

## บทความวิจัย

# การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงระหว่างนาโนแคลเซียมคาร์บอนเนต และซิลิกาในยางธรรมชาติ

กุชวงค์ ทับทอง<sup>1,2\*</sup> ชาคริต สิริสิงห์<sup>2,3</sup> และ พงษ์ธร แซ่ดุย<sup>1,2</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเสริมแรงระหว่างนาโนแคลเซียมคาร์บอนเนตและซิลิกา (ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีการเติมสารคู่ควบไชเลน) ในยางธรรมชาติ โดยระหว่างกระบวนการผสมได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเติมตั้งแต่ 0 ถึง 40 ส่วนในร้อยส่วนของยาง (phr) สำหรับในกรณีที่มีการใช้ซิลิการ่วมกับสารคู่ควบไชเลน ได้ทำการเติมสารคู่ควบไชเลนลงไปในปริมาณร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักของซิลิกา) หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการผสม ได้นำยางคอมพาวด์ส่วนหนึ่งไปทดสอบสมบัติในกระบวนการผลิต และนำยางคอมพาวด์ส่วนที่เหลือไปขึ้นรูปและคงรูปเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ ต่อไป จากการศึกษาพบว่าสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดส่งผลต่อสมบัติในกระบวนการผลิตของยางในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมจะส่งผลทำให้พลังงานที่ใช้ในการผสมและความหนืดของยาง คอมพาวด์มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากรายละเอียดที่บันทึกไว้แล้ว ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมดังกล่าวส่งผลทำให้ยางมีระยะเวลาสากอร์ช ( $t_{90}$ ) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม ( $t_{90}$ ) ลดลงอีกด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อจากนาโนแคลเซียมคาร์บอนเนตมีสภาพเป็นผง จึงส่งผลทำให้ยางคงรูปที่ได้มีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ในขณะที่ซิลิกากลับส่งผลต่อระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในทิศทางตรงกันข้าม ทั้งนี้เนื่องจากบนผิวของซิลิกามีหมูไซลานอลที่สามารถดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปนั้นเอง จากการศึกษา สมบัติเชิงกลของยางคงรูปพบว่าการเพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอนเนตจะทำให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ของยางด้อยลง (ยกเว้นสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด) ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกาจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางได้ดีขึ้น จากการที่ซิลิกามีผิวจำเพาะสูงกว่างานนาโนแคลเซียมคาร์บอนเนตค่อนข้างมาก ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณการเติมเท่ากันจึงพบว่าซิลิกาสามารถเสริมแรงให้กับยางได้ดีกว่างานนาโนแคลเซียมคาร์บอนเนต นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ซิลิการ่วมกับสารคู่ควบไชเลนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาให้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพราะสารคู่ควบไชเลนนอกจากจะช่วยลดการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปและทำให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้นแล้ว ยังช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาให้สูงขึ้นอีกด้วย

**คำสำคัญ:** นาโนแคลเซียมคาร์บอนเนต ซิลิกา ยางธรรมชาติ สมบัติเชิงกล การเสริมแรง

<sup>1</sup>ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จ.ปทุมธานี

<sup>2</sup>ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จ.นครปฐม

<sup>3</sup>ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

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

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

Puchong Thappong<sup>1,2\*</sup>, Chakrit Sirisinha<sup>2,3</sup> and Pongdhorn Sae-oui<sup>1,2</sup>

## 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

<sup>1</sup>National Metal and Materials Technology Center, Thailand Science Park, Pathumthani

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

<sup>3</sup>Department 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 สารตัวเติมที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงและใช้อาย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมยาง ได้แก่ เขมาดำ (carbon black) และซิลิกา (silica) โดยประสิทธิภาพในการเสริมแรงของสารตัวเติมขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น อันตรรศิริยะระหว่างยางและสารตัวเติม (rubber-filler interaction) ขนาดอนุภาคปฐมภูมิและพื้นที่ผิวจำเพาะ (primary particle size and specific surface area) โครงสร้างของสารตัวเติม (filler structure) ความว่องไวทางปฏิกิริยาของพื้นผิว (specific surface activity) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH value) [1] แม้ว่าเขมาดำจะเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่เขมาดำก็ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีสัน ดังนั้น สารตัวเติมที่มีสีอ่อน เช่น ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอนเนต ดินขาว หัลคัม ฯลฯ จึงมีบทบาทสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทนี้

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมสีอ่อนที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงค่อนข้างสูงทั้งนี้ เพราะซิลิกามีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง) [2] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากซิลิกามีหมู่ไฮดราโนล (silanol groups) อยู่ที่พื้นผิวเป็นจำนวนมาก [3, 4] ทำให้ซิลิกาถูกจัดเป็นสารตัวเติมที่มีข้อจำกัด คือ ความต้านทานต่อการสึกหรอสูง ทำให้ซิลิกาแตกหักง่าย แต่เมื่อใช้กับยางช่วงต่อๆ กัน สามารถลดการสึกหรอลงได้ [5] ซิลิกาสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (H-bonding) กับหมู่ไฮดราโนลตัวอื่นๆ ของตัวเอง จึงทำให้ซิลิกาแตกหักในยางได้ยาก ซึ่งส่งผลทำให้ซิลิกามีระดับของการเสริมแรงที่ต่ำกว่าเขมาดำ (เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากัน) [5] ด้วยเหตุนี้ สารคู่คุณใช้เลน (silane coupling agent) จึงเข้ามามีบทบาทในการเพิ่มอันตรรศิริยะระหว่างยางและซิลิกา นอกจากนี้ สารคู่คุณใช้เลนยังช่วยทำให้ซิลิกาแตกตัวได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย [6-8]

วัสดุนาโน (nanomaterials) คือ วัสดุที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ปัจจุบันวัสดุนาโนถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์หลากหลายประเภท เช่น ผ้าที่เป็นยกและสามารถกันของเหลวไม่ให้ซึมเข้าไปได้ ตู้เย็นหรือเครื่องปรับอากาศที่มีการเติมอนุภาคนาโนของเงินเพื่อกำจัดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ เป็นต้น นาโนแคลเซียมคาร์บอนเนต (nano-calcium carbonate; NPCC) จัดเป็นวัสดุนาโนประเภทหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็งเสี้ยวและมีความเป็นพิษต่ำ [9] ปัจจุบันได้มีการนำ NPCC ไปใช้เป็นสารตัวเติมในพอลิเมอร์หลายชนิด เช่น พอลิไพริลีน (PP) [10-13] และพอลิเอสเทอร์โอมีด (PEA) [14] โดยมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์เหล่านี้ให้ดีขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาของ Shou และคณะพบว่าการใช้กรดเมทาไครลิก (MMA) เป็นสารตัดแปรพื้นผิวของ NPCC จะทำให้ NPCC เกิดอันตรรศิริยะกับยางเอทธิลีนไพริลีนไดอีน (EPDM) ได้ดียิ่งขึ้น เป็นผลให้มอดูลัส (modulus) ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) และความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ของยางสูงขึ้น [15] Deng และคณะใช้ NPCC ที่ดัดแปลงพื้นผิวเป็นสารตัวเติมในน้ำยางชرمชาติและพบว่า NPCC ที่ดัดแปลงพื้นผิวสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อนและออกซิเจนของยางให้สูงขึ้นได้ [9] อย่างไรก็ได้ การใช้ NPCC เป็นสารตัวเติมในยางชرمชาติที่อยู่ในรูปของยางแห้ง ยังคงมีการศึกษากันน้อย และเพื่อเป็นการเน้นศึกษาสารตัวเติมประเภทที่มีสีอ่อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงระหว่าง NPCC และซิลิกา (ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีการเติมสารคู่คุณใช้เลน) ในยางชرمชาติแห้ง

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### วัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติเกรด STR 5L ผลิตโดยบริษัทญี่ปุ่นรับเนอร์ไพรตัคส์ จำกัด สารเคมีชนิดอื่นๆ ที่ใช้เป็นองค์ประกอบในการผสมคือยาง ได้แก่ นาโนแคลเซียมคาร์บอนเนต (NPCC-101) จากบริษัทเบนเมเยอร์เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด ซิลิกา (silica; Tokusil 255) จากบริษัทโตกุยาม่า สยามซิลิก้า จำกัด (ตารางที่ 1 แสดงสมบัติพื้นฐานของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด) สารคู่ควบไชเลนไฟโอไซเดนโตโพร์ฟิลไทรอกซิไซเลน (Si-264) จากบริษัท เจเจ-เดกุสซาเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด ซิงก์ออกไซด์ ( $ZnO$ ) กรดสเตียริก (stearic acid) และกำมะถัน ( $S_8$ ) จากบริษัทเคมีนิคอร์ปอเรชัน จำกัด ส่วนสารเร่งปฏิกิริยาจำนวน 2 ชนิดที่นำมาใช้ คือ เตตระเมทธิลไธยูแรมไดซัลไฟด์ (Perkasit<sup>®</sup>TMTD) และบิวทิล-2-เบนโซไซอะซิลซัลฟีนาไมด์ (Santocure<sup>®</sup>TBBS) จากบริษัททรีไลแอนซ์เทคโนโลยี (Flexsys) จำกัด

ตารางที่ 1 สมบัติพื้นฐานของสารตัวเติม

	ขนาดกลุ่มก้อน สารตัวเติม ( $\mu m$ )	พื้นที่ผิวจำเพาะ* อนุภาคเฉลี่ย ( $m^2/g$ )	pH (BET)	ความถ่วง 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: \*พื้นที่ผิวจำเพาะจะเป็นสัดส่วนแบบผกผันกับขนาดอนุภาคปฐมภูมิ [1]

### การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคอมพาวด์

ตารางที่ 2 แสดงสูตรการผสมคุณที่ใช้ในงานวิจัย หลังจากการออกแบบ ได้ดำเนินการผสมคุณยางโดยใช้เครื่องผสมระบบปิด (Brabender 350E) โดยตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของห้องผสมเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบในการหมุนของโรเตอร์เท่ากับ 40 รอบต่อนาที การผสมแบ่งออกเป็น 2 ช่วงโดยช่วงที่ 1 ทำการบดยางธรรมชาติ ซิงก์ออกไซด์ และกรดสเตียริกในเครื่องผสม เมื่อเวลาผ่านไป 1.5 นาทีจึงทำการเติมสารตัวเติมและสารคู่ควบไชเลน (สารคู่ควบไชเลนจะเติมเฉพาะสูตรที่ใช้ซิลิก้าเป็นสารตัวเติมเท่านั้น) หลังจากนั้น 8.5 นาที จึงนำยางคอมพาวด์ออกจากเครื่องผสม แล้วนำไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ทึ้งไว้ให้เย็น จากนั้นจึงนำยางมาทดสอบต่อในช่วงที่ 2 โดยทำการเติมกำมะถัน และสารเร่งปฏิกิริยาลดไป เมื่อเวลาผ่านไป 3 นาที จึงนำยางคอมพาวด์ออกจากเครื่องผสม แล้วนำไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ท้ายสุดจึงแบ่งยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกนำไปวัดค่าความหนืดมูนนีตามมาตรฐาน ASTM D1646-87 ด้วยเครื่อง Mooney viscometer (ViscTech+) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ส่วนที่ 2 นำไปหาระยะเวลาสกอร์ช (scorch time,  $t_s$ ) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม (optimum curing time,  $t_c$ ) 90 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 ชิลิกา)	ปรับเปลี่ยนปริมาณ (0.0-40.0)
สารคุ่มควบไชเลน (Si-264)*	ร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักของชิลิกา)
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Santocure®TBBS)	1.0
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Perkasit®TMTD)	0.3
กำมะถัน	2.0

หมายเหตุ: \*ใช้เฉพาะสูตรที่มีชิลิกาเป็นสารตัวเติมเท่านั้น

### การเตรียมและทดสอบสมบัติของยางคงรูป

นำยางคอมพาวด์ไปทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ตามระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมของยาง ( $t_c$ ) 90 จากนั้นจึงนำยางคงรูปที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความแข็ง (hardness) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM D412 (ด้วย 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) โดยใช้วิธีการทดสอบการบวมพองของยางในตัวทำละลายโทลูอิน (toluene) ซึ่งคำนวนหาความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยางโดยใช้สมการ 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  $\chi_2$  คือ ค่าตัวแปรอันตรกิริยา (interaction parameter) ระหว่างยางธรรมชาติกับโทลูอินซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.393 [17]  $V_1$  คือ ปริมาตรของตัวทำละลายต่อน้ำในมล (molar volume) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 107.10 มิลลิลิตรต่อมอล และ  $n$  คือ จำนวนสายโซ่โมเลกุลยางที่มีความยืดหยุ่นต่อน้ำหน่วยปริมาตร นอกจากนี้ยังได้ดำเนินการวัดระดับการแตกตัวของสารตัวเติม (filler dispersion) โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกล้อง (SEM, JEOL JSM-6301F) อิเกด้วย

## ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

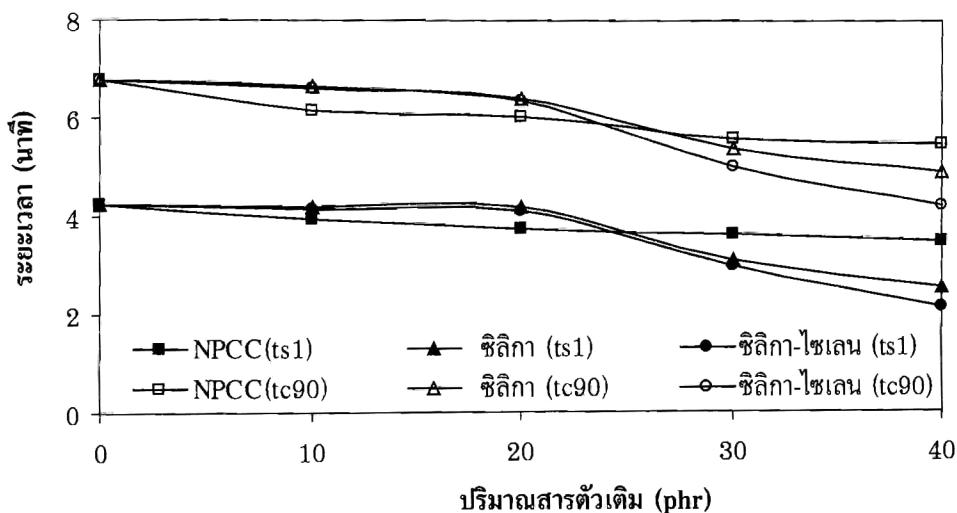
### ความหนืดมูนนี (mooney viscosity) และพลังงานที่ใช้ในการผสม (mixing energy)

ตารางที่ 3 แสดงผลของสารตัวเติมต่อความหนืดมูนนีและพลังงานที่ใช้ในการผสม โดยทั่วไป การเติมสารตัวเติมที่เป็นของแข็งลงไปในยางจะทำให้ความหนืดของยางสูงขึ้น ส่งผลให้ยางได้รับแรงเฉือนที่สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น จากตารางจึงพบว่าทั้งค่าความหนืดมูนนีและค่าพลังงานที่ใช้ในการผสมมีแนวโน้มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารตัวเติม เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติมเท่ากัน พบร่วม NPCC จะทำให้ยางมีความหนืดมูนนีต่ำกว่าชิลิกา ทั้งนี้เนื่องจาก NPCC มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่า (มีขนาดของอนุภาคปูรุณภูมิใหญ่กว่า) จึงมีพื้นที่ในการเกิดอันตรักษิริยาภัยน้อยกว่าจากานี้เมื่อทำการศึกษาผลของสารคู่ควบใช้เล่นต่อสมบัติในกระบวนการผลิตของยางที่เสริมแรงด้วยชิลิกา จะพบว่าการเติมสารคู่ควบใช้เล่นทำให้ความหนืดมูนนีของยางลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารคู่ควบใช้เล่นจะทำให้ชิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดียิ่งขึ้น (ดูผลของ SEM ในໂຄຣກາຟໃນหัวข้อ 3.3 ประกอบ) โดยทั่วไปแล้วเมื่อทำการเติมชิลิกาเข้าไปในยาง ยางส่วนที่จับอยู่บนพื้นผิวของชิลิกาและยางส่วนที่แทรกเข้าไปในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของชิลิกาจะถือเสมือนว่าเป็นส่วนหนึ่งของชิลิกา ซึ่งยางส่วนนี้จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (immobilized rubber) ในขณะที่ยางส่วนที่เหลือซึ่งอยู่ด้านนอกจัดเป็นยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ (mobilized rubber) ซึ่งถ้าชิลิกาแตกตัวได้ไม่ดี ยางส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ก็จะมีปริมาณมาก ส่งผลให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดสูงเนื่องจากยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมีปริมาณน้อย แต่เมื่อมีการเติมสารคู่ควบใช้เล่นลงไป สารคู่ควบใช้เล่นจะเข้าไปทำงานปฎิกริยาภัยหมุนเวียนบนลอนพื้นผิวของชิลิกา ทำให้ชิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางส่วนที่เคยแทรกอยู่ในรูพรุนของชิลิกา (ยางส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้) ถูกปลดปล่อยออกมาด้านนอกกลไกเป็นยางส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ [18] ด้วยเหตุนี้ การเติมสารคู่ควบใช้เล่นลงไปจึงส่งผลทำให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดต่ำลง อย่างไรก็ดี แม้ว่าการเติมสารคู่ควบใช้เล่นจะทำให้ยางนิ่มลง แต่จากการสังเกตพบว่ายางคอมพาวด์ที่เสริมแรงด้วยชิลิการ่วมกับสารคู่ควบใช้เล่นก็ยังคงมีค่าความหนืดที่สูงกว่ายางคอมพาวด์ที่เสริมแรงด้วย NPCC ค่อนข้างมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากชิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่า NPCC ค่อนข้างมากนั่นเอง

ตารางที่ 3 ความหนืดมูนนี่และพลังงานที่ใช้ในการทดสอบคอมพาวด์

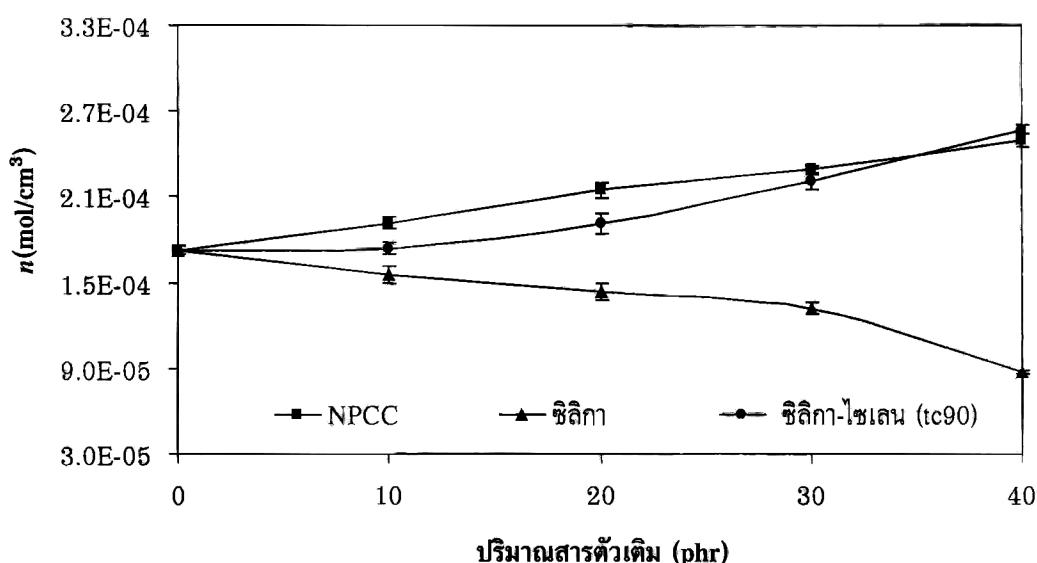
สารตัวเติม	ปริมาณ สารตัวเติม (phr)	ปริมาณ สารคุณภาพเลน (phr)	ความหนืดมูนนี่*	พลังงานที่ใช้ในการทดสอบ	
				ช่วงที่ 1 (kN.m)	ช่วงที่ 2 (kN.m)
ไม่มี	-	-	35.3	300.2	124.4
NPCC	10	-	35.4	301.5	125.2
	20	-	36.5	307.7	123.8
	30	-	37.3	320.9	128.5
	40	-	38.2	343.0	129.7
ซิลิกา	10	-	40.9	303.5	125.6
	20	-	53.9	363.3	139.6
	30	-	61.8	411.2	152.3
	40	-	87.4	425.7	176.4
ซิลิกา	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 ผลของสารตัวเติมต่อระยะเวลาสกอร์ช ( $t_s$ ) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม ( $t_c$  90)

## ลักษณะการคงรูป (cure characteristics) และความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (crosslink density)

ผลของสารตัวเติมต่อระยะเวลาสกอร์ช ( $t_s$ ) และระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสม ( $t_c$ ) แสดงดังรูปที่ 1 จากรูปพบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะทำให้ระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง สำหรับยางที่มี NPCC เป็นสารตัวเติม การลดลงของระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมดังกล่าวอาจเกิดจากสภาพที่เป็นด่างของ NPCC (pH ของ NPCC เท่ากับ 9.19) เนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าสารเคมีหรือสารตัวเติมที่มีสภาพเป็นด่างจะสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาคงรูปได้ [1] เมื่อทำการเบรียบเทียบชนิดของสารตัวเติม พบว่าที่ปริมาณสารตัวเติมต่ำกว่า 25 phr ยางที่มี NPCC เป็นสารตัวเติมจะมีระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมสั้นกว่ายางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติม แต่ที่ปริมาณสารตัวเติมสูงกว่านั้นจะพบผลกระทบในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ ยางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมจะมีระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมสั้นกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารคู่គุนไชเลนร่วมกับซิลิกาส่งผลให้ยางมีระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาในการคงรูปที่เหมาะสมสั้นลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากสารคู่គุนไชเลนจะไปทำปฏิกิริยากับหมูไชланอุด เป็นผลให้หมูไชланล่อนเป็นผิวของซิลิกามีปริมาณลดลง การดูดซับสารเคมีโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปและสารประกอบเชิงชั้อนของสังกะสีจึงลดลงตามไปด้วย ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาคงรูปเกิดได้เร็วขึ้น [7]



รูปที่ 2 ผลของสารตัวเติมต่อความหนาแน่นของการเชื่อมโยง

รูปที่ 2 แสดงผลของสารตัวเติมต่อความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยาง ซึ่งบอกในรูปของจำนวนสลายไโนเมเลกุลยางที่มีความยืดหยุ่นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ( $n$ ) จากรูปพบว่าการเพิ่มปริมาณของ NPCC จะส่งผลทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณของชิลิกาลับ ส่งผลทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงลดลง (แม้ว่าการเพิ่มปริมาณของชิลิกาจะทำให้ยาง มีอัตราเร็วในการคงรูปที่สูงขึ้นก็ตาม) ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยางที่มี NPCC เป็นสารตัวเติมคาดว่าอาจเกิดจากการที่ NPCC มีสภาพเป็นด่างจึงสามารถกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปได้ แต่การเพิ่มปริมาณของชิลิกาจะเป็นการเพิ่มการดูดซับสารกระตุ้นและสารเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากนั้น พื้นผิวของชิลิกามีหมู่ไซลานอล จึงส่งผลทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงลดลง อย่างไรก็ได้ ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่าเมื่อทำการเติมสารคู่ควนไซเลนลงไปจะทำให้ระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ของยางกลับมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของชิลิกา ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารคู่ควนไซเลนที่เติมลงไปจะ เข้าไปทำงานกับหมู่ไซลานอลที่อยู่บนพื้นผิวของชิลิกา ทำให้บนพื้นผิวของชิลิกามีปริมาณของหมู่ไซลานอล ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาลดลง การดูดซับสารกระตุ้นและสารเร่งปฏิกิริยาจึงลดลงตามไปด้วย เมื่อทำการเบรเยน เทียบกับปริมาณการเติมเท่ากัน พบว่ายางที่เติม NPCC จะมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงที่สุด ตาม มาด้วยยางที่เติมชิลิการ่วมกับสารคู่ควนไซเลน และยางที่เติมเฉพาะชิลิกาเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ อย่างไร

ตารางที่ 4 ผลของสารตัวเติมต่อค่าความแข็ง ความหนาแน่นต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการขัดถู

สารตัวเติม	ปริมาณสารตัวเติม (phr)	ปริมาณสารคู่ควนไซเลน (phr)	ความแข็ง (Shore A)	ความหนาแน่นต่อแรงดึง (MPa)	ปริมาตรที่สูญหาย (cm <sup>3</sup> )
NPCC	ไม่มี	-	48.6±0.2	23.8±1.0	0.179±0.010
	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
ชิลิกา	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
ชิลิกา	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

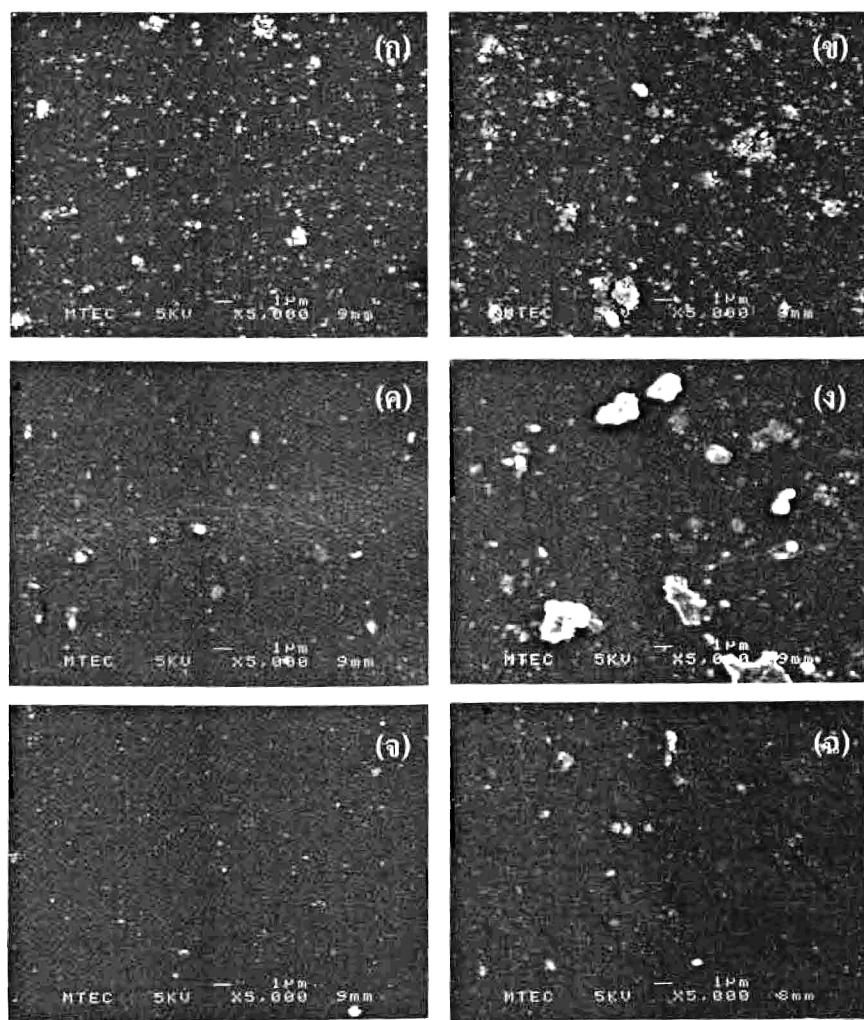
กีดี จากการทดลองพบว่าที่ปริมาณของสารตัวเติมสูงๆ (เช่น ที่ 40 phr) การเติมซิลิการ่วมกับสารคู่คุณไชเลนจะทำให้ระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงของยางสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าไกล์เดี่ยงหรือสูงกว่าการเติม NPCC

### **สมบัติเชิงกล (mechanical properties) และระดับการแตกตัวของสารตัวเติม (filler dispersion)**

ตารางที่ 4 แสดงผลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมต่อความแข็ง ความทนทานต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการขัดถู (ซึ่งแสดงในรูปของปริมาตรที่สูญหาย) ตามลำดับ จากตารางพบว่าค่าความแข็งของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากสารตัวเติมจัดเป็นอนุภาคของแข็งที่มีความแข็งสูงกวายางค่อนข้างมาก ดังนั้น การเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมจึงส่งผลทำให้ลดส่วนของยางลดลง ซึ่งจะส่งผลต่อเนื่องให้ยางมีค่าความแข็งสูงขึ้น เรียกผลกระทบในลักษณะ เช่นนี้ว่าผลของการเจือจางหรือ “dilution effect” เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ปริมาณสารตัวเติมเท่ากัน พบร่วงที่มี NPCC เป็นสารตัวเติมจะมีค่าความแข็งสูงกวายางที่มีซิลิกาเป็นสารตัวเติมเล็กน้อย ในทางทฤษฎีแล้ว NPCC ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำกว่าซิลิกาค่อนข้างมากควรจะทำให้ยางมีค่าความแข็งต่ำกว่าซิลิกา แต่ในกรณีนี้พบว่า NPCC ทำให้ยางมีค่าความแข็งสูงกว่าซิลิกา คาดว่าอาจจะเกิดจากการที่ NPCC ทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงกว่านั้นเอง เนื่องจากการเติมสารคู่คุณไชเลนลงไปส่งผลทำให้ยางมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นค่อนข้างมาก ดังนั้น จึงพบว่ายางที่ได้รับการเสริมแรงด้วยซิลิการ่วมกับสารคู่คุณไชเลนจึงมีค่าความแข็งสูงที่สุด (สูงกวายางที่เติม NPCC)

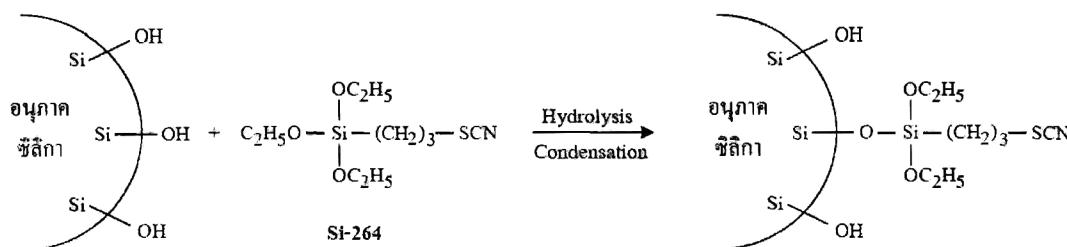
เมื่อพิจารณาผลของสารตัวเติมต่อค่าความทนทานต่อแรงดึงของยาง พบร่วงการเพิ่มปริมาณ NPCC จะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกา (ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีการเติมสารคู่คุณไชเลน) จะทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดที่ปริมาณสารตัวเติมเท่ากับ 30 phr หลังจากนั้นก็จะเริ่มลดลง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวก่อให้เกิดคล้องกับผลงานวิจัยที่เคยมีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ที่พบว่าค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางจะสูงขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติมเสริมแรงจนถึงจุดๆ หนึ่งจากนั้นก็จะลดลง [19] ซึ่งการลดลงของค่าความทนทานต่อแรงดึงที่พบในกรณีของการเติม NPCC คาดว่าเป็นผลมาจากการมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่อนข้างต่ำของ NPCC (เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกา) ด้วยเหตุนี้ NPCC จึงจัดเป็นสารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงแก่ยาง เมื่อเติมลงไปในยางจึงส่งผลทำให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ในทางตรงกันข้าม เนื่องจากซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่อนข้างสูงมาก ซิลิกาจึงเสริมแรงให้แก่ยางได้ดี การเติมซิลิกาลงไปจึงส่งผลทำให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น แต่ถ้าทำการเติมซิลิกาลงไปในปริมาณที่มากเกินไป ( $> 30$  phr) ยางส่วนที่เป็นเมทริกซ์ซึ่งห่อหุ้มซิลิกาจะมีปริมาณลดลง ส่งผลทำให้ค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางเริ่มน้ำหนักลดลงตามไปด้วย จากผลการทดลองยังพบว่าการเติมสารคู่คุณไชเลนลงไปในซิลิกาจะช่วยทำให้ซิลิกาสามารถเสริมแรงให้แก่ยางได้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เพราะเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณการเติมเท่ากันพบว่าการใช้ซิลิการ่วมกับสารคู่คุณไชเลนส่งผลทำให้ยางมีค่าความทนทานต่อแรงดึงสูงกว่าการใช้ซิลิกาเพียงอย่างเดียวค่อนข้างมาก การเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อแรงดึงในกรณีที่มีการเติมสารคู่คุณไชเลนดังกล่าว

คาดว่าจากจะเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของระดับความหนาแน่นของการเติมอย่างแล้ว ยังอาจเกิดจาก การแตกตัวที่ดีขึ้นของซิลิกาอีกด้วย เพราะจากรูปที่ 3 จะพบว่าการเติมสารคู่ควบใช้เลนลงไปจะส่งผลทำให้ ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้การเสริมแรงที่ดีขึ้นเนื่องจากการเติมสารคู่ควบใช้เลนยังอาจเกิดจาก การเพิ่มขึ้นของอัันตรกิริยะระหว่างยางธรรมชาติและซิลิกาอีกด้วย เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าซิลิกามีความ เป็นข้าวสูงในขณะที่ยางธรรมชาติมีความเป็นข้าวต่ำ ดังนั้นซิลิกาและยางธรรมชาติจึงมีอันตรกิริยาต่อกัน ค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อมีการเติมสารคู่ควบใช้เลนลงไป ปลายด้านหนึ่งของสารคู่ควบใช้เลน (ด้านเอทอกซ์) จะ เข้าไปทำปฏิกิริยากับหมุนไฟล์ลานอล บนพื้นผิวของซิลิกาเกิดเป็นพันธะไซโลกเซน (siloxane) ที่มีความ เสถียรสูง (ดังสมการที่แสดงในรูปที่ 4) ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งของสารคู่ควบใช้เลนจะหันเข้าหา ไม่เลกุลของยางและจะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาคงรูปทำให้สารคู่ควบใช้เลนยึดติดกับยางได้อย่างแข็งแรง ด้วยเหตุนี้การเติมสารคู่ควบใช้เลนลงไปจึงช่วยเพิ่มอันตรกิริยะระหว่างยางธรรมชาติและซิลิกาให้สูงขึ้น



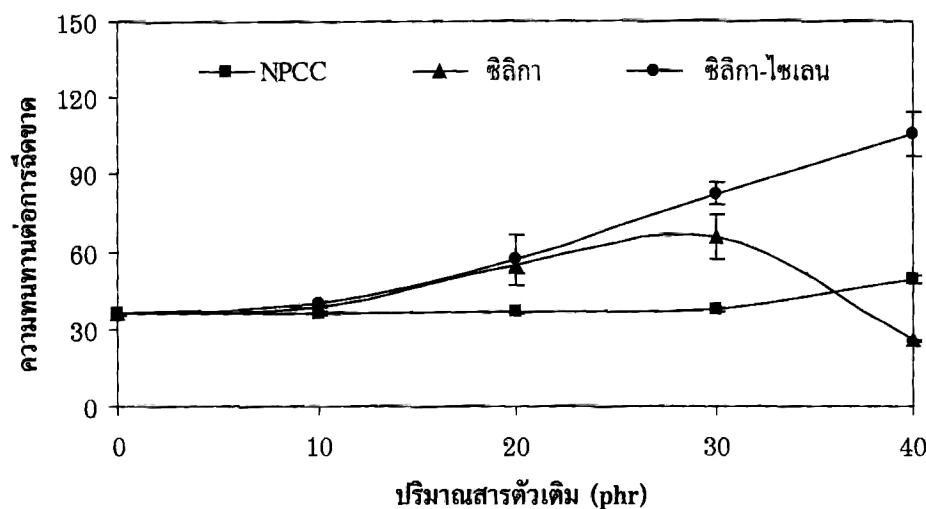
รูปที่ 3 SEM ไมโครกราฟแสดงการแตกตัวของสารตัวเติมในยางคงรูป ( $5 \times 10^3$  เท่า)

- (ก) NPCC 20 phr (ข) NPCC 40 phr (ค) ซิลิกา 20 phr (ง) ซิลิกา 40 phr
- (จ) ซิลิกา-ใช้เลน 20 phr (ฉ) ซิลิกา-ใช้เลน 40 phr



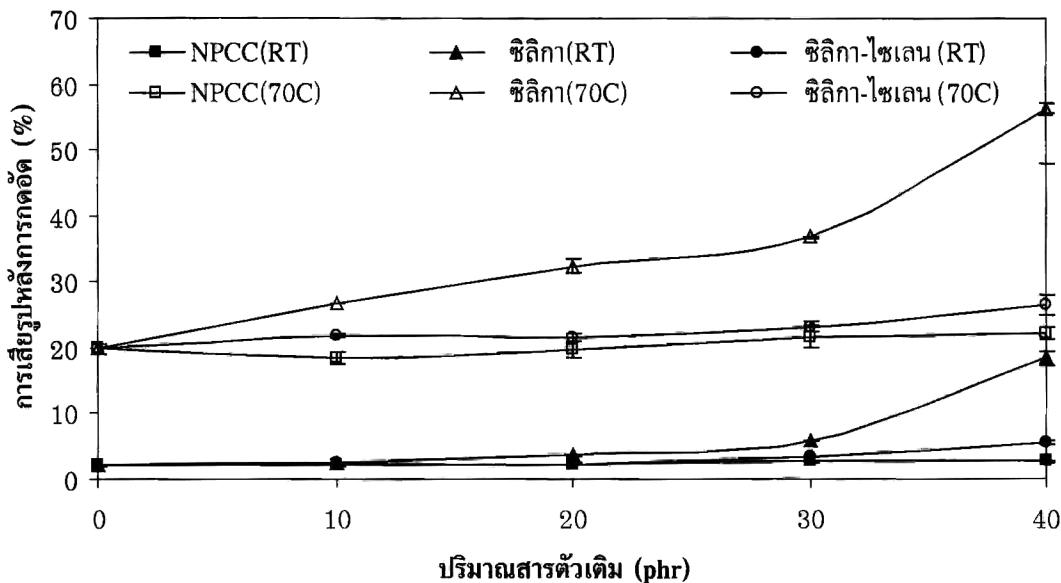
รูปที่ 4 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างซิลิกาและสารคุ่มไฮเดน

จากผลการทดลองในตารางที่ 4 ยังพบว่าสมบัติความต้านทานต่อการขัดถูของยางมีแนวโน้มด้อยลงตามการเพิ่มปริมาณของหั่ง NPCC และซิลิกา (มีปริมาตรที่สูญหายเพิ่มขึ้น) ซึ่งการด้อยลงของสมบัติความต้านทานต่อการขัดถูในกรณีที่เติม NPCC นั้น คาดว่าจะเกิดจากความจริงที่ว่า NPCC มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ ด้วยเหตุนี้ NPCC จึงไม่เสริมแรงให้แก่ยาง ส่วนการด้อยลงของสมบัติความต้านทานต่อการขัดถูในกรณีที่เติมซิลิกานั้น คาดว่าจะเป็นผลมาจากการลดลงของค่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงและการแตกตัวที่ไม่ดีของซิลิกา (โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเติมซิลิกาลงไปในปริมาณสูง) อย่างไรก็ได้ เมื่อทำการเติมซิลิการ่วมกับสารคุ่มไฮเดนจะพบผลการทดลองในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ สมบัติความต้านทานต่อการขัดถูของยางถูกปรับปูนให้ดีขึ้นตามปริมาณของซิลิกาลงถึง 30 phr ก่อนที่จะเริ่มด้อยลง ความต้านทานต่อการขัดถูที่ดีขึ้นดังกล่าว คาดว่าอาจเกิดจากการแตกตัวที่ดีขึ้นของซิลิกาและการเพิ่มขึ้นของอันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติมอันเนื่องมาจากสารคุ่มไฮเดน เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณการเติมเท่ากัน พบว่า NPCC จะทำให้ยางมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูต่ำที่สุด เพราะ NPCC มีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำสุด (ยกเว้นที่ปริมาณการเติมเท่ากัน 40 phr ที่พบว่าซิลิกาจะทำให้ยางมีค่าความต้านทานต่อการขัดถูต่ำกว่า NPCC ทั้งนี้ เพราะที่ปริมาณดังกล่าว ซิลิกามีระดับของการแตกตัวที่ไม่ดีและมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่ต่ำมาก) ในขณะที่ความต้านทานต่อการขัดถูสูงที่สุดจะพบในยางที่มีการใช้ซิลิการ่วมกับสารคุ่มไฮเดน ซึ่งสามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 5 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาด

รูปที่ 5 แสดงผลของสารตัวเติมต่อสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง จากรูปพบว่าการเติม NPCC ไม่ส่งผลต่อค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นในกรณีที่มีการเติมลงไปในปริมาณที่สูงกว่า 30 phr ซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้นเล็กน้อย อย่างไรก็ตี ในกรณีของการเติมชิลิกานั้น พบว่าค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณของชิลิกานถึง 30 phr ก่อนที่จะเริ่มลดลง การเพิ่มขึ้นของค่าความทนทานต่อการฉีกขาดในช่วงแรกดังกล่าวเกิดจากการเสริมแรงของชิลิกาซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่อนข้างสูงนั่นเอง ส่วนการลดลงของค่าความทนทานต่อการฉีกขาดเมื่อเติมชิลิกาในปริมาณที่สูงเกินไปนั้นคาดว่าเกิดจากการแตกตัวที่ไม่ดีของชิลิกา (ดู SEM ในครุภาระในรูปที่ 3 ประกอบ) และการลดลงของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง อย่างไรก็ตี ในกรณีของยางที่มีการเติมชิลิการ่วมกับสารคุ่มวงไชเลนนั้น ค่าความทนทานต่อการฉีกขาดของยางมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามปริมาณของชิลิกา ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารคุ่มวงไชเลนนอกจากจะทำให้ระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้นและช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและชิลิกาแล้ว ยังส่งผลให้ชิลิกาแตกตัวได้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 6 ผลของสารตัวเติมต่อสมบัติการเสียรูปหลังการกัดอัด

รูปที่ 6 แสดงผลของสารตัวเติมต่อสมบัติการเสียรูปหลังการกัดอัดของยางที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิห้องโดยทั่วไปสมบัติการเสียรูปหลังการกัดอัดที่อุณหภูมิห้องจะขึ้นอยู่กับระดับความยืดหยุ่นของยางเท่านั้น ในขณะที่สมบัติการเสียรูปหลังการกัดอัดที่อุณหภูมิสูงจะขึ้นอยู่กับทั้งระดับความยืดหยุ่นและระดับความทนทานต่อความร้อนของยาง เมื่อทำการทดสอบสมบัติการเสียรูปหลังการกัดอัดที่อุณหภูมิห้องพบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นต่ำลง (มีค่าการเสียรูปหลังการกัดอัดสูงขึ้น) การลดลงของความยืดหยุ่นดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากผลของการเจือจาง เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าเฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อยางเท่านั้นที่มีความยืดหยุ่น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณสารตัวเติมเท่ากันพบว่าชิลิกาจะทำให้ยางมีสมบัติความยืดหยุ่นต่ำกว่า NPCC ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ผลของระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า เพราะเป็นที่ทราบกันดีว่าความยืดหยุ่นของยางจะแปรผันโดยตรงกับระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยง ผลการทดลองยังปังชี้ว่าการเติมสารคุ่คุวน้ำยาเลนลงในยางที่มีชิลิกาเป็นสารตัวเติมจะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น (มีค่าการเสียรูปหลังการกัดอัดต่ำลง) ทั้งนี้เพราะการเติมสารคุ่คุวน้ำยาเลน จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในยาง และเพิ่มอัตราการห่วงยางและชิลิกาให้สูงขึ้น เมื่อพิจารณาสมบัติการเสียรูปหลังการกัดอัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส พบว่ามีแนวโน้มคล้ายกับผลการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง แต่ค่าการเสียรูปหลังการกัดอัดที่วัดได้จะมีค่าสูงกว่า ที่เป็นเช่นนี้ เพราะการบ่มเร่งด้วยความร้อนจะส่งผลทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพ เป็นผลทำให้ยางมีความยืดหยุ่นต่ำลง

## สรุปผลการทดลอง

เนื่องจาก NPCC มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับซิลิกา ดังนั้น NPCC จึงจัดเป็นสารตัวเติมที่มีประสิทธิภาพในการเสริมแรงต่ำ เมื่อเติม NPCC ลงไปในยางจะส่งผลทำให้ยางมีความหนืดสูงขึ้นเพียงเล็กน้อย และเนื่องจาก NPCC มีสภาพเป็นด่าง จึงทำให้ยางเกิดการคงรูปได้เร็วและยางคงรูปที่ได้ก็จะมีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติม NPCC ลงไปในยางก็จะส่งผลทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ด้อยลง ในทางตรงกันข้าม ซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่า NPCC ค่อนข้างมาก ดังนั้นซิลิกาจึงเสริมแรงให้แก่ยางได้ดี การเติมซิลิกาลงไปในยางจะส่งผลทำให้ความหนืดของยางสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของซิลิกาจะส่งผลทำให้ยางมีอัตราเร็วของการคงรูปสูงขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ยางคงรูปที่ได้มีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงต่ำลง แม้ว่าซิลิกาจะทำให้ยางคงรูปที่ได้มีความยืดหยุ่นต่ำกว่า NPCC แต่ซิลิกาที่ส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลในภาพรวมที่ดีกว่า NPCC ค่อนข้างมาก นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาจะสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการใช้ร่วมกับสารคู่คิวบ์ไซเลน เนื่องจากเกิดการลดลงของการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยา การแตกตัวที่ดีขึ้นของซิลิกา และการเพิ่มขึ้นของอันตรกิริยะระหว่างยางและซิลิกา นอกจากสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้นแล้ว สารคู่คิวบ์ไซเลนยังทำให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติในกระบวนการผลิตที่ดีขึ้นอีกด้วย

## เอกสารอ้างอิง

1. พงษ์ธร แซ่อุย. 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. Ansanifar, 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. Saeoui, 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-CaCO<sub>3</sub> and Nano-SiO<sub>2</sub>. *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-CaCO<sub>3</sub>-Filled EPDM Vulcanizates and Possible Mechanism. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics* 44: 1226-1236.
16. Flory, P. J. and Rhener, 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. สุกาวัตน์ รักชลธี นิรชาติ ก่อตระกูล ปานทัย ชื่นพูดี และพงษ์ธร แซ่จุย. 2547. อิทธิพลของ เถ้าแกลงในสารตัวเติมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ. วารสาร วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 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 Comparision with Other Commercial Fillers. *Journal of Applied Polymer Science* 83: 2485-2493.

ได้รับบทความวันที่ 17 ตุลาคม 2550  
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 21 มกราคม 2551