

การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ ยางธรรมชาติที่ใช้เขม่าดำ และพอลิยูรีเทนโฟมชนิดยืดหยุ่น ที่ใช้แล้วเป็นสารเติมแต่ง

ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด กรุงเทพมหานคร 10140

บทคัดย่อ

ผงพอลิยูรีเทนโฟมและเขม่าดำถูกใช้เสมือนสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ และคุณสมบัติต่างๆ เช่น การทดสอบแรงดึง การทดสอบด้วยแรงดัดอย่างต่อเนื่อง คุณสมบัติของความยืดหยุ่น และการบวมตัว ได้ถูกตรวจสอบและวิจารณ์สรุป ผลจากการทดลองพบว่า การใช้ผงพอลิยูรีเทนโฟมที่ความเข้มข้นระหว่าง 20-30 กรัมต่อยาง 100 กรัม ให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางเป็นที่น่าพอใจ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เขม่าดำเสมือนสารเติมแต่ง

Comparison of rubber vulcanisate properties filled with carbon black and used flexible polyurethane foams

Dr. Narongrit Sombatsompop

Division of Materials Technology, School of Energy and Materials

King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) Bangmod Bangkok 10140 Thailand

Abstract

Polyurethane foam particles (PU) and carbon black were introduced as fillers in natural rubber compounds and some properties of the rubber compounds were reviewed, these properties including tensile properties, dynamic mechanical thermal analysis, elongation set and swelling behaviour. It was recommended from the results that PU filler at the concentration range of 20-30 parts per hundred rubbers (pph) gave a satisfactory level of reinforcement in the rubber compounds compared to carbon black-rubber reinforcements.

บทนำ

ผลิตภัณฑ์ที่มีความเกี่ยวข้องและสร้างคุณประโยชน์ต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก ซึ่งมีผลิตภัณฑ์ของยางหลายชนิดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ยางรถยนต์ ยางรองสะพาน ข้อต่อยาง ยางกันรั่ว เป็นต้น ในโรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการผลิตเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ยางจะนิยมใช้สารเติมแต่งต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพของยางให้ได้ตามความต้องการหรือมีความเหมาะสมกับการใช้งานทั่วไป(1) เช่น เพื่อเพิ่มความต้านทานแรงดึงและแรงเสียดสี เขม่าดำ (carbon black) จะถูกเติมเข้าไปในปริมาณที่เหมาะสม ในงานที่ต้องการป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับอากาศอันเป็นผลให้เกิดการสลายตัวด้วยออกซิเจน สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidants) จะถูกเติมลงไป ชนิดและโครงสร้างทางเคมีของตัวยางเองก็มีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้เช่นกัน เช่น ยางธรรมชาติ (natural rubbers) เหมาะกับการใช้ทำยางรถยนต์ ในขณะที่ยางไนไตร (nitrile rubbers) เหมาะสำหรับยางที่ใช้

กันการรั่วซึมหรืองานที่ต้องสัมผัสกับของเหลว[1-2] ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ยางในท้องตลาดมีราคาสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หนึ่งในสาเหตุหลายๆ ประการที่ก่อให้เกิดปัญหานี้คือ สารเติมแต่งที่มีราคาสูงขึ้น สารเติมแต่งที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง คือ เขม่าดำ[1-3] ซึ่งจะถูกเติมในระหว่างกระบวนการผลิตเนื่องจากมีความต้องการสูงราคาของเขม่าดำจึงปรับตัวสูงขึ้นเรื่อยๆ มีนักวิชาการและนักวิจัยหลายท่านพยายามที่จะค้นหาสารเติมแต่งตัวใหม่ที่มีราคาถูก ง่ายต่อการเตรียม และจัดหา ทั้งยังสามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางให้ได้ทัดเทียมกับผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้เขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง จนกระทั่งถึงปัจจุบัน การค้นคว้างดังกล่าวก็น่าจะถูกดำเนินอยู่อย่างต่อเนื่อง แต่ยังไม่พบวัสดุหรือสารเคมีชนิดใดที่จะมาทดแทนเขม่าดำได้อย่างจริงจัง

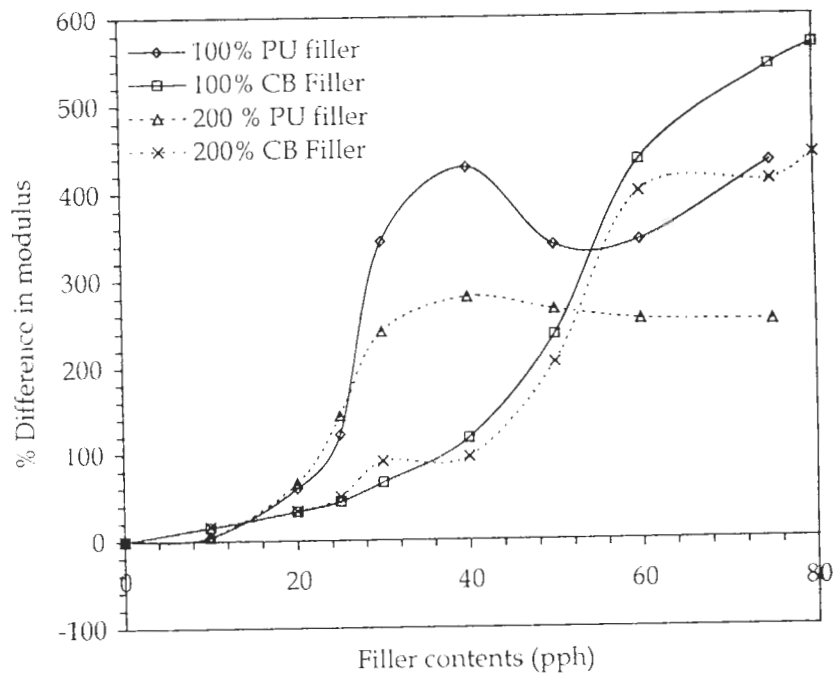
อุตสาหกรรมพลาสติกและยางในปัจจุบันกำลังประสบปัญหาใหญ่ประการหนึ่งคือ ขาดเสียจากผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ไม่สามารถกำจัดได้โดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากพลาสติกประเภทเทอร์โมเซต (thermosets) ในผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิยูรีเทนโฟม (polyurethane foams, PU) เช่น เบาะนั่งในรถยนต์ และวัสดุกันกระแทกในงานขนส่งต่างๆ เป็นต้น ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ทำจากพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น (flexible polyurethane)[3] จากการสำรวจของ Ehrig[4] พบว่า ผลิตภัณฑ์พอลิยูรีเทนโฟมที่ใช้แล้วสร้างภาระที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดอย่างมากโดยเฉพาะในประเทศทางยุโรป ความยุ่งยากที่เกิดขึ้น[5-7] คือ ต้นทุนในการขนถ่ายเพื่อนำไปกำจัดหรือเก็บเพื่อส่งออก ต้นทุนในการกำจัด ปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นหากมีการกำจัดโดยตรง (เช่น เผา หรือ ฝังใต้ดิน) ดังนั้น ในการนำพอลิยูรีเทนโฟมที่ใช้แล้วให้สามารถนำกลับมาหมุนเวียนใช้ประโยชน์ได้อีกจึงเป็นทางออกหนึ่งที่ต้องพิจารณา

ในบทความฉบับนี้ จะทบทวน ชี้แจง และสรุปเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการใช้พอลิยูรีเทนโฟมที่ใช้แล้วมาใช้เป็นสารเติมแต่งในยางธรรมชาติซึ่งมีจุดประสงค์หลักๆ สองประการคือ

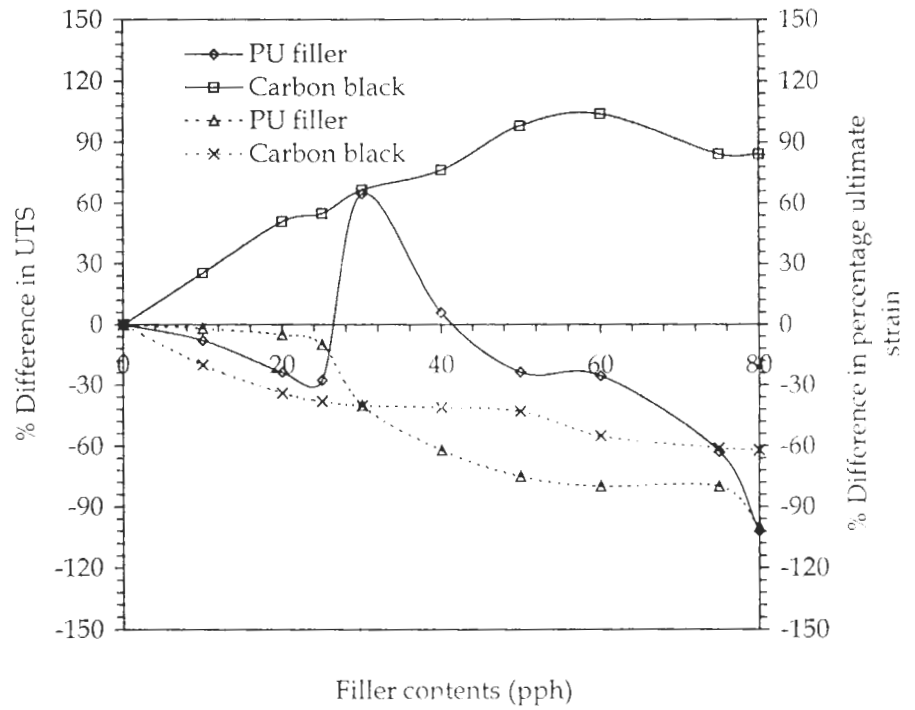
- เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้พอลิยูรีเทนโฟมที่ใช้แล้วมาทดแทนการใช้เขม่าดำตามที่กล่าวมาข้างต้น
- เพื่อนำพอลิยูรีเทนโฟมที่ใช้แล้วมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อีก

ผลการทดลองได้ถูกรวบรวมคัดเลือก ปรับปรุง และสรุปเนื้อหาสำคัญจากเอกสารที่ตีพิมพ์แล้วของผู้เขียนเองทั้งสิ้น[3,5-12] ดังนั้น ในบทความฉบับนี้จะเป็นการเขียนสรุปเปรียบเทียบและวิจารณ์ความเป็นไปได้ของการใช้พอลิยูรีเทนโฟมเสมือนสารเติมแต่งในผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ และศึกษาคูณสมบัติโดยรวมๆ ของยางธรรมชาติที่ถูกผสมด้วยพอลิยูรีเทนโฟม ซึ่งผลการทดลองจะถูกเปรียบเทียบับยางธรรมชาติชนิดเดียวกันที่มิใช่เขม่าดำเป็นองค์ประกอบ สำหรับผลกระทบต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติที่สนใจ เช่น อุณหภูมิ โครงสร้างทางเคมีของยาง อัตราเร็วหรือเวลาที่ใช้ในการทดสอบ จะไม่ถูกรวบรวมในบทความฉบับนี้ ผู้สนใจควรทำการศึกษารายละเอียดจากเอกสารที่ตีพิมพ์แล้วในอดีต

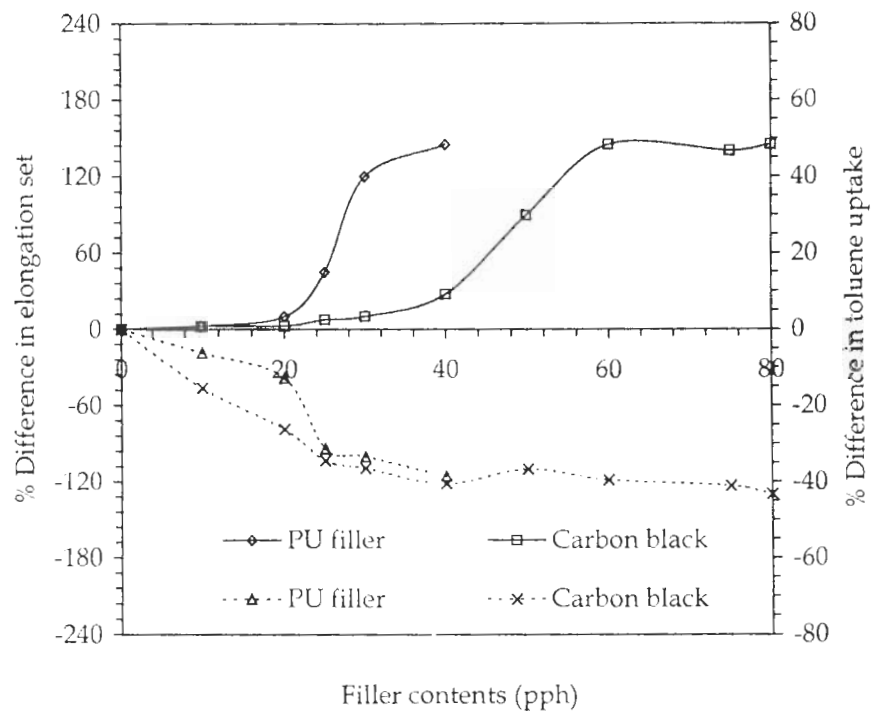
รูปที่ 2 ในส่วนของค่าความแตกต่างของการสูญเสียสูงสุดของ tangent จะแสดงถึงการสูญเสียแบบหนืด (viscous dissipation) อันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของสายพอลิเมอร์ และความเป็นอีลาสติคขณะที่ถูกกระทำด้วยแรงจากภายนอก จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งลงไปเรื่อยๆ ระดับความสูญเสียจะลดลงอย่างต่อเนื่องประมาณ 25% ในซีกันยาง/เขม่าดำและ 40% ในซีกันยาง/พอลิยูรีเทนโฟม (โดยแสดงผลในช่วงของค่าที่เป็นลบ) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สายพอลิเมอร์เกิดการถูกจำกัดในการเคลื่อนตัวมากขึ้นด้วยสารเติมแต่ง และแสดงว่าเกิดการเสริมแรงขึ้นระหว่างพอลิเมอร์กับสารเติมแต่ง นอกจากนี้ การใส่สารเติมแต่งทั้งสองลงไปยังมีผลให้ glass transition temperature (T_g) ของซีกันยางนั้นสูงขึ้นมากกว่า 30% เช่นกัน หมายความว่า สารเติมแต่งและพอลิเมอร์มีการเกิดปฏิกิริยากัน หรือ เกิดการเสริมแรงได้อย่างเหนียวแน่นขึ้น จากกราฟจะสามารถเห็นได้ว่า ระดับความสูญเสียที่ลดลงสูงสุด และ ค่า T_g ที่มากที่สุด อยู่ในในช่วงความเข้มข้นของพอลิยูรีเทนโฟมและเขม่าดำที่ 20-30 pph และ 50-60 pph ตามลำดับ แสดงว่า ณ ความเข้มข้นในช่วงนี้เกิดการเสริมแรงดีที่สุด



รูปที่ 3 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของโมดูลัสที่ 100% และ 200% ของความเค้น



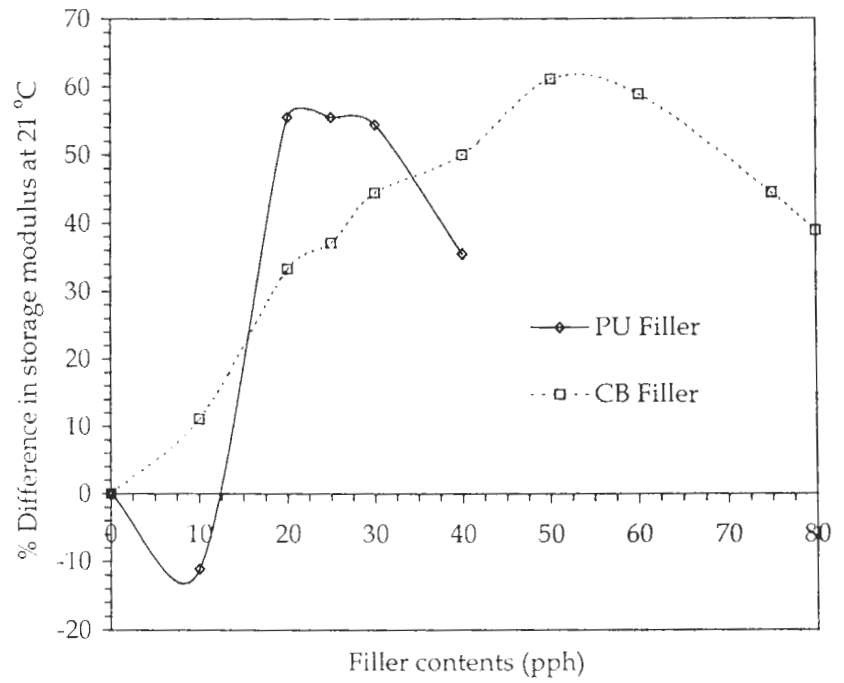
รูปที่ 4 ค่าความแตกต่างของ ultimate tensile strength (เส้นทึบ) และความเครียดที่จุดแตกหัก (เส้นประ) กับความเข้มข้นของ filler



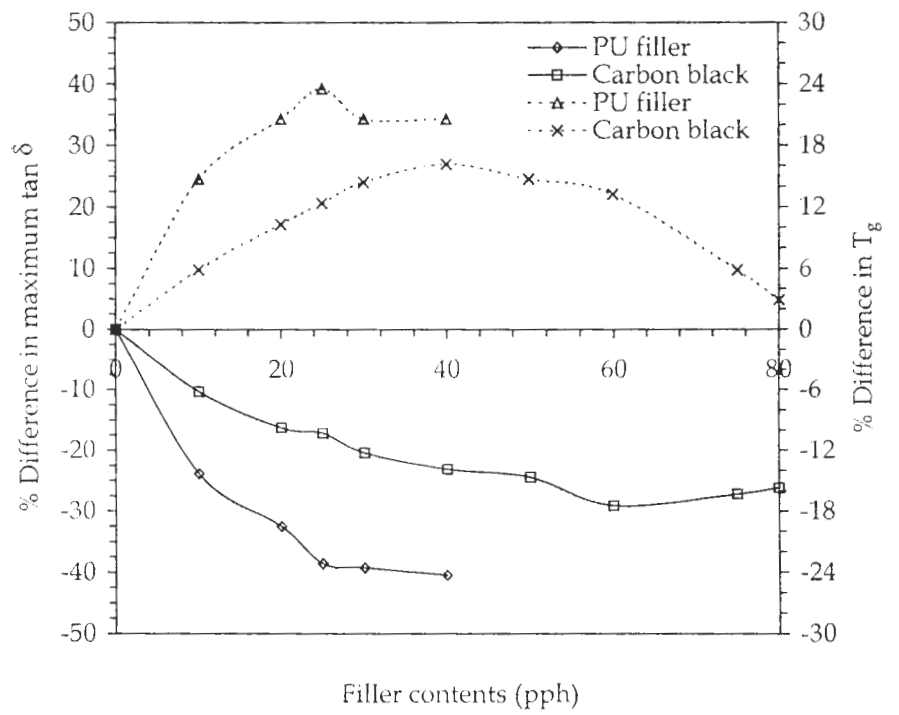
รูปที่ 5 ค่าความแตกต่างของ elongation set (เส้นทึบ) และ toluene uptake (เส้นประ) กับความเข้มข้นของ filler

กว่าคุณภาพของชิ้นงานหลัก ในทางกลับกันหากผลลัพธ์ของผลต่างที่ได้เป็นลบ (-) หมายความว่าคุณภาพของชิ้นงานนั้นๆ จะเป็นไปในแนวที่ต่ำกว่าคุณภาพของชิ้นงานหลัก ยกเว้น คุณสมบัติ 3 ประการคือ ค่าของการสูญเสียสูงสุดของ tangent ปริมาณของไทลูอิน และเปอร์เซ็นต์ของการยึดตัว ซึ่งจะแสดงความหมายในทางตรงกันข้าม

รูปที่ 1 และ 2 เป็นผลการทดลองจาก DMTA ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า storage modulus ที่ 21 °C, ค่าของการสูญเสียสูงสุดของ tangent และ glass-transition temperature กับความเข้มข้นของสารเติมแต่งพอลิยูรีเทนโฟมและเขม่าดำจากรูปที่ 1 พบว่าที่ ค่า storage modulus ของตัวอย่างที่มีพอลิยูรีเทนโฟมและเขม่าดำองค์ประกอบอยู่ในกลุ่มบวกทั้งหมด (ยกเว้นชิ้นงานยางที่มีความเข้มข้นของพอลิยูรีเทนโฟมช่วงประมาณ 10 pph ทั้งนี้ อาจเป็นผลอันเนื่องมาจากว่า ที่ค่าความเข้มข้นของพอลิยูรีเทนโฟมต่ำๆ ความสามารถในการผสมเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกับยางอาจเป็นไปได้ยากกว่าของผสมที่มีความเข้มข้นของพอลิยูรีเทนโฟมสูงๆ ณ เวลาที่ให้หนึ่งๆ) ซึ่งหมายความว่า ในการใช้สารเติมแต่งทั้งสองประเภตินี้ส่งผลให้เกิด modulus ที่สูงขึ้น จากกราฟพบว่า ความเข้มข้นของพอลิยูรีเทนโฟมและเขม่าดำที่ 20 pph และ 60 pph ให้จุดที่สูงที่สุดของ modulus ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 60% การปรับปรุง modulus ของชิ้นงานยางอันเนื่องมาจากการเติมพอลิยูรีเทนโฟมมีผลมาจากการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีระหว่างกลุ่มโครงสร้างย่อยทางเคมีที่อยู่ในตัวของพอลิยูรีเทนโฟมกับโมเลกุลของยาง กลุ่มโครงสร้างย่อยทางเคมีในพอลิยูรีเทนโฟมคือ C=O และ NH ที่อยู่ในยูรีเทน และยูเรียที่เป็นส่วนแข็ง และ C=O ที่อยู่ในพอลิเอสเทอร์ที่เป็นส่วนอ่อน [3, 5-6, 13] นอกจากนี้ ยังอาจเกิดจากความสัมพันธ์แบบขั้วต่อขั้วระหว่างโครงสร้าง (Dipole-dipole molecular interaction) ของกรุป C=O กับสายพันธะข้ามซัลเฟอร์ (sulphur crosslinks) และ พันธะของไฮโดรเจน การเสริมแรงดังกล่าวข้างต้นนี้จะลดลงหากความเข้มข้นของสารเติมแต่งมากจนกระทั่งเจือจางปริมาณของเนื้อยาง[3,5-6,11] ในกรณีนี้จะพบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมของพอลิยูรีเทนโฟมคือ 20-30 pph สำหรับยางที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบพบว่าความเข้มข้นที่ 50-60 pph เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด กลไกการปรับปรุงคุณสมบัติของยางโดยใช้เขม่าดำจะไม่กล่าวรายละเอียด เนื่องจากมีเอกสารทางวิชาการบันทึกไว้มากมาย[1-2]



รูปที่ 1 ค่าความแตกต่างของ storage modulus ที่อุณหภูมิ 21°C



รูปที่ 2 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการสูญเสียสูงสุดของ tangent และ glass-transition temperature (T_g)

ต่อไป[3,5-12] คุณสมบัติต่างๆ ที่สนใจจะถูกตรวจสอบและเปรียบเทียบโดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานสากลทั่วไป (conventional methods)

วิธีการทดลอง

เนื่องจากเป็นบทความฉบับนี้เป็นการสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองที่ได้กระทำผ่านมาของผู้เขียน อุปกรณ์การทดสอบและวิธีการทดลองจะกล่าวแต่เพียงสั้นๆ เพื่อความเข้าใจ และจะอ้างอิงถึงเอกสารที่ตีพิมพ์แล้ว[3,5-12] ซึ่งที่สามารถให้ข้อมูลที่ละเอียดครบครัน

สภาวะและการเตรียมชิ้นงานยางเพื่อการทดสอบ

ยางธรรมชาติ (NR, SMR-60CV) ได้ถูกเตรียมด้วยการบดและผสมกับสารเคมีที่ช่วยทำให้ยางกลายเป็นยางสุก (vulcanisates) สารเคมีดังกล่าวประกอบด้วย sulphur, zinc oxide, stearic acid และ Mercaptobenzthiazole (MBT) ตามส่วนผสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางแบบทั่วไป (conventional vulcanisates)[5-6,9-12] เครื่องมือที่ใช้ผสมคือ เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ในระหว่างทำการผสมจะมีการเติมสารเติมแต่ง (ใช้เขม่าดำหรือพอลิยูรีเทนโฟม) เพื่อให้ได้ของผสมที่มีความเข้มข้นของสารเติมแต่งต่างๆ กัน เขม่าดำ (NB102, WOM Polymer Ltd) จะถูกเติมด้วยความเข้มข้นตั้งแต่ 0-80 กรัมต่อยาง 100 กรัม (pph) ส่วนพอลิยูรีเทนโฟม (4200C Caligen Foams Ltd) จะถูกเติมด้วยความเข้มข้นตั้งแต่ 0-40 กรัมต่อยาง 100 กรัม (หมายเหตุ: พอลิยูรีเทนโฟมจะถูกบดให้เป็นผงโดยวิธี cryogenic pulverisation โดยใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นตัวความเย็น ขนาดผงของพอลิยูรีเทนโฟมจะมีขนาดประมาณ 200 μm) ในขั้นตอนของการเตรียมยางสุกจะใช้ ขบวนการอัดแรงดัน (compression moulding) ที่อุณหภูมิ 160°C และแรงดัน 5000 kPa ใช้เวลา 30 นาทีในการทำให้ยางสุก ชิ้นงานที่ถูกเตรียมขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เครื่องมือทดสอบและวิธีการทดสอบ

การทดสอบแรงดึง : ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ความเร็วในการทดสอบ 500 mm/min ชิ้นงานที่ใช้เป็นรูปทรงของ dumbbell ผลการทดลองที่สนใจคือ tensile modulus ที่ 100% strain และที่ 200% strain, ultimate tensile strength (UTS), เปอร์เซนต์ของความเครียด (strain) ที่จุดแตกหัก[5,6]

การทดสอบความเป็นอีลาสติก (elasticity): นอกจากการวิเคราะห์โดยใช้เปอร์เซนต์ของความเครียดจากเครื่องทดสอบแรงดึงแล้ว การวิเคราะห์หาความเป็นอีลาสติกสามารถทำได้โดยการวัดค่า

elongation set ซึ่งมีหลักการคือ การวัดเปอร์เซ็นต์การคืนรูปของชิ้นงาน หลังจากถูกดึงด้วยแรงและระยะยืดหนึ่งๆ ผลต่างความยาวของชิ้นงานก่อนและหลังการรับแรงยืด (โดยที่ percent elongation set ต่ำๆ จะแสดงถึงมีความเป็นอีลาสติคสูง)(5,6)

การบวมตัวของชิ้นงานยาง (swelling): ทำการแช่ผลิตภัณฑ์ยางในสารละลายโทลูอีน (toluene) จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว และทำการวัดปริมาณของโทลูอีนที่สะสมอยู่ในผลิตภัณฑ์ ณ อุณหภูมิที่ควบคุมได้คือ 21°C ปริมาณของโทลูอีน (toluene uptake) จะเป็นอัตราส่วนโดยตรงต่ออัตราการบวมตัวของชิ้นงานยาง กล่าวคือ ยิ่งมีปริมาณโทลูอีนมาก ยิ่งบวมมาก(8-11)

การทดสอบด้วยแรงดัดอย่างต่อเนื่อง (dynamic mechanical test): ในกรณีนี้จะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) ในระบบการดัดตัวสามจุด ช่วงอุณหภูมิที่วัดคือ -60 ถึง +40°C อัตราการให้ความร้อนคือ 5°C/min ใช้แอมปริจูดัล 0.2% และความถี่ 1 Hz ชิ้นงานที่ใช้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด กว้างxยาวxหนา 10×40×2.5 mm³ สิ่งที่น่าสนใจคือ storage modulus (E') ที่อุณหภูมิ 21°C, การสูญเสียสูงสุดของ tangent (maximum $\tan\delta$) และ glass-transition temperature (T_g) [3,11]

ผลการทดลองและการวิจารณ์สรุป

เพื่อการหาข้อสรุปได้อย่างสะดวกรวดเร็วถึงแนวโน้มการใช้พอลิยูรีเทนเสมือนสารเติมแต่งในยางเพื่อปรับปรุงคุณภาพของยาง และเปรียบเทียบกับยางที่มีหมักดำเป็นองค์ประกอบร่วม ผลการทดลองทั้งหมดจากเอกสารที่ตีพิมพ์ไปแล้วด้วยค่าการที่ได้จากการวัดจริงจะถูกปรับให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับผลการทดลองที่ได้รับจากชิ้นงานยางที่ไม่มีสารเติมแต่ง ดังสมการง่ายๆ ต่อไปนี้

$$\text{Percentage difference} = \frac{(X - Y)}{Y} \times 100$$

โดย

X หมายถึง ค่าหรือผลการทดลองที่ได้จากชิ้นงานยางที่มีสารเติมแต่ง

Y หมายถึง ค่าหรือผลการทดลองที่ได้จากชิ้นงานยางที่ไม่มีสารเติมแต่ง

หมายเหตุ: ชิ้นงานยางที่ไม่ได้มีการผสมของสารเติมแต่งใดๆ เรียกว่า ชิ้นงานหลัก โดยหากผลลัพธ์ของผลต่างจากสมการข้างต้นได้เป็นบวก (+) หมายความว่า คุณภาพของชิ้นงานนั้นๆ จะเป็นไปในแนวที่ดี

ผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบแรงดึงโดยวิเคราะห์จาก 100% และ 200% moduli ในรูปที่ 3 พบพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกัน คือ ให้จุด 100% และ 200% moduli ที่เปลี่ยนแปลงไปในทางที่ดีมากที่สุด ณ ความเข้มข้นพอลิยูรีเทนโฟมและเขม่าดำที่ 20-30 pph และ 50-60 pph ตามลำดับ การเติมสารเติมแต่งให้ผลที่มีประสิทธิภาพเป็นอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของ modulus จากการพล็อตจะเห็นว่า modulus เพิ่มขึ้นถึง 400 เท่า ด้วยการเติมพอลิยูรีเทนโฟม 30 pph และ 450 เท่า ด้วยการเติมเขม่าดำ 60 pph สิ่งที่น่าสนใจคือ ในรูปที่ 4 ค่าความแข็งแรงประลัย (UTS) ของชิ้นงานที่มีเขม่าดำเป็นองค์ประกอบจะให้ค่าความแข็งแรงประลัย (ที่สูงขึ้นที่อยู่ในช่วงที่มีค่าเป็นบวก) ทุกความเข้มข้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ 50-60 pph ค่าความแข็งแรงประลัย เพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 100% หากพิจารณาในกรณีของพอลิยูรีเทนโฟม พบว่า มีค่าความเข้มข้นเพียงค่าเดียวที่อยู่ในช่วงของค่าบวก คือ ค่าที่ความเข้มข้นประมาณ 30 pph (เพิ่มขึ้น 60% UTS) ในช่วงความของพอลิยูรีเทนโฟมจาก 0 ถึง 20 pph อาจให้ประโยชน์ในแง่ที่เป็นสารเติมแต่งเพื่อลดการยืด (หรือที่เรียกว่า extenders) กล่าวคือ การเติมพอลิยูรีเทนโฟมลงไปในช่วงในช่วงความเข้มข้น 0-20 ให้ค่าความแข็งแรงประลัยของชิ้นงานโดยรวมคล้ายคลึงกับยางที่ไม่มีการใส่สารเติมแต่งใดๆ การทำเช่นนี้จะเป็นการลดปริมาณการใช้วัตถุดิบยางเนื่องจากสามารถใช้พอลิยูรีเทนโฟมทดแทนยางได้ และยังเพิ่มประสิทธิภาพในการแปรรูปพอลิยูรีเทนโฟมที่ใช้แล้วได้อีกด้วย ในรูปที่ 4 จะพบว่าประโยชน์อีกอย่างของการใช้พอลิยูรีเทนโฟมในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำๆ จาก 0-20 pph ซึ่งให้ผลที่ดีในแง่ของความเป็นอีลาสติคโดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดที่จุดแตกหัก จะเห็นว่า ค่าดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจากชิ้นงานยางที่ไม่มีการเติมแต่ง เหตุผลที่สำคัญที่อธิบายพฤติกรรมนี้คือว่า พอลิยูรีเทนมีความเป็นอีลาสติคในตัวอยู่แล้ว การผสมกันของอีลาสโตเมอร์สองชนิดย่อมส่งผลให้คงความเป็นอีลาสติคได้ดีมากขึ้น ในกรณีของเขม่าดำจะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดลดลงอย่างต่อเนื่อง ความเป็นยืดหยุ่นสามารถพิจารณาได้ชัดเจนมากโดยพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว ในรูปที่ 5 (ค่าการยืดตัวน้อยจะแสดงถึงความเป็นอีลาสติคสูง [5-7]) จะเห็นได้ว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่มีพอลิยูรีเทนโฟมเป็นองค์ประกอบในช่วงความเข้มข้นระหว่าง 0-20 pph ค่าการยืดตัวไม่เปลี่ยนแปลงไปจากของชิ้นงานยางที่ปราศจากสารเติมแต่ง ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานยังคงความเป็นอีลาสติคได้ดีตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในกรณีของเขม่าดำค่าการยืดตัวเริ่มเพิ่มขึ้น ณ ความเข้มข้นประมาณ 40 pph และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 50-60 pph

หากพิจารณาถึงปริมาณการซึมผ่านหรือเคลื่อนผ่านของสารละลายโทลูอินในยาง ในรูปที่ 5 (เส้นปะ) โดยมีหลักการว่า หากค่าที่ได้เป็นลบ แสดงว่ามีการบวมตัวน้อย และยิ่งค่าลบมากๆ หมายถึงปริมาณการซึมผ่านของสารละลายในยางเป็นไปได้ยากมากขึ้น นั่นคือ การบวมตัวจะยิ่งลดลง โดยภาพรวมพบว่า การใส่สารเติมแต่งไม่ว่าจะเป็นพอลิยูรีเทนโฟมหรือเขม่าดำจะทำให้ปริมาณสารละลายเคลื่อนที่ผ่านได้น้อยลงถึงโดยเฉลี่ย 30-40% (ให้มีค่าเป็นลบ) ที่ความเข้มข้นของสารเติมแต่งต่ำๆ (ต่ำ

กว่า 20 pph) ชิ้นงานยางที่มี PU เป็นสารเติมแต่งจะยอมให้สารละลายผ่านได้มากกว่า (ค่าลบต่ำๆ) ซึ่งส่งผลให้เกิดการบวมของชิ้นงานมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีเขม่าดำเป็นสารเติมแต่ง เหตุผลที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือ ชิ้นงานยางที่ใช้พอลิยูรีเทนโฟมมีความเป็นอีลาสติกที่สูงในช่วงความเข้มข้นต่ำกว่า 20 pph (จากที่กล่าวมาข้างต้นในรูปที่ 4) จากเอกสารตีพิมพ์ของณรงค์ฤทธิ์[9-11] กล่าวว่า ระดับของการบวมตัวจะสูงขึ้น ถ้าพอลิเมอร์มีความยืดหยุ่นสูงขึ้นเพราะความยืดหยุ่นจะส่งผลให้เกิดความง่ายในการแทรกซึมของสารละลายผ่านสายพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม สิ่งที่น่าสนใจในชิ้นงานยางที่มีพอลิยูรีเทนโฟมเป็นสารเติมแต่ง คือ เมื่อมาถึงความเข้มข้นของพอลิยูรีเทนโฟมที่ประมาณ 20-30 pph การบวมตัวของยางจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ระดับของการบวมตัวของชิ้นงานยาง/PU ที่ลดลงในช่วงนี้ เป็นผลมาจากการเสริมระหว่างสารเติมแต่งและโมเลกุลของพอลิเมอร์ ซึ่งค่ากล่าวนี้สอดคล้องเป็นอย่างดีกับคุณสมบัติทางกายภาพ (คือ tensile strength และ dynamic mechanical properties) ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

บทสรุป

1. การใช้ polyurethane foam particles เป็นสารเสริมแรงในยางธรรมชาติให้ผลที่น่าพอใจในด้านคุณสมบัติทางฟิสิกส์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เขม่าดำความเข้มข้นของ พอลิยูรีเทนโฟมเหมาะสมคือ ระหว่าง 20-30 pph สำหรับการใช้เขม่าดำเป็นสารเสริมแรง พบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดคือ 50-60 pph
2. การใช้พอลิยูรีเทนโฟมเป็นสารเติมแต่งในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 20 pph จะมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานยางไม่มากนัก เมื่อเทียบกับยางที่ไม่มีการใส่สารเติมแต่ง ด้วยเหตุนี้พอลิยูรีเทนโฟม สามารถใช้เป็นสารทดแทนการใช้วัตถุเติมยาง (extenders) เพื่อการลดต้นทุนการผลิต และลดราคาของสินค้ายางลง
3. ในกรณีที่ต้องการให้ชิ้นงานคงความเป็นอีลาสติก การเติมแต่งพอลิยูรีเทนโฟมจะให้ประสิทธิภาพได้ดีกว่าการใช้ เขม่าดำในช่วงความเข้มข้นของสารเติมแต่งต่ำๆ
4. ระดับการบวมตัว (swelling ratio) ของชิ้นงานยางที่มีสารเติมแต่งเป็นองค์ประกอบ ขึ้นโดยตรงกับ ความยืดหยุ่นของชิ้นงานยาง และ ระดับของการเสริมระหว่างโมเลกุลของยางกับสารเติมแต่ง

เอกสารอ้างอิง

1. Whelan A. and Lee K.S., **"Developments in Rubber Technology 1"** Applied Science, Oxford, 1979.
2. Kraus G., **"Reinforcement of Elastomers"** John Wiley, New York, 1965.
3. Sombatsompop N., **"Dynamic Mechanical Properties of Ground Flexible Polyurethane Foam Particles and Carbon Black Filled Rubber Vulcanisates"** Polymer-Plastics Technology and Engineering, 37 (1), 1-18, 1998.
4. Ehrig R.J., **"Plastics Recycling"** Hansers, New York, 1992.
5. Sombatsompop N. and Sims G.L.A., **"Pulverised Flexible Polyurethane Foam Particles as a Filler in Natural Rubber Vulcanisates"** Cellular Polymers, 15 (2), 90-104, 1996.
6. Sombatsompop N. and Sims G.L.A., **"Pulverised Flexible Polyurethane Foam Particles and Carbon Black as Fillers in Natural Rubber Compounds"** Polymer Recycling, 2 (3), 221-229, 1996.
7. Sombatsompop N. and Sims G.L.A. **"Effect of Moisture Content and Particle Size of Flexible Polyurethane Foam Particles and Carbon Black Filled Natural Rubber Compounds"** SPE ANTEC Technical Papers, 43 (3), 3114-3118, 1997.
8. Sombatsompop N., **"Equilibrium Swelling of Filled NR Vulcanisates"** Thai Academic Conference '97, 22nd June, Manchester UK, Paper 01-04, 9-11, 1997.

9. Sombatsompop N. and Christodoulou K.J., **"Penetration of Aromatic Hydrocarbons into Natural Rubber"** Polymers & Polymer Composites, 5(5), 377-386, 1997.
10. Sombatsompop N., **"Investigation of Swelling Behaviour of NR Vulcanisates"** Polymer-Plastics Technology and Engineering, 37 (1), 19-39, 1998.
11. Sombatsompop N., **"Swelling and Viscoelastic Properties of NR Vulcanisates Filled with Cryogenically Pulverised Polyurethane Foam Particles"** Journal of Elastomers and Plastics (Submitted 1998).
12. Sombatsompop N., **"Analysis of Cure Characteristics on Crosslink Density & Type and Viscoelastic Properties of Natural Rubber"** Polymer-Plastics Technology and Engineering, 37 (3), 333-349, 1998.
13. Ismael H., Freakley P.K., Bradley R.H., Sutherland I. and Sheng E., **"Modes of Action of a Multifunctional Additive in a Carbon Black Filled Natural Rubber Compound"** Plastics, Rubbers and Composites Processing and Application, 23 (1), 43-51, 1995.