พฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์โดยใช้เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่

ณัฐกานต์ หมันนาเกลือ* ไรฮานา เจะเตะ และ วัชรินทร์ สายน้ำใส
สาขาวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
**ผู้รับผิดชอบบทความ E-mail: 594236002@parichat.skru.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ 4 ชนิด คือ ยางบีอาร์ ยางเอสบีอาร์ ยางเอ็นบีอาร์ และยางอีพีดีเอ็ม ด้วยเครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 1646-99 พบว่า ยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติมีแรงบิดเริ่มต้นของการทดสอบการผ่อนคลายความเค้นสูงกว่ายางคอมพาวด์ของยางสังเคราะห์ มีระยะเวลาในการคืนตัวสู่สภาวะสมดุลยาวกว่า แต่มีอัตราการผ่อนคลายความเค้นต่ำกว่ายางคอมพาวด์ของยางสังเคราะห์ทั้ง 4 ชนิด นั่นคือยางธรรมชาติมีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงกระทำเป็นแบบของแข็งยืดหยุ่นสูงกว่ายางสังเคราะห์ ซึ่งส่งผลให้ยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติต้องใช้เวลาการในการเก็บยางระหว่างกระบวนการผลิตนานกว่า เพื่อให้ยางคืนตัวกลับสู่สภาวะสมดุล ซึ่งผลการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์และนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางต่อไปได้

คำสำคัญ: ยางคอมพาวด์ การผ่อนคลายความเค้น เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่

Stress Relaxation Behavior of Compound Rubbers Using Mooney Viscometer

Nattakan Mannaklua*, Raihana Cheteh, and Watcharin Sainumsai
Program in Rubber and Polymer Technology, Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University
**Corresponding Author; E-mail: 594236002@parichat.skru.ac.th*

Abstract

This work aims to comparative study stress relaxation behavior of natural rubber and synthetic rubber (BR, SBR, NBR and EPDM) compounds by using Mooney viscometer following ASTM D 1646-99 standard test method. It was found that natural rubber compound exhibited the higher original torque of stress relaxation test and the longer recovery time to equilibrium state, whereas the lower rate of stress relaxation than synthetic rubber compounds. A rapid rate of stress relaxation indicates a higher viscous component. The higher rate of stress relaxation, the shorter storage time of rubber. The result of this research was applied to the rubber industry, especially on handling of compounded rubbers.

Keywords: compound rubber, stress relaxation, Mooney viscometer

1. บทนำ

ยางจัดเป็นวัสดุประเภทหยุ่นหนืด (viscoelastic material) มีสมบัติเป็นทั้งของเหลวหนืด (viscous) และของแข็งยืดหยุ่น (elastic) (Ngai et al., 2014; Ward & Hadley, 1993) นั่นคือ ยางสามารถยืดและไหลได้เมื่อได้รับแรงกด ซึ่งเป็นสมบัติของของเหลวหนืด เมื่อเอาแรงออกยางสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ซึ่งเป็นสมบัติของแข็งยืดหยุ่น ดังนั้น เมื่อยางมีสมบัติทั้งของเหลวหนืดและของแข็งยืดหยุ่น ทำให้ยางยุบตัวหรือยืดเมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึง แต่เมื่อคลายแรงกระทำออก ยางสามารถคืนรูปกลับแต่ไม่เท่าเดิม วัสดุยางแบ่งตามแหล่งที่มาได้เป็น 2 กลุ่มคือยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) และยางสังเคราะห์ (synthetic rubber) (Hofmann, 1994)

ยางธรรมชาติจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ได้จากต้นยางพันธุ์ฮีเวียบราซิลเลียนซิส (*Hevea brasiliensis*) (จิตต์ลัดดา, 2553) ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (พรพรรณ, 2540) ปัจจุบันมีการนำยางธรรมชาติไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด สมบัติเด่นของยางธรรมชาติได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง (tensile strength) สูง แม้ไม่ได้เติมสารเสริมแรง เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ ทำให้สามารถตกผลึกได้เมื่อดึง (Toki & Hsiao, 2003; Tosaka et al., 2004; Toki et al., 2005) สามารถยืดได้ถึงประมาณ 1000% หรือมากกว่านั้น (Gent, 1992; Gent & Mars, 2014; Roberts, 1988) ความสามารถในการยืดได้สูงนี้ ทำให้สามารถใช้ยางธรรมชาติในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการยืดได้สูง มีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง ความร้อนสะสมภายใน (heat build-up) ที่เกิดขณะใช้งานต่ำ และมีสมบัติการเหนียวติดกัน (tack) ที่ดี จึงเหมาะสำหรับการผลิตยางรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางรถยนต์ นอกจากนั้นยังมีความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) สูง (พรพรรณ, 2540) ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง

ยางสังเคราะห์ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของมอนอเมอร์ชนิดต่างๆ ยางสังเคราะห์ที่ใช้งานทั่วไป เช่น ยางเอสบีอาร์ (styrene butadiene rubber, SBR) เป็นยางที่สังเคราะห์จากการพอลิเมอไรซ์ร่วมกันของสไตรีนกับบิวทาไดอีน ส่วนยางบีอาร์ (butadiene rubber, BR) เป็นยางที่สังเคราะห์จากการพอลิเมอไรซ์ของมอนอเมอร์บิวทาไดอีน มีความยืดหยุ่นและสมบัติการกระเด้งกระดอนสูง ยางเอ็นบีอาร์ (acrylonitrile butadiene rubber, NBR) เป็นยางสังเคราะห์ที่มีความเป็นขั้วสูง สังเคราะห์จากการพอลิเมอไรซ์ร่วมกันของมอนอเมอร์อะไครโลไนไตรล์กับบิวทาไดอีน ประกอบด้วยอะไครโลไนไตรล์ตั้งแต่ 18-51 เปอร์เซ็นต์ และยางอีพีดีเอ็ม (etheylene propylene diene rubber, EPDM) ซึ่งสังเคราะห์มาจากการพอลิเมอร์ไรซ์ร่วมกันของมอนอเมอร์ 3 ชนิด คือ เอทธิลีน พรอพีลีน และไดอีน ปริมาณเล็กน้อย เป็นยางที่สายโซ่หลักไม่มีส่วนที่อิ่มตัวเลย จึงมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพจากความร้อน แสงแดด ออกซิเจน โอโซน สารเคมี กรด และด่างได้ดีมาก นอกจากนี้ ยังมียางสังเคราะห์ชนิดพิเศษอื่นๆ สำหรับการใช้งานเฉพาะทางอีกหลายชนิด เช่น ยางซิลิโคน ยางบิวไทล์ ยางฟลูออโรคาร์บอน ยางพอลิซัลไฟด์ ยางพอลิยูรีเธน เป็นต้น

การนำวัสดุยางมาใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จะมีการผสมสารเคมีลงไปในยางดิบ (raw rubber) ยางที่ผสมสารเคมีแล้วเรียกว่ายางคอมพาวด์ (compound rubber) ยางดิบมีความหนืดสูงจะทำให้การบดผสมเป็นไปได้ยากเนื่องจากสารเคมีจะเข้าผสมกับยางได้ยากและจะใช้พลังงานในการบดผสมสูง (บุญธรรม, 2539) ด้วยเหตุนี้ก่อนการใส่ สารเคมีลงไปจึงต้องมีการลดความหนืดโดยการบดยางให้นิ่ม (mastication) ในบางกรณีอาจมีการเติมสารช่วยย่อยโมเลกุล (peptizer) เพื่อให้ยางนิ่มเร็วขึ้น โดยทั่วไปการบดยางจะทำในเครื่องบดซึ่งอาจใช้เครื่องบดผสมระบบปิด (internal mixer) หรือเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ซึ่งเป็นเครื่องบดผสมระบบเปิด (Dick, 2001; Hofmann, 1994) ขั้นตอนนี้ยางจะถูกทำให้นิ่มโดยโมเลกุลของยางถูกทำให้ฉีกขาดด้วยแรงเฉือนจากเครื่องบดผสม เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) เป็นเครื่องมือสำหรับทดสอบความหนืดมูนนี่ ลักษณะการวัลคาไนซ์และการผ่อนคลายความเค้นของยางดิบและยางคอมพาวด์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ รุ่น MV-3000-VS ผลิตและจัดจำหน่ายโดยบริษัท GOTECH Testing Machines Inc. ซึ่งการผ่อนคลายความเค้นเป็นพฤติกรรมของวัสดุประเภทหยุ่นหนืดที่ตอบสนองต่อแรงกระทำ ซึ่งจะประกอบด้วยการ

ตอบสนองแบบของแข็งที่ยืดหยุ่น (elastic response) และการตอบสนองของของเหลวหนืด (viscous response) (Dick, 2001; Ngai et al., 2014) อัตราการผ่อนคลายความเค้นสามารถบ่งชี้ได้ว่าวัสดุชนิดนั้นๆ มีการตอบสนองแบบของแข็งที่ยืดหยุ่น หรือการตอบสนองของของเหลวหนืด ซึ่งวัสดุที่อัตราการผ่อนคลายความเค้นต่ำกว่า จะมีการตอบสนองแบบของแข็งที่ยืดหยุ่นสูงกว่า ส่วนวัสดุที่มีอัตราการผ่อนคลายความเค้นสูงมีการตอบสนองแบบของเหลวหนืด

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์ 5 ชนิด คือยางธรรมชาติ (ยางแท่งมาตรฐานเกรด 5แอล) กับยางสังเคราะห์ที่ใช้งานทั่วไป 4 ชนิด ได้แก่ ยางบีอาร์ ยางเอสบีอาร์ ยางเอ็นบีอาร์ และยางอีพีดีเอ็ม โดยใช้เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ รุ่น MV-3000-VS

3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ ศึกษาเปรียบเทียบการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์ โดยใช้ยาง 5 ชนิด ดังนี้

1) ยางแท่งมาตรฐานเกรด 5แอล (STR 5L) ผลิตโดยบริษัทหวาไท้รับเบอร์ จำกัด จังหวัดสงขลา
2) ยางบีอาร์ (BR) KUMHO KBR 01 ผลิตโดยบริษัท KUMHO Petrochemical Co., Ltd.
3) ยางเอสบีอาร์ (SBR) BSTE SBR 1502 ผลิตโดยบริษัท BST Elastomers Co., Ltd.
4) ยางเอ็นบีอาร์ (NBR) NANCAR® 3345 ผลิตโดยบริษัท NANTEX Industry Co., Ltd.
5) ยางอีพีดีเอ็ม (EPDM) VISTALONTM 2504 ผลิตโดยบริษัท Exxon Mobil Chemical Co., Ltd.

3.2 การเตรียมยางคอมพาวด์

ผสมยางคอมพาวด์ตามสูตรการทดลองในตารางที่ 1 โดยนำยางมาบดผสมกับสารเคมีตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 3182 (1994) ด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้งขนาด 10x20 นิ้ว ซึ่งมี friction ratio เท่ากับ 1:1.2 ผลิตโดยบริษัทชัยเจริญเอ็นจิเนียริ่ง หลังจากนั้นนำยางคอมพาวด์มาทดสอบความหนืดมูนนี่ และการผ่อนคลายความเค้น

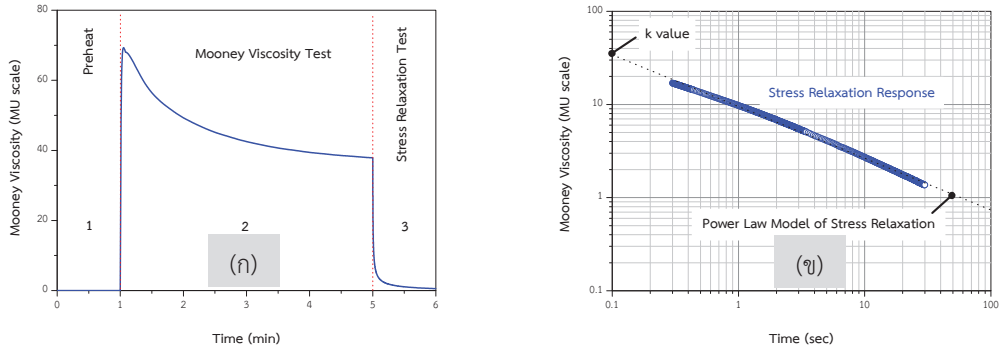
ตารางที่ 1 ปริมาณยางและสารเคมีที่ใช้ของยางคอมพาวด์

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (phr*)				
	NR	BR	SBR	NBR	EPDM
ยางธรรมชาติ	100	-	-	-	-
ยางบีอาร์	-	100	-	-	-
ยางเอสบีอาร์	-	-	100	-	-
ยางเอ็นบีอาร์	-	-	-	100	-
ยางอีพีดีเอ็ม	-	-	-	-	100
กรดสเตียริค	1	1	1	1	1
ซิงค์ออกไซด์	5	5	5	5	5
ซีบีเอส	1	1	1	1	1
กำมะถัน	2	2	2	2	2

* phr = parts per hundred rubber

3.3 การทดสอบความหนืดมูนนี่และการผ่อนคลายความเค้น

นำยางคอมพาวด์มาทดสอบความหนืดมูนนี่และการผ่อนคลายความเค้นด้วยเครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ รุ่น MV-3000-VS (GOTECH Testing Machines Inc.) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ ตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM D 1646 (1999) ซึ่งในการทดสอบจะมี 3 ขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 1(ก) โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการอุ่นยางตัวอย่างเป็นเวลา 1 นาที ในขั้นตอนที่สอง โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว 2 รอบต่อนาทีและบันทึกค่าแรงบิดเป็นค่าความหนืดมูนนี่ของยางตัวอย่างที่เวลา 4 นาที และในขั้นตอนที่สาม เป็นการวัดการผ่อนคลายความเค้นของยางหลังจากโรเตอร์หยุดหมุน โดยจะบันทึกค่าแรงบิดเป็นเวลา 1 นาที



รูปที่ 1 (ก) ค่าแรงบิดในการทดสอบความหนืดมูนนี่และการทดสอบการผ่อนคลายความเค้น และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิด (Mooney units) กับเวลา (วินาที)

จากนั้นนำข้อมูลแรงบิด (Mooney viscosity value) มาวิเคราะห์หาอัตราการผ่อนคลายความเค้น (rate of stress relaxation) จากความสัมพันธ์ของแรงบิด (Mooney units) กับเวลา (วินาที) แสดงดังรูปที่ 1(ข) ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่และอัตราการผ่อนคลายความเค้นได้จากสมการยกกำลังแบบถดถอยดังสมการ (1) ทดสอบ 5 ชิ้นทดสอบ รายงานผลด้วยค่าเฉลี่ย

$$M = k(t)^{\alpha} \quad (1)$$

โดยที่ M หมายถึง ค่าแรงบิดในหน่วย Mooney units

k หมายถึง ค่าคงที่ เป็นแรงบิดในหน่วย Mooney units ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากโรเตอร์หยุดหมุน

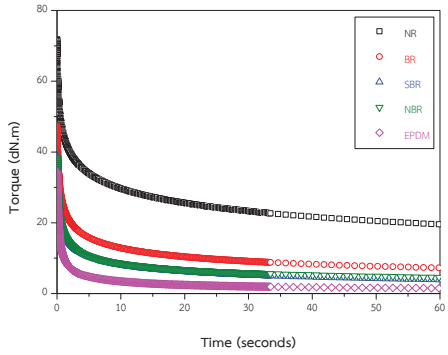
t หมายถึง เวลา (วินาที)

α หมายถึง อัตราการผ่อนคลายความเค้น (s^{-1})

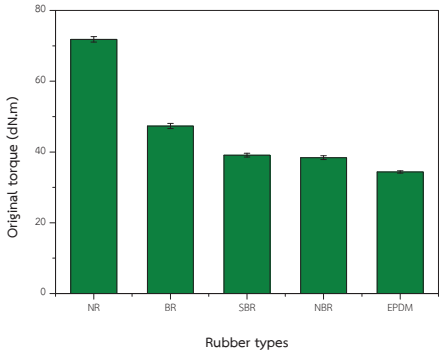
4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดหลังโรเตอร์หยุดหมุนกับเวลาของยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ทั้ง 4 ชนิด แสดงดังรูปที่ 2(ก) พบว่าในช่วงแรกที่โรเตอร์หยุดหมุน ค่าแรงบิดของยางคอมพาวด์ทุกชนิดจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นค่าแรงบิดจะค่อย ๆ ลดลงตามระยะเวลา ซึ่งยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติมีค่าแรงบิดเริ่มต้นสูงที่สุด รองลงมาเป็นยางคอมพาวด์ของยางบีอาร์ โดยที่ยางคอมพาวด์ของยางเอสบีอาร์และยางเอ็นบีอาร์มีค่าแรงบิดเริ่มต้นต่ำที่ใกล้เคียงกัน ส่วนยางคอมพาวด์ของยางอีพีดีเอ็มมีค่าความหนืดเริ่มต้นต่ำที่สุด ดังรูปที่ 2(ข) ทั้งนี้เนื่องมาจากยางธรรมชาติซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง (พรพรรณ, 2540) ต้องใช้แรงขับสูงเพื่อหมุนโรเตอร์ให้มีความเร็ว 2 รอบต่อนาที ในขณะที่ยางสังเคราะห์นั้นโดยทั่วไปจะมีการควบคุมขนาดโมเลกุลสำหรับการใช้งานที่เหมาะสมไว้ ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่ายางคอมพาวด์ของยางสังเคราะห์

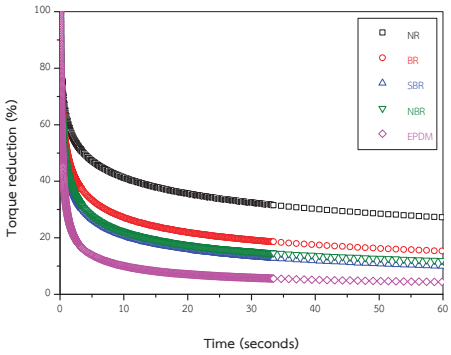
ทุกชนิดมีค่าความหนืดเริ่มต้นต่ำกว่ายางธรรมชาติ อาจเป็นเพราะยางสังเคราะห์เหล่านี้มีน้ำหนักโมเลกุลของยางต่ำกว่ายางธรรมชาติ ทำให้ค่าแรงบิดน้อยกว่าไปด้วย



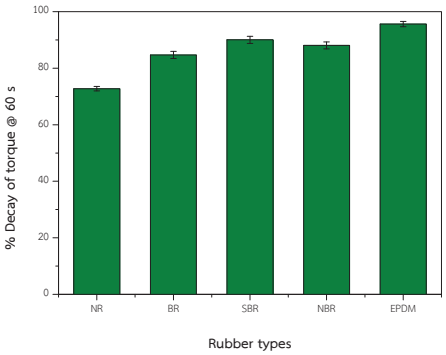
(ก) แรงบิด



(ข) ค่าแรงบิดหลังโรเตอร์หยุดหมุน



(ค) การลดลงของแรงบิด



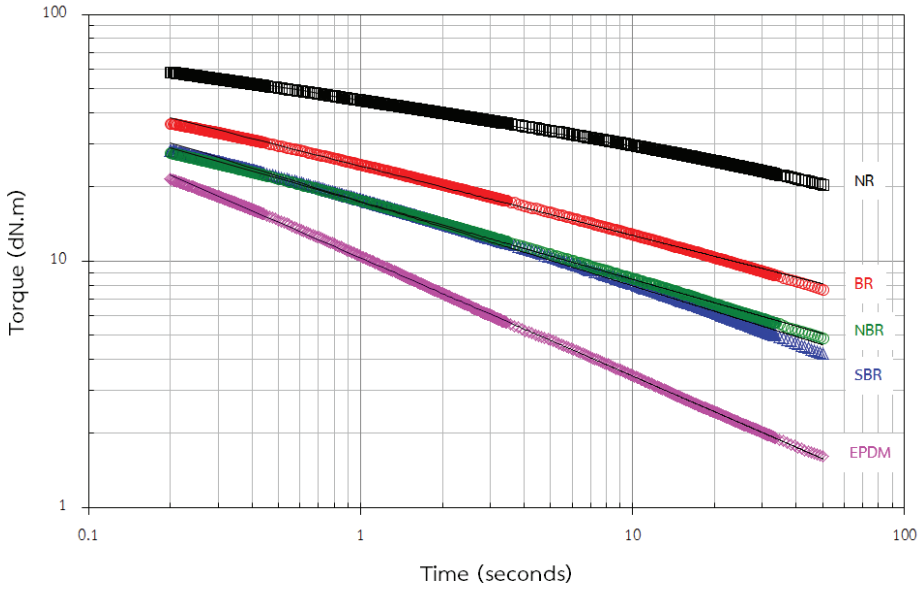
(ง) เปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงบิดที่เวลา 60 วินาที

รูปที่ 2 แรงบิดและการลดลงของแรงบิดหลังจากที่โรเตอร์หยุดหมุน

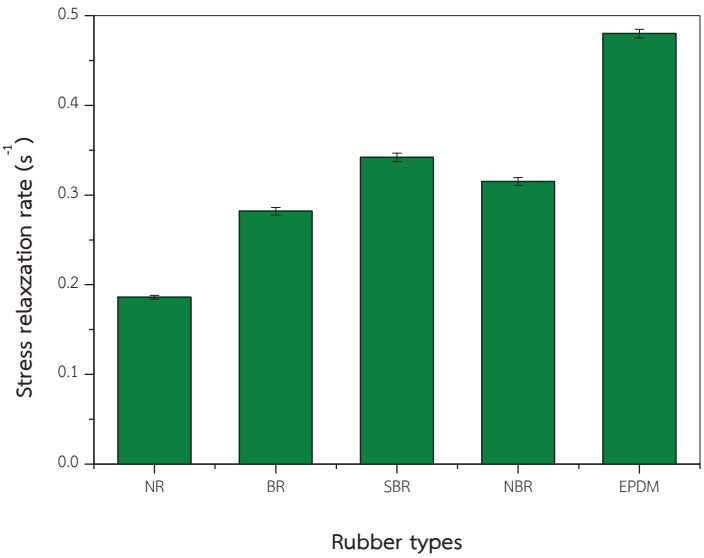
การลดลงของค่าแรงบิดหลังจากโรเตอร์หยุดหมุน พบว่ายางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติมีการลดลงของค่าแรงบิดช้ากว่ายางคอมพาวด์ของยางสังเคราะห์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นและน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่ายางสังเคราะห์ ดังรูปที่ 2(ค) ยางคอมพาวด์ของยางอีพีดีเอ็มมีการลดลงของค่าแรงบิดมากที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นเพราะยางอีพีดีเอ็มเป็นยางที่สังเคราะห์มาจากมอนอเมอร์ที่มีความเป็นของเหลวหนืดมากกว่ายางสังเคราะห์ชนิดอื่น ส่วนยางเอสบีอาร์และยางเอ็นบีอาร์จะมีส่วนประกอบของสไตรีนและอะไครโลไนไตรล์ที่แสดงความเป็นของเหลวหนืด ตามลำดับ โดยมีส่วนประกอบของบิวทาไดอีนที่แสดงสมบัติของของแข็งอิลาสติก (Hofmann, 1994) จึงทำให้ยางคอมพาวด์ของยางทั้งสองชนิดนี้มีการลดลงของแรงบิดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะได้พิจารณาอัตราการผ่อนคลายความเค้นต่อไป จากรูปที่ 2(ง) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ายางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติมีค่าแรงบิดลดลงน้อยกว่ายางคอมพาวด์ของยางสังเคราะห์ทั้ง 4 ชนิด หลังจากโรเตอร์หยุดหมุนเพียง 1 นาที แสดงว่ายางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติสามารถจะคืนตัวกลับสู่สภาวะสมดุลได้ช้ากว่ายางคอมพาวด์ของยางสังเคราะห์ นั่นคือยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติจะต้องใช้เวลานานกว่าเพื่อคืนตัวกลับสู่สภาวะสมดุล

อัตราการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์สามารถวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ของแรงบิดกับเวลา โดยใช้สมการยกกำลังแบบถดถอยดังรูปที่ 3 โดยอัตราการผ่อนคลายความเค้นพิจารณาได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งอัตราการผ่อนคลายความเค้นของยางที่มีค่าน้อยจะบ่งชี้ว่ายางตัวอย่างนั้นมีพฤติกรรมของแข็งที่ยืดหยุ่น (elastic) สูง (Treloar, 2005; Gent, 2014) ในทางกลับกันยางตัวอย่างที่มีอัตราการผ่อนคลายความเค้นสูงจะแสดงพฤติกรรม

ของของเหลวหนืด (viscous) สูง จากรูปที่ 4 พบว่ายางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติมีอัตราการผ่อนคลายความเค้นต่ำที่สุด คือ 0.186 หน่วยต่อวินาที นั่นแสดงว่ายางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติมีพฤติกรรมของแข็งที่ยืดหยุ่นสูงกว่ายางคอมพาวด์ของยางสังเคราะห์ทั้ง 4 ชนิด หากพิจารณาเปรียบเทียบในยางคอมพาวด์ของยางสังเคราะห์ด้วยกัน พบว่ายางคอมพาวด์ของยางบีอาร์มีพฤติกรรมของแข็งที่ยืดหยุ่นสูงกว่ายางคอมพาวด์ของยางเอ็นบีอาร์ ยางเอสบีอาร์ และยางอีพีดีเอ็ม ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากทั้งส่วนประกอบของยางและขนาดน้ำหนักโมเลกุล รวมถึงโครงสร้างของโมเลกุลด้วย (Treloar, 2005) ซึ่งจะได้ทำการศึกษาต่อไปในอนาคต ยางสังเคราะห์ซึ่งมีพฤติกรรมของแข็งที่ยืดหยุ่นต่ำกว่ายางธรรมชาติอย่างมาก ทำให้การบดผสมสารเคมีเข้าไปในยางทำได้ง่ายขึ้น (บุญธรรม, 2539) นอกจากนี้อาจส่งผลดีต่อระยะเวลาการเก็บยางคอมพาวด์ ตลอดจนกระบวนการแปรรูปในขั้นตอนอื่น ๆ ต่อไปด้วย



รูปที่ 3 แรงบิดกับเวลาของยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์



รูปที่ 4 อัตราการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์ชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของสมการยกกำลังแบบถดถอยและเวลาการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์ชนิดต่าง ๆ

ชนิดของยางคอมพาวด์	พารามิเตอร์ของสมการยกกำลังแบบถดถอย			เวลาการผ่อนคลายความเค้น (นาที)	
	k	*a*	*r**	t_{50}**	t_{90}**
ยางธรรมชาติ	44.849	-0.186	0.9967	0.055	315.10
ยางบีอาร์	24.343	-0.282	0.9977	0.018	5.53
ยางเอสบีอาร์	17.459	-0.342	0.9987	0.012	1.32
ยางเอ็นบีอาร์	17.423	-0.315	0.9965	0.012	2.03
ยางอีพีดีเอ็ม	10.323	-0.480	0.9998	0.006	0.17

r:* correlation coefficient / *t_X:* เวลาที่แรงบิดลดลง X%

อัตราการผ่อนคลายความเค้นที่แตกต่างกันของยางคอมพาวด์ทั้ง 5 ชนิด (รูปที่ 4) ยังสามารถบ่งชี้ถึงระยะเวลาการเก็บยางเพื่อให้ยางคอมพาวด์คืนตัวสู่สภาวะสมดุลได้ด้วย กล่าวคือยางคอมพาวด์ที่มีอัตราการผ่อนคลายความเค้นต่ำจะต้องใช้เวลาในการเก็บยางคอมพาวด์ดังกล่าวเป็นระยะเวลานาน ส่วนยางคอมพาวด์ที่มีอัตราการผ่อนคลายความเค้นสูงจะคืนตัวสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว จากพารามิเตอร์ของสมการยกกำลังแบบถดถอยในตารางที่ 2 สามารถนำมาทำนายระยะเวลาที่ยางคอมพาวด์จะคืนกลับสู่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งพบว่ายางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติต้องใช้เวลานานประมาณ 5.25 ชั่วโมง ในการลดความเค้นในยางคอมพาวด์ลง 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ยางคอมพาวด์ของยางบีอาร์จะใช้เวลาดังกล่าวประมาณ 5 นาที แต่ยางคอมพาวด์ของยางอีพีดีเอ็มจะใช้เวลาดังกล่าวเพียงประมาณ 0.17 นาที ส่วนยางคอมพาวด์ของยางเอสบีอาร์และยางเอ็นบีอาร์จะใช้เวลาในการลดความเค้นในยางลง 90 เปอร์เซ็นต์ประมาณ 1.32 และ 2.03 นาที ตามลำดับ

5. สรุปผลการวิจัย

ยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ทั้ง 4 ชนิดมีพฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นที่แตกต่างกัน ยางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติมีอัตราการผ่อนคลายความเค้นต่ำกว่ายางคอมพาวด์ของยางสังเคราะห์ทั้ง 4 ชนิด โดยยางคอมพาวด์ของยางอีพีดีเอ็มเป็นยางสังเคราะห์ที่มีอัตราการผ่อนคลายความเค้นสูงที่สุด ซึ่งยางคอมพาวด์ของยางสังเคราะห์สามารถคืนตัวสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่า และใช้เวลาในการเก็บยางน้อยกว่ายางคอมพาวด์ของยางธรรมชาติ

6. ข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยที่ได้เกี่ยวกับความหนืด และพฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์จะเป็นประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะอย่างในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณหาเวลาการเก็บยาง การหดตัวกลับ และการเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาของแผ่นยางได้ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพียงเบื้องต้น ยังคงต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการผ่อนคลายความเค้นของยางคอมพาวด์ที่ผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณหลักสูตรเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่อนุเคราะห์วัสดุและสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือ เครื่องจักร เครื่องทดสอบ และขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่สนับสนุนงบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

จิตต์ลัดดา ศักดาภิพาณิชย์. (2553). **เทคโนโลยียางธรรมชาติ**. กรุงเทพมหานคร: เทคโนบิซ คอมมิวนิเคชั่นส์.

บุญธรรม นิธิอุทัย. (2539). **กระบวนการแปรรูปยาง.** ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี.

พรพรรณ นิธิอุทัย. (2540). **ยาง: เทคนิคการออกสูตร.** ปัตตานี: ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ASTM D 1646. (1999). Standard test methods for rubber - Viscosity, stress relaxation, and pre-vulcanization characteristics (Mooney viscometer). **Annual book of ASTM standards**, Vol 09.01. New York, USA.

ASTM D 3182. (1994). Standard practice for rubber - Materials, equipment, and procedures for mixing standard compounds and preparing standard vulcanized sheets. **Annual book of ASTM standards**, Vol 09.01. New York, USA.

Dick, J. S. (2001). Compound processing characteristics and testing. In Dick, J. S. (Ed.), **Rubber technology: compounding and testing performance** (17-45)**.** Ohio: Hanser Publishers.

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

Gent, A. N. (2014). Rubber elasticity: Basic concepts and behavior. In Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (Eds.), **The science and technology of rubber** (1-26)**.** 4th Ed. MA: Elsevier Inc.

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.

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

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.

Roberts, A. D. (1988). **Natural rubber science and technology**. Oxford: 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(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.

Ward, I. M., & Hadley, D. W. (1993). **An introduction to the mechanical properties of solid polymers.** West Essex: John Wiley & Sons Ltd.