

การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติของยางธรรมชาติที่เติมผงเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทยกับซิลิกาเกรดการค้า

A Comparative Study of the Properties of Natural Rubber Filled with Fly Ash Particles from Various Sources in Thailand and a Commercial Silica

ศิรินทร ทองแสง¹ และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ^{*2}
Sirinthorn Thongsang¹, and Narongrit Sombatsompop^{*2}

¹นักศึกษาคณะศึกษาศาสตร์ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
โทรศัพท์ 02-4708696 ต่อ 319 โทรสาร 02-4708614 อีเมล* sirinthorn.tho@kmutt.ac.th

²หัวหน้าโครงการวิจัย กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
โทรศัพท์ 02-4708645 โทรสาร 02-4708614 E-mail*: narongrit.som@kmutt.ac.th

■ บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย และปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยที่มีต่อสมบัติของยางธรรมชาติที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่ง รวมถึงการเปรียบเทียบการเติมซิลิกาเกรดการค้าด้วย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการนำเถ้าลอยจาก 3 แหล่ง คือ เถ้าลอยจาก อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง เถ้าลอยจาก จ.ระยอง เถ้าลอยจาก อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเป็นไปได้ในการใช้เถ้าลอยเป็นสารเสริมแรงในผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ โดยมีการนำเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ และซิลิกาเกรดการค้ามาปรับปรุงผิวด้วย Si69 ปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก แล้วจึงเติมลงในยางธรรมชาติในปริมาณ 30 - 75 phr จากนั้นทำการทดสอบสมบัติการคงรูปยาง ความหนาแน่นพันธะข้าม การทนแรงดึง การทนแรงฉีกขาด ความแข็ง การกระดอน และการยุบตัวถาวร ผลงานวิจัย พบว่า การใช้เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ เติมในยางธรรมชาตินั้นช่วยลดพลังงานในการผสม และขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง การเติมซิลิกาของเถ้าลอยในยางธรรมชาติสามารถทดแทนการใช้ซิลิกาเกรดการค้าเมื่อเติมปริมาณซิลิกา 30 phr ซึ่งให้สมบัติทางกลใกล้เคียงกัน การเติมเถ้าลอยในยางธรรมชาติให้สมบัติความเป็นอีลาสติคดีกว่าซิลิกาเกรดการค้าโดยเฉพาะเถ้าลอยจากแม่เมาะ นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่งยังให้สมบัติการทนต่อความร้อนที่ดีด้วย

■ Abstract

This article studied the effect of fly ash (FA) from various sources in Thailand and silica content of fly ash on the properties of FA-filled natural rubber (NR) vulcanizates, in comparison that also with commercial silica. In this work, the FA particles were obtained from three different sources, these including Mae Moh (Lampang), Rayong, and Banphong (Rajburi). The aim of this research was to seek possibilities of using fly ash particles as a reinforcing filler in natural rubber products. The fly ash and commercial silica were treated by Si69 of 2% wt and mixed in natural rubber by loading from 30 - 75 phr. The FA-filled NR vulcanizates were studied through cure characteristics, crosslink density, tensile properties, tear strength, hardness, resilience and compression set. The result suggested that the FA-filled NR vulcanizates were energy saving in rubber compounding and processing. We recommended that FA particles can be used to replace commercial silica at the loading 30 phr, giving similar the mechanical properties. The NR/FA vulcanizates were superior elastic properties than commercial silica-filled NR composites, especially FA from Mae Moh. Furthermore, the FA-filled NR vulcanizates gave good heat aging properties.

Keywords

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ, เถ้าลอย, ซิลิกา, สารเสริมแรง

Keywords : natural rubber, fly ash, silica, reinforcing filler

□ บทนำ

เถ้าลอยเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาถ่านหิน โดยมีหลายแหล่งมากในประเทศไทย ซึ่งเถ้าลอยที่มีอยู่ในประเทศไทย โดยเฉพาะเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีปริมาณสูงถึง 3,000,000 ตันต่อปี และหากไม่นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ก็จะกลายเป็นของเสียในที่สุด อีกทั้งยังทำให้เกิดปัญหาการกำจัดของเสียในส่วนนี้ด้วย แต่ปัจจุบันได้มีการเริ่มนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ปริมาณการใช้เถ้าลอยสูงถึง 1,800,000 ตันต่อปี คิดเป็นร้อยละ 60 ของที่ผลิตได้ อย่างไรก็ตามปริมาณเถ้าลอยในประเทศไทยยังคงเหลืออยู่ปริมาณมาก ไม่เพียงแต่เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเท่านั้น แต่ยังมีเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินในแหล่งต่างๆ ในประเทศด้วย อาทิ เถ้าลอยถ่านหินซิปบูมินัส จาก จ.ระยอง ถ่านหินแอนทราไซต์ จาก จ.กาญจนบุรี เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ นั้นมีส่วนประกอบทางเคมีแตกต่างกันด้วย ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีหลักของเถ้าลอยนี้คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ หรือที่เรียกว่า ซิลิกา เป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 40% เป็นที่ทราบกันดีว่า โดยทั่วไปซิลิกาเป็นสารเติมแต่งสำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางเพื่อเพิ่มสมบัติทางกล ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำเถ้าลอยมาผสมในยางธรรมชาติเพื่อใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบซิลิกา รวมถึงการนำไปสู่การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติให้ดี และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการสนองนโยบายของประเทศ ด้วยการส่งเสริมให้มีการใช้ยางธรรมชาติภายในประเทศให้มากขึ้น และลดการพึ่งพาการส่งออก อีกทั้งยังเป็นทางเลือกหนึ่งของโรงงานในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ รวมถึงทำให้อุตสาหกรรมยางเจริญเติบโตขึ้นด้วย

งานวิจัยที่มีการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ร่วมกับวัสดุพลาสติก เช่น การนำเถ้าลอยเติมลงในพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว อาทิ งานวิจัยของ SEN และ NUGAY พบว่า การใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) ปรับปรุงผิวเถ้าลอยที่เติมในพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว ช่วยลดเวลาในการคงรูปลงบ้างเล็กน้อย ช่วยเพิ่มสมบัติทนแรงดึงให้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วยสารคู่ควบยังช่วยลดการสูญเสียโมดูลัส เนื่องจากเป็นผลของการลดแรงเสียดสีภายในระดับโมเลกุล GUHANATHAN และคณะ ยังพบผลการทดลองที่คล้ายกับ SEN และคณะ กล่าวคือ การปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วยสารคู่ควบประเภทไฮเลนช่วยส่งผลต่อสมบัติความทนแรงดึง ทนแรงดัด ทนแรงอัด และทนแรงกระแทกได้ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าลอยถูกทำให้ลดพลังงานพื้นผิวและสารคู่ควบสามารถทำให้เกิดพันธะเคมีได้ดีกับเถ้าลอย และพอลิเอสเตอร์ ซึ่งพันธะเคมีที่เกิดขึ้นเป็นสายโซ่โมเลกุลที่เชื่อมระหว่างสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ และยังพบอีกว่าการใช้สาร

คู่ควบ Aminopropyltrimethoxysilane ปรับปรุงผิวเถ้าลอยนั้น ช่วยเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนพวกน้ำ น้ำเค็ม น้ำเกลือกรด สภาพอากาศ และน้ำแข็งที่ละลายได้ดีขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบชนิดนี้มีหมู่อะมิโนที่ช่วยให้เกิดพันธะโควาเลนต์กับพอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัวได้ดี นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงการเติมเถ้าลอยลงในในลอนด้วยงานวิจัยของ ณัฐวรรณ ด่านวิวัฒน์พร และคณะ พบว่า การปรับปรุงทางเคมีด้วยกรด และตามด้วยการเผาไหม้ช่วยกำจัดสารที่รบกวนการเกิดพอลิเมอไรเซชันของในลอน 6 และเมื่อใช้ไฮเลน 3-amino-propyl tritethoxysilane ปรับปรุงผิว ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างอนุภาคเถ้าลอยกับในลอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ส่วนงานวิจัยที่มีการนำเถ้าลอยเติมลงในยาง อาทิ ALKADASI NABIL และคณะ พบว่า การเติมเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวด้วย Si69 ลงในยางบิวทอะไดอีน ช่วยเพิ่มค่าทนแรงดึง ค่ามอดูลัส การยืดตัว 100% และค่าความแข็งให้ดีขึ้น เนื่องจากสารคู่ควบ Si69 สามารถเกิดพันธะเคมีเชื่อมระหว่าง 2 เฟสนี้ MISHRA และคณะ พบว่า การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตอนุภาคระดับนาโน และแคลเซียมเกรดการค้าลงในยางบิวทอะไดอีนทำให้ค่าทนแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นถึง 40% ซึ่งมีค่าสูงกว่าการเติมเถ้าลอย เนื่องจากกระจายตัวได้สม่ำเสมอดีกว่า และยังพบว่า อัตราการติดไฟของยางบิวทอะไดอีนที่เติมแคลเซียมคาร์บอเนตระดับนาโนมีค่าน้อยกว่าการเติมแคลเซียมเกรดการค้า และเถ้าลอยด้วย GARDE และคณะ พบว่า การปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วยเบสแล้วตามด้วยการกัดกรดทำให้ผิวของเถ้าลอยมีพื้นที่ผิวมากขึ้นซึ่งใกล้เคียงกับรูปร่างของซิลิกา และเมื่อนำไปเติมในยางพอลิไอโซพรีน ช่วยทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมแบบเสริมแรงในยางพอลิไอโซพรีนได้ดีด้วย และการใช้สารคู่ควบ TESPT ยังช่วยให้การกระจายของเถ้าลอยในยางพอลิไอโซพรีนดียิ่งขึ้น แต่กลับทำให้การกระดอนของยางลดลง เนื่องจากการขาดหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวไป ซึ่งการเติมเถ้าลอยลงในยางพอลิไอโซพรีนนั้นไม่ทำให้ปริมาณพันธะข้ามเปลี่ยนไปมากนัก SOMBATSOMPOP และคณะ พบว่า การเติมซิลิกาของเถ้าลอยที่ไม่ปรับปรุงผิวในยางธรรมชาติในช่วง 0 - 30 ส่วนในร้อยละ ให้สมบัติทางกลเทียบเท่ากับการเติมซิลิกาเกรดการค้า แต่ที่การเติมปริมาณซิลิกาสูงกว่านี้ไม่ทำให้สมบัติทางกลของวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางธรรมชาติกับเถ้าลอยไม่เปลี่ยนแปลง นั่นหมายความว่าอนุภาคเถ้าลอยแสดงพฤติกรรมเป็นสารเพิ่มเนื้อ (Extender) นอกจากนี้ยังพบว่า การปรับปรุงผิวเถ้าลอยด้วย Si69 ปริมาณ 2 - 4% โดยน้ำหนัก เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดที่ช่วยเพิ่มสมบัติทางกลด้านต่างๆ ของยางให้ดีขึ้น

จากงานวิจัยที่มีการนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์ในยางชนิดต่างๆ แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้สูงในการนำ

แก้ล่อยมาใช้ในอุตสาหกรรมยาง อย่างไรก็ตามแก้ล่อยในประเทศไทยมีหลายแหล่งด้วยกัน ซึ่งล้วนแต่มีส่วนประกอบทางเคมี และรูปร่างอนุภาคแก้ล่อยต่างกัน ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจของการนำแก้ล่อยจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย ซึ่งมาจากการเผาถ่านหินต่างชนิดกัน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการเติมแก้ล่อยเหล่านี้เพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติ โดยทำการศึกษสมบัติการคงรูปยาง ความหนาแน่น พันธะข้าม การทนแรงดึง การทนแรงฉีกขาด ความแข็ง การกระดอน และการยุบตัวถาวร รวมถึงศึกษาเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติที่มีการเติมซิลิกาเกรดการค้าด้วย

□ การทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

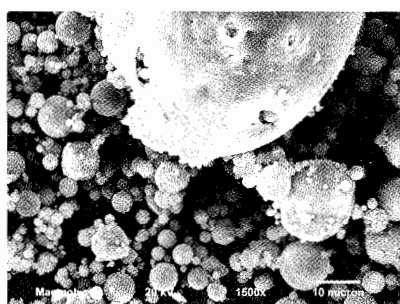
วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมยางคอมปาวด์ของงานวิจัยนี้มีรายละเอียดดังสูตรในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรยางคอมปาวด์ที่ใช้ในงานวิจัย

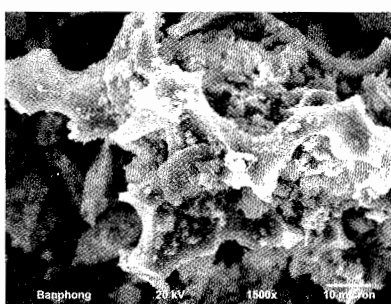
วัตถุดิบ	ปริมาณ (ส่วนในยางร้อยละ)	บริษัทการค้า
1. ยางธรรมชาติ เกรด STR 20	100 ส่วน	บริษัท ฮ่วยชวน จำกัด
2. ซิงค์ออกไซด์	5	บริษัท อูทีศอินเทอร์โพรส์ จำกัด (อนุเคราะห์)
3. กรดสเตียริก เกรด ST-DDK	2	บริษัท ซีออน แอดวานซ์ พอลิเม็กซ์ จำกัด
4. MBT เกรด ACCEL M-R	0.5	บริษัท ซีออน แอดวานซ์ พอลิเม็กซ์ จำกัด
5. DPG เกรด PERKACIT DPG	0.2	บริษัท ซีออน แอดวานซ์ พอลิเม็กซ์ จำกัด
6. ซัลเฟอร์ เกรด 325 mesh	3	บริษัท ซีออน แอดวานซ์ พอลิเม็กซ์ จำกัด

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของแก้ล่อยจากแหล่งต่างๆ

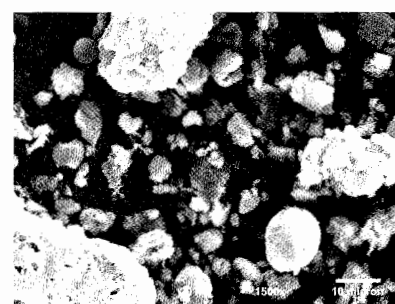
แหล่งแก้ล่อย	ส่วนประกอบทางเคมี (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅
แม่เมาะ	35.05	20.14	9.13	9.56	2.28	1.18	1.91	1.39	0.33	0.36
บ้านโป่ง	35.19	19.88	5.76	10.06	2.36	0.91	1.76	2.98	0.70	0.87
ระยอง	27.47	16.6	7.54	31.36	1.32	1.96	1.26	7.92	0.52	0.29



(ก) แก้ล่อยจากแม่เมาะ



(ข) แก้ล่อยจากบ้านโป่ง



(ค) แก้ล่อยจากระยอง

รูปที่ 1 ภาพโครงสร้างจุลภาคแก้ล่อย



สารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย และซิลิกาเกรดการค้าแบบตกผลึก เกรด Hi-sil (R) 233-S ได้รับอนุเคราะห์จากบริษัท PPG-SIAM SILICA จำกัด ซึ่งในการเตรียมสูตรยางที่เติมสารตัวเติมเถ้าลอยต้องคิดปริมาณซิลิกาจริงที่มีอยู่ในเถ้าลอยนั้นๆ ดังนั้น ปริมาณสารตัวเติมจริงที่ใช้ในแต่ละสูตรจึงต่างกัน เมื่อเทียบกับปริมาณซิลิกานี้เท่ากัน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณสารตัวเติมที่เติมในสูตรยาง

ประเภทของซิลิกา	ปริมาณสารตัวเติม (ส่วนในยางร้อยละ)			
ซิลิกาเกรดการค้า	30	45	60	75
ซิลิกาของเถ้าลอยจากแม่เมาะ	85	128	170	213
ซิลิกาเถ้าลอยจากบ้านโป่ง	85	128	170	213
ซิลิกาเถ้าลอยจากระยอง	109	163	218	272

จากงานวิจัยของ THONGSANG และคณะ พบว่า การใช้สารคู่ควบ Si69 ปริมาณ 2%wt ช่วยเพิ่มการยึดเกาะระหว่างยางธรรมชาติกับเถ้าลอย และส่งผลต่อสมบัติทางกลของยางดีขึ้นด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงผิวเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้าด้วยสารคู่ควบ Si69 จากบริษัท JJ-DEGUSSA (THAILAND) นั้น ปริมาณ 2%wt ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมโดยใช้ Si69 2 กรัม ผสมกับเอธานอล 100 มิลลิลิตร แล้วใช้เครื่องกวนกวนสารให้เป็นเนื้อเดียวกันเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเถ้าลอย 100 กรัม เทลงในของผสมระหว่าง Si69 กับเอธานอล ที่ละน้อย แล้วใช้แท่งแก้วกวนอีกประมาณ 15 นาที เพื่อให้แน่ใจว่า Si69 กระจายอยู่ทั่วบนผิวเถ้าลอย จากนั้นอบไล่เอธานอลออกให้หมดด้วยการใช้อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

□ การทดสอบสมบัติของยาง

- ทดสอบสมบัติคุณลักษณะการคงรูปของยางด้วย ODR: Oscillating Die Rheometer รุ่น ODR GT 70-70 บริษัท GOTECH Testing machine จำกัด ประเทศไทย ได้วัน ณ อุณหภูมิ 160°C ซึ่งเวลาคงรูปยางที่ 90 (tc90) ที่ได้จากการทดสอบนี้ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ
- ทดสอบการทนแรงดึง ตามมาตรฐาน ASTM D412-98 ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น Autograph AG-I บริษัท Shimadzu จำกัด ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้เวลาในการดึงทดสอบ 500 มิลลิเมตร ต่อนาที

- ทดสอบการทนแรงฉีกขาด ASTM D624-00 ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine รุ่น Autograph AG-I บริษัท Shimadzu จำกัด ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้เวลาในการดึงทดสอบ 500 มิลลิเมตรต่อนาที
- วัดค่าความแข็ง ASTM D2240-97 ทดสอบด้วยเครื่อง Durometer Hardness รุ่น 475 บริษัท PTC instruments ประเทศสหรัฐอเมริกา
- % ยึดตัวถาวร ทดสอบด้วยการนำชิ้นงานทดสอบทนแรงดึงไปยึดด้วยระยะยึดคงที่ 150% ทิ้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปล่อยให้ยางคืนตัวอิสระจนระยะยึดในช่วง gauge length ไม่เปลี่ยนแปลง แล้วบันทึกค่า % การยึดตัวที่เปลี่ยนไป
- % การกระดอน ตามมาตรฐาน ASTM D2632-C1 ทดสอบด้วยเครื่อง Wallance Dunlop Tripsometer บริษัท HW-Wallance จำกัด ประเทศสหราชอาณาจักร
- % การยุบตัวถาวร ตามมาตรฐาน ASTM D395-01
- การทดสอบความต้านทานต่อการบวมด้วยความร้อนของยางคงรูป ตามมาตรฐาน ASTM D573-99
- การทดสอบหาค่าความหนาแน่นพันธะข้าม โดยวิธีการแช่ชิ้นงานทดสอบในโทลูอีนเป็นเวลา 7 วัน แล้วจึงนำค่าเหล่านี้ไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นพันธะข้ามดังสมการที่ 1

$$-\ln(1-V_r) - V_r - \chi V_r^2 = 2V_s \eta_{swell} \left(V_r^{1/3} - \frac{2V_r}{f} \right) \quad \text{(สมการที่ 1)}$$

โดยที่ V_r คือ สัดส่วนปริมาตรของยางที่บวมตัว เนื่องจากสมมุติว่าส่วนที่เป็นสารตัวเติมไม่มีการบวมตัวเกิดขึ้น ดังนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$V_r = \frac{\left(\frac{w_d}{\rho_d} - \frac{w_f}{\rho_f} \right)}{\left(\frac{w_d}{\rho_d} - \frac{w_f}{\rho_f} \right) + \left(\frac{w_t - w_d - w_f}{\rho_s} \right)} \quad \text{(สมการที่ 2)}$$

ซึ่ง ρ_d คือ ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทดสอบ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ρ_f คือ ค่าความหนาแน่นของสารตัวเติม (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของโทลูอีนมีค่าเท่ากับ 0.862 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

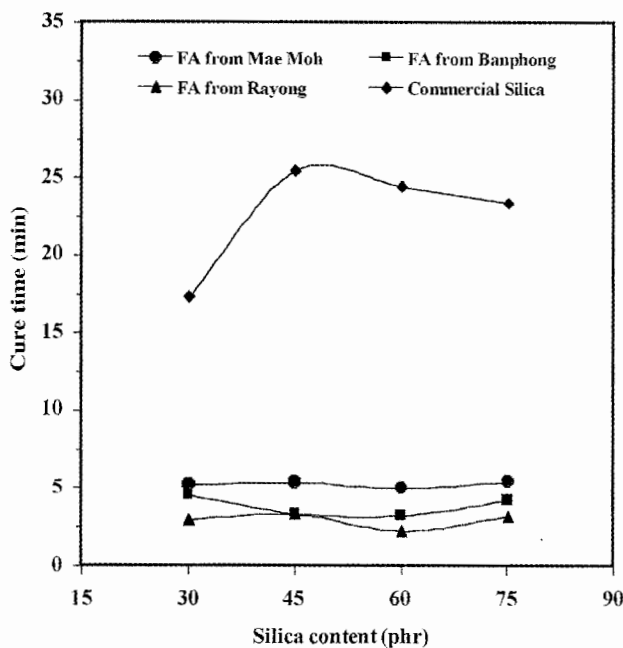
W_d คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนแช่โทลูอีน (กรัม)



- W_f คือ น้ำหนักของสารตัวเติมที่มีอยู่ในชิ้นงานทดสอบ (กรัม)
- W_t คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังแช่โหลอื่น (กรัม)
- V_s คือ ปริมาตรของโหลอื่นต่อ 1 โมล ซึ่งมีค่าเท่ากับ 106.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล
- χ คือ ค่าพารามิเตอร์อันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับโหลอื่น ซึ่งเป็นค่าคงเท่ากับ 0.3795
- η_{swell} คือ ความหนาแน่นพันธะข้าม (โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
- f คือ ฟังก์ชันของพันธะข้ามที่เป็นระบบการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์ ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 4

❑ ผลการทดลอง

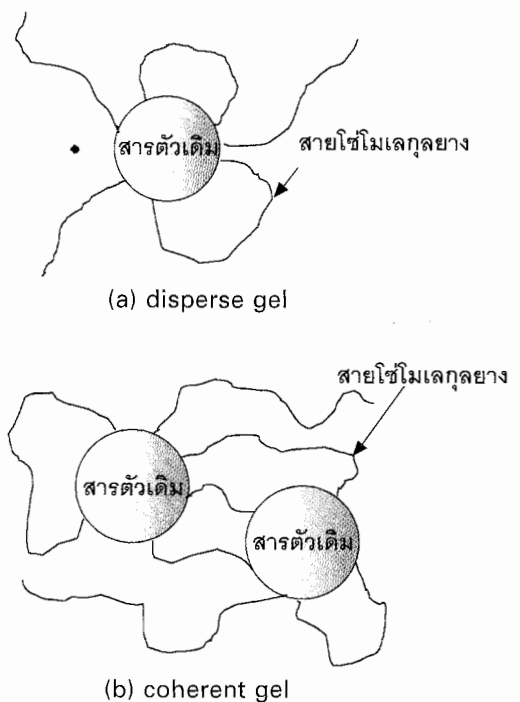
จากรูปที่ 2 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของแก้วลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อเวลาในการคงรูปยาง พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้าส่งผลให้เวลาในการคงรูปยางเปลี่ยนไปอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะในช่วงที่เติมปริมาณซิลิกา 30 - 45 phr ถึงแม้ว่าซิลิกาเกรดการค้านี้ผ่านการปรับปรุงผิวด้วย Si69 แล้วก็ตาม แต่เป็นการปรับปรุงผิวดังปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก (ประมาณ 0.6 phr) เพื่อสอดคล้องกับการปรับปรุงผิวแก้วลอย ซึ่งนับว่าใช้ปริมาณ Si69 น้อยมากสำหรับการปรับปรุงผิวซิลิกาเกรดการค้าในช่วงปริมาณ 30 - 75 phr จากรายงานของ ANSARIFAR และคณะ พบว่า



รูปที่ 2 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของแก้วลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อเวลาในการคงรูปยาง

เวลาในการคงรูปยางของยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้า 30 และ 60 phr ลดลงเมื่อทำการปรับปรุงผิวซิลิกาด้วย Si69 ด้วยปริมาณ 4 และ 7 phr ตามลำดับ นั้นหมายความว่า Si69 ช่วยลดการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคสารตัวเติม (filler-filler interaction) ให้อ่อนลงได้ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเป็นผลให้ของเวลาในการคงรูปยางนี้แสดงพฤติกรรมคล้ายกับยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้าแบบไม่ปรับปรุงผิว ดังงานวิจัยของ SOMBATSOMPOP และคณะ ซึ่งทำให้ยังคงส่งผลให้เกิดเป็นช่วงของการเพิ่มการก่อตัวของอนุภาคซิลิกาเกรดการค้า และส่งผลกระทบต่อระบบปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันด้วยกลไกที่เกิดขึ้นดังนี้

- การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคสารตัวเติม กล่าวคือ ซิลิกามีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวอยู่มาก จึงทำให้เกิดอันตรกิริยา (interaction) ที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจน จนทำให้เกิดการก่อตัวของสารตัวเติมในยางขึ้น ดังแสดงในแบบจำลอง รูปที่ 3 โดยรูปที่ 3 (a) เป็นการก่อตัวของอนุภาคสารตัวเติมในยางเป็นแบบกระจาย ซึ่งปลายสายโซ่โมเลกุลยางยึดเกาะบนผิวของอนุภาคสารตัวเติมเดียวกัน ที่เรียกว่า disperse gel ส่วนรูปที่ 3 (b) เป็นการก่อตัวของอนุภาคสารตัวเติมที่ปลายสายโซ่โมเลกุลยางสามารถยึดเกาะระหว่างอนุภาคสารตัวเติมทั้งสองไว้ ที่เรียกว่า coherent gel ดังนั้นในระบบนี้จึงทำให้การก่อตัวของอนุภาคซิลิกามีการก่อตัวแบบ coherent gel อีกทั้งยังอาจทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเองมากขึ้น ด้วยการก่อตัวเป็น bound rubber ในเนื้อยาง การเกาะกลุ่ม



รูปที่ 3 แบบจำลองการก่อตัวของสารตัวเติม

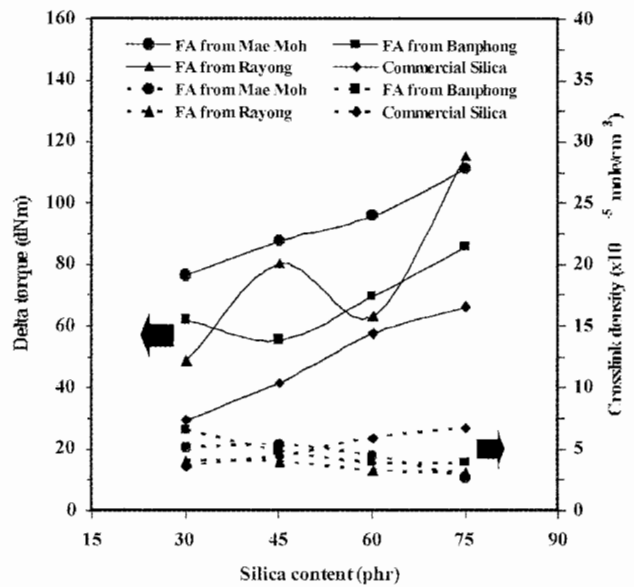


กันเองของซิลิกาที่อาจทำให้แสดงพฤติกรรมคล้ายกับป้องกัน
ยางที่จะไปเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชัน จึงเป็นผลให้เวลาในการ
คงรูปยางนานขึ้น

- การดูดซับสารเร่งตัวกระตุ้นบนผิวซิลิกา กล่าวคือ
สารเร่งตัวกระตุ้นถูกดูดซับโดยพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิล
บนผิวของซิลิกา ดังนั้น จึงทำให้เวลาในการคงรูปยางมากขึ้น

- การลดลงของการก่อตัวของสารประกอบเชิงซ้อน
ของซิงค์ กล่าวคือ โลหะออกไซด์ ในที่นี้คือ ซิงค์ออกไซด์ สามารถ
ก่อตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของซิงค์ในปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชัน
ลดลง เนื่องจากเป็นผลของซิลิกาแสดงอันตรกิริยากับซิงค์-
ออกไซด์ จึงเป็นผลให้ปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชันดำเนินไปช้าลง

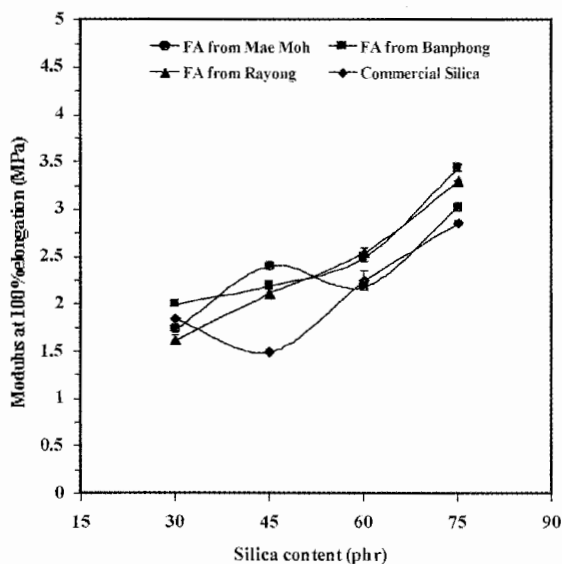
จากคำอธิบายข้างต้นนี้ คาดการณ์ได้ว่า การเติม
ซิลิกาของเก้าลอยน่าจะใช้เวลาในการคงรูปยางใกล้เคียงกับ
ซิลิกาเกรดการค้า และเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาของเก้าลอยน่าจะ
ทำให้เวลาในการคงรูปยางเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนเช่นกัน
แต่กลับพบว่า ปริมาณการเติมซิลิกาของเก้าลอยลงในยาง
ธรรมชาติไม่ทำให้เวลาในการคงรูปยางเปลี่ยนแปลงไป และ
การเติมซิลิกาของเก้าลอยลงในยางธรรมชาติยังใช้เวลาในการ
คงรูปยางน้อยกว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้าประมาณ 4 เท่า
ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกาของเก้าลอยเป็นสารเติมแต่งที่มีโลหะ
ออกไซด์มากพอ (Al₂O₃, CaO, MgO) ดังแสดงในตารางที่ 2
และน่าจะจะเป็นไปได้ว่าแสดงหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น และเร่งใน
ปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชัน อีกทั้งปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนผิว
ของเก้าลอยไม่หนาแน่นเหมือนกับซิลิกาเกรดการค้า จึงทำให้
กลไกที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซชันไม่เกิดอันตรกิริยา
ระหว่างอนุภาคกับอนุภาคสารตัวเติมเหมือนกับซิลิกาเกรดการค้า
แต่เป็นการก่อตัวของอนุภาคเก้าลอยที่กระจายแบบ disperse gel
ดังแสดงในแบบจำลองรูปที่ 3 (a) สิ่งที่น่าสนใจ คือ ยางธรรมชาติ
ที่มีซิลิกาของเก้าลอยนี้ใช้เวลาในการคงรูปยางน้อยกว่าซิลิกา
เกรดการค้า ซึ่งเป็นสิ่งที่มีประโยชน์ต่อกระบวนการผลิตผลิต-
ภัณฑ์ยางที่ลดเวลาในการผลิตได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยัง
สังเกตได้ว่า ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเก้าลอยจากแหล่ง
ต่างๆ ใช้เวลาในการคงรูปยางต่างกัน เนื่องจากเป็นผลของภาวะ
ความเป็นกรด - เบสของเก้าลอยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยารีดอกซ์ใน-
เซชันด้วย โดยทั่วไปภาวะที่สามารถทำให้ยางคงรูปได้เร็ว คือ
ภาวะที่เป็นเบส ซึ่งเก้าลอยจากแม่เมาะมีค่า pH เท่ากับ 9.5
เก้าลอยจากบ้านโป่ง และระยองมีค่า pH เท่ากับ 12 ดังนั้นจึง
ทำให้ยางธรรมชาติที่เติมเก้าลอยจากบ้านโป่ง และระยองใช้
เวลาในการคงรูปยางน้อยกว่าการเติมซิลิกาของเก้าลอยจาก
แม่เมาะ



รูปที่ 4 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเก้าลอยจากแหล่ง
ต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อค่าผลต่างแรงบิดจาก
เครื่อง ODR และความหนาแน่นพันธะข้าม

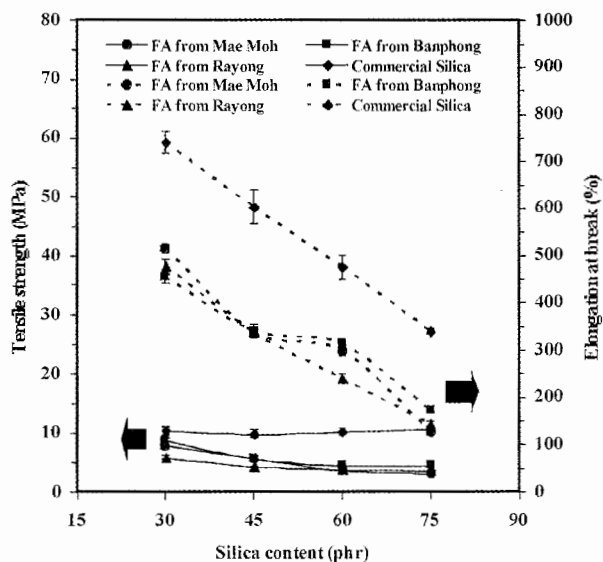
จากรูปที่ 4 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของ
เก้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อผลต่าง
แรงบิด (delta torque) จากเครื่อง ODR และความหนาแน่น
พันธะข้าม พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น
ทำให้ผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด
เนื่องจากการเติมซิลิกาซึ่งมีความแข็งแกร่งลงในยางธรรมชาติ
จึงทำให้สมบัติของยางโดยรวมมีความแข็งแกร่งเพิ่มขึ้น และ
คาดการณ์ได้น่าจะเป็นผลจากความหนาแน่นพันธะข้ามด้วย
โดยทั่วไปผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR นั้นเป็นความสัมพันธ์
โดยตรงกับความหนาแน่นพันธะข้ามที่ถูกรวมเข้าด้วยกัน ทั้ง
การเกิดพันธะข้ามระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์สาย และ การเกิด
อันตรกิริยาระหว่างสายกับอนุภาคสารตัวเติม แต่ผลการทดลอง
กลับไม่เป็นเช่นนั้น กล่าวคือ การเติมซิลิกาเกรดการค้าในยาง
ธรรมชาติ มากขึ้นทำให้ความหนาแน่นพันธะข้ามมากขึ้น แสดง
ให้เห็นว่าเป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายกับอนุภาค
สารตัวเติม เพิ่มมากขึ้น ส่วนการเติมซิลิกาของเก้าลอยในยาง
ธรรมชาติทำให้ความหนาแน่นพันธะข้ามมีแนวโน้มลดลง แสดง
ว่าเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายกับอนุภาคสารตัวเติมน้อยลง
นอกจากนี้ ยังสังเกตสังเกตได้ว่า ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของ
เก้าลอยจากทั้ง 3 แหล่ง ผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR มาก
กว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้า ทั้งนี้เป็นผลกระทบจากปริมาณ
สารตัวเติม ที่มีอิทธิพลมากกว่าความหนาแน่นพันธะข้าม
กล่าวคือ ณ ปริมาณซิลิกาเดียวกันต้องเติมซิลิกาของเก้าลอย
ด้วยปริมาณสารตัวเติมที่มากกว่าซิลิกาเกรดการค้าถึง 3 เท่า จึง

ทำให้ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยสามารถแสดงผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR สูงกว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้า โดยเฉพาะเถ้าลอยจากแม่เมาะให้ผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR สูงกว่าเถ้าลอยจากบ้านโป่ง และระยอง คาดว่าน่าจะเป็นผลของความแตกต่างของรูปร่างอนุภาคเถ้าลอยจากแม่เมาะที่ค่อนข้างกลม แต่เถ้าลอยจากบ้านโป่ง และระยองมีรูปร่างไม่แน่นอน ดังรูปที่ 1 ข้างต้น



รูปที่ 5 แสดงผลกระทบบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100%

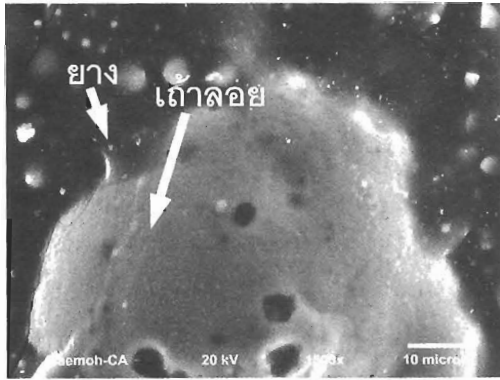
สำหรับสมบัติการทนแรงดึงด้านผลกระทบบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100% ในรูปที่ 5 พบว่า โดยภาพรวมค่ามอดูลัสของยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอย และซิลิกาเกรดการค้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาเป็นลำดับ โดยกลไกของการเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสที่มีการเติมสารตัวเติมทั้งสองชนิดนี้มีปัจจัยหลักๆ ที่เป็นผลจากความแข็งแรงของยางโดยรวม ซึ่งสอดคล้องกับผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR ข้างต้น นอกจากนี้ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยยังให้ค่ามอดูลัสเทียบเท่ากับซิลิกาเกรดการค้าตลอดช่วง 30 - 75 phr โดยมีค่าประมาณ 1 - 3 MPa ถึงแม้ว่ากลไกในการก่อตัวซิลิกาของเถ้าลอยในยางธรรมชาติต่างกับซิลิกาเกรดการค้าก็ตาม แต่เนื่องจากเป็นผลกระทบบจากปริมาณสารตัวเติมที่มีอิทธิพลมากกว่าความหนาแน่นพันธะข้าม ดังที่กล่าวในผลต่างแรงบิดจากเครื่อง ODR จึงทำให้ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่งมีค่ามอดูลัสเทียบเท่าการเติมซิลิกาเกรดการค้า



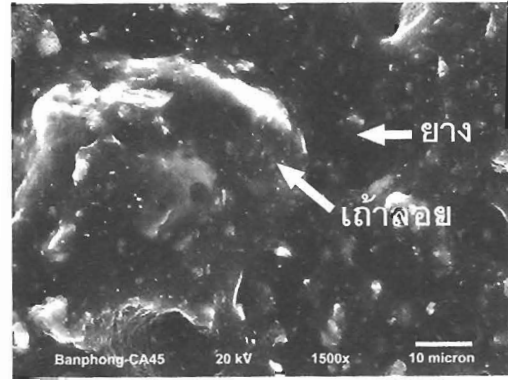
รูปที่ 6 แสดงผลกระทบบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อค่าทนแรงดึง และ % ยืดตัว ณ จุดขาด

จากรูปที่ 6 แสดงผลกระทบบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อค่าทนแรงดึง และ % การยืดตัว ณ จุดขาด พบว่า โดยภาพรวมของยางธรรมชาติที่เติมปริมาณซิลิกามากขึ้นไม่ทำให้ค่าทนแรงดึงเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเป็นกลไกที่สมดุลระหว่างอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคสารตัวเติม และอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคสารตัวเติม กล่าวคือ จากงานวิจัยของ SOM-BATSOMPOP เมื่อเติมปริมาณซิลิกาทั้งซิลิกาเกรดการค้า และซิลิกาของเถ้าลอย ส่งผลให้ค่าทนแรงดึงลดลง เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติมน้อยมาก แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงผิวซิลิกาทั้งสองชนิดด้วย Si69 จึงทำให้ค่าทนแรงดึงเพิ่มขึ้นจากเดิม นั่นหมายความว่า เป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคของสารตัวเติมที่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลความหนาแน่นพันธะข้าม สำหรับยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยทั้ง 3 แหล่ง นั่นทำให้ค่าทนแรงดึงเพิ่มขึ้นจากที่ไม่ปรับปรุงผิวเถ้าลอย แต่ไม่เพิ่มขึ้นมากเหมือนกับซิลิกาเกรดการค้า อาจเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลบนผิวของอนุภาคเถ้าลอยไม่หนาแน่นเหมือนกับซิลิกาเกรดการค้า จึงทำให้ตำแหน่งที่สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติมบนผิวของเถ้าลอยที่ปรับปรุงผิวได้น้อยกว่าบนผิวของซิลิกาเกรดการค้า ซึ่งสอดคล้องกับผลความหนาแน่นพันธะข้ามเช่นกัน ดังนั้นจึงทำให้ค่าทนแรงดึงโดยรวมของยางธรรมชาติ ที่เติมซิลิกาเกรดการค้ามากกว่าซิลิกาของเถ้าลอยอย่างเห็นได้ชัดตลอดช่วงปริมาณซิลิกา 30 - 75 phr ด้วยและคาดว่าผลของตำแหน่งที่สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่าง

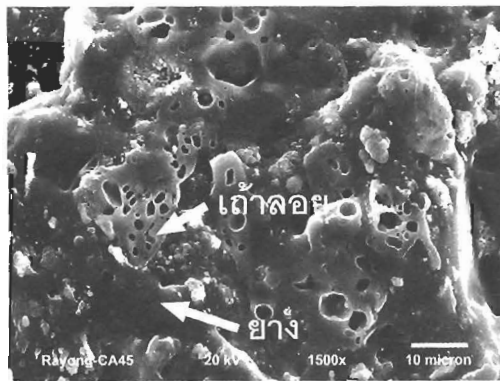




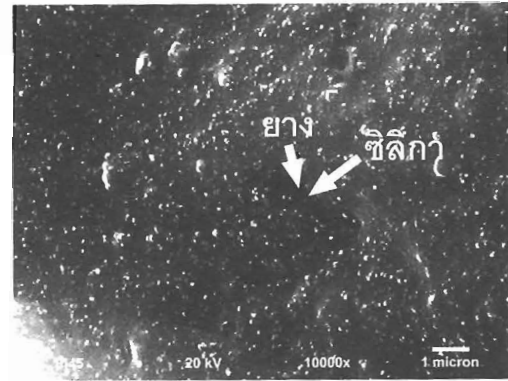
(a) ยางธรรมชาติกับเถ้าลอยจากแม่เมาะ กำลังขยาย 1500 เท่า



(b) ยางธรรมชาติกับเถ้าลอยจากบ้านโป่ง กำลังขยาย 1500 เท่า



(c) ยางธรรมชาติกับเถ้าลอยจากระยอง กำลังขยาย 1500 เท่า



(d) ยางธรรมชาติกับซิลิกาเกรดการค้า กำลังขยาย 10000 เท่า

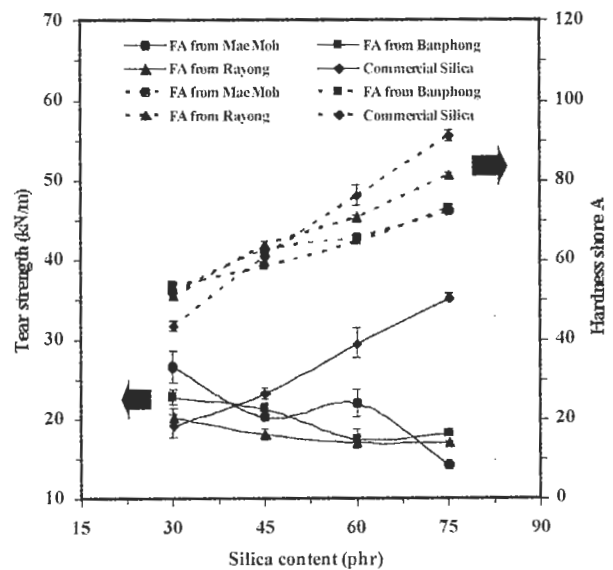
รูปที่ 7 ภาพแสดงความต่อเนื่องของเฟสระหว่างยางธรรมชาติกับสารตัวเติม

ยางกับอนุภาคสารตัวเติมของซิลิกาเกรดการค้ามากกว่าซิลิกาของเถ้าลอยทำให้ % ยึดตัว ณ จุดขาดมากกว่าด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเติมปริมาณซิลิกาทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ทำให้ % การยึดตัว ณ จุดขาดลดลง

จากความแตกต่างของค่าทนแรงดึงระหว่างการเติมซิลิกาของเถ้าลอยและเกรดการค้าในยางธรรมชาติช่วงปริมาณ 30 - 75 phr ยังสามารถอธิบายได้จากภาพ SEM บริเวณพื้นผิวรอยขาด ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า ยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยมีการยึดเกาะระหว่างเฟสยางธรรมชาติกับเถ้าลอยที่ไม่ดีเหมือนกับยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้า เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอยมีขนาดใหญ่กว่าซิลิกาเกรดการค้ามาก ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวยึดเกาะกับเนื้อยาง และความต่อเนื่องของเฟสยางในการรับแรงน้อยกว่า นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่ารูปร่างของอนุภาคเถ้าลอยที่ต่างกันไม่ส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องของเฟสยางในการรับแรงที่ให้ค่าทนแรงดึงใกล้เคียงกัน

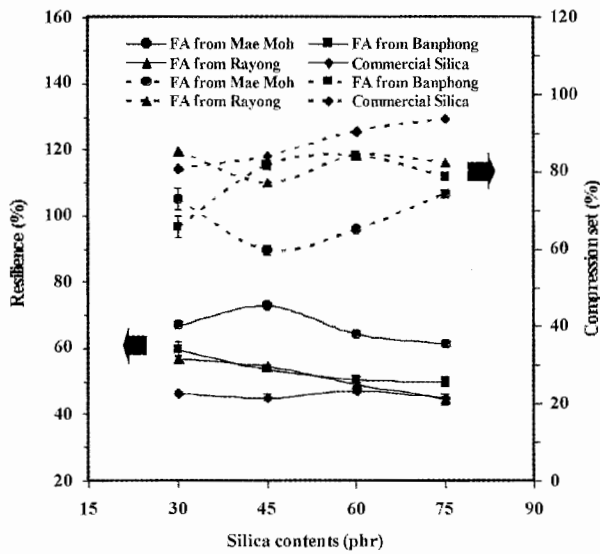
สำหรับผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อความทนแรงฉีกขาดและความแข็ง ในรูปที่ 8 พบว่า โดยภาพรวมค่าทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยมีแนวโน้มลดลงตาม

การเพิ่มปริมาณเถ้าลอยเป็นลำดับ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่าทนแรงดึงข้างต้น แต่ยางธรรมชาติที่เติมปริมาณซิลิกาเกรด



รูปที่ 8 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อค่าทนแรงฉีกขาด และค่าความแข็ง

การค้ำขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าทนแรงฉีกขาดตาปริมาตรซิลิกาเกรดการค้ำอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเป็นผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติม และยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้ำยังมีค่าทนแรงฉีกขาดสูงกว่าการเติมซิลิกาของเถ้าลอยที่คาดว่าเป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติมที่มากกว่าการเติมซิลิกาของเถ้าลอย ส่วนค่าความแข็ง พบว่า เมื่อเติมปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นผลของความแข็งแกร่งของยางโดยรวม ซึ่งสอดคล้องกับผลมอดูลัส ณ การยืดตัว 100% นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่ายางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้ำมีค่าความแข็งมากกว่าการเติมซิลิกาของเถ้าลอย เนื่องจากเป็นผลรวมของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคสารตัวเติม และอันตรกิริยาระหว่างยางกับอนุภาคสารตัวเติมที่มากกว่า สำหรับยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ นั้นไม่ส่งผลต่อค่าทนแรงฉีกขาด และความแข็งที่ต่างกัน

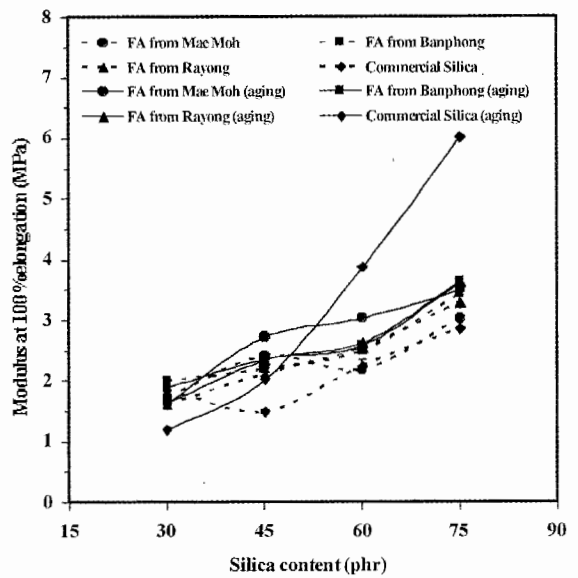


รูปที่ 9 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้ำที่มีต่อ % การกระดอน และ % ยุบตัวถาวร

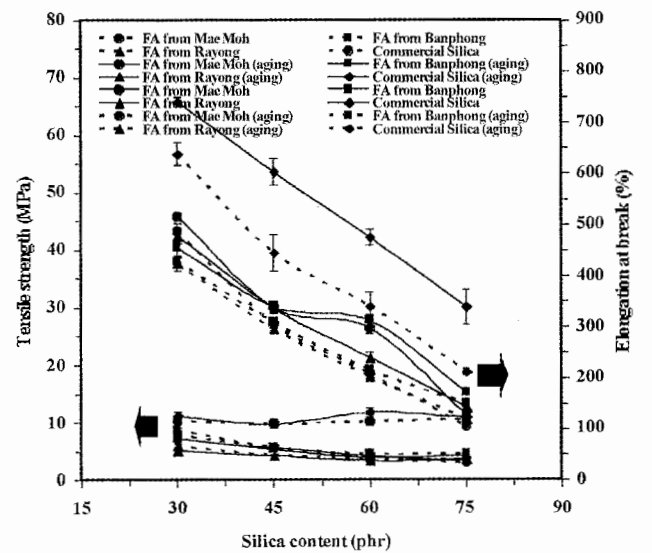
จากรูปที่ 9 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้ำที่มีต่อ % การกระดอน และ % ยุบตัวถาวร ซึ่งเป็นสมบัติที่แสดงพฤติกรรมความเป็นอีลาสติกของยาง พบว่า เมื่อเติมปริมาณซิลิกามากขึ้น ยางธรรมชาติสูญเสียความเป็นอีลาสติกลดลงเป็นลำดับ เนื่องจากสัดส่วนของความเป็นอีลาสติกของยางลดลง อย่างไรก็ตามสังเกตได้ว่า ยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยทั้ง 3 แหล่งยังคงรักษาพฤติกรรมความเป็นอีลาสติกที่ดีกว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้ำ ทั้งๆ ที่ ณ ปริมาณซิลิกาเดียวกันต้องเติมซิลิกาของเถ้าลอยด้วยปริมาณสารตัวเติมที่มากกว่าซิลิกาเกรดการค้ำ

เกือบ 3 เท่า แต่กลับสามารถแสดงพฤติกรรมความเป็นอีลาสติกของยางได้ดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยจากแม่เมาะยังแสดงพฤติกรรมความเป็นอีลาสติกดีกว่าเถ้าลอยจากบ้านโป่ง และระยอง ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลของความแตกต่างของรูปร่างอนุภาคเถ้าลอย นับว่าเป็นสมบัติของยางที่น่าสนใจมากของการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติ

จากรูปที่ 10 - 12 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้ำที่มีต่อสมบัติ

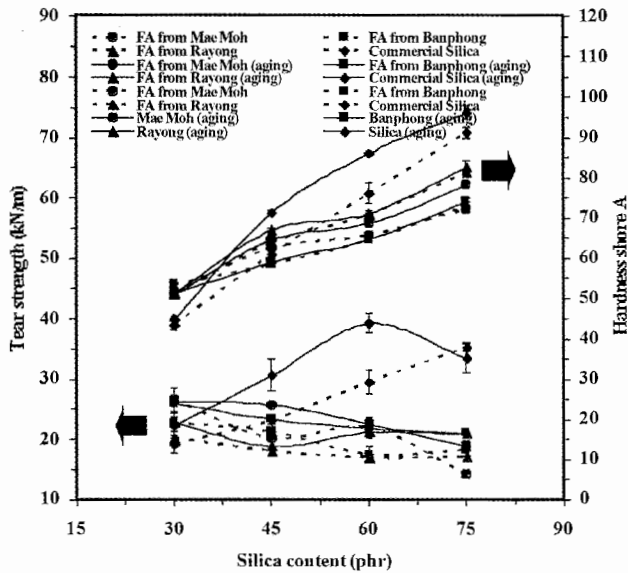


รูปที่ 10 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้ำที่มีต่อค่ามอดูลัส ณ การยืดตัว 100% หลังปมด้วยความร้อน

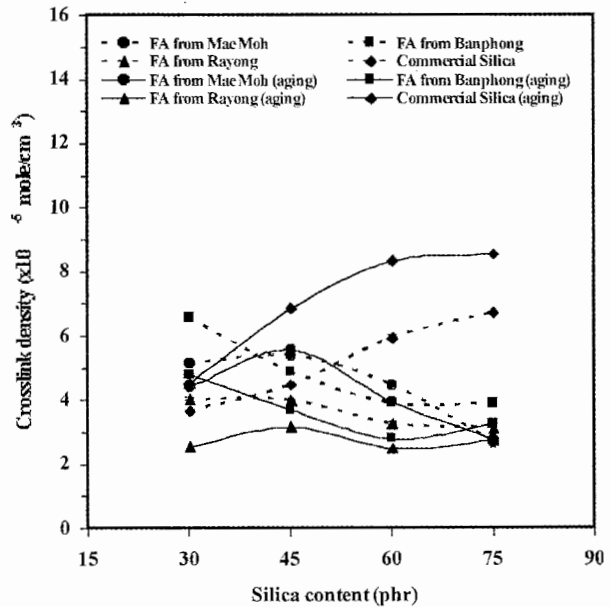


รูปที่ 11 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้ำที่มีต่อค่าทนแรงดึง และ % ยืดตัว ณ จุดขาดหลังปมด้วยความร้อน





รูปที่ 12 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อค่าทนแรงฉีกขาด และค่าความแข็งหลังบ่มด้วยความร้อน



รูปที่ 13 แสดงผลกระทบของปริมาณซิลิกาของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ กับซิลิกาเกรดการค้าที่มีต่อความหนาแน่นพันธะข้ามหลังบ่มด้วยความร้อน

ทางกลด้านทนแรงดึง ทนแรงฉีกขาด และค่าความแข็ง หลังผ่านการบ่มด้วยความร้อน (heat aging) พบว่า โดยภาพรวมสมบัติทางกลหลังผ่านการบ่มด้วยความร้อนของยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาเกรดการค้าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่สมบัติทางกลหลังผ่านการบ่มด้วยความร้อนของยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่ง ไม่เปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นพันธะข้าม ดังในรูปที่ 13

□ สรุปผลการทดลอง

การนำซิลิกาของเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่งของประเทศ-ไทยมาใช้เป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาตินั้นช่วยลดพลังงานในการผสม และขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เมื่อเทียบกับการใช้ซิลิกาเกรดการค้า โดยยางธรรมชาติที่เติมเถ้าลอยจากแม่เมาะใช้เวลาในการคงรูปยางมากกว่าการเติมเถ้าลอยจากบ้านโป่งและระยองเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามสามารถใช้ซิลิกาของเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่ง ทดแทนซิลิกาเกรดการค้าได้ในปริมาณ 30 phr ซึ่งให้สมบัติทางกลด้านทนแรงดึง ทนแรงฉีกขาด และค่าความแข็งเทียบเท่ากัน นอกจากนี้การใช้ซิลิกาของเถ้าลอย

จากทั้ง 3 แหล่ง เป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาตินั้นยังรักษาสมบัติความเป็นอีลาสติกของยางดีกว่ซิลิกาเกรดการค้า โดยเฉพาะเถ้าลอยจากแม่เมาะที่ให้สมบัติความเป็นอีลาสติกดีกว่าการเติมเถ้าลอยจากบ้านโป่งและระยอง ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากความแตกต่างของรูปร่างอนุภาคเถ้าลอย นับว่าเป็นสมบัติของยางที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก และยางธรรมชาติที่เติมซิลิกาของเถ้าลอยจากทั้ง 3 แหล่ง ยังคงรักษาสมบัติทางกลหลังผ่านการบ่มความร้อนไว้ได้เป็นอย่างดี

■ กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรม 5 สัญญาเลขที่ RDG4650038 และทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สัญญาเลขที่ PHD-0285/2545 สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ ตลอดจนบริษัทที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบในงานวิจัยมีดังนี้ บริษัท ทอริส-ปอซซิลาสต์ จำกัด บริษัท JJ-DEGUSSA (THAILAND) จำกัด บริษัท PPG-SIAM SILICA จำกัด บริษัท อูทิคอนเทอร์ไพรส์ จำกัด



■ เอกสารอ้างอิง

- มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์ (2545), "รางวัลนักเทคโนโลยีดีเด่น ปี 2545".
- ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จีงเกษมโชคชัย และ วราภรณ์ คุณวานากิจ (2542), *วารสาร กฟผ.*, การไฟฟ้าฝ่ายผลิต, 8: 13 - 23.
- S. Sen and N. Nugay (2000), *Journal of Applied Polymer Science*, 77: 1128 - 1136.
- S. Guhanathan, M. Saroja Devi and V. Murugesan (2001), *Journal of Applied Polymer Science*, 82: 1755 - 1760.
- S. Guhanathan and M. Saroja Devi (2002), *Polymer International*, 51: 289-296.
- ณัฐวรรณ ต้านวิวัฒน์พร, รัชส์านู ชูทอง และ อภิญา ดวงจันทร์ (2543), *การประชุมวิชาการ วิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์ แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10*, หน้า 430 - 436.
- N.A.N. Alkadasi, D.G. Hundiwale, and U.R. Kapadi (2004), *Journal of Applied Polymer Science*, 91: 1322 - 1328.
- S. Mishra, S. H. Sonawane, N. Badgujar, K. Gurav, and D. Patil (2005), *Journal of Applied Polymer Science*, 96: 6 - 9.
- W. J. McGill Garde and C. D. Woolard (1999), *Plastics Rubber and Composites*, 28: 1 - 10.
- N. Sombatsompop, S. Thongsang, T. Markpin, and E. Wimolmala (2004), *Journal of Applied Polymer Science*, 93, 2119 - 2130.
- S. Thongsang, and N. Sombatsompop (2005), *The Society of Plastics Engineers: Annual Technical Conference (SPE ANTEC 2005)*, May 1-5, Hynes Convention Center, Boston, Massachusetts, USA., 51: 2248 - 2252.
- S. Thongsang, and N. Sombatsompop (2006), *Polymer Composites*, 27: 30 - 40.
- N. Sombatsompop, C. Kantala, and E. Wimolmala (2006), *Polymers & Polymer Composites* (accepted).
- M. A. Ansarifar, and R. Nijhawan (2000), *Journal of Rubber Research*, 3: 169 - 184.
- C. Lewis, R. Buanpa, and S. Kiatkamjornwong (2003), *Journal of Applied Polymer Science*, 90: 3059 - 3068.

