

ตัวอย่งนั้หนทนาการจาก

3 ๑๓

วันที่ ๒4 ก.ย. 2551



รายงานการวิจัย

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์วัลคาไนซ์

Factors Influencing Stress Softening of Synthetic Rubber Vulcanizates

ปราณี
อังสนา
หรือ
จารง

รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนพัฒนาการวิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

พ.ศ. 2547

ชื่อวิทยานิพนธ์ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์วัลคาไนซ์

ผู้เขียน ปราณ หรือชู

อังสนา ช่าง

โปรแกรมวิชา เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

คณะกรรมการสอบ




(อาจารย์ วชรินทร์ สายน้ำใส)

ประธานกรรมการ



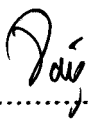
(ดร. พิพัฒน์ ลิ้มปะนะพิทยาร)

กรรมการ



(ดร. พงพัฒน์ รวงเรือง)

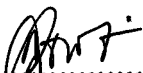
กรรมการ



(อาจารย์ จรัญ พูนนง)

กรรมการ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อนุมัติให้นับ โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาตรี โปรแกรมวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์



(อาจารย์ สุรน อ่องคณา)

คณบดี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(2)

เลขที่	150544
วันที่	20/01/2561
ชื่อ	ว
ชื่อ	678.8
ชื่อ	21/1/2561

ชื่อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความอ่อนค่าความเค้นในยางสังเคราะห์วัลคาไนซ์
ผู้เขียน	ปราณี หรือชู อังสนา จารง
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
โปรแกรมวิชา	เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์
ปีการศึกษา	2546
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์วัชรินทร์ สายน้ำใส

บทคัดย่อ

ในการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความอ่อนค่าความเค้นในยางสังเคราะห์วัลคาไนซ์ ใช้ยางสังเคราะห์ 2 ชนิด ได้แก่ ยางสไตรีนบิวตาไดอีนหรือยางเอสบีอาร์และยางบิวตาไดอีนหรือยางบีอาร์ โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดของยางทั้งที่ไม่มีสารตัวเติมและมีสารตัวเติม ชนิดและปริมาณสารตัวเติม ระบบการวัลคาไนซ์ อัตราเร็วในการผิครูป

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่า เมื่อเปรียบเทียบยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ ยางธรรมชาติจะให้ค่าความเค้นสูงกว่ายางสังเคราะห์ แต่เมื่อเปรียบเทียบยางสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด ยางเอสบีอาร์จะให้ค่าความเค้นสูงกว่ายางบีอาร์เล็กน้อย ความอ่อนค่าความเค้นในยางสังเคราะห์ที่มีสารตัวเติมมีค่าสูงกว่ายางที่ไม่มีสารตัวเติม ชนิดและปริมาณสารตัวเติมมีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ในยางเอสบีอาร์ เขม่าคาร์บอน N 330 ให้ค่าความเค้นสูงสุด ในยางบีอาร์ ซิลิกาให้ค่าความเค้นสูงสุด ความอ่อนค่าความเค้นลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ระบบสารให้กำมะถันมีค่าความเค้นของยางสูงกว่าระบบกำมะถันปกติ ระบบเซมิอีวีและระบบอีวี อัตราเร็วในการผิครูปมีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ในยางสังเคราะห์ที่ไม่มีสารตัวเติม ความอ่อนค่าความเค้นลดลงเมื่ออัตราเร็วในการผิครูปต่ำลง ในยางสังเคราะห์ที่มีสารตัวเติม ความอ่อนค่าความเค้นลดลงเมื่ออัตราเร็วในการผิครูปเพิ่มขึ้น

Title	Factors Influencing Stress Softening of Synthetic Rubber Vulcanizates
Author	Miss Pranee Hruechoo Miss Angsana Jarong
Program	Bachelor of Science
Major Program	Rubber and Polymer Technology
Academic year	2003
Advisors	Mr. Watcharin Sainumsai

Abstract

Factor influencing the stress softening of synthetic rubber vulcanizates: Styrene Butadiene Rubber (SBR) and Butadiene Rubber (BR) has been studied. This study involved the influence of rubbers type, filled and unfilled rubber, fillers type and content, vulcanizing system, and deformation speeds.

It was found that the stress value in natural rubber was higher than those in synthetic rubber. However, for synthetic rubber the stress value in SBR was higher than that in BR. Stress softening in filled synthetic rubber was higher than unfilled synthetic rubber. Fillers type and content have an influence on the stress softening. SBR filled with carbon black (grade N 330) showed the highest stress value whereas BR filled with silica showed the highest stress value. Stress softening decreased when filler content increased. Vulcanizing system has an effect on the stress softening. Sulphur donor vulcanizing system gave stress value higher than those from conventional, semi-EV and EV vulcanizing system. Deformation speeds have influence on the stress softening. In unfilled synthetic rubber, the stress softening decreased when deformation speeds decreased. In filled synthetic rubbers the stress softening decreased when deformation speeds increased.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีโดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนพัฒนาการวิจัย
ของมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาปี พ.ศ. 2546 ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องค่าใช้จ่ายต่างๆ ตลอดจนการ
ทำวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ วัชรินทร์ สายน้ำใส ที่กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครง
การวิจัยและคอยชี้แนะแนวทางการวิจัย จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์
ไฉฉฉ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่โปรแกรมวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ทุกท่าน
ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกด้านอาคารสถานที่ตลอดงานวิจัย

และสุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อ-คุณแม่และครอบครัว ตลอดจนเพื่อนๆ น้องๆ โปรแกรม
วิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดงานวิจัยครั้งนี้

ปราณี หรือชู
อังสนา จารง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

ตุลาคม พ.ศ. 2547

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(11)
สารบัญรูป.....	(12)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ปัญหาและความเป็นมาของวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	2
2. ทฤษฎี	
2.1 ความเค้น.....	3
2.2 ความเครียด.....	4
2.2.1 การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป.....	4
2.2.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป.....	4
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด.....	5
2.4 ความคืบ.....	5
2.5 ความแกร่ง.....	5
2.6 ความยืดหยุ่น.....	6
2.7 คุณสมบัติด้านการดึง ความเค้น-ความเครียด.....	7
2.8 ความอ่อนค่าความเค้น.....	8

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 ยางเอสปีอาร์.....	9
2.9.1 สมบัติและการแปรรูปของยางเอสปีอาร์.....	10
2.9.2 สมบัติของยางวัลคาไนซ์.....	10
2.10 ยางปีอาร์.....	10
2.10.1 ระบบการออกสูตร.....	11
2.10.2 สมบัติด้อยของยางปีอาร์.....	11
2.10.3 การใช้งาน.....	11
2.11 สารตัวเติม.....	12
2.11.1 เขม่าดำ.....	13
2.11.1.1 สมบัติของเขม่าดำ.....	13
2.11.1.2 ผลของเขม่าดำต่อยางที่ไม่วัลคาไนซ์.....	15
2.11.1.3 อิทธิพลของเขม่าดำต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์.....	15
2.11.2 คัลเซียมคาร์บอเนต.....	15
2.11.3 ซิลิกา.....	16
2.11.4 ไซนาเคลย์.....	17
2.11.4.1 ไซนาเคลย์ชนิดละเอียด.....	18
2.11.4.2 ไซนาเคลย์ชนิดหยาบ.....	18
2.11.4.3 ไซนาเคลย์ให้ความร้อน.....	18
2.11.4.4 ไซนาเคลย์เคลือบสารเคมี.....	18
2.11.5 แป้งทลัคัม.....	18
2.12 สารที่ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์.....	19
2.13 สารตัวเร่ง.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14 สารกระตุ้น.....	20
2.14.1 สารกระตุ้นพวกอินทรี.....	20
2.14.2 สารกระตุ้นพวกอินทรี.....	20
3. วิธีการวิจัย	
3.1 วัสดุ.....	21
3.1.1 ยางธรรมชาติเกรดเอสตีอาร์ 5 แอล.....	21
3.1.2 ยางสไตรีนบิวตาไดอีนเกรด 1502.....	21
3.1.3 ยางบิวตาไดอีนเกรด 0150.....	21
3.1.4 กรดสเตียริก.....	21
3.1.5 ซิงค์ออกไซด์.....	21
3.1.6 เอ็น-ไซโคลเฮกซิล-2-เบนโซโรอาซิลซัลฟิनाไมด์.....	21
3.1.7 เตตราเมทิล ไธยูเรม ไดซัลไฟด์.....	22
3.1.8 กำมะถัน.....	22
3.1.9 เหม่าดำ.....	22
3.1.10 แคลเซียมคาร์บอเนต.....	22
3.1.11 ไซนาเคลย์.....	22
3.1.12 ทัลคัม.....	22
3.1.13 ซิลิกา.....	22
3.1.14 ไดเอทิลีนไกลคอล.....	22
3.2 เครื่องมือที่ใช้.....	22
3.2.1 เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง.....	22
3.2.2 เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง.....	23
3.2.3 เครื่องอัดไฮโดรลิก.....	23
3.2.4 เครื่องวัดความหนา.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.5 เครื่องมือทดสอบความทนทานต่อแรงดึง.....	23
3.2.6 เครื่องชั่งไฟฟ้า.....	23
3.3 วิธีดำเนินการ.....	23
3.3.1 การทดสอบความอ่อนค่าความเค้น.....	23
3.3.2 ศึกษาเปรียบเทียบความอ่อนค่าความเค้นระหว่างยางสังเคราะห์ กับยางธรรมชาติ.....	24
3.3.3 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปอนด์.....	25
3.3.4 การอัดยางเข้าเข้าพิมพ์.....	25
3.3.5 การเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบ.....	25
3.3.6 ศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ของยางสังเคราะห์.....	25
3.3.7 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ของยางสังเคราะห์.....	27
3.3.8 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ของยางสังเคราะห์ที่มีเขม่าดำปริมาณ 40 phr.....	28
3.3.9 ศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วในการพิดรูปที่มีผลต่อความอ่อนค่าความ เค้นของยางสังเคราะห์.....	29
3.3.9.1 ยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม.....	29
3.3.9.2 ยางที่ผสมสารตัวเติม.....	29
4. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	
4.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบความอ่อนค่าความเค้นระหว่างยางสังเคราะห์ กับยางธรรมชาติ.....	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ของยางสังเคราะห์.....	34
4.2.1 ยางบีอาร์.....	34
4.2.2 ยางเอสบีอาร์.....	37
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ของยางสังเคราะห์.....	40
4.3.1 ยางบีอาร์.....	40
4.3.2 ยางเอสบีอาร์.....	43
4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ของยางสังเคราะห์.....	46
4.4.1 ยางบีอาร์.....	46
4.4.2 ยางเอสบีอาร์.....	49
4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วในการพิดรูปที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ของยางสังเคราะห์.....	52
4.5.1 ยางไม่มีสารตัวเติม.....	52
4.5.1.1 ยางบีอาร์.....	52
4.5.1.2 ยางเอสบีอาร์.....	53
4.5.2 ยางผสมสารตัวเติม.....	54
4.5.2.1 ยางบีอาร์.....	54
4.5.2.2 ยางเอสบีอาร์.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57

บรรณานุกรม

ภาคผนวก

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมปานด์.....	24
3.2 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อ ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิอาร์.....	26
3.3 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อ ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบิอาร์.....	26
3.4 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลปริมาณสารตัวเติมที่มีผลต่อ ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิอาร์.....	27
3.5 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลปริมาณสารตัวเติมที่มีผลต่อ ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบิอาร์.....	27
3.6 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อ ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิอาร์.....	28
3.7 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อ ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบิอาร์.....	28

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงกระทำและเมื่อถอนแรงกลับของยาง.....	8
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางที่มีสารตัวเติม และไม่มีสารตัวเติม.....	9
4.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางสังเคราะห์ กับยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	30
4.2 ความอ่อนค่าความเค้นของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติม.....	31
4.3 โครงข่ายที่มีการผิดรูปทั้งก่อนการผิดรูปและหลังการผิดรูป.....	32
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม.....	33
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบิโอาร์ที่ไม่ผสม สารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	34
4.6 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr.....	35
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางบิโอาร์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr.....	36
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสบิโอาร์ที่ไม่ผสม สารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	37
4.9 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบิโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr.....	38
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสบิโอาร์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr.....	39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีมาร์ที่ไม่ผสม สารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างกัน ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	40
4.12 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีมาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างกัน.....	41
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางบีมาร์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ.....	42
4.14 ลักษณะการขาดของสายโซ่.....	43
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสบีมาร์ที่ไม่ผสม สารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างกัน ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	43
4.16 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีมาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างกัน.....	44
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสบีมาร์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ.....	45
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีมาร์ที่ใช้ระบบ การวัลคาไนซ์ต่างกันซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	46
4.19 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีมาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างกัน.....	47
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางบีมาร์ ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์ต่าง ๆ.....	48
4.21 การหลุดออกของพันธะ.....	49

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างกันซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	49
4.23 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างกัน.....	50
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์ ต่าง ๆ.....	51
4.25 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างกัน.....	52
4.26 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างกัน.....	53
4.27 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างกัน.....	54
4.28 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างกัน.....	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาและความเป็นมาของวิจัย

ยางถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางเพราะยางมีสมบัติแตกต่างจากวัสดุวิศวกรรมอื่น ๆ คือ ยางเป็นวัสดุที่มีกรรมวิธีผลิตได้ แต่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เกือบสมบูรณ์ สามารถถูกยืดออกได้หลายเท่าของความยาวเดิม แต่ผลิตรูปได้เพียงเล็กน้อย เมื่อถูกกระทำด้วยแรงกดหรือแรงเฉือน ยางเป็นวัสดุพอลิเมอร์ประเภทวิสโคอีลาสติกที่มีสมบัติระหว่างการยืดหยุ่นและการไหลหนืด

การผิดรูปทำให้ยางอ่อนนุ่มลง ซึ่งความอ่อนค่าความเค้นส่วนใหญ่เกิดจากการผิดรูปครั้งแรก ๆ และความเค้นจะลดลงเรื่อย ๆ ในการผิดรูปครั้งต่อ ๆ มา

การประยุกต์ใช้งาน ในบางกรณีเน้นเฉพาะสมบัติประเภทใดประเภทหนึ่งเพียงอย่างเดียว แต่บางกรณีต้องการสมบัติหลายๆอย่างพร้อมกัน บางกรณีเน้นเฉพาะสมบัติพิเศษ เช่น สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของก๊าซต่ำ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติการใช้งานทั่วไป เช่น การวัดสมบัติความเค้นความเครียด (แรงดึงและส่วนยืด) ดังนั้นยางที่ใช้จึงต้องแตกต่างกัน จึงอาจมีสมบัติเฉพาะทางด้านการใช้งาน ที่มีความเครียดมากที่ใช้วัสดุประเภทอื่นไม่ได้ และแน่นอนว่าความเค้นที่เกี่ยวข้องในแต่ละกรณี ต้องเกี่ยวกับมอดูลัสของยาง

ในการทำวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางและการออกแบบงานวิศวกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นในยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของระบบวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นในยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบความอ่อนค่าความเค้นของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ทั้งที่มีสารตัวเติมและไม่มีสารตัวเติม

1.2.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วในการฉีดรูปที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นในยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยที่มีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาเปรียบเทียบยางสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ ยางบิวอาร์ และ เอสบิวอาร์

1.3.2 ศึกษาความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์ที่ไม่มีสารตัวเติมและมีสารตัวเติม

1.3.3 ศึกษาความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์โดยใช้สารตัวเติม 6 ชนิด คือ เชม่าดำเกรด N-330 เชม่าดำเกรด N-660 แคลเซียมคาร์บอเนต ไนมาเคลย์ ทัดคัมและซิลิกา

1.3.4 ศึกษาความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์โดยใช้เชม่าดำเกรด N-330 เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr

1.3.5 ศึกษาความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์ด้วยระบบการวัลคาไนซ์ 4 ระบบ คือ ระบบกำมะถันปกติ ระบบอีวี ระบบเซมิอีวีและระบบสารให้กำมะถัน

1.3.6 ศึกษาความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์โดยใช้อัตราเร็วในการฉีดรูป 6 อัตราเร็ว คือ 20, 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิเมตร/นาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1.4.1 ได้ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นในยางสังเคราะห์

1.4.2 นำความรู้ที่ได้ไปใช้ในงานวิศวกรรมหรืองานก่อสร้าง

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ความเค้น (Stress)

เป็นลักษณะของแรงต้านที่อยู่ภายในของวัสดุที่มีความพยายามในการต้านทานต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุนั้นๆ โดยแบ่งชนิดของความเค้นได้เป็นดังนี้ คือ

1. Tensile Stress หมายถึง ความเค้นดึงที่เกิดจากแรงดึงที่มากระทำต่อชิ้นงาน เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน
 2. Compressive Stress หมายถึง ความเค้นกด หรือ ความเค้นอัด เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง
 3. Shear Stress หมายถึง ความเค้นเฉือน เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงเฉือน เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันมีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) ทารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน
 4. Bending Stress หมายถึง ความเค้นดัด เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นต่อเมื่อชิ้นงานนั้นๆ ได้รับแรงดัด
 5. Torsion Stress หมายถึง ความเค้นบิด เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงบิดกระทำต่อชิ้นงานนั้นๆ
- คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) ฯลฯ เป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้นๆ สามารถที่จะรับหรือทนทานแรง หรือพลังงานเชิงกลภายนอกที่มากระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เมื่อจะเลือกใช้วัสดุใดๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้น เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักร อุปกรณ์นั้นๆ เป็นสำคัญ ความเค้น (Stress) ตามความเป็นจริงความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสม

สมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ จึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน (http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description_of_courses/Engineering_Materials/Properties.doc)

2.2 ความเครียด (Strain)

เป็นความเครียดที่ปรากฏภายใต้แรงที่มากระทำต่อเนื้อของวัสดุ จนวัสดุเกิดรับแรงนั้นไว้ไม่ไหว ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างไปในทิศทางของแรงที่มากระทำ เช่น เกิดการยืดตัวออก (Elongation) หรือหดตัวเข้า (Contraction)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (เกิดความเค้น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

2.2.1 การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวยังคงกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวงยางยืด, สปริง ถ้าดึงแล้วปล่อยจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

2.2.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทพอลิเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราคจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

ก. แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

ข. แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ (http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description_of_courses/Engineering_Materials/Properties.doc)

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน การทดสอบแรงดึงนอกจากให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะและความเหนียวของวัสดุ (Brittle and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย (http://www.eng.chula.ac.th/~metal/course/Description_of_courses/Engineering_Materials/Properties.doc)

2.4 ความคืบ (Creep)

วัสดุส่วนใหญ่เมื่ออยู่ภายใต้แรงที่มากระทำ แม้ว่าจะต่ำกว่าพิคัดยึดหยุ่น หากทิ้งไว้นาน ๆ แล้ว ก็อาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวรหรือแบบพลาสติกได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ด้วยปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า ความคืบ ปริมาณของความคืบที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ปริมาณของความเค้น อุณหภูมิและเวลา หากใช้สภาวะที่เหมาะสมและมีเวลาเพียงพอ ความคืบจะเกิดขึ้นได้จนครบ 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นที่ 1 อัตราการเกิดความเครียดจะค่อย ๆ ลดลง ขั้นที่ 2 อัตราการเกิดความเครียดจะคงที่และเป็นอัตราการเกิดความเครียดต่ำสุดในขณะที่วัสดุเกิดการคืบขึ้น ขั้นที่ 3 อัตราการเกิดความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนวัสดุขาดหรือแตกออกจากกัน

(http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description_of_courses/Engineering_Materials/Properties.doc)

2.5 ความแกร่ง (Toughness)

ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก เรียกว่า ความแกร่ง (Toughness) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความเหนียวของวัสดุ โดยกำหนดว่า Modulus of Toughness เท่ากับพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of Toughness นี้ แสดงถึงงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้จนทำให้เกิดการแตกหักด้วย ข้อกำหนดนี้แสดงให้เห็นถึงข้อแตกต่างระหว่างวัสดุเหนียวที่มีความแกร่ง

สูงและวัสดุประเภทที่มีความแกร่งต่ำด้วย (http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description_of_courses/Engineering_Materials/Properties.doc)

2.6 ความยืดหยุ่น

ยางมีลักษณะสำคัญที่เป็นเอกลักษณ์ 2 ประการ คือ ยางเป็นวัสดุที่มีความอ่อนตัว คือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากโดยที่ไม่ถูกทำลายหรือฉีกขาดเพราะมีคุณสมบัติไหลได้ ขณะเดียวกันยางมีความหนืด คือ มีความต้านทานการเปลี่ยนหรือการไหล ยางจึงแสดงคุณสมบัติความตรงกันข้ามกับความเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ยางจึงมีความสามารถในการกลับสู่สภาพเดิมได้ นั่นคือมีความแข็งหรือมีความยืดหยุ่นในตัวเอง เมื่อรวมคุณสมบัติทั้งสองอย่างนี้เข้าด้วยกัน จึงเรียกได้ว่ายางมีคุณสมบัติความหยุ่นหนืด

ยางที่คงรูปแล้วจะมีลักษณะยืดหยุ่นคงรูปเกือบสมบูรณ์ทำให้ยางมีลักษณะดังนี้

ก. สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อถูกแรงกระทำ คือ ยืดตัวได้ หดตัวได้ บิดตัวได้หรือโค้งงอได้รวดเร็วตามแรงกระทำ

ข. เมื่อยางที่ถูกยืดออกจะสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ยางเมื่อถูกแรงมากระทำมันสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้อย่างรวดเร็ว

ค. ยางมีความแข็งแรงมากทนต่อแรงดึงสูง มีความแข็งสูงเมื่อหดตัวเต็มที่ ดังนั้นเมื่อยางถูกกดจะหดเพียงเล็กน้อย ยางจึงสามารถรับน้ำหนักได้มาก

ง. ยางมีความยืดหยุ่นดีเมื่อถูกกระทำให้เสีรูปร่างแล้ว สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เกือบสมบูรณ์เพื่อหยุดแรงกระทำ ดังนั้นการเสีรูปร่างจึงต่ำมาก ทำให้ยางมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตลอดเวลา

จากสมบัติด้านความยืดหยุ่นของยางทั้ง 4 ข้อ ที่กล่าวมาแล้วทำให้ยางสามารถที่จะนำไปใช้งานในการทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้

ผลิตภัณฑ์ที่ใช้รับน้ำหนัก (Load) หรือแรง ทั้งแรงดึง แรงอัด แรงเฉือน ทั้งแบบที่รับน้ำหนักคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแบบอยู่กับที่ (static load) และแรงที่กระทำเป็นระยะอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องอยู่ตลอดเวลาแบบการเคลื่อนที่ ผลิตภัณฑ์ต่างชนิดกันมีความต้องการสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น อ่อนและยืดได้มาก หรือ ยืดและแข็งปานกลาง ไปจนถึงแข็งและยืดไม่ได้เลยหรือ ในผลิตภัณฑ์ยางลบจะต้องให้มีความสึกหรอมาก แต่ในทางกลับกันยางพื้นรองเท้าจะต้องมีการสึกหรอน้อย ดังนั้นผลิตภัณฑ์ยางแต่ละตัวย่อมมีสมบัติที่ต้องการที่แตกต่างกันเพื่อที่จะให้ใช้งานได้ตามความต้องการ (ปรีชา, 2542)

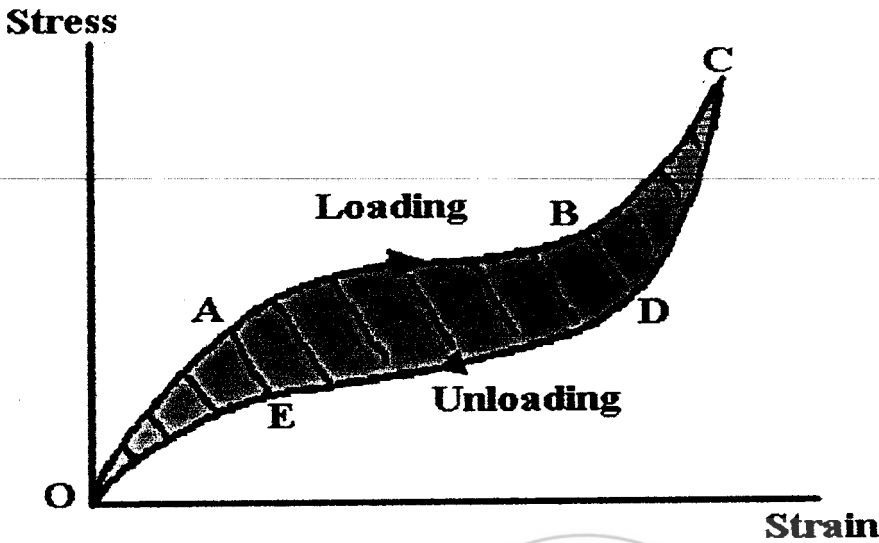
2.7 คุณสมบัติด้านการดึง ความเค้น-ความเครียด (Tensile, Stress – Strain)

เมื่อใช้แรงกระทำต่ออย่างหรือวัตถุใดๆ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ 2 แบบ การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงดึง (Tensile) การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงเฉือน (shear) แรงที่กระทำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดของยางนี้จะคิดเป็นแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับแรงกระทำเรียกว่า แรงเค้น (stress) เมื่อแรงกระทำหรือแรงเค้นกระทำต่ออย่างหรือวัตถุใด ถ้าไม่เกินความสามารถยืดได้ของวัสดุนั้นทำให้เกิดความเครียด (strain) เนื่องจากแรงเค้นนั้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมอันเนื่องมาจากแรงกระทำมีค่าเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวหรือขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวหรือขนาดเดิม ความเครียดนี้จะเป็นความยาว พื้นที่หรือปริมาตรก็ได้

ถ้าออกแรงกระทำ F ดึงยางที่มีความยาว L_0 ในแนวตั้งได้ฉากกับพื้นที่ A ให้ยางยืดออกไปให้มีความยาว L ได้ว่า

แรงเค้น (Stress)	$= F/A$
ความยาวที่เพิ่มขึ้น	$= L - L_0$
ความเครียด (Strain)	$= (L - L_0) / L_0$
หรือคิดเป็นร้อยละ	$= (L / L_0) \times 100$
สัดส่วนความยาวที่เปลี่ยนแปลง	$= (L - L_0) / L_0 \times 100$

การทดสอบคุณสมบัติด้านการดึงเป็นการหาคุณสมบัติแรงยืดหรือแรงเค้น (Stress) และความยืด (Strain) ของยางที่ถูกกระทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้สภาวะที่กำหนด ถ้ายืดยางออกไปความยาวหนึ่งแล้วปล่อยให้ยางกลับสู่สภาพเดิมจะเกิดสูญเสียพลังงานในเนื้อยางไป (ปรีชา, 2542) ดังแสดงรูปที่ 2.1

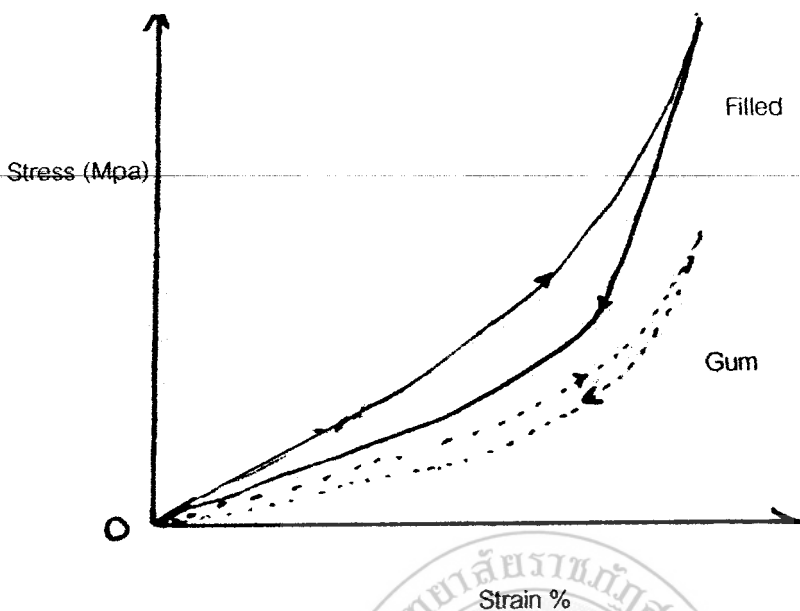


รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงกระทำ และเมื่อถอนแรงกลับของยาง

ที่มา: www.christian81.free-online.co.uk/ph4a.2.htm.

2.8 ความอ่อนค่าความเค้น (Stress Softening)

การคิดรูปทำให้ยางอ่อนนุ่มลงกราฟความเค้น-ความเครียดของการยืดหดครั้งแรกที่ใช้บอกคุณลักษณะของยางนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการออกแบบเชิงวิศวกรรม ความอ่อนนุ่มส่วนใหญ่เกิดจากการคิดรูปครั้งแรกๆ ความอ่อนนุ่มจะลดลงเรื่อย ๆ ในการคิดรูปครั้งต่อมา การอ่อนนุ่มลงเช่นนี้เกิดได้ทั้งในยางไม้วัลคาไนซ์และยางวัลคาไนซ์ และเกิดได้ทั้งในยางผสมสารตัวเติมและไม่ผสมสารตัวเติม ดังรูปที่ 2.2 ผลจะชัดเจนในยางที่ผสมสารตัวเติมชนิดเสริมแรงในปริมาณมาก ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า “ผลของมุลลิน” หรือ The Mullin’s Effect และได้รับการศึกษาค้นคว้าต่อมาอย่างมาก เกิดทฤษฎีเชิงคุณภาพที่ก้าวหน้าขึ้นเป็นลำดับ เพื่ออธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นที่ชัดเจนในยางผสมสารตัวเติม การถกเถียงส่วนมากนั้นว่าเกิดจากโครงสร้างของสารตัวเติมที่ถูกทำลายหรือ การลื่นไถลของพันธะระหว่างสารตัวเติมกับยาง การที่โครงสร้างของสารตัวเติมถูกทำลาย หรือเส้นโมเลกุลของโครงข่ายของยางขาด (ปรีชา, 2541)



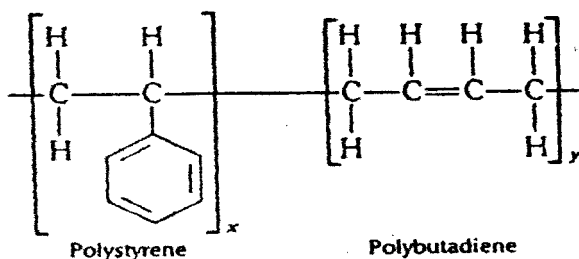
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางที่มีสารตัวเติมและไม่มีสารตัวเติม

ที่มา: www.sinrubtech.com.my/short%20notes/Musing%20With%20Sin%202001.htm

2.9 ยางเอสบีอาร์ (Styrene Butadiene Rubber, SBR)

ยางเอสบีอาร์นับเป็นยางที่ใช้กันทั่วไป (General purpose rubber) เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ จึงนับว่ายางทั้งสองเป็นคู่แข่งกัน โดยตรงที่จะทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ แม้ยางทั้งสองเป็นคู่แข่งกันแต่มีความแตกต่างกันทางสมบัติและการใช้สารเคมีตั้งนั้นยางทั้งสองมาแทนที่กันทันทีไม่ได้

สูตรโครงสร้างทางเคมี



ยางเอสบีอาร์เป็นโคพอลิเมอร์ของสไตรีนและบิวทาไดอีน มอนอเมอร์สองชนิดนี้ จะมาเชื่อมต่อกัน ยางเอสบีอาร์เป็นยางที่สังเคราะห์ขึ้น การสังเคราะห์โดยสูตรที่ต่างกัน และสภาวะที่ต่างกัน จะทำให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ต่างๆ หลายชนิด และมีสมบัติที่แตกต่างกันซึ่งสมบัติที่แตกต่างกันนั้นจะขึ้นกับ

1. สัดส่วนของ บิวทาไดอินต่อสไตรีน
2. น้ำหนักโมเลกุล และการกระจายตัวของโมเลกุล
3. ลำดับของการจัดตัวของโมโนเมอร์ในสายโซ่

2.9.1 สมบัติและการแปรรูปของยางเอสปีอาร์

ยางเอสปีอาร์ พันลูกกลิ้งได้ไม่ดีเท่ากับยางธรรมชาติ โดยที่ยางเอสปีอาร์ มักจะห้อยย้อยจากลูกกลิ้งจึงมักผสมยาง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และยางเอสปีอาร์ จะให้ความร้อนออกมา มากกว่า ยางเอสปีอาร์เอกซทรูดง่ายกว่ายางธรรมชาติและการนำยางเอสปีอาร์ที่เอกซทรูดแล้วกลับมาใช้ใหม่อีก จะไม่มีปัญหาที่ยางนิ่มลงเหมือนกับยางธรรมชาติ การรีดแผ่นจะทำให้ยาก เนื่องจากยางเอสปีอาร์ มี Green Strength ต่ำ การดึงยางให้เข้ารูปอาจทำให้ยางมีรอยแตก แก้ไขโดยใช้ยางธรรมชาติผสมเข้าไป 10 – 15 phr

ยางเอสปีอาร์ มี Green Strength ต่ำ และการเหนียวติดกัน (Tack) ต่ำ เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ การหดตัวและการพองตัวเมื่อออกจากหัวได (Die swell) ของยางเอสปีอาร์อาจจะสูงซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการผสมยาง เอสปีอาร์ เชื่อมโยง (เกรด 1009) เป็นต้น ความต้านทานต่อกรดและเบสต่ำ มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูงมีความต้านทานต่อการฉีกขาดขณะร้อนต่ำ

2.9.2 สมบัติของยางวัลคาไนซ์

เนื่องจากยางเอสปีอาร์ ประกอบด้วยสไตรีน ร้อยละ 23 และมีการจัดตัวของหน่วยโมโนเมอร์ ในสายโซ่แบบไม่มีระเบียบทำให้โมเลกุลไม่สามารถคดงอได้เมื่อดึง ทำให้ยางไม่แข็งแรง การออกสูตรยางจะต้องใช้สารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพทุกครั้ง

มีพันธะคู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ยางเอสปีอาร์สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และสามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย ความต้านทานต่อการเสื่อมของยางเอสปีอาร์ ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ (พรพรรณ, 2540)

2.10 ยางปีอาร์ (Butadiene Rubber, BR)

โครงสร้างทางเคมีเป็น Cis-1,4-polybutadiene เป็นยางชนิดเดียวที่มีความกระด้างตัวดีกว่ายางธรรมชาติ เมื่อนำยางนี้ผสมกับเขม่าดำจะให้ยางที่มีความทนทานต่อการสึกหรอสูงกว่ายางธรรมชาติ ผิวยางแห้งมาก ถ้าใช้เดี่ยวๆ จะมีปัญหาในการแปรรูป การใช้งานจึงมักผสมกับยางธรรมชาติหรือยางเอสปีอาร์ ถ้าไม่ใส่สารตัวเติมเลยยางบิวทาไดอินจะมีความแข็งแรงต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารตัวเติม (บุญธรรม, 2530)

2.10.1 ระบบการออกสูตร

ยางบิโอาร์ มักไม่ใช่เป็นยางล้วนๆ เพราะการแปรรูปยาก แต่จะผสมกับยางธรรมชาติหรือยางเอสบิโอาร์ และจะใช้ไม่เกิน 50% เพราะการแปรรูปไม่ดีขึ้นแล้ว ปริมาณที่ใช้อาจจะใช้ประมาณ 25-30% ในดอกยางรถยนต์ มักจะใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์แต่การใช้เปอร์ออกไซด์ก็สามารถทำได้ ปริมาณกำมะถันที่ใช้จะใช้น้อยกว่ายางธรรมชาติ(แต่ปริมาณสารตัวเร่งจะใช้มากกว่า) ยางบิวทาไดอินจะให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงกว่ายางเอสบิโอาร์หรือยางธรรมชาติเมื่อใช้กำมะถันในปริมาณที่เท่าๆ กัน ปริมาณกำมะถันที่แนะนำ 1.5 – 1.9 phr ถ้าสูตรยางผสมกันแปรรจากยางธรรมชาติ 100 phr ไปถึง ยางบิวทาไดอิน 100 phr ปริมาณกำมะถันจะแปรไปจาก 2.5 phr ไปจนถึง 1.5 phr แต่ปริมาณสารตัวเร่งแปรไปจาก 0.5 phr ไปจนถึง 1.0 phr สารตัวเติมที่ใช้จะต้องเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพและสามารถรับเขม่าดำและน้ำมันได้มากกว่ายางธรรมชาติหรือยางเอสบิโอาร์ (พรพรรณ, ม.ป.ป.)

2.10.2 สมบัติดีด้อยของยางบิโอาร์

- การเกาะถนนไม่ดี
- ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ
- การซึมอากาศมาก ใช้ทำยางในรถไม่ได้เลย

2.10.3 การใช้งาน

การใช้งานของยางบิโอาร์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของการผสมกับยางอื่น เพราะยางบิโอาร์แปรรูปไม่ดี

ตารางที่ 2.1 ผลของการผสมยางธรรมชาติกับยางบิโอาร์ต่อการแปรรูป (บุญธรรม, 2530)

สารเคมี	ปริมาณ (phr)				
	100	75	50	25	-
ยางบิโอาร์	100	75	50	25	-
ยางธรรมชาติ	-	25	50	75	100
เขม่าดำ	50	50	50	50	50
น้ำมัน	10	10	10	10	10
การพันลูกกลิ้ง	เลว	พอใช้	ดี	ดี	ดีมาก
ML-4 ที่ 212 F	72	68	60	60	60
ใช้ Garvay die, กรัม/นาที่	85	96	100	101	102
ลักษณะผิว	8	9	11	11	12

2.11 สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติม หมายถึงสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในช่วง ตัวอย่างเช่น เชม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต ดินเหนียว แมกนีเซียมคาร์บอเนต และ ซิลิกา เป็นต้น สารเหล่านี้ใส่ไปเพื่อวัตถุประสงค์ต่อไปนี้

1. เพื่อลดต้นทุน โดยทั่วไปสารตัวเติมจะมีราคาถูกกว่ายาง ปัจจุบันยางธรรมชาติในประเทศไทย กิโลกรัมละ 22 บาท แคลเซียมคาร์บอเนต กิโลกรัมละ 5 บาท แป้งราคา กิโลกรัมละ 8-10 บาท เชม่าดำเฉลี่ย กิโลกรัมละ 20-25 บาท จะเห็นได้ว่าการลดต้นทุนการผลิตทำได้โดยเติมสารตัวเติมลงไปกับยางนั้น

2. เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง โดยทั่วไปการใส่สารตัวเติมเข้าไปในยางจะทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นและโมดูลัสสูงขึ้นด้วย ส่วนสมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับชนิดของยางและสารตัวเติม เช่น ถ้ายางธรรมชาติใช้เชม่าดำเป็นสารตัวเติม จะให้ยางที่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ความต้านทานต่อการสึกหรอสูง แต่ถ้าใส่เชม่าดำมากเกินไป ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการสึกหรออาจลดลงได้เช่นกัน

3. เพื่อช่วยในขบวนการผลิต ในขบวนการผลิตของยางถ้าไม่มีสารตัวเติมอาจทำให้ขบวนการผลิตยุ่งยาก เช่น การคาเลนเดอร์ การเอกซทรูด เป็นต้น ถ้าเป็นยางล้วน ๆ หรือมีสารตัวเติมน้อย การเอกซทรูดจะได้ผิวไม่เรียบ หรือการคาเลนเดอร์ จะมีปัญหาเรื่องยางบางหรือยางหนา โดยไม่สามารถควบคุมได้ การใส่สารตัวเติมจะช่วยแก้ปัญหาเรื่องเหล่านี้ได้

4. ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน ยางจะพองตัวได้ดีน้ำมัน แต่เมื่อใส่สารตัวเติมเข้าไปในยาง จะทำให้การพองของยางในน้ำมันลดลง เนื่องจากมีเนื้อยางลดลง

5. เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า ยางบางชนิดเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ซึ่งอาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ถ้ามีประกายไฟสถิตย์หรือนำไฟฟ้าได้

6. เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง ปกติยางจะสลายตัวได้ง่ายถ้าถูกแสงแดด ซึ่งมีแสงอุลตราไวโอเล็ตอยู่ ถ้าใส่สารที่กันไม่ให้แสงอ่อนผ่านเข้าไปในยางได้ เช่น เชม่าดำ ก็จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของยางขึ้น

การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะรูปร่าง แบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Particulate filler) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ดินเหนียว เชม่าดำ แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1.1 สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (reinforcing filler) คือสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในยางแล้วทำให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอสูง ความต้านทานต่อการฉีกขาด

สูง เป็นต้น ส่วนใหญ่อนุภาคจะมีขนาดเล็กประมาณ $180 \text{ \AA} - 600 \text{ \AA}$ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเขม่าดำ (fumed product) เช่นเขม่าดำ ซิลิกา เป็นต้น

1.2 สารตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพ (diluent filler) สารตัวเติมชนิดนี้จะมีราคาถูก มีอนุภาคใหญ่ประมาณตั้งแต่ $10,000 \text{ \AA}$ ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทาลค์ เป็นต้น สารตัวเติมบางตัวมีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อะลูมิเนียมซิลิเกต และแคลเซียมซิลิเกต จะจัดอยู่ในพวกกึ่งเสริมประสิทธิภาพ (semi – reinforcing filler)

2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler) เช่น ใยฝ้าย (cotton floc) ใยไม้ (wood floc) สารตัวเติมชนิดนี้ใส่ในบางชนิดเพื่อป้องกันไม่ให้ยางหดตัว แผลออกเพื่อรักษารูปร่าง เช่น พื้นรองเท้า

3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (Resinous filler) เช่น ไฮสไตรีนเรซิน (high styrene resin), ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์เรซิน (phenol formaldehyde resin)

ปัจจุบันสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุดคือ เขม่าดำ และ ซิลิกา เพราะสามารถเสริมประสิทธิภาพ (พรพรรณ, 2528)

2.11.1 เขม่าดำ

2.11.1.1 สมบัติของเขม่าดำ

เขม่าดำขึ้นกับสมบัติ 5 ประการคือ

1. ขนาดของอนุภาค โดยทั่วไปแล้วเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้ยางที่ผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้นและผสมเข้ากับยางได้ยากขึ้นด้วย การวัดขนาดของอนุภาคทำได้โดยตรงโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนซึ่งต้องวัดขนาดของเม็ดแต่ละเม็ดแล้วนำมาเฉลี่ย วิธีนี้จะได้ค่าที่ถูกต้องแน่นอนแต่เสียเวลามาก วิธีอื่นที่สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบกับเขม่าดำมาตรฐานซึ่งทำได้ 2 วิธี

(ก) การดูแสงสะท้อน ปกติเขม่าดำยังมีขนาดเล็กมากเท่าใดแสงที่ส่องถูกผิวของเขม่าดำจะสะท้อนกลับมาเท่าใด วิธีนี้จึงช่วยวัดขนาดของอนุภาคโดยวัดตาม Nigrometer scale โดยกำหนดให้ 100 สำหรับ เขม่าดำชนิด Semi-reinforcing furnace (SRF) ค่าตัวเลขที่ต่ำกว่า 100 แสดงถึงสะท้อนน้อย มีขนาดอนุภาคเล็ก ถ้าเกิน 100 สะท้อนแสงมาก มีขนาดอนุภาคใหญ่

(ข) การดูดกลืนของแสง ทำโดยนำเขม่าดำ 0.100 กรัม มาผสมกับซิงค์ออกไซด์ 3.75 กรัม แล้วใช้น้ำมันลินสีดเป็นตัวพา สังเกตผลที่ได้เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน โดยกำหนดให้สารมาตรฐานมีค่าเป็น 100 ถ้าเขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็กจะเห็นเป็นสีเข้ม ถ้าขนาดอนุภาคใหญ่สีจะไม่เข้ม

2. โครงสร้างของเขม่าดำ หมายถึง การจัดตัวระหว่างอนุภาคของเขม่าดำให้มีรูปโครงสร้าง ถ้าเขม่าดำมีการจัดตัวต่อกันเป็นสายมาก แสดงว่ามีโครงสร้างสูง ถ้าการจัดตัวไม่ต่อกันหรือต่อกันน้อย แสดงว่ามีโครงสร้างต่ำ

เขม่าดำมีโครงสร้างต่างกันมากน้อยขึ้นอยู่กับขบวนการเตรียมเขม่าดำนั้นๆ เช่น Thermal black มีโครงสร้างน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วน channel black จะมีโครงสร้างปานกลาง แต่ furnace black ชนิดที่ใช้ น้ำมัน โรมาติกสูงจะให้เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง furnace black สามารถจัดให้มีโครงสร้างสูงหรือต่ำ โดยการใช้ additive (เกลือของโลหะ) ไปช่วยในการแตกตัวเป็นไอออนในเปลวไฟทำเขม่าดำนั้นซึ่งพวกที่มีเกลือโลหะจะให้เขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ การจะให้ได้เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงจะต้องออกแบบเตารวมทั้งเลือกชนิดของน้ำมันด้วย

การที่เขม่าดำมีโครงสร้างสูงจะทำให้การจัดตัวไม่แน่น ดังนั้นการหาโครงสร้างของเขม่าดำนอกจากใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแล้ว อาจใช้วิธีวัดช่องว่างของอากาศระหว่างอนุภาคของเขม่าดำต่อหน้าหน้าของเขม่าดำ ในการทดลองจริง ๆ นั้นแทนที่จะวัดช่องว่างของอากาศโดยตรง กลับใช้น้ำมันใส่ลงในช่องว่าง น้ำมันที่ใช้คือ dibutyl phthalate (DBP) การทดลองจะเป็นการปริมาตรของ DBP ที่จะต้องเติมเข้าไปในช่องว่างนั้น เครื่องมือที่ใช้ absorptometer ซึ่งประกอบด้วยช่องว่างเล็ก ๆ ที่จะใส่เขม่าดำที่ทราบน้ำหนักแน่นอน มีที่กวนแล้วค่อย ๆ เติม DBP เข้าไปในเขม่าดำนั้น ขณะที่เติม DBP เข้าไปจนเต็มช่องว่างของผสมจะแน่นทำให้แรงบิดในการกวนสูงขึ้นทันที เครื่องมือจะหยุดทำงานในช่วงนี้ อ่านปริมาตรของ DBP ทันที แล้วคำนวณหาค่าปริมาตร DBP ที่ใช้เป็นลูกบาศก์เซ็นติเมตรต่อ 100 กรัมของเขม่าดำ

3. ลักษณะผิว การจัดตัวของคาร์บอนอะตอมในเขม่าดำจะมีลักษณะเป็นชั้น เขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพต่ำ เช่น thermal black จะมีการจัดตัวของคาร์บอนอะตอมเรียงขนานอย่างมีระเบียบ เขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพสูง จะมีการจัดตัวของคาร์บอนอะตอมไม่เป็นระเบียบ และยังเขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็กยิ่งขึ้นการจัดตัวของคาร์บอนอะตอมยิ่งไม่เป็นระเบียบมากขึ้น บางทีลักษณะของคาร์บอนอะตอมที่ผิวมีผลต่อการเสริมประสิทธิภาพได้ เช่น ถ้าอะตอมของคาร์บอนเกิดการสร้างพันธะกันเองจนทำให้ลักษณะผิวจัดตัวเป็นระเบียบ ทำให้เกาะติดกับยางไม่ดี การเสริมประสิทธิภาพก็ต่ำ แต่ถ้าคาร์บอนอะตอมมีไฮโดรเจนมาเกาะจะช่วยให้เขม่าดำนั้นเสริมประสิทธิภาพมากขึ้น และเพิ่มมากขึ้นถ้าเกิดอนุมูลอิสระอยู่บนผิวของเขม่าดำ ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะสร้างพันธะกับยางได้ เมื่อโมเลกุลของยางแตกออกเป็นอนุมูลอิสระขณะทำการผสม

4. สมบัติทางเคมีของผิว เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจนมาจากไฮโดรคาร์บอนเดิม

(จากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ) ไฮโดรเจนจะอยู่กระจายตลอดทั้งอนุภาคของเขม่าดำ ส่วนออกซิเจนมาจากการเผาไหม้ในขณะเตรียมเขม่าดำในลักษณะ reducing flame ดังนั้นออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผิวของเขม่าดำ ออกซิเจนที่ผิวจะจับตัวในรูปของหมู่ฟีนอลิก คีโตนิก คาร์บอกซิลิก และแลคโตน นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณเล็กน้อยปนอยู่ในเขม่าดำด้วย ปริมาณของกำมะถันขึ้นอยู่กับปริมาณของกำมะถันเดิมที่มีในน้ำมันที่ใช้ทำเขม่าดำ

5. ความเป็นรูปพรุนของเขม่าดำ ผิวของเขม่าดำไม่เรียบเนื่องจากในการเตรียมเขม่าดำนั้นทำให้เกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง การออกซิเดชันจะทำให้เกิดเป็นรูปพรุนขึ้นในอนุภาคของเขม่าดำได้ การมีรูปพรุนมากหรือน้อยในเขม่าดำจะเป็นเหตุทำให้เกิดการวัลคาไนซ์เร็วหรือช้าได้ เพราะรูปพรุนนี้จะดูดเอาสารตัวเร่งเข้าไป ซึ่งจะทำการวัลคาไนซ์ช้าลงไปได้ถ้าเอาเขม่าดำที่มีรูปพรุนมากจะพบว่าปริมาณอนุภาคมากกว่าเขม่าดำที่มีรูปพรุนน้อย ดังนั้นถ้าใช้เขม่าดำจำนวนเท่า ๆ กัน โดยน้ำหนักใส่ลงไปในยาง เขม่าดำที่มีรูปพรุนมากจะทำให้ยางมีวิสโคซิตีสูงกว่า การนำไฟฟ้าดีกว่าเขม่าดำที่มีรูปพรุนน้อย เนื่องจากจำนวนอนุภาคมากกว่านั่นเอง

2.11.1.2 ผลของเขม่าดำต่อยางที่ไม่วัลคาไนซ์

การนำเขม่าดำไปผสมกับยางจำเป็นที่จะต้องบดขย้างให้ نرم ก่อน การที่ยาง نرم เรียกว่ามีวิสโคซิตีลดลงและพลาสติกซีตีเพิ่มขึ้น การใส่เขม่าดำจะทำให้ยางมีวิสโคซิตีเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใส่เขม่าดำปริมาณต่างกันและขนาดต่างกันจะมีผลต่อวิสโคซิตีของยาง เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้ยางมีวิสโคซิตีสูงกว่าเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ เมื่อใช้ในปริมาณที่เท่า ๆ กัน นอกจากเขม่าดำที่มีขนาดเล็กจะทำให้วิสโคซิตีสูงกว่าแล้วยังผสมเข้าไปในยางโดยใช้เวลานานกว่า

2.11.1.3 อิทธิพลของเขม่าดำต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์

สมบัติของยางวัลคาไนซ์ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ ความดำ และความกระด้างตัวคืนกลับของยาง จะขึ้นกับขนาดอนุภาคของเขม่าดำ ส่วนความแข็งของยางจะขึ้นกับโครงสร้างมากกว่าขนาดอนุภาค (พรพรรณ, 2528)

2.11.2 คัลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)

คัลเซียมคาร์บอเนตที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปของซอลต์กับหินปูน หรืออาจอยู่ในรูปของ Dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ Ankerite $\text{Ca}(\text{MgFe})(\text{CO}_3)_2$ คัลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในยางอาจเป็นพวกที่มาจากธรรมชาติหรือสังเคราะห์ โดยกระบวนการทำให้ตกตะกอนคัลเซียมคาร์บอเนตชนิดที่ใช้ในยางแบ่งเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. กราวด์ ลิมสโตน (Ground Limestone)
2. กราวด์ ชอล์ก (Ground Chalk)

3. ปริมาณเวทคิง (Precipitated Whiting)

4. ทรีท เวทคิง หรือ ทรีท คัลเซียมคาร์บอเนต (Treated whiting หรือ Treated calcium carbonate)

โดยทั่วไปขนาดของคัลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดใหญ่ ดังนั้นความต้านทานต่อแรงดึงจึงไม่ดีเท่ากับสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ เช่น เชม่าค่า ยางธรรมชาติเมื่อใช้คัลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงลดลงทันทีและคัลเซียมคาร์บอเนตขนาดเล็กจะทำให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางที่ใช้คัลเซียมคาร์บอเนตปานกลาง แต่สำหรับยางเอสบีอาร์นั้น ปกติเป็นยางที่มีค่าความต้านทานแรงดึง โดยทั่วไปต่ำ จึงต้องใช้สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ เช่น เชม่าค่า เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อแรงดึง แต่ถ้าใช้คัลเซียมคาร์บอเนตอนุภาคเล็ก ซึ่งจะให้ความต้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าเดิมเล็กน้อย แต่ถ้าใช้อนุภาคขนาดปานกลางจะไม่ให้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเลย (พรพรรณ, 2528)

2.11.3 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ดีที่สุดในบรรดาสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ มีสูตรโครงสร้างเป็น SiO_2 และอาจมีน้ำผลึกอยู่ด้วย ซิลิกาที่นำมาใช้อาจอยู่ในรูปที่พบในธรรมชาติแล้วนำมาบดหรือเป็นซิลิกาที่เตรียมขึ้นมา

แร่ซิลิกาบด (Ground mineral silica) เป็นแร่ซิลิกาบดหรือทรายบดให้ละเอียด มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 200 เมช จะมีขนาดใหญ่มาก ใช้เป็นสารตัวเติมราคาถูกในยางทนความร้อน เนื่องจากขนาดอนุภาคใหญ่ทำให้คุณสมบัติไม่ดีและมีพื้นที่ผิวว่น้อย ดังนั้นแร่ซิลิกาบดจะไม่มีผลในการสุก (Cure) ของยาง

อิทธิพลของการใช้ซิลิกากับยางมี 4 ประการคือ

1. อิทธิพลเนื่องจากขนาด ซิลิกามีขนาดเล็กพื้นที่ผิวมาก ขณะผสมยางจะเกิดความร้อนสูง อาจเป็นเหตุให้เกิดการสุกก่อนได้ง่าย

2. อิทธิพลเนื่องจากความเป็นกรด ซิลิกาเป็นสารที่มี pH เป็นกรดซึ่งทำให้ยางสุกช้าลง และผิวของซิลิกามีพันธะไฮโดรเจนดังนั้นจะทำให้เกิดการดูดสารตัวเร่งที่ผิวของซิลิกาได้ ปริมาณสารตัวเร่งจะลดลงทำให้ยางสุกช้าลงซึ่งอาจแก้ไขโดยการเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่ง

3. อิทธิพลที่ทำให้ยางแข็ง ซิลิกาจะทำให้ยางผสมสารมีที่ยังไม่สุก แข็งมาก

4. อิทธิพลเนื่องจากซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ ดังนั้นทำให้การเกิดพันธะกับยางซึ่งเป็นสารอินทรีย์จะไม่ดีเท่าที่ควรทำให้ยางมีโมดูลัส ความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำกว่ายางที่ใช้เชม่าค่า (พรพรรณ, 2528)

2.11.4 ใชน้ำเคลย์ (China clay)

โดยทั่วไปจะเป็น Kaolin ที่มีส่วนประกอบเป็น $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ นอกจากนั้นอาจมีสารประกอบอื่นปน เช่น เหล็ก ทิทาเนียม คัลเซียม แมกเนเซียม โปตัสเซียม โซเดียม และอาจมีแมงกานีสอยู่ด้วย คุณสมบัติของใชน้ำเคลย์ที่ใช้ในยางมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 กากที่เหลือหลังกรองผ่านตะแกรง (screen residue) หรือ กริท (grit) น้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงหลังจากการกรองด้วยตะแกรง 325 เมช จะเหลือกากน้อยที่สุด ถ้ามีกริทสูงจะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงของยางลดลง การแตกเนื่องจากการหักงอไปมา (Flex cracking) ต่ำ ค่าโคคิเลคตริกของยางที่เป็นฉนวนเสียไป ทำให้มีดที่ใส่ที่อ และเครื่องมือผสมและแปรรูปยางสึกหรอ ปริมาณของกริทในใชน้ำเคลย์ที่ตั้งแต่่น้อยมากจนถึง 3.5% แต่สำหรับใชน้ำเคลย์ที่คัดแล้วไม่ควรมีกริทเกิน 0.35% (การทดสอบหากริททำโดยนำใชน้ำเคลย์มาเติมโซเดียมไพโรฟอสเฟตซึ่งจะเป็น peptising agent ช่วยใ้ใชน้ำเคลย์กระจายตัวได้ดี เติมน้ำลงไปกวนอย่างรวดเร็ว แล้วกรองผ่านตะแกรง กากที่ไม่ผ่านตะแกรงคือกริท นำไปทำให้แห้ง ชั่งหาปริมาณ)

ความชื้นในใชน้ำเคลย์ไม่ควรเกิน 1% แต่ kaolin เป็นประเภทที่ไม่ดูดความชื้นถึงแม้อากาศจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูงถึง 90% ก็จะไม่ดูดความชื้นเข้าไปเพียง 1.3% เท่านั้น สีของใชน้ำเคลย์มีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีอ่อน การวัดความแตกต่างของสีของใชน้ำเคลย์อาจทำได้ง่าย ๆ โดยนำใชน้ำเคลย์ 2 ตัวอย่างมาวางบนพื้นขาวใกล้เคียงกันเอาช้อนบดให้ทั้งสองตัวอย่างมาต่อกัน ดูความแตกต่างของสีตรงรอยต่อ นั้น แต่จะให้แน่นอนควรใช้เครื่องมือ The General electric brightness meter ซึ่งวัดการสะท้อนของแสงที่ตกกระทบบนสี แล้วเปรียบเทียบกับมาตรฐานให้สีมาตรฐานมีค่าเป็น 100 ใชน้ำเคลย์ชนิดละเอียด (hard clay) มีค่า 74-78 ใชน้ำเคลย์ชนิดหยาบ (soft clay) มีค่า 78-81 แต่ถึงแม้ว่าสีของใชน้ำเคลย์จะมีความสำคัญ แต่อำนาจครอบคลุม (covering power) ของสีดำ (กำลังการแสดงออกของสีที่จะกลบสีของยาง) ทั้งนี้เนื่องจากธรรมชาติหักเหของแสงของใชน้ำเคลย์ใกล้เคียงกับยางมาก)

ใชน้ำเคลย์ที่ใช้ในยางจะแบ่งเป็น 4 พวกใหญ่ ๆ คือ

1. ใชน้ำเคลย์ชนิดละเอียด (Hard clay)
2. ใชน้ำเคลย์ชนิดหยาบ (Soft clay)
3. ใชน้ำเคลย์ให้ความร้อน (Calcined clay)
4. ใชน้ำเคลย์เคลือบสารเคมี (Treated clay)

2.11.4.1 ไซนาเคลย์ชนิดละเอียด

เป็นไซนาเคลย์ที่มีขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ต่ำกว่า 2 ไมครอน มีสีขาวกว่าชนิดหยาบ เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพราคาถูก ทำให้ยางมีมอดูลัสและความต้านทานต่อแรงดึงสูง ความต้านทานต่อการสึกหรอและยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์จะมีวิสโคซิตีสูงด้วย นอกจากนี้ยังที่ได้จะมีความต้านทานไฟฟ้าสูง นิยมใช้มากเพราะมีราคาถูกและสามารถเสริมประสิทธิภาพยางเกือบทุกชนิด การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ในการทำสายพานลำเลียง ปะเก็น ยางท่อ ยางรองพื้น ตู้คาเทรื่องใช้ในบ้านและใช้มากที่สุดในงานทำรองเท้า เช่น พื้นรองเท้า ส้นรองเท้า เป็นต้น

2.11.4.2 ไซนาเคลย์ชนิดหยาบ

เป็นไซนาเคลย์ที่มีอนุภาคใหญ่กว่า 2 ไมครอน มีสีขาวหม่น ใช้เป็นสารกึ่งเสริมประสิทธิภาพ ราคาถูก ให้ยางที่มีมอดูลัส ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ วิสโคซิตีของยางที่ยังไม่วัลคาไนซ์ต่ำกว่ายางที่ใช้ไซนาเคลย์ชนิดละเอียด เมื่อเปรียบเทียบไซนาเคลย์ชนิดหยาบกับคัลเซียมคาร์บอเนต จะพบว่าความแข็งและความต้านทานต่อแรงดึงของยางที่ใช้ไซนาเคลย์จะสูงกว่ายางที่ใช้คัลเซียมคาร์บอเนต แต่ความกระด้างตัวจะต่ำกว่า การใช้งานมักใช้ในงานการทำผลิตภัณฑ์ยางทางเชิงกล แต่ไม่อาจใช้ในยางที่ต้องการยืดหยุ่น

2.11.4.3 ไซนาเคลย์ให้ความร้อน

เป็นไซนาเคลย์ชนิดละเอียดที่นำไปให้ความร้อน เพื่อเอาน้ำที่รวมอยู่ในไซนาเคลย์ออกไป จะได้สารตัวเติมชนิดเสริมประสิทธิภาพที่มีสีขาว ให้ยางที่มีความแข็ง ความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าไซนาเคลย์ชนิดละเอียดธรรมดา ไซนาเคลย์ชนิดนี้จะใช้ในกรณีที่ต้องการยางที่เน้นความต้านทานไฟฟ้าเป็นเรื่องสำคัญ

2.11.4.4 ไซนาเคลย์เคลือบสารเคมี

เป็นไซนาเคลย์ชนิดละเอียด ชนิดพิเศษ ที่ทำการเคลือบผิวด้วยสารเคมี เช่น เคลือบด้วยสารอะมีน เคลือบด้วยไซเลน เป็นต้น (พรพรรณ, 2528)

2.11.5 แป้งทัลคัม

เป็นผงสีขาวประกอบด้วย มักนิเซียมซิลิเกตและอลูมิเนียมซิลิเกตใช้เป็นสารตัวเติมเฉื่อยในสารประกอบที่ทนความร้อน เช่น ปะเก็น เป็นต้น สำหรับแป้งที่บดละเอียดมาก อาจใช้เป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมประสิทธิภาพ สำหรับยางที่มีสีจางได้ และยังใช้เป็นตัวหล่อลื่นที่ยังไม่สุกไม่ให้ยางเหล่านี้มาเกาะติดกันหรือเกาะติดกับสารอื่นๆ (พรพรรณ, 2528)

2.12 สารที่ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)

การวัลคาไนซ์คือขบวนการการเปลี่ยนแปลงที่อยู่ในสภาพไม่คงตัวให้เป็นยางที่รักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งกระด้างโดยใช้สารวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นสารทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลซึ่งเรียกว่า Crosslink ซึ่งตรงจุดที่วงไวต่อปฏิกิริยา สารวัลคาไนซ์ที่สำคัญของยางธรรมชาติคือ กำมะถัน ส่วนยางสังเคราะห์ใช้ Dicumyl peroxide (DCP) (พรพรรณ, 2528)

2.13 สารตัวเร่ง (Accelerator)

สารตัวเร่ง คือ สารที่ช่วยให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดขึ้นได้เร็วขึ้น ซึ่งสารตัวเร่งนี้มีอิทธิพลในอัตราการเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ในยางมากน้อยเพียงใดนั้น คุ้ได้จาก การวัดด้วยเครื่องวัดความหนืด (Mooney Viscometer) และ เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ (Monsanto Oscillating Disk Rheometer, ODR) ซึ่งการเลือกใช้สารตัวเร่งแต่ละชนิดนั้นก็เลือกใช้ตาม คุณสมบัติของสารตัวเร่ง ตามความต้องการของลักษณะการสุกของยาง (Cure)

การแบ่งสารตัวเร่งเป็นหมวดหมู่ตามลักษณะโครงสร้างทางเคมีของสารตัวเร่งนั้นดังนี้

2.13.1 หมู่ไดไธโอคาร์บาเมต (Dithiocarbamate)

2.13.1.1 เกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salts) เช่น PIPC

2.13.1.2 เกลือโลหะ (Metal Salts) เช่น SDBC

2.13.1.3 ซิงค์ไดไธโอคาร์บาเมต เช่น ZDMC, ZDEC (ZDC), ZDBC, ZEPC

2.13.2 หมู่แซนเทท (Xanthates) เช่น SIX, ZIX, ZBX

2.13.3 หมู่ไธยูเรม (Thiurams)

2.13.3.1 ไธยูเรมโมโนซัลไฟด์ (Thiuram Monosulphides) เช่น TMTM

2.13.3.2 ไธยูเรมไดซัลไฟด์ (Thiuram Disulphides) เช่น TMTD

2.13.4 หมู่ไธอาโซล (Thiazole)

2.13.4.1 เมอร์แคปโต (Mercapto Accelerator) เช่น MBT, MBTS, ZMBT

2.13.5 หมู่ซัลฟิनाไมด์ (Sulphenamide Accelerator) เช่น BDES, CBS, DCBS, TBBS,

2.13.6 หมู่อัลดีไฮด์อะมีน (Aldehyde Arine Accelerator) เช่น Hexamethylene Tetramine

2.13.7 หมู่เบส (Basic Accelerators)

2.13.7.1 กัวนิดีน (Guanidine) เช่น DPG, DOTG

2.13.8 ลำดับการเร่งเรียงจากเร็วไปช้าดังนี้

แซนเทท > ไดไธโอคาร์บาเมต > ไธยูเรม > ไธอาโซล > ซัลฟิनाไมด์ > อัลดีไฮด์อะมีน > กัวนิดีน

2.13.9 สารตัวเร่งที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

1. สุกเร็วและระยะเวลาก่อนที่ยางสุกยาว
2. มีความอ่อนไหวในการเร่งทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลสูง
3. กระจายตัวในยางได้ดี
4. ให้ FLAT CURE
5. ใช้งานได้ในอุณหภูมิกว้าง
6. ผสมเข้ากับสารเคมีตัวอื่นได้ดี
7. สามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสื่อม (ทั้งในรูปเดี่ยว ๆ หรือผสมกับยางแล้ว)
8. ไม่ทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยางด้อยลง
9. ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้

สารตัวเร่งที่นิยมใช้กันมากคือ สารตัวเร่งพวกที่เป็นกรด ได้แก่ โซอาโซล ซัลฟีนามาได์ ไธยูเรม ไดโซโอคาร์บามต เป็นต้น (พรพรรณ, 2528)

2.14 สารกระตุ้น (Activator)

สารกระตุ้น คือสารที่ช่วยเสริมให้สารตัวเร่งทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้ยางสุกได้อย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะสารตัวเร่งพวกโซอาโซลสารกระตุ้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.14.1 สารกระตุ้นพวกอินทรีย์ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่นิยมใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์เพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นทำให้ยางมีโมดูลัส (Modulus) สูง รักษารูปทรงขณะทำการสุกในเบ้าพิมพ์ได้ ถ้าระยะที่ยืดยาง (Elongation) จะลดลงเมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากขึ้น ปริมาณที่ใช้ 3-5 phr ขึ้นไป

ซิงค์ออกไซด์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ZnO (White Seal) ลักษณะ เป็นผงสีขาวละเอียดแต่หยาบกว่าผง ZnO ACTIVE ใช้ในงานที่ต้องการสีขาวหรือสีสดและ ZnO (ACTIVE) ลักษณะ เป็นผงละเอียดสีเหลือง ใช้ในกรณียางสีดำหรือสีธรรมชาติ

2.14.2 สารกระตุ้นพวกอินทรีย์ ได้แก่ พวกกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก กรดปาล์มมิติก ที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมยางคือ กรดสเตียริก มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่นจับลื่นมือ ช่วยในการบดผสมให้เร็วขึ้น (พรพรรณ, 2528)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ

3.1.1 ยางธรรมชาติเกรดเอสตีอาร์ 5แอล (Standard Thai Rubber, STR 5L) จัดจำหน่ายโดย บริษัทจะนะน้ำยาง จำกัด ทำมาจากน้ำยางซึ่งกรองสิ่งสกปรกออก ทำให้สิ่งสกปรกในยางไม่เกิน ตามที่มาตรฐานกำหนด

3.1.2 ยางสไตรีนบิวตาไดอีนเกรด 1502 (Styrene Butadiene Rubber, SBR 1502) เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งผลิตขึ้นมาทดแทนยางธรรมชาติ โดยมีสมบัติใกล้เคียงกับยางธรรมชาติแต่มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่ายางธรรมชาติ เป็นยางที่ใช้ในงานทั่วไปและราคาไม่แพง มีหลายเกรดขึ้นกับกระบวนการสังเคราะห์

3.1.3 ยางบิวตาไดอีนเกรด 0150 (Butadiene Rubber, BR 0150) เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีความยืดหยุ่นสูงมาก มีสมบัติเด่นคือทนต่อการสึกกร่อน จึงนิยมใช้ผสมกับยางธรรมชาติหรือยางเอสปีอาร์ในการผลิตดอกยางรถยนต์หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ต้องการความทนต่อการสึกกร่อนสูง

3.1.4 กรดสเตียริก (Stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นพวกอินทรีย์ ทำหน้าที่เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น จัดจำหน่ายโดย บริษัทอิมพีเรียล อินดัสเตรียล เคมีคัลส์ จำกัด

3.1.5 ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นพวกอนินทรีย์มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด ช่วยในการบดผสมให้เร็วขึ้น จัดจำหน่ายโดย บริษัท Univentures public Company Limited

3.1.6 เอ็น-ไซโคลเฮกซิล-2-เบนโซไทอาซิลซัลฟีนามิเด (N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamidine, CBS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งในหมู่ซัลฟีนามิเดซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางโมดูลัสสูงมากและมีสมบัติทางกลดี

3.1.7 เตตราเมทิล ไซยูเรม ไดซัลไฟด์ (tetramethyl thiuram disulphide, TMTD) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มไฮยูเรมไดซัลไฟด์ โดยสารตัวเร่งในกลุ่มไฮยูเรมจัดได้ว่าเป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงพิเศษ สำหรับยางธรรมชาติ

3.1.8 กำมะถัน (Sulphur powder) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้ยางเกิดการคงรูป มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง จัดจำหน่ายโดย บริษัทสยามเคมีจำกัด (มหาชน)

3.1.9 เขม่าดำ (Carbon Black) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพในอุตสาหกรรมยาง เพื่อเพิ่มความแข็ง ความแข็งแรง และความทนต่อการสึกกร่อนให้แก่ผลิตภัณฑ์ยาง มีลักษณะเป็นผงสีดำ จัดจำหน่ายโดย บริษัทไทยคาร์บอนจำกัด (มหาชน)

3.1.10 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมประสิทธิภาพ มีลักษณะเป็นผงสีขาวห่ม่น จัดจำหน่ายโดย บริษัท Shiraishi Kogyo Kaisha Company Limited

3.1.11 ไชนาเคลย์ (China Clay) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมประสิทธิภาพ มีลักษณะเป็นผงสีขาวละเอียด ชนิด Soft Clay จัดจำหน่ายโดย บริษัท Sand and Soil (Bangkok) Company Limited

3.1.12 ทัลคัม (Talcum) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมประสิทธิภาพ มีลักษณะเป็นผงสีขาว จัดจำหน่ายโดย บริษัท Lioning Metal and Mineral

3.1.13 ซิลิกา (Silica) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมเสริมแรง มีสีขาวและมีขนาดอนุภาคเล็กมาก เมื่อเติมลงไปใในยางจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดีขึ้น จัดจำหน่ายโดย บริษัท USSL Degussa Group United Silica (Siam) Ltd.

3.1.14 ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) ทำหน้าที่เป็นสารลดประสิทธิภาพในการผสมในยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ทำให้เวลาในการวัลคาไนซ์เร็วขึ้น จัดจำหน่ายโดย บริษัท จีไอเซาท์ จำกัด

3.2 เครื่องมือที่ใช้

3.2.1. เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) เครื่องผสมยางระบบเปิดที่ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นต่อการบดผสมยางกับสารเคมียาง ลูกกลิ้งมีขนาดเส้นรอบวง 19.26 นิ้ว มีความกว้าง 15 นิ้ว ความเร็วของลูกกลิ้งหน้า 12 รอบต่อนาที ลูกกลิ้งหลัง 15 รอบต่อนาที และมี Friction ratio 1:1.25 ผลิตโดยบริษัท ชัยเจริญการช่าง จำกัด

3.2.2. เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง (Oscillating disk rheometer, ODR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาเวลาที่ยางเกิดการคงรูป (หรือหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์) ประกอบด้วยจานโลหะ (Rotor) ที่มีลักษณะเป็นเหมือนรูปดอกเห็ด ส่วนบนจานโลหะเป็นรูปวงกลมมีเส้นนูนรอบๆจานโลหะ เรียงตามแนวรัศมีของจานโลหะ จานโลหะเป็นโลหะแข็งส่วนล่างของจานโลหะจะต่อกับแท่งโลหะทรงกระบอกมีเหลี่ยม แกว่งทำมุม 2 องศา โดยจะหมุนในอัตราเร็ว 105 รอบ/นาที เป็นเครื่อง Gotech รุ่น GT-7070-2S

3.2.3. เครื่องอัดไฮดรอลิก (Compression molding machine) เป็นเครื่องสำหรับขึ้นรูปโดยใช้ระบบไฮดรอลิก ให้ความร้อนด้วยระบบไฟฟ้า มี 2 ชั้น ผลิตโดย บริษัท Sahawat factory เครื่องอัดไฮดรอลิกสามารถปรับตั้งค่าอุณหภูมิและความดันที่กระทำอย่างได้ตามต้องการ

3.2.4. เครื่องวัดความหนา ใช้เครื่องไมโครมิเตอร์แบบเป็นกลมวัดค่าความละเอียดถูกต้อง +/- 0.025 มม. (0.001 นิ้ว) ผลิตโดยบริษัท Teclock Corporation

3.2.5. เครื่องมือทดสอบความทนทานต่อแรงดึง (Micro computer tensile tester) เป็นเครื่องมือวัดสมบัติความทนทานต่อแรงดึงของยางคงรูป เป็นเครื่อง Gotech รุ่น GT-7010-A2 Capacity 2000 KG Power Ac100-240 V 50 Hz. 30 A ผลิตโดยบริษัท Taichung Industry Park หน้าจอเป็นระบบดิจิทัลสามารถตั้งค่าต่างๆได้ มีเซลล์รับแรง (load cell) เป็นตัวแปลงสัญญาณค่าแรงดึงผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นค่าแรงในหน่วยนิวตัน

3.2.6 เครื่องชั่งไฟฟ้า (Electrical balance) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น LIBBOR EB-220 ผลิตโดยบริษัท Shimadzu corporation ชั่งได้ละเอียด 0.01 กรัม สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 2,200 กรัม

3.3 วิธีดำเนินการ

3.3.1 การทดสอบความอ่อนค่าความเค้น

นำชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์ มาทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบความทนทานต่อแรงดึง โดยดึงให้ยืดออกที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วปล่อยให้คืนตัวกลับสู่สถานะที่มีแรงกระทำเป็นศูนย์ ซึ่งการดึงและการคืนกลับกระทำด้วยอัตราเร็วเท่ากับ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ถือเป็น การทดสอบ 1 รอบ ทำการทดสอบเช่นเดียวกันนี้ซ้ำๆ กัน เป็นจำนวน 7-8 รอบ วัดแรงที่ใช้ในการยืดหรือหดตัวทุกๆ ระยะยืด 20 เปอร์เซ็นต์

การคำนวณผล ค่าความเค้น คำนวณดังนี้

$$\text{Stress (MPa)} = F/A \quad \text{----- (3.1)}$$

โดยที่ $F =$ แรงที่ใช้ (นิวตัน)

$A =$ พื้นที่หน้าตัดของยางขณะที่ไม่ได้ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

การคำนวณผล ค่าความเครียด จำนวนดังนี้

$$\text{Strain} = (L - L_0) / L_0 \quad \text{-----}(3.2)$$

โดยที่ L = ระยะห่างระหว่างจุดขณะที่ยางขาดพอดี (เซนติเมตร)

L_0 = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนยางเดิม (เซนติเมตร)

3.3.2 ศึกษาเปรียบเทียบความอ่อนค่าความเค้นระหว่างยางสังเคราะห์กับยางธรรมชาติ

ในการทดลองนี้ใช้ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ ยางสไตรีนบิวตาไดอีน และยางบิวตาไดอีน โดยไม่ผสมสารตัวเติมและใช้การวัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ ผสมยางกับสารเคมีตามสูตรมาตรฐาน ASTM D 3184-80 ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมพอนด์

Ingredients	Quantity (phr)		
	SBR 1502	BR 0150	STR5L
Rubber	100	100	100
Zinc Oxide	3	3	3
Stearic acid	1	1	1
Sulphur	1.75	1.75	1.75
CBS	1	1	1

ทำการบดผสมยางกับสารเคมีโดยใช้เครื่องบดผสมยางสองลูกกลิ้ง ตามมาตรฐาน ASTM D3184-80 ซึ่งมีลำดับขั้นตอนและระยะเวลาดังนี้

ขั้นตอน	สารเคมี	เวลา (นาที)
1.	บดยาง	3
2.	Zinc oxide	2
3.	Filler+Stearic acid	14
4.	CBS	2
5.	Sulphur	3
6.	บดผสม	5

หลังจากนั้นนำยางคอมพอนด์ที่ได้ไปทดสอบลักษณะเฉพาะของการวัลคาไนซ์

3.3.3 การทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปอนด์

นำยางคอมปอนด์มาทำการทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ ด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer รุ่น GOTECH GT-7070-2S ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-81 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อนำยางคอมปอนด์ใส่ลงในห้องใส่ยางที่ปิดมิดชิด ใช้ความดันกดยางให้อยู่ภายในห้องนั้น ภายในห้องมีจานโลหะรูปกรวยป้านสองด้านประกบกันอยู่ (Biconical disk) จานโลหะดังกล่าวจะถูกห่อหุ้มด้วยยางคอมปอนด์ที่ใส่เข้าไป การทดสอบถือว่าสิ้นสุดถึงเวลาที่กำหนดไว้ จากนั้นหาช่วงเวลาที่สามารถแปรรูปร่างของคอมปอนด์ (scorch time (t_1), min) หาเวลาในการวัลคาไนซ์ (Cure time (t_{90}), min)

3.3.4 การอัดยางเข้าแม่พิมพ์

อุ่นแบบพิมพ์ให้ร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แล้วจึงทาสารกันยางติดแบบพิมพ์ (Mould lubricant) ลงไปบนผิวของแบบพิมพ์ที่ร้อนนั้น โดยอุ่นแบบพิมพ์อย่างน้อย 30 นาที นำยางคอมปอนด์มาทำการตัดให้ได้ขนาด รูปร่างและน้ำหนักตามต้องการ แล้วใส่เข้าไปที่ Mould cavity แล้วปิดฝา นำเข้าไปอัดในเครื่องอัดไฮดรอลิก แล้วทำการอัดอย่างรวดเร็ว อัดยางไว้ในเครื่องอัดไฮดรอลิก เป็นเวลา 90 % Cure time เมื่อครบเวลาตามกำหนดให้เอายางออก

3.3.5 การเตรียมตัวอย่างขึ้นทดสอบ

ตัวอย่างขึ้นทดสอบเตรียมตามมาตรฐาน ASTM D 412-80 ขึ้นทดสอบแบบดัมเบลล์เตรียมได้จากการตัดแผ่นยางด้วยมีดตัดที่มีรูปแบบตามมาตรฐานที่ต้องการด้วยเครื่องตัดที่มีลักษณะแบบกดตัดครั้งเดียว เมื่อได้ขึ้นทดสอบแล้วให้นำมาทำเครื่องหมาย ระยะห่างจะใช้ระยะห่างในการทดสอบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร การวัดความหนาของตัวอย่างยาง

3.3.6 ศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์

ยางสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ยางสไตรีนบิวตาไดอีนและยางบิวตาไดอีน วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ โดยใช้สารตัวเติม 5 ชนิด คือ เขม่าดำเกรด N330 และ N660 แคลเซียมคาร์บอเนต ไชนาเคลย์ ทัลคัม และซิลิกา ในปริมาณ 40 phr ผสมยางกับสารเคมีตามสูตรมาตรฐาน ASTM D 3182-74 ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 นำยางคอมปอนด์ที่ได้ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปอนด์ ตามวิธีในข้อ 3.3.3 และนำยางอัดเข้าแม่พิมพ์ตามวิธีในข้อ 3.3.4 จากนั้นนำยางที่ได้ตัดขึ้นทดสอบตามวิธีในข้อ 3.3.5 นำขึ้นทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบความอ่อนค่าความเค้นตามวิธีในข้อ 3.3.1

ตารางที่ 3.2 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมปอนด์ของยางปียาร์

Ingredients	Quantity (phr)					
	1	2	3	4	5	6
BR 0150	100	100	100	100	100	100
Zinc Oxide	3	3	3	3	3	3
Stearic acid	2	2	2	2	2	2
CBS	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Carbon Black N330	40	-	-	-	-	-
Carbon Black N660	-	40	-	-	-	-
Calcium carbonate	-	-	40	-	-	-
China clay	-	-	-	40	-	-
Talcum	-	-	-	-	40	-
Silica	-	-	-	-	-	40
DEG	-	-	-	-	-	2

ตารางที่ 3.3 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมปอนด์ของยางเอสปีอาร์

Ingredients	Quantity (phr)					
	1	2	3	4	5	6
SBR 1502	100	100	100	100	100	100
Zinc Oxide	3	3	3	3	3	3
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
CBS	1	1	1	1	1	1
Sulphur	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
Carbon Black N330	40	-	-	-	-	-
Carbon Black N660	-	40	-	-	-	-
Calcium carbonate	-	-	40	-	-	-
China clay	-	-	-	40	-	-
Talcum	-	-	-	-	40	-
Silica	-	-	-	-	-	40
DEG	-	-	-	-	-	2

3.3.7 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณขี้เถ้าที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์

ยางสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ยางสไตรีนบิวตาไดอีนและยางบิวตาไดอีน วัลคาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ โดยใช้สารตัวเติม คือ ขี้เถ้าเกรด N 330 ในปริมาณ 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ผสมยางกับสารเคมีตามสูตรมาตรฐาน ASTM D 3182-74 ดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 นำยางคอมพอนด์ที่ได้ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมพอนด์ ตามวิธีในข้อ 3.3.3 และนำยางอัดเข้าเบ้าพิมพ์ตามวิธีในข้อ 3.3.4 จากนั้นนำยางที่ได้ตัดชิ้นทดสอบตามวิธีในข้อ 3.3.5 นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบความอ่อนค่าความเค้นตามวิธีในข้อ 3.3.1

ตารางที่ 3.4 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมพอนด์ของยางบิโอาร์

Ingredients	Quantity (phr)					
	1	2	3	4	5	6
BR 0150	100	100	100	100	100	100
Zinc Oxide	3	3	3	3	3	3
Stearic acid	2	2	2	2	2	2
CBS	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Sulphur	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Carbon Black N330	0	10	20	30	40	50

ตารางที่ 3.5 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมพอนด์ของยางเอสบิโอาร์

Ingredients	Quantity (phr)					
	1	2	3	4	5	6
SBR 1502	100	100	100	100	100	100
Zinc Oxide	3	3	3	3	3	3
Stearic acid	1	1	1	1	1	1
CBS	1	1	1	1	1	1
Sulphur	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75	1.75
Carbon Black N 330	0	10	20	30	40	50

3.3.8 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยาง

สังเคราะห์ที่มีเขม่าดำปริมาณ 40 phr

ยางสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ยางสไตรีนบิวตาไดอีนและยางบิวตาไดอีน ผสมเขม่าดำเกรด N 330 ในปริมาณ 40 phr โดยใช้การวัลคาไนซ์ 4 ระบบ คือ ระบบกำมะถันปกติ ระบบอีวี ระบบเซมิอีวี ระบบสารให้กำมะถันผสมยางกับสารเคมีตามสูตร ดังตารางที่ 3.6 และ 3.7 นำยางคอมปานด์ที่ได้ทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ของยางคอมปานด์ ตามวิธีในข้อ 3.3.3 และนำยางอัดเข้าเข้าพิมพ์ตามวิธีในข้อ 3.3.4 จากนั้นนำยางที่ได้ตัดชิ้นทดสอบตามวิธีในข้อ 3.3.5 นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบความอ่อนค่าความเค้นตามวิธีในข้อ 3.3.1

ตารางที่ 3.6 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมปานด์ของยางบิวอาร์

Ingredients	Quantity (phr)			
	Conventional	EV	Semi -EV	S-donor
BR 0150	100	100	100	100
Zinc Oxide	3	3	3	3
Stearic acid	2	2	2	2
CBS	0.9	2.2	1.8	-
Sulphur	1.5	0.6	1.2	-
TMTD	-	-	-	4
Carbon Black N 330	40	40	40	40

ตารางที่ 3.7 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมปานด์ของยางเอสบีอาร์

Ingredients	Quantity (phr)			
	Conventional	EV	Semi -EV	S-donor
SBR 1502	100	100	100	100
Zinc Oxide	3	3	3	3
Stearic acid	1	1	1	1
CBS	1	2.2	1.8	-
Sulphur	1.75	0.6	1.2	-
TMTD	-	-	-	4
Carbon Black N 330	40	40	40	40

3.3.9 ศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วในการผิครูปที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์

3.3.9.1 ยางที่ไม่ผสมสารตัวเติม

นำตัวอย่างที่เตรียมได้จากสูตรที่ 1 และ 2 ในตารางที่ 3.1 มาทำการทดสอบความอ่อนค่าความเค้นตามวิธีในข้อ 3.3.1 โดยใช้อัตราเร็วในการผิครูปเป็น 20, 50, 100, 300 และ 500 มิลลิเมตร/นาที

3.3.9.2 ยางที่ผสมสารตัวเติม

นำตัวอย่างที่เตรียมได้ในสูตรที่ 1 จากตารางที่ 3.2 และ 3.3 มาทำการทดสอบความอ่อนค่าความเค้นตามวิธีในข้อ 3.3.1 โดยใช้อัตราเร็วในการผิครูปเป็น 20, 50, 100, 300 และ 500 มิลลิเมตร/นาที

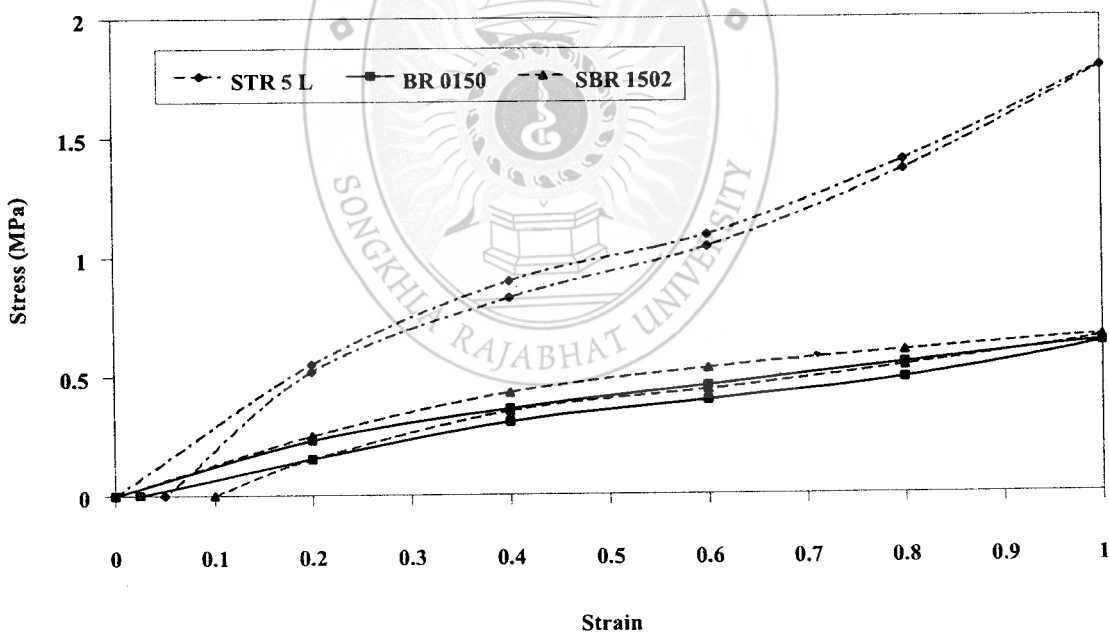


บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

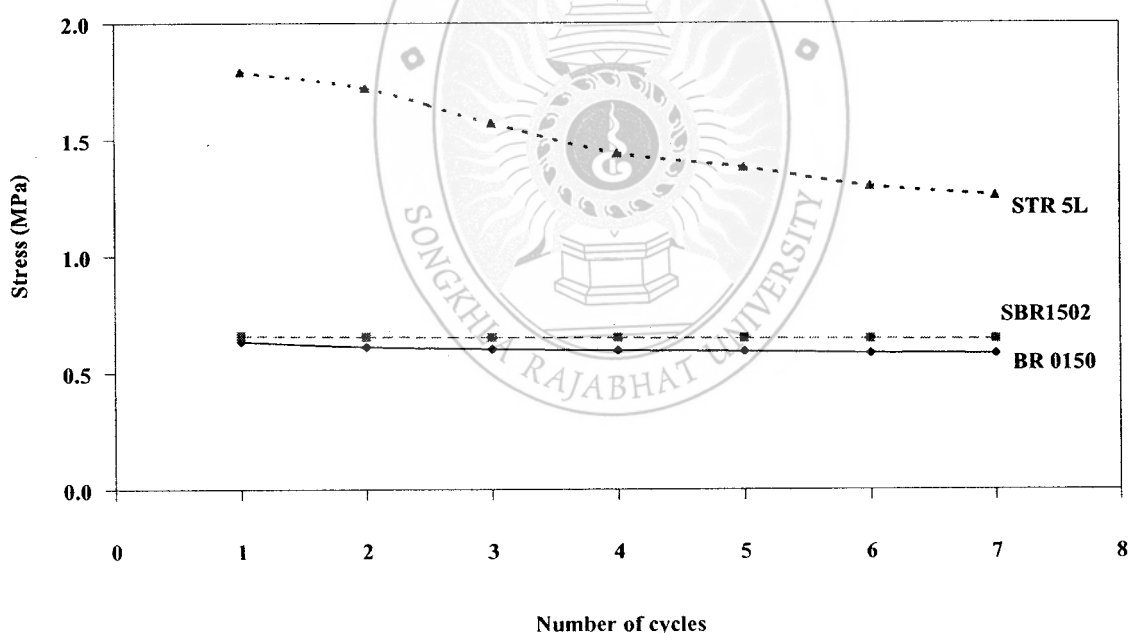
4.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบความอ่อนค่าความเค้นระหว่างยางสังเคราะห์กับยางธรรมชาติ

จากการทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติชนิดยางแท่ง เอสทีอาร์ 5 แอล, ยางเอสบีอาร์ 1502 และยางบีอาร์ 0150 ที่อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อ นาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปรอบแรกมีลักษณะดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางสังเคราะห์กับยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

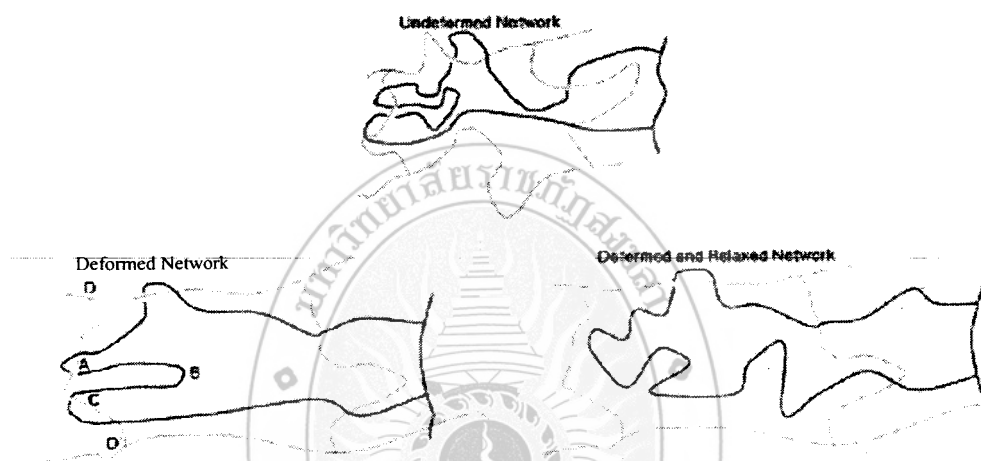
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 พบว่า ยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเอสทีอาร์ 5 แอลจะมีลักษณะ Loop ที่แคบกว่ายางเอสบีอาร์ 1502 และยางบีอาร์ 0150 เนื่องจากยางธรรมชาติไม่สะสมพลังงานไว้ในตัวมัน เมื่อได้รับแรงกระทำทำให้ความร้อนสะสมในยางน้อย ลักษณะ Loop จึงแคบ (พรพรรณ, 2540) แต่ในยางเอสบีอาร์จะมีความร้อนสะสมเกิดขึ้นสูง ลักษณะ Loop จึงกว้างกว่ายางธรรมชาติ (บุญธรรม, 2530) ในยางธรรมชาติจะมีค่าความเค้นสูงกว่ายางสังเคราะห์ เนื่องจากการมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอทำให้โมเลกุลของยางธรรมชาติ สามารถดกผลึกได้ขณะดึง โดยผลึกที่เกิดขึ้นเป็นตัวเสริมความแข็งแรงจึงทำให้ยางธรรมชาติแข็งแรงโดยตัวมันเอง ยางธรรมชาติจึงมีความเค้นสูงกว่ายางที่ไม่ดกผลึกขณะดึง ซึ่งในยางสังเคราะห์ทั้งยางบีอาร์และยางเอสบีอาร์เป็นยางที่มีบิดาโคอิน การเรียงตัวของมอนอเมอร์ไม่เป็นระเบียบ ทำให้โมเลกุลไม่สามารถดกผลึกได้ขณะดึง (พรพรรณ, 2535) ยางสังเคราะห์จึงมีความแข็งแรงต่ำ ความเค้นของยางจึงต่ำกว่ายางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ให้ค่าความเค้นสูงกว่ายางบีอาร์ เนื่องจากยางเอสบีอาร์มีสไตรีนอยู่ในโคโพลิเมอร์จึงทำให้ยางเอสบีอาร์มีความแข็งแรงกว่ายางบีอาร์ค่าความเค้นจึงสูงกว่ายางบีอาร์ (แมนและสมชัย, 2541)



รูปที่ 4.2 ความอ่อนค่าความเค้นของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม

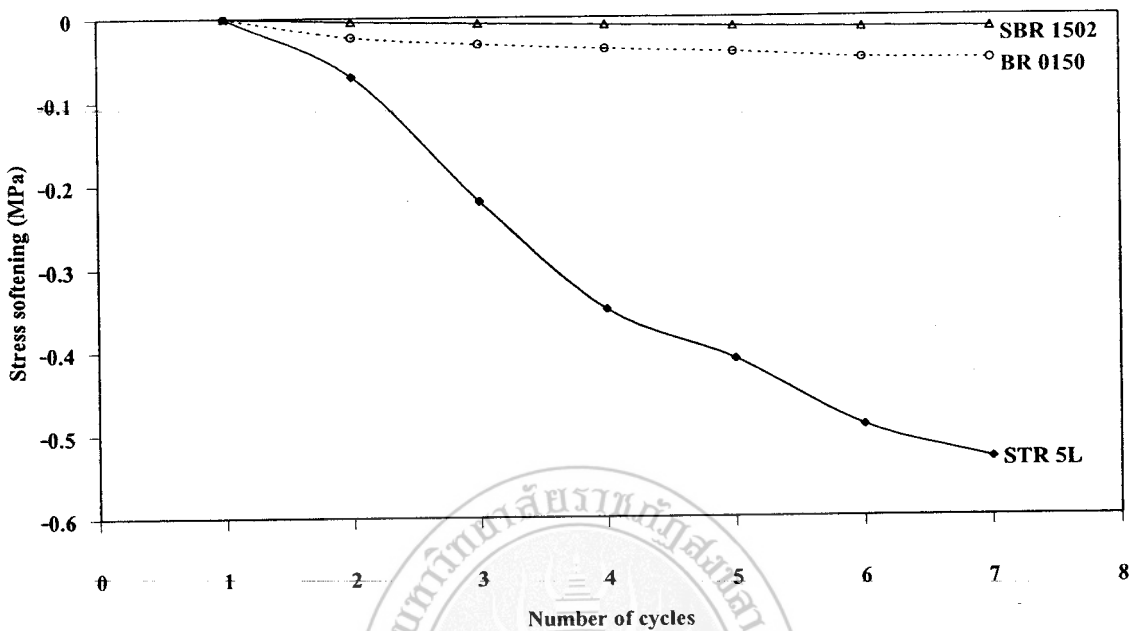
เมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำๆ แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิดรูปแต่ละรอบแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ค่าความเค้นของยางธรรมชาติลดลงตามจำนวนรอบในการดึงที่เพิ่มขึ้น โดยยางธรรมชาติมีค่าความเค้นลดลงมากกว่ายางบีอาร์ 0150 และยางเอสบีอาร์ 1502 ตามลำดับ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่มีความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยาง

ธรรมชาติตกผลึกได้เมื่อยืด ความเค้นจึงสูง แต่ในยางเอสปีอาร์มีกึ่งกำน ทำให้การเชื่อมโยงเกิดแบบหลวม ๆ จึงทำให้โครงสร้างเป็นแบบไม่มีรูปร่างผลึก ความแข็งแรงของพันธะจึงลดลง ค่าความเค้นจึงลดลงด้วย (แม้นและสมชัย, 2541) ยางเอสปีอาร์ให้ค่าความเค้นสูงกว่ายางบีอาร์ เนื่องจากยางเอสปีอาร์มีสไตรีนอยู่ในโคโพลิเมอร์จึงทำให้ยางเอสปีอาร์มีความแข็งแรงกว่ายางบีอาร์ ค่าความเค้นจึงสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนท่าวางของโครงข่ายโมเลกุล คือ ตำแหน่งของจุดเชื่อมโยงและจุดเกี่ยวพันกันของเส้นโมเลกุลย้ายที่ไปจากตำแหน่งเดิม ดังรูปที่ 4.3 ทำให้ใช้แรงน้อยลงในการผิดรูปครั้งหลังๆ (ปรีชา, 2541)



รูปที่ 4.3 โครงข่ายที่มีการผิดรูปทั้งก่อนการผิดรูปและหลังการผิดรูป (J.S. Bergstrom

และ M.C. Boyce, 1998)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม

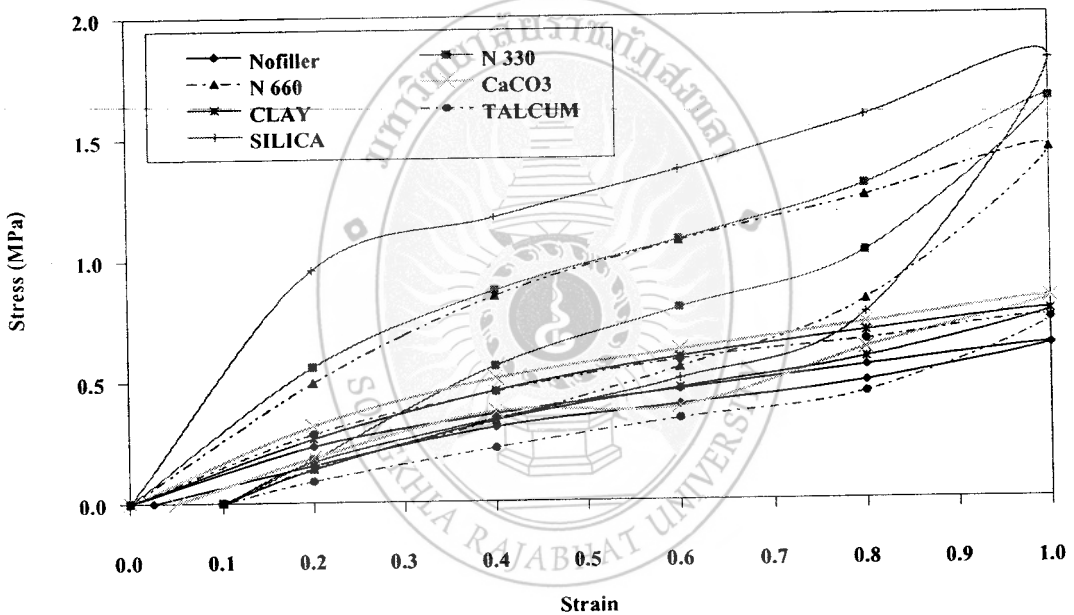
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมลักษณะดังรูปที่ 4.4 พบว่ายางธรรมชาติมีการลดลงของความเค้นสูงกว่ายางสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยางธรรมชาติมีสูตรโครงสร้างโมเลกุลเป็น cis-1,4-polyisoprene มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน มีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอทำให้มีความแข็งแรงกว่ายางสังเคราะห์ เมื่อจำนวนรอบในการดึงเพิ่มขึ้นการลดลงของความเค้นของยางธรรมชาติจะลดลงมากเนื่องจากโครงสร้างที่สม่ำเสมอเมื่อถูกกระทำซ้ำๆ โครงสร้างจะจัดเรียงตัวอย่างสมบูรณ์แรงที่ใช้จึงลดลง ซึ่งยางธรรมชาติมีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นในตัวเมื่อถูกแรงกระทำสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้มาก เมื่อยืดออกครั้งหลังๆ แรงที่ดึงจะน้อยลงแต่ต้องใช้แรงอยู่ตลอด แต่ยางสังเคราะห์เมื่อถูกกระทำครั้งแรกจะเกิดการผิดรูปเกือบสมบูรณ์ทำให้กลับคืนสู่สภาพเดิมได้น้อยเมื่อดึงครั้งต่อไปแรงที่ใช้จะสม่ำเสมอ ซึ่งยางสังเคราะห์เมื่อยืดออกแล้วจะคืนกลับได้น้อย เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยทำให้การลดลงของความเค้นของยางสังเคราะห์น้อยกว่ายางธรรมชาติ

4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยาง

สังเคราะห์

4.2.1 ยางบิโอาร์

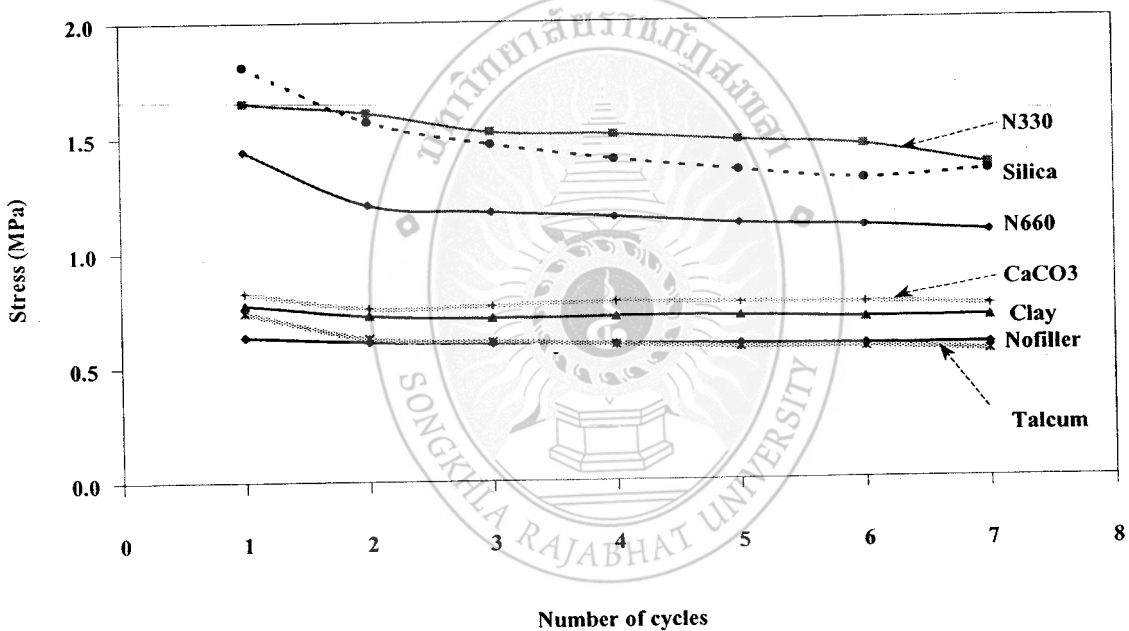
ศึกษาชนิดสารตัวเติมต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ ใช้สารตัวเติม 5 ชนิด คือ เขม่าดำเกรด N 660 และ N 330, แคลเซียมคาร์บอเนต, ไซนาเคลย์, ทัลคัมและซิลิกา ในปริมาณ 40 phr ซึ่งวัดค่าโมดูลัสด้วยระบบกัมมันตภาพรังสี ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปรอบแรกมีลักษณะรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบิโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบิโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก ลักษณะดังรูปที่ 4.5 พบว่ายางบิโอาร์ที่ผสมสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพได้แก่ เขม่าดำและซิลิกา ทำให้อยางบิโอาร์แข็งแรงขึ้นซึ่งยางบิโอาร์เป็นยางที่ไม่ตกผลึกขณะดึงยางทำให้เมื่อต้องใช้สารตัวเติมที่เป็นตัวเสริมประสิทธิภาพยางจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 9 หรือ 10 เท่าตัว (พรพรรณ, 2535) เมื่อสังเกตรูปที่ 4.5 ซิลิกาก็จะมีความกว้างของ Loop มากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เนื่องจาก ซิลิกาเป็น

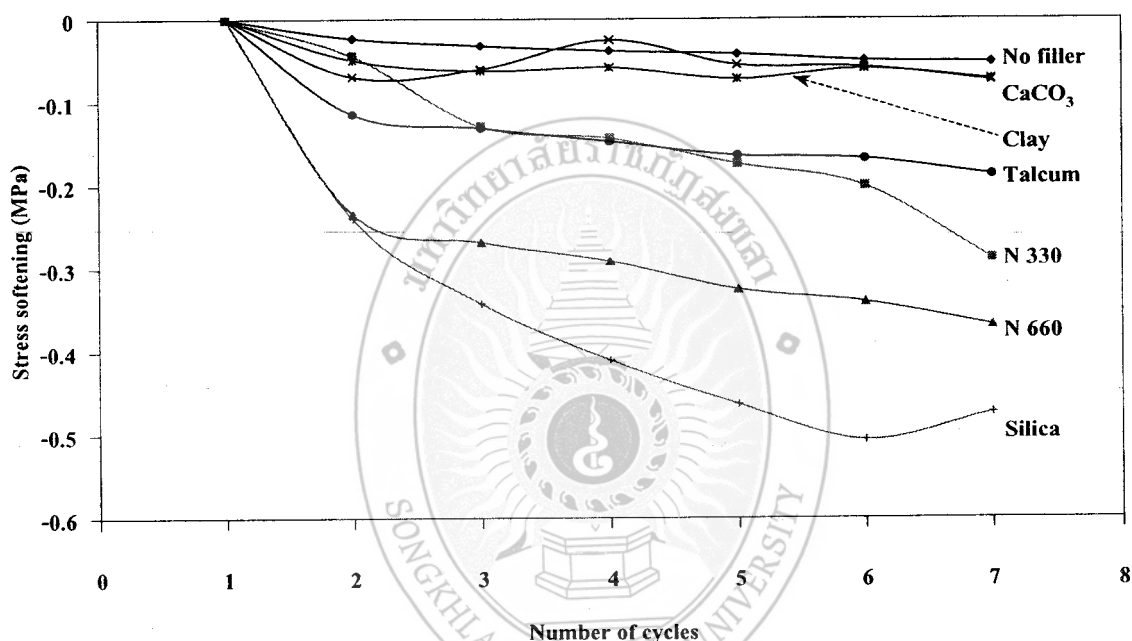
สารตัวเติมที่มีขนาดเล็กกว่าเขม่าดำและยังเป็นตัวเสริมประสิทธิภาพเมื่อผสมกับยางบิอาร์ ที่ต้องใช้สารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพจึงให้ค่าความเค้นสูงและมีพลังงานเก็บสะสมความร้อนเอาไว้มาก จึงมีความกว้างของ Loop มาก ซิลิกาเป็นสารที่มีขั้วซึ่งยางบิอาร์เป็นยางที่ไม่มีขั้วทำให้เกิดพันธะกับซิลิกาได้ไม่ดีมากนัก เมื่อมีแรงมากระทำกับยางในครั้งแรกต้องใช้แรงดึงมากกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมชนิดอื่น เพราะซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพและมีขนาดอนุภาคเล็กทำให้กระจายตัวในยางได้ดีเมื่อคั่งยางครั้งแรกใช้แรงมากเมื่อปล่อยแรงกลับพลังงานที่สะสมไว้ในเนื้อยางมาก แรงที่ใช้จึงน้อย Loop จึงกว้าง สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต, ไซนาเคลย์, ทัลคัม เป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเขม่าดำและซิลิกา ทำให้เมื่อผสมกับยางการกระจายตัวได้ไม่ดีเท่ากับยางที่มีอนุภาคเล็กกว่า ค่าความเค้นของยางจึงน้อยกว่ายางผสม เขม่าดำและซิลิกา



รูปที่ 4.6 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆในปริมาณ 40 phr

เมื่อพิจารณาความอ่อนค่าความเค้นของยางบิอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆในปริมาณ 40 phr ลักษณะดังรูปที่ 4.6 สารตัวเติมที่มีอนุภาคเล็กจะมีความเค้นสูงเมื่อจำนวนรอบในการดึงเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำๆ กัน ทำให้เส้นโมเลกุลของยางเกิดการเปลี่ยนท่าการวางตัว เกิดการเปลี่ยนโครงข่ายย้ายจุดเชื่อมโยงพันธะ จึงใช้แรงน้อยในการดึงครั้งหลังๆ จะสังเกตได้ว่ายางที่ผสมสารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพ เช่น เขม่าดำ N 330, N 660 และ

ซิลิกาจะมีความอ่อนค่าความเค้นที่ลดลงของแต่ละรอบในการดึงมากกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต, ไชนาเคลย์, ทัลคัม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยางที่ผสมสารตัวเติมเขม่าดำ N 330, N 660 และซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็ก เมื่อผสมกับยางทำให้ยางมีความแข็งแรงมาก แรงที่ใช้จึงมาก ความอ่อนค่าความเค้นของยางในแต่ละรอบการดึงจะลดลงมากกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมที่ไม่เสริมประสิทธิภาพทำให้มีความแข็งแรงน้อยแรงที่ใช้จึงน้อยส่งผลให้ความอ่อนค่าความเค้นของยางในแต่ละรอบการดึงลดลงน้อยกว่า



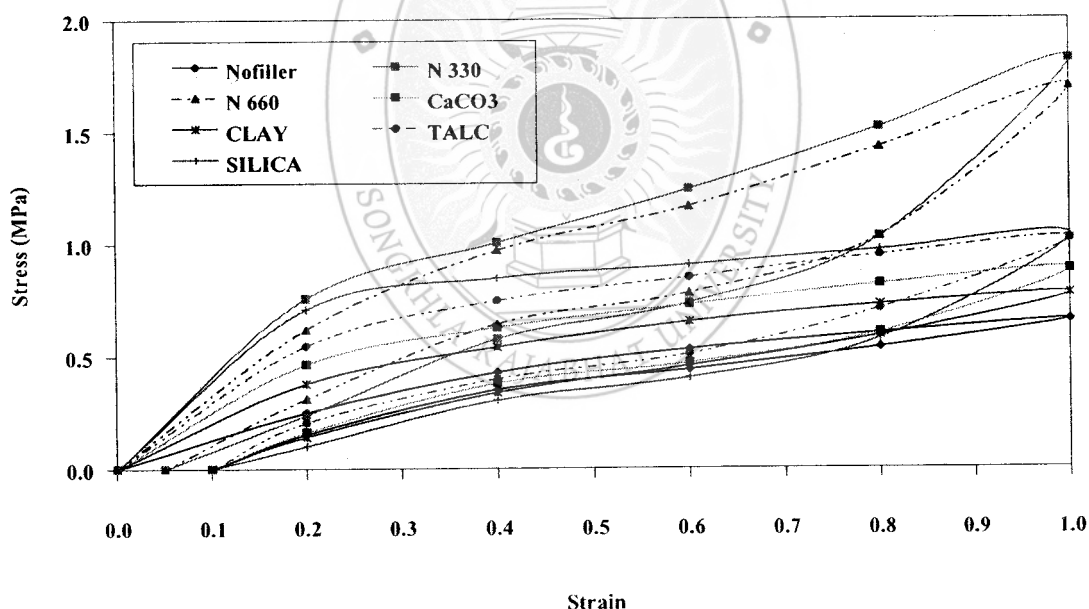
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางปียอร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางปียอร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ลักษณะดังรูปที่ 4.7 การลดลงของความเค้นในซิลิกานั้นจะมีการลดลงของความเค้นมากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัดที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพื้นผิวของสารตัวเติมต่างชนิดกันการกระจายตัวจะแตกต่างกัน ที่เห็นได้ชัดพื้นผิวของซิลิกาพื้นที่ผิวที่รวมตัวกันจะแตกต่างกันที่การเชื่อมโยงกันของพื้นผิวซิลิกาจะแผ่ขยายออกมากกว่าก่อนจะรวมตัวกัน แต่กรณีของเขม่าดำการเชื่อมโยงจะเชื่อมต่อกันที่บริเวณริมของพื้นผิวการครอบคลุมจะน้อย พื้นที่ผิวของการกระจายของซิลิกาจึงกระจายตัวสูงกว่าเขม่าดำ (Wang, Meng-Jiao, 1998) เมื่อเกิดการผิรุข้ำๆ จำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น ความเค้นลดลงเนื่องจากการ

ปรับตัวและการไหลของการผิดรูปเป็นการสิ้นเปลืองของเส้นโมเลกุลของโครงข่ายโครงสร้างพื้นที่ผิวของซิลิกาจะเกิดการแตกหักแต่ละรอบมากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ทำให้สังเกตเห็นได้ชัดถึงการลดลงของความเค้นของซิลิกา ส่วนสารตัวเติมชนิดอื่นที่มีขนาดอนุภาคใหญ่เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต, ไชน่าเคลย์ และ ทัลคัม นั้นจะมีรอยตำหนิเล็ก ๆ และมีจุดอ่อนลงเกิดความเค้นความเข้มเฉพาะที่ แรงที่ใช้ในการดึงข้างจึงน้อยการลดลงของความเค้นจึงน้อย (C.M.Blow, 1978)

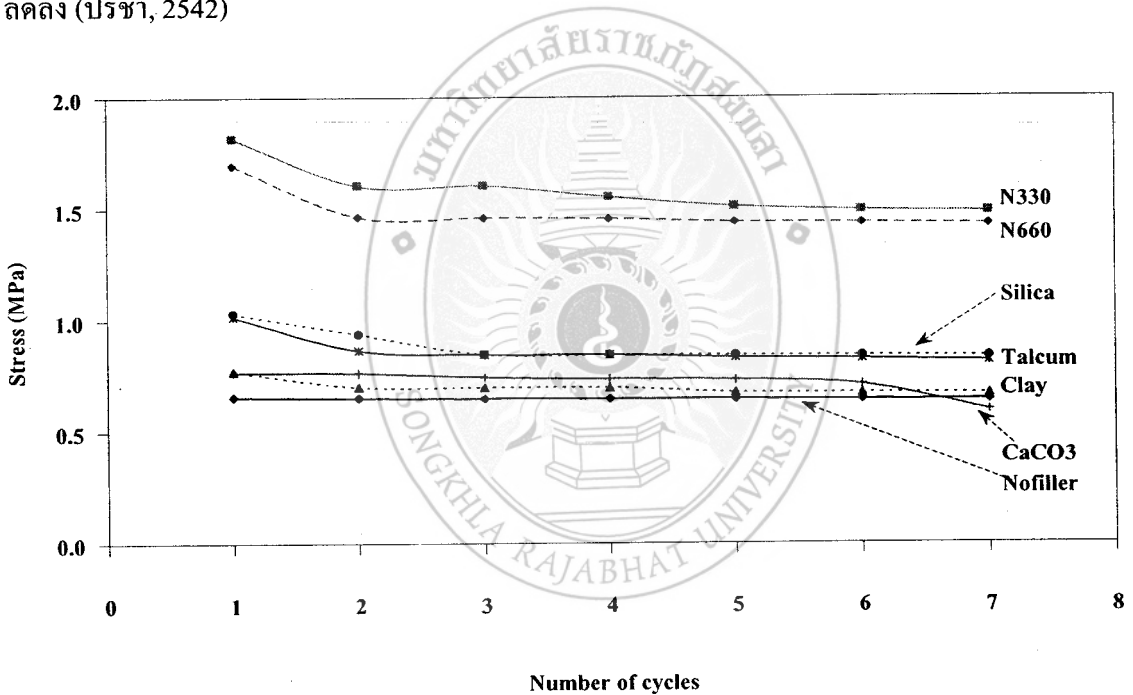
4.2.2 ยางเอสปีอาร์

ศึกษาชนิดสารตัวเติมต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ ใช้สารตัวเติม 5 ชนิด คือ เหม่าดำเกรด N 660 และ N 330, แคลเซียมคาร์บอเนต, ไชน่าเคลย์, ทัลคัมและซิลิกา ในปริมาณ 40 phr ซึ่งวัดเวลาในชั่งด้วยระบบกัมมันตภาพรังสี ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อวินาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปรอบแรกมีลักษณะดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสปีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

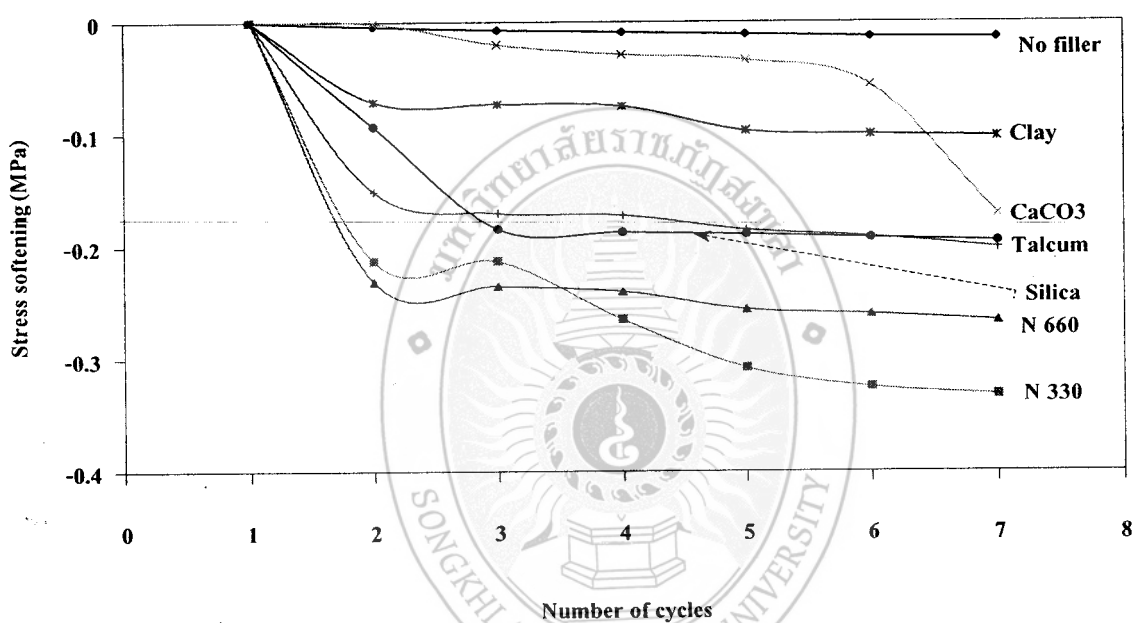
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก ลักษณะดังรูปที่ 4.8 พบว่ายางที่ใช้เขม่าคาร์บอน N 330 เป็นสารตัวเติม จะมีค่าความเค้นสูงที่สุด รองลงมาคือ เขม่าคาร์บอน N 660, ซิลิกา, ทัลคัม, แคลเซียมคาร์บอเนต, ไซนาเคลย์ และยางที่ไม่มีสารตัวเติม ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเขม่าคาร์บอน N 330 เป็นสารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพและมีขนาดอนุภาคเล็กมาก เมื่อผสมกับยางจึงสามารถกระจายเข้าในยางและเกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ดีกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ค่าความเค้นจึงสูง แต่ในสารตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพและมีขนาดอนุภาคใหญ่เมื่อผสมในยางการกระจายตัวกระจายสม่ำเสมอได้ยากในยาง เม็ดตัวเติมที่ไม่กระจายทำให้เกิดความเข้มข้นขึ้นเมื่อยางถูกดึง จึงทำให้ความแข็งแรงของยางลดลง ความเค้นจึงลดลง (ปรีชา, 2542)



รูปที่ 4.9 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr

เมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำๆ แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิดรูปแต่ละรอบแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ มีความอ่อนค่าความเค้นของยางลดลงเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างของตัวโครงข่ายโมเลกุล จากการย้ายที่ของจุดครอสลิงก์และจุดเกี่ยวพันจากตำแหน่งเดิม มีผลให้ใช้แรงน้อยลงในการดึงครั้งหลัง ความเค้นจึงลดลง (ปรีชา, 2542)

จะสังเกตได้ว่ายางที่ผสมสารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพ เช่น เชม่าดำ N 330, N 660 และ ซิลิกาจะมีความอ่อนค่าความเค้นที่ลดลงของในแต่ละรอบในการดึงมากกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต, ไชนาเคลย์, ทัลคัม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยางที่ผสมสารตัวเติมเชม่าดำ N 330, N 660 และซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็กเมื่อผสมกับยางทำให้ยางมีความแข็งแรงมากจะเกิดการผิดรูปมากความอ่อนค่าความเค้นของยางในแต่ละรอบการดึงจะลดลงมากกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมที่ไม่เสริมประสิทธิภาพทำให้มีความแข็งแรงน้อยแรงที่ใช้จึงน้อยส่งผลให้ความอ่อนค่าความเค้นของยางในแต่ละรอบการดึงลดลงน้อยกว่า



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสปีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr

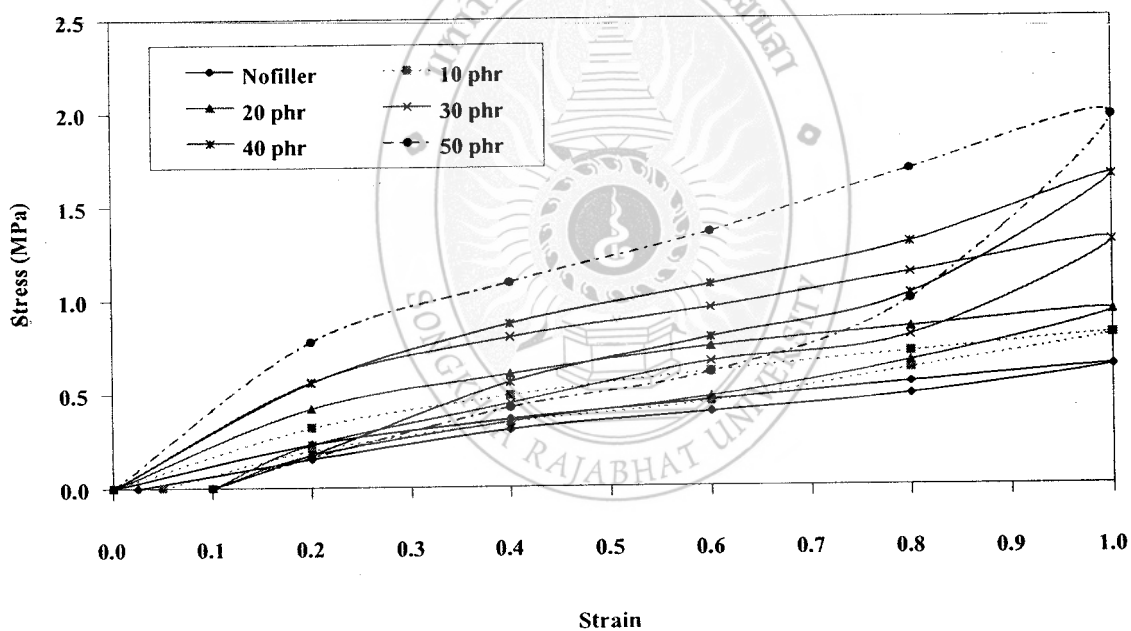
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสปีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ลักษณะดังรูปที่ 4.10 พบว่า เชม่าดำมีการลดลงของความเค้นมาก เนื่องจากเมื่อผสมเชม่าดำเข้าไปในยาง เชม่าดำจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของยางจะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงกับยาง ทำให้ยางแข็งแรงขึ้น (Banks and potter, 1997) เชม่าดำมีสมบัติเสริมประสิทธิภาพสูงจะมีการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมไม่เป็นระเบียบยิ่งเชม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็กยิ่งขึ้นการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมก็ยิ่งไม่เป็นระเบียบมากขึ้นลักษณะผิวจะมีผลต่อการเสริมประสิทธิภาพทำให้เมื่อมีแรงมากระทำซ้ำๆ การจัดเรียงตัว

ของคาร์บอนอะตอมก็ยังเป็นระเบียบการลดลงของความเค้นจึงลดลงมากกว่า สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไซนาเคลย์และทัลคัม (พรพรรณ ,2528)

4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์

4.3.1 ยางปียอร์

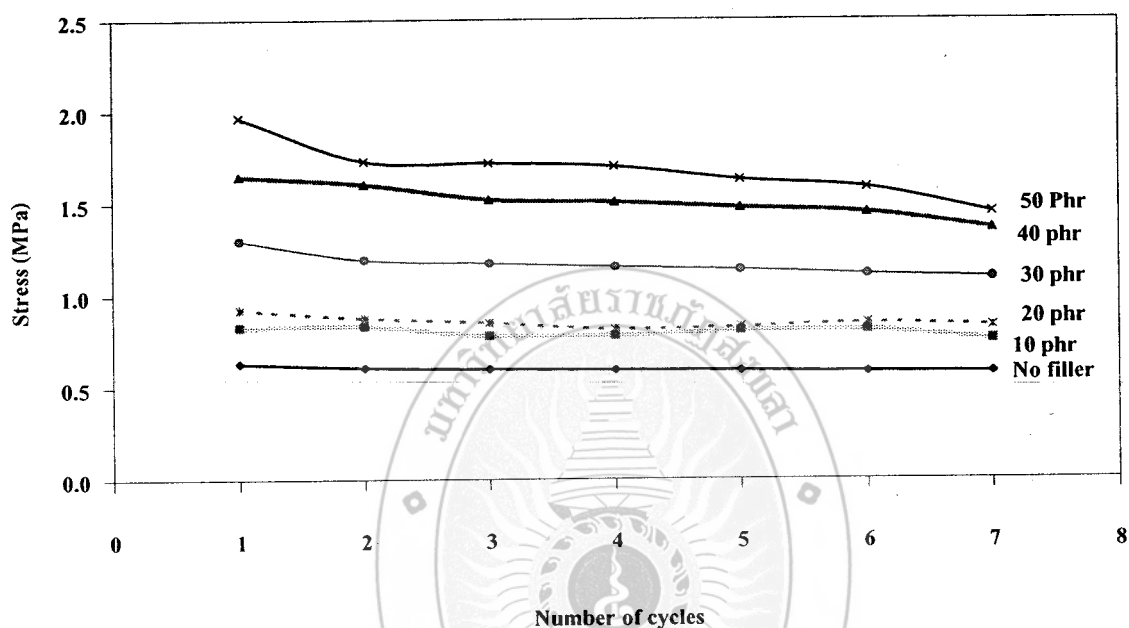
ศึกษาปริมาณเขม่าดำต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางปียอร์ แปรปริมาณเขม่าดำเกรด N 330 เป็น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ซึ่งวัดคาไนซ์ด้วยระบบกัมมันตภาพ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปรอบแรกมีลักษณะดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางปียอร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

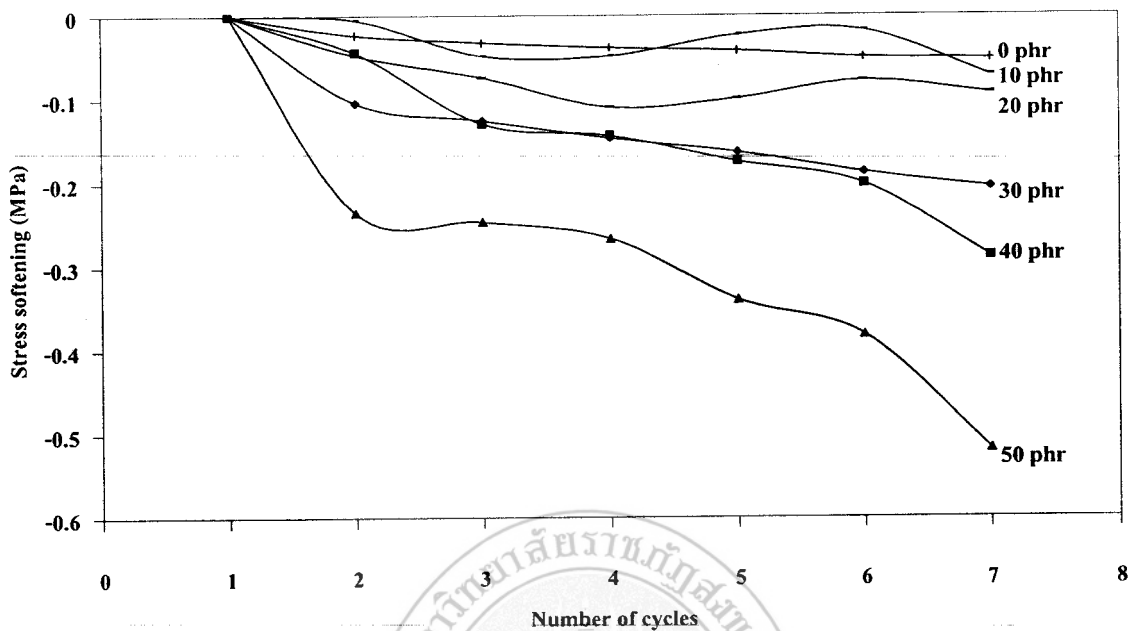
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางปียอร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรกลักษณะดังรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้น โดยยางที่มีเขม่าดำ 50 phr จะมีค่าความเค้นสูงที่สุด รองลงมาคือ ที่ปริมาณ 40, 30, 20, 10 และไม่มีสารตัวเติม ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้

เนื่องจากเมื่อยางที่ผสมสารตัวเติมถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปและปล่อยให้คืนกลับสู่รูปเดิม สารตัวเติมเป็นตัวดูดซับและเก็บสะสมพลังงานเอาไว้ ทำให้พลังงานที่ปล่อยออกมาสู่สภาพเดิมมีน้อย ยิ่งปริมาณสารตัวเติมมากก็ยิ่งเก็บสะสมพลังงานเอาไว้มาก ทำให้พลังงานที่ปล่อยออกมาสู่สภาพเดิมมีน้อย ลักษณะ Loop จึงกว้างขึ้น (Frederick R. Eirich, 1978)



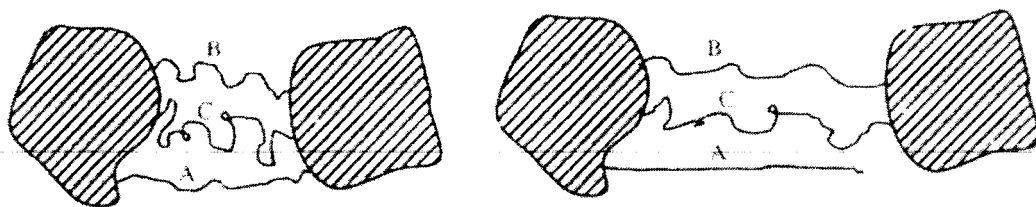
รูปที่ 4.12 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีดอร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

เมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำๆ แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิดรูปแต่ละรอบแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการดึง ความเค้นของยางทุก ๆ ปริมาณสารตัวเติมมีค่าลดลงจากนั้นจะคงที่ตามไปด้วย โดยค่าความเค้นของยางบีดอร์ที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณ 50 phr จะมีค่าความเค้นสูงกว่าในปริมาณ 40, 30, 20, 10 phr และไม่มีสารตัวเติมตามลำดับ เนื่องจาก ความอ่อนค่าความเค้นจะเกิดขึ้นในการผิดรูปครั้งแรกๆ ก็คือในรอบการผิดรูปครั้งที่ 1-3 จากนั้นยางจะเริ่มมีสภาพที่คงที่ในรอบการผิดรูปครั้งหลังๆ (M.Kluppel และ J.Schramm, 1998)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางปียอร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ

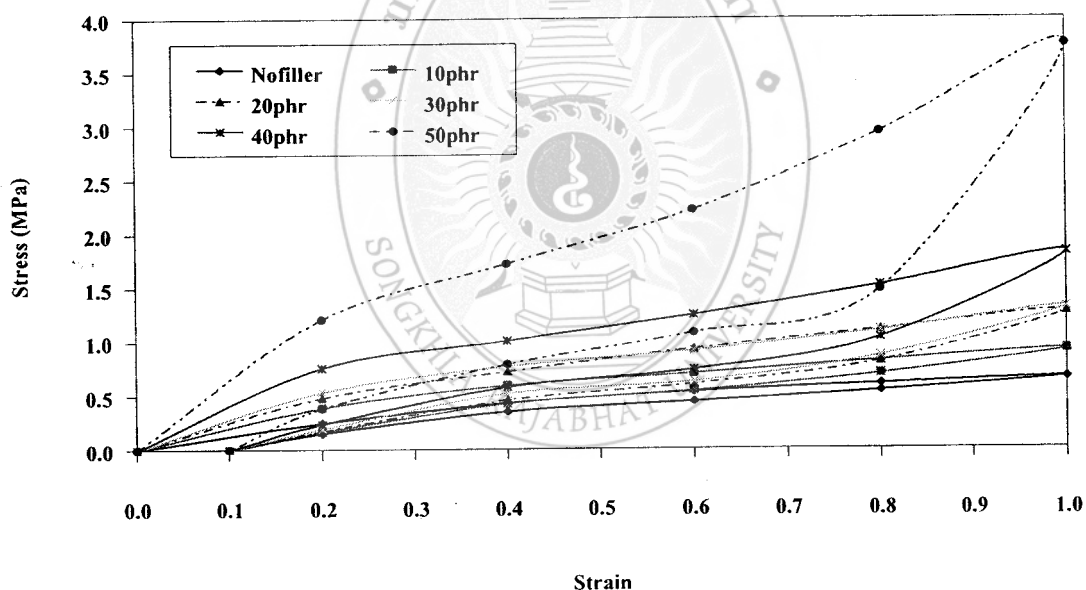
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางปียอร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ มีลักษณะดังรูป 4.13 ปริมาณสารตัวเติมที่ 50 phr จะมีการลดลงของความเค้น ดังเหตุได้ชัดว่ามีการลดลงมากกว่าที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณ 40, 30, 20, 10 phr ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการผสมเขม่าดำปริมาณมากจะมีคาร์บอนอะตอม ที่มีไฮโดรเจนมาเกาะจะช่วยให้เขม่าดำนั้นเสริมประสิทธิภาพมากขึ้นและเพิ่มการเกิดอนุมูลอิสระอยู่บนผิวของเขม่าดำซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะสร้างพันธะกับยางได้เมื่อโมเลกุลของยางแตกออกเป็นอนุมูลอิสระ (พรพรรณ, 2528) ยิ่งเพิ่มเขม่าดำทำให้ต้องใช้แรงมากในการฉีครูป เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น โครงสร้างของเขม่าดำจะเริ่มแตกหักทำให้ใช้แรงน้อยลง ดังรูปที่ 4.14 การลดลงของความเค้นของเขม่าดำที่ปริมาณมากจึงเห็นได้ชัดกว่าที่ปริมาณ 40, 30, 20, 10 phr และไม่ผสมสารตัวเติม



รูปที่ 4.14 ลักษณะการขาดของสายโซ่ (Marckmann *et. al.*, 2001)

4.3.2 ยางเอสปีอาร์

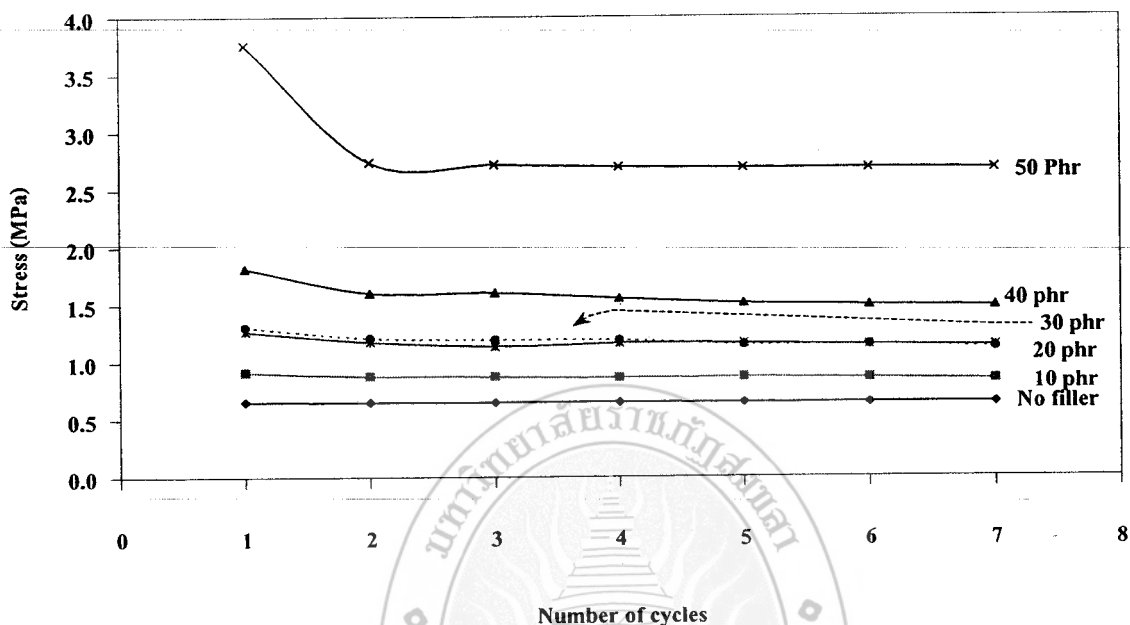
ศึกษาปริมาณเขม่าดำต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ แปรปริมาณเขม่าดำเกรด N 330 เป็น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ซึ่งวัดคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันปกติ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการฝึกรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการฝึกรูปรอบแรกมีลักษณะดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสปีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการฝึกรูปครั้งแรก

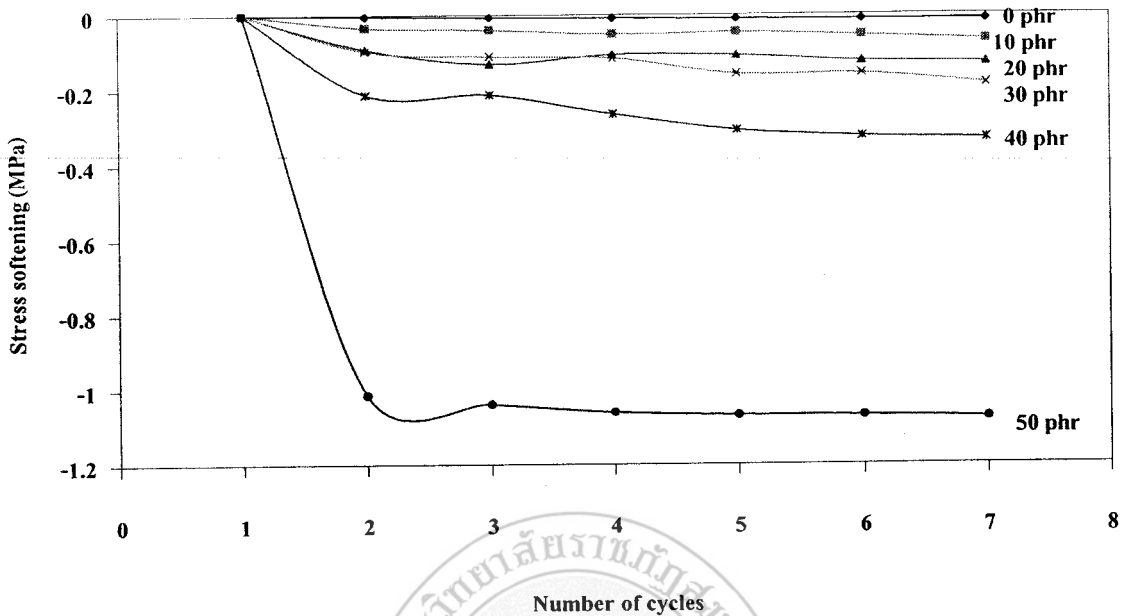
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสปีอาร์ที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการฝึกรูปครั้งแรกลักษณะดังรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้น โดยยางที่มีเขม่าดำ 50 phr จะมีค่าความเค้นสูงที่สุด รองลงมาคือ ที่ปริมาณ 40, 30, 20, 10 และ ไม่มีสารตัวเติม ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสาร

ตัวเติมในยาง ทำให้สมบัติความเป็นอีลาสติกของยางลดลง แรงที่ใช้จึงมากขึ้น ค่าความเค้นจึงสูงตามไปด้วย (<http://www.mse.cornell.edu>, 2547)



รูปที่ 4.16 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ

เมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำ ๆ แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิดรูปแต่ละรอบแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่า ค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ ลดลงตามจำนวนรอบในการดึงที่เพิ่มขึ้น โดยยางเอสปีอาร์ที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณ 50 phr มีค่าความเค้นสูงกว่าในปริมาณ 40, 30, 20, 10 phr และไม่มีสารตัวเติม ตามลำดับ เนื่องจาก เมื่อทำการผิดรูปซ้ำ ๆ โมเลกุลเกิดการเรียงตัวและสั่นไถล ทำให้สายโซ่ที่โค้งงอมีความเป็นระเบียบมากขึ้น แรงที่ใช้ก็น้อยลง ค่าความเค้นจึงลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นด้วย



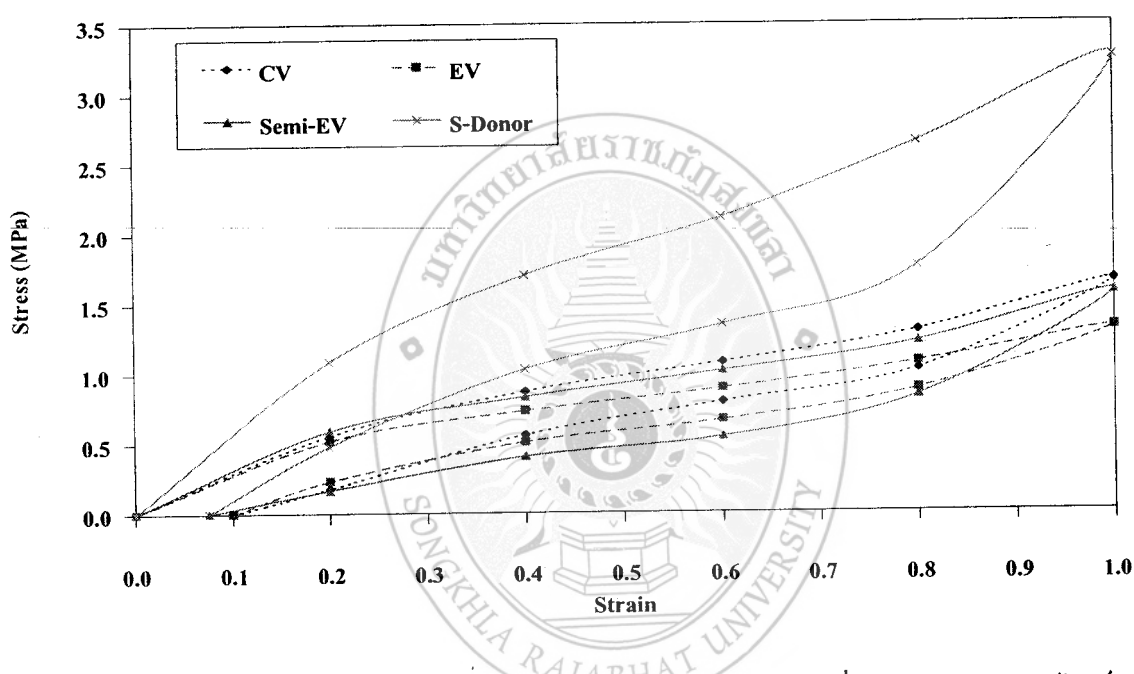
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ลักษณะดังรูปที่ 4.17 พบว่ายางที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณ 50 phr การลดลงของความเค้นจะลดลงมากกว่าที่ปริมาณ 40, 30, 20, 10 และไม่ผสมสารตัวเติม เมื่อใส่เข้ามาค่าปริมาณเพิ่มขึ้น จะเกิดการเชื่อมโยงพันธะระหว่างโมเลกุลทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งจากการออกแรงดึงครั้งแรกจะเริ่มเกิดการแตกขึ้น พอครั้งต่อมาการแตกจะเริ่มขยายตัวขึ้น การเกิดรอยแตกเริ่มแรกเนื่องจากการเปลี่ยนอย่างถาวรไม่อาจกลับไปสู่สภาพสมบูรณ์ ทำให้การลดลงของความเค้นจะลดมาก (แม้นและสมชัย, 2541) แต่เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นครั้งต่อไปแรงที่ใช้เริ่มน้อยลง การลดลงของความเค้นจึงเริ่มคงที่ ส่วนที่ปริมาณ 40, 30, 20, 10 และไม่ผสมสารตัวเติม นั้นการลดลงของความเค้นจะมีระดับลดลงน้อย

4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลคาไนซ์ที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์ที่มีเขม่าดำปริมาณ 40 phr

4.4.1 ยางบีดาร์

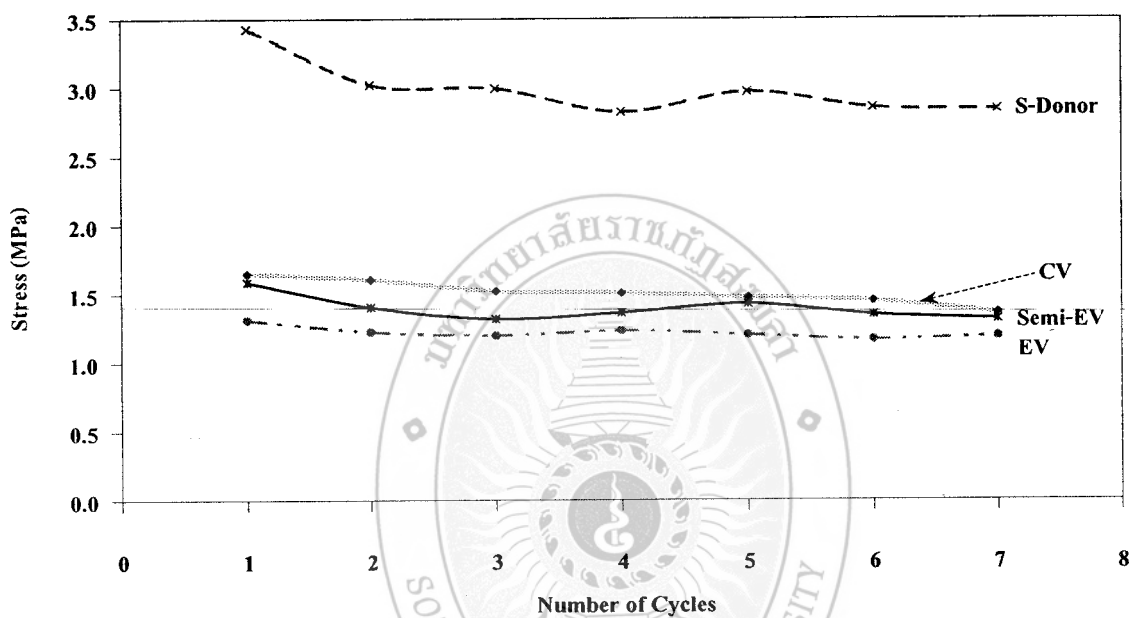
ศึกษาการวัลคาไนซ์ต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางบีดาร์ที่มีเขม่าดำปริมาณ 40 phr ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ 4 ระบบ คือ ระบบกำมะถันปกติ, ระบบอีวี, ระบบเซมิอีวี และระบบสารให้กำมะถัน ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปรอบแรกมีลักษณะดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีดาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

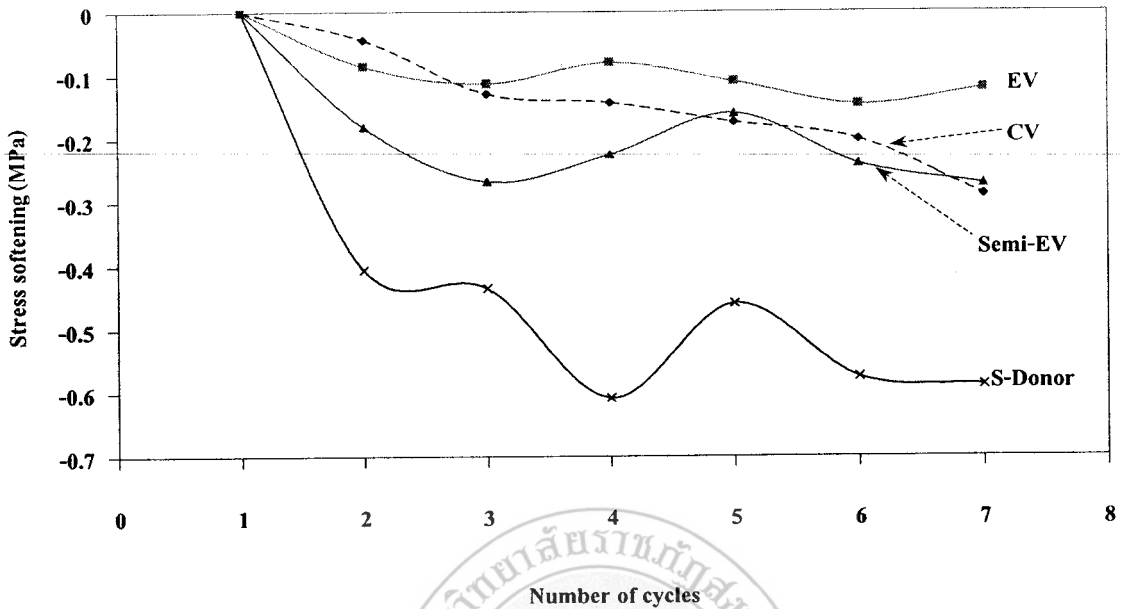
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีดาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรกลักษณะดังรูปที่ 4.18 พบว่าระบบสารให้กำมะถัน (S-Donor) ให้ค่าความเค้นสูงสุด รองลงมาคือ ระบบกำมะถันปกติ (CV) ระบบ Semi-EV และ ระบบ EV ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระบบสารให้กำมะถันเป็นระบบที่ได้กำมะถันออกมาซึ่งกำมะถันนี้มีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงพันธะระหว่างโมเลกุลมาก ทำให้ยางมีความแข็งแรงกว่าระบบการวัลคาไนซ์อื่นๆ จึงส่งผลให้ค่าความเค้นสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์อื่นๆ ด้วย (พรพรรณ, 2528) ระบบกำมะถันปกติจะเกิดการเชื่อมโยงแต่ละพันธะด้วยกำมะถันหลาย ๆ หรือที่เรียกว่าพันธะ Polysulphidic ซึ่งมีผลให้ได้ความแข็งแรงสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์แบบ EV ที่

พันธะเชื่อมโยงมีกำมะถันเพียงหนึ่งตัวในหนึ่งพันธะหรือที่เรียกว่าพันธะ Monosulphidic (พรพรรณ, 2540) ส่วนระบบ Semi-EV จะเป็นระบบที่อยู่กึ่งกลางระหว่างระบบกำมะถันปกติและระบบ EV ซึ่งระบบ Semi-EV จะให้พันธะเชื่อมโยงแบบ Polysulphidic และ Monosulphidic ในสัดส่วนที่เท่ากัน ระบบ Semi-EV จึงแข็งแรงกว่าระบบ EV แต่ไม่เท่าระบบกำมะถันปกติ (พรพรรณ, 2535)



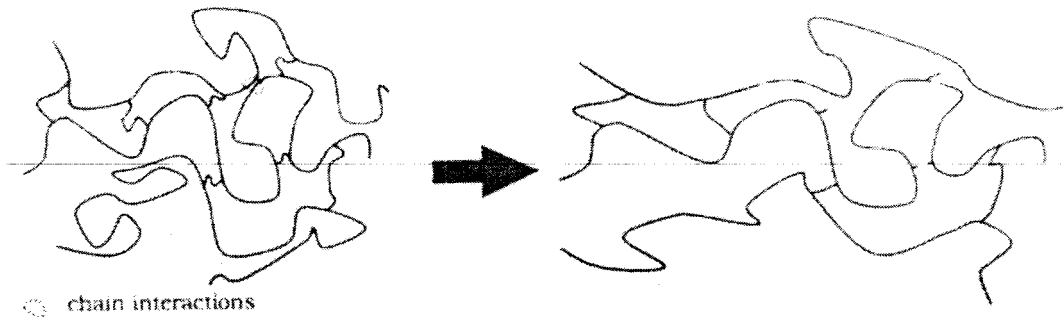
รูปที่ 4.19 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ

เมื่อพิจารณาความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆจากรูปที่ 4.19 พบว่าระบบสารให้กำมะถัน (S-Donor) ให้ค่าความเค้นสูงที่สุด รองลงมาคือระบบกำมะถันปกติ (CV) ระบบ Semi-EV และ ระบบ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระบบสารให้กำมะถันเป็นระบบที่ได้กำมะถันออกมาซึ่งกำมะถันนี้จะมีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงพันธะระหว่างโมเลกุลมาก ทำให้ยางมีความแข็งแรงกว่าระบบการวัลคาไนซ์อื่นๆ จึงส่งผลให้ค่าความเค้นสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์อื่นๆ ด้วย (พรพรรณ, 2528) และเมื่อถูกกระทำซ้ำๆ จำนวนรอบเพิ่มขึ้นความอ่อนค่าความเค้นของยางลดลงสังเกตได้ว่าระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้กำมะถันมากจะมีความอ่อนค่าความเค้นในแต่ละรอบลดลงมากกว่าระบบวัลคาไนซ์ที่มีปริมาณกำมะถันน้อยกว่า



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางปียอร์ที่ใช้ระบบวัตคาไนซ์ต่าง ๆ

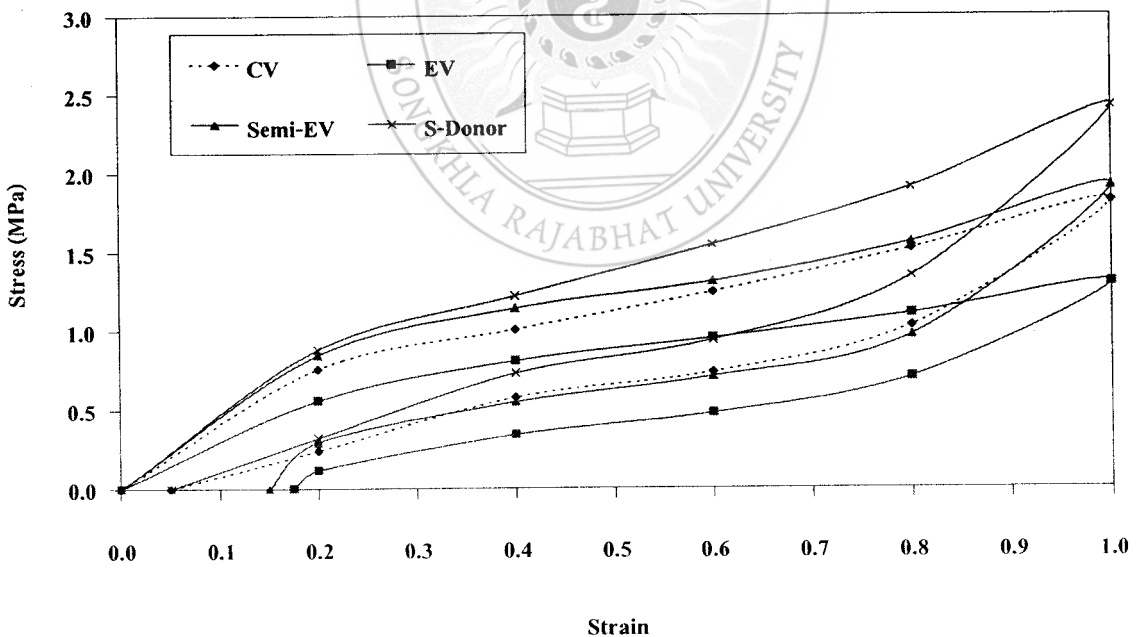
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางปียอร์ที่ใช้ระบบวัตคาไนซ์ต่าง ๆ ลักษณะดังรูปที่ 4.20 พบว่าระบบสารให้กำมะถันจะมีการลดลงของความเค้นมากที่สุด ซึ่งจะต่างกับระบบการวัตคาไนซ์ ระบบกำมะถันปกติ, ระบบอีวีและระบบเคมีอีวี ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระบบสารให้กำมะถันเป็นระบบที่มีพันธะเชื่อมโยงแบบ Monosulphidic เมื่อถูกกระทำสายโซ่โมเลกุลจะหลุดออกจากพันธะยาก ทำให้โมเลกุลเรียงตัวได้ยาก แต่ในระบบกำมะถันปกติเป็นระบบที่มีพันธะเชื่อมโยงแบบ Polysulphidic เมื่อถูกกระทำสายโซ่โมเลกุลจะหลุดออกจากกันง่ายและสามารถต่อเข้าหากันได้ง่าย ทำให้โมเลกุลเรียงตัวได้ดี การลดลงของความเค้นจึงลดลงไม่มาก ดังรูปที่ 4.21 (พรพรรณ, 2535)



รูปที่ 4.21 การหลุดออกของพันธะ (Marckmann *et. al.*, 2001)

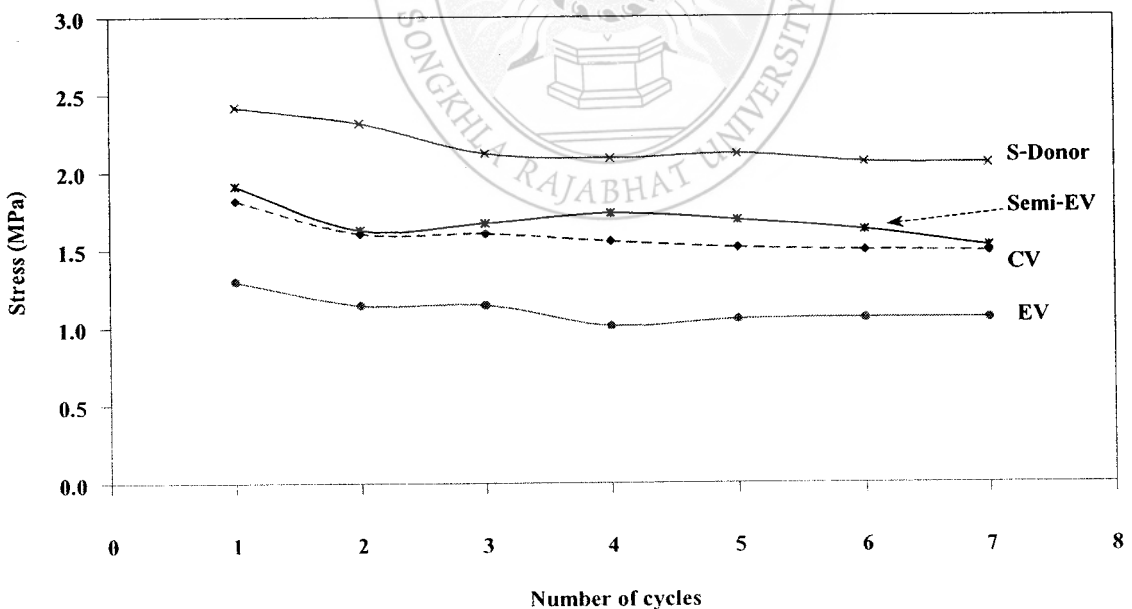
4.4.2 ยางเอสปีอาร์

ศึกษากระบวนการวัลคาไนซ์ต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่มีเขม่าดำปริมาณ 40 phr ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ 4 ระบบ คือ ระบบกำมะถันปกติ, ระบบอีวี, ระบบเซมิอีวี และระบบสารให้กำมะถัน ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปรอบแรกมีลักษณะดังรูปที่ 4.22



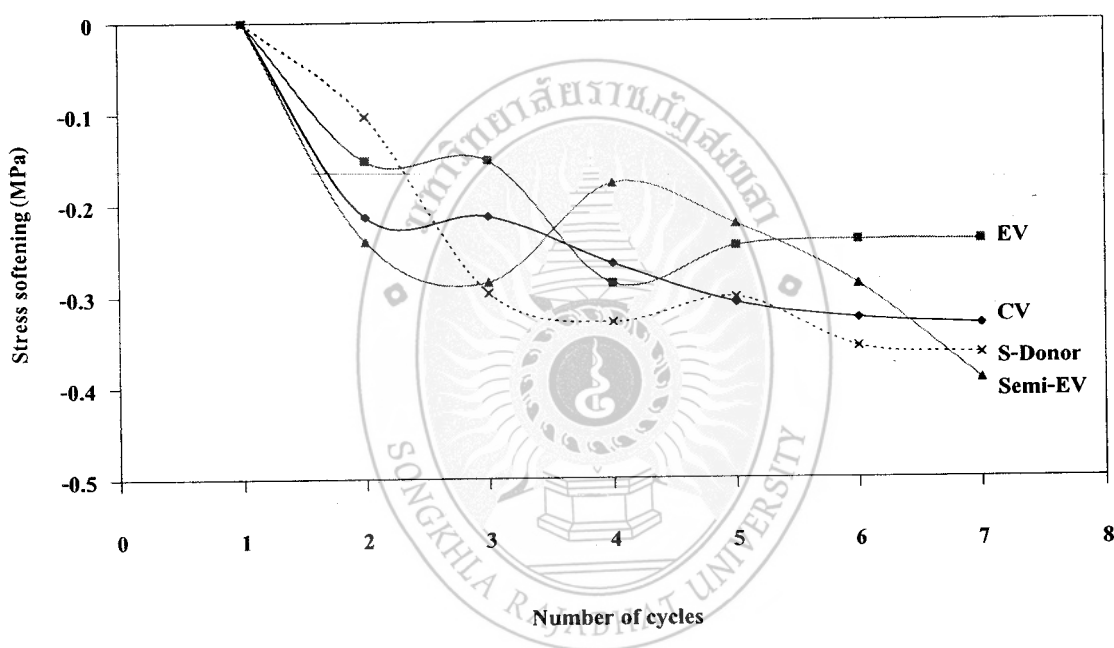
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างกันซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรกลักษณะดังรูปที่ 4.22 พบว่าระบบสารให้กำมะถัน (S-Donor) ให้ค่าความเค้นสูงสุด รองลงมาคือ ระบบ Semi-EV ระบบกำมะถันปกติ (CV) และระบบ EV ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระบบสารให้กำมะถันเป็นระบบที่ได้กำมะถันออกมา ซึ่งกำมะถันนี้จะมีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงพันธะระหว่างโมเลกุลมาก โดยระบบนี้จะเชื่อมโยงพันธะด้วยกำมะถัน ทำให้ยางมีความแข็งแรงกว่าระบบการวัลคาไนซ์อื่นๆ จึงส่งผลให้ค่าความเค้นสูงกว่าระบบการวัลคาไนซ์อื่นๆ ด้วย (พรพรรณ, 2528) พันธะที่ยาวจะเอื้อต่อการเรียงตัวของโมเลกุลยาง ทำให้ยางมีความแข็งแรงสูง (พรพรรณ, 2535) ระบบกำมะถันปกติจะทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบPolysulphidic แต่ในระบบ EV จะทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบ Monosulphidic (พรพรรณ, 2528) ซึ่งพันธะเชื่อมโยง Polysulphidic เป็นพันธะที่ยาวกว่าพันธะเชื่อมโยงแบบ Monosulphidic ดังนั้นในระบบกำมะถันปกติจึงแข็งแรงกว่าระบบ EV ซึ่งเมื่อสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของระบบการวัลคาไนซ์ที่ให้ค่าความเค้นสูงเมื่อปล่อยแรงการกลับคืนรูปร่างเดิมจะเกิดได้น้อย เพราะว่าจะเกิดพลังงานสะสมในเนื้อยางไว้มาก ลักษณะ Loop จะกว้าง ในแต่ระบบการวัลคาไนซ์จึงมีลักษณะความกว้าง Loop ไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.23 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างๆ

เมื่อพิจารณาความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบการวัดคาไนซ์ต่างกัน จากรูปที่ 4.23 พบว่าระบบสารให้กำมะถัน (S-Donor) ให้ค่าความเค้นสูงสุด รองลงมาคือ ระบบ Semi -EV, ระบบกำมะถันปกติ (CV) และระบบ EV ตามลำดับ และเมื่อยางถูกกระทำซ้ำ ๆ ที่จำนวนรอบเพิ่มขึ้นความอ่อนค่าความเค้นของยางจะลดลงตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระบบสารให้กำมะถันเป็นระบบที่ได้กำมะถันออกมาซึ่งกำมะถันนี้จะมีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงพันธะระหว่างโมเลกุลมาก ทำให้ยางมีความแข็งแรงกว่าระบบการวัดคาไนซ์อื่นๆ จึงส่งผลให้ค่าความเค้นสูง (พรพรรณ, 2528)



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบการวัดคาไนซ์ต่างๆ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของของยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบการวัดคาไนซ์ต่างๆ ลักษณะดังรูปที่ 4.24 พบว่าระบบสารให้กำมะถันจะมีลักษณะการลดลงของความเค้นมากกว่าระบบการวัดคาไนซ์อื่นๆ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระบบสารให้กำมะถันมีพลังงานพันธะเท่ากับ 68 กิโลแคลอรีต่อโมล ระบบกำมะถันปกติมีพลังงานพันธะน้อยกว่า 64 กิโลแคลอรีต่อโมล (วารกรณ์, 2541) จะเห็นว่าระบบสารให้กำมะถันมีพลังงานพันธะมากกว่าระบบ

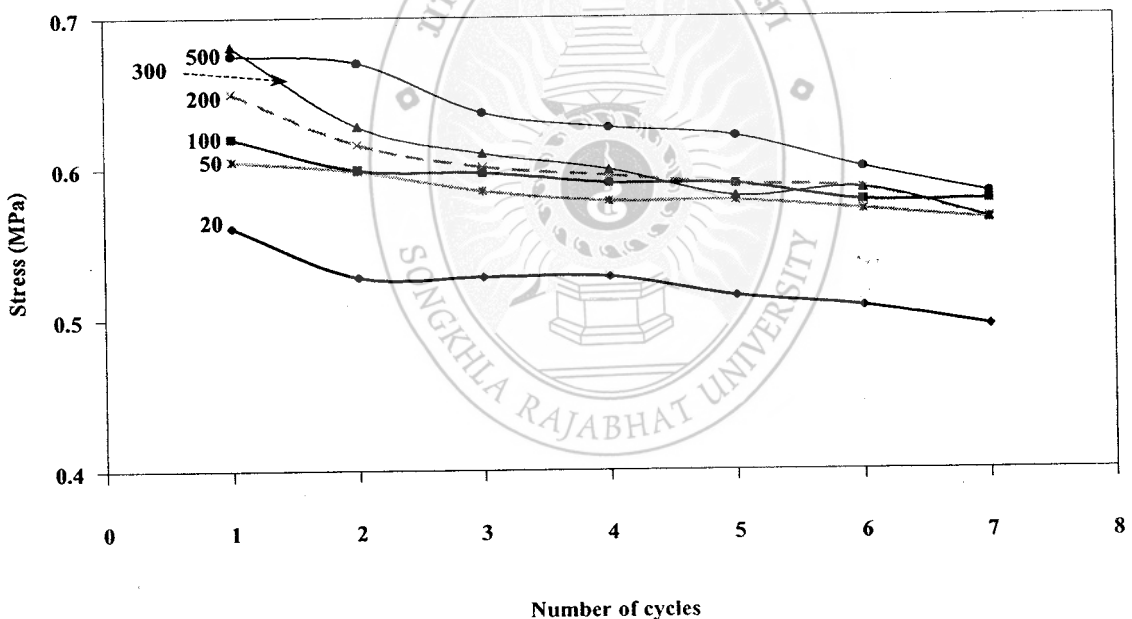
กำมะถันปกติ ซึ่งระบบที่มีพลังงานมากกว่าพันธะจะหลุดออกยากกว่า ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเรียงตัวของโมเลกุล การลดลงของความเค้นจึงลดลงมาก

4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วในการผิครูปที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์

4.5.1 ยางไม่มีสารตัวเติม

4.5.1.1 ยางบีดาร์

ศึกษาอัตราเร็วในการผิครูปต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางบีดาร์ที่ไม่มีสารตัวเติม ซึ่งวัดคาบไชน์ด้วยระบบกำมะถันปกติ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิครูปที่ 20, 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิครูปมีลักษณะดังรูป 4.25



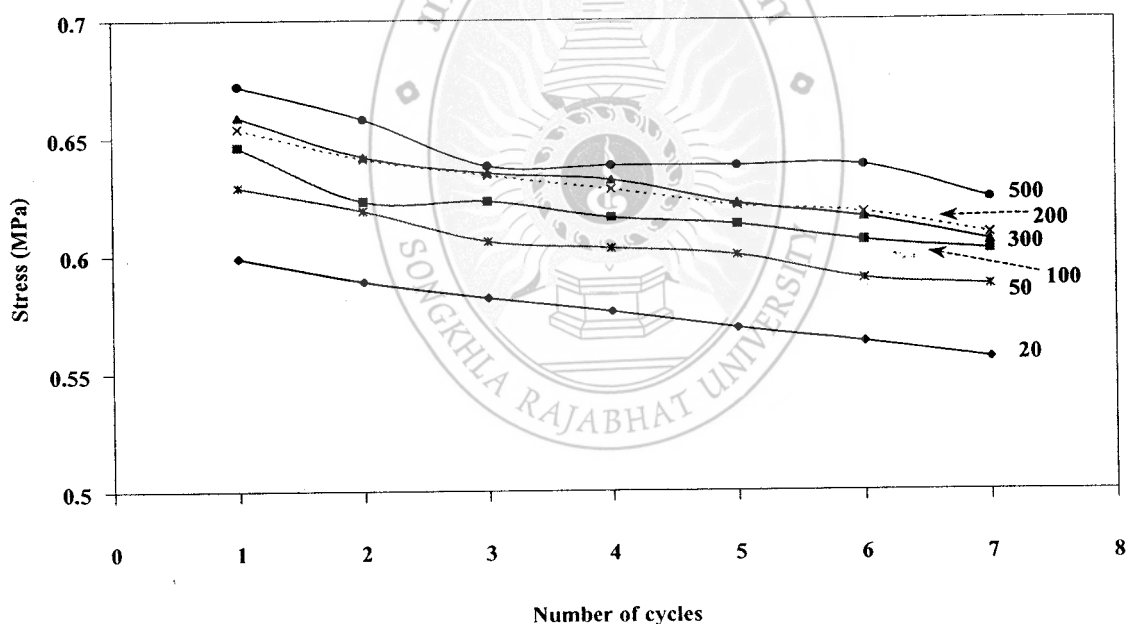
รูปที่ 4.25 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีดาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิครูปต่างๆ

เมื่อพิจารณาความอ่อนค่าความเค้นของยางบีดาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิครูปต่างกันจากรูปที่ 4.25 พบว่า เมื่อนำยางมาดึงที่อัตราเร็วสูง ความอ่อนค่าความเค้นจะสูงกว่าดึงที่อัตราเร็วต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก การดึงยางที่อัตราเร็วสูง ยางจะแข็งตึงมากขึ้นตามอัตราเร็วของการดึงที่เพิ่มขึ้นแรงที่ใช้จึงเพิ่มขึ้น ทำให้ความอ่อนค่าความเค้นของยางเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

(www.eng.su.ac.th, 2547) เมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำๆ แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิดรูปแต่ละรอบ สังเกตได้ว่ายางทุกอัตราเร็วนั้นจะเป็นไปแนวเดียวกันคือความอ่อนค่าความเค้นของยางทั้ง 5 อัตราเร็วในการผิดรูปลดลง เมื่อจำนวนรอบการดึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการดึงยางครั้งแรกยางยังไม่เคยถูกกระทำมาก่อน เมื่อยืดออกโมเลกุลยางยังจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อดึงครั้งหลัง ๆ ยางมีการจัดเรียงตัว แรงที่ใช้จึงน้อยลง ค่าความเค้นจึงลดลงด้วย

4.5.1.2 ยางเอสปีอาร์

ศึกษาอัตราเร็วในการผิดรูปต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ ซึ่งวัดคาบในชั่วด้วยระบบกัมมะถันปกติ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูปที่ 20, 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปมีลักษณะดังรูป 4.26



รูปที่ 4.26 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างกัน

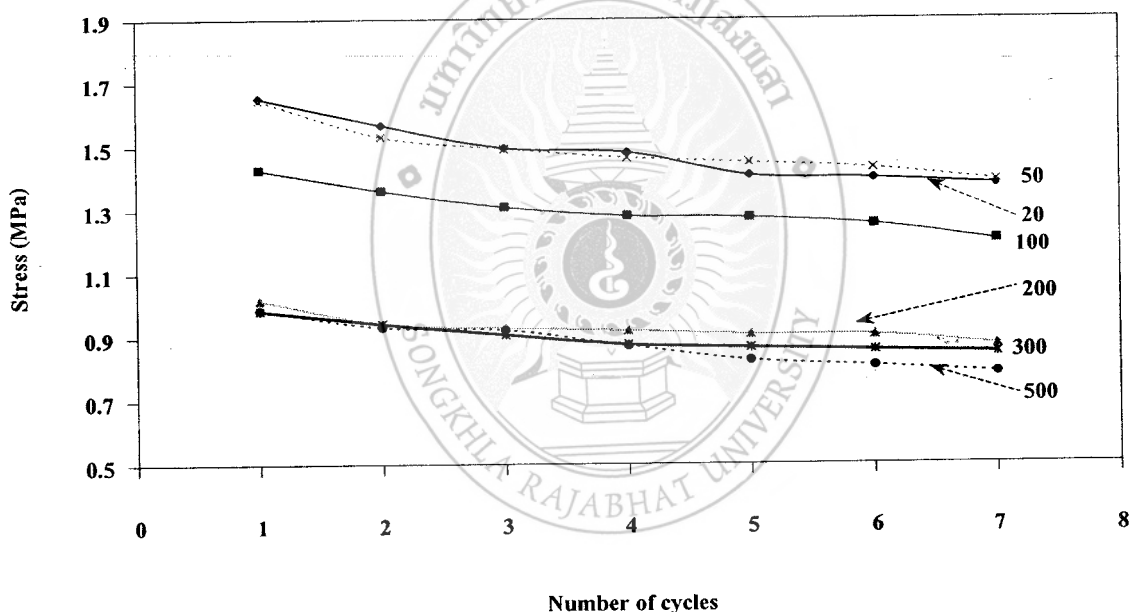
เมื่อพิจารณาความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ไม่มีสารตัวเติม โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างกันจากรูปที่ 4.26 พบว่า เมื่อนำยางมาดึงที่อัตราเร็วสูง ความอ่อนค่าความเค้นจะสูงกว่าดึงที่อัตราเร็วต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการดึงยางที่อัตราเร็วสูง ยางจะแข็งตึงมากขึ้นตามอัตราเร็วของการดึงที่เพิ่มขึ้น แรงที่ใช้จึงเพิ่มขึ้น ทำให้ความอ่อนค่าความเค้นของยางเพิ่มขึ้นตามไป

ด้วย (www.eng.su.ac.th, 2547) เมื่อกระทำให้เกิดการผิครูปซ้ำๆ แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะยัด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิครูปแต่ละรอบ สังเกตได้ว่าภายในทุกๆ อัตราเร็วนั้นจะแนวโน้มเดียวกันคือเมื่อจำนวนรอบการดึงเพิ่มขึ้น ความอ่อนค่าความเค้นของยางทั้ง 5 อัตราเร็วในการผิครูปลดลง

4.5.2 ยางผสมสารตัวเติม

4.5.2.1 ยางบิโอาร์

ศึกษาอัตราเร็วในการผิครูปต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ที่ผสมเขม่าดำปริมาณ 40 phr ซึ่งวัดค่าในชั่วโมงด้วยระบบกัมมะถันปกติ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิครูปที่ 20, 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิครูปมีลักษณะดังรูปที่ 4.27

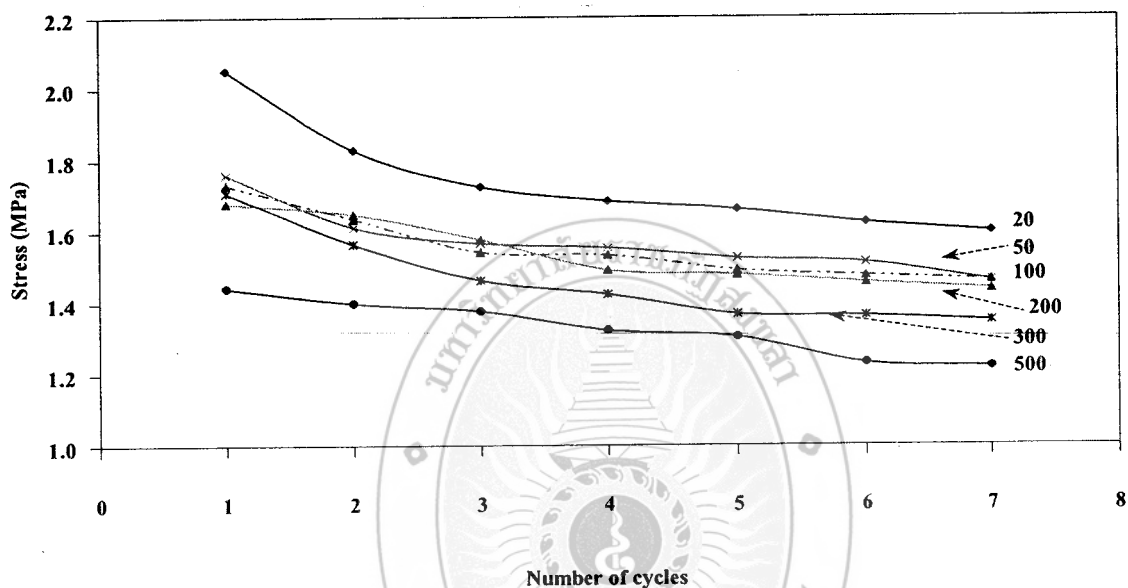


รูปที่ 4.27 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิครูปต่างกัน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.27 พบว่าเมื่อนำยางมาดึงที่อัตราเร็วต่ำ ความอ่อนค่าความเค้นจะสูงกว่าดึงที่อัตราเร็วสูง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อยางถูกกระทำด้วยอัตราการผิครูปต่างกัน การตอบสนองของโมเลกุลก็ต่างกันด้วย โดยการดึงยางที่อัตราเร็วต่ำ โมเลกุลยางค่อยๆ เกิดการจัดเรียงตัว ยางจึงแข็งแรงขึ้น แรงที่ใช้จึงเพิ่มขึ้น ความเค้นของยางเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อกระทำให้เกิดการผิครูปซ้ำๆ แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะยัด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิครูปแต่ละรอบ พบว่า ค่าความเค้นของยางลดลงตามจำนวนรอบในการดึงที่เพิ่มขึ้น

4.5.2.2 ยางเอสปีอาร์

ศึกษาอัตราเร็วในการผิดรูปต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ผสม เหมำค่าปริมาณ 40 phr ซึ่งวัดคาไนซ์ด้วยระบบกัมมะถันปกติ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูปที่ 20, 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปมีลักษณะดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างกัน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.28 พบว่าเมื่อนำยางมาดึงที่อัตราเร็วต่ำ ความอ่อนค่าความเค้นจะสูงกว่าดึงที่อัตราเร็วสูง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อยางถูกกระทำด้วยอัตราการผิดรูปต่างกัน การตอบสนองของโมเลกุลก็ต่างกันด้วย ที่อัตราการผิดรูปสูง โมเลกุลไม่สามารถจัดตัวได้ทัน ยางจึงมีสมบัติคล้ายของแข็ง คือเมื่อยางเกิดการผิดรูปโมเลกุลของยางจะแตกหักง่าย แรงที่ใช้ดึงจึงน้อย และเมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำ แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิดรูปแต่ละรอบ พบว่าความอ่อนค่าความเค้นลดลงตามจำนวนรอบในการดึงที่เพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลจะเกิดการลื่นไถลและการเปลี่ยนโครงข่ายจุดเชื่อม โยงพันธะและจุดเกี่ยวพันระหว่างโมเลกุล

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ในบางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมจะมีความอ่อนค่าความเค้นสูงกว่ายางเอสปีอาร์และยางปีอาร์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติม
2. สารตัวเติมแต่ละชนิดมีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นต่างกัน ทั้งยางเอสปีอาร์และยางปีอาร์ สารตัวเติมที่มีอนุภาคเล็กจะทำให้ความเค้นในยางสูงกว่าสารตัวเติมที่มีอนุภาคใหญ่กว่า
3. เมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นค่าความเค้นก็เพิ่มขึ้นเช่นกันทั้งในยางเอสปีอาร์และยางปีอาร์
4. ระบบการวัลคาไนซ์มีผลต่อค่าความเค้นต่างกัน ในยางเอสปีอาร์และยางปีอาร์ถ้าปริมาณการเชื่อมโยงสูงทำให้มีค่าความเค้นสูง ซึ่งระบบการวัลคาไนซ์แบบสารให้กำมะถันจะมีค่าความเค้นสูงของยางทั้ง 2 ชนิด
5. อัตราเร็วที่ใช้ในการทดสอบมีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์ ทั้งที่ผสมสารตัวเติมและไม่ผสมสารตัวเติม ในยางที่ผสมสารตัวเติม เมื่ออัตราเร็วต่ำค่าความเค้นสูง ในยางที่ไม่มีสารตัวเติม อัตราเร็วสูงค่าความเค้นเพิ่มขึ้น
6. เมื่อยางถูกกระทำซ้ำ ๆ ทำให้ความอ่อนค่าความเค้นของยางลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ชนิดและปริมาณสารตัวเติม ระบบการวัลคาไนซ์ อัตราเร็วในการฉีดรูป

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาความอ่อนค่าความเค้นในยางสังเคราะห์ชนิดอื่น เช่นยางไนไตรล์ ยางอีพียีเอ็ม ยางคลอโรพรีน
2. ศึกษาความอ่อนค่าความเค้นในยางเบตนด์ เช่นยางไนไตรล์กับยางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์กับยางธรรมชาติ
3. ศึกษาผลของปริมาณของน้ำมันต่อความอ่อนค่าความเค้นของยาง



บรรณานุกรม

- บุญธรรม นิธิอุทัย. 2530. **ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์และคุณสมบัติ**. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.
- บุญธรรม นิธิอุทัยและ ปรีชา ป็องภัย. 2534. **ปฏิบัติการเทคโนโลยียาง 2**. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.
- ปรีชา ป็องภัย. 2541. “การใช้ยางทางวิศวกรรม” **ยางและพอลิเมอร์** 2, 1 (มกราคม - มีนาคม 2541) หน้า 1 – 15.
- ปรีชา ป็องภัย. 2542. “Physical Properties and Their Meaning” **ยางและพอลิเมอร์** 3, 4 (ตุลาคม-ธันวาคม 2542) หน้า 13 –23.
- ปรีชา ป็องภัย. 2542. “Physical Properties and Their Meaning” **ยางและพอลิเมอร์** 4, 1 (มกราคม-เมษายน 2543) หน้า 5- 10.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. มปป. **ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์**. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2528. **สารเคมีสำหรับยาง**. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2540. **เทคนิคการออกสูตรยาง**. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.
- พรพรรณ นิธิอุทัย. 2535. **เอกสารประกอบการอบรมเทคโนโลยียางระยะสั้นเรื่อง เทคนิคการออกสูตรยาง**. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.
- แม่น้ำ อมรสิทธิ์และ สมชัย อัครวิทยา. 2541. **วัสดุวิศวกรรม**. สำนักพิมพ์แมคกรอ-ฮิล. กรุงเทพฯ
- วารภรณ์ ขจรไชยกูล. 2541. **การออกสูตรยางและกระบวนการผลิต**. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ
- ASTM D 412-80. **Standard Test Methods for Rubber Properties in Tension**, Annual Book of ASTM Standard. Part. 37. 57-65.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- ASTM D 2084-81. **Standard Test Methods for Rubber Property Vulcanization Characteristics Using Oscillating Disk Cure Meter**, Annual Book of ASTM Standard. Part. 37. 529-557.
- ASTM D 3182-74. **Standard Recommended Practice for Rubber – Materials Equipment and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized sheets**, Annual Book of ASTM Standard. Part. 37. 688-693.
- ASTM D 3184-80. **Standard Methods for Rubber – Evaluation of NR (Natural Rubber)**, Annual Book of ASTM Standard. Part. 37. 697-699.
- ASTM D 3186-81. **Standard Methods for Rubber – Evaluation of SBR Mixed with Carbon Black or Carbon Black and Oil**, Annual Book of ASTM Standard. Part. 37. 704-706.
- ASTM D 3189-73. **Standard Methods for Rubber – Evaluation of Solution BR (Polybutadiene Rubber)**, Annual Book of ASTM Standard. Part. 37. 713-717.
- Bank, H.T. and Potter, K Laura. 1997. **Stress-Strain Laws for Carbon black and Silica filled Elastomers**. Center of Research in Scientific Computation North Carolina State University.
- Bergstrom, J.S. and Boyce, M.C. 1998. **Constitutive modeling of the large strain time-dependent behavior of elastomer**. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Blow, C.M., 1978. **Rubber Technology and Manufacture**, Butterworths, London.
- Eirich, Frederick.R., 1978. **Science and Technology of Rubber**, Academic Press, Florida.
- Kluppel, M. and Schramm, J. 2001. **A Molecular-statistical Approach to Hyperelasticity of Elastomer Materials**. Deutsches Institute für Kautschuktechnologie e.v.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- Marckmann, G., Verron, E., Gomet, L., Chagnon, G., Charrier, P. and Fort, F. 2001. "A theory of network alteration for the Mullins effect" **Journal of the mechanics and physics of solids**, 50 (October, 2001): 2011-2028.
- Wang, Meng.Jiao., 1998. "Effect of polymer-filler and filler-filler interaction on dynamic properties of filled vulcanizates" **Rubber Chemistry and Technology**, 71, 3 (July-August 1998): 535-568.
- www.christian81.free-online.co.uk (21 กุมภาพันธ์ 2547)
- www.eng.chula.ac.th (18 กุมภาพันธ์ 2547)
- www.eng.su.ac.th (21 กุมภาพันธ์ 2547)
- www.mse.cornell.edu (23 มิถุนายน 2547)
- www.sinrubtech.com.my (21 กุมภาพันธ์ 2547)



ภาคผนวก



ภาคผนวก

คำนวณ

แรงเค้น (Stress) $= F/A$

เมื่อ $F =$ แรงที่ใช้ดึง (นิวตัน)

$A =$ พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)

เช่น แรงที่ใช้ดึง = 29.61 นิวตัน พื้นที่หน้าตัด = 20.28 ตารางมิลลิเมตร

$$\text{Stress} = 29.61/20.28 = 1.460 \text{ นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร}$$

ความเครียด (Strain) $= (L-L_0)/L_0$

เมื่อ $L =$ ระยะที่ยืดยาง (มิลลิเมตร)

$L_0 =$ ระยะก่อนยืดยาง (มิลลิเมตร)

เช่น ระยะก่อนยืดยาง = 20 มิลลิเมตร ระยะที่ยืดยาง = 40 มิลลิเมตร

$$\text{Strain} = (40-20)/20 = 1$$



ตารางที่ 1 ความเค้นกับความเครียดของยางที่ไม่มีสารตัวเติมซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

ความเครียด (Strain)	ความเค้น (Stress, MPa)		
	ยางธรรมชาติ	ยางเอสปีอาร์	ยางบีอาร์
0	0	0	0
0.2	0.55	0.25	0.231
0.4	0.90	0.43	0.362
0.6	1.09	0.53	0.457
0.8	1.40	0.601	0.549
1.0	1.79	0.657	0.633
0.8	1.36	0.537	0.486
0.6	1.04	0.439	0.395
0.4	0.83	0.352	0.307
0.2	0.52	0.153	0.153
0.1	0	0	
0.25			0

ตารางที่ 2 ความอ่อนค่าความเค้นของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมโดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ชนิดของยาง	จำนวนรอบการค้ำ (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
ยางธรรมชาติ	1.790	1.720	1.570	1.440	1.380	1.300	1.260
ยางเอสปีอาร์	0.657	0.653	0.650	0.648	0.646	0.644	0.643
ยางบีอาร์	0.633	0.610	0.601	0.595	0.591	0.583	0.581

ตารางที่ 3 การลดลงของความเค้นในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ชนิดของยาง	จำนวนรอบการดึง (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
ยางธรรมชาติ	0	-0.070	-0.220	-0.350	-0.410	-0.490	-0.530
ยางเอสบีอาร์	0	-0.004	0.007	-0.009	-0.011	-0.013	-0.014
ยางบีอาร์	0	-0.023	-0.032	-0.038	-0.042	-0.050	0.052

ตารางที่ 4 แสดงค่าความเค้นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมต่างกันปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

ความเครียด (Strain)	ความเค้น (Stress, MPa) ในสารตัวเติม					
	เขม่าดำ เกรด N330	เขม่าดำ เกรด N660	แคลเซียม คาร์บอเนต	โซนาเคลย์	ทัลคัม	ซิลิกา
0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.588	0.494	0.316	0.263	0.283	0.960
0.4	0.871	0.848	0.508	0.457	0.453	1.173
0.6	1.076	1.069	0.620	0.591	0.579	1.364
0.8	1.298	1.250	0.725	0.692	0.656	1.583
1.0	1.651	1.440	0.824	0.772	0.739	1.810
0.8	1.022	0.822	0.622	0.583	0.440	0.766
0.6	0.793	0.548	0.387	0.463	0.337	0.501
0.4	0.559	0.333	0.372	0.335	0.221	0.343
0.2	0.178	0.140	0.185	0.136	0.088	0.168
0.1	0	0		0	0	0
0.05			0			

ตารางที่ 5 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมต่างชนิด
ที่ปริมาณ 40 phr โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ชนิดของสารตัวเติม	จำนวนรอบการดึง (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
ไม่มีสารตัวเติม	0.633	0.610	0.601	0.595	0.591	0.583	0.581
เขม่าดำเกรด N330	1.651	1.607	1.522	1.508	1.477	1.450	1.363
เขม่าดำเกรด N660	1.440	1.206	1.172	1.149	1.115	1.100	1.072
แคลเซียมคาร์บอเนต	0.824	0.755	0.764	0.779	0.769	0.766	0.750
ไชนาเคลย์	0.772	0.723	0.710	0.714	0.700	0.712	0.700
ทัลคัม	0.739	0.625	0.608	0.592	0.575	0.571	0.552
ซิลิกา	1.810	1.570	1.468	1.400	1.347	1.304	1.337

ตารางที่ 6 การลดลงของความเค้นของยางบิโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมต่างชนิด
ที่ปริมาณ 40 phr โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ชนิดของสารตัวเติม	จำนวนรอบการดึง (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
ไม่มีสารตัวเติม	0	-0.023	-0.032	-0.038	-0.042	-0.05	-0.052
เขม่าดำเกรด N330	0	-0.044	-0.129	-0.143	-0.174	-0.201	-0.288
เขม่าดำเกรด N660	0	-0.234	-0.268	-0.291	-0.325	-0.34	-0.368
แคลเซียมคาร์บอเนต	0	-0.069	-0.06	-0.025	-0.055	-0.058	-0.074
ไชนาเคลย์	0	-0.049	-0.062	-0.058	-0.072	-0.06	-0.072
ทัลคัม	0	-0.114	-0.131	-0.147	-0.164	-0.168	-0.187
ซิลิกา	0	-0.24	-0.342	-0.41	-0.463	-0.506	-0.473

ตารางที่ 7 แสดงค่าความเค้นกับความเครียดของยางบิโอาร์ที่ผสมเขม่าดำเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างกันซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิครูปครั้งแรก

ความเครียด (Strain)	ความเค้น (Stress, MPa) ที่ปริมาณสารตัวเติม					
	0	10	20	30	40	50
0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.231	0.319	0.422	0.563	0.558	0.778
0.4	0.362	0.488	0.602	0.799	0.871	1.092
0.6	0.457	0.610	0.744	0.952	1.076	1.357
0.8	0.549	0.711	0.844	1.135	1.298	1.689
1.0	0.633	0.800	0.926	1.301	1.651	1.968
0.8	0.486	0.623	0.662	0.799	1.022	0.994
0.6	0.395	0.449	0.477	0.663	0.793	0.606
0.4	0.307	0.345	0.349	0.447	0.559	0.424
0.2	0.153	0.198	0.175	0.229	0.178	0.162
0.1			0	0	0	0
0.05		0				
0.025	0					

ตารางที่ 8 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างกัน โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่ออนาที

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	จำนวนรอบการดึง (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0.633	0.610	0.601	0.595	0.591	0.583	0.581
10	0.829	0.834	0.781	0.781	0.806	0.811	0.757
20	0.926	0.879	0.852	0.817	0.827	0.848	0.833
30	1.301	1.197	1.176	1.155	1.138	1.114	1.096
40	1.651	1.607	1.522	1.508	1.477	1.450	1.363
50	1.968	1.733	1.722	1.702	1.629	1.587	1.450

ตารางที่ 9 การลดลงของความเค้นของยางบิโอาร์ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างกัน โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	จำนวนรอบการดึง (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0	-0.023	-0.032	-0.038	-0.042	-0.05	-0.052
10	0	-0.005	-0.048	-0.048	-0.023	-0.018	-0.072
20	0	-0.047	-0.074	-0.109	-0.099	-0.078	-0.093
30	0	-0.104	-0.125	-0.146	-0.163	-0.187	-0.205
40	0	-0.044	-0.129	-0.143	-0.147	-0.201	-0.288
50	0	-0.235	-0.246	-0.266	-0.339	-0.381	-0.518

ตารางที่ 10 แสดงค่าความเค้นกับความเครียดของยางบิโอาร์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์ต่างกัน ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิครูปครั้งแรก

ความเครียด (Strain)	ความเค้น (Stress, MPa) ที่ระบบการวัลคาไนซ์			
	กำมะถันปกติ	อีวี	เซมิอีวี	สารให้กำมะถัน
0	0	0	0	0
0.2	0.558	0.522	0.592	1.087
0.4	0.871	0.732	0.832	1.702
0.6	1.076	0.888	1.015	2.113
0.8	1.298	1.072	1.218	2.648
1.0	1.651	1.314	1.568	3.249
0.8	1.022	0.880	0.833	1.760
0.6	0.793	0.661	0.541	1.346
0.4	0.559	0.508	0.405	1.032
0.2	0.178	0.232	0.167	0.482
0.1	0	0		
0.075			0	0

ตารางที่ 11 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างกันผสมเขม่าดำที่ ปริมาณ 40 phr โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ระบบการวัลคาไนซ์	จำนวนรอบการดึง (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
ระบบกำมะถันปกติ	1.651	1.607	1.522	1.508	1.477	1.450	1.363
ระบบอีวี	1.314	1.228	1.201	1.234	1.204	1.168	1.193
ระบบเคมีอีวี	1.568	1.407	1.321	1.364	1.428	1.349	1.317
ระบบสารให้กำมะถัน	3.429	3.023	2.994	2.821	2.970	2.854	2.841

ตารางที่ 12 การลดลงของความเค้นของยางบิโอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างกันผสมเขม่าดำที่ ปริมาณ 40 phr โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ระบบการวัลคาไนซ์	จำนวนรอบการดึง (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
ระบบกำมะถันปกติ	0	-0.044	-0.129	-0.143	-0.174	-0.201	-0.288
ระบบอีวี	0	-0.086	-0.113	-0.08	-0.11	-0.146	-0.121
ระบบเคมีอีวี	0	-0.181	-0.267	-0.224	-0.16	-0.239	-0.271
ระบบสารให้กำมะถัน	0	-0.406	-0.435	-0.608	-0.459	-0.575	-0.588

ตารางที่ 13 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโอาร์ไม่ผสมสารตัวเติมที่อัตราเร็วในการดึงต่างกัน

อัตราเร็วในการดึง (มิลลิเมตร/นาที)	จำนวนรอบการดึง (รอบ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20	0.561	0.528	0.528	0.528	0.515	0.508	0.495	0.489
50	0.605	0.598	0.585	0.578	0.578	0.572	0.565	0.558
100	0.62	0.599	0.597	0.590	0.589	0.578	0.578	0.575
200	0.65	0.616	0.601	0.595	0.589	0.586	0.566	0.557
300	0.681	0.628	0.61	0.599	0.581	0.586	0.566	0.557
500	0.675	0.67	0.637	0.627	0.621	0.600	0.583	0.558

ตารางที่ 14 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบิโออาร์ผสมเขม่าดำ 40 phr ที่อัตราเร็วในการดึงต่างกัน

อัตราเร็วในการดึง (มิลลิเมตร/นาที)	จำนวนรอบการดึง (รอบ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20	1.653	1.567	1.494	1.48	1.408	1.398	1.379	1.345
50	1.646	1.531	1.492	1.463	1.448	1.429	1.39	1.371
100	1.427	1.361	1.309	1.281	1.275	1.253	1.203	1.157
200	1.017	0.949	1.929	0.920	0.908	0.905	0.874	0.829
300	0.984	0.942	0.907	0.876	0.866	0.857	0.848	0.842
500	0.966	0.931	0.922	0.872	0.826	0.807	0.785	0.776

ตารางที่ 15 แสดงค่าความเค้นกับความเครียดของยางเอสบิโออาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมต่างชนิดกันปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

ความเครียด (Strain)	ความเค้น (Stress, MPa) ในสารตัวเติม					
	เขม่าดำ เกรด N330	เขม่าดำ เกรด N660	แคลเซียม คาร์บอเนต	โซนาเคลย์	ทัลคัม	ซิลิกา
0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.757	0.620	0.465	0.379	0.547	0.709
0.4	1.006	0.971	0.628	0.541	0.747	0.847
0.6	1.241	1.165	0.727	0.652	0.848	0.904
0.8	1.516	1.429	0.817	0.727	0.947	0.970
1.0	1.818	1.696	0.879	0.773	1.017	1.032
0.8	1.028	1.032	0.603	0.589	0.708	0.576
0.6	0.735	0.779	0.469	0.456	0.508	0.403
0.4	0.577	0.644	0.381	0.338	0.400	0.305
0.2	0.239	0.311	0.163	0.142	0.205	0.101
0.1			0	0	0	0
0.05	0	0				

ตารางที่ 16 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมต่าง
ชนิดที่ปริมาณ 40 phr โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ชนิดของสารตัวเติม	จำนวนรอบการดึง (รอบ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ไม่มีสารตัวเติม	0.657	0.653	0.65	0.648	0.646	0.644	0.643	0.628
เขม่าดำเกรด N330	1.818	1.605	1.605	1.553	1.510	1.493	1.486	1.476
เขม่าดำเกรด N660	1.696	1.465	1.461	1.456	1.440	1.436	1.420	1.422
แคลเซียมคาร์บอเนต	0.766	0.765	0.746	0.737	0.732	0.710	0.595	0.503
โซนาเคลย์	0.773	0.702	0.700	0.698	0.676	0.673	0.671	0.657
ทัลคัม	1.017	0.866	0.847	0.845	0.832	0.826	0.816	0.810
ซิลิกา	1.032	0.939	0.848	0.845	0.843	0.840	0.837	0.819

ตารางที่ 17 การลดลงของความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมต่าง
ชนิดที่ปริมาณ 40 phr โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ชนิดของสารตัวเติม	จำนวนรอบการดึง (รอบ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ไม่มีสารตัวเติม	0.657	0.653	0.65	0.648	0.646	0.644	0.643	0.628
เขม่าดำเกรด N330	1.818	1.605	1.605	1.553	1.510	1.493	1.486	1.476
เขม่าดำเกรด N660	1.696	1.465	1.461	1.456	1.440	1.436	1.420	1.422
แคลเซียมคาร์บอเนต	0.766	0.765	0.746	0.737	0.732	0.710	0.595	0.503
โซนาเคลย์	0.773	0.702	0.700	0.698	0.676	0.673	0.671	0.657
ทัลคัม	1.017	0.866	0.847	0.845	0.832	0.826	0.816	0.810
ซิลิกา	1.032	0.939	0.848	0.845	0.843	0.840	0.837	0.819

ตารางที่ 18 แสดงค่าความเค้นกับความเครียดของยางเอสปีอาร์ที่ผสมเขม่าดำเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างกันซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

ความเครียด (Strain)	ความเค้น (Stress, MPa) ที่ปริมาณสารตัวเติม					
	0	10	20	30	40	50
0	0	0	0	0	0	0
0.2	0.25	0.388	0.481	0.534	0.757	1.207
0.4	0.43	0.593	0.721	0.770	1.006	1.722
0.6	0.53	0.698	0.927	0.909	1.241	2.219
0.8	0.601	0.818	1.103	1.094	1.516	2.944
1.0	0.657	0.914	1.269	1.307	1.818	3.756
0.8	0.537	0.693	0.810	0.861	1.028	1.479
0.6	0.439	0.539	0.601	0.625	0.735	1.075
0.4	0.352	0.423	0.459	0.519	0.577	0.790
0.2	0.153	0.167	0.175	0.195	0.239	0.385
0.1	0	0	0	0	0	0

ตารางที่ 19 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างกัน โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	จำนวนรอบการดึง (รอบ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.657	0.653	0.65	0.648	0.646	0.644	0.643	0.628
10	0.914	0.880	0.874	0.862	0.867	0.858	0.845	0.858
20	1.269	1.178	1.138	1.163	1.161	1.145	1.140	1.204
30	1.307	1.211	1.196	1.191	1.149	1.149	1.122	1.116
40	1.818	1.605	1.605	1.553	1.510	1.493	1.486	1.476
50	3.756	2.741	2.717	2.695	2.687	2.686	2.680	2.637

ตารางที่ 20 การลดลงของความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างกัน โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ปริมาณเขม่าดำ (phr)	จำนวนรอบการดึง (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0	-0.004	-0.007	-0.009	-0.011	-0.013	-0.014
10	0	-0.034	-0.04	-0.052	-0.047	-0.056	-0.069
20	0	-0.091	-0.131	-0.106	-0.108	-0.124	-0.129
30	0	-0.096	-0.111	-0.116	-0.158	-0.158	-0.185
40	0	-0.213	-0.213	-0.265	-0.308	-0.325	-0.332
50	0	-1.015	-1.039	-1.061	-1.069	-1.07	-1.076

ตารางที่ 21 แสดงค่าความเค้นกับความเครียดของยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบวัลคาไนซ์ต่างกัน ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

ความเครียด (Strain)	ความเค้น (Stress, MPa) ที่ระบบการวัลคาไนซ์			
	กำมะถันปกติ	อีวี	เซมิอีวี	สารให้กำมะถัน
0	0	0	0	0
0.2	0.757	0.559	0.846	0.880
0.4	1.006	0.808	1.141	1.218
0.6	1.241	0.950	1.309	1.542
0.8	1.516	1.104	1.559	1.905
1.0	1.818	1.297	1.912	2.418
0.8	1.028	0.703	0.968	1.342
0.6	0.735	0.475	0.708	0.937
0.4	0.577	0.340	0.548	0.729
0.2	0.239	0.117	0.294	0.320
0.175		0		
0.15			0	
0.05	0			0

ตารางที่ 22 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างกันผสมเขม่าดำที่ ปริมาณ 40 phr โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ระบบการวัลคาไนซ์	จำนวนรอบการดึง (รอบ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ระบบกำมะถันปกติ	1.818	1.605	1.605	1.553	1.510	1.493	1.486	1.476
ระบบอีวี	1.297	1.145	1.145	1.010	1.051	1.057	1.057	1.036
ระบบเซมิอีวี	1.912	1.627	1.672	1.735	1.769	1.624	1.520	1.619
ระบบสารให้กำมะถัน	2.418	2.315	2.121	2.089	2.116	2.062	2.054	1.995

ตารางที่ 23 การลดลงของความเค้นของยางเอสปีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลคาไนซ์ต่างกันผสมเขม่าดำที่ ปริมาณ 40 phr โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ระบบการวัลคาไนซ์	จำนวนรอบการดึง (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
ระบบกำมะถันปกติ	0	-0.213	-0.213	-0.265	-0.308	-0.325	-0.332
ระบบอีวี	0	-0.152	-0.152	-0.287	-0.246	-0.24	-0.24
ระบบเซมิอีวี	0	-0.24	-0.285	-0.177	-0.222	-0.288	-0.392
ระบบสารให้กำมะถัน	0	-0.103	-0.297	-0.329	-0.302	-0.356	-0.364

ตารางที่ 24 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสปีอาร์ไม่ผสมสารตัวเติมที่อัตราเร็วในการดึงต่างกัน

อัตราเร็วในการดึง (มิลลิเมตร/นาที)	จำนวนรอบการดึง (รอบ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20	0.629	0.619	0.606	0.603	0.6	0.59	0.587	0.58
50	0.599	0.589	0.582	0.576	0.569	0.563	0.556	0.549
100	0.646	0.623	0.623	0.616	0.613	0.606	0.602	0.586
200	0.654	0.641	0.634	0.628	0.621	0.618	0.609	0.605
300	0.672	0.658	0.638	0.638	0.638	0.638	0.624	0.624
500	0.659	0.642	0.635	0.632	0.622	0.616	0.606	0.599

ตารางที่ 25 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์ผสมเขม่าดำ 40 phr ที่อัตราเร็วในการดึงต่างกัน

อัตราเร็วในการดึง (มิลลิเมตร/นาที)	จำนวนรอบการดึง (รอบ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20	1.442	1.4	1.378	1.324	1.305	1.232	1.22	1.185
50	1.761	1.613	1.568	1.555	1.526	1.513	1.426	1.41
100	1.732	1.636	1.543	1.534	1.492	1.476	1.463	1.447
200	2.052	1.83	1.727	1.686	1.663	1.625	1.6	1.536
300	1.68	1.649	1.578	1.492	1.479	1.457	1.438	1.428
500	1.71	1.566	1.464	1.425	1.369	1.364	1.349	1.326

