อิทธิพลของระยะเวลาการบดยางต่อการพักความเค้นของยางธรรมชาติโดยใช้เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่

Influence of Mastication Time on Stress Relaxation of Natural Rubber Using Mooney Viscometer

นุสรา บุญคง[1], วาสนา หมัดล่าเตะ[1], ณัฐกานต์ หมันนาเกลือ[1], ไรฮานา เจะเตะ[1], วัชรินทร์ สายน้ำใส[2*]
Nussara Boonkong[1], Wassna Madlateh[1], Nattakan Mannaklua[1], Raihana Cheteh[1],
Watcharin Sainumsai[2*]

บทคัดย่อ

การศึกษาพฤติกรรมการพักความเค้นของยางธรรมชาติด้วยเครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 1646-99 โดยศึกษาผลของเวลาการบดยางต่อพฤติกรรมดังกล่าว ซึ่งแปรระยะเวลาบดยางเป็น 0, 1, 3, 5, 10 และ 20 นาที พบว่าเมื่อเวลาการบดยางเพิ่มขึ้น ทำให้แรงบิดเริ่มต้นของการทดสอบการพักความเค้นมีค่าลดลง มีระยะเวลาในการคืนตัวสู่สภาวะสมดุลสั้นลง แต่มีอัตราการพักความเค้นสูงขึ้น นั่นคือยางจะมีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงกระทำเป็นแบบของเหลวหนืดมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ลดระยะเวลาการเก็บยางระหว่างกระบวนการผลิตให้สั้นลงได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์และนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยางต่อไปได้

คำสำคัญ: ยางธรรมชาติ, ระยะเวลาบดยาง, การพักความเค้น, เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่

Abstract

Stress relaxation behavior of natural rubber was carried out by using Mooney viscometer following ASTM D 1646-99 standard test method. The effect of mastication time of natural rubber was studied. The mastication times of rubber were varied in the range of 0-20 minutes. It was found that the original torque of stress relaxation test and the recovery time to equilibrium state decreased with increasing the mastication time of natural rubber, whereas the rate of stress relaxation increased. A rapid rate of stress relaxation indicates a higher viscous component. The higher rate of stress relaxation, the shorter storage time of compounded rubber. The result of this research was applied to the rubber industry, especially on handling of compounded rubbers.

Keyword: Natural rubber, Mastication time, Stress relaxation, Mooney viscometer

[1]นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

[2]อาจารย์ หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

*Corresponding author, E-mail: watcharin.sa@skru.ac.th

บทนำ

ยางธรรมชาติเป็นสารพอลิเมอร์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก การจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบ cis-1,4-polyisoprene (พรพรรณ, 2540) ยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ จัดเป็นวัสดุประเภทหยุ่นหนืด (viscoelastic material) มีสมบัติเป็นทั้งของเหลวหนืด (viscous) และของแข็งยืดหยุ่น (elastic) (Ngai et al., 2004; Ward and Hadley, 1993) นั่นคือ ยางสามารถยืดและไหลได้เมื่อได้รับแรงกด ซึ่งเป็นสมบัติของของเหลวหนืด เมื่อเอาแรงออกยางสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้ ซึ่งเป็นสมบัติของแข็งยืดหยุ่น ดังนั้น เมื่อยางมีสมบัติทั้งของเหลวหนืดและของแข็งยืดหยุ่น ทำให้ยางยุบตัวหรือยืดเมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึง แต่เมื่อคลายแรงกระทำออก ยางจะคืนรูปกลับแต่ไม่เท่าเดิม ก่อนการใช้งานจึงจำเป็นต้องบดให้นิ่ม (masticate) เพื่อให้การบดผสมยางและสารเคมีทำได้ง่ายขึ้น

ยางมีความหนืดสูงจะทำให้การบดผสมเป็นไปได้ยากเนื่องจากสารเคมีจะเข้าผสมกับยางได้ยากและจะใช้พลังงานในการบดผสมสูง (บุญธรรม, 2539) ด้วยเหตุนี้ก่อนการใส่สารเคมีลงไปจึงต้องมีการลดความหนืดโดยการบดยางให้นิ่ม (mastication) ในบางกรณีอาจมีการเติมสารช่วยย่อยโมเลกุล (peptizer) เพื่อให้ยางนิ่มเร็วขึ้น โดยทั่วไปการบดยางจะทำในเครื่องบดซึ่งอาจใช้เครื่องบดผสมระบบปิด (internal mixer) หรือเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) ซึ่งเป็นเครื่องบดผสมระบบเปิด (Dick, 2001; Hofmann, 1994) ขั้นตอนนี้ยางจะถูกทำให้นิ่มโดยโมเลกุลของยางถูกทำให้ฉีกขาดด้วยแรงเฉือนจากเครื่องบดผสม

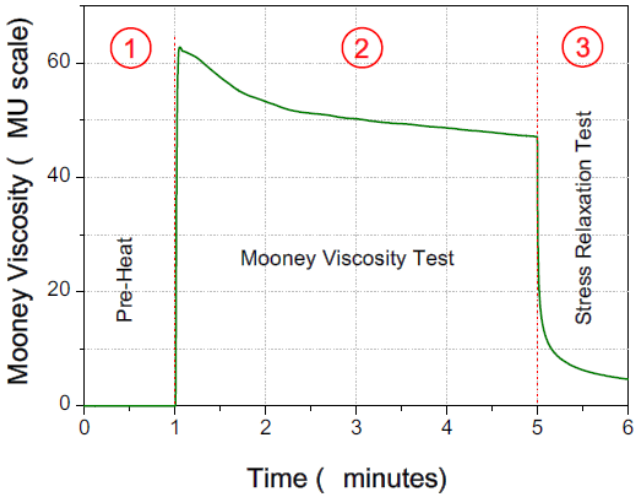
เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) เป็นเครื่องมือสำหรับทดสอบความหนืดมูนนี้ ลักษณะการวัลคาไนซ์และการพักความเค้นของยางดิบและยางคอมพาวนด์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ รุ่น MV-3000-VS ผลิตและจัดจำหน่ายโดยบริษัท GOTECH Testing Machines Inc. ซึ่งการพักความเค้นเป็นพฤติกรรมของวัสดุประเภทหยุ่นหนืดที่ตอบสนองต่อแรงกระทำ ซึ่งจะประกอบด้วยการตอบสนองแบบของแข็งที่ยืดหยุ่น (elastic response) และการตอบสนองแบบของเหลวหนืด (viscous response) (Dick, 2001; Ngai et al., 2014) อัตราการพักความเค้นสามารถบ่งชี้ได้ว่าวัสดุชนิดนั้นๆ มีการตอบสนองแบบของแข็งที่ยืดหยุ่น หรือการตอบสนองแบบของเหลวหนืด ซึ่งวัสดุที่อัตราการพักความเค้นต่ำกว่า จะมีการตอบสนองแบบของแข็งที่ยืดหยุ่นสูงกว่า ส่วนวัสดุที่มีอัตราการพักความเค้นสูงมีการตอบสนองแบบของเหลวหนืด

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพักความเค้นของยางธรรมชาติที่บดด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 0, 1, 3, 5, 10 และ 20 นาที โดยใช้เครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ รุ่น MV-3000-VS

วิธีดำเนินการวิจัย

ยางธรรมชาติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นยางแท่งเกรด 5แอล (STR 5L) ผลิตโดยบริษัทหวาไท้รับเบอร์ จำกัด จังหวัดสงขลา โดยนำยางแท่งเกรด 5แอลมาบดด้วยเครื่องบดผสมยางแบบสองลูกกลิ้งขนาด 10x20 นิ้ว ซึ่งมี Friction ratio เท่ากับ 1:1.2 ผลิตโดยบริษัทชัยเจริญเอ็นจิเนียริ่ง โดยแปรระยะเวลาการบดบางเป็น 0, 1, 3, 5, 10 และ 20 นาทีหลังจากนั้นนำยางตัวอย่างมาทดสอบการพักความเค้นด้วยเครื่องทดสอบความหนืดมูนนี่ รุ่น MV-3000-VS (GOTECH Testing Machines Inc.) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้โรเตอร์ขนาดใหญ่ ตามวิธีการทดสอบมาตรฐาน ASTM D 1646-99 ซึ่งในการทดสอบจะมี 3 ขั้นตอนแสดงดังภาพ 1 โดยขั้นตอนที่ 1 จะเป็นการอุ่นยางตัวอย่างเป็นเวลา 1 นาที ในขั้นตอนที่ 2 โรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว 2 รอบต่อนาทีและบันทึกค่าแรงบิดเป็นค่าความหนืดมูนนี่ของยางตัวอย่างที่เวลา 4 นาที และในขั้นตอนที่ 3 เป็นการวัดการพักความเค้นของยางหลังจากโรเตอร์หยุดหมุน โดยจะบันทึกค่าแรงบิดเป็นเวลา 1 นาที



ภาพ 1 ค่าแรงบิดในการทดสอบความหนืดมูนนี่และการทดสอบการพักความเค้น

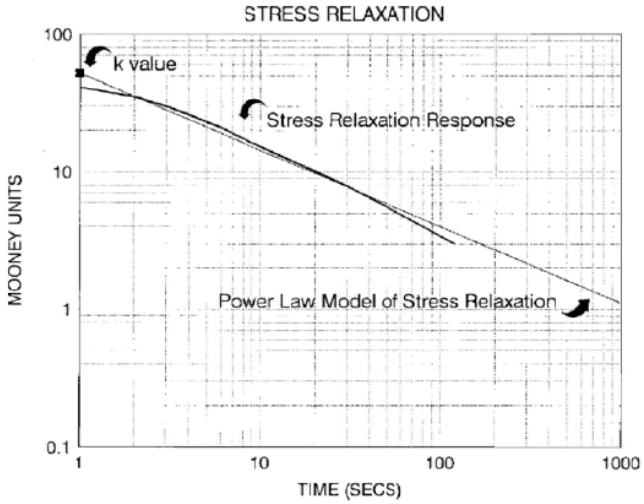
จากนั้นนำข้อมูลแรงบิด (Mooney viscosity value) มาวิเคราะห์หาอัตราการพักความเค้น (rate of stress relaxation) จากความสัมพันธ์ของแรงบิด (Mooney units) กับเวลา (วินาที) แสดงดังภาพ 2 ซึ่งสามารถคำนวณค่าคงที่และอัตราการพักความเค้นได้จากสมการยกกำลังแบบถดถอยดังสมการ (1) ทดสอบ 5 ชิ้นทดสอบ รายงานผลด้วยค่าเฉลี่ย

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

โดยที่ M หมายถึง ค่าแรงบิดในหน่วย Mooney units

k หมายถึง ค่าคงที่ เป็นแรงบิดในหน่วย Mooney units ที่เวลา 1 วินาทีหลังจากโรเตอร์หยุดหมุน

α หมายถึง อัตราการพักความเค้น (s^{-1})

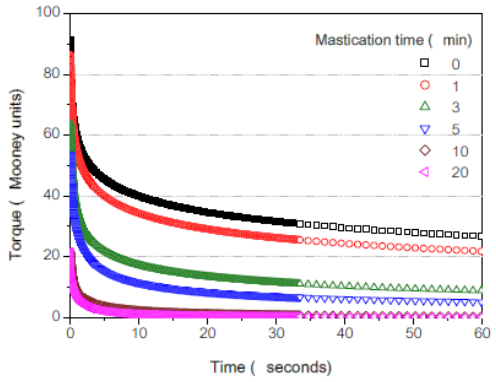


ภาพ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิด (Mooney units) กับเวลา (วินาที) (ASTM D 1646, 1999)

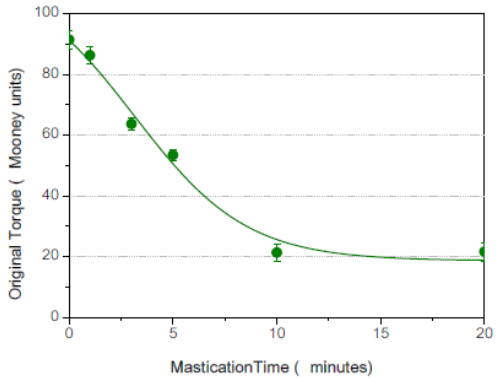
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดหลังโรเตอร์หยุดหมุนกับเวลาของยางธรรมชาติที่บดด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 0, 1, 3, 5, 10 และ 20 นาที แสดงดังภาพ 3(ก) พบว่าในช่วงแรกที่โรเตอร์หยุดหมุน ค่าแรงบิดจะลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจาก

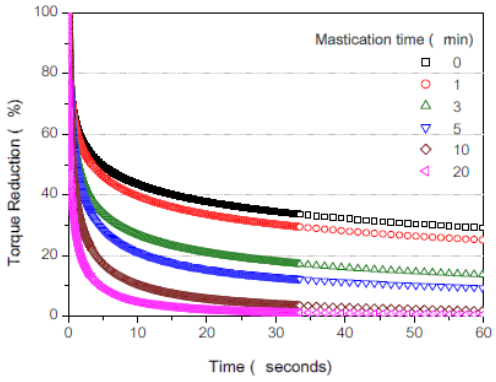
นั้นค่าแรงบิดจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ตามระยะเวลา ซึ่งยางที่ไม่ได้ผ่านการบดมีค่าแรงบิดเริ่มต้นสูงที่สุด ส่วนยางที่ผ่านการบดมีค่าแรงบิดเริ่มต้นต่ำลงอย่างมากตามเวลาบดยางในช่วง 10 นาทีแรก หลังจากนั้นแรงบิดเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยดังภาพ 3(ข) ทั้งนี้เนื่องมาจากยางธรรมชาติซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง (พรพรรณ, 2540) ต้องใช้แรงขับสูงตามไปด้วยเพื่อหมุนโรเตอร์ให้มีความเร็ว 2 รอบต่อนาที แต่เมื่อบดยางด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง ยางจะถูกกระทำด้วยแรงเฉือนจากความเร็วรอบที่ต่างกันของลูกกลิ้งหน้าและหลัง ทำให้โมเลกุลยางเกิดการฉีกขาด ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางลดลงตามระยะเวลาบดยาง (บุญธรรม, 2539; Gent, 2014) ส่งผลให้ค่าแรงบิดลดลงไปด้วย



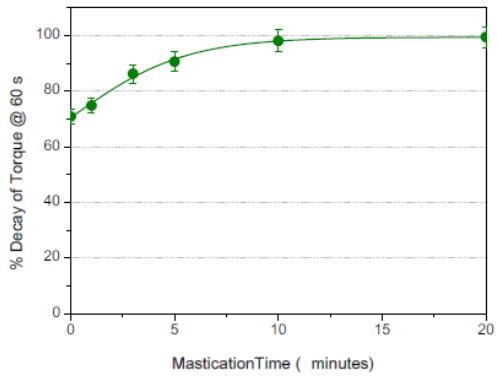
(ก) แรงบิด



(ข) ค่าแรงบิดหลังโรเตอร์หยุดหมุน



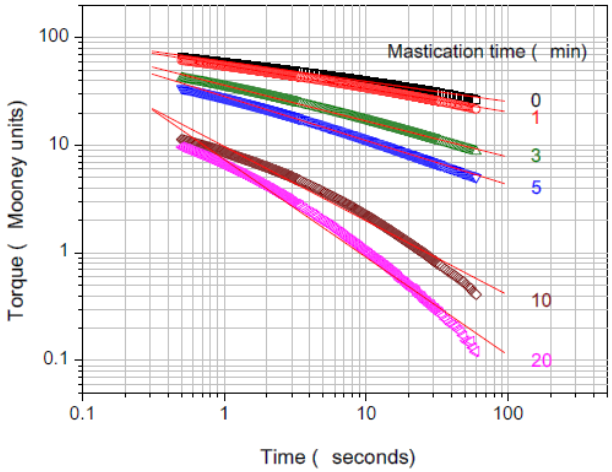
(ค) การลดลงของแรงบิด



(ง) เปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงบิดที่เวลา 60 วินาที

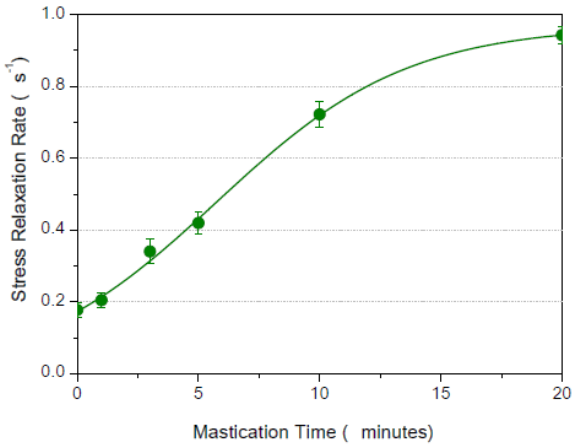
ภาพ 3 แรงบิดและการลดลงของแรงบิดหลังจากที่โรเตอร์หยุดหมุน

การลดลงของค่าแรงบิดหลังจากโรเตอร์หยุดหมุนของยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการบด พบว่าลดลงน้อยกว่ายางที่ผ่านการบดแล้ว ดังภาพ 3(ค) ซึ่งยางที่บดนานขึ้นมีการลดลงของแรงบิดมากกว่าตามระยะเวลาการบดยาง จากภาพ 3(ง) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่ายางธรรมชาติที่บด 10-20 นาที มีค่าแรงบิดลดลงจนแทบจะไม่มีแรงบิดเหลืออยู่เลยหลังจากโรเตอร์หยุดหมุนเพียง 1 นาที นั่นแสดงว่ายางที่ผ่านการบดเป็นเวลานานๆ สามารถจะคืนตัวกลับสู่สภาวะสมดุลได้เร็วกว่ายางที่บดในเวลาสั้น



ภาพ 4 แรงบิดกับเวลาของยางธรรมชาติที่บดด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งเป็นเวลา 0-20 นาที

อัตราการพักความเค้นของยางสามารถวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ของแรงบิดกับเวลา โดยใช้สมการยกกำลังแบบถดถอยดังภาพ 4 โดยอัตราการพักความเค้นพิจารณาได้จากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับเวลา ซึ่งอัตราการพักความเค้นของยางที่มีค่าน้อยจะบ่งชี้ว่ายางตัวอย่างนั้นมีพฤติกรรมแบบของแข็งที่ยืดหยุ่น (elastic) สูง (Treloar, 2005; Gent, 2014) ในทางกลับกันยางตัวอย่างที่มีอัตราการพักความเค้นสูงจะแสดงพฤติกรรมแบบของเหลวหนืด (viscous) สูง จากภาพ 5 พบว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการบดมีอัตราการพักความเค้นต่ำที่สุด คือ 0.1771 หน่วยต่อวินาที เมื่อเวลาการบดยางเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการพักความเค้นสูงขึ้นตามไปด้วย แสดงว่ายางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการบดมีความยืดหยุ่นสูง การบดยางทำให้ความยืดหยุ่นของยางดิบลดลง ซึ่งทำให้การบดผสมสารเคมีเข้าไปในยางทำได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้อาจส่งผลดีต่อระยะเวลาการเก็บยาง ตลอดจนกระบวนการแปรรูปในขั้นตอนอื่นๆ ต่อไปได้



ภาพ 5 อัตราการพักความเค้นของยางธรรมชาติที่ระยะเวลาบดยางต่างๆ

ตาราง 1 พารามิเตอร์ของสมการยกกำลังแบบถดถอยและเวลาการพักความเค้นของยางธรรมชาติที่ระยะเวลาการบดต่าง ๆ

ระยะเวลาบดยาง (นาที)	พารามิเตอร์ของสมการยกกำลังแบบถดถอย			เวลาการพักความเค้น (นาที)	
	k	*a*	*r**	t_{50}**	t_{90}**
0	59.135	-0.1771	0.9977	0.83	7358.33
1	54.157	-0.2044	0.9972	0.49	1300.00
3	34.588	-0.3403	0.9992	0.13	14.47
5	26.723	-0.4193	0.9993	0.09	4.04
10	10.602	-0.7221	0.9948	0.04	0.40
20	8.079	-0.9429	0.9968	0.03	0.19

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

อัตราการพักความเค้นของยางที่สูงขึ้นตามระยะเวลาการบดยาง (ภาพ 5) ยังสามารถบ่งชี้ถึงระยะเวลาการเก็บยางเพื่อให้ยางคืนตัวสู่สภาวะสมดุลได้ด้วย กล่าวคือยางที่มีอัตราการพักความเค้นต่ำจะต้องเก็บยางเป็นระยะเวลานาน ส่วนยางที่มีอัตราการพักความเค้นสูงจะคืนตัวสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว จากพารามิเตอร์ของสมการยกกำลังแบบถดถอยในตาราง 1 สามารถนำมาทำนายเวลาที่ยางจะคืนกลับสู่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งพบว่ายางดิบที่ไม่ผ่านการบดต้องใช้เวลานานกว่า 5 วันในการลดความเค้นในยางลง 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ยางซึ่งบดนาน 1 นาที จะใช้เวลาดังกล่าวนานเกือบ 22 ชั่วโมง แต่ยางธรรมชาติที่บดนาน 3, 5, 10 และ 20 นาที จะใช้เวลาในการลดความเค้นในยางลง 90 เปอร์เซ็นต์เพียง 14.47, 4.04, 0.40 และ 0.19 นาที ตามลำดับ

สรุปผลการวิจัย

เวลาในการบดยางธรรมชาติด้วยเครื่องบดผสมสองลูกกลิ้งมีผลต่อพฤติกรรมการพักความเค้นของยาง เมื่อเวลาบดยางนานขึ้นทำให้อัตราการพักความเค้นสูงขึ้น ยางจะคืนตัวสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น และใช้เวลาในการเก็บยางน้อยลง

ข้อเสนอแนะและการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะอย่างในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณหาเวลาการเก็บยาง การหดตัวกลับ และการเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาของแผ่นยางได้ ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพียงเบื้องต้น ยังคงต้องมีการศึกษาต่อไปเกี่ยวกับพฤติกรรมการพักความเค้นของยางสังเคราะห์ตลอดจนพฤติกรรมการพักความเค้นของยางคอมพาวนด์ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่อนุเคราะห์วัสดุและสารเคมี รวมทั้งเครื่องมือ เครื่องจักร และเครื่องทดสอบ และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาที่สนับสนุนงบประมาณในการนำเสนองานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

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.

Dick, J. S. (2001). "Compound Processing Characteristics and Testing." In Dick, J. S. (Ed.) **Rubber Technology: Compounding and Testing Performance.** Ohio: Hanser Publishers, 17-45.

Gent, A. N. (2014). "Rubber Elasticity: Basic Concepts and Behavior." In J. E. Mark, B. Erman, and C. M. Roland. (Eds.). **The Science and Technology of Rubber.** 4th Ed. MA, USA: Elsevier Inc., 1-26.

Hofmann, W. (1994). **Rubber Technology Handbook.** Ohio: Hanser Publishers.

Ngai, K. L. Capaccioli, S. and Plazek, D. J. (2014). "The Viscoelastic Behavior of Rubber and Dynamics of Blends." In J. E. Mark, B. Erman, and C. M. Roland. (Eds.). **The Science and Technology of Rubber.** 4th Ed. MA, USA: Elsevier Inc., 1-26.

Treloar, L.R.G. (2005). **The Physics of Rubber Elasticity.** 3rd Ed. Oxford: Oxford University Press.

Ward, I. M., and Hadley, D. W. (1993). **An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers.** West Essex, U.K: John Wiley & Sons Ltd.