขม่าดำก็ไม่เหมาะสำหรับการใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีใส ดังนั้น สารตัวเติมที่มีสีอ่อน เช่น ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต ดินขาว ทัลคัม ฯลฯ จึงมีบทบาทสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทนี้

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมสีอ่อนที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงค่อนข้างสูงทั้งนี้เพราะซิลิกามีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง) [2] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากซิลิกามีหมู่ซิลานอล (silanol groups) อยู่ที่พื้นผิวเป็นจำนวนมาก [3, 4] ทำให้ซิลิกาถูกจัดเป็นสารตัวเติมที่มีขั้วสูง ส่งผลให้มีอันตรกิริยากับยางธรรมชาติ (ซึ่งเป็นยางที่มีขั้วต่ำ) ในระดับต่ำ อีกทั้งหมู่ซิลานอลยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (H-bonding) กับหมู่ซิลานอลด้วยกันเอง จึงทำให้ซิลิกาแตกตัวในยางได้ยาก ซึ่งส่งผลทำให้ซิลิกามีระดับของการเสริมแรงที่ต่ำกว่าเขม่าดำ (เมื่อเปรียบเทียบที่พื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากัน) [5] ด้วยเหตุนี้ สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent) จึงเข้ามามีบทบาทในการเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกา นอกจากนี้ สารคู่ควบไซเลนยังช่วยทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย [6-8]

วัสดุนาโน (nanomaterials) คือ วัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ปัจจุบันวัสดุนาโนถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท เช่น ผ้าที่เปื้อนยากและสามารถกันของเหลวไม่ให้ซึมเข้าใยผ้าได้ ตู้เย็นหรือเครื่องปรับอากาศที่มีการเติมอนุภาคนาโนของเงินเพื่อกำจัดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ เป็นต้น นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (nano-calcium carbonate; NPCC) จัดเป็นวัสดุนาโนประเภทหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาวและมีความเป็นพิษต่ำ [9] ปัจจุบันได้มีการนำ NPCC ไปใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิโพรพิลีน (PP) [10-13] และพอลิเอสเตอร์เอไมด์ (PEA) [14] โดยมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เหล่านี้ให้ดีขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาของ Shou และคณะพบว่าการใช้กรดเมทาไคริลิก (MMA) เป็นสารดัดแปรพื้นผิวของ NPCC จะทำให้ NPCC เกิดอันตรกิริยากับยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ได้ดียิ่งขึ้น เป็นผลให้มอดูลัส (modulus) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ของยางสูงขึ้น [15] Deng และคณะใช้ NPCC ที่ดัดแปรพื้นผิวเป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติและพบว่า NPCC ที่ดัดแปรพื้นผิวสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและออกซิเจนของยางให้สูงขึ้นได้ [9] อย่างไรก็ตาม การใช้ NPCC เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่อยู่ในรูปของยางแห้งยังคงมีการศึกษากันน้อย และเพื่อเป็นการเน้นศึกษาสารตัวเติมประเภทที่มีสีอ่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงระหว่าง NPCC และซิลิกา (ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี การเติมสารคู่ควบไซเลน) ในยางธรรมชาติแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

วัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ผลิตโดยบริษัทยูเนียนริบเบอร์โปรดักส์ จำกัด สารเคมีชนิดอื่นๆ ที่ใช้เป็นองค์ประกอบในการผสมเคมียาง ได้แก่ นาโนแคลเซียมคาร์บอเนต (NPCC-101) จากบริษัทเบนเมเยอร์เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด ซิลิกา (silica; Tokusil 255) จากบริษัทโตกุยาม่าสยามซิลิกา จำกัด (ตารางที่ 1 แสดงสมบัติพื้นฐานของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด) สารคู่ควบไซเลนไทโอไซยาเนโตไฟรฟัลโทรเอทอกซีไซเลน (Si-264) จากบริษัท เจเจ-เดกุกุสซาเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด ซิงก์ออกไซด์ (ZnO) กรดสเตียริก (stearic acid) และกำมะถัน (S₈) จากบริษัทเคมิมินคอร์ปอเรชั่น จำกัด ส่วนสารเร่งปฏิกิริยาจำนวน 2 ชนิดที่นำมาใช้ คือ เตตระเมทิลไฮยูเรมโดซิลไฟด์ (Perkasit[®]TMTD) และบิวทิล-2-เบนโซโซโรซิลิลฟีนาไมด์ (Santocure[®]TBBS) จากบริษัทรีไลแอนซ์เทคโนเคมี (Flexsys) จำกัด

ตารางที่ 1 สมบัติพื้นฐานของสารตัวเติม

	ขนาดกลุ่มก้อน สารตัวเติม (μm)	พื้นที่ผิวจำเพาะ* อนุภาคเฉลี่ย (m^2/g)	pH (BET)	ความล่อง จำเพาะ (g/cm^3)
NPCC (NPCC-101)	2.9	21.9	9.19	2.50
ซิลิกา (Tokusil 255)	29.3	175.0	7.10	1.95

หมายเหตุ: *พื้นที่ผิวจำเพาะจะเป็นสัดส่วนแบบผกผันกับขนาดอนุภาคปฐุมุม [1]

การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

ตารางที่ 2 แสดงสูตรการผสมเคมีที่ใช้ในงานวิจัย หลังจากการออกสูตร ได้ดำเนินการผสมเคมียางโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Brabender 350E) โดยตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของห้องผสมเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วยกในการหมุนของโรเตอร์เท่ากับ 40 รอบต่อนาที การผสมแบ่งออกเป็น 2 ช่วงโดยช่วงที่ 1 ทำการบดยางธรรมชาติ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริกในเครื่องผสม เมื่อเวลาผ่านไป 1.5 นาทีจึงทำการเติมสารตัวเติมและสารคู่ควบไซเลน (สารคู่ควบไซเลนจะเติมเฉพาะสูตรที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมเท่านั้น) หลังจากนั้น 8.5 นาที จึงนำยางคอมพาวด์ออกจากเครื่องผสม แล้วนำไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ทั้งไว้ให้เย็น จากนั้นจึงนำยางมาผสมต่อในช่วงที่ 2 โดยทำการเติมกำมะถันและสารเร่งปฏิกิริยาลงไป เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที จึงนำยางคอมพาวด์ออกจากเครื่องผสม แล้วนำไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ท้ายสุดจึงแบ่งยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกนำไปวัดค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D1646-87 ด้วยเครื่อง Mooney viscometer (ViscTech+) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ส่วนที่ 2 นำไปหาระยะเวลาสกอริช (scorch time, t_{c1}) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (optimum curing time, t_{c90}) ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer (MDR TechPRO MD+) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และส่วนที่ 3 นำไปขึ้นรูปสำหรับทดสอบสมบัติต่างๆ ของยางคงรูปต่อไป

ตารางที่ 2 สูตรการผสมเคมีของยางคอมพาวด์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติ (STR 5L)	100.0
ซิงก์ออกไซด์	3.0
กรดสเตียริก	2.0
สารตัวเติม (NPCC หรือ ซิลิกา)	ปรับเปลี่ยนปริมาณ (0.0-40.0)
สารคู่ควบไฮเลน (Si-264)*	ร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักของซิลิกา)
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Santocure® TBBS)	1.0
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Perkasit® TMTD)	0.3
กำมะถัน	2.0

หมายเหตุ: *ใช้เฉพาะสูตรที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมเท่านั้น

การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคงรูป

นำยางคอมพาวด์ไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ตามระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมของยาง ($t_c 90$) จากนั้นจึงนำยางคงรูปที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความแข็ง (hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D412 (ด้าย C) ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) ตามมาตรฐาน DIN 53516 ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ตามมาตรฐาน ASTM D624 การเสียรูปหลังการกดอัด (compression set) ตามมาตรฐาน ASTM D395 (method B) โดยทำการทดสอบที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 22 ชั่วโมง ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density) โดยใช้วิธีการทดสอบการบวมพองของยางในตัวทำละลายโทลูอีน (toluene) ซึ่งคำนวณหาความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยางโดยใช้สมการ Flory-Rehner ดังแสดงข้างล่าง [16]

$$-\left[\ln(1-v_2) + v_2 + \chi_2 v_2^2\right] = V_1 n \left[v_2^{1/3} - \frac{v_2}{2} \right]$$

เมื่อ v_2 คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของเนื้อยางที่มีอยู่ในชิ้นทดสอบที่บวมพอง χ_1 คือ ค่าตัวแปรอันตรกิริยา (interaction parameter) ระหว่างยางธรรมชาติกับโทลูอีนซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.393 [17] V_1 คือ ปริมาตรของตัวทำละลายต่อหนึ่งโมล (molar volume) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 107.10 มิลลิลิตรต่อโมล และ n คือ จำนวนสายโซ่โมเลกุลยางที่มีความยืดหยุ่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร นอกจากนี้ยังได้ดำเนินการวัดระดับการแตกตัวของสารตัวเติม (filler dispersion) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM, JEOL JSM-6301F) อีกด้วย

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

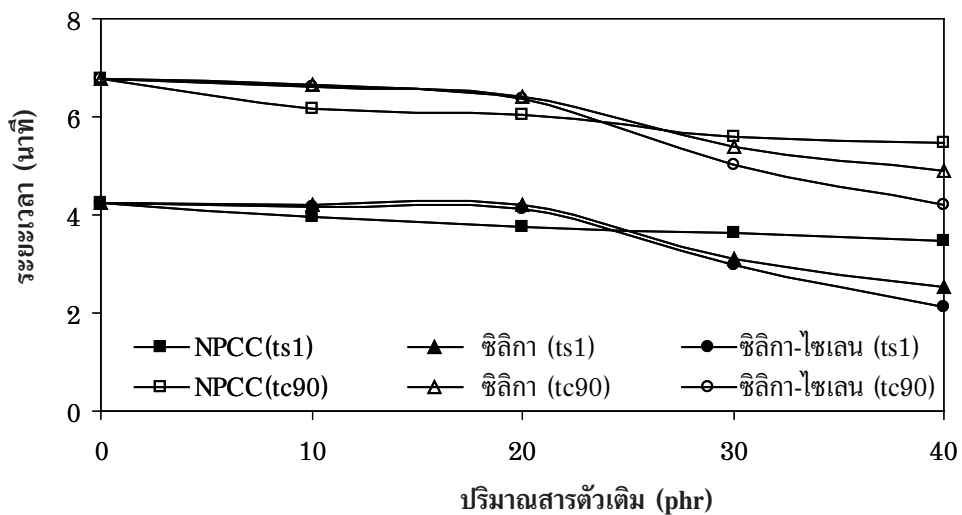
ความหนืดมูนนี่ (mooney viscosity) และพลังงานที่ใช้ในการผสม (mixing energy)

ตารางที่ 3 แสดงผลของสารตัวเติมต่อความหนืดมูนนี่และพลังงานที่ใช้ในการผสม โดยทั่วไป การเติมสารตัวเติมที่เป็นของแข็งลงไปในยางจะทำให้ความหนืดของยางสูงขึ้น ส่งผลให้ยางได้รับแรงเฉือนที่สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น จากตารางจึงพบว่าทั้งค่าความหนืดมูนนี่และค่าพลังงานที่ใช้ในการผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารตัวเติม เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติมเท่ากัน พบว่า NPCC จะทำให้ยางมีความหนืดมูนนี่ต่ำกว่าซิลิกา ทั้งนี้เนื่องจาก NPCC มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่า (มีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิใหญ่กว่า) จึงมีพื้นที่ในการเกิดอันตรกิริยากับยางน้อยกว่า นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาผลของสารคู่ควบไซเลนต่อสมบัติในกระบวนการผลิตของยางที่เสริมแรงด้วยซิลิกา จะพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนทำให้ความหนืดมูนนี่ของยางลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะทำให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดียิ่งขึ้น (ดูผลของ SEM ไมโครกราฟในหัวข้อ 3.3 ประกอบ) โดยทั่วไปแล้วเมื่อทำการเติมซิลิกาเข้าไปในยาง ยางส่วนที่จับอยู่บนพื้นผิวของซิลิกาและยางส่วนที่แทรกเข้าไปในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซิลิกาจะถือเสมือนว่าเป็นส่วนหนึ่งของซิลิกา ซึ่งยางส่วนนี้จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (immobilized rubber) ในขณะที่ยางส่วนที่เหลือซึ่งอยู่ด้านนอกจัดเป็นยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ (mobilized rubber) ซึ่งถ้าซิลิกาแตกตัวได้ดีไม่ตี ยางส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ก็จะมีปริมาณมาก ส่งผลให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดสูงเนื่องจากยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมีปริมาณน้อย แต่เมื่อมีการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป สารคู่ควบไซเลนจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกา ทำให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางส่วนที่เคยแทรกอยู่ในรูพรุนของซิลิกา (ยางส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้) ถูกปลดปล่อยออกมาด้านนอกกลายเป็นยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ [18] ด้วยเหตุนี้ การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจึงส่งผลทำให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดต่ำลง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนจะทำให้ยางนิ่มลง แต่จากการสังเกตพบว่ายางคอมพาวด์ที่เสริมแรงด้วยซิลิการ่วมกับสารคู่ควบไซเลนก็ยังคงมีค่าความหนืดที่สูงกว่ายางคอมพาวด์ที่เสริมแรงด้วย NPCC ค่อนข้างมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่า NPCC ค่อนข้างมากนั่นเอง

ตารางที่ 3 ความหนืดมูนี้และพลังงานที่ใช้ในการผสมยางคอมพาวด์

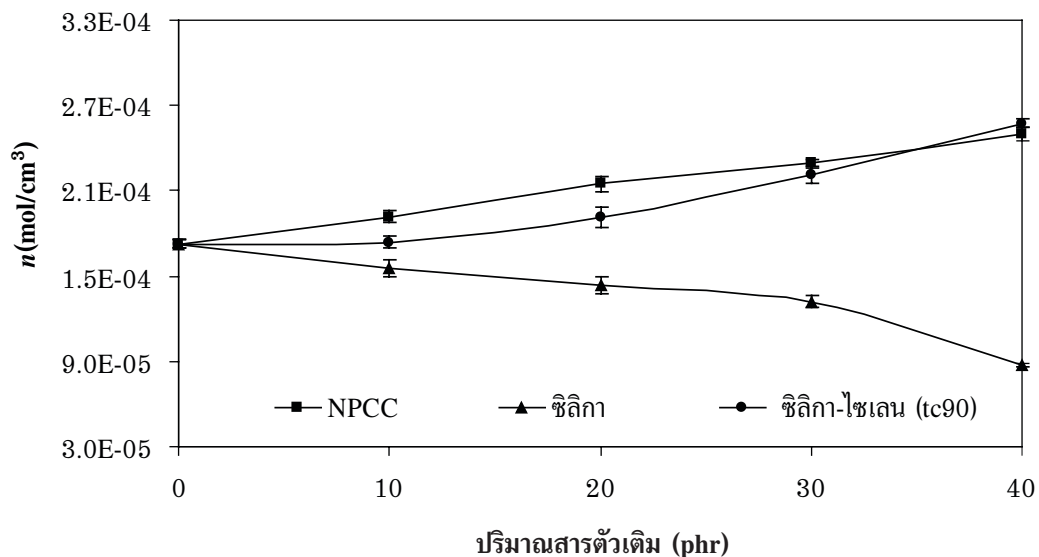
สารตัวเติม	ปริมาณสารตัวเติม (phr)	ปริมาณสารคู่ควบไซเลน (phr)	ความหนืดมูนี้* (MU)	พลังงานที่ใช้ในการผสม (kN.m)	
				ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2
ไม่มี	-	-	35.3	300.2	124.4
NPCC	10	-	35.4	301.5	125.2
	20	-	36.5	307.7	123.8
	30	-	37.3	320.9	128.5
	40	-	38.2	343.0	129.7
ซีลิกา	10	-	40.9	303.5	125.6
	20	-	53.9	363.3	139.6
	30	-	61.8	411.2	152.3
	40	-	87.4	425.7	176.4
ซีลิกา	10	0.8	41.6	311.7	126.5
	20	1.6	52.8	355.1	130.6
	30	2.4	57.0	395.4	141.0
	40	3.2	63.1	419.6	153.1

หมายเหตุ: *(ML1+4@100 °C)

รูปที่ 1 ผลของสารตัวเติมต่อระยะเวลาสกออร์ช (t_s) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (t_c)

ลักษณะการคงรูป (cure characteristics) และความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density)

ผลของสารตัวเติมต่อระยะเวลาสกอรัช (t_{90}) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (t_{c90}) แสดงดังรูปที่ 1 จากรูปพบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะทำให้ระยะเวลาสกอรัชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง สำหรับยางที่มี NPCC เป็นสารตัวเติม การลดลงของระยะเวลาสกอรัชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมดังกล่าวอาจเกิดจากสภาพที่เป็นต่างของ NPCC (pH ของ NPCC เท่ากับ 9.19) เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าสารเคมีหรือสารตัวเติมที่มีสภาพเป็นต่างจะสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปด้วยกำมะถันได้ [1] เมื่อทำการเปรียบเทียบชนิดของสารตัวเติม พบว่าที่ปริมาณสารตัวเติมต่ำกว่า 25 phr ยางที่มี NPCC เป็นสารตัวเติมจะมีระยะเวลาสกอรัชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมสั้นกว่ายางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติม แต่ที่ปริมาณสารตัวเติมสูงกวานั้นจะพบผลการทดลองในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ยางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมจะมีระยะเวลาสกอรัชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมสั้นกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า การใช้สารคู่ควบไซเลนร่วมกับซิลิกาส่งผลให้ยางมีระยะเวลาสกอรัชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมสั้นลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนจะไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไซลานอล เป็นผลให้หมู่ไซลานอลบนพื้นผิวของซิลิกามีปริมาณลดลง การดูดซับสารเคมีโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปและสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีจึงลดลงตามไปด้วย ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาการคงรูปเกิดได้เร็วขึ้น [7]



รูปที่ 2 ผลของสารตัวเติมต่อความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

รูปที่ 2 แสดงผลของสารตัวเติมต่อความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยาง ซึ่งบอกในรูปของจำนวนสายโซ่โมเลกุลยางที่มีความยืดหยุ่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (n) จากรูปพบว่า การเพิ่มปริมาณของ NPCC จะส่งผลทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณของซิลิกากลับส่งผลทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงลดลง (แม้ว่าการเพิ่มปริมาณของซิลิกาจะทำให้ยางมีอัตราเร็วในการคงรูปที่สูงขึ้นก็ตาม) ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยางที่มี NPCC เป็นสารตัวเติมคาดว่าอาจเกิดจากการที่ NPCC มีสภาพเป็นด่างจึงสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปได้ แต่การเพิ่มปริมาณของซิลิกาจะเป็นการเพิ่มการดูดซับสารกระตุ้นและสารเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก จึงส่งผลทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงลดลง อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองก็บ่งชี้ว่าเมื่อทำการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะทำให้ระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของยางกลับมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของซิลิกา ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนที่เติมลงไปจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกา ทำให้บนพื้นผิวของซิลิกามีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาลดลง การดูดซับสารกระตุ้นและสารเร่งปฏิกิริยาจึงลดลงตามไปด้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณการเติมเท่ากัน พบว่ายางที่เติม NPCC จะมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงที่สุด ตามมาด้วยยางที่เติมซิลิการ่วมกับสารคู่ควบไซเลน และยางที่เติมเฉพาะซิลิกาเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม

ตารางที่ 4 ผลของสารตัวเติมต่อค่าความแข็ง ความทนทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการขีดถู

สารตัวเติม	ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ปริมาณ สารคู่ควบไซเลน (phr)	ความแข็ง (Shore A)	ความทนทาน ต่อแรงดึง (MPa)	ปริมาตร ที่สูญหาย (cm^3)
ไม่มี	-	-	48.6±0.2	23.8±1.0	0.179±0.010
NPCC	10	-	50.6±0.2	21.3±2.4	0.154±0.004
	20	-	52.6±0.2	20.7±1.3	0.150±0.003
	30	-	54.8±0.3	19.5±1.8	0.162±0.004
	40	-	56.1±0.4	19.1±1.9	0.180±0.003
ซิลิกา	10	-	50.7±0.3	26.0±0.9	0.127±0.005
	20	-	51.3±0.4	28.8±0.6	0.130±0.002
	30	-	54.6±0.4	28.8±1.0	0.162±0.008
	40	-	55.0±0.4	18.1±0.5	0.293±0.008
ซิลิกา	10	0.8	50.9±0.2	28.3±0.6	0.122±0.004
	20	1.6	53.9±0.4	30.6±1.1	0.116±0.002
	30	2.4	58.5±0.5	33.0±1.2	0.113±0.002
	40	3.2	64.6±0.4	31.9±0.6	0.119±0.003

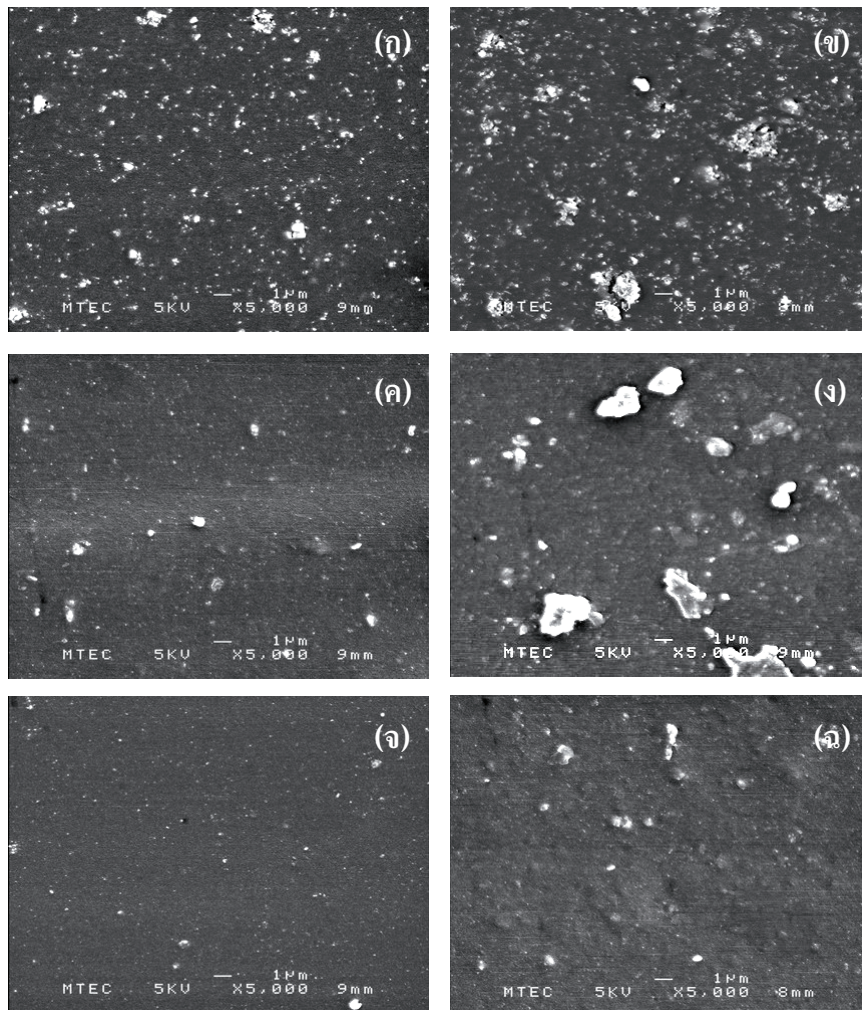
ก็ดี จากผลการทดลองพบว่าที่ปริมาณของสารตัวเติมสูงๆ (เช่น ที่ 40 phr) การเติมซิลิกาพร้อมกับสารคู่ควบไซเลนจะทำให้ระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของยางสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าใกล้เคียงหรือสูงกว่าการเติม NPCC

สมบัติเชิงกล (mechanical properties) และระดับการแตกตัวของสารตัวเติม (filler dispersion)

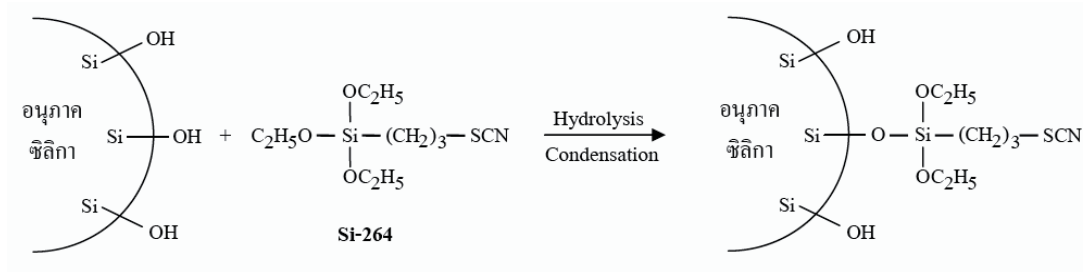
ตารางที่ 4 แสดงผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมต่อความแข็ง ความทนทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการขาด (ซึ่งแสดงในรูปของปริมาตรที่สูญหาย) ตามลำดับ จากตารางพบว่าค่าความแข็งของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากสารตัวเติมจัดเป็นอนุภาคของแข็งที่มีความแข็งสูงกว่ายางค่อนข้างมาก ดังนั้น การเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมจึงส่งผลทำให้สัดส่วนของยางลดลง ซึ่งจะส่งผลต่อเนื้อให้ยางมีค่าความแข็งสูงขึ้น เรียกผลกระทบในลักษณะเช่นนี้ว่าผลของการเจือจางหรือ “dilution effect” เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณสารตัวเติมเท่ากัน พบว่ายางที่มี NPCC เป็นสารตัวเติมจะมีค่าความแข็งสูงกว่ายางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมเล็กน้อย ในทางทฤษฎีแล้ว NPCC ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าซิลิกาค่อนข้างมากควรจะทำให้ยางมีค่าความแข็งต่ำกว่าซิลิกา แต่ในกรณีนี้พบว่า NPCC ทำให้ง่ายมีค่าความแข็งสูงกว่าซิลิกา คาดว่าน่าจะเกิดจากการที่ NPCC ทำให้ง่ายมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่านั่นเอง เนื่องจากการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปส่งผลทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นค่อนข้างมาก ดังนั้น จึงพบว่ายางที่ได้รับการเสริมแรงด้วยซิลิกาพร้อมกับสารคู่ควบไซเลนจึงมีค่าความแข็งสูงที่สุด (สูงกว่ายางที่เติม NPCC)

เมื่อพิจารณาผลของสารตัวเติมต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงของยาง พบว่าการเพิ่มปริมาณ NPCC จะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกา (ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีการเติมสารคู่ควบไซเลน) จะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่ปริมาณสารตัวเติมเท่ากับ 30 phr หลังจากนั้นก็จะเริ่มลดลง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก็สอดคล้องกับผลงานวิจัยที่เคยมีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ที่พบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางจะสูงขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติมเสริมแรงจนถึงจุดๆ หนึ่งจากนั้นก็ลดลง [19] ซึ่งการลดลงของค่าความทนทานต่อแรงดึงที่พบในกรณีของการเติม NPCC คาดว่าเป็นผลมาจากการมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่อนข้างต่ำของ NPCC (เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกา) ด้วยเหตุนี้ NPCC จึงจัดเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงแก่ยาง เมื่อเติมลงไปยางจึงส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ในทางตรงกันข้าม เนื่องจากซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่อนข้างสูงมาก ซิลิกาจึงเสริมแรงให้แก่ยางได้ดี การเติมซิลิกาลงไปจึงส่งผลทำให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น แต่ถ้าทำการเติมซิลิกาลงไปในปริมาณที่มากเกินไป (> 30 phr) ยางส่วนที่เป็นเมทริกซ์ซึ่งห่อหุ้มซิลิกาก็จะมีปริมาณลดลง ส่งผลทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางเริ่มมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย จากผลการทดลองยังพบว่า การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในซิลิกาจะช่วยทำให้ซิลิกาสามารถเสริมแรงให้แก่ยางได้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพราะเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณการเติมเท่ากันพบว่าการใช้ซิลิกาพร้อมกับสารคู่ควบไซเลนส่งผลทำให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าการใช้ซิลิกาเพียงอย่างเดียวค่อนข้างมาก การเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อแรงดึงในกรณีที่มีการเติมสารคู่ควบไซเลนดังกล่าว

คาดว่านอกจากจะเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงแล้ว ยังอาจเกิดจากการแตกตัวที่ดีขึ้นของซิลิกาอีกด้วย เพราะจากรูปที่ 3 จะพบว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจะส่งผลทำให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้การเสริมแรงที่ดีขึ้นเนื่องจากการเติมสารคู่ควบไซเลนยังอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและซิลิกาอีกด้วย เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าซิลิกามีความเป็นขั้วสูงในขณะที่ยางธรรมชาติมีความเป็นขั้วต่ำ ดังนั้นซิลิกาและยางธรรมชาติจึงมีอันตรกิริยาต่อกันค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อมีการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไป ปลายด้านหนึ่งของสารคู่ควบไซเลน (ด้านเอทอกซี) จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวของซิลิกาเกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (siloxane) ที่มีความเสถียรสูง (ดังสมการที่แสดงในรูปที่ 4) ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งของสารคู่ควบไซเลนจะหันเข้าหาโมเลกุลของยางและจะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาควบรูปทำให้สารคู่ควบไซเลนยึดติดกับยางได้อย่างแข็งแรงด้วยเหตุนี้การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปจึงช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและซิลิกาให้สูงขึ้น

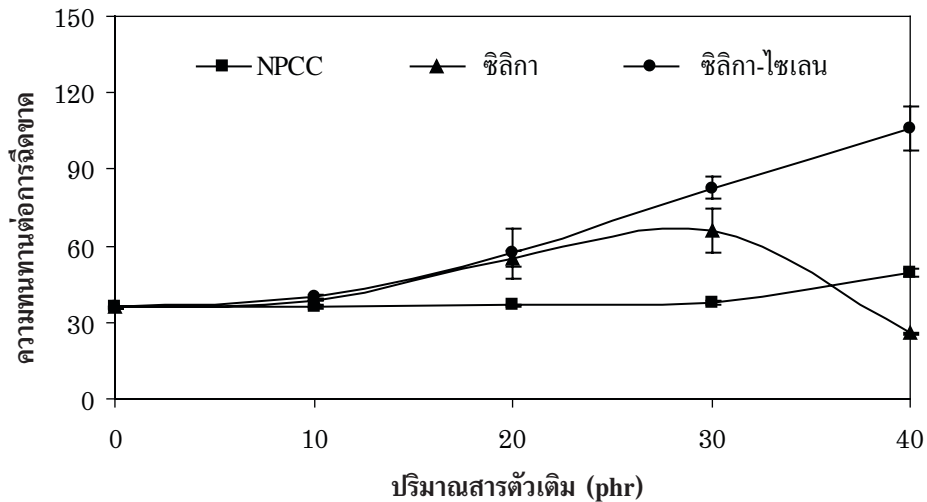


รูปที่ 3 SEM ไมโครกราฟแสดงการแตกตัวของสารตัวเติมในยางคงรูป (5×10^3 เท่า)
 (ก) NPCC 20 phr (ข) NPCC 40 phr (ค) ซิลิกา 20 phr (ง) ซิลิกา 40 phr
 (จ) ซิลิกา-ไซเลน 20 phr (ฉ) ซิลิกา-ไซเลน 40 phr



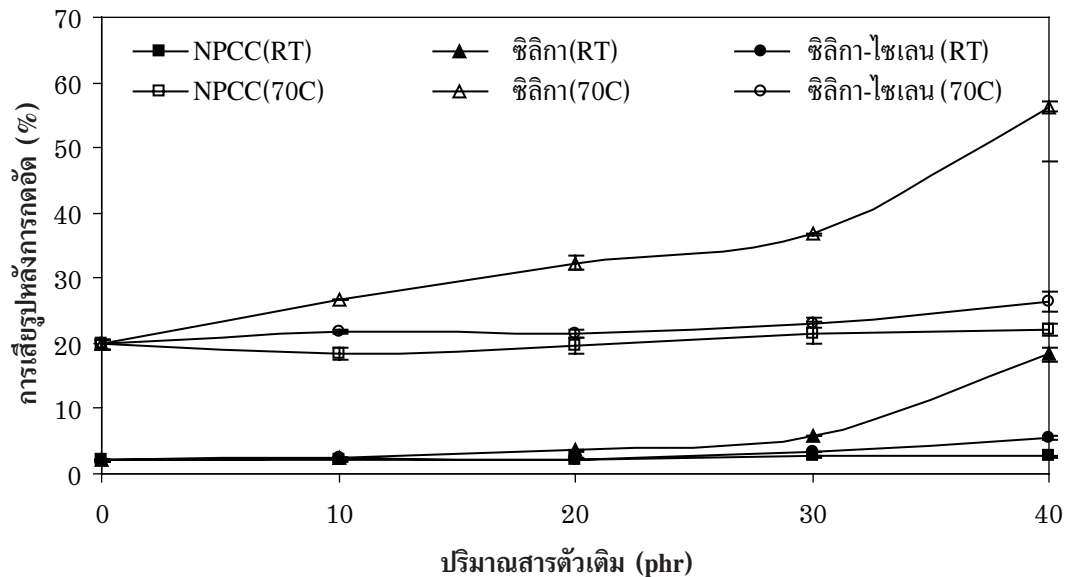
รูปที่ 4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างซิลิกาและสารคู่ควบไซเลน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 ยังพบว่าสมบัติความต้านทานต่อการซัดลูของยางมีแนวโน้มด้อยลงตามการเพิ่มปริมาณของทั้ง NPCC และซิลิกา (มีปริมาตรที่สูญหายเพิ่มขึ้น) ซึ่งการด้อยลงของสมบัติความต้านทานต่อการซัดลูในกรณีที่เติม NPCC นั้น คาดว่าน่าจะเกิดจากความจริงที่ว่า NPCC มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ ด้วยเหตุนี้ NPCC จึงไม่เสริมแรงให้แก่ยาง ส่วนการด้อยลงของสมบัติความต้านทานต่อการซัดลูในกรณีที่เติมซิลิกานั้น คาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการลดลงของค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและการแตกตัวที่ไม่ดีของซิลิกา (โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเติมซิลิกาเข้าไปในปริมาณสูง) อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเติมซิลิการ่วมกับสารคู่ควบไซเลนจะพบผลการทดลองในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ สมบัติความต้านทานต่อการซัดลูของยางถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นตามปริมาณของซิลิกาจนถึง 30 phr ก่อนที่จะเริ่มด้อยลง ความต้านทานต่อการซัดลูที่ดีขึ้นดังกล่าว คาดว่าอาจเกิดจากการแตกตัวที่ดีขึ้นของซิลิกาและการเพิ่มขึ้นของอันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติมอันเนื่องมาจากสารคู่ควบไซเลน เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณการเติมเท่ากัน พบว่า NPCC จะทำให้ยางมีค่าความต้านทานต่อการซัดลูต่ำที่สุด เพราะ NPCC มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำสุด (ยกเว้นที่ปริมาณการเติมเท่ากับ 40 phr ที่พบว่าซิลิกาจะทำให้ยางมีค่าความต้านทานต่อการซัดลูต่ำกว่า NPCC ทั้งนี้เพราะที่ปริมาณดังกล่าว ซิลิกามีระดับของการแตกตัวที่ไม่ดีและมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่ต่ำมาก) ในขณะที่ความต้านทานต่อการซัดลูสูงที่สุดจะพบในยางที่มีการใช้ซิลิการ่วมกับสารคู่ควบไซเลน ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 5 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด

รูปที่ 5 แสดงผลของสารตัวเติมต่อสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง จากรูปพบว่า การเติม NPCC ไม่ส่งผลต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นในกรณีที่มีการเติมลงไปปริมาณที่สูงกว่า 30 phr ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ในกรณีของการเติมซีลีกา นั้น พบว่าค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของซีลีกาจนถึง 30 phr ก่อนที่จะเริ่มลดลง การเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อการฉีกขาดในช่วงแรกดังกล่าวเกิดจากการเสริมแรงของซีลีกาซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่อนข้างสูงนั่นเอง ส่วนการลดลงของค่าความทนทานต่อการฉีกขาดเมื่อเติมซีลีกาในปริมาณที่สูงเกินไปนั้น คาดว่าเกิดจากการแตกตัวที่ไม่ดีของซีลีกา (ดู SEM ไมโครกราฟในรูปที่ 3 ประกอบ) และการลดลงของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง อย่างไรก็ตาม ในกรณีของยางที่มีการเติมซีลีการ่วมกับสารคู่ควบไซเลนนั้น ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของซีลีกา ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารคู่ควบไซเลนนอกจากจะทำให้ระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นและช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและซีลีกาแล้ว ยังส่งผลให้ซีลีกาแตกตัวได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 6 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติการเสีรูปหลังการกอดอัด

รูปที่ 6 แสดงผลของสารตัวเติมต่อสมบัติการเสีรูปหลังการกอดอัดของยางที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิห้องโดยทั่วไปสมบัติการเสีรูปหลังการกอดอัดที่อุณหภูมิห้องจะขึ้นอยู่กับระดับความยืดหยุ่นของยางเท่านั้น ในขณะที่สมบัติการเสีรูปหลังการกอดอัดที่อุณหภูมิสูงจะขึ้นอยู่กับทั้งระดับความยืดหยุ่นและระดับความทนทานต่อความร้อนของยาง เมื่อทำการทดสอบสมบัติการเสีรูปหลังการกอดอัดที่อุณหภูมิห้องพบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นต่ำลง (มีค่าการเสีรูปหลังการกอดอัดสูงขึ้น) การลดลงของความยืดหยุ่นดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากผลของการเจือจาง เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าเฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อยางเท่านั้นที่มีความยืดหยุ่น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารตัวเติมเท่ากันพบว่าซิลิกาจะทำให้ยางมีสมบัติความยืดหยุ่นต่ำกว่า NPCC ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ผลของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่าเพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าความยืดหยุ่นของยางจะแปรผันโดยตรงกับระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ผลการทดลองยังบ่งชี้ว่าการเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในยางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมจะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น (มีค่าการเสีรูปหลังการกอดอัดต่ำลง) ทั้งนี้เพราะการเติมสารคู่ควบไซเลน จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยาง และเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาให้สูงขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติการเสีรูปหลังการกอดอัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับผลการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แต่ค่าการเสีรูปหลังการกอดอัดที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะการบ่มเร่งด้วยความร้อนจะส่งผลทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ เป็นผลทำให้ยางมีความยืดหยุ่นต่ำลง

สรุปผลการทดลอง

เนื่องจาก NPCC มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกา ดังนั้น NPCC จึงจัดเป็นสารตัวเติมที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงต่ำ เมื่อเติม NPCC ลงไปในยางจะส่งผลทำให้ยางมีความหนืดสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย และเนื่องจาก NPCC มีสภาพเป็นต่าง จึงทำให้ยางเกิดการคงรูปได้เร็วและยางคงรูปที่ได้ก็จะมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติม NPCC ลงไปในยางก็จะส่งผลทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ด้อยลง ในทางตรงกันข้าม ซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่า NPCC ค่อนข้างมาก ดังนั้นซิลิกาจึงเสริมแรงให้แก่ยางได้ดี การเติมซิลิกา ลงไปในยางจะส่งผลทำให้ความหนืดของยางสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของซิลิกาจะส่งผลทำให้ยางมีอัตราเร็วของการคงรูปสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ยางคงรูปที่ได้มีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำลง แม้ว่าซิลิกาจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีความยืดหยุ่นต่ำกว่า NPCC แต่ซิลิกาก็ส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลในภาพรวมที่ดีกว่า NPCC ค่อนข้างมาก นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาจะสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการใช้ร่วมกับสารคู่ควบไซเลน เนื่องจากเกิดการลดลงของการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยา การแตกตัวที่ดีขึ้นของซิลิกา และการเพิ่มขึ้นของอันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกา นอกจากสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นแล้ว สารคู่ควบไซเลนยังทำให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติในกระบวนการผลิตที่ดีขึ้นอีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2548. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 1. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
2. John, S. D. 2001. Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance. Munich. Hanser Publishers. p. 331.
3. Wagner, M. P. 1976. Reinforcing Silicas and Silicates. *Rubber Chemistry and Technology* 49(3): 703-774.
4. Byers, J. T. 1998. Silane Coupling Agents for Enhanced Silica Performance. *Rubber World* 218(6): 38-47.
5. Ansarifar, A., Azhar, A., Ibrahim, N., Shiah, S. F. and Lawton, J. M. D. 2005. The Use of a Silanised Silica Filler to Reinforce and Crosslink Natural Rubber. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 25: 77-86.
6. Poh, B. T. and Ng, C. C. 1998. Effect of Silane Coupling Agents on the Mooney Scorch Time of Silica-Filled Natural Rubber Compound. *European Polymer Journal* 34(7): 975-979.
7. Sae-oui, P., Sirisinha, C., Thepsuwan, U. and Hatthapanit, K. 2004. Comparison of Reinforcing Efficiency between Si-69 and Si-264 in a Conventional Vulcanization System. *Polymer Testing* 23: 871-879.
8. Yan, H. X., Tian, G. H., Sun, K. and Zhang, Y. 2005. Effect of Silane Coupling Agent on the Polymer-Filler Interaction and Mechanical Properties of Silica-Filled NR. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics* 43: 573-584.

9. Deng, C. M., Chen, M., Ao, N. J., Yan, D. and Zheng, Z. Q. 2006. Calcium Carbonate/Natural Rubber Latex Nanometer Composite and Its Properties. *Journal of Applied Polymer Science* 101: 3442-3447.
10. Chan, C. M., Wu, J. S., Li, J. X. and Cheung, Y. K. 2002. Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites. *Polymer* 43(10): 2981-2992.
11. Wang, G., Chen, X. Y., Huang, R. and Zhang, L. 2002. Nano-Calcium Carbonate/Polypropylene Composites Made with Ultra-High-Speed Mixer. *Journal of Materials Science Letters* 21: 985-986.
12. Levita, G., Marchetti, A. and Lazzeri, A. 1989. Fracture of Ultrafine Calcium Carbonate/Polypropylene Composites. *Polymer Composites* 10(1): 39.
13. Yang, K., Yang, Q., Li, G. X., Sun, Y. J. and Feng, D. C. 2006. Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites. *Materials Letters* 60: 805-809.
14. Liu, X. B., Zou, Y. B., Cao, G. P. and Luo, D. W. 2007. The Preparation and Properties of Biodegradable Polyesteramide Composites Reinforced with Nano-CaCO₃ and Nano-SiO₂. *Materials Letters* 61: 4216-4221.
15. Zhou, Y. B., Wang, S. F., Zhang, Y. X. and Zhang, Y. 2006. Reinforcement Effect of MAA on Nano-CaCO₃-Filled EPDM Vulcanizates and Possible Mechanism. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics* 44: 1226-1236.
16. Flory, P. J. and Rehner, J. 1943. Statistical Mechanics of Cross-linked Polymer Networks II. Swelling. *Journal of Chemical Physics* 11: 521-526.
17. Lamminmäki, J., Li, S. Y. and Hanhi, K. 2006. Feasible Incorporation of Devulcanized Rubber Waste in Virgin Natural Rubber. *Journal of Materials Science* 41: 8301-8307.
18. สุภารัตน์ รักชลธี วีรชาติ ก่อตระกูล ปานหทัย ชื่นพุดิ และพงษ์ธร แซ่อู๋. 2547. อิทธิพลของแก้วกลบในสารตัวเติมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* 12(3): 50-59.
19. Sae-oui, P., Rakdee, C. and Thanmathorn, P. 2002. Use of Rice Husk Ash as Filler in Natural Rubber Vulcanized: in Comparison with Other Commercial Fillers. *Journal of Applied Polymer Science* 83: 2485-2493.

ได้รับบทความวันที่ 17 ตุลาคม 2550

ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 21 มกราคม 2551