

ผลของปริมาณซิลิกาต่อสมบัติของยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยซิลิกาที่มียางธรรมชาติอีพอกไซด์ เป็นสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากัน

วริศรา บรรณาค, ณรงค์ เชื้องชยะพันธุ์, สกฤตน์ พิชัยยุทธ์ และ วรณรัตน์ เชื้องชยะพันธุ์

สาขาเทคโนโลยียาง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี
ตำบลมะขามเตี้ย อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84000

wannarat.p@psu.ac.th

บทคัดย่อ

ซิลิกาเป็นสารเสริมแรงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์ยาง อย่างไรก็ตามเนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยาง ส่งผลให้ซิลิกาเกาะกลุ่มเป็นก้อน การกระจายตัวในเฟสของยางต่ำ ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ ดังนั้นเพื่อปรับปรุงข้อด้อยดังกล่าวจำเป็นต้องใช้สารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) หรือสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากัน (Compatibilizer) โดยในงานวิจัยนี้ยางธรรมชาติผสมซิลิกาและใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่อีพอกไซด์ 25 % (ENR25) ปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของซิลิกา เป็นสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันระหว่างยางธรรมชาติกับซิลิกาและใช้ซิลิกา ตั้งแต่ 0 ถึง 60 phr ศึกษาสมบัติการคงรูป สมบัติเชิงกลและลักษณะพื้นฐานวิทยาของยางธรรมชาติคอมพอสิต ผลการทดลองพบว่ามอดูลัสที่ 100% มอดูลัสที่ 300% และดัชนีการเสริมแรง (M300/M100) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกา แต่ระยะเวลาสกออร์ช (Scorch time) และระยะเวลาคงรูป (Cure time) ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด และอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, Tg) ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ ซิลิกา สารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้

บทนำ

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4-polyisoprene) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติสามารถผลิตใหม่ขึ้นมาทดแทนได้ (Renewable resource) เป็นวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดี คือ มีความยืดหยุ่นและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง มีสมบัติที่ดีเยี่ยมในด้านความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) อีกทั้งมีความร้อนสะสมในการใช้งานต่ำ ทำใหยางธรรมชาติถูกนำไปใช้งานในการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติมีความอ่อนไหวต่อความร้อน ปฏิกิริยาออกซิเดชันและไม่ทนต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เนื่องจากยางธรรมชาติมีพันธะคู่บนสายโซ่หลักและเป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอนล้วน เป็นสาเหตุให้ยางธรรมชาติมีข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน (Juntuek et al., 2011)

ในกระบวนการแปรรูปจะต้องนำยางผสมกับสารเคมี เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติเฉพาะตามการใช้งาน ซึ่งสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญที่จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ได้แก่ สารกระตุ้น สารคงรูปยาง สารป้องกันการเสื่อมสภาพ และสารเสริมแรง เป็นต้น สารเสริมแรงที่ใช้ ได้แก่ เขม่าดำ (Carbon black) และซิลิกา (Silica) ซึ่งสารเสริมแรงทั้งสองนั้นเป็นสารเสริมแรงที่มีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ยางในเชิงวิศวกรรม (Rattanasom et al., 2007) โดยซิลิกาเป็นสารเสริมแรงชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสีสน และในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเพิ่มความแข็งและสมบัติเชิงกลอื่นๆ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยางล้อ เนื่องจากยางคอมพาวนด์ที่ใช้ซิลิกาเป็นสารเสริมแรงให้สมบัติด้านความต้านทานต่อการหมุน (Rolling resistance) ความต้านทานต่อการสึกกร่อน (Wear resistance) และการยึดเกาะบนพื้นเปียก (Wet traction) ที่ดีกว่าการใช้เขม่าดำ (พงษ์ธร, 2550) แต่อย่างไรก็ตามการใช้ซิลิกาเป็นสารเสริมแรงในยางยังมีปัญหาในเรื่องการแตกตัว (Dispersion) และกระจายตัว (Distribution) ของซิลิกา เนื่องมาจากบริเวณพื้นผิวของซิลิกาประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ในปริมาณมาก ทำให้ซิลิกามีความเป็นขั้วสูง ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนี้ทำให้อนุภาคของซิลิกามีอันตรกิริยา

ระหว่างกันสูง (Filler-Filler interaction) ส่งผลให้ซิลิกามีความสามารถในการผสมเข้ากับยางที่ไม่มีขั้วหรือที่มีขั้วต่ำได้ยาก ดังนั้นซิลิกาจึงรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ส่งผลให้ยางคอมพาวนด์มีความหนืดสูงขึ้นในระหว่างกระบวนการแปรรูปยาง เพื่อลดปัญหาดังกล่าวและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมแรงของซิลิกาในยาง จึงมีการใช้สารคู่ควบซิลิโคน (Silane coupling agent) ในการปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกา โดยหมู่แอลคอกซี (Alkoxy group) เช่น หมู่เมทอกซี ($-OCH_3$) หรือหมู่เอทอกซี ($-OC_2H_5$) ของซิลิโคนจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ซิลานอลผ่านปฏิกิริยาซิลานาในเซชัน (Silanization) เกิดเป็นพันธะซิลอกเซน (Si-O-Si) (Sengloyluan et al., 2013) ทำให้ซิลิกามีอันตรกิริยาต่อกันลดลง แยกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายยิ่งขึ้น การปรับปรุงพื้นผิวของซิลิกาสามารถเตรียมได้ก่อนหรือในระหว่างการบดผสม โดยในการเกิดปฏิกิริยาซิลานาในเซชันของ สารคู่ควบซิลิโคนกับซิลิกาที่ทำให้ระหว่างการผสมจะใช้อุณหภูมิสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาซิลานาในเซชันเกิดขึ้นได้ดี (ชญาภา, 2554) แต่การใช้สารคู่ควบซิลิโคนเป็นปฏิกิริยาที่มีความซับซ้อนและปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับสถานะการผสม ได้แก่ อุณหภูมิการผสม เวลาและแรงเฉือนเชิงกล (Kaewsakul et al., 2012) แนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการกระจายตัวของซิลิกาในยางให้มากขึ้น คือการดัดแปรโมเลกุลยางให้มีความเป็นขั้วเพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาให้มากขึ้น เช่น การดัดแปรโมเลกุลยางธรรมชาติให้มีหมู่ฟอสเฟตในการช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา (Cataldo et al., 2002; Sengloyluan et al. 2014)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อเพิ่มมูลค่าและเพิ่มความหลากหลายในการใช้งานให้แก่ยางธรรมชาติ โดยทำการศึกษาผลของปริมาณซิลิกา ใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่ฟอสเฟต 25 % (ENR25) เป็นสารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันระหว่างยางธรรมชาติกับซิลิกาปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของซิลิกา ทำการแปรปริมาณซิลิกาตั้งแต่ 0 – 60 phr ทำการเปรียบเทียบกับยางคอมพาวนด์ที่ไม่ใส่ซิลิกา

วิธีดำเนินการวิจัย

ยางธรรมชาติและสารเคมี

ยางธรรมชาติเกรด STR5L (Natural rubber, NR) ผลิตโดยการยางแห่งประเทศไทย (อ.ส.ย. นาบอน) สารเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างยางกับซิลิกา คือ ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ (Epoxidized natural rubber, ENR) ที่มีปริมาณหมู่ฟอสเฟต 25% ผลิตโดยบริษัท เมืองใหม่กัททรี จำกัด มหาชน สาขาสุราษฎร์ธานี สารกระตุ้นที่ใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ลักษณะเป็นผงสีขาว มีความหนาแน่น 5.57 g/cm^3 ผลิตโดยบริษัท Global Chemical จำกัดและกรดสเตียริก (Stearic oxide) ลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น ไม่ละลายน้ำ มีความหนาแน่น 0.85 g/cm^3 มีสูตรโครงสร้าง $C_{17}H_{35}COOH$ ผลิตโดยบริษัท Imperial Industry Chemical จำกัด ซิลิกา (Silica) เป็นสารตัวเติมเสริมแรงสีขาว (White reinforcing filler) เกรด Ultrasil VN3 มีค่า CTAB $165 \text{ m}^2/\text{g}$ ผลิตโดยบริษัท Evomik Industries AG จำกัด สารตัวเร่งได้แก่ ไดเบนโซไทอะซัลไดซัลไฟด์ (Dibenzothiazyl disulfide, MBTS) และ ไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenylguanidine, DPG) ผลิตโดยบริษัท Flexsys จำกัด กำมะถัน (Sulfur) เป็นสารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent หรือ Curing agent) ลักษณะเป็นผงสีเหลือง ผลิตโดยบริษัท Ajax Chemical จำกัด

การเตรียมยางคอมพาวนด์

ลำดับการผสมยางคอมพาวนด์ผสมซิลิกาด้วยเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) ขนาดห้องผสม 500 cm^3 ใช้อุณหภูมิเริ่มต้นการผสมเท่ากับ 90°C ความเร็วโรเตอร์ (Rotor speed) 60 rpm และค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor) เท่ากับ 0.70 แสดงดังตารางที่ 1 โดยสูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปริมาณของซิลิกา แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ลำดับการผสมยางคอมพาวนด์

Mixing procedure	Cumulative time (min)
ขั้นตอนที่ 1 : Internal mixer	
- บดยาง NR และ ENR25	0
- เติมซิลิกาครึ่งหนึ่ง	2
- เติมซิลิกาอีกรครึ่งหนึ่งกับน้ำมันอะโรมาติก	7
- เติมซิงค์ออกไซด์และกรดสเตียริก	12
- นำยางออก	15
ขั้นตอนที่ 2 : Two roll mill	
- เติมไดฟีนิลกาวินดีน ไตเบนโซโทอะซิลไดซัลไฟด์และกำมะถัน	5

ตารางที่ 2 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาปริมาณของซิลิกาตั้งแต่ 0 – 60 phr

Materials	Formula				
	0	10	20	40	60
STR5L	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Zinc oxide	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Stearic acid	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ultrasil VN3	0	10	20	40	60
Aromatic oil	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
MBTS	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
DPG	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfur	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
ENR25	-*	1.5*	3*	6*	9*

*15wt% of silica

การทดสอบสมบัติการคงรูป

ทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบตายเคลื่อนที่ (Moving die rheometer) โดยนำยางคอมพาวนด์มาตัดเป็นชิ้นเล็กใส่ในเตา เพื่อทดสอบลักษณะการเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150°C ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเทคนิค MDR จะบันทึกค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิด (Torque) กับเวลา (Time) เรียกว่า Cure curve ที่สามารถบันทึกค่าต่างๆได้ดังนี้ แรงบิดต่ำสุด (Minimum torque, M_L) แรงบิดสูงสุด (Maximum torque, M_H) ระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time, t_{s2}) ค่าความแตกต่างของแรงบิด ($M_H - M_L$) ระยะเวลาคงรูป (Cure time, t_{90}) และดัชนีอัตราการคงรูป (Cure rate index, CRI)

การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

สมบัติแรงดึงของยาง ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) ระยะยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) โมดูลัสที่ 100% และ 300% (100% Modulus และ 300% Modulus) มาตรฐานที่ใช้ทดสอบแรงดึงคือ ASTM D 412 ได้กำหนดอัตราเร็วในการดึงเท่ากับ 500 mm/min โดยชิ้นทดสอบที่ใช้จะเป็นรูปดัมเบลล์

การทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical thermal analysis, DMTA)

สมบัติทางกลเชิงพลวัตเป็นการทดสอบสมบัติวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์ โดยนำชิ้นทดสอบอุณหภูมิตั้งแต่ -100 ถึง 100°C ซึ่งมีอัตราการให้อุณหภูมิ 3°C และใช้โหมดการดึง

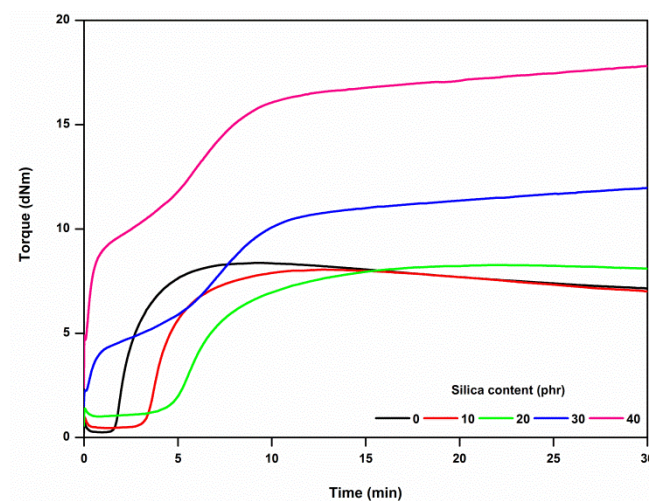
ลักษณะสัณฐานวิทยา (Scanning electron microscopy, SEM)

ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์สามารถศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) ซึ่งชิ้นทดสอบต้องนำไปแช่ในไตรเจนเหลวจนกระทั่งชิ้นทดสอบแข็งตัว จากนั้นนำชิ้นทดสอบมาหักแล้วทำการเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำก่อนทำการทดสอบ

ผลและอภิปรายผล

สมบัติการคงรูป

ผลของการแปรปริมาณซิลิกาของยางคอมพาวนด์ที่มีต่อสมบัติการคงรูป แสดงดังรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่า การแปรปริมาณซิลิกาตั้งแต่ 0-60 phr ทำให้ระยะเวลาสกอริช (Scorch time) และระยะเวลาคงรูป (Cure time) นั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกาประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจะทำหน้าที่ดูดซับสารตัวเร่ง ส่งผลให้สารตัวเร่งมีประสิทธิภาพลดลง ยางคอมพาวนด์เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและวัลคาไนซ์ได้ช้าลง ซึ่งสอดคล้องกับค่าดัชนีการคงรูป (CRI) ที่มีค่าลดลง บ่งบอกว่ายางคอมพาวนด์มีการวัลคาไนซ์ที่ช้าลง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณซิลิกายังทำให้ ML และ MH เพิ่มขึ้น เพราะปริมาณซิลิกาที่มากขึ้นไปขัดขวางการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลของยาง ความหนืดของยางคอมพาวนด์จึงเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความแตกต่างของแรงบิด ($M_H - M_L$) มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าความหนาแน่นของการเชื่อมโยงใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 3



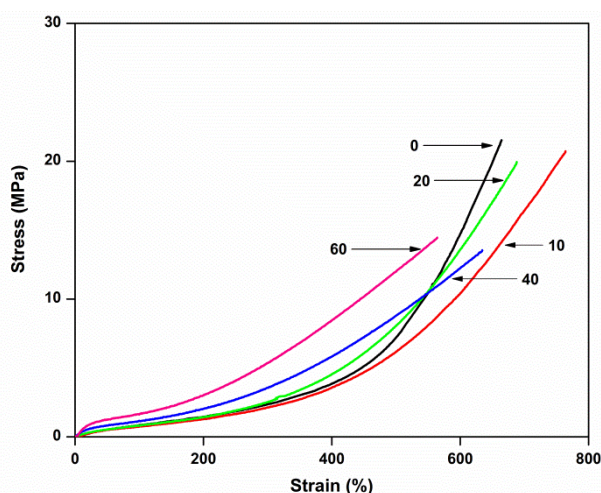
รูปที่ 1 สมบัติการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณซิลิกา ตั้งแต่ 0-60 phr

ตารางที่ 3 ลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวนด์ที่แปรปริมาณซิลิกา ตั้งแต่ 0-60 phr

Silica content (phr)	Cure characteristics					
	t_{s2} (min)	t_{90} (min)	M_H (dNm)	M_L (dNm)	$M_H - M_L$ (dNm)	CRI (min^{-1})
0	1.99	4.84	8.16	0.52	7.64	35.09
10	3.90	7.49	7.93	0.69	7.24	27.86
20	4.31	7.95	8.00	0.78	7.22	27.47
40	3.09	14.41	11.90	4.56	7.34	8.83
60	4.97	16.48	14.08	6.22	7.86	8.69

สมบัติเชิงกล

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดและตารางแสดงสมบัติการทดสอบแรงดึงแสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 4 จากผลการทดลองพบว่า สมบัติมอดุลัสที่ 100 และ 300% และดัชนีการเสริมแรง (M_{300}/M_{100}) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นถึง 50 phr แต่มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาเป็น 60 phr อาจเป็นผลเนื่องมาจากการเติมซิลิกา ส่งผลให้ยางมีความแข็งตึง (Stiffness) มากขึ้นและมีโอกาสเกิดโครงข่ายระหว่างอนุภาคของซิลิกากับยางวัลคาไนซ์ (จุฬาทิพย์ และคณะ, 2556) ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และระยะยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาอาจทำให้อนุภาคของซิลิกายู่ใกล้กันมาก จนทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางและสารตัวเติมลดลง ส่งผลให้ซิลิกามีแนวโน้มเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคซิลิกาด้วยตัวเอง ทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อนแอกกรีเกตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดเป็นจุดอ่อนในยางวัลคาไนซ์ ค่าความต้านทานต่อแรงดึงที่ได้ลดลง นอกจากนี้ซิลิกาที่มีการจับตัวกันเป็นก้อนแอกกรีเกตขนาดใหญ่ยังไปขัดขวางการเคลื่อนไหวยาวสายโซ่โมเลกุลของยางขณะยืด ระยะยืด ณ จุดขาดจึงลดลง (Sae-oui et al. 2007) การเกาะกลุ่มกันของซิลิกายืนยันได้ลักษณะสัญญาณที่ทดสอบด้วยเทคนิค SEM ในรูปที่ 4 และค่า Tg ที่มีค่าลดลงจากผลสมบัติเชิงกลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ ENR ที่มีหมู่ฟอกซี 25 % ปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของซิลิกาที่สภาวะการบดผสมดังกล่าว ไม่สามารถช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางกับซิลิกาได้ อาจเป็นผลมาจากอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับยาง ENR ที่เกิดขึ้นเกิดผ่านแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับหมู่ฟอกซีเท่านั้น และความแตกต่างของความเป็นขั้วระหว่างยางทั้งสองชนิดจึงส่งผลให้เกิดการแยกเฟสระหว่างยางธรรมชาติกับ ENR25 (Sengloyluan et al., 2014) และระหว่างซิลิกากับยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น สมบัติเชิงกลที่ได้จึงมีค่าลดลง



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิลิกา ตั้งแต่ 0-60 phr

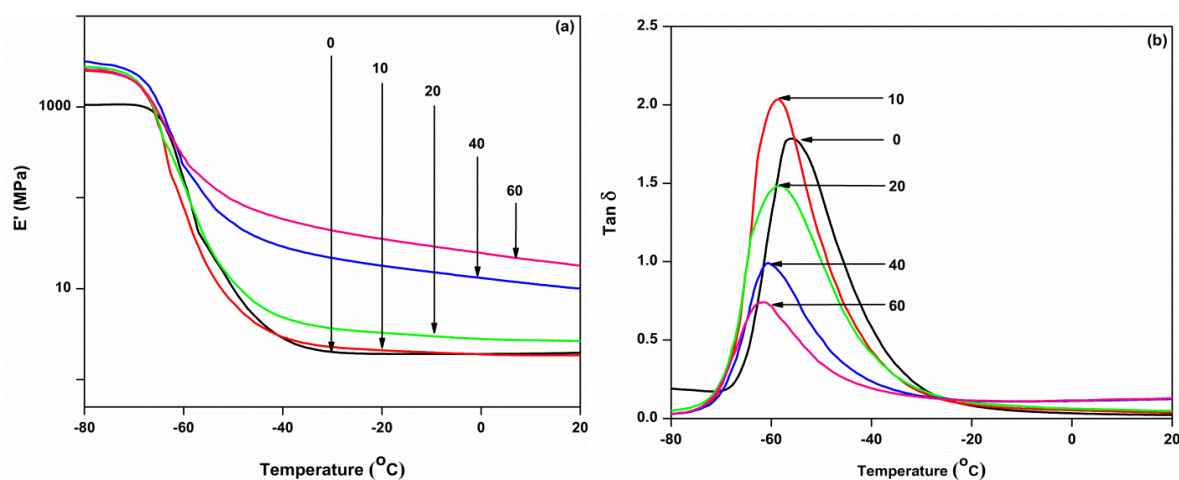
ตารางที่ 4 สมบัติเชิงกลและอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Tg) ของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิลิกาตั้งแต่ 0-60 phr

Silica content (phr)	100%Modulus (MPa)	300%Modulus (MPa)	M300/M100	TS. (MPa)	EB. (%)	Tg (°C)	at tan δ peak
0	0.86 $\pm$ 0.05	2.37 $\pm$ 0.31	2.75	21.54 $\pm$ 1.52	671 $\pm$ 34	-56.1	1.78
10	0.81 $\pm$ 0.04	2.40 $\pm$ 0.15	2.96	20.61 $\pm$ 0.28	678 $\pm$ 35	-58.7	2.04
20	0.82 $\pm$ 0.01	2.53 $\pm$ 0.10	3.08	20.75 $\pm$ 0.54	658 $\pm$ 31	-58.7	1.48
40	0.87 $\pm$ 0.03	2.65 $\pm$ 0.13	3.04	14.03 $\pm$ 0.57	650 $\pm$ 25	-60.9	0.99
60	0.78 $\pm$ 0.03	2.28 $\pm$ 0.25	2.92	14.09 $\pm$ 0.78	608 $\pm$ 28	-61.8	0.74

สมบัติเชิงกลพลวัต

จากรูปที่ 3(a) แสดงค่ามอดุลัสสะสมของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิลิกาจะเห็นได้ว่าค่ามอดุลัสสะสมสูงขึ้นเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างซิลิกากับซิลิกา ส่งผลให้อนุภาคของซิลิกาอยู่ใกล้กันและเกาะกลุ่มกันเป็นโครงสร้างตาข่าย (Network) มากขึ้น นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ว่าปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่ามอดุลัสสะสมเพิ่มขึ้นอาจเกิดจากการที่ซิลิกาแตกตัวได้ไม่ดีในระหว่างการบดผสมจึงส่งผลให้มีค่าความต้านทานต่อแรงดึงลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น (Rattanasom et al. 2007)

รูปที่ 3(b) ค่าแทนเดลต้าของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิลิกา พบว่าความสูงของค่าแทนเดลต้ามี่แนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น และจากตารางที่ 4 ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของยางวัลคาไนซ์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เพิ่มขึ้น แสดงว่าอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกาน้อยลงเมื่อปริมาณซิลิกามากขึ้น ซึ่งให้ตรงข้ามกับงานวิจัย Sarkawi และคณะ (2014) ที่ใช้ไซเลนเป็นสารคู่ควบในยาง/ซิลิกาคอมพอสิต พบว่าคอมพอสิตที่มีการใช้ไซเลนจะให้ค่า Tg สูงกว่ายางคอมพอสิตที่ไม่มีการเติมไซเลนเป็นผลมาจากการเคลื่อนไหวของสายโซ่โมเลกุลยางเกิดได้ยากขึ้น เนื่องจากไซเลนช่วยปรับปรุงอันตรกิริยาของยางธรรมชาติและซิลิกาเพิ่มมากขึ้น (Sengloyluan et al. 2014)

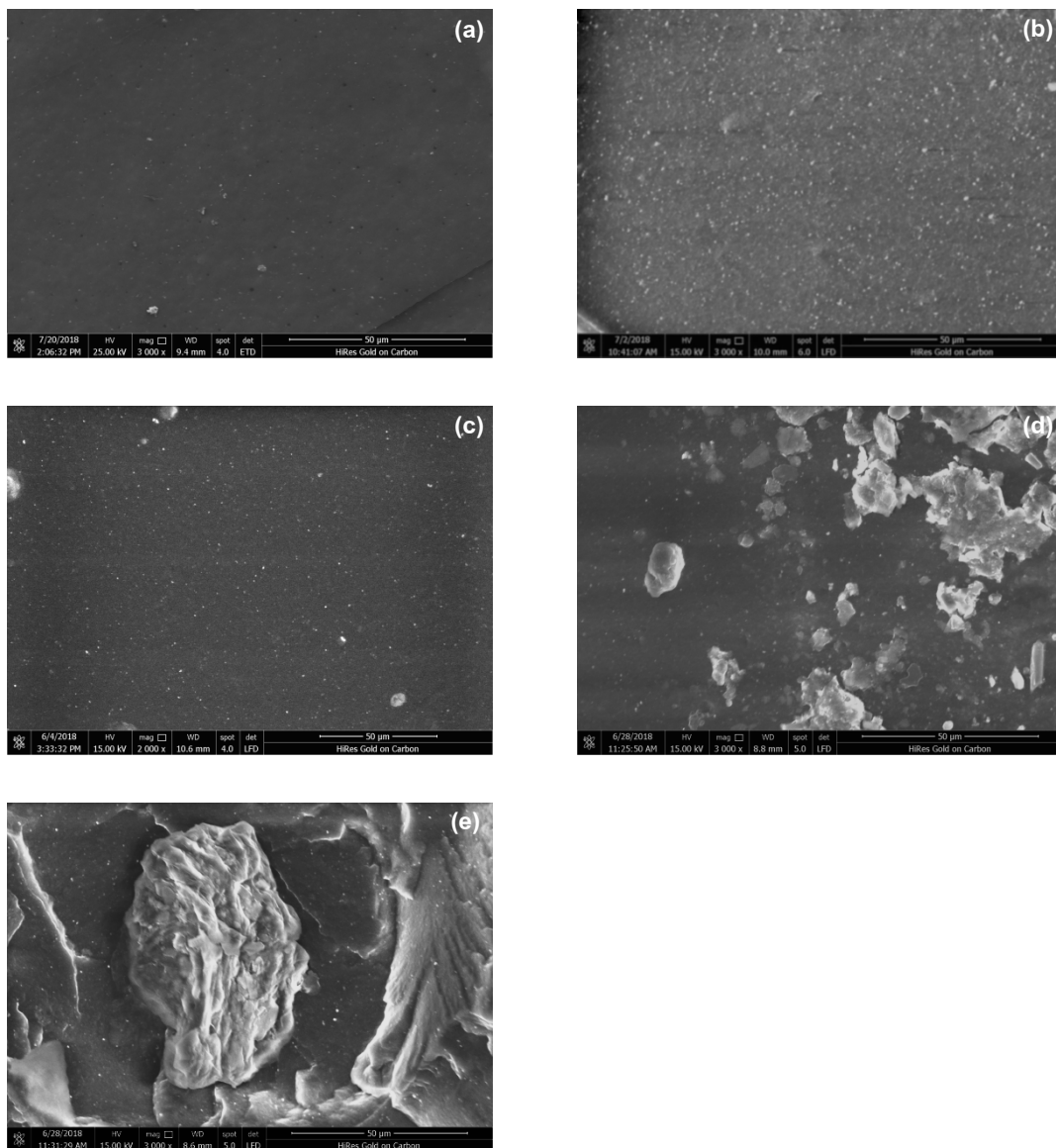


รูปที่ 3 สมบัติเชิงกลพลวัตของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิลิกา ตั้งแต่ 0 – 60 phr (a) ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, E'), (b) ค่าแทนเดลต้า (Tan δ)

ลักษณะพื้นฐานวิทยา

สมบัติการกระจายตัวของซิลิกาเป็นปัจจัยที่สำคัญของยางคอมพาวนด์ โดยรูปที่ 4 แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิลิกา พบว่า รูปที่ 4(b) และ 4(c) ที่มีปริมาณซิลิกา 10 และ 20 phr จะเห็นว่ามีการกระจายตัวของซิลิกาค่อนข้างดี กล่าวคือไม่ค่อยมีซิลิกาเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ซึ่งสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึงของยางคอมพาวนด์ที่มีปริมาณซิลิกา 10

และ 20 phr ให้ค่าที่สูงกว่ายางคอมพาวนด์ที่มีปริมาณซิลิกา 40 และ 60 phr เนื่องจากเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคซิลิกาอยู่ใกล้กัน ส่งผลให้อนตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมลดลงซิลิกาจึงมีแนวโน้มรวมตัวเป็นก้อนแอกกรีเกตที่มีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่ามอดูลัสสะสมเพิ่มขึ้นอีกด้วย ในรูปที่ 4(d) และ 4(e) โดยเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นที่ 40 และ 60 phr เห็นว่าซิลิกามีการกลุ่มกันเป็นก้อนอย่างชัดเจน



รูปที่ 4 ลักษณะสัณฐานวิทยาของยางวัลคาไนซ์ที่แปรปริมาณซิลิกา (a) 0 phr (b) 10 phr (c) 20 phr (d) 40 phr และ (e) 60 phr

สรุปผลการวิจัย

การใช้ยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่อีพอกไซด์ 25% ที่ปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของซิลิกา ยังไม่สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ระหว่างยางกับซิลิกา โดยยางคอมพอสิตให้ความต้านทานต่อแรงดึง ระยะยืด ณ จุดขาด อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงสถานะคล้ายแก้ว และการกระจายตัวของซิลิกาลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับยางคอมพาวนด์ที่ไม่ใส่ซิลิกา

ข้อเสนอแนะ

อาจต้องปรับเปลี่ยนสถานะในการบดผสมยาง ปริมาณยางและปริมาณหมู่อีพอกไซด์ของยาง ENR ที่ใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2559 รหัสโครงการ SIT590171c และทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ประจำปีงบประมาณ 2559 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทุนสนับสนุนค่าธรรมเนียมการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาและทุนสนับสนุนการเดินทางไปนำเสนอผลงานวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2561 คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี

บรรณานุกรม

- Cataldo, F. (2002). Preparation of silica-based rubber compounds without the use of a silane coupling agent through the use of epoxidized natural rubber. *Macromolecular Materials and Engineering*, 287(5), 348-352.
- Juntuek, P., Ruksakulpiwat, C., Chumsamrong, P., & Ruksakulpiwat, Y. (2011). Glycidyl methacrylate grafted natural rubber: synthesis, characterization, and mechanical property. *Journal of Applied Polymer Science*, 122(5), 3152-3159.
- Kaewsakul, W., Sahakaro, K., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. (2015). Mechanistic aspects of silane coupling agents with different functionalities on reinforcement of silica-filled natural rubber compounds. *Polymer Engineering & Science*, 55(4), 836-842.
- Rattanasom, N., Saowapark, T., & Deeprasertkul, C. (2007). Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. *Polymer Testing*, 26(3), 369-377.
- Sae-oui, P., Sirisinha, C., Wantana, T., & Hatthapanit, K. (2007). Influence of silica loading on the mechanical properties and resistance to oil and thermal aging of CR/NR blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(5), 3478-3483.
- Sarkawi, S.S., Dierkes, W.K., & Noordermeer, J.W.M. (2014). Elucidation of filler-to-filler and filler-to-rubber interactions in silica-reinforced natural rubber by TEM Network Visualization, 54, 118-127.
- Sengloyluan, K., Sahakaro, K., & Noordermeer, J. W. (2013). Silica-reinforced natural rubber compounds compatibilized through the use of epoxide functional groups and TESPT combination. *Advanced Materials Research*, 844, 272-275.
- Sengloyluan, K., Sahakaro, K., Dierkes, W. K., & Noordermeer, J. W. (2014). Silica-reinforced tire tread compounds compatibilized by using epoxidized natural rubber. *European Polymer Journal*, 51, 69-79.
- จุฑาทิพย์ อาจชมภู, เตียว สายจันทร์ และขวัญฤทัย บุญส่ง. (2556). ประสิทธิภาพการลดพลังงานการผสมและสมบัติเชิงกลของยางวัลคาไนซ์จากยางธรรมชาติซิลิกามาสเตอร์แบท. ใน การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5 (น. 241). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- ชญาภา นิมสุวรรณ. (2554). การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างสารคู่ควบไซเลน Si-69 กับ Si-264 วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมไทย, 5(4), 32-42.
- พงษ์ธร แซ่อูย. (2550). การใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติมในยาง. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมไทย, 1(2), 30-38.
- พงษ์ธร แซ่อูย. (2550). สารเคมียาง. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- เอกชัย วิมลมาลา, ชีระศักดิ์ หมากรผิน และณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. (2549). การศึกษาวัสดุเชิงประกอบระหว่างยางเอสปีอาร์ที่มีถั่วลอมเป็นสารเติมแต่งโดยใช้สารคู่ควบไซเลนชนิด Si69 ใช้ปรับปรุงผิวถั่วลอม. ว. วิจัยและพัฒนา มจร., 2(3), 353-373.