

การศึกษาเปรียบเทียบความเร็วในการผิดรูปต่ำและสูงต่อการอ่อนตัวของความเค้นและ พลังงานสูญเสียของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ผสมสารตัวเติม

สุภัตตรา ตู๊ดำ พาตีฮะห์ แดวอสนุง และ วัชรินทร์ สายน้ำใส*

สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

*ผู้รับผิดชอบบทความ E-mail: watcharin.sa@skru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบความเร็วในการผิดรูปเท่ากับ 10 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ต่อสมบัติด้านการอ่อนตัวของความเค้นและพลังงานสูญเสียของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์ที่ผสมเขม่าดำเกรด N550 และซิลิกาในปริมาณ 40 phr ด้วยเครื่อง universal testing machine ผลการวิจัยพบว่ายางธรรมชาติวัลคาไนซ์ผสมสารตัวเติม เมื่อได้รับแรงกระทำแบบพลวัตด้วยความเร็วในการผิดรูปต่ำมีการอ่อนตัวของความเค้น และพลังงานสูญเสียสูงกว่าการกระทำด้วยความเร็วในการผิดรูปสูงเมื่อจำนวนรอบของการถูกกระทำอย่างต่อเนื่องเพิ่มขึ้น การอ่อนตัวของความเค้น และพลังงานสูญเสยรวมมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ยางธรรมชาติผสมเขม่าดำมีค่าความเค้นสูงสุด และพลังงานสูญเสียสูงกว่ายางธรรมชาติผสมซิลิกา ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ยางทางวิศวกรรมต่างๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ยางที่ได้รับแรงแบบพลวัต

คำสำคัญ: ความเร็วในการผิดรูป การอ่อนตัวของความเค้น พลังงานสูญเสีย ยางธรรมชาติ สารตัวเติม

Comparative Study of Low and High Deformation Speed on Stress Softening and Loss Energy of Filled Natural Rubber Vulcanizates

Supattra Tudam, Fatihah Daeworsanung, and Watcharin Sainumsai*

Program in Rubber and Polymer Technology, Faculty of Science and Technology, SKRU

*Corresponding Author; E-mail: watcharin.sa@skru.ac.th

Abstract

This work comparative studies the effect of deformation speed (10 and 500 mm/min) on stress softening and loss energy of carbon black (N550 grade) and silica-filled natural rubber (NR) vulcanizates by using universal testing machine. The carbon black and silica contents were 40 phr (parts (by weight) per hundred parts of rubber). It was found that filled-NR vulcanizates applied with lower deformation speed dynamic force, higher the stress softening and loss energy. Stress softening and total loss energy increased with increasing cycle numbers. Carbon black N550-filled NR exhibited higher maximum stress and loss energy than silica-filled one. The result of this research can be applied to the rubber engineering design, especially for the rubber products which applied dynamic force rubbers.

Keywords: deformation speed, stress softening, loss energy, natural rubber, filler

1. บทนำ

ยางธรรมชาติเป็นสารพอลิเมอร์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก การจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบ cis-1,4-polyisoprene ก่อนการใช้งานจึงจำเป็นต้องบดให้หยาบ (masticate) เพื่อให้การบดผสมยางและสารเคมีทำได้ง่ายขึ้น (พรพรรณ, 2540) ยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ (vulcanization) จัดเป็นวัสดุประเภทหยุ่นหนืด (viscoelastic material) มีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก (Ngai, et al., 2014; Ward & Hadley, 1993; Boonstra, 1982) นั่นคือยางสามารถยืดและไหลได้เมื่อได้รับแรงกด ซึ่งเป็นสมบัติของพลาสติก เมื่อเอาแรงออกยางสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ซึ่งเป็นสมบัติของอีลาสติก ดังนั้น เมื่อยางมีสมบัติทั้งพลาสติกและอีลาสติก ทำให้ง่ายยวบตัวหรือยืดเมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึง แต่เมื่อคลายแรงกระทำออก ยางจะคืนรูปกลับแต่ไม่เท่าเดิม ส่วนยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้วสามารถยืดได้ถึงประมาณ 1000% หรือมากกว่านั้น (Gent, 1992; Gent & Mars, 2014; Roberts, 1988) สมบัติในการยืดได้สูงนี้ ทำให้ง่ายธรรมชาตินี้สามารถทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการยืดได้สูง เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ ทำให้สามารถตกผลึกได้เมื่อถึง (Tosaka, et al., 2004; Toki, et al., 2005; Sainumsai, et al., 2017) ทำให้ง่ายธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง

การนำยางธรรมชาติมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จะมีการเติมสารตัวเติมชนิดเสริมแรงบางชนิด เช่น เขม่าดำ (carbon black) หรือ ซิลิกา (silica) (Donnet & Custodero 2014; Laube, et al., 2001; Waddell & Evans, 2001) เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และความทนทานให้กับยางธรรมชาติ โดยสารตัวเติมเหล่านี้จะยึดติดกับโมเลกุลยางด้วยอันตรกิริยาทางกายภาพและทางเคมี สารตัวเติมอื่น ๆ นอกเหนือจากเขม่าดำ และ ซิลิกา ได้แก่ ดินขาวหรือเคลย์ (clay) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ทัลคัม (talc) ซึ่งสารเหล่านี้ไม่เสริมแรงจนถึงเสริมแรงได้ปานกลางขึ้นกับขนาดของอนุภาค (Brydson, 1988) แต่จะช่วยลดต้นทุนในการผลิต และช่วยให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างง่าย

ยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมที่วัลคาไนซ์แล้วเมื่อถูกกระทำอย่างต่อเนื่องจะมีการอ่อนตัวของความเค้น (stress softening) หรือเกิดการแตกหักเสียหายได้ (Boonstra, 1982; Donnet & Custodero, 2014) ปรากฏการณ์การอ่อนตัวของความเค้นนี้รู้จักกันทั่วไปในชื่อผลของมุลลินส์ (Mullins effect) นอกจากนี้ยางซึ่งเป็นวัสดุประเภทหยุ่นหนืดจะเกิดการสูญเสียพลังงานจากแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง กล่าวคือแรงที่ใช้ในการบิดรูปจะมากกว่าแรงที่ใช้ในการคืนตัวกลับ โดยพลังงานที่สูญหายไปนี้จะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนสะสม (heat build-up) โดยที่สมบัติทางด้าน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ ความเค้น (stress) และอัตราความเครียด (strain rate) (Brown, 2006)

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของความเร็วในการบิดรูปต่ำเท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อนาที และอัตราในการบิดรูปสูงเท่ากับ 500 มิลลิเมตรต่อนาทีต่อการอ่อนตัวความเค้น และพลังงานสูญเสียของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำเกรด N550 และซิลิกาเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 40 phr (parts (by weight) per hundred parts of rubber) โดยใช้ทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นยางแท่งมาตรฐานเกรด 5 แอล (STR 5L) ผลิตโดยบริษัทหว่าได้รับเบอร์ จำกัด จังหวัดสงขลา กรดสเตียริก ซิงค์ออกไซด์ กำมะถัน สารตัวเร่ง และน้ำมันอะโรมาติก เป็นเกรดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง โดยสารตัวเร่งที่ใช้คือ ซีบีเอส (N-cyclohexyl-2-benzothiazole sulphenamide, CBS) สารตัวเติมในงานวิจัยนี้คือ เขม่าดำเกรด N550 และซิลิกา เป็นเกรดทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง

ผสมยางคอมพาวด์ตามสูตรการทดลองในตารางที่ 1 โดยนำยางแท่งมาตรฐานเกรด 5 แอล มาบดผสมยางกับสารเคมีตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 3182-94 ด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้งขนาด 10x20 นิ้ว ซึ่งมี friction ratio เท่ากับ 1:1.2 ผลผลิตโดยบริษัทชัยเจริญเอ็นจิเนียริ่ง หลังจากนั้นนำยางคอมพาวด์มาทดสอบหาเวลาอัดเข้าด้วยเครื่อง moving die rheometer (MDR) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 2084-95 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ทดสอบ 5 ชั้นทดสอบ รายงานผลด้วยค่าเฉลี่ย แล้วนำยางคอมพาวด์มาอัดเข้าเป็นแผ่นทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 3182-94

ตารางที่ 1 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ของยางคอมพาวด์

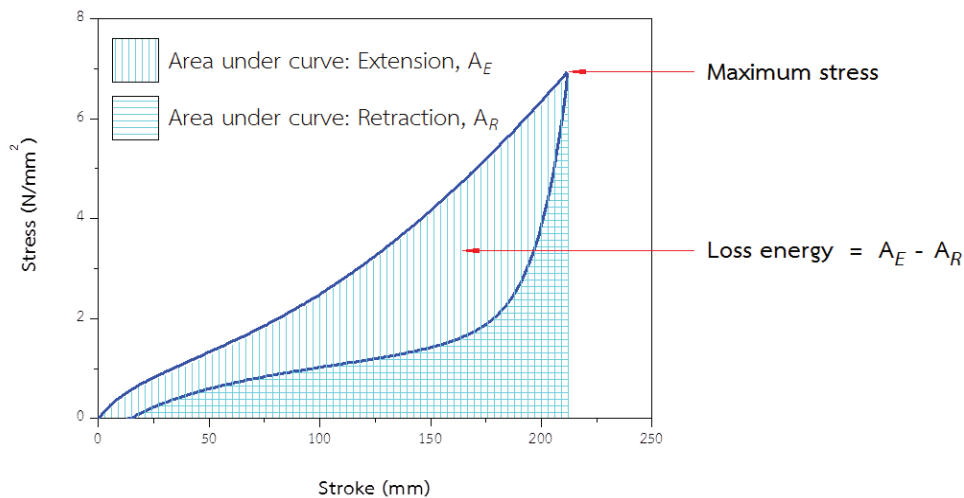
ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr)	
ยางธรรมชาติ	100	100
กรดสเตียริก	1.5	1.5
ซิงค์ออกไซด์	5	5
ซีบีเอส	1.5	1.5
เขม่าดำเกรด N550	40	-
ซิลิกา	-	40
น้ำมันอะโรมาติก	2	2
กำมะถัน	2	2

นำแผ่นทดสอบมาตัดเป็นชิ้นทดสอบรูปดัมเบล (dumb-bell) แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่อง universal testing machine ด้วยความเร็วในการดึง 10 และ 500 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยดึงยางให้ยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์แล้วให้หดตัวกลับ ในโหมด cycle จำนวน 7 รอบ บันทึกค่าความเค้นสูงสุด (maximum stress) ของแต่ละรอบ จากนั้นคำนวณการอ่อนตัวของความเค้น (stress softening) ดังสมการที่ (1) ทดสอบ 5 ชั้นทดสอบ รายงานผลด้วยค่าเฉลี่ย

$$\text{Stress softening (\%)} = \frac{T_i}{T_1} \times 100 \quad (1)$$

โดยที่ T_1 หมายถึง ค่าความเค้นสูงสุดของการดึงยางให้ยืดออก-หดตัวกลับ ในรอบแรก

T_i หมายถึง ค่าความเค้นสูงสุดของการดึงยางให้ยืดออก-หดตัวกลับ ในรอบที่ 1-7



รูปที่ 1 ค่าความเค้นสูงสุดและพลังงานสูญเสียจากการการยืด-หดยางในแต่ละรอบ

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยืด ดังแสดงในรูปที่ 1 คำนวณพลังงานสูญเสียไปในนัยอย่าง (hysteresis loss energy) ดังสมการที่ (2) ทดสอบ 5 ชั้นทดสอบ รายงานผลด้วยค่าเฉลี่ย

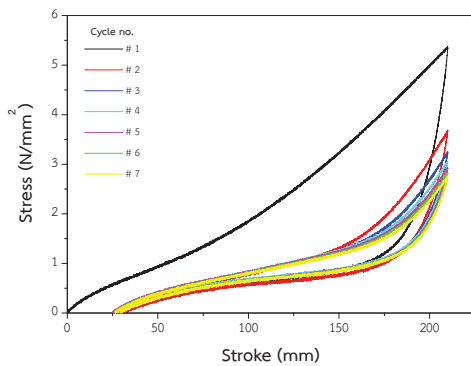
$$\text{Hysteresis loss energy (kJ/m}^2\text{)} = A_E - A_R \quad (2)$$

โดยที่ A_E หมายถึง พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้น (N/mm²) กับระยะยืด (มิลลิเมตร) ขณะยืดออก (extension)

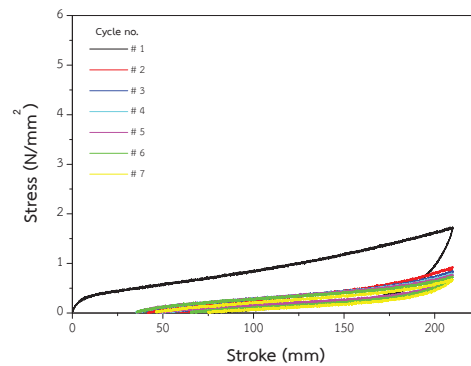
A_R หมายถึง พื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้น (N/mm²) กับระยะยืด (มิลลิเมตร) ขณะหดกลับ (retraction)

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

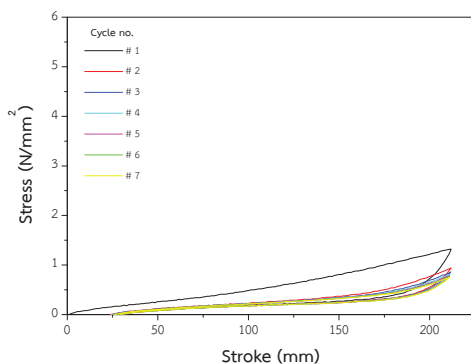
การดัดยางให้ยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์แล้วปล่อยให้ยางหดตัวกลับ ด้วยความเร็วในการผิดรูปเป็น 10 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยดัดให้ยางตัวอย่างยืด-หดจำนวน 7 รอบ ของยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำเกรด N550 และซิลิกาเป็นสารตัวเติม ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยืด แสดงดังรูปที่ 2(ก) - 2(ง) พบว่ายางธรรมชาติผสมสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด ที่ความเร็วในการผิดรูปเป็น 10 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาทีที่มีพฤติกรรมที่เหมือนกัน ซึ่งค่าความเค้นของการดัดให้ยางยืดออกในรอบแรกมีค่าสูงกว่าความเค้นของการหดกลับของยาง โดยในการหดตัวกลับของยางนั้น ยางจะไม่กลับสู่ตำแหน่งได้อย่างสมบูรณ์ กล่าวคือค่าความเค้นจะเป็นศูนย์ที่ความเครียดค่าหนึ่ง ซึ่งถือเป็นการคงรูปอย่างถาวร นอกจากนี้ค่าความเค้นในการยืดยางดังกล่าวยังมีค่าสูงกว่าความเค้นในการยืดยางรอบต่อ ๆ มา ซึ่งจะได้พิจารณาการอ่อนตัวความเค้นตามสมการที่ (1) ต่อไป ส่วนความแตกต่างระหว่างความเค้นของการดัดให้ยางยืดออกกับความเค้นของการหดกลับของยางในแต่ละรอบของการผิดรูป สามารถคำนวณหาพลังงานสูญเสียหรือพลังงานที่สะสมในนัยอย่างตามสมการที่ (2) ดังกล่าวแล้วข้างต้น



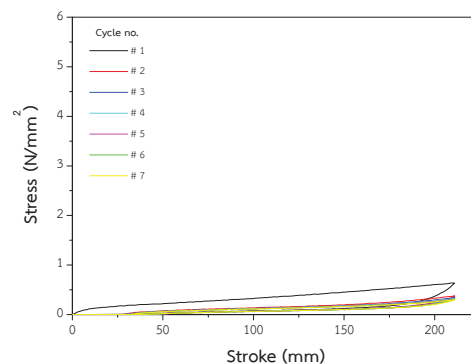
(ก) เขม่าดำ / 10 มิลลิเมตรต่อนาที



(ข) ซิลิกา / 10 มิลลิเมตรต่อนาที



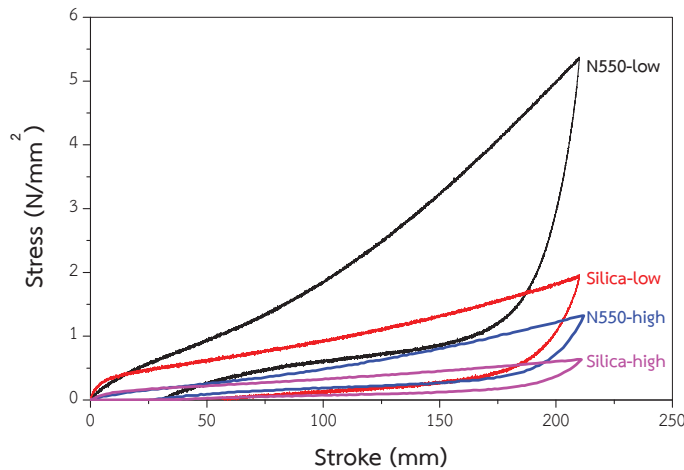
(ค) เขม่าดำ / 500 มิลลิเมตรต่อนาที



(ง) ซิลิกา / 500 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 2 ความเค้นกับระยะยืดจากการยืด-หดอย่างต่อเนื่องจำนวน 7 รอบของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำเกรด N550 และซิลิกา ด้วยความเร็วในการผิดรูปเป็น 10 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที

ยางธรรมชาติผสมเขม่าดำเกรด N550 เมื่อถูกดึงให้ยืดออกและปล่อยให้หดตัวกลับด้วยความเร็วในการบิดรูป 10 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเป็นความเร็วในการบิดรูปต่ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีค่าความเค้นในการดึงรอบแรกสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเขม่าดำซึ่งเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรง (Boonstra, 1982; Donnet & Custodero, 2014) เมื่อผสมเข้าไปในยางธรรมชาติสามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลยากกับเขม่าดำทั้งทางกายภาพและทางเคมี ทำให้สามารถส่งผ่านแรงกระทำจากภายนอกไปผสมในอนุภาคของเขม่าดำได้ ส่งผลให้ต้องใช้แรงดึงมากขึ้นเพื่อให้ยางบิดรูปหรือยืดออกในระยะยืดที่เท่ากัน ส่วนยางธรรมชาติผสมซิลิกาที่ความเร็วในการบิดรูปเดียวกันจะมีค่าต่ำ ซึ่งซิลิกาจัดเป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงเช่นกัน แต่เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิล หรือหมู่ไฮดรอกซิลในปริมาณมาก (Donnet & Custodero, 2014; Waddell & Evans, 2001) ทำให้มีความเป็นขี้ผึ้ง ซิลิกาจึงแตกตัวและผสมเข้ากับยางธรรมชาติซึ่งไม่มีขี้ผึ้งได้ยาก ยางธรรมชาติผสมซิลิกาจึงมีค่าความเค้นในการดึงรอบแรกต่ำกว่ายางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำเกรด N550

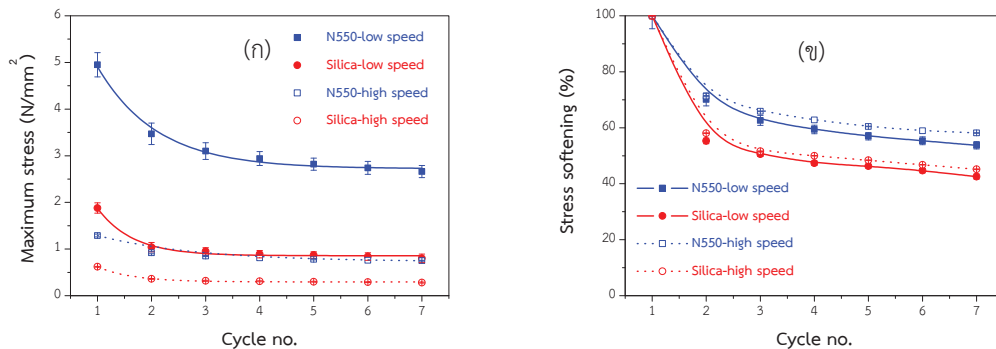


รูปที่ 3 ความเค้นกับระยะยืดจากการยืด-หด รอบแรกของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำเกรด N550 และซิลิกา ด้วยความเร็วในการบิดรูปเป็น 10 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อเปรียบเทียบยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมชนิดเดียวกันที่ความเร็วในการบิดรูปต่ำและสูง คือ 10 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ตามลำดับ พบว่ายางธรรมชาติผสมสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดที่ความเร็วในการบิดรูปต่ำมีค่าความเค้นในการดึงรอบแรกสูงกว่า ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการบิดรูปของยางด้วยความเร็วในการบิดรูปที่ต่ำมากนั้น ปลายโมเลกุลของอิสระ (free chain end) (Treloar, 2005) หรือส่วนของโมเลกุลยาระหว่างจุดเชื่อมโยงที่เกี่ยวข้องกัน (entanglement) (Gent & Mars, 2014) สามารถคลายตัว หรือการเลื่อนไถล (molecules slipping) ของโมเลกุลยาง (Hanson, et al., 2005; Houwink, 1956) หรือเคลื่อนไหวอย่างอิสระได้ ทำให้ต้องใช้แรงกระทำสูงในการดึงให้ยางยืดออก ส่วนแรงกระทำในขณะหดตัวกลับมีค่าต่ำกว่าแรงที่ใช้ในการยืดออกอย่างมาก เนื่องจากการคลายตัว หรือการเลื่อนไถลของโมเลกุลดังกล่าวจะไม่คืนกลับสภาพเดิม จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีพื้นที่ระหว่างการยืดออกและการหดกลับสูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งจะได้พิจารณาปริมาณพลังงานสูญหายนี้ในภายหลังต่อไป เมื่อความเร็วในการบิดรูปสูง (500 มิลลิเมตรต่อนาที) อาจจะมีเร็วเกินไปที่โมเลกุลยางจะเกิดการคลายตัว หรือการเลื่อนไถลของโมเลกุลยาง ทำให้ความเค้นต่ำกว่าที่ความเร็วในการบิดรูป 10 มิลลิเมตรต่อนาที แต่ยังคงปรากฏพื้นที่ระหว่างการยืดออกและการหดกลับ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการแตกหักของโครงสร้างสารตัวเติม หรือการแตกหักของพันธะระหว่างโมเลกุลยากกับอนุภาคสารตัวเติม (Kraus, et al., 1966; Mullins, 1950)

รูปที่ 4 (ก) แสดงความเค้นสูงสุดของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำและซิลิกาที่ถูกดึงให้ยางยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์ในแต่ละรอบอย่างต่อเนื่องจำนวน 7 รอบ ด้วยความเร็วในการบิดรูป 10 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าเมื่อจำนวนรอบที่ดึง

ให้ยางยืด-หดเพิ่มขึ้น ความเค้นของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดที่ทุกความเร็วในการฉีดรูปมีค่าลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น โดยในรอบที่สองค่าความเค้นจะลดลงหลังจากการดึงให้ยางยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์ในรอบแรกค่อนข้างมาก หลังจากนั้นในรอบต่อ ๆ มา ค่าความเค้นลดลงอีกเล็กน้อย โดยยางธรรมชาติผสมเขม่าดำที่ดึงให้ยางยืด-หดด้วยความเร็วในการฉีดรูป 10 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความเค้นสูงสุด การอ่อนตัวหรือลดลงของความเค้นนี้ อาจเป็นผลมาจากการดึงยางให้ยืดออกในรอบแรก ทำให้เกิดการแตกหักของโซโมเลกุลยาง (bond rupture) หรือพันธะระหว่างโมเลกุลที่อ่อนแอ (Blanchard & Parkinson, 1952; Bueche, 1960; Diani, et al., 2006) การคลายการเกี่ยวพัน (disentanglement) ของโซโมเลกุล (Hanson, et al., 2005) หรือการจัดเรียงตัว (orientation) ของโซโมเลกุลยาง (Qi & Boyce, 2005) การดึงให้ยางยืดออกในรอบต่อ ๆ มา จึงใช้แรงดึงน้อยลงหรือมีค่าความเค้นลดลง อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติผสมเขม่าดำและซิลิกามีการลดลงของความเค้นที่แตกต่างกัน อาจเป็นผลเนื่องมาจากการดึงให้ยางตัวอย่างยืดออก ทำให้สารตัวเติมแต่ละชนิดที่เติมลงไปมีการแตกหักของโครงสร้างสารตัวเติม หรือการแตกหักของพันธะระหว่างโมเลกุลยางกับอนุภาคสารตัวเติม (Kraus, et al., 1966; Mullins, 1950) หรือการเลื่อนไถล (molecules slipping) ของโมเลกุลยางกับอนุภาคของสารตัวเติม (Hanson, et al., 2005; Houwink, 1956) ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความเค้นลดต่ำลงต่างกัน ดังนั้นการดึงให้ยางยืดออกในรอบต่อ ๆ มา จึงใช้แรงดึงน้อยลงหรือมีค่าความเค้นลดลงนั่นเอง

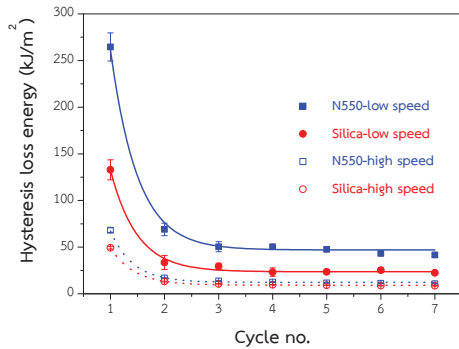


รูปที่ 4 (ก) ความเค้นสูงสุด และ (ข) การอ่อนตัวของความเค้นจากการยืด-หดอย่างต่อเนื่องจำนวน 7 รอบของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณ 40 phr

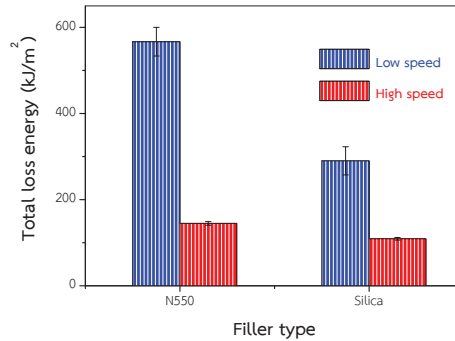
เมื่อคำนวณการอ่อนตัวของความเค้นตามสมการที่ (1) แสดงดังรูปที่ 4(ข) พบว่ายางธรรมชาติผสมสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิดที่ยืด-หด ด้วยความเร็วในการฉีดรูปต่ำ (10 มิลลิเมตรต่อนาที) มีการอ่อนตัวของความเค้นมากกว่าที่ยืด-หด ด้วยความเร็วในการฉีดรูปสูง ยางธรรมชาติผสมเขม่าดำมีการอ่อนตัวหรือการลดลงของค่าความเค้นมากกว่ายางธรรมชาติที่ผสมซิลิกา นั้นแสดงว่าการดึงให้ยางยืดออก 300 เปอร์เซ็นต์อาจทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้างเขม่าดำหรือการแตกหักของพันธะระหว่างโมเลกุลยางกับอนุภาคเขม่าดำหรือการเลื่อนไถลของโมเลกุลยางกับอนุภาคของเขม่าดำดังกล่าวแล้วข้างต้น ซึ่งโดยทั่วไปโครงสร้างเขม่าดำจะอยู่ในลักษณะของแอกโกลเมอเรต (agglomerate) ซึ่งประกอบด้วยแอกกรีเกต (aggregate) ของเขม่าดำที่ยึดกันอยู่อย่างหลวม ๆ สามารถแตกและถูกทำลายได้ง่ายจากการยืดออกของยาง (Leblanc, 2002; Chandra et al., 2017) ในทำนองเดียวกัน ซิลิกาซึ่งปกติจะมีโครงสร้างเป็นกลุ่มก้อน (clusters) ที่ยึดติดกันอยู่ด้วยพันธะไฮโดรเจน ก็สามารถแตกและถูกทำลายได้เช่นกัน แต่เกิดขึ้นได้ยากกว่าการแตกแอกโกลเมอเรตของเขม่าดำ นอกจากนี้อนุภาคซิลิกาไม่มีอันตรกิริยากับโมเลกุลยางที่จะทำให้เกิดการแตกหักของพันธะระหว่างโมเลกุลยางกับอนุภาคของซิลิกาหรือการเลื่อนไถลของโมเลกุลยางกับอนุภาคของซิลิกา จึงทำให้การลดลงของความเค้นที่น้อยกว่าที่ยังผสมเขม่าดำ

คำนวณพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับระยะยืดของการดึงให้ยางยืดออก (ขาขึ้น) และพื้นที่ใต้กราฟของการหดตัวกลับ (ขาลง) แล้วนำมาคำนวณพลังงานสูญหายตามสมการที่ (2) ได้ผลแสดงดังรูปที่ 5(ก) ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการยืด-หดยางธรรมชาติผสมเขม่าดำด้วยความเร็วในการฉีดรูป 10 มิลลิเมตรต่อนาทีมีพลังงานสูญหายสูงมาก ดัง

อธิบายแล้วข้างต้น นั่นคือที่ความเร็วในการฉีดรูปนี้อาจทำให้โมเลกุลยางเกิดการคลายการเกี่ยวพัน หรือการเลื่อนไถลของโมเลกุลยางมากกว่าความเร็วในการฉีดรูปสูง 500 มิลลิเมตรต่อนาที การคลายการเกี่ยวพัน หรือการเลื่อนไถลของโมเลกุลยางเป็นพฤติกรรมที่ไม่สามารถย้อนกลับได้ (Treloar, 2005; Hofmann, 1989) ส่งผลให้มีพลังงานสูญเสียสูงสุด ซึ่งพลังงานเหล่านี้ถูกใช้ไปในการแตกหักของโครงสร้างสารตัวเติมหรือการแตกหักของพันธะระหว่างโมเลกุลยางกับอนุภาคสารตัวเติม หรือการเลื่อนไถลของโมเลกุลยางกับอนุภาคของสารตัวเติมดังกล่าวแล้วข้างต้น ดังจะเห็นได้อย่างชัดเจนจากพลังงานสูญเสียรวมในการยืด-หดจำนวน 7 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 5(ข) การยืด-หดอย่างรวดเร็วในการฉีดรูป 10 มิลลิเมตรต่อนาทีที่มีพลังงานสูญเสียสูงสุด



(ก) พลังงานสูญเสียจากการยืด-หด แต่ละรอบ



(ข) พลังงานสูญเสียรวมจากการยืด-หด 7 รอบ

รูปที่ 5 (ก) พลังงานสูญเสียจากการยืด-หด แต่ละรอบ และ (ข) พลังงานสูญเสียรวมจากการยืด-หด 7 รอบของยางธรรมชาติที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณ 40 phr

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับผลของความเร็วในการฉีดรูปต่อการอ่อนตัวความเค้น และพลังงานสูญเสีย โดยทดสอบการอ่อนตัวความเค้น และพลังงานสูญเสียด้วยเครื่อง universal testing machine ซึ่งสามารถปรับความเร็วในการฉีดรูปในโหมด cycle ได้สูงสุดเพียง 500 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยางบางชนิดมีความเร็วในการฉีดรูปที่สูงกว่านี้ งานวิจัยที่จะศึกษาต่อไป ผู้วิจัยจะได้ศึกษาความเร็วในการฉีดรูปที่สูงขึ้นด้วยเครื่องทดสอบอื่น ๆ เช่น เครื่อง dynamic mechanical analyzer (DMA) เป็นต้น รวมทั้งศึกษาในยางธรรมชาติที่ผสมเขม่าดำเกรดอื่น ๆ และสารตัวเติมชนิดอื่นๆ และปริมาณของสารตัวเติมด้วย ซึ่งจะทำให้ได้องค์ความรู้ที่นำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนา และปรับปรุงสูตรยางให้เหมาะสมกับการใช้งานยางธรรมชาติทางวิศวกรรมที่รับแรงกระทำแบบพลวัตได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางต่อไป

5. สรุปผลการวิจัย

ยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมเมื่อได้รับแรงกระทำแบบพลวัตด้วยความเร็วในการฉีดรูปต่ำ มีการอ่อนตัวของความเค้น และพลังงานสูญเสียสูงกว่าการกระทำด้วยความเร็วในการฉีดรูปสูง โดยเมื่อจำนวนรอบของการถูกกระทำอย่างต่อเนื่องเพิ่มขึ้น การอ่อนตัวของความเค้น และพลังงานสูญเสียรวมมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ยางธรรมชาติผสมเขม่าดำมีค่าความเค้นสูงสุด และพลังงานสูญเสียสูงกว่ายางธรรมชาติผสมซิลิกา ผลการวิจัยที่ได้เกี่ยวกับสมบัติด้านการอ่อนตัวของความเค้น และพลังงานสูญเสียของยางธรรมชาติผสมสารตัวเติมนี สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ยางทางวิศวกรรม โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ยางที่ได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องรับแรงกระทำซ้ำ ๆ ในขณะใช้งาน เช่น ยางล้อรถ ยางรองคอกสะพาน ยางรองแท่นเครื่อง และยางรองอาคาร ซึ่งอาจต้องทำการวิจัยต่อไปในกรณีของยางธรรมชาติผสมเขม่าดำเกรดต่าง ๆ สารตัวเติมชนิดอื่น และผลของปริมาณสารตัวเติม

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณหลักสูตรเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่อนุเคราะห์วัสดุและสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือ เครื่องจักร เครื่องทดสอบ และขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่สนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

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(4), 799-812.

Boonstra, B. B. (1982). Reinforcement by fillers. In Blow, C. M., & Hepburn, C. (eds.), **Rubber technology and manufacture**. (269-308) 2nd ed. Norwich, Norfolk, UK: Butterworth Scientific.

Brown, R. (2006). **Physical testing of rubber**. 4th ed. Boston: Springer.

Brydson, J. A. (1988). **Rubbery materials and their compounds**. Essex: Elsevier Science Publishers Ltd.

Bueche, F. (1960). Molecular basis for the Mullins effect. **Journal of applied polymer science**, 4(10), 107-114.

Chandra, C. S. J., Bipinbal, P. K., & Sunil, K. N. (2017). Viscoelastic behaviour of silica filled natural rubber composites-Correlation of shear with elongational testing. **Polymer testing**, 60, 187-197.

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 Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (eds.), **The science and technology of rubber**. (383-416) 4th ed. MA, USA: Elsevier Inc.

Gent, A., N. (1992). **Engineering with rubber**. Oxford: Oxford University Press.

Gent, A. N., & Mars, W. V. (2014). Strength of elastomers. In Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (eds.), **The science and technology of rubber** (473-516). 4th ed. MA: Elsevier Inc.

Hanson, D. E., Hawley, M., Houlton, R., Chitanvis, K., Rae, P., & Orlor, E. B. (2005). Stress softening experiments in silica-filled polydimethylsiloxane provide Insight into a mechanism for the Mullins effect. **Polymer**, 46(24), 10989-10995.

Hofmann, W. (1994). **Rubber technology handbook**. Ohio: Hanser Publishers.

Houwink, R. (1956). Slipping of molecules during the deformation of reinforced rubber. **Rubber chemistry and technology**, 29(3), 888-893.

Kraus, G., Childers, C. W. & Rollmann, K. W. (1966). Stress softening in carbon black reinforced vulcanizates. strain rate and temperature effects. **Journal of applied polymer science**, 10(2), 229-244.

Laube, S., Monthey, S., & Wang, M. J. (2001). Compounding with carbon black and oil. In Dick, J. S. (ed.), **Rubber technology: Compounding and testing for performance**. (295-324). Cincinnati, Ohio, USA: Hanser Gardner Publications, Inc.

- Leblanc, J. L. (2002). Rubber-filler interactions and rheological properties in filled compounds. **Progress in polymer science**, 27, 627-687.
- Mullins, L. (1950). The thixotropic behavior of carbon black in rubber. **The journal of physical chemistry A**, 54(2), 239-251.
- Ngai, K. L., Capaccioli, S., & Plazek, D. J. (2014). The viscoelastic behavior of rubber and dynamics of blends. In Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (eds.), **The science and technology of rubber** (193-284). 4th ed. MA: Elsevier Inc.
- Qi, H. J., & Boyce, M. C. (2005). Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethane. **Mechanics of materials**, 37(8), 817-839.
- Roberts, A. D. (1988). **Natural rubber science and technology**. Oxford: Oxford University Press.
- Sainumsai, W., Toki, S., Amnuaypornsi, S., Nimpai boon, A., Sakdapapanich, J., Rong, L., Hsiao, B. S., & Suchiva., K. (2017). Dependence on the onset of strain-induced crystallization of natural rubber and its synthetic analogue on crosslink and entanglement by using synchrotron X-ray. **Rubber chemistry and technology**, 90(4), 728-742.
- 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(16), 7064-7073.
- Tosaka, M., Murakami, S., Poompradub, S., Kohjiya, S., Ikeda, S., Toki, Y., Sics, I., & Hsiao, B. S. (2004). Orientation and crystallization of natural rubber network as revealed by WAXD using synchrotron radiation. **Macromolecules**, 37(9), 3299-3309.
- Treloar, L. R. G. (2005). **The physics of rubber elasticity**. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press.
- Waddell, W. H., & Evans, L. R. (2001). Precipitated silica and non-black fillers. In Dick, J. S. (ed.), **Rubber technology: Compounding and testing for performance**. (325-343). Cincinnati, Ohio, USA: Hanser Gardner Publications, Inc.
- Ward, I. M., & Hadley, D. W. (1993). **An introduction to the mechanical properties of solid polymers**. West Essex: John Wiley & Sons Ltd.