



การพัฒนาพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์
ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่งเพื่อขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โอริง
Materials Development of NR-NBR Blends Containing
Fly Ash Particles as Filler for O-ring Products

นรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ เอกชัย วิมลมาลา และ เชชวาลย์ กันทะลา
Narongrit Sombatsompop Ekachai Wimolmala and Chatchawan Kantala

กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF)
สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.) บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, Division of Material Technology, School of Energy,
Environment and Material, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Bangmod,
Toongkru, Bangkok 10140 Corresponding e-mail: narongrit.som@kmutt.ac.th



บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการพัฒนาวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่งเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทนน้ำมันไฮดรอลิก โดยศึกษาหาความเป็นไปได้ของการนำเถ้าลอยที่เป็นวัสดุเหลือใช้ที่มีปริมาณมากในประเทศไทยมาเป็นสารเติมแต่งในวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ ได้มีการศึกษาและพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ยางโอริงปริมาณของซิลิกาจากเถ้าลอยและทำการเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้าที่เติมในพอลิเมอร์ผสม และทำการปรับปรุงผิวของเถ้าลอยและซิลิกาเกรดการค้า ด้วยสารคู่ควบไซเลน คือ บิส-(3-ไตรเอทอกซีไซลิลโพรพิล) เตตระซัลเฟน (Si69) เพื่อเพิ่มการยึดเกาะระหว่างสารเติมแต่งกับพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการคงรูปยาง สมบัติเชิงกล สมบัติการทนต่อน้ำมัน สมบัติยวบยวถาวรหลังได้รับแรงอัด และสมบัติหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อน ผลการวิจัยโดยรวมพบว่า การเติมซิลิกาจากเถ้าลอย 15 ส่วนในยางหนึ่งร้อยส่วน และซิลิกาเกรดการค้า 30 ส่วนในยางหนึ่งร้อยส่วน ควบคู่กับผงเถ้าลอยในพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ 20:80 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด ทางบริษัท คอมพาวด์โปรเฟสชั่นแนล จำกัด ซึ่งเป็นผู้ร่วมทุนวิจัย เลือกสูตรสารประกอบยาง เอ็นบีอาร์บริสุทธิ์ และสูตรพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ 20:80 ในการนำไปผลิตเชิงพาณิชย์ เพราะให้สมบัติเชิงกล และทนต่อน้ำมันโดยรวมใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์โอริงที่กำหนดอยู่ในท้องตลาด ผู้ประกอบการที่ร่วมทุนวิจัยใช้สูตรสารประกอบยางเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์และสูตรสารประกอบยางผสมในการผลิตผลิตภัณฑ์โอริง

คำสำคัญ : โอริง, ยางธรรมชาติ, ยางเอ็นบีอาร์, ยางผสม, ซิลิกา



Abstract

The research was to develop NR/NBR blend filled with fly ash particles and commercial precipitated silica used as potential fillers for oil-resistant O-ring in hydraulic applications. The precipitated and fly ash particles used were chemically treated to improve the properties of the filled rubber blend using Bis-(3-triethoxysilyl propyl) tetrasulfan (Si69) coupling agent. The properties of the NR/NBR blend with the fillers were evaluated by varying silica and fly ash contents. The vulcanized rubbers were evaluated in terms of cure characteristics, mechanical properties, oil-resistant properties, compression set, and the effect of thermal aging. The findings in this work suggested that NR:NBR of 20:80 was found to give optimum mechanical properties of the vulcanized products. NR:NBR of 20:80 with 30 phr precipitated silica or 15 phr silica in fly ash particles under Si69 treatment of 4%wt gave the most satisfactory mechanical properties. Compound Professionals Co., Ltd has chosen two rubber formulations for their commercial use.

these being 100%NBR compound and NR:NBR of 20:80, as the properties of these two selected formulations gave similar properties to the commercially available O-rings.


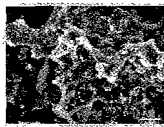
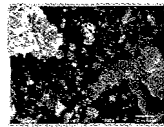
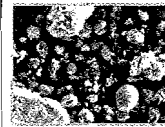
Keywords : O-ring, Natural Rubber, Nitrile Rubber, Rubber Blend, Silica

 **คำนำ**

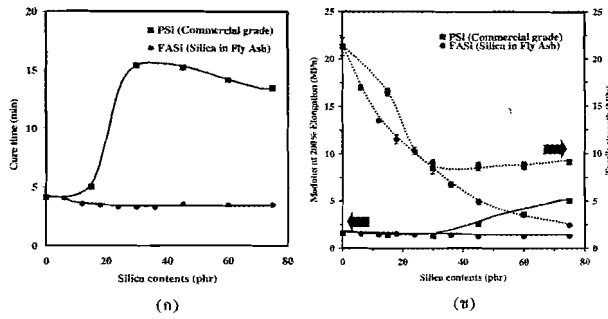
จากรายงานวิจัยหัวข้อ “สภาวะการผลิตและสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่มีถั่วลอมเป็นสารเติมแต่ง” ของ ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ และ นางสาวศิรินทร ทองแสง (คณะวิจัยฯ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์: (P-PROF) คณะพลังงานและวัสดุ มจร.) ซึ่งได้รับทุนจาก สกว. และเป็นโครงการวิจัยในระยะแรกที่ได้ทำการศึกษาถึงแนวทางการนำถั่วลอมที่มีในประเทศไทยมาใช้เป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติ และหาวิธีการปรับปรุงผิวถั่วลอมที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานยางธรรมชาติที่มีถั่วลอมเป็นสารเติมแต่งได้มากขึ้น โดยมีการเปรียบเทียบกับสารเติมแต่งเกรดการค้าคือ ซิลิกา ในงานวิจัยพบว่าถั่วลอมแต่ละแหล่งที่มีอยู่ในประเทศไทยนั้นมีคุณลักษณะที่ค่อนข้างแตกต่างกันมากทั้งส่วนประกอบทางเคมี รูปร่าง ขนาด รวมไปถึงความเป็นกรด-เบส ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งความแตกต่างของคุณลักษณะถั่วลอมจากแต่ละแหล่งทำให้มีผลกระทบต่อกระบวนการวัลคาไนเซชันของยางเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะความเป็นกรด-เบส จากตารางที่ 1 สังเกตได้ว่า ถั่วลอมจาก จ.ระยอง ที่นำมาศึกษาทั้งสองครั้งมีคุณลักษณะที่ต่างกันทั้งๆ ที่เป็นการเผาถั่วลอมชนิดเดียวกัน ซึ่งเป็นผลของอุณหภูมิของการเผาถั่วลอมและความละเอียดของถั่วลอมนั้นๆ ด้วย จึงทำให้ตัวอย่างถั่วลอมจาก จ.ระยอง ที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งแรกที่มีความเป็นกรด ไม่สามารถทำให้ยางธรรมชาติเกิดการวัลคาไนเซชันได้อย่างสมบูรณ์ นั้นแสดงให้เห็นว่าในการนำถั่วลอมในประเทศไทยมาผสมในยางธรรมชาติจำเป็นต้องมีการเลือกถั่วลอมที่มีคุณลักษณะเหมาะสมเท่านั้น และเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีถั่วลอมเป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติ จึงต้องมีกระบวนการวิเคราะห์คุณลักษณะของถั่วลอมก่อนนำมาใช้งานด้วย

จากผลงานวิจัยดังในรูปที่ 1 และ 2 พบว่า สามารถนำถั่วลอมจากแม่เมาะ แบบไม่ปรับปรุงผิวเติมลงในยางธรรมชาติได้ถึงปริมาณถั่วลอมที่มีซิลิกา 30 phr (FASi30 : ปริมาณถั่วลอมที่มีซิลิกา 30 phr) ที่ทำให้สมบัติการคงรูปของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติดีกว่าการใช้ซิลิกาเกรดการค้าทั่วไป และสมบัติทางกลโดยรวมก็เปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า มีผลทำให้สมบัติทางกลโดยรวมใกล้เคียงกับซิลิกาเกรดการค้า และการเติมถั่วลอมยังมีผลทำให้เวลาในการคงรูปของยางธรรมชาติน้อยกว่าซิลิกาเกรดการค้า ซึ่งส่งผลทำให้มีอัตราการผลิตสูง และใช้พลังงานน้อยกว่าซิลิกาเกรดการค้า ซึ่งส่งผลดีต่อภาคอุตสาหกรรม

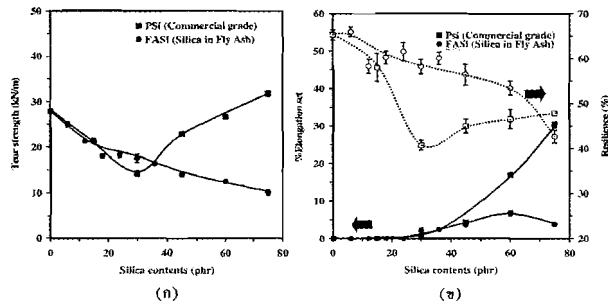
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณลักษณะถั่วลอมจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย

คุณลักษณะของถั่วลอม	แหล่งของถั่วลอม			
	แม่เมาะ	บ้านโป่ง	ระยอง	
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
ปริมาณซิลิกา (%)	35.05	35.19	44.26	27.47
รูปร่างถั่วลอม				
ความถ่วงจำเพาะ	2.093	2.571	2.183	-*
ช่วงขนาดถั่วลอมที่มีมากกว่า 80% (µm)	<125	<125	<75	<75
ความเป็นกรด-เบส	เบส	เบส	กรด	เบส

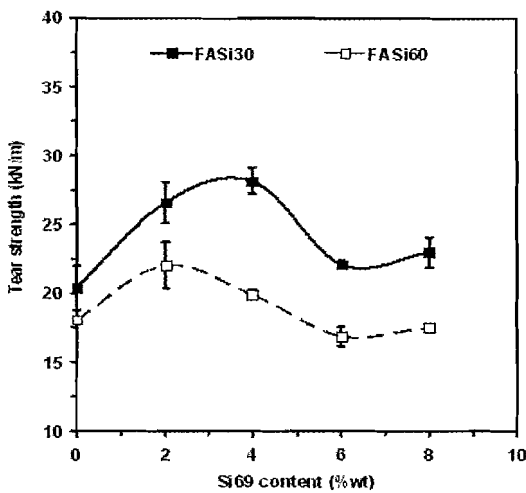
หมายเหตุ *ไม่ได้ทำการทดลอง



รูปที่ 1 ก) การเปรียบเทียบระหว่างการเติมเถ้าลอยกับซิลิกาเกรดการค้าในยางธรรมชาติที่มีผลต่อเวลาในการคงรูปยาง ข) การเปรียบเทียบระหว่างการเติมเถ้าลอยกับซิลิกาเกรดการค้าในยางธรรมชาติที่มีผลต่อค่าความแข็งแรง ณ การยืดตัว 200 เปอร์เซ็นต์ และค่าความทนแรงดึง



รูปที่ 2 ก) การเปรียบเทียบระหว่างการเติมเถ้าลอยกับซิลิกาเกรดการค้าในยางธรรมชาติที่มีผลต่อค่าความทนแรงฉีกขาด ข) การเปรียบเทียบระหว่างการเติมเถ้าลอยกับซิลิกาเกรดการค้าในยางธรรมชาติที่มีผลต่อการยืดตัวถาวร และการกระด้างตัว



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณสารคู่ควบซิลิโคน Si69 ในยางธรรมชาติที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่งที่มีต่อค่าความทนแรงฉีกขาด

นอกจากนี้การใช้ซิลิกาจากเถ้าลอยยังมีข้อเด่นเหนือกว่าการใช้ซิลิกาเกรดการค้า คือ เถ้าลอยสามารถผสมเข้าในเนื้อยางได้ดี สามารถถอดขึ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย และราคาต้นทุนทางการผลิตต่ำกว่า ในด้านต้นทุนการผลิต สูตรยางที่มี

การใช้ซิลิกาจากเถ้าลอยสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 28 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยในระยะแรกยังสามารถเติมเถ้าลอยในปริมาณที่มีซิลิกาได้สูงถึง 60 phr อีกด้วย เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิตมากขึ้น แต่เนื่องจากสมบัติทางกลโดยรวมด้อยกว่าซิลิกาเกรดการค้า (ในปริมาณซิลิกาในเถ้าลอยที่สูงกว่า 30 phr) จึงนำไปสู่การปรับปรุงเถ้าลอย ซึ่งพบว่า การปรับปรุงเถ้าลอยที่เหมาะสมคือ การนำเถ้าลอยผ่านการรีฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ จากนั้นเคลือบด้วยสารคู่ควบซิลิโคน Si69 ทำให้สมบัติของยางธรรมชาติดีขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เถ้าลอยที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงผิวทางเคมี รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของสารคู่ควบที่มีต่อสมบัติการทนต่อแรงฉีกขาดของสารประกอบยางธรรมชาติที่มีเถ้าลอยเป็นสารเติมแต่ง พบว่าปริมาณสารคู่ควบซิลิโคน Si69 ที่ 2-4 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักเถ้าลอยเป็นปริมาณที่เหมาะสม

จากงานวิจัยที่ผ่านมาที่แสดงผลการวิจัยบางส่วนในรูปที่ 1-3 ทางคณะวิจัย เห็นว่า การนำเถ้าลอยมาใช้เป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมยางเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีข้อดีดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยเฉพาะความสามารถในการรับแรง การคืนตัวกลับของยางหลังได้รับแรงยืด การกระด้างตัวของยางที่แสดงถึงสมบัติความเป็นอีลาสติคที่ดี คณะวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติกับเถ้าลอยให้ต่อเนื่อง เพื่อใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางกันรั่วหรือเป็นผลิตภัณฑ์โอริง แต่เนื่องจากการนำผลิตภัณฑ์โอริงไปใช้งานจะต้องมีการสัมผัสกับน้ำมัน ดังนั้น จึงได้เลือกยางเอ็นบีอาร์ (NBR: Nitrile Rubber) มาใช้เป็นพอลิเมอร์กับยางธรรมชาติ (NR: Natural Rubber) เนื่องจากเป็นยางเอ็นบีอาร์ที่มีสมบัติความทนต่อน้ำมันดังได้แสดงการเปรียบเทียบสมบัติระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ไว้ใน ตารางที่ 2 (พรพรรณ, 2540, [Http://www.ayt-rubber.com/material.html](http://www.ayt-rubber.com/material.html), 2005 และ [Http://www.amesindustrial.com/material-properties.htm](http://www.amesindustrial.com/material-properties.htm), 2005)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์

สมบัติ	ยางธรรมชาติ	ยางเอ็นบีอาร์
แพ็คเกจด้านราคา	ถูก	แพง
ความหนาแน่นของยาง	0.92	0.98
การทนน้ำมันปิโตรเลียม, น้ำมันพืช, น้ำมันสัตว์	ไม่ดี	ดีเยี่ยม
ความทนต่อตัวทำละลายประเภทอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน	ไม่ดี	ดีเยี่ยม
อุณหภูมิการใช้งาน (°C)	75-105	100-130
ความทนทานต่อโอโซน	ไม่ดี	พอใช้
ความทนทานต่อการออกซิเดชัน	พอใช้	ดี
ความแข็ง (Shore A)	30-95	40-100

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ (ต่อ)

สมบัติ	ยางธรรมชาติ	ยางเอ็นบีอาร์
ความต้านทานต่อการฉีกขาดและการขีดข่วน	ดีเยี่ยม	ดี
ความต้านแรงดึง	ดีเยี่ยม	ดี
การกระเดิงตัว	ดีเยี่ยม	ดี
การคืนตัวเมื่อได้รับแรงอัด	ดี	ดี
สมบัติความเป็นฉนวนไฟฟ้า	ดีเยี่ยม	ไม่ดี

หากพิจารณาสมบัติของยางทั้งสองชนิดข้างต้น สังเกตได้ว่า ยางทั้งสองชนิดมีทั้งข้อดีข้อเสียต่างกันไป กล่าวคือ ยางธรรมชาติมีสมบัติเด่นทางด้านความแข็งแรง ส่วนยางเอ็นบีอาร์มีสมบัติเด่นทางด้านความทนต่อน้ำมัน ดังนั้นจึงทำการผสมยางผลระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์เพื่อเป็นการรวมสมบัติเด่นทั้งสองเข้าด้วยกัน โดยอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่มีการนำพอลิเมอร์ผสมนี้ไปใช้คือ ชิ้นส่วนต่างๆ ที่ใช้ในเครื่องจักรกล เช่น ไอรัง ปะเก็นยาง ซีล ซึ่งต้องทนต่อน้ำมัน และมีความต้านแรงดึงด้วย ดังนั้น จึงเลือกใช้ยางธรรมชาติมาทำพอลิเมอร์ผสมร่วมกับยางเอ็นบีอาร์อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนการผลิตด้วยเนื่องจากยางธรรมชาติผลิตในประเทศและมีราคาถูกกว่า (Mathai, A.E., Singh, R.R. and Thomas, S, 2002) ซึ่งจะช่วยทำให้ความหลากหลายของการเลือกพอลิเมอร์ผสมนี้ไปใช้งานในอุตสาหกรรมมากขึ้น นอกจากนี้แล้วการเสริมแรงด้วยสารเติมแต่งให้กับพอลิเมอร์ผสมก็สำคัญเช่นกัน เช่น ซิลิกา และผงเขม่าดำ หรืออาจใช้ทั้งสองอย่างร่วมกัน โดยเฉพาะไอรังสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูงมีการเติมผงเขม่าดำเพียง 10 phr ร่วมกับซิลิกา 40 phr จึงจะทำให้ทนความร้อนได้ดียิ่งขึ้น (พรพรวณ, 2540) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงถือเป็นการริเริ่มใช้เถ้าลอยเป็นสารเติมแต่งในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ร่วมกับผงเขม่าดำเพื่อการพัฒนาสูตรยางผสมสำหรับผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ไอรัง



อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้สารเคมี ดังแสดงในตารางที่ 3 ดังนี้ ตัวกระตุ้นปฏิกิริยาประกอบด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และกรดสเตียริก (Stearic acid) ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ ทีเอ็มทีดี (TMTD) เอ็มบีทีเอส (MBTS) สารเสริมแรงผงเขม่าดำเกรด N330 และ N660 (Carbon black grad N330 and N660) สารคงรูปใช้กำมะถัน (Sulfur) ส่วนสารเสริมแรง และกึ่งเสริมแรงที่เลือกใช้คือซิลิกา 2 ชนิด ดังนี้ ซิลิกาเกรดการค้า (Commercial Silica grade :Si) และซิลิกาในเถ้าลอย (Silica in fly ash :FASi) ที่ผ่านการปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรไลซิง Si69 ที่ปริมาณร้อยละ 4 ต่อน้ำหนักของสารเติมแต่ง (Thongsang, S. and Sombatsompop, N, 2006) เดิมในพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์

ตารางที่ 3 หน้าที่ และปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

สารเคมี	หน้าที่	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติ (NR:STR20) : ยางเอ็นบีอาร์ (NBR:ACN 33.4%) (**NR=40 และ NBR=44.5)	ยางผสม	20 : 80
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)	ตัวกระตุ้นปฏิกิริยา	2.5
กรดสเตียริก (Stearic acid)	ตัวกระตุ้นปฏิกิริยา	0.75
ทีเอ็มทีดี (Tetramethylthiulam disulfide, TMTD)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	1.25
เอ็มบีทีเอส (Dibenzothiazyl disulfide, MBTS)	ตัวเร่งปฏิกิริยา	0.35
ผงเขม่าดำเกรด N330 และ N660 (Carbon black grad N330 and N660)	ตัวสารเสริมแรง	80 และ 100 ตามลำดับ
ซิลิกาเกรดการค้า (Commercial Silica grade, Si) และซิลิกาในเถ้าลอย (Silica in fly ash, FASi)	ตัวสารเสริมแรง และ สารกึ่งเสริมแรง	ปรับเปลี่ยนปริมาณที่ 0 15 30 และ 45
กำมะถัน (Sulfur 325 mesh)	ตัวเชื่อมพันธะข้าม	1

*phr: parts per hundred of rubber by weight

** Mooney viscosity ML (1+4) 100°C

การปรับปรุงผิวซิลิกาเกรดการค้า และซิลิกาในเถ้าลอย

ขั้นตอนการ Hydrolyzing สารคู่ควบไฮโดรไลซิง Si69

- ๑) คำนวณหาปริมาณสารคู่ควบต่อปริมาณซิลิกาเกรดการค้าและเถ้าลอย
- ๒) คำนวณหาปริมาณสารคู่ควบต่อปริมาณซิลิกาเกรดการค้าและเถ้าลอย โดยใช้สารคู่ควบไฮโดรไลซิง Si69 ร้อยละ 4 ต่อบริมาณของซิลิกาเกรดการค้าและเถ้าลอยร้อยละ 100
- ๓) เตรียมปริมาณเอทานอล (Ethanol) ต่อบริมาณสารเติมแต่งที่ใช้ 1 กรัม: 1 มิลลิลิตร (ml) (เช่น ใช้สารเติมแต่ง 100 กรัม เพราะฉะนั้นใช้ปริมาณเอทานอล 100 มิลลิลิตร
- ๔) เตรียมปริมาณเอทานอลที่ใช้เทใส่ในบีกเกอร์พร้อมกับแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic sterler) จากนั้นนำบีกเกอร์วางบนแท่นกวนแม่เหล็ก (Sterler)
- ๕) หยดสารคู่ควบไฮโดรไลซิง Si69 ในเอทานอลจนหมด โดยหยดลงทีละหยดเพื่อป้องกันการเกาะกลุ่มกันของสารคู่ควบไฮโดรไลซิง (ใช้เวลาในการกวน 30 นาที)
- ๖) เมื่อ Hydrolyzed สารคู่ควบแล้ว นำซิลิกาเกรดการค้าหรือเถ้าลอยมาปรับปรุงผิว ดังนี้
 - ๐ ซิลิกาเกรดการค้า
 - นำสารคู่ควบไฮโดรไลซิงที่ Hydrolyzed แล้วมาพรม (Spray) บนซิลิกาเกรดการค้าแล้วผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่นผสมแบบความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 3.9 เป็นเวลา 5 นาที

- ซิลิกาในถั่วลย
นำซิลิกาในถั่วลย เทลงในบีกเกอร์ที่มีสารคู่ควบไซ
เลนที่ Hydrolyzed แล้ว และกวนต่อไปอีก 5 นาที
นำซิลิกาหรือถั่วลยมาอบที่อุณหภูมิ 100 องศา
เซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

☞ การผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่ง

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็น
ปีอาร์ที่ปริมาณ 20:80 กับสารเติมแต่งชนิดต่างๆ โดยใช้เครื่อง
บดผสมลูกกลิ้งคู่ (Two roll mill) จาก บริษัท ยง ฟง แมชชีนเนอรี
จำกัด ตามสารประกอบยาง ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยใช้เวลา
ในการผสมสารประกอบยางที่ 30 นาที อุณหภูมิในการผสมที่ 25
°C ความชื้นสัมพัทธ์ไม่เกิน 50 เปอร์เซ็นต์ (Sombat-sompop,
N., Wimolmala, E. and Markpin, T, 2007)

☞ การหาเวลาคงรูปยาง การขึ้นรูปและเตรียมชิ้น งานทดสอบ

นำสารประกอบพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ
ยางเอ็นปีอาร์ทดสอบหาเวลาการไหม้ (Scorch time) และเวลา
คงรูป (Cure time) ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ (tc_{90}) ด้วยเครื่อง
Oscillating Disk Rheometer (ODR) จากบริษัท โทเทคเทคตั้ง
แมชชีน อินดัสเตรียล จำกัด รุ่น GT 70-70-S2, Taiwan ตาม
มาตรฐาน ASTM D2084-01 ที่อุณหภูมิ 160°C และเตรียมชิ้น
รูปแผ่นยางทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot press) จาก
บริษัท แลปเทค จำกัด อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 160°C ใช้แรงดัน
โมลด์ที่ 15 นิวตันต่อตารางเมตร และเตรียมชิ้นรูปขึ้นงาน
ทดสอบความทนแรงดึงสูงสุดเป็นรูปดัมเบลล์ ชนิด Die C ตาม
มาตรฐาน ASTM D412-98 (Sombatsompop, N.,
Wimolmala, E. and Markpin, T, 2007)

☞ การทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

- ◎ การทดสอบสมบัติเชิงกล ทดสอบหาความทนแรง
ดึง (Tensile strength) โดยใช้เครื่อง Universal
Testing Machines ขนาดน้ำหนักในการดึง 5.0 กิโล
นิวตัน (Load cell 5.0 kN) จากบริษัท ซิมาสู รุ่น
Autograph AG-I, Japan ตามมาตรฐาน ASTM
D412-98 ทดสอบความทนแรงฉีกขาด (Tear
strength) ตามมาตรฐาน ASTM D624-00 ใช้
ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที และ
ทดสอบการยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด (Com-
pression set) ตามมาตรฐานทดสอบ ASTM D395-
89 ตลอดจนทดสอบค่าความแข็ง (Hardness Shore
A) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง จากบริษัท เทค ลีออด
จำกัด ตามมาตรฐาน ASTM D2240-03 (Sombat-
sompop, N., Wimolmala, E. and Markpin, T,
2007)

- ◎ การทดสอบสมบัติการบ่มเร่งสภาวะด้วยความ
ร้อน และการบ่มเร่งสภาวะในน้ำมันไฮดรอลิค
ทดสอบการบ่มเร่งสภาวะในตู้อบยี่ห้อ GOTECH รุ่น
GT-7017 ที่อุณหภูมิ 70°C เวลา 168 ชั่วโมง ตาม
มาตรฐาน ASTM D573-04 และทดสอบสมบัติการ
บ่มเร่งสภาวะในน้ำมันไฮดรอลิค ที่อุณหภูมิ 125°C
เวลา 70 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D471-98 ซึ่ง
หลังบ่มเร่งสภาวะดังกล่าวแล้วนำชิ้นงานมาทดสอบ
สมบัติเชิงกล

- ◎ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค การตรวจสอบ
โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ
ส่องกราด (Scanning Electron Microscope:SEM)
จาก บริษัท JEOL รุ่น JSM-6400 ใช้พลังงาน 15 kV
ที่ความดัน $10^{-5} - 10^{-6}$ และใช้วิธีการตรวจสอบแบบ
Back Scattering Electron (BSE) โดยเตรียมชิ้นงาน
ที่ย้อมผิวด้วยออสเมียมเตตรอกไซด์ (Osmium
tetroxide) ตรวจสอบความสามารถในการเข้ากันได้
(Compatibility) ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างยาง
ธรรมชาติและยางเอ็นปีอาร์และการยึดเกาะ ตลอดจน
กระจายตัวของซิลิกาเกรดการค้า และซิลิกาในถั่ว
ลย

- ◎ การทดสอบสมบัติการกลับคืนตัวของผลิตภัณฑ์
โอริง (Ring recovery time) โดยทำการปิด
ผลิตภัณฑ์โอริงเป็นเกลียวแล้วปล่อยให้คลายคืนตัวสู่
สภาพเดิม เพื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์โอริงที่
จำหน่ายอยู่ในท้องตลาด โดยจับเวลาการกลับคืนตัว
ของผลิตภัณฑ์โอริงขณะปล่อยให้คลายจนถึงผลิตภัณฑ์โอริง
คลายคืนตัวสู่สภาพเดิม

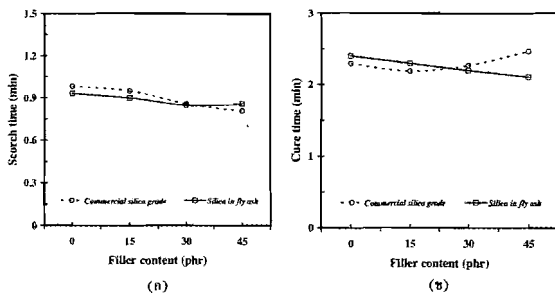


ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปริมาณซิลิกาเกรดการค้าและ
ซิลิกาที่มีในถั่วลย เติมลงในยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับ
ยางเอ็นปีอาร์ 20:80 และทำการเปรียบเทียบผลการทดลอง
อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ได้กำหนดสมบัติผลิตภัณฑ์ใหม่จากการ
วัดสมบัติเชิงกลและสมบัติการทนน้ำมันจากผลิตภัณฑ์ยางโอริง
ที่มีคุณภาพและขายอยู่ทั่วไป และได้กำหนดเกณฑ์ตามข้อเสนอ
แนะของผู้ทรงคุณวุฒิ ซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 โดยสมบัติ
เชิงกลและสมบัติการทนน้ำมันที่ได้แสดงในตารางนี้ ถือเป็น
เป้าหมายสำคัญ (Target point) ในการพัฒนาสมบัติของวัสดุ
ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นปีอาร์ ในโครงการวิจัยนี้

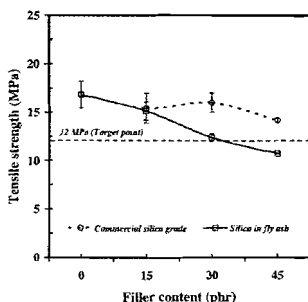
ตารางที่ 4 เกณฑ์สมบัติของผลิตภัณฑ์ยางทนน้ำมันของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง เอ็นบีอาร์ที่ใช้ในงานวิจัย (กำหนดโดยข้อตกลงระหว่างคณะวิจัย ฯ และบริษัท คอมพาวด์โปรเฟสชั่นแนล จำกัด)

สมบัติ	เกณฑ์ผลิตภัณฑ์ยางทนน้ำมัน (จริง)
มอดุลัสที่การยืดตัว 100 เปอร์เซ็นต์ (MPa)	≥ 10
ความต้านแรงดึง (MPa)	≥ 12
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว (%)	≥ 120
ความทนต่อแรงฉีกขาด (kN/m)	≥ 28
ความแข็ง (Shore A)	≥ 70-90
ความทนต่อการขีดข่วน (ปริมาตรที่หายไป, mm ³)	≤ 70
การยุบตัวถาวรหลังได้รับแรงอัด (%)	≤ 40
การบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิก (%)	≤ 1.3
ความแข็งแรงสัมพัทธ์	≥ 0.7



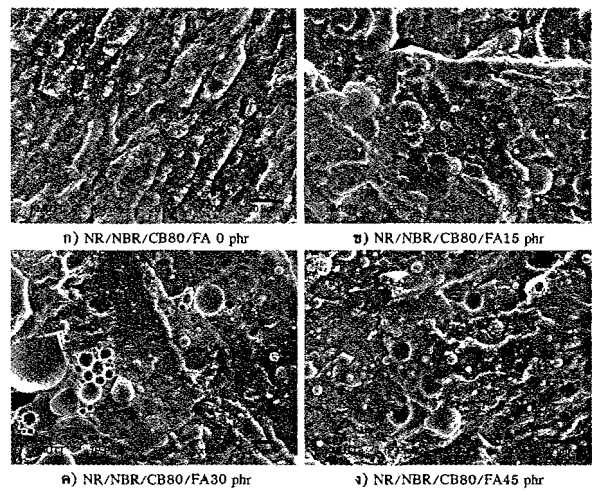
รูปที่ 4 ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการไหลตัวกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการคงรูปกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์

รูปที่ 4 (ก) และ (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการไหลตัวและเวลาในการคงรูป กับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ ผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมปริมาณซิลิกาเกรดการค้าและ ซิลิกาที่มีในเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาการไหลตัวและการคงรูปของยางผสม ทั้งนี้เนื่องจากในสูตรยางผสมมีการเติมผงเขม่าดำที่ปริมาณ 80 phr ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาคัดค้าน้ำหนักมากกว่าการเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิด

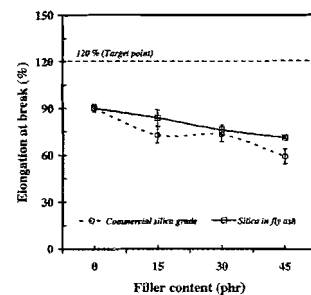


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้า และซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้า และซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ พบว่าเมื่อเติมปริมาณสารเติมแต่งทั้งสองชนิดในยางผสมเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณ 15 phr ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มลดลง และเมื่อปริมาณซิลิกาเกรดการค้าเพิ่มขึ้นที่ 30 และ 45 phr ค่าความทนแรงดึงมีแนวโน้มคงที่ ซึ่งมีค่ามากกว่าการเติมซิลิกาที่มีในเถ้าลอยที่มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะที่การเติมซิลิกาที่มีในเถ้าลอยในยางผสมที่ปริมาณ 30 – 45 phr เนื่องจากเถ้าลอยมีการยึดเกาะกับยางผสมไม่ดี แสดงได้จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM ในรูปที่ 6 ค) และ ง) เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสม ในรูปที่ 6 ก) และ ข) อย่างไรก็ตามความทนแรงดึงโดยรวมผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 12 MPa



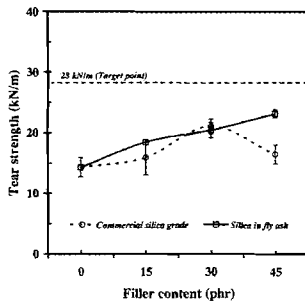
รูปที่ 6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ที่สัดส่วน 20:80 ที่มีผงเขม่าดำปริมาณ 80 phr ที่เติมเถ้าลอยที่ปริมาณ 0 15 30 และ 45 (phr) (กำลังขยาย 500 เท่า)



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด กับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์

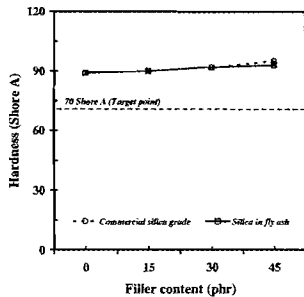
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด กับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง

เอ็นปีอาร์ พบว่า เมื่อปริมาณสารเติมแต่งทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ของยางผสมมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากปริมาณของเนื้อยางลดลงทำให้ยางผสมมีการยืดตัวได้น้อย นอกจากนี้ยังพบอีกว่า การเติมซิลิกาที่มีในถ้ำลอยในยางผสมมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูงกว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้า ซึ่งเปอร์เซ็นต์การยืดตัวไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 120 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงฉีกขาดกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและ ซิลิกาที่มีในถ้ำลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นปีอาร์

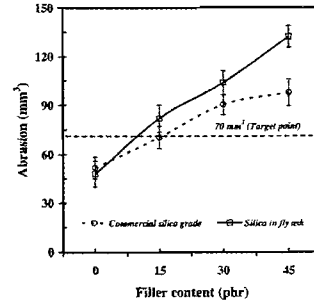
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงฉีกขาด กับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในถ้ำลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยาง เอ็นปีอาร์ พบว่า เมื่อเติมปริมาณสารเติมแต่งทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ความทนต่อแรงฉีกขาดของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากการปรับปรุงผิวสารเติมแต่งทั้งสองชนิดด้วยสารคู่ควบไซเลน ลดการเกิด Filler-Filler interaction ตลอดจนซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาในถ้ำลอยสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับยางเอ็นปีอาร์ที่เป็นส่วนประกอบหลักได้ (Yan, H., Sun, K. and Zhang, Y, 2005) และสารเติมแต่งทั้งสองชนิดมีค่าความทนต่อแรงฉีกขาดไม่แตกต่างกัน โดยสูตรยางผสมมีค่าความทนต่อแรงฉีกขาดอยู่ระหว่าง 14-24 kN/m ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 28 kN/m



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้า และซิลิกาที่มีในถ้ำลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นปีอาร์

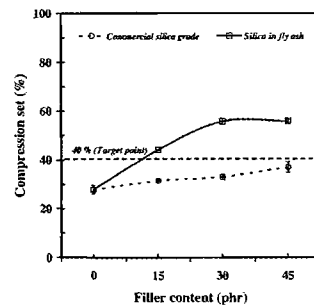
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้า และซิลิกาที่มีในถ้ำลอยของ

วัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นปีอาร์ พบว่า การเติมสารเติมแต่งทั้งสองชนิดในยางผสมไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งและมีค่าระหว่าง 90-95 Shore A ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 70 Shore A



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างการขัดถูกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในถ้ำลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นปีอาร์

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขัดถูกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในถ้ำลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นปีอาร์ พบว่า เมื่อสารเติมแต่งทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ยางผสมมีการสูญเสียเนื้อวัสดุเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัดส่วนปริมาณเนื้อยางที่เป็นส่วนประกอบหลักลดลง โดยที่การเติมสารเติมแต่งชนิดซิลิกาที่มีในถ้ำลอยมีการสูญเสียเนื้ออยู่ในช่วงระหว่าง 50-130 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ซึ่งมากกว่าการเติม ซิลิกาเกรดการค้าซึ่งมีการสูญเสียเนื้ออยู่ในช่วงระหว่าง 50-100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร เนื่องจากสัดส่วนปริมาณเนื้อยางผสมที่เติมถ้ำลอยน้อยกว่าปริมาณเนื้อยางที่เติมซิลิกาเกรดการค้า ส่วนสูตรยางที่มีซิลิกาเกรดการค้าเป็นสารเติมแต่งที่ปริมาณไม่เกิน 15 phr ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดได้ไม่เกิน 70 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และเมื่อปริมาณสารเติมแต่งทั้งสองชนิดมากกว่า 30 phr มีการสูญเสียเนื้ออย่างผสมมากขึ้น ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด

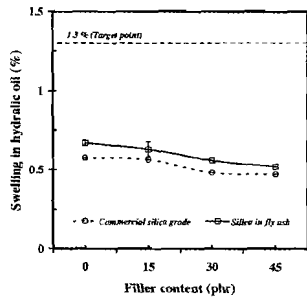


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงอัดกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในถ้ำลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นปีอาร์

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงอัดกับปริมาณสารเติมแต่ง ชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในถ้ำลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นปีอาร์ ทดสอบอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22

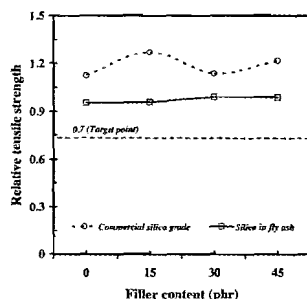


ชั่วโมง พบว่า เมื่อเติมปริมาณสารเติมแต่งทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ค่าการยุบตัวถาวรเมื่อได้รับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยที่การเติมซิลิกาจากเถ้าลอยในยางผสม มีค่าอยู่ระหว่าง 44-55 เปอร์เซ็นต์ (ไม่ผ่านเกณฑ์) ซึ่งมากกว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้า มีค่าอยู่ระหว่าง 28-37 เปอร์เซ็นต์ (ผ่านเกณฑ์) เนื่องจากปริมาณสัดส่วนเถ้าลอยที่เติมในยางผสมมากกว่าซิลิกาเกรดการค้า หรือซิลิกาทำให้ปริมาณเนื้อยางลดลง ส่งผลทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติกของยางผสมลดลงด้วย



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิกกับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิกกับปริมาณสารเติมแต่ง ชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 168 ชั่วโมง พบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในเถ้าลอยในยางผสมเพิ่มขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงการบวมตัวของยางผสมที่น้อยมาก อยู่ในช่วงระหว่าง 0.4-0.6 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสัดส่วนของเนื้อยางลดลง ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 1.3 เปอร์เซ็นต์

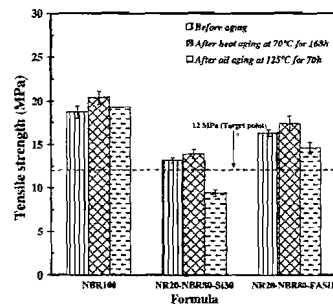


รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงสัมพันธ์กับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและ ซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์

รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบความทนแรงดึงก่อนและหลังการบวมตัวในน้ำมันไฮดรอลิก (Relative tensile strength) กับปริมาณสารเติมแต่งชนิดซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในเถ้าลอยของวัสดุผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางเอ็นบีอาร์ พบว่าเมื่อปริมาณซิลิกาเกรดการค้าและซิลิกาที่มีในเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อค่าความทนแรงดึงสัมพันธ์ ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 0.7

จากการประชุมโครงการวิจัยกับภาคเอกชนผู้ร่วมให้ทุน มีความประสงค์ต้องการสมบัติการกลับคืนตัวของผลิตภัณฑ์ให้การกลับคืนตัวถาวรหลังได้รับแรงอัดดีขึ้น โดยได้เลือกสูตรยาง จากงานวิจัยทั้งสามสูตร (ตามที่ระบุไว้ข้างล่างนี้) โดยปรับเปลี่ยนเกรดผงเขม่าดำ N660 แทนเกรด N330 เพื่อปรับปรุงสมบัติการกลับคืนตัวให้ดีขึ้น ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า ผงเขม่าดำเกรด N660 เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสมบัติการกลับคืนตัวที่ดีขึ้น โดยคณะวิจัย ได้เพิ่มปริมาณผงเขม่าดำที่ 100 phr แล้วทดสอบสมบัติก่อนและหลังการบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 168 ชั่วโมง และทดสอบบ่มเร่งสภาวะด้วยความร้อนในน้ำมันไฮดรอลิกที่อุณหภูมิ 125°C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

1. ยางเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์
2. ยางผสม NR20/NBR80 มีส่วนผสมของซิลิกาเกรดการค้าปริมาณ 30 phr
3. ยางผสม NR20/NBR80 ที่มีส่วนผสมของซิลิกาในเถ้าลอยปริมาณ 15 phr



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึง กับสูตรยางเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์ ยางธรรมชาติผสมยางเอ็นบีอาร์ ที่มีปริมาณซิลิกาเกรดการค้า 30 phr และซิลิกาในเถ้าลอย 15 phr (ปริมาณผงเขม่าดำคงที่ 100 phr)

รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึง กับสูตรยางเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์ ยางธรรมชาติผสมยางเอ็นบีอาร์ ที่มีปริมาณซิลิกาเกรดการค้า 30 phr และซิลิกาในเถ้าลอย 15 phr ภายใต้การบ่มเร่งด้วยความร้อนและน้ำมัน ผลการทดลองพบว่าการบ่มเร่งสูตรยางเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์มีค่าความทนแรงดึงมากกว่าสูตรยางผสมที่มีซิลิกาเกรดการค้า อาจเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของการปรับปรุงผิวซิลิกาเกรดการค้าด้วยปริมาณสารคู่ควบไซเลน Si69 ที่ใช้ (4% wt) ทำให้เกิด Filler-Filler interaction มากกว่าที่จะเกิด Filler-Rubber interaction (Ansarifar, M.A. and Nijhawan, R, 2000) และสูตรยางผสมที่มีซิลิกาในเถ้าลอยมีค่าความทนแรงดึงต่ำกว่าสูตรยางเอ็นบีอาร์บริสุทธิ์เช่นเดียวกันเนื่องจากซิลิกาในเถ้าลอยถึงแม้ถูกปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนแล้วก็ตาม ซึ่งจากงานวิจัยของ (Thongsang, S., Sombatsompop, N. and Ansarifar, A, 2008) พบว่า เมื่อนำเถ้าลอยดังกล่าวผสมกับยางขณะผสมนั้นเถ้าลอยที่มีขนาดใหญ่อาจแตกตัวด้วยแรงเฉือน และมีเถ้าลอยขนาดเล็กๆ อยู่ในเถ้าลอยขนาดใหญ่ ซึ่งอนุภาคเถ้าลอยที่มีขนาดเล็กๆ ดังกล่าวไม่ได้ผ่านการ

