

การอ่อนตัวของความเค้นและพลังงานสูญเสียของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำ Stress Softening and Loss Energy of Carbon Black-Filled Natural Rubber

กิตตินันท์ ช่วยดำ¹, ศศิลักษณ์ ชีทอง² และ วัชรินทร์ สายน้ำใส³

^{1,2,3} Program in Rubber and Polymer Technology, Faculty of Science and Technology, SongkhlaRajabhat University, ¹ phone: 09-4061-1897, e-mail: kittinan.14584@gmail.com

² Phone: 08-4825-8595, e-mail: Ming_Merit@hotmail.com

³ Phone: 08-9599-7455, e-mail: watcharin.sa@skru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติมเขม่าดำเกรด N660 ที่ผสมในยางธรรมชาติต่อสมบัติด้านการอ่อนตัวของความเค้นและพลังงานสูญเสียของยางวัลคาไนซ์โดยนำยางธรรมชาติชนิดยางแท่งมาตรฐานเกรด 5 แอล (STR 5L) มาผสมกับสารตัวเติมเขม่าดำเกรด N660 ปริมาณ 0, 25 และ 50 phr (ส่วนต่ออย่าง 100 ส่วนโดยน้ำหนัก) พบว่ายางธรรมชาติผสมเขม่าดำเกรด N660 มีสมบัติการอ่อนตัวของความเค้น ความเครียดคงรูปถาวร และพลังงานสูญเสียของยางสูงขึ้น ตามการเพิ่มปริมาณของเขม่าดำที่ผสมลงไปในยางธรรมชาติ ในขณะที่จำนวนรอบของการถูกกระทำอย่างต่อเนื่องต่อยางธรรมชาติผสมเขม่าดำนั้น เมื่อจำนวนรอบของการถูกกระทำเพิ่มขึ้น ความเครียดคงรูปถาวรของยางมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนการอ่อนตัวของความเค้น และพลังงานสูญหามีค่าลดลง

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ, เขม่าดำ, การอ่อนตัวของความเค้น, พลังงานสูญเสีย

Abstract

This work studies the effect of carbon black N6 6 0 content in carbon black- filled natural rubber on stress softening and loss energy of natural rubber vulcanizates. Carbon black content was varied at 0, 25 and 50 parts (by weight) per hundred parts of rubber (phr), respectively. It was found that the stress softening, permanent set strain, and loss energy increased with increasing the carbon black loading in natural rubber. Increasing the number of cycles of cyclic deformation, the permanent set strain increased, while the stress softening, and loss energy decreased.

Keywords: Natural rubber, Carbon black, Stress softening, Loss energy

บทนำ

ยางธรรมชาติเป็นสารพอลิเมอร์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก การจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบ cis-1,4-polyisoprene ก่อนการใช้งานจึงจำเป็นต้องบดให้ نرم (masticate) เพื่อให้การบดผสมยางและสารเคมีทำได้ง่ายขึ้น (พรพรรณ, 2540) ยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanization) มีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก นั่นคือ ยางสามารถยืดและไหลได้เมื่อได้รับแรงกด ซึ่งเป็นสมบัติของพลาสติก เมื่อเอาแรงออกยางสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ซึ่งเป็นสมบัติของอีลาสติก ดังนั้น เมื่อยางมีสมบัติทั้งพลาสติกและอีลาสติก ทำให้ยางยุบตัวหรือยืดเมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึง แต่เมื่อคลายแรงกระทำออก ยางจะคืนรูปกลับแต่ไม่เท่าเดิม ส่วนยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วสามารถยืดได้ถึงประมาณ 1000% หรือมากกว่านั้น (Gent, 1992; Gent & Mars, 2014; Roberts, 1998) สมบัติในการยืดได้สูงนี้ ทำใหยางธรรมชาตินี้สามารถทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการยืดได้สูง เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ ทำให้สามารถตกผลึกได้เมื่อดึง (Toki & Hsiao, 2003; Tosaka et al., 2004; Toki et al., 2005) ทำใหยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง

ยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมที่วัลคาไนซ์แล้วเมื่อถูกกระทำอย่างต่อเนื่องจะมีการอ่อนตัวของความเค้น (stress softening) หรือเกิดการแตกหักเสียหายได้ ปรากฏการณ์การอ่อนตัวของความเค้นนี้รู้จักกันทั่วไปในชื่อผลของมุลลินส์ (Mullins effect) นอกจากนี้ยางซึ่งเป็นวัสดุประเภทหยุ่นหนืด (viscoelastic material) จะเกิดการสูญเสียพลังงานจากแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือแรงที่ใช้ในการบิดรูปจะมากกว่าแรงที่ใช้ในการคืนตัวกลับ โดยพลังงานที่สูญเสียไปนี้จะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนสะสม (heat build-up)

การใช้ประโยชน์ของยางธรรมชาติในทางวิศวกรรมจะมีการเติมสารตัวเติมชนิดเสริมแรงบางชนิด เช่น เขม่าดำ หรือ ซิลิกา (Donnet & Custodero, 2014) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และความทนทานให้กับยางธรรมชาติ โดยสารตัวเติมเหล่านี้จะยึดติดกับโมเลกุลยางด้วยอันตรกิริยาทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งเขม่าดำเป็นสารตัวเติมที่สำคัญมากในการผลิตยางล้อรถ และผลิตภัณฑ์ด้านวิศวกรรมอื่นๆ

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำเกรด N660 ปริมาณ 0, 25, และ 50 phr (parts per hundred rubber) ที่มีต่อการอ่อนตัวของความเค้นและการสะสมพลังงานของยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำเกรด N660 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

ผสมยางคอมปอนด์ตามสูตรการทดลองในตารางที่ 1 โดยนำยางธรรมชาติมาบดผสมกับสารเคมีตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3182-94 ซึ่งมีขั้นตอนและระยะเวลาในการบดผสมดังตารางที่ 2 แล้วนำยางคอมปอนด์ที่เตรียมได้ มาทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ด้วยเครื่อง Moving die Rheometer (MDR) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2084-95 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสอัดเข้ายางคอมปอนด์เป็นแผ่นทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3182-94

ตารางที่ 1 ปริมาณของยางและสารเคมีในยางคอมปอนด์ที่ใช้ในการทดลอง

ยางและสารเคมี	ปริมาณ (phr)		
	CB0	CB25	CB50
STR 5L ^a	100	100	100
Stearic acid	1	1	1
Zinc oxide	5	5	5
MBTS	1	1	1
DPG	0.75	0.75	0.75
Carbon black N660	0	25	50
Sulphur	2.5	2.5	2.5

^aSTR5L: ยางธรรมชาติ

ตารางที่ 2 ขั้นตอนและระยะเวลาในการบดผสมยางกับสารเคมี

ขั้นที่	วิธีการ	เวลา (นาที)
1	บดยาง	2
2	เติมกรดสเตียริก	1
3	เติมซิงค์ออกไซด์	1
5	เติมสารตัวเร่ง	2
6	เติมเขม่าดำเกรด N660	5
7	เติมกำมะถัน	2
8	ม้วนยางเป็นแท่ง แล้วใส่ด้านปลายผ่านลูกกลิ้ง	10 ครั้ง

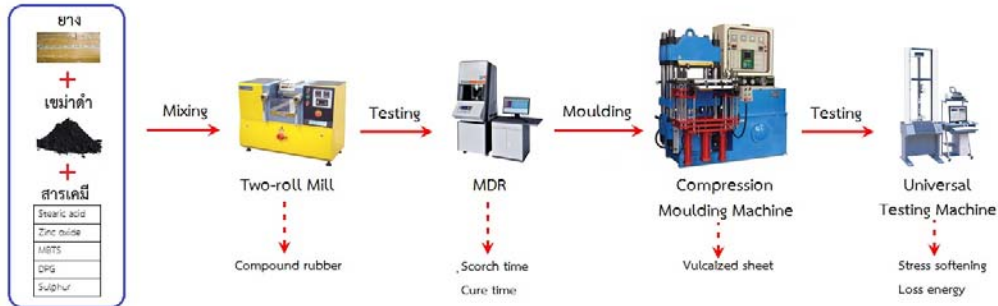
จากนั้นนำแผ่นทดสอบมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบล (dumb-bell) แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ด้วยอัตราเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตร/นาทีโดยดึงยางให้ยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์แล้วให้หดตัวกลับ ในโหมด cycle จำนวน 7 รอบ บันทึกค่าความเค้นสูงสุด (maximum stress) และความเครียดคงรูปถาวร (permanent set strain) และคำนวณพลังงานที่สูญหายไปในเรื่องยาง (Hysteresis loss energy) ดังสมการที่ (1) ทำการทดสอบ 5 ชิ้นทดสอบ รายงานผลด้วยค่าเฉลี่ย

$$\text{Hysteresis loss energy (kJ/m}^2\text{)} = A_L - A_U \quad (1)$$

โดยที่ A_L = พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้น (MPa) กับระยะยืด (mm) ขาขึ้น (kJ/m²)

A_U = พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้น (MPa) กับระยะยืด (mm) ขาลง (kJ/m²)

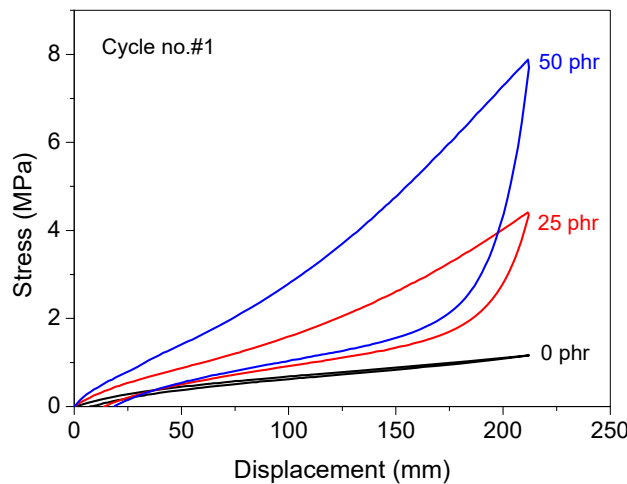
รูปที่ 1 แสดงแผนผังสรุปการดำเนินการทดลองในงานวิจัยนี้



รูปที่ 1 แผนผังการผสมยางคอมเพาเนนต์ การเตรียมชิ้นทดสอบ และการทดสอบสมบัติด้านการอ่อนตัวของความเค้น และพลังงานสูญเสียในงานวิจัยนี้

ผลการวิจัย

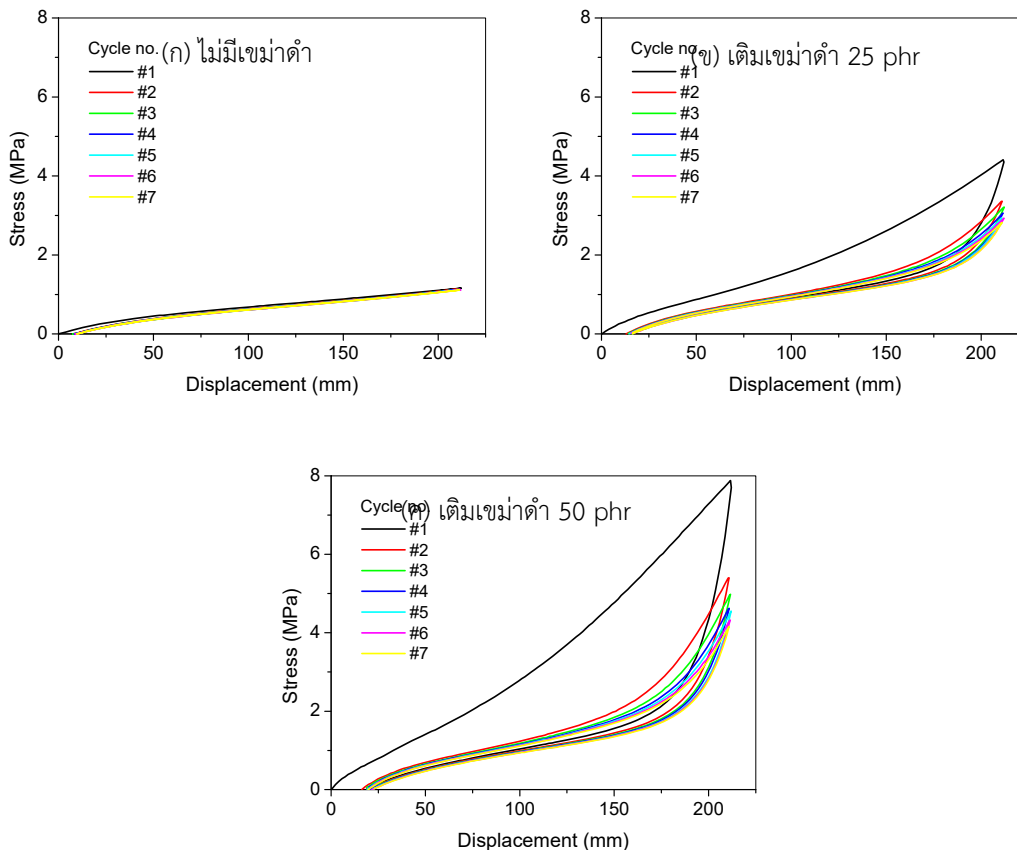
ความเค้นในการดึงรอบแรกของยางธรรมชาติที่ไม่มีและมีเขม่าดำเกรด N660 เป็นสารตัวเติมแสดงดังรูปที่ 2 จะเห็นว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม มีค่าความเค้นของการดึงรอบแรกต่ำกว่าความเค้นของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมปริมาณ 25 และ 50 phr ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (พรพรรณ, 2528) เมื่อผสมเข้าไปในยางธรรมชาติสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลยางกับเขม่าดำทั้งทางกายภาพและทางเคมีทำให้สามารถส่งผ่านแรงกระทำจากภายนอกไปสะสมในอนุภาคของเขม่าดำได้ส่งผลให้ต้องใช้แรงดึงมากขึ้นเพื่อให้ผิดรูปหรือยืดออก



รูปที่ 2 เปรียบเทียบความเค้นกับระยะยืดรอบแรกของยางธรรมชาติที่ไม่มีเขม่าดำและผสมเขม่าดำเกรด N660 ปริมาณ 25, และ 50 phr เป็นสารตัวเติม

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยืดของยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม และยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำเกรด N660 เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 25, และ 50phr ในการดึงให้ยืดแล้วปล่อยให้ยางหดตัวกลับด้วยอัตราเร็วในการดึงยืดและหดกลับเท่ากับ 500 มิลลิเมตร/นาที โดยดึงให้ยางยืด-หดจำนวน 7 รอบ แสดงดังรูปที่ 3(ก) รูปที่ 3(ข) และ รูปที่ 3(ค) ตามลำดับ

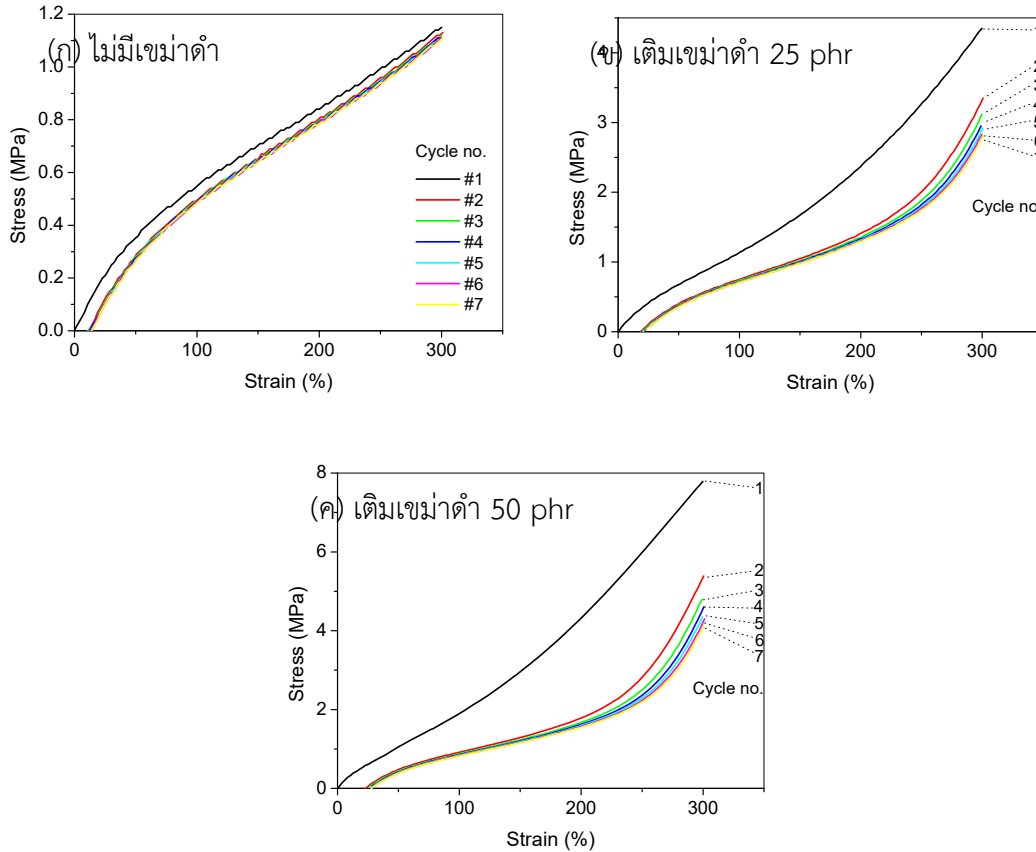
ค่าความเค้นของการดึงให้ยางยืดออกในรอบแรกมีค่าสูงกว่าความเค้นของการหดกลับของยาง โดยในการหดตัวกลับของยางนั้น ยางจะไม่กลับสู่ตำแหน่งเดิมได้อย่างสมบูรณ์ กล่าวคือค่าความเค้นจะเป็นศูนย์ที่ความเครียดค่าหนึ่งซึ่งถือเป็นการคงรูปอย่างถาวร นอกจากนี้ค่าความเค้นในการยืดยางดังกล่าวยังมีค่าสูงกว่าความเค้นในการยืดยางรอบต่อ ๆ มา ซึ่งจะได้พิจารณาการลดลงของค่าความเค้นและความเค้นที่คงรูปอย่างถาวรต่อไป ส่วนความแตกต่างระหว่างความเค้นของการดึงให้ยางยืดออกกับความเค้นของการหดกลับของยางในแต่ละรอบของการผิดรูป สามารถคำนวณหาพลังงานสูญเสียหรือพลังงานที่สะสมในเนื้อยางตามสมการที่ (1) ต่อไป ยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมเขม่าดำ N660 มีค่าความเค้นน้อยที่สุด ซึ่งน้อยกว่ายางที่ผสมเขม่าดำปริมาณ 25 และ 50 phr ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง เมื่อผสมเข้าไปในยางสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลยางกับเขม่าดำทั้งทางกายภาพและทางเคมี ทำให้สามารถส่งผ่านแรงกระทำจากภายนอกไปสะสมในอนุภาคของเขม่าดำได้ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เป็นผลให้ยางสามารถรับแรงกระทำจากภายนอกได้สูงมากขึ้นตามปริมาณของเขม่าดำที่ผสมอยู่ในยาง



รูปที่ 3 ความเค้นกับระยะยืดจากการยืด-หดอย่างต่อเนื่องจำนวน 7 รอบ ของยางธรรมชาติที่ไม่มีเขม่าดำและผสมเขม่าดำเกรด N660 ปริมาณ 25, และ 50 phr เป็นสารตัวเติม

การอ่อนตัวของความเค้นหรือผลของมุลินส์ของยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม และมีเขม่าดำเกรด N660 ปริมาณ 25, และ 50 phr เป็นสารตัวเติมที่ถูกดึงให้ยืด-หดอย่างต่อเนื่องจำนวน 7 รอบ แสดงดังรูปที่

4(ก), 4(ข), และ 4(ค) ตามลำดับ พบว่าเมื่อจำนวนรอบที่ดึงให้ยางยืด-หดเพิ่มขึ้น ความเค้นของยางทั้งที่ไม่มีและมีส่วนเติมมีค่าลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น โดยในรอบที่สองค่าความเค้นจะลดลงหลังจากการดึงให้ยางยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์ในรอบแรกค่อนข้างมาก หลังจากนั้นในรอบต่อ ๆ มา ค่าความเค้นลดลงอีกเล็กน้อย



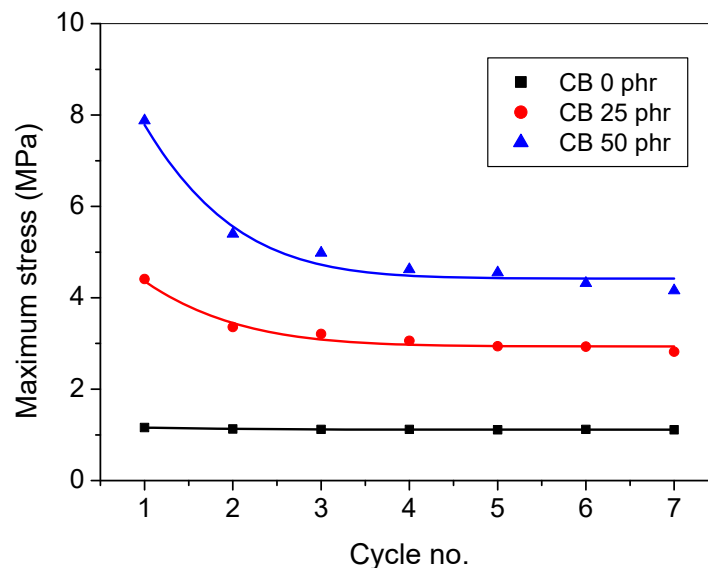
รูปที่ 4 ความเค้นกับความเครียดของการดึงให้ยางยืดออกจำนวน 7 รอบอย่างต่อเนื่องของยางธรรมชาติที่ไม่มีเขม่าดำและผสมเขม่าดำเกรด N660 ปริมาณ 25, และ 50 phr เป็นสารตัวเติม

ยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมมีการอ่อนตัวของความเค้นน้อยกว่ายางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติม ซึ่งในยางที่ไม่มีสารตัวเติมนี้อ่อนตัวของความเค้นอาจเป็นผลมาจากการดึงยางให้ยืดออกในรอบแรก ทำให้เกิดการแตกหักของโซ่โมเลกุลยาง (bond rupture) หรือพันธะระหว่างโมเลกุลที่อ่อนแอ (Blanchard & Parkinson, 1952; Bueche, 1960; Diani et al., 2006) การคลายการเกี่ยวพัน (disentanglement) ของโซ่โมเลกุล (Hanson et al., 2005) หรือการจัดเรียงตัว (orientation) ของโซ่โมเลกุลยาง (Qi & Boyce, 2005) เมื่อดึงให้ยางยืดออกในรอบต่อ ๆ มา จึงทำให้มีค่าความเค้นลดลง ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเหล่านี้ ยังส่งผลให้ยางเกิดการคงรูปถาวร ไม่สามารถคืนกลับสู่รูปร่างเดิมได้อย่างสมบูรณ์

ส่วนในยางธรรมชาติที่มีเขม่าดำเป็นสารตัวเติมนั้น การอ่อนตัวของความเค้นนอกเหนือจากสาเหตุที่กล่าวไปในยางที่ไม่มีสารตัวเติมแล้ว ยังอาจจะเป็นผลเนื่องมาจากเขม่าดำที่เติมลงไปด้วย กล่าวคือ การแตกหัก

ของโครงสร้างเขม่าดำหรือการแตกหักของพันธะระหว่างโมเลกุลยางกับอนุภาคเขม่าดำ (Kraus et al., 1996; Mullins, 1950) หรือการเลื่อนไถล (Molecules slipping) ของโมเลกุลยางกับอนุภาคของเขม่าดำ (Houwink, 1956; Hanson et al., 2005) ส่งผลให้ค่าความเค้นลดต่ำลงและความเครียดคงรูปถาวรสูงขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติม

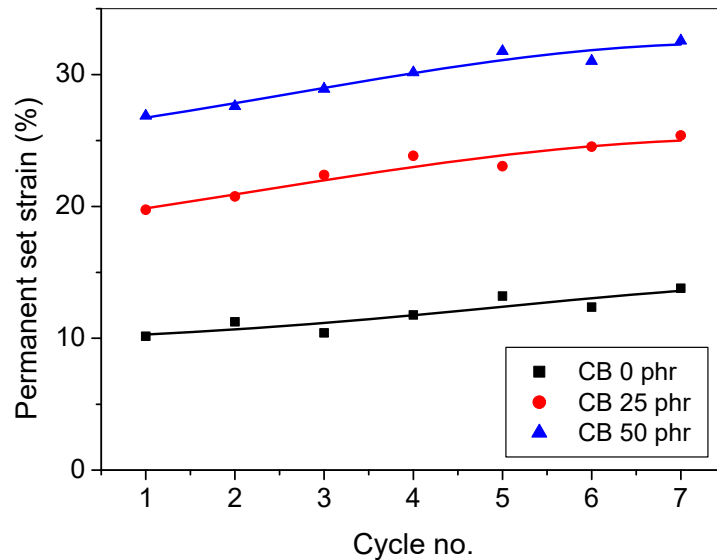
ความเค้นสูงสุดในการดึงให้ยางยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์ในแต่ละรอบ แสดงดังรูปที่ 5 พบว่า ยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมมีค่าความเค้นสูงสุดต่ำกว่ายางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำปริมาณ 25, และ 50 phr ตามลำดับ นั่นคือ ยางที่ไม่มีสารตัวเติมจะใช้แรงน้อยที่สุดในการดึงให้ผิดรูปในขนาดของความเครียดที่เท่ากัน ซึ่งเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานที่มีความยืดหยุ่น ผิดรูปได้ง่าย แต่หากต้องการผลิตภัณฑ์หรือชิ้นงานที่รับแรงได้สูง ยืดตัวออกน้อย ควรใช้ยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติม



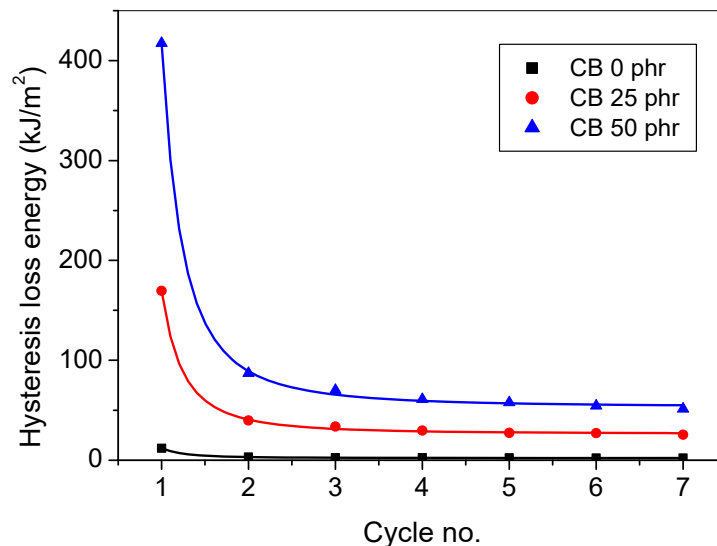
รูปที่ 5 ความเค้นสูงสุดในการดึงแต่ละรอบของยางธรรมชาติที่ไม่มีเขม่าดำและผสมเขม่าดำเกรด N660 ปริมาณ 25, และ 50 phr เป็นสารตัวเติม

ยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติม เมื่อดึงให้ยืด-หดอย่างต่อเนื่องจำนวน 7 รอบ พบว่าความเค้นสูงสุดในการดึงแต่ละรอบลดลงเพียงเล็กน้อย ดังรูปที่ 4(ก) และ รูปที่ 5 ซึ่งความเค้นสูงสุดของยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมนี้นั้นแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงหลังจากถูกดึงให้ยืด-หดเป็นรอบที่ 3 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการดึงให้ยางยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์ทำให้เกิดการแตกหักของโซ่โมเลกุลยางหรือพันธะระหว่างโมเลกุลที่อ่อนแอ เกิดการคลายการเกี่ยวพันของโซ่โมเลกุล หรือเกิดการจัดเรียงตัวของโซ่โมเลกุลยาวเพียงเล็กน้อย ซึ่งปกติยางธรรมชาติสามารถยืดได้สูงถึง 800-1,000 เปอร์เซ็นต์ (Roberts, 1998) ส่วนยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำเกรด N660 เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 50 phr ดังรูปที่ 4(ค) และ รูปที่ 5 มีความเค้นสูงสุดสูงกว่ายางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติม 25 phr นั้นแสดงว่าการดึงให้ยางยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์อาจทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้างเขม่าดำหรือการแตกหักของพันธะระหว่างโมเลกุลยางกับอนุภาคเขม่าดำหรือการเลื่อนไถลของโมเลกุลยางกับ

อนุภาคของเขม่าดำดังกล่าวแล้วข้างต้น โดยยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำในปริมาณ 50 phr มีความเค้นสูงสุดมากกว่าและมีการอ่อนตัวของความเค้นสูงกว่ายางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำปริมาณ 25 phr โดยมีแนวโน้มจะคงที่หลังจากถูกดึงให้ยืด-หดเป็นรอบที่ 5 นั่นคือการใช้ผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตจากยางธรรมชาติผสมเขม่าดำอาจจำเป็นต้องมีการดึง-ยืดเพื่อเป็นการปรับสภาพ (conditioning) ก่อนการใช้งานจริงเพื่อให้ผลิตภัณฑ์สามารถรับแรงกระทำได้ตรงกับสมบัติที่แท้จริงของตัวผลิตภัณฑ์



รูปที่ 6 ความเครียดคงรูปถาวรของยางธรรมชาติที่ไม่มีเขม่าดำและผสมเขม่าดำเป็นสารตัวเติม



รูปที่ 7 พลังงานสูญเสียในการดึงแต่ละรอบของยางธรรมชาติที่ไม่มีเขม่าดำและผสมเขม่าดำเกรด N660 ปริมาณ 25 และ 50 phr เป็นสารตัวเติม

วัสดุยางเมื่อถูกกระทำให้เกิดการผิดรูป หลังจากเอาแรงกระทำออกแล้ว ยางสามารถคืนตัวกลับสู่รูปร่างเดิมได้แต่ไม่สมบูรณ์ จะเกิดการคงรูปถาวรขึ้นบางส่วน รูปที่ 6 แสดงความเครียดคงรูปถาวรของยาง

ธรรมชาติที่ไม่ได้ผสมเขม่าดำและผสมเขม่าดำเป็นสารตัวเติม พบว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมมีการคงรูปถาวรน้อยที่สุด นั่นคือหลังจากดึงให้ยางยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเครียดคงรูปถาวรประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นและความเครียดคงรูปถาวรนี้มีค่าสูงขึ้นตามจำนวนรอบที่ถูกกระทำ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการแตกหักของโซโม่เลกุลยางหรือพันธะระหว่างโม่เลกุลที่อ่อนแอ เกิดการคลายการเกี่ยวพันของโซโม่เลกุลหรือเกิดการจัดเรียงตัวของโซโม่เลกุลยาวดังกล่าวแล้วก่อนหน้านี้ ส่วนยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมมีความเครียดคงรูปถาวรสูงกว่ายางที่ไม่ผสมสารตัวเติม และมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของสารตัวเติม

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยืดในรูปที่ 2 เมื่อนำมาคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของการดึงให้ยางยืดออก (ขาขึ้น) และพื้นที่ใต้กราฟของการหดตัวกลับ (ขาลง) แล้วนำมาคำนวณพลังงานสูญเสียตามสมการที่ (1) ได้ผลแสดงดังรูปที่ 7 ยางที่ผสมเขม่าดำปริมาณ 50 phr มีพลังงานสูญเสียมากที่สุด โดยการดึงให้ยางยืดออกในรอบแรกมีพลังงานสูญหายมากที่สุด ซึ่งพลังงานเหล่านี้ถูกใช้ไปในกระบวนการแตกหักของโครงสร้างเขม่าดำหรือการแตกหักของพันธะระหว่างโม่เลกุลยางกับอนุภาคเขม่าดำ หรือการเลื่อนไถลของโม่เลกุลยางกับอนุภาคของเขม่าดำดังกล่าวแล้วข้างต้น ยางที่มีสมบัติดังกล่าวนี้ เหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการดูดซับพลังงาน เช่นยางกันกระแทก ยางกันชน ยางรองแท่นเครื่องจักร เป็นต้น

สรุปและอภิปรายผล

การอ่อนตัวของความเค้น ความเครียดคงรูปถาวร และพลังงานสูญเสียมีค่าสูงขึ้น ตามการเพิ่มปริมาณของเขม่าดำเข้าไปผสมในยางธรรมชาติ โดยที่เมื่อจำนวนรอบของการถูกกระทำอย่างต่อเนื่องเพิ่มขึ้น ความเครียดคงรูปถาวรของยางมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่การอ่อนตัวของความเค้น และพลังงานสูญหามีค่าลดต่ำลง

ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยที่ได้เกี่ยวกับสมบัติด้านการอ่อนตัวของความเค้น และพลังงานสูญเสียของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่มีเขม่าดำเกรด N660 เป็นสารตัวเติม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ยางทางวิศวกรรมต่างๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ยางที่ได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องรับแรงกระทำซ้ำๆ ขณะใช้งาน เช่น ยางล้อรถ ยางรองคอกสะพาน และยางรองอาคาร ซึ่งอาจต้องทำการวิจัยต่อไปในกรณีของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมชนิดอื่นๆ รวมถึงการวิจัยสมบัติดังกล่าวในยางสังเคราะห์ และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ที่ผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณโปรแกรมวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่อนุเคราะห์วัสดุและสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือ เครื่องจักร เครื่องทดสอบ และขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่สนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- พรพรรณ นิธิอุทัย. (2528). *สารเคมีสำหรับยาง*. ปัตตานี: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. (2540). *ยาง: เทคนิคการออกสูตร*. ปัตตานี: ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Blanchard, A. F., & Parkinson, D. (1952). Breakage of carbon-rubber networks by applied stress. *Industrial & Engineering Chemistry*, 44, 799–812.
- Bueche F. (1960). Molecular basis for the Mullins effect. *Journal of Applied Polymer Science*, 4, 107–114.
- Diani, J., Brieu, M., & Vacherand, J. M. (2006). A damage directional constitutive model for Mullins effect with permanent set and induced anisotropy. *European Journal of Mechanics*, 25(3), 483-496.
- Donnet, J. B., & Custodero E. (2014). Reinforcement of elastomers by particulate fillers. In B. Erman, J. E. Mark, C., & M. Roland (Ed.), *The Science and Technology of Rubber* (pp.383-416) 4thEd. MA, USA: Elsevier Inc.
- Gent, A., N. (1992). *Engineering with rubber*. Oxford, U.K: Oxford University Press.
- Gent, A., N. & Mars, W.V. (2014). Strength of elastomers. In B. Erman, J. E. Mark, C., & M. Roland (Ed.), *The Science and Technology of Rubber* (pp.473-516) 4thEd. MA, USA: Elsevier Inc.
- Hanson, D. E., Hawley, M., Houlton, R., Chitanvis, K., Rae. P., & Orler, E.B. (2005). Stress softening experiments in silica-filled polydimethylsiloxane provide insight into a mechanism for the Mullins effect. *Polymer*, 46, 10989-10995.
- Houwink, R. (1956). Slipping of molecules during the deformation of reinforced rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 29, 888–893.
- Kraus, G., Childers, C. W., & Rollman, K. W. (1966). Stress softening in carbon black reinforced vulcanizates. Strain rate and temperature effects. *Journal of Applied Polymer Science*, 10, 229–240.

- Mullins, L. (1950). Thixotropic behavior of carbon black in rubber. *The Journal of Physical Chemistry*, 54(2), 239–251.
- Qi, H. J., & Boyce, M. C. (2005). Stress-strain behavior of thermoplastic Polyurethane. *Mechanics of Materials*, 31, 817-839.
- Roberts, A. D. (1988). *Natural rubber science and technology*. Oxford, U.K: Oxford University Press.
- Toki, S. & Hsiao, B. S. (2003). Nature of strain-induced structures in natural and synthetic rubbers under stretching. *Macromolecules*, 36, 5915-5917.
- Toki, S., Sics, I., Hsiao, B. S., Murakami, S., Tosaka, M., Poompradub, S., Kohjiya, S., & Ikeda, Y. (2005). Probing the nature of strain-induced crystallization in polyisoprene rubber by combined thermomechanical and in situ X-ray diffraction techniques. *Macromolecules*, 38, 7064-7073.
- Tosaka, M., Murakami, S., Poompradub, S., Kohjiya, S., Ikeda, Y., Toki, S., Sics, I., & Hsiao, B. S. (2004). Orientation and crystallization of natural rubber network as revealed by WAXD using synchrotron radiation. *Macromolecules*, 37, 3299-3309.