

การบ่มสุกและสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มี ซิลิกาจากเถ้าชานอ้อย

Cure and Mechanical Properties of Natural Rubber Compounds Filled with Silica from bagasse ash

พจนพร ฮวบเจริญ^{1*}, เอกชัย วิมลมาลา¹, และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ¹

Potchanaporn Huabcharoen^{1*}, Ekachai Wimolmala¹, and Narongrit Sombatsompop¹

¹ กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF) สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสารตัวเติม 3 ชนิดที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ คือ ซิลิกาเกรดการค้า เถ้าชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงผิว และเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการปรับปรุงผิว โดยศึกษาหมู่ฟังก์ชันเคมีและองค์ประกอบของซิลิกาในสารตัวเติม และเติมสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ 0, 15, 30 และ 45 ส่วนในยางร้อยละ (คำนวณจากองค์ประกอบซิลิกาที่อยู่ในเถ้าชานอ้อย) ตรวจสอบสมบัติการไหล บ่มสุก และสมบัติเชิงกล ผลการวิจัยพบว่า สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดมีหมู่ฟังก์ชันหลักคือหมู่ไฮดรอกซิลและซิลอกเซน และมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักที่ 77%, 91% และ 97% ตามลำดับ การเติมสารตัวเติมไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหล แต่ส่งผลต่อเวลาในการบ่มสุก ส่วนค่าผลต่างแรงบิด พบว่า ซิลิกาเกรดการค้าและเถ้าไม่แช่กรดให้ค่าใกล้เคียงกัน ส่วนเถ้าแช่กรดให้ค่าต่ำสุด การศึกษาสมบัติเชิงกลโดยรวม พบว่า ค่ามอดุลัสและค่าความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม ยกเว้น เปอร์เซนต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น และการเติมเถ้าทั้งที่แช่และไม่แช่กรด ให้สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ / ซิลิกา / เถ้าชานอ้อย / การบ่มสุก / สมบัติเชิงกล

Abstract

This research aims to study the three different types of silica based fillers: namely; precipitated silica, untreated bagasse ash, and acid treated bagasse ash in terms of functional groups and amount of silica in the fillers. The silica based fillers were added into the natural rubber composite at 0, 15, 30 and 45 parts per hundred rubbers (phr) (Calculated based on silica contents in the bagasse). The rheological, cure and mechanical properties revealed that the main functional groups of all fillers were silanol and siloxane groups and the percentage of silica in precipitated silica, untreated bagasse ash, and acid treated bagasse ash were 77%, 91% and 97% respectively. Adding all fillers did not affect the scorch time, but affected the cure time. Furthermore, the precipitated silica and untreated bagasse ash gave similar torque differences while treated bagasse ash exhibited lowest torque differences. The modulus and hardness of the fillers added rubber vulcanizates were found to be higher than unfilled rubber vulcanizates except for the elongation at break which decreased with increasing silica content. In addition, adding untreated bagasse ash and treated bagasse ash reduced the tensile strength of the rubber vulcanizates.

Keywords : Natural rubber / Silica / Bagasse ash / Cure properties / Mechanical properties

*Corresponding author. E-mail : potchanaporn.h@gmail.com

1. บทนำ

ยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีสมบัติเด่นด้านความยืดหยุ่น ความทนทานต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด ความทนทานต่อการขีดถู และสมบัติเชิงพลวัต ทำให้ยางธรรมชาติเหมาะกับการใช้งานเชิงวิศวกรรมที่ต้องรับแรงสูง อย่างไรก็ตาม ยางดิบมีข้อจำกัดด้านการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลและลักษณะทางกายภาพไม่เสถียรขึ้นกับอุณหภูมิ กล่าวคือ ยางอ่อนนุ่มและเหนียว เมื่ออยู่ในอุณหภูมิสูง แต่แข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงต้องนำยางธรรมชาติไปผสมกับสารเคมีและสารตัวเติมประเภทเสริมแรงเพื่อทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้ในยางแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้ สารตัวเติมเสริมแรงที่ให้สีดำ คือ ผงเขม่าดำ และสารตัวเติมเสริมแรงที่ไม่ให้สีดำ เช่น ฟูลิคา ฟูลิคาเตดซิลิกา และกลุ่มของซิลิกาที่ได้จากแหล่งธรรมชาติ เช่น จากเถ้าแกลบที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ 90% และเถ้าขาน้อยที่ได้จากการเผาเถ้าขาน้อยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ 70% (ณพศร, 2548) ในปัจจุบันมีงานวิจัยเกี่ยวกับเถ้าขาน้อย โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา Kanking และคณะ (2012) ศึกษาการใช้เถ้าขาน้อยเป็นสารตัวเติมเสริมแรงร่วมกับซิลิกาและผงเขม่าดำในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพของเถ้าขาน้อย พบว่า เถ้าขาน้อยมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณสูงถึง 75% โดยน้ำหนัก และมีองค์ประกอบอื่นๆ เป็นกลุ่มโลหะออกไซด์ เถ้าขาน้อยมีลักษณะพื้นผิวที่มีรูพรุนและมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 45-150 ไมโครเมตร จากการใช้เถ้าขาน้อยเป็นสารตัวเติมเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ พบว่าทำให้สมบัติเชิงกลโดยรวมไม่ลดลง และให้สมบัติการคืนกลับตัวที่ดีกว่าการใช้ซิลิกาเกรดการค้า แต่สามารถเติมเถ้าขาน้อยในปริมาณสูงสุดได้ไม่เกิน 15 ส่วนต่อปริมาณยางร้อยละ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาปรับปรุงเถ้าขาน้อย โดยนำเถ้าขาน้อยไปแช่กรดเพื่อกำจัดโลหะออกไซด์ เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ เพอร์ริกออกไซด์ที่เป็นสารมลทินในอนุภาค (Worathanakul *et al.*, 2009) ที่อาจจะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติเพิ่มขึ้น มีสมบัติเชิงกลด้านการคืนกลับตัวที่ดี และสามารถเติมซิลิกาจากเถ้าขาน้อยลงในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบกับซิลิกาเกรดการค้า

2. วิธีการ

2.1 วัสดุและสารเคมี

งานวิจัยนี้ใช้ยางธรรมชาติเกรด STR 20 สารเคมีประกอบด้วยซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) และกรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาร่วมกันในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ มีเมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (Mercaptobenzothiazole, MBT) และไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenylguanidine, DPG) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ มีกำมะถัน (Sulphur) เป็นสารที่ใช้ในกระบวนการคงรูปยางในกระบวนการผลิตยาง และมีการเติมเถ้าขาน้อยจากจังหวัดสุพรรณบุรีเป็นสารตัวเติม โดยนำเถ้าขาน้อยมาแช่กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric, HCl) จากบริษัท สยามเบต้า กรุ๊ป จำกัด ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ แล้วนำมาคัดขนาดอนุภาคไม่เกิน 150 ไมโครเมตร ทำการปรับปรุงผิวเถ้าขาน้อยด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน ซินดี Bis-(3-triethoxysilylpropyl) tetrasulfide, $[(C_2H_5O)_3Si-(CH_2)_3-S_4-(CH_2)_3-Si-(C_2H_5O)_3]$, (Couplink 89) จากบริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณซิลิกาจากเถ้าขาน้อยที่ใช้ผสมในยางธรรมชาติ คือ 0, 15, 30 และ 45 ส่วนต่อยางร้อยละ เติมน้ำมันดีออกซิแดนท์ ชนิด N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ และใช้พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG) เพื่อลดการเกาะกลุ่มกันของสารตัวเติมด้วย

2.2 การนำเถ้าขาน้อยมาแช่กรด

นำเถ้าขาน้อยน้ำหนัก 100 กรัม เติมน้ำในภาชนะที่มีกรดไฮโดรคลอริกปริมาณ 900 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 1 โมลาร์ กวนสารละลายที่มีเถ้าขาน้อยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำมารองแยกส่วนที่เป็นสารละลายออก นำส่วนที่เป็นอนุภาคเถ้าขาน้อยมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) เพื่อทำให้เป็นกลาง (pH 7) นำไปกำจัดความชื้นและตัวทำละลายที่หลงเหลือในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง ให้น้ำหนักคงที่ จากนั้นนำเถ้าขาน้อยที่ผ่านการแช่กรดไปทำการพินิจเอกลักษณ์และนำไปปรับปรุงผิวด้วยสารคู่ควบไฮโดรเจน เพื่อใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

2.3 การปรับปรุงผิวสารตัวเติมโดยใช้สารคู่ควบไฮโดรเจน

เตรียมสารคู่ควบไฮโดรเจนที่ปริมาณความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยเติมน้ำมันดีออกซิแดนท์ในเอทานอลที่ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ต่อน้ำหนักสารตัวเติม 100 กรัม และกวนสารละลายด้วยแท่งกวนแม่เหล็กเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำสารตัวเติมลงในสารละลาย

ระหว่างสารคู่ควบไซเลนกับเอทานอล และทำการผสม โดยใช้เครื่องปั่นผสมความเร็วสูง (High speed mixer) จากบริษัท Labtech Engineering จำกัด (ประเทศไทย) เป็นเวลา 5 นาที ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที หลังจากนั้นนำสารตัวเติมลงในตู้ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

2.4 การผสมและเตรียมตัวอย่างชิ้นงานยางกับสารตัวเติม

ส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัย

Ingredients	Supplier	Content (phr)
Natural Rubber (grade STR 20)	Chemical Innovation Co., Ltd. (Thailand)	100 part
Zinc Oxide (ZnO)	Thai-Lysaght Co., Ltd. (Thailand)	5.0
Stearic Acid	Imperial Industrial Chemicals Co., Ltd. (Thailand)	2.0
Polyethylene Glycol (PEG)	Cosan Co., Ltd. (Thailand)	5 wt% added silica
Silica from bagasse ash	Mitr Phol Sugar Co., Ltd. (Thailand)	Varying 0, 15, 30 and 45 wt% silica
Antioxidants (6PPD)	Behn Meyer Chemical Co., Ltd. (Thailand)	1.0
Mercaptobenzothiazole (MBT)	CMC Advance Co., Ltd. (Thailand)	0.5
Diphenyl Guanidine (DPG)	Siam Chemicals Co., Ltd. (Thailand)	0.2
Sulphur	Zeon Advanced Polymix Co., Ltd. (Thailand)	3.0

*phr: part per hundred of rubber

ทำการบดผสมยางธรรมชาติและสารเติมแต่งด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) จากบริษัท Yong Fong Machinery จำกัด (ประเทศไทย) ตามส่วนผสมในตารางที่ 1 โดยใช้สารตัวเติมนั้นๆ เข้าชามย่อยที่ผ่านการแช่กรด และเข้าชามย่อยที่ไม่ผ่านการแช่กรด เทียบกับซิลิกาเกรดการค้าหรือฟริชิตีเตตซิลิกา เกรด TOKUSIL233 จากบริษัท ไทกยามา สยามซิลิกา จำกัด (ประเทศไทย) เติมสารตัวเติมในยางธรรมชาติที่ปริมาณสัดส่วน 0, 15, 30 และ 45 ส่วนต่อยางร้อยละ (คำนวณจากองค์ประกอบของซิลิกาที่อยู่ในเข้าชามย่อย) โดยใช้เวลาในการผสม 30 นาที ที่อุณหภูมิในช่วง 40-45 องศาเซลเซียส วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีเข้าชามย่อยและซิลิกาเกรดการค้าเป็นสารตัวเติมที่ได้ นำไปเตรียมขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานทดสอบด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน (Hot compression molding)) จากบริษัท Labtech Engineering จำกัด (ประเทศไทย) อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป 160 องศาเซลเซียส แรงดันแม่พิมพ์ที่ 150 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเตรียมขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยแม่พิมพ์ตัดเป็นรูปดัมเบลล์

2.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติม

ทำการวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาของสารตัวเติมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5800 (ประเทศญี่ปุ่น) ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์ และทำการศึกษาค้นคว้าด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาดไม่เกิน 150 ไมโครเมตร จากนั้นตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารตัวเติมด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี โดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum one (ประเทศสหรัฐอเมริกา) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารตัวเติมด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรสโกปี โดยใช้เครื่อง XRF spectrometer ยี่ห้อ Bruker รุ่น S8 TIGER (ประเทศเยอรมนี)

2.6 การทดสอบสมบัติการไหล การบ่มสุก และสมบัติเชิงกล

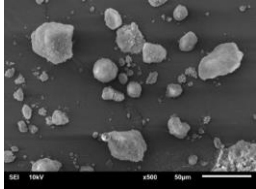
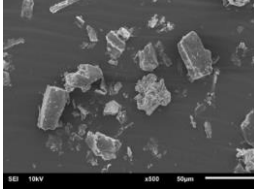
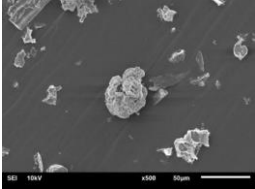
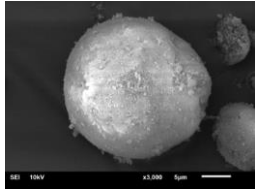
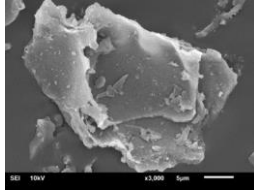
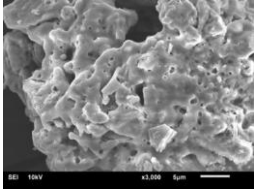
นำยางคอมปาวด์ทดสอบหาเวลาในการไหล เวลาที่ใช้ในการบ่มสุก และค่าผลต่างของแรงบิด ตามมาตรฐาน ASTM D2084-01 ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบจานแกว่ง (Oscillating Disk Rheometer, ODR) จากบริษัท GOTECH Testing Machine รุ่น GT 70-70-S2 (ประเทศไต้หวัน) ที่อุณหภูมิทดสอบ 160 องศาเซลเซียส จากนั้นขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานทดสอบสมบัติเชิงกล ด้านมอดุลัสแรงดึง ความต้านทานต่อแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด ตามมาตรฐาน ASTM D412-06 ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine จากบริษัท Shimadzu รุ่น Autograph AG-I 5kN (ประเทศญี่ปุ่น) และหาค่าความแข็งของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM D2240-05 (Shore A) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจากบริษัท Tech Lock จำกัด (ประเทศญี่ปุ่น)

3. ผลและอภิปราย

3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของสารตัวเติม

จากการศึกษาภาพถ่ายโครงสร้างสัณฐานวิทยาของสารตัวเติม 3 ชนิด ดังนี้ ซิลิกาเกรดการค้า เถ้าขาน้อยที่ไม่แช่กรด และเถ้าขาน้อยที่แช่กรด ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ซิลิกาเกรดการค้ามีลักษณะอนุภาคกลมมน มีผิวเรียบ ส่วนเถ้าขาน้อยที่ไม่แช่กรด มีลักษณะอนุภาคเป็นแท่งเหลี่ยม มีผิวเรียบเช่นเดียวกับซิลิกาเกรดการค้า ส่วนเถ้าขาน้อยที่แช่กรด มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน พื้นผิวขรุขระ มีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่โดยทั่ว

ตารางที่ 2 โครงสร้างสัณฐานวิทยาของสารตัวเติม

Magnification	Morphology examination: SEM		
	Commercial silica	Untreated bagasse ash	Acid treated bagasse ash
500X			
3000X			

3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติมเสริมแรง

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติม 3 ชนิด แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติม

Characterization method	Filler types		
	Commercial silica	Untreated bagasse ash	Acid treated bagasse ash
Functional group investigation: FTIR			
	Wavenumber (cm^{-1})		
Si-OH stretching (Silanol group)	3383.96	3357.71	3372.87
Si-O-Si stretching (Siloxane group)	1074.66	1028.88	1054.57
Chemical composition investigation: XRF			
	Chemical composition (%)		
Silicon oxide (SiO_2)	97.90	77.20	90.60
Aluminium oxide (Al_2O_3)	0.26	4.80	2.73
Ferric oxide (Fe_2O_3)	0.06	2.11	1.14
Potassium oxide (K_2O)	0.02	5.52	2.39
Calcium oxide (CaO)	0.03	4.45	0.76
Other metal oxide (TiO_2 , MgO , P_2O_5 , SO_3 , Na_2O , MnO , BaO and ZrO_2)	1.73	5.92	2.38

จากการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันเคมีของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ดังนี้ ซิลิกาเกรดการค้า เถ้าขาน้อยที่ไม่แช่กรด และเถ้าขาน้อยที่แช่กรด ด้วยเทคนิค FT-IR ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า เถ้าขาน้อยทั้งที่แช่กรดและไม่แช่กรดมีหมู่ฟังก์ชันที่แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลที่เลขคลื่นในช่วง $3357.71\text{--}3372.87\text{ cm}^{-1}$ และหมู่ไฮดรอกซิลที่เลขคลื่นในช่วง $1028.88\text{--}1054.57\text{ cm}^{-1}$ (Barbara H., 2004) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันในช่วงเลขคลื่นดังกล่าวมีความคล้ายกับซิลิกาเกรดการค้า แสดงว่าเถ้าขาน้อยมีส่วนประกอบของซิลิกาที่สามารถใช้เป็นสารเสริมแรงในยางเพื่อทดแทนซิลิกาเกรดการค้า และจากผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ด้วยเทคนิค XRF ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่า เถ้าขาน้อยที่ไม่แช่กรด มีซิลิคอนออกไซด์หรือซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักที่ปริมาณ 77% ส่วนเถ้าขาน้อยที่แช่กรด มีปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นที่

ปริมาณ 91% โดยมีกลุ่มโลหะออกไซด์เป็นองค์ประกอบรอง โดยกรดสามารถกำจัดโลหะออกไซด์บางส่วน เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ โพแทสเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นสารมลทินในถ้ำชานอ้อย

3.3 การตรวจสอบสมบัติการไหล การบ่มสุก และค่าผลต่างของแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

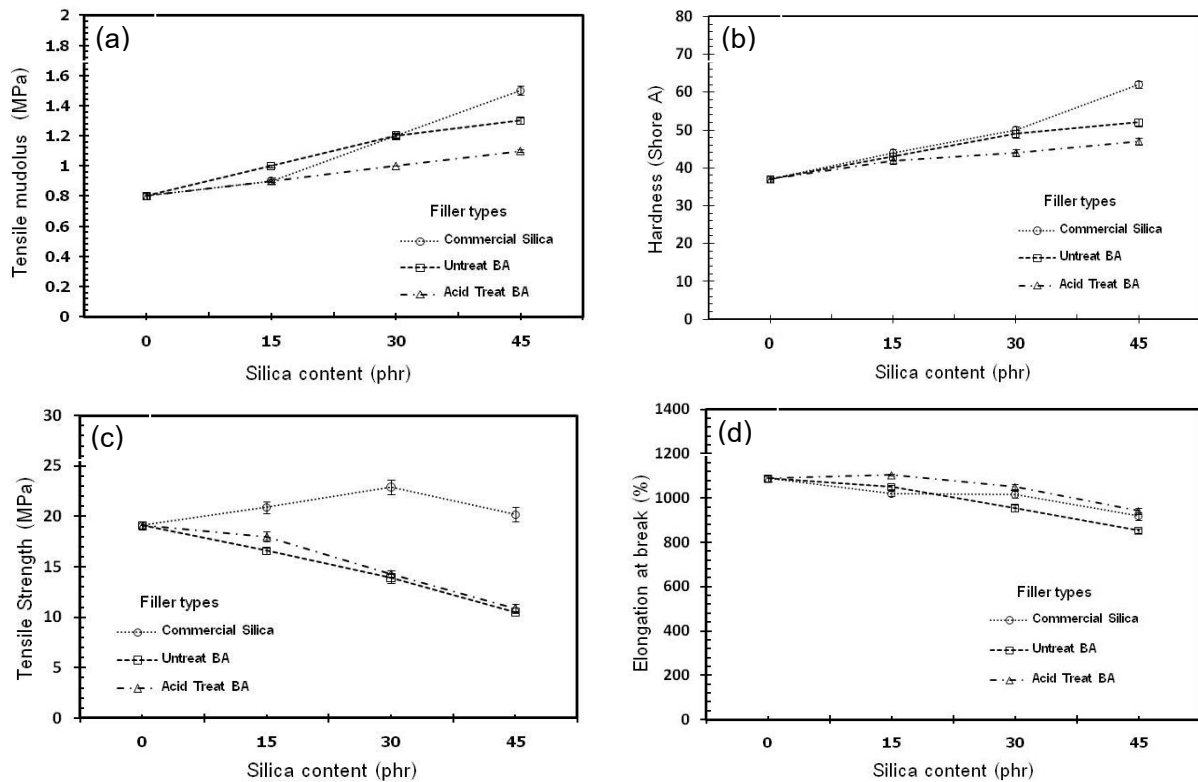
จากผลการตรวจสอบสมบัติการไหล การบ่มสุก และค่าผลต่างของแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมต่างชนิดกัน ดังแสดงในตารางที่ 4 อธิบายได้ว่า เมื่อเติมซิลิกาจากถ้ำชานอ้อยทั้งที่ผ่านการแช่กรดและไม่แช่กรดในยางธรรมชาติ ปริมาณที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัวก่อนการบ่มสุกอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าการเติมซิลิกาเกรดการค้าในยางใช้เวลาในการบ่มสุกนานที่สุด รองมาเป็นถ้ำชานอ้อยที่ไม่แช่กรดและไม่แช่กรด ตามลำดับ อธิบายได้ว่า ซิลิกาเกรดการค้ามีความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวมากกว่าถ้ำชานอ้อย ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกัน โดยที่พื้นผิวของซิลิกาสามารถดูดซับตัวเร่งปฏิกิริยา (Sombatsompop *et al.*, 2004) ส่งผลให้ซิลิกาเกรดการค้าใช้เวลาในการบ่มสุกนานที่สุด ส่วนค่าผลต่างแรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา เนื่องจากมีแรงอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาเพิ่มขึ้น บ่งบอกถึงความหนาแน่นของพันธะข้ามในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการเพิ่มปริมาณซิลิกายังทำให้ความแข็งแรง (Rigidity) โดยรวมเพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบระหว่างซิลิกาทั้ง 3 ชนิด พบว่า ซิลิกาเกรดการค้าและถ้ำชานอ้อยที่ไม่แช่กรดให้ค่าผลต่างแรงบิดใกล้เคียงกัน ส่วนถ้ำชานอ้อยที่แช่กรดให้ค่าผลต่างแรงบิดต่ำสุด อธิบายได้ว่า พื้นผิวที่มีความเป็นรูพรุน เห็นได้จากภาพถ่าย SEM ทำให้มีค่าความแข็งแรงของอนุภาคน้อยกว่าสารตัวเติมอีก 2 ชนิด

ตารางที่ 4 สมบัติการไหล การบ่มสุก และค่าผลต่างของแรงบิดของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

Natural rubber composite properties	Filler types and Silica content (phr)									
	0	Commercial silica			Untreated bagasse ash			Acid treated bagasse ash		
		15	30	45	15	30	45	15	30	45
Scorch time (min)	1 : 18	0 : 59	0 : 59	1 : 08	1 : 12	1 : 20	1 : 11	1 : 07	1 : 04	1 : 07
Cure time (min)	5 : 27	5 : 20	5 : 45	6 : 27	5 : 15	5 : 15	5 : 18	5 : 19	5 : 32	5 : 49
Delta torque (dN m)	47.94	53.58	62.38	74.44	56.30	63.90	72.19	51.99	53.89	56.18
SD	± 0.3	± 0.3	± 1.1	± 0.3	± 0.2	± 0.5	± 0.0	± 0.4	± 0.6	± 0.3

3.4 การตรวจสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ

จากการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีการเติมสารตัวเติม 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่ใช้สารตัวเติมต่างชนิดกัน

(a) โมดูลัสแรงดึง (b) ความแข็ง (c) ความต้านทานต่อแรงดึง และ (d) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด

ผลการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมต่างชนิดกัน เมื่อพิจารณาค่าโมดูลัสแรงดึง (Tensile modulus) และค่าความแข็ง (Hardness) ดังแสดงในรูปที่ 1 (a) และ (b) พบว่าค่าโมดูลัสแรงดึง และค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของสารตัวเติมมีความแข็งแรงสูง เมื่อเติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่มีความนิ่ม จึงทำให้ค่าความแข็งโดยรวมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าโมดูลัสของวัสดุเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกา และเมื่อเทียบระหว่างสารตัวเติม 3 ชนิด พบว่า ถ้าใช้ซิลิกาที่แช่กรดให้ค่าต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่าผลต่างแรงบิดดึงที่อธิบายไปแล้ว เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ดังแสดงในรูปที่ 1 (c) พบว่า การเติมซิลิกาเกิดการค้ำ ตั้งแต่ 15 - 30 ส่วนในยางร้อยละ 10 ทำให้วัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แสดงว่าเมื่อเติมซิลิกาเกิดการค้ำลงในยาง ซิลิกาเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของยาง (Rubber-Filler interaction) ได้ดี (Sombatsompop *et al.*, 2004) และค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมปริมาณซิลิกาเกินกว่า 30 ส่วนในยางร้อยละ 10 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารตัวเติมที่มากขึ้นสามารถเกิดการเกาะกลุ่มกันเอง (Filler-Filler interaction) (โอบเชื้อ, 2543) และเมื่อเทียบระหว่างซิลิกาที่แช่กรดและไม่แช่กรด พบว่า ที่ปริมาณ 15 ส่วนในยางร้อยละ 10 ซิลิกาที่แช่กรดให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าที่ไม่แช่กรด อธิบายได้ว่า ถ้าที่แช่กรดมีความเป็นรูพรุนสูงจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวยึดเกาะทำให้เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่โมเลกุลของยางได้ดีขึ้น เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ดังรูปที่ 1 (d) พบว่า มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น โดยซิลิกาที่เติมเข้าไปทำหน้าที่เสริมแรงในยาง ทำให้สายโซ่โมเลกุลของยางถูกจำกัดการเคลื่อนไหว (Restrict) เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาดจึงมีแนวโน้มลดลง และเมื่อเทียบระหว่างสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด พบว่าผลการทดลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

4. บทสรุป

- การนำสารตัวเติม 3 ชนิด ได้แก่ ซิลิกาเกิดการค้ำ ซิลิกาที่แช่กรดและไม่แช่กรดเติมในวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติ พบว่า
1. สารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลักที่ปริมาณ 77%, 91% และ 97% ตามลำดับ และมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีหลักๆ เป็นหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่ไฮดรอกซี
 2. ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด ไม่ส่งผลต่อเวลาในการไหลตัวอย่างมีนัยสำคัญ แต่ส่งผลต่อเวลาในการบ่มสุก โดยซิลิกาเกิดการค้ำใช้เวลาในการบ่มสุกนานที่สุด รองลงมาเป็นซิลิกาที่แช่กรดและไม่แช่กรด ตามลำดับ ส่วนค่าผลต่าง

แรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา (คิดเฉพาะองค์ประกอบของซิลิกาในสารตัวเติม) และเมื่อเทียบระหว่างสารตัวเติมพบว่า ซิลิกาเกรดการค้าและถั่วที่ไม่แช่กรดให้ค่าผลต่างแรงบิดใกล้เคียงกัน ส่วนถั่วที่แช่กรดให้ค่าผลต่างแรงบิดต่ำสุด

3. สมบัติเชิงกลโดยรวมของวัสดุเชิงประกอบยางธรรมชาติที่เติมถั่วชานอ้อยทั้งที่แช่กรดและไม่แช่กรด พบว่า ค่ามอดุลัสแรงดึงและค่าความแข็งแรงของยางธรรมชาติที่มีสารตัวเติมมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม ยกเว้น เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของซิลิกาที่เพิ่มขึ้น และการเติมปริมาณถั่วชานอ้อยทั้งที่แช่กรดและไม่แช่กรด ให้สมบัติด้านความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัย ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (เมธีวิจัยอาวุโส สกว., เลขที่สัญญา RTA5580009) ที่ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนทุนวิจัย บริษัท โรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาลมิตรผล จำกัด (ประเทศไทย) ที่ให้ความอนุเคราะห์ถั่วชานอ้อย บริษัท เบ็นไมเยอร์ เคมีคอล (ที) จำกัด (กรุงเทพฯ ประเทศไทย) ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสารเคมียาง

6. เอกสารอ้างอิง

- ณพวงศธร ลิขิตศรีไพบุณย์. (2548). การพัฒนาถั่วชานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุปูโซลัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 51-52.
- โอบเอื้อ อิมวิทยา. (2543). ผลของขนาดอนุภาคและปริมาณสารตัวเติมต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Kanking, S., Niltui, P., Wimolmala, E. and Sombatsompop, N. (2012). Use of bagasse fiber ash as secondary filler in silica or carbon black filled natural rubber compound. *Materials and Design*, 41(1), 74-82.
- Sombatsompop, N., Thongsang, S., Markpin, T. and Wimolmala, E. (2004). Fly ash particles and precipitated silica as fillers in rubbers. I. Untreated fillers in natural rubber and styrene-butadiene rubber compounds. *Journal of Applied Polymer Science*, 93, 2119-2130.
- Worathanakul, P., Payubnop, W. and Muangpet, A. (2009). Characterization for post-treatment effect of bagasse ash for silica extraction. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 56, 360-362.
- Barbara H. Stuart. (2004). Infrared spectroscopy: fundamentals and applications. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate. Chichester. England.