

ด้วยอภิเนกานนาการจก

๓ เล่ม

วันที่ ๗๔ ๗. ๘. ๒๕๕๑



## รายงานการวิจัย

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความอ่อนค่าความเหน็บของยางสังเคราะห์วัสดุในชั้น

**Factors Influencing Stress Softening of Synthetic Rubber Vulcanizates**



รายงานวิจัยฉบับนี้ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนพัฒนาการวิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

พ.ศ. ๒๕๔๗

ชื่อวิทยานิพนธ์ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความอ่อนค่าความเด็นของยางสังเคราะห์วัลคาไนซ์

ผู้เขียน ปราณี หวังอูฐ

อั้งสถาน ชาตรี

โปรแกรมวิชา เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

คณะกรรมการสอบ

ดร. ดร. ดร.

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ วัชรินทร์ ถายน้ำใส)

ดร. ดร. ดร.

กรรมการ

(ดร. พิพัฒน์ ลิมปนาดีพิทยาคร) ดร. พิพัฒน์ ลิมปนาดีพิทยาคร)

ดร. ดร. ดร.

กรรมการ

(ดร. พลพัฒน์ รวมเจริญ)

ดร. ดร. ดร.

กรรมการ

(อาจารย์ จรัญ พุ่มนก)



คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อนุมัติให้นับโครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาตรี โปรแกรมวิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์

ดร. ดร. ดร.

(อาจารย์ ศุรน อ่องคง)

คณบดี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

(2)

150544

๓๕๗ ๒๕๖๑

๖๗๘.๙  
ป.๑๗

ชื่อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์วัสดุในชีวี	
ผู้เขียน	ปราณี หรือชู	
	อังสนา จารง	
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
โปรแกรมวิชา	เทคโนโลยียางและพอลิเมอร์	
ปีการศึกษา	2546	
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์วชรินทร์ สายนำ้ใส	

### บทคัดย่อ

ในการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความอ่อนค่าความเค้นในยางสังเคราะห์วัสดุในชีวี ใช้ยางสังเคราะห์ 2 ชนิด ได้แก่ ยางสไตรีนบิวตาไดอีนหรือยางเอสบีอาร์และยางบิวตาไดอีนหรือยางบีอาร์ โดยศึกษาอิทธิพลของชนิดของยางทั้งที่ไม่มีสารตัวเติมและมีสารตัวเติม ชนิดและปริมาณสารตัวเติม ระบบการวัดค่าในชีวี อัตราเร็วในการผิดรูป

จากการศึกษาระงับนี้พบว่า เมื่อเปรียบเทียบยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ ยางธรรมชาติจะให้ค่าความเค้นสูงกว่ายางสังเคราะห์ แต่เมื่อเปรียบเทียบยางสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด ยางเอสบีอาร์จะให้ค่าความเค้นสูงกว่ายางบีอาร์เล็กน้อย ความอ่อนค่าความเค้นในยางสังเคราะห์ที่มีสารตัวเติมนี้ค่าสูงกว่ายางที่ไม่มีสารตัวเติม ชนิดและปริมาณสารตัวเติมมีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ในยางเอสบีอาร์ เมม่าดำเนอร์ N 330 ให้ค่าความเค้นสูงสุด ในยางบีอาร์ ซิลิค้าให้ค่าความเค้นสูงสุด ความอ่อนค่าความเค้นลดลงเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ระบบสารให้กำมะถันมีค่าความเค้นของยางสูงกว่าระบบกำมะถันปกติ ระบบเซนเซอร์และระบบอิวี อัตราเร็วในการผิดรูปมีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ในยางสังเคราะห์ที่ไม่มีสารตัวเติม ความอ่อนค่าความเค้นลดลงเมื่ออัตราเร็วในการผิดรูปต่ำลง ในยางสังเคราะห์ที่มีสารตัวเติม ความอ่อนค่าความเค้นลดลงเมื่ออัตราเร็วในการผิดรูปเพิ่มขึ้น

<b>Title</b>	Factors Influencing Stress Softening of Synthetic Rubber Vulcanizates
<b>Author</b>	Miss Pranee Hruechoo
	Miss Angsana Jarong
<b>Program</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Rubber and Polymer Technology
<b>Academic year</b>	2003
<b>Advisors</b>	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

งานวิจัยเล่นน้ำสำเร็จลงได้ด้วยดีโดยได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนพัฒนาการวิจัยของมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาปี พ.ศ. 2546 ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องค่าใช้สอยต่างๆ ตลอดการทำวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ วัชรินทร์ สายนำ่aise ที่กรุณายืนอาจารย์ที่ปรึกษาโครงสร้างวิจัยและเคยชี้แนะแนวทางการวิจัย จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ไวย ไอกานันดี ด้วย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่โปรแกรมวิชาเทคโนโลยีบังคับและพอดิเมอร์ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกด้านข้าราชการสถานที่ทดลองงานวิจัย

และสุดท้ายขอขอบคุณ คุณพ่อ-คุณแม่ และครอบครัว ตลอดจนเพื่อนๆ น้องๆ โปรแกรมวิชาเทคโนโลยีบังคับและพอดิเมอร์ทุกคนที่เคยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือตลอดงานวิจัยครั้งนี้

ปราณี หรือชู

อังสนา ชาวงศ์

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 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
2. ทฤษฎี	
2.1 ความเด่น.....	3
2.2 ความเครียด	
2.2.1 การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป.....	4
2.2.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบทรงรูป.....	4
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเด่นกับความเครียด .....	5
2.4 ความคืบ.....	5
2.5 ความแกร่ง.....	5
2.6 ความยึดหยุ่น.....	6
2.7 คุณสมบัติค้านการดึง ความเด่น-ความเครียด.....	7
2.8 ความอ่อนค่าความเด่น.....	8

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 ยางเอสบีอาร์.....	9
2.9.1 สมบัติและการแปรรูปของยางเอสบีอาร์.....	10
2.9.2 สมบัติของยางวัลคานайнซ์.....	10
2.10 ยางบีอาร์.....	10
2.10.1 ระบบการออกสูตร.....	11
2.10.2 สมบัติข้อดีของยางบีอาร์.....	11
2.10.3 การใช้งาน.....	11
2.11 สารตัวเดิน.....	12
2.11.1 เขม่าคำ.....	13
2.11.1.1 สมบัติของเขม่าคำ.....	13
2.11.1.2 ผลของเขม่าคำต่อยางที่ไม่วัลคานайнซ์.....	15
2.11.1.3 อิทธิพลของเขม่าคำต่อสมบัติของยางวัลคานайнซ์.....	15
2.11.2 คัลเซียมคาร์บอนेट.....	15
2.11.3 ซิลิกา.....	16
2.11.4 ไชน่าเคลย์.....	17
2.11.4.1 ไชน่าเคลย์ชนิดละเอيد.....	18
2.11.4.2 ไชน่าเคลย์ชนิดทราย.....	18
2.11.4.3 ไชน่าเคลย์ให้ความร้อน.....	18
2.11.4.4 ไชน่าเคลย์เคลือบสารเคมี.....	18
2.11.5 แป้งทัลคัม.....	18
2.12 สารที่ทำให้เกิดการวัลคานайнซ์.....	19
2.13 สารตัวเร่ง.....	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14 สารกระดุ้น.....	20
2.14.1 สารกระดุ้นพวกอินทรี.....	20
2.14.2 สารกระดุ้นพวกอินทรี.....	20
3. วิธีการวิจัย	
3.1 วัสดุ.....	21
3.1.1 ยานชลธรรมชาติเครื่องເອສທິອາຮ໌ ຮແດລ.....	21
3.1.2 ยานสໍາຕ්‍රේන්බවතාໄດ້ອື່ນເກຣດ 1502.....	21
3.1.3 ยานບවතාໄດ້ອື່ນເກຣດ 0150.....	21
3.1.4 ກຽດສະເຕීຍරිກ.....	21
3.1.5 ຜົງຄ້ອກໄໝຕ්.....	21
3.1.6 ເັ່ນ-ໄຟໂຄລເຂກຊີລ-2-ບັນໂຫຼາຍເຈົ້າຊີລຊັ້ນຝຶນາໄມ໌.....	21
3.1.7 ເຕෙරາມເທິລ ໄຊຍຸແຮນ ໄດ້ສັລ ໄພດ.....	22
3.1.8 ກໍານະຄົນ.....	22
3.1.9 ເໝນ່າດໍາ.....	22
3.1.10 ແකດເຊີ່ມຄາຮັບອນເຕ.....	22
3.1.11 ໄໜ່າເຄລຢີ.....	22
3.1.12 ທັລຄົມ.....	22
3.1.13 ຜົລິກາ.....	22
3.1.14 ໄດເອທິລິນ ໄກລຄອລ.....	22
3.2 ເຄື່ອງມືອໍທີ່ໃໝ.....	22
3.2.1 ເຄື່ອງບົດສົມຍາງສອງລູກກລິ້ນ.....	22
3.2.2 ເຄື່ອງທົດສອບລັກມະກາວັດຄາໄນ້ຫຼືອງຍາງ.....	23
3.2.3 ເຄື່ອງອັດໄສໂໂຄຣລິກ.....	23
3.2.4 ເຄື່ອງວັດຄວາມໜາ.....	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 การทดสอบลักษณะการวัลภาไนซ์ของยางคอมเป่นด์.....	25
3.3.4 การอัดยางเข้าเบ้าพิมพ์.....	25
3.3.5 การเตรียมตัวอย่างชิ้นทดสอบ.....	25
3.3.6 ศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ของยางสังเคราะห์.....	25
3.3.7 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเข้าด้ำที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ของยางสังเคราะห์.....	27
3.3.8 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลภาไนซ์ที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ของยางสังเคราะห์ที่มีเข้ม่าดำปริมาณ 40 phr.....	28
3.3.9 ศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วในการผิดรูปที่มีผลต่อความอ่อนค่าความ 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 ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเด่น ของยางสังเคราะห์.....	34
4.2.1 ยางบีอาร์.....	34
4.2.2 ยางเอสนีอาร์.....	37
4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเ元件มาดำเนินที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเด่น ของยางสังเคราะห์.....	40
4.3.1 ยางบีอาร์.....	40
4.3.2 ยางเอสนีอาร์.....	43
4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัดค่าไนซ์ที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเด่น ของยางสังเคราะห์.....	46
4.4.1 ยางบีอาร์.....	46
4.4.2 ยางเอสนีอาร์.....	49
4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วในการผิครูปที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเด่น ของยางสังเคราะห์.....	52
4.5.1 ยางไม่มีสารตัวเติม.....	52
4.5.1.1 ยางบีอาร์.....	52
4.5.1.2 ยางเอสนีอาร์.....	53
4.5.2 ยางผสมสารตัวเติม.....	54
4.5.2.1 ยางบีอาร์.....	54
4.5.2.2 ยางเอสนีอาร์.....	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	56
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57

บรรณานุกรม

ภาคผนวก

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมเปนด์.....	24
3.2 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อ <sup>ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์.....</sup>	26
3.3 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อ <sup>ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์.....</sup>	26
3.4 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลปริมาณสารตัวเติมที่มีผลต่อ <sup>ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์.....</sup>	27
3.5 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลปริมาณสารตัวเติมที่มีผลต่อ <sup>ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์.....</sup>	27
3.6 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลระบบการวัลภาไนซ์ที่มีผลต่อ <sup>ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์.....</sup>	28
3.7 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ศึกษาอิทธิพลระบบการวัลภาไนซ์ที่มีผลต่อ <sup>ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์.....</sup>	28

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงม้ากระทำและเมื่อตอนแรงกลับของยาง.....	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 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ไม่ผสม สารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	34
4.6 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr.....	35
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางบีอาร์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr.....	36
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสม สารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	37
4.9 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr.....	38
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสบีอาร์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr.....	39

## สารบัญรูป(ต่อ)

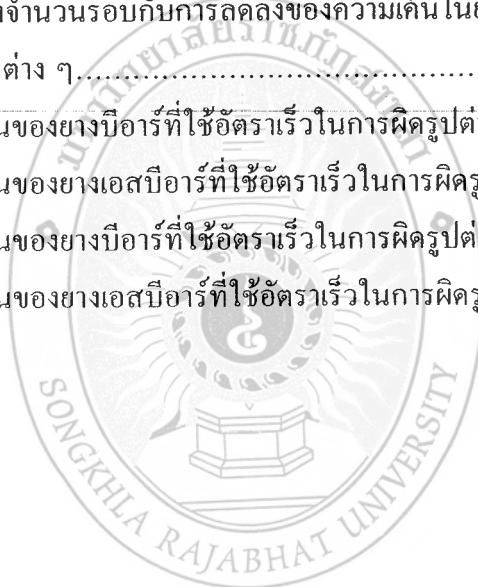
รูปที่

หน้า

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเด็นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างกัน ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	40
4.12 ความอ่อนค่าความเด็นของยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างกัน.....	41
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเด็นในยางบีอาร์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ .....	42
4.14 ลักษณะการขาดของสายโซ่.....	43
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเด็นกับความเครียดของยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างกัน ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	43
4.16 ความอ่อนค่าความเด็นของยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างกัน.....	44
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเด็นในยางเอสบีอาร์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ .....	45
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเด็นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ใช้ระบบ การวัดค่าในซีต่างกันซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก.....	46
4.19 ความอ่อนค่าความเด็นของยางบีอาร์ที่ใช้ระบบการวัดค่าในซีต่างกัน.....	47
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเด็นในยางบีอาร์ ที่ใช้ระบบวัดค่าในซีต่าง ๆ .....	48
4.21 การหลุดออกของพันธะ.....	49

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเด็นกับความเครียดของยางເອສນີອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ระบบ ກາຮວັດຄາໃນໜີຕ່າງກັນຈຶ່ງຄູກກະທຳໄຫ້ເກີດກາຮົມຮູປ່ປຽງແຮກ.....	49
4.23 ຄວາມອ່ອນຄ່າຄວາມເຄື່ອນຂອງຍາງເອສນີອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ບະນາດກາຮວັດຄາໃນໜີຕ່າງກັນ.....	50
4.24 ຄວາມສັນພັນທີ່ຮ່ວ່າງຈຳນວນຮອບກັບກາຮລົດລົງຂອງຄວາມເຄື່ອນໃນຍາງເອສນີອາຣ໌ ທີ່ໃຊ້ບະນາດກາຮວັດຄາໃນໜີ ຕ່າງ ຖ. ....	51
4.25 ຄວາມອ່ອນຄ່າຄວາມເຄື່ອນຂອງຍາງນີ້ອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ອັຕຣາເຮົວໃນກາຮົມຮູປ່ປຽງແຮກ.....	52
4.26 ຄວາມອ່ອນຄ່າຄວາມເຄື່ອນຂອງຍາງເອສນີອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ອັຕຣາເຮົວໃນກາຮົມຮູປ່ປຽງແຮກ.....	53
4.27 ຄວາມອ່ອນຄ່າຄວາມເຄື່ອນຂອງຍາງນີ້ອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ອັຕຣາເຮົວໃນກາຮົມຮູປ່ປຽງແຮກ.....	54
4.28 ຄວາມອ່ອນຄ່າຄວາມເຄື່ອນຂອງຍາງເອສນີອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ອັຕຣາເຮົວໃນກາຮົມຮູປ່ປຽງແຮກ.....	55



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ปัญหาและความเป็นมาของวิจัย

ยางถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เพราะยางมีสมบัติแตกต่างจากวัสดุวิศวกรรมอื่น ๆ คือ ยาง เป็นวัสดุที่มีการผิดรูปได้ แต่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เกือบสมบูรณ์ สามารถถูกยืดออกได้ หลายเท่าของความยาวเดิม แต่ผิดรูปได้เพียงเล็กน้อย เมื่อถูกกระทำด้วยแรงกดหรือแรงเฉือน ยาง เป็นวัสดุพอลิเมอร์ประเภทพาราฟิน โคลีอิสติกที่มีสมบัติระหว่างการยืดหยุ่นและการหดตัว

การผิดรูปทำให้ยางอ่อนนิ่มลง ซึ่งความอ่อนค่าความเค้นส่วนใหญ่เกิดจากการผิดรูปครั้งแรก ๆ และความเค้นจะลดลงเรื่อย ๆ ในการผิดรูปครั้งต่อ ๆ มา

การประยุกต์ใช้งาน ในบางกรณีเน้นเฉพาะสมบัติประเภทใดประเภทหนึ่งเพียงอย่างเดียวแต่ บางกรณีต้องการสมบัติหลายอย่างพร้อมกัน บางกรณีเน้นเฉพาะสมบัติพิเศษ เช่น สมบัติที่ การซึมผ่านของก๊าซต่ำ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติการใช้งานทั่วไป เช่น การวัดสมบัติความ เค้นความเครียด (แรงดึงและส่วนยืด) ดังนั้นยางที่ใช้จึงต้องแตกต่างกัน จึงอาจมีสมบัติเฉพาะ ทางด้านการใช้งาน ที่มีความเครียดมากที่ใช้วัสดุประเภทอื่นไม่ได้ และแน่นอนว่าความเค้นที่ เกี่ยวข้องในแต่ละกรณี ต้องเกี่ยวกับมอคูลัสของยาง

ในการทำวิจัยครั้งนี้ทำการศึกษาความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์ เพื่อนำไปสู่การ พัฒนาผลิตภัณฑ์ยางและการออกแบบงานวิศวกรรมต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดและปริมาณของสารตัวเติมที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้น ในยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ

1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของระบบวัลภาไนซ์ที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นในยาง สังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบความอ่อนค่าความเด่นของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ทั้งที่มีสารตัวเติมและไม่มีสารตัวเติม

1.2.4 เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วในการผิดรูปที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเด่นในยางสังเคราะห์ชนิดต่างๆ

### 1.3 ขอบเขตและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยที่ทำมีขอบเขตของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1.3.1 ศึกษาเปรียบเทียบยางสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ ยางบีอาร์ และ เอสบีอาร์

1.3.2 ศึกษาความอ่อนค่าความเด่นของยางสังเคราะห์ที่ไม่มีสารตัวเติมและมีสารตัวเติม

1.3.3 ศึกษาความอ่อนค่าความเด่นของยางสังเคราะห์โดยใช้สารตัวเติม 6 ชนิด คือ เมน่าดำเกรด N-330 เมน่าดำเกรด N-660 แคลเซียมคาร์บอเนต ไชนาเคลย์ ทัลคัมและซิลิกา

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

1.3.5 ศึกษาความอ่อนค่าความเด่นของยางสังเคราะห์ด้วยระบบการวัดค่าไนซ์ 4 ระบบ คือ ระบบกำมะถันปักติ ระบบอีวี ระบบเซมิอีวีและระบบสารให้กำมะถัน

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

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.4.1 ได้ความรู้เกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเด่นในยางสังเคราะห์

1.4.2 นำความรู้ที่ได้ไปใช้ในงานวิศวกรรมหรืองานก่อสร้าง

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ความเค้น (Stress)

เป็นลักษณะของแรงต้านที่อยู่ภายในของวัสดุที่มีความพยายามในการต้านทานต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อวัสดุนั้นๆ โดยแบ่งชนิดของความเค้นได้เป็นดังนี้ คือ

1. Tensile Stress หมายถึง ความเค้นดึงที่เกิดจากแรงดึงที่มากระทำต่อชิ้นงาน เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำดังน้ำหนักพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน
2. Compressive Stress หมายถึง ความเค้นกด หรือ ความเค้นอัด เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งจากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามขัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง
3. Shear Stress หมายถึง ความเค้นเฉือน เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงเฉือน เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากกระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันมีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อมๆ กัน
4. Bending Stress หมายถึง ความเค้นดัด เป็นความเค้นที่เกิดขึ้นต่อเมื่อชิ้นงานนั้นๆ ได้รับแรงดัด
5. Torsion Stress หมายถึง ความเค้นบิด เป็นความเค้นที่เกิดจากแรงบิดกระทำต่อชิ้นงานนั้นๆ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเห็นiyaw (Ductility) ฯลฯ เป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้นๆ สามารถที่จะรับหรือทนทานแรง หรือพลังงานเชิงกลภายนอกที่มากระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เมื่อจะเลือกใช้วัสดุใดๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณา ก็คือ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้น เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำ เครื่องจักร อุปกรณ์นั้นๆ เป็นสำคัญ ความเค้น (Stress) ตามความเป็นจริงความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายนอกเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่เนื่องจากความไม่แน่นอน

สมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหากำกันนี้ จึงมักจะพูดถึงความคื้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน ([http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description\\_of\\_courses/Engineering\\_Materials/Properties.doc](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 (เกิดความเด่น) การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

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

**2.2.2 การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป** (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความคื้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความคื้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation) นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโลหะ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรงกระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

ก. แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม

ข. แบบเนื่อง เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างรั้านา ([http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description\\_of\\_courses/Engineering Materials/Properties.doc](http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description_of_courses/Engineering%20Materials/Properties.doc))

### 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะplotค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน การทดสอบแรงดึงนอกจากให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความerasible และความหนืดของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้ข้อความสามารถในการขีดรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย ([http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description\\_of\\_courses/Engineering Materials/Properties.doc](http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description_of_courses/Engineering%20Materials/Properties.doc))

### 2.4 ความคืบ (Creep)

วัสดุส่วนใหญ่มีอยู่ภายในได้แรงที่มากระทำ เมื่อเวลาจะต่ำกว่าพิกัดยึดหยุ่น หากทิ้งไว้นาน ๆ แล้ว ก็อาจเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรหือแบบพลาสติกได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ด้วยประ勾ู การณ์เช่นนี้เรียกว่า ความคืบ ปริมาณของความคืบที่เกิดจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ปริมาณของความเค้น อุณหภูมิและเวลา หากใช้สภาวะที่เหมาะสมและมีเวลาเพียงพอ ความคืบจะเกิดขึ้นได้จนครบ 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นที่1 อัตราการเกิดความเครียดจะค่อยๆ ลดลง ขั้นที่2 อัตราการเกิดความเครียดจะคงที่และเป็นอัตราการเกิดความเครียดต่ำสุดในขณะที่วัสดุเกิดการคืบขึ้น ขั้นที่3 อัตราการเกิดความเครียดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนั่นเอง วัสดุขาดหรือแตกออกจากกัน ([http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description\\_of\\_courses/Engineering Materials/Properties.doc](http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description_of_courses/Engineering%20Materials/Properties.doc))

### 2.5 ความแกร่ง (Toughness)

ความสามารถของวัสดุที่จะดูดซึมพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก เรียกว่า ความแกร่ง (Toughness) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติด้านความแข็งแรงและความหนืดของวัสดุ โดยกำหนดว่า Modulus of Toughness เท่ากับพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงดึง ค่า Modulus of Toughness นี้ แสดงถึงงานต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุที่ต้องใช้จ่ายให้เกิดการแตกหักด้วย ข้อกำหนดนี้แสดงให้เห็นถึงข้อแตกต่างระหว่างวัสดุหนึ่งที่มีความแกร่ง

สูงและวัสดุประจำที่มีความแกร่งต่ำด้วย ([http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description\\_of\\_courses/Engineering\\_Materials/Properties.doc](http://www.eng.chula.ac.th/~metal/courses/Description_of_courses/Engineering_Materials/Properties.doc))

## 2.6 ความยืดหยุ่น

ยางมีลักษณะสำคัญที่เป็นเอกลักษณ์ 2 ประการ คือ ยางเป็นวัตถุที่มีความอ่อนตัว คือมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากโดยที่ไม่ถูกทำลายหรือฉีกขาด เพราะมีคุณสมบัติให้ ขณะเดียวกันยางมีความหนืด คือ มีความต้านทานการเปลี่ยนหรือการไฟด้วย ยางจึงแสดงคุณสมบัติความตึงกัน ขึ้นกับความเปลี่ยนแปลง ดังนั้น ยางจึงมีความสามารถในการกลับสู่สภาพเดิมได้ นั่นคือมีความแข็งหรือมีความยืดหยุ่นในตัวเอง เมื่อร่วมคุณสมบัติทั้งสองอย่างนี้เข้าด้วยกัน จึงเรียกได้ว่ายางมีคุณสมบัติความหยุ่นหนืด

ยางที่คงรูปแล้วจะมีลักษณะยืดหยุ่นคงรูปเกือบสมบูรณ์ทำให้ยางมีลักษณะดังนี้

ค. สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อถูกแรงกระทำ คือ ยืดตัวได้ หดตัวได้ บิดตัวได้หรือโค้งงอได้รวดเร็วตามแรงกระทำ

ข. เมื่อยางที่ถูกยืดออกจะสามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ ยางเมื่อถูกแรงม้ากระทำมันสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้อย่างรวดเร็ว

ค. ยางมีความแข็งแรงมากทันต่อแรงดึงสูง มีความแข็งแรงเมื่อหดตัวเต็มที่ ดังนั้นเมื่อยางถูกกดจะหดเพียงเล็กน้อย ยางจึงสามารถรับน้ำหนักได้มาก

ง. ยางมีความยืดหยุ่นดีเมื่อถูกกระทำให้เสียรูปร่างแล้ว สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้เกือบสมบูรณ์เพื่อหยุดแรงกระทำ ดังนั้นการเสียรูปจึงต่ำมาก ทำให้ยางมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตลอดเวลา

จากสมบัติต้านความยืดหยุ่นของยางทั้ง 4 ข้อ ที่กล่าวมาแล้วทำให้ยางสามารถที่จะนำไปใช้งานในการทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้

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

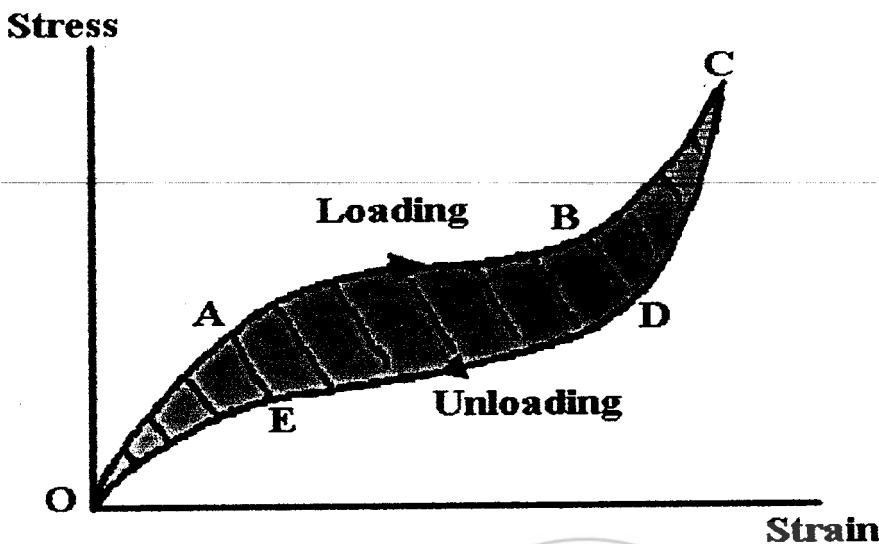
## 2.7 คุณสมบัติด้านการดึง ความดัน-ความเครียด (Tensile, Stress – Strain)

เมื่อใช้แรงกระทำต่อยางหรือวัสดุใดๆ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ 2 แบบ การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงดึง (Tensile) การเปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงเฉือน (shear) แรงที่กระทำทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดของยางนี้จะคิดเป็นแรงกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตึงจากกับแรงกระทำเรียกว่า แรงดัน (stress) เมื่อแรงกระทำหรือแรงดันกระทำต่อยางหรือวัสดุใด ถ้าไม่เกินความสามารถยืดได้ของวัสดุนั้นทำให้เกิดความเครียด (strain) เนื่องจากแรงดันนั้น การเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมอันเนื่องจากแรงกระทำมีค่าเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวหรือขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปต่อความยาวหรือขนาดเดิม ความเครียดนี้จะเป็นความยาว พื้นที่หรือปริมาตรก็ได้

ถ้าออกแรงกระทำ  $F$  ดึงยางที่มีความยาว  $L_0$  ในแนวตั้ง ได้จากกับพื้นที่  $A$  ให้ยางยืดออกไปให้ได้ความยาว  $L$  ได้ว่า

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

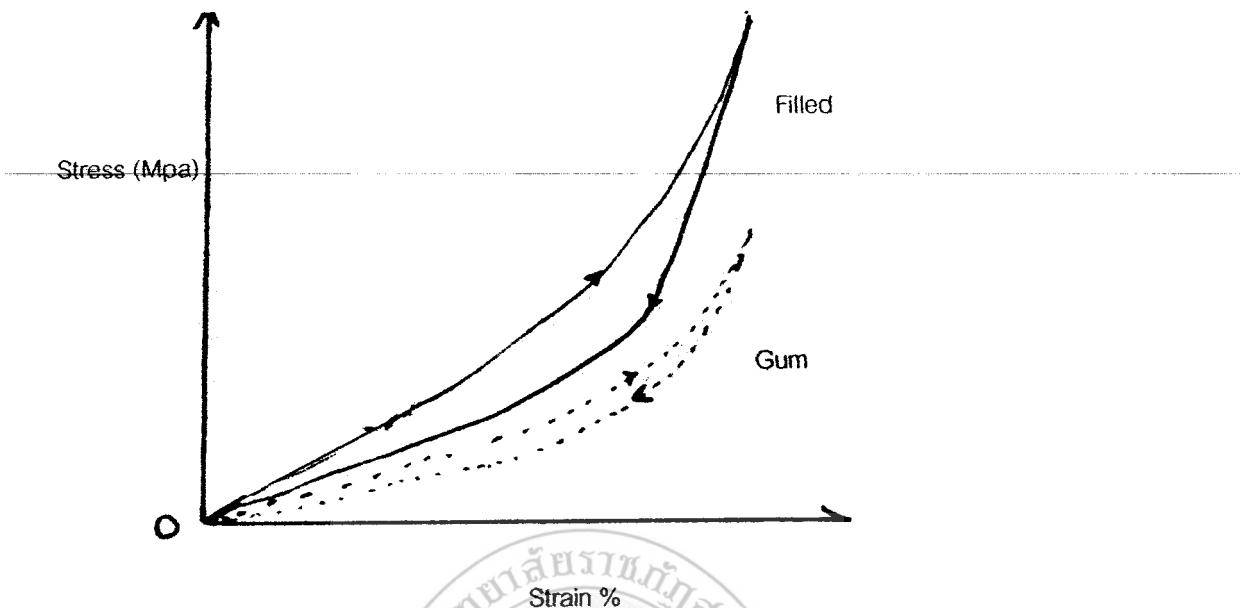
การทดสอบคุณสมบัติด้านการดึงเป็นการหาคุณสมบัติแรงดันหรือแรงดัน (Stress) และความยืด (Strain) ของยางที่ถูกกระทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างภายใต้สภาพที่กำหนด ถ้าเมื่อยางออกไป ความยาวหนึ่งแล้วปล่อยให้ยางกลับสู่สภาพเดิมจะเกิดสูญเสียพลังงานในเนื้อยางไป (ปรีชา, 2542) ดังแสดงรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงนากระทำ และเมื่อดันแรงกลับของยาง  
ที่มา: [www.christian81.free-online.co.uk/ph4a.2.htm](http://www.christian81.free-online.co.uk/ph4a.2.htm).

## 2.8 ความอ่อนค่าความเด็น (Stress Softening)

การผิดรูปทำให้ยางอ่อนนิ่งกราฟความเด็น-ความเครียดของการยืดหดครั้งแรกที่ใช้บวกคุณลักษณะของยางนั้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการออกแบบเชิงวิศวกรรม ความอ่อนนิ่นส่วนใหญ่เกิดจากการผิดรูปครั้งแรกๆ ความอ่อนนิ่นจะลดลงเรื่อยๆ ใน การผิดรูปครั้งต่อมา การอ่อนนิ่งเหล่านี้เกิดได้ทั้งในยางไม่วัลภาไนซ์และยางวัลภาไนซ์ และเกิดได้ทั้งในยางพสมสารตัวเดินและไม่พสมสารตัวเดิน ดังรูปที่ 2.2 ผลจะชัดเจนในยางที่พสมสารตัวเดินชนิดเสริมแรงในปริมาณมาก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ผลของมูลลิน” หรือ The Mullin’s Effect และได้รับการศึกษาค้นคว้าต่อมาอย่างมาก เกิดทฤษฎีเชิงคุณภาพที่ถาวรหาน้ำขึ้นเป็นลำดับ เพื่ออธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นที่ชัดเจนในยางพสมสารตัวเดิน การถูกเดึงส่วนมากเน้นว่าเกิดจากโครงสร้างของสารตัวเดินที่ถูกทำลายหรือ การลื่นไถลของพันธะระหว่างสารตัวเดินกับยาง การที่โครงสร้างของสารตัวเดินถูกทำลาย หรือเสื่นไม่เลกุตของโครงข่ายของยางขาด (ปรีชา, 2541)

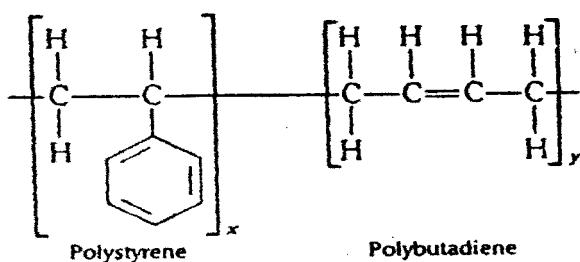


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดีนกับความเครียดของยางที่มีสารตัวเติมและไม่มีสารตัวเติม  
ที่มา: [www.sinrubtech.com.my/short%20notes/Musing%20With%20Sin%202001.htm](http://www.sinrubtech.com.my/short%20notes/Musing%20With%20Sin%202001.htm)

## 2.9 ยางเอสบีอาร์ (Styrene Butadiene Rubber, SBR)

ยางเอสบีอาร์นับเป็นยางที่ใช้งานทั่วไป (General purpose rubber) เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ ซึ่งนับว่ายางหักสองเป็นคู่แข่งกันโดยตรงที่จะทำเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ แม้ยางหักสองเป็นคู่แข่งกันแต่ มีความแตกต่างกันทางสมบัติและการใช้สารเคมีดังนี้ยางหักสองมีแทนที่กันทันทีไม่ได้

### สูตรโครงสร้างทางเคมี



ยางเอสบีอาร์เป็นโพลีเมอร์ของส్టైრेनและบూతాడు. มองอമอร์สองชนิดนี้ จะมาเข้ามาร่วมต่อกัน. ยางเอสบีอาร์เป็นยางที่สัมเคราะห์เข้ม การสัมเคราะห์โดยสูตรที่ต่างกัน และสภาวะที่ต่างกัน จะทำให้เกิดเป็นโพลีเมอร์ต่างๆ หลายชนิด และมีสมบัติที่แตกต่างกันซึ่งสมบัติที่แตกต่างกันนั้นจะขึ้นกับ

1. สักส่วนของ บิวทาไคอินต์อสไตรีน
2. นำหนักโนเมเลกุล และการกระจายตัวของโนเมเลกุล
3. ลำดับของการจัดตัวของโนโนเมอร์ในสายโซ่

#### 2.9.1 สมบัติและการประปุของยางเอสนีอาร์

ยางเอสนีอาร์ พันธุ์กอกลึง ได้ไมค์เท่ากับยางธรรมชาติ โดยที่ยางเอสนีอาร์ มักจะห้อยข้ออยู่จากกอกกลึง จึงมักผสมยาง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และยางเอสนีอาร์ จะให้ความร้อนออกมากกว่า ยางเอสนีอาร์ เอกซ์ทรูดง่ายกวายางธรรมชาติ และการนำยางเอสนีอาร์ ที่เอกซ์ทรูดแล้วกลับมาใช้ใหม่อีก จะไม่มีปัญหาที่ยางนิ่มลงเหมือนกับยางธรรมชาติ การรีดแผ่นจะทำได้ยากเนื่องจากยางเอสนีอาร์ มี Green Strength ต่ำ การดึงยางให้เข้ารูปอาจทำให้ยางมีรอยแตก แก้ไขโดยใช้ยางธรรมชาติผสมเข้าไป 10 – 15 phr

ยางเอสนีอาร์ มี Green Strength ต่ำ และการเหนี่ยวยติดกัน (Tack) ต่ำ เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ การหดตัวและการพองตัวเมื่ออุ่นห้ำได้ (Die swell) ของยางเอสนีอาร์ อาจจะสูงซึ่งสามารถแก้ได้โดยการผสมยาง เอสนีอาร์ เชื่อมโยง (เกรด 1009) เป็นต้น ความต้านทานต่อกรดและเบสต่ำ มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง มีความต้านทานต่อการฉีกขาดแนะนำต่อ

#### 2.9.2 สมบัติของยางวัลคานิช

เนื่องจากยางเอสนีอาร์ ประกอบด้วยสไตรีน ร้อยละ 23 และมีการจัดตัวของหน่วยโนโนเมอร์ ในสายโซ่แบบไม่มีระเบียบทาให้โนเมเลกุลไม่สามารถตกลงลึกได้เมื่อดึง ทำให้ยางไม่แข็งแรง การออกแบบยางจะต้องใช้สารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพทุกครั้ง

มีพันธุ์คู่ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ยางเอสนีอาร์ สามารถวัลคานิชได้ด้วยกำมะถัน และสามารถถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย ความต้านทานต่อการเสื่อมของยางเอสนีอาร์ ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติ (พรบรรณ, 2540)

### **2.10 ยางบีอาร์ (Butadiene Rubber, BR)**

โครงสร้างทางเคมีเป็น Cis-1,4-polybutadiene เป็นยางชนิดเดียวที่มีความกระเด้งตัวดีกวายางธรรมชาติ เมื่อนำยางนี้ผสมกับเนม่าดำจะให้ยางที่มีความทนทานต่อการสึกหรอสูงกวายางธรรมชาติ ผิวยางแห้งมาก ถ้าใช้เดียวๆ จะมีปัญหาในการประปุ การใช้งานจึงมักผสมกับยางธรรมชาติหรือยางเอสนีอาร์ ถ้าไม่ใส่สารตัวเติมเลยยางบิวทาไคอินจะมีความแข็งแรงต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สารตัวเติม (บุญธรรม, 2530)

### 2.10.1 ระบบการออกสูตร

ยางบีอาร์ มักไม่ใช้เป็นยางล้วนๆ เพราะการแปรรูปยาก แต่จะผสมกับยางธรรมชาติ หรือยางเอสบีอาร์ และจะใช้ไม่เกิน 50% เพราะการแปรรูปไม่ดีขึ้นแล้ว ปริมาณที่ใช้อาจจะใช้ประมาณ 25-30% ในคอกยางถyenต์ มักจะใช้กำมะถันเป็นสารวัลค่าในชั้นแต่การใช้เปอร์ออกไซด์ก็สามารถทำได้ ปริมาณกำมะถันที่ใช้จะใช้น้อยกว่ายางธรรมชาติ(แต่ปริมาณสารตัวเร่งจะใช้มากกว่า) ยางบีวีท้าไดอีนจะให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโดยสูงกว่ายางเอสบีอาร์หรือยางธรรมชาติเมื่อใช้กำมะถันในปริมาณที่เท่าๆ กัน ปริมาณกำมะถันที่แนะนำ 1.5 – 1.9 phr ถ้าสูตรยางผสมกันแปรจากยางธรรมชาติ 100 phr ไปถึง ยางบีวีท้าไดอีน 100 phr ปริมาณกำมะถันจะแปรไปจาก 2.5 phr ไปจนถึง 1.5 phr แต่ปริมาณสารตัวเร่งแปรไปจาก 0.5 phr ไปจนถึง 1.0 phr สารตัวติดที่ใช้จะต้องเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพและสามารถรับเขม่าคำและน้ำมันได้มากกว่ายางธรรมชาติหรือยางเอสบีอาร์ (พรพรรณ, น.ป.ป.)

### 2.10.2 สมบัติด้อยของยางบีอาร์

- การเกะกะคนไม่มีดี
- ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ
- การซึมอากาศมาก ใช้ทำยางในรถไม่ได้เลย

### 2.10.3 การใช้งาน

การใช้งานของยางบีอาร์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของการผสมกับยางอื่น เพราะยางบีอาร์แปรรูปไม่ดี

ตารางที่ 2.1 ผลของการผสมยางธรรมชาติกับยางบีอาร์ต่อการแปรรูป (บุญธรรม, 2530)

สารเคมี	ปริมาณ (phr)				
	ยางบีอาร์	ยางธรรมชาติ	เขม่าคำ	น้ำมัน	ดีบุก
การพันลูกกลิ้ง	เลว	พอใช้	ดี	ดี	ดีมาก
ML-4 ที่ 212 F	72	68	60	60	60
ใช้ Garvay die,กรัม/นาที	85	96	100	101	102
ลักษณะผิว	8	9	11	11	12

## 2.11 สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติม หมายถึงสารอื่นๆ ที่ไม่ใช้ยางที่ใส่ลงไปในยาง ตัวอย่างเช่น เบนาค่า แคลเซียม คาร์บอนเนต ดินเหนียว แมกนีเซียมคาร์บอนเนต และ ซิลิกา เป็นต้น สารเหล่านี้ใส่ไปเพื่อวัตถุประสงค์ ต่อไปนี้

1. เพื่อลดต้นทุน โดยทั่วไปสารตัวเติมจะมีราคาถูกกวายาง ปัจจุบันยางธรรมชาติในประเทศไทย กิโลกรัมละ 22 บาท แคลเซียมคาร์บอนเนต กิโลกรัมละ 5 บาท แป้งรากคิโลกรัมละ 8-10 บาท เบนาค่าเฉลี่ย กิโลกรัมละ 20-25 บาท จะเห็นได้ว่าการลดต้นทุนการผลิตทำได้โดยเติมสารตัวเติมลงไปกับยางนั้น

2. เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง โดยทั่วไปการใส่สารตัวเติมเข้าไปในยางจะทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้นและไม่คูลัสสูงขึ้นด้วย ส่วนสมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นกับชนิดของยางและสารตัวเติม เช่น ถ้ายางธรรมชาติใช้เบนาค่าเป็นสารตัวเติม จะให้ยางที่มีความต้านทานต่อแรงดึงสูง ความต้านทานต่อการสึกหรอสูง แต่ถ้าใส่เบนาค่ามากเกินไป ค่าความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการสึกหรออาจลดลงได้เช่นกัน

3. เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต ในกระบวนการผลิตของยางถ้าไม่มีสารตัวเติมอาจทำให้กระบวนการผลิตยุ่งยาก เช่น การคานเลนเดอร์ การเอกซ์ทรูด เป็นต้น ถ้าเป็นยางล้วน ๆ หรือมีสารตัวเติมน้อย การเอกซ์ทรูดจะได้ผิวไม่เรียบ หรือการคานเลนเดอร์ จะมีปัญหารื่องยางบางหรือยางหนา โดยไม่สามารถควบคุมได้ การใส่สารตัวเติมจะช่วยแก้ปัญหารื่องเหล่านี้ได้

4. ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน ยางจะพองตัวได้ดีน้ำมัน แต่เมื่อใส่สารตัวเติมเข้าไปในยาง จะทำให้การพองของยางในน้ำมันลดลง เนื่องจากมีเนื้อยางลดลง

5. เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า ยางบางชนิดเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดี ซึ่งอาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ถ้ามีประกายไฟสถิติหรือนำไฟฟ้าได้

6. เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง ปกติยางจะลายตัวได้่ายถ้าถูกแสงแดด ซึ่งมีแสงอุลตราไวโอลे�ตอยู่ ถ้าใส่สารที่กันไม่ให้แสงอ่อนผ่านเข้าไปในยางได้ เช่น เบนาค่า ก็จะช่วยเพิ่มอายุการใช้งานของยางขึ้น

การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะรูปร่าง แบ่งได้ 3 ลักษณะ คือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Particulate filler) เช่น แคลเซียมคาร์บอนเนต ดินเหนียว เบนาค่า แบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1.1 สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ (reinforcing filler) คือสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปในยางแล้วทำให้ยางมีความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอสูง ความต้านทานต่อการนีกขาด

สูง เป็นต้น ส่วนใหญ่อนุภาคจะมีขนาดเล็กประมาณ  $180\text{ A}^{\circ}$  -  $600\text{ A}^{\circ}$  เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไหม่คำ (fumed product) เช่นไหม่คำ ชิลิกา เป็นต้น

1.2 สารตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพ (diluent filler) สารตัวเติมชนิดนี้จะมีราคาถูก มีอนุภาคใหญ่ประมาณครั้งเดียว  $10,000\text{ A}^{\circ}$  ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอนต์ แป้งทัลคัม เป็นต้น สารตัวเติมบางตัวมีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อะลูมิเนียมชิลิกา และแคลเซียมชิลิกา จะจัดอยู่ในพวกกึ่งเสริมประสิทธิภาพ (semi – reinforcing filler)

2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler) เช่น ไยฝ้าย (cotton floc) ไยไม้ (wood floc) สารตัวเติมชนิดนี้ใส่ในยางบางชนิดเพื่อป้องกันไม่ให้ยางหดตัว แผ่นออกเพื่อรักษารูปทรง เช่น พื้นรองเท้า

3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (Resinous filler) เช่น ไฮส泰รีนเรซิน (high styrene resin), ฟีโนอลฟอร์มัลเดคไซด์เรซิน (phenol formaldehyde resin)

ปัจจุบันสารตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ไหม่คำ และ ชิลิกา เพราะสามารถเสริมประสิทธิภาพ (พรพรณ, 2528)

## 2.11.1 ไหม่คำ

### 2.11.1.1 สมบัติของไหม่คำ

#### ไหม่คำขึ้นกับสมบัติ 5 ประการคือ

1. ขนาดของอนุภาค โดยทั่วไปแล้วไหม่คำที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้ยางที่ผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้น ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้นและผสมเข้ากับยางได้ยากขึ้นด้วย การวัดขนาดของอนุภาคทำได้โดยตรงโดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเลคตรอนซ์ซึ่งต้องวัดขนาดของเม็ดแต่ละเม็ดแล้วนำมารวบกัน วิธีนี้จะได้ค่าที่ถูกต้องแน่นอนแต่เสียเวลามาก วิธีอื่นที่สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสีกับไหม่คำมาตรฐานซึ่งทำได้ 2 วิธี

(ก) การดูแสงสะท้อน ปกติไหม่คำยังมีขนาดเล็กมากเท่าไหร่แสงที่ส่องถูกผิวของไหม่คำจะสะท้อนกลับมาเท่าไหร่ วิธีนี้จึงช่วยวัดขนาดของอนุภาคโดยวัดตาม Nigrometer scale โดยกำหนดให้ 100 สำหรับไหม่คำชนิด Semi-reinforcing furnace (SRF) ค่าตัวเลขที่ต่ำกว่า 100 แสดงถึงสะท้อนน้อย มีขนาดอนุภาคเล็กถ้าเกิน 100 สะท้อนแสงมาก มีขนาดอนุภาคใหญ่

(ข) ดูการดูดกลืนของแสง ทำโดยนำไหม่คำ 0.100 กรัม มาผสมกับซิงค์ออกไซด์ 3.75 กรัม และใช้น้ำมันลินสีดเป็นตัวพา สังเกตผลที่ได้เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน โดยกำหนดให้สารมาตรฐานมีค่าเป็น 100 ถ้าไหม่คำมีขนาดอนุภาคเล็กจะเห็นเป็นสีเข้ม ถ้าขนาดอนุภาคใหญ่สีจะไม่เข้ม

2. โครงสร้างของเขม่าดำ หมายถึง การจัดตัวระหว่างอนุภาคของเขม่าดำให้มีรูปโครงสร้าง ถ้าเขม่าดำมีการจัดตัวต่อกันเป็นสายมาก แสดงว่ามีโครงสร้างสูง ถ้าการจัดตัวไม่ต่อ กันหรือต่อ กันน้อย แสดงว่ามีโครงสร้างต่ำ

เขม่าดำมีโครงสร้างค่ากันมากน้อยขึ้นกับขั้นตอนการเตรียมเขม่าดำนั้นๆ เช่น Thermal black มีโครงสร้างน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วน channel black จะมีโครงสร้างปานกลาง แต่ furnace black ชนิดที่ใช้น้ำมันอิฐมาติกสูงจะให้เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง furnace black สามารถจัดให้มีโครงสร้างสูงหรือต่ำ โดยการใช้ additive (เกลือของโลหะ) ไปช่วยในการแตกตัวเป็นอิออนในเปลวไฟทำให้เขม่าดำนั้นซึ่งพวกรึมีเกลือโลหะจะให้เขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ การจะให้ได้เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงจะต้องออกแบบเดาร่วมทั้งเลือกชนิดของน้ำมันด้วย

การที่เขม่าดำมีโครงสร้างสูงจะทำให้การจัดตัวไม่แน่น ดังนั้นการหาโครงสร้างของเขม่าดำนักจากใช้กล้องจุลทรรศน์อีเลคตรอนແล็ก อาจใช้วิธีวัดช่องว่างของอากาศระหว่างอนุภาคของเขม่าดำต่อกันน้ำหนักของเขม่าดำ ในกราฟคลื่นของจริง ๆ นั้นแทนที่จะวัดช่องว่างของอากาศโดยตรง กลับใช้น้ำมันใส่ลงในช่องว่าง น้ำมันที่ใช้คือ dibutyl phthalate (DBP) การทดลองจะเป็นการปริมาณของ DBP ที่จะต้องเติมเข้าไปในช่องว่างนั้น เครื่องมือที่ใช้ absorptometer ซึ่งประกอบด้วยช่องว่างเล็ก ๆ ที่จะใส่เขม่าดำที่ทราบน้ำหนักแน่นอน มีที่กวนแล้วก่ออยู่ เติม DBP เข้าไปในเขม่าดำนั้น ขณะที่เติม DBP เข้าไปจนเต็มช่องว่างของพลาสติกจะแผ่นทำให้แรงบิดในการกรุณฑ์ขึ้นทันที เครื่องมือจะหยุดทำงานในช่วงนี้ อ่านปริมาตรของ DBP ทันที และคำนวณหาค่าปริมาตร DBP ที่ใช้เป็นลูกบาศก์ซึ่งติดต่อกัน 100 กรัมของเขม่าดำ

3. ลักษณะผิว การจัดตัวของการรับอนอะตอนในเขม่าดำจะมีลักษณะเป็นขี้น เขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพต่ำ เช่น thermal black จะมีการจัดตัวของคาร์บอนอะตอนเรียงบนอย่างมีระเบียบ เขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพสูง จะมีการจัดตัวของคาร์บอนอะตอนไม่เป็นระเบียบ และยิ่งเขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็กยิ่งขึ้นการจัดตัวของคาร์บอนอะตอนยิ่งไม่เป็นระเบียบมากขึ้น บางทีลักษณะของการรับอนอะตอนที่ผิวมีผลต่อการเสริมประสิทธิภาพได้ เช่น ถ้าอะตอนของคาร์บอนเกิดการสร้างพันธะกันเองจนทำให้ลักษณะผิวจัดตัวเป็นระเบียบ ทำให้เก่าติดกับยางไม่ได้ การเสริมประสิทธิภาพก็ต่ำ แต่ถ้าคาร์บอนอะตอนมีไออกอร์เจนมาเกาะจะช่วยให้เขม่าดำนั้นเสริมประสิทธิภาพมากขึ้น และเพิ่มมากขึ้นถ้าเกิดอนุมูลอิสระอยู่บนผิวของเขม่าดำ ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะสร้างพันธะกับยางได้ เมื่อโมเลกุลของยางแตกออกเป็นอนุมูลอิสระขณะทำการทดสอบ

4. สมบัติทางเคมีของผิว เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไออกอร์เจนและออกซิเจนที่เกากันด้วยพันธะโควาเลนท์ ไออกอร์เจนมาจากไออกอร์เจนเดิม

(จากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ) ไฮโดรเจนจะอยู่ระหว่างจุดอุ่นของเปลวไฟ ดังนั้นออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผิวของเมฆม่าน ออกซิเจนที่ผิวจะจับตัวในรูปของหมู่ฟินอลิก คีโตกนิก คาร์บอกรัลิก และแคลโนตัน นอกจานี้ยังมีกำมะถันปริมาณเล็กน้อยปนอยู่ในเมฆม่านด้วย ปริมาณของของกำมะถันขึ้นอยู่กับปริมาณของกำมะถันเดิมที่มีในน้ำมันที่ใช้ทำเมฆม่าน

5 ความเป็นรูพจน์ของเมฆม่าน ผิวของเมฆม่านไม่เรียบเนื่องจากในการเตรียมเมฆม่านนั้นทำโดยให้เกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง การออกซิเดชันจะทำให้เกิดเป็นรูพจน์ขึ้นในอนุภาคของเมฆม่านได้ การมีรูพจน์มากหรือน้อยในเมฆม่านจะเป็นเหตุทำให้เกิดการวัดค่าไนซ์เร็วหรือช้าได้ เพราะรูพจน์นี้จะดูดเอาสารตัวเร่งเข้าไป ซึ่งจะทำให้การวัดค่าไนซ์ช้าลงไปได้ถ้าเอาเมฆม่านที่มีรูพจน์มากจะพบว่ามีจำนวนอนุภาคมากกว่าเมฆม่านที่มีรูพจน์น้อย ดังนั้นถ้าใช้เมฆม่านจำนวนเท่า ๆ กัน โดยน้ำหนักใส่ลงไปในยาง เมฆม่านที่มีรูพจน์มากจะทำให้ยางมีวิสโคซิตีสูงกว่า การนำไปฟื้ฟ้าดีกว่าเมฆม่านที่มีรูพจน์น้อย เนื่องจากจำนวนอนุภาคมากกว่านั้นเอง

#### 2.11.1.2 ผลของการเมฆม่านต่อยางที่ไม่วัลภาไนซ์

การนำเมฆม่านมาใส่ลงในยางจะเป็นที่จะต้องบดยางให้นิ่มก่อน การที่ยางนิ่มเรียกว่าวิสโคซิตีลดลงและพลาสติกซิตีเพิ่มขึ้น การใส่เมฆม่านจะทำให้ยางมีวิสโคซิตีเพิ่มขึ้นดังนั้นการใส่เมฆม่านปริมาณต่างกันและขนาดต่างกันจะมีผลต่อวิสโคซิตีของยาง เมฆม่านที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้ยางมีวิสโคซิตีสูงกว่าเมฆม่านที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ เมื่อใช้ในปริมาณที่เท่า ๆ กัน นอกจากเมฆม่านที่มีขนาดเล็กจะทำให้วิสโคซิตีสูงกว่าเมฆม่านแล้วยังผสมเข้าไปในยางโดยใช้เวลานานกว่า

#### 2.11.1.3 อิทธิพลของเมฆม่านต่อสมบัติของยางวัลภาไนซ์

สมบัติของยางวัลภาไนซ์ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ ความล้ำ และความกระเด้งตัวคืนกลับของยาง จะขึ้นกับขนาดอนุภาคของเมฆม่าน ส่วนความแข็งของยางจะขึ้นกับโครงสร้างมากกว่าขนาดอนุภาค (พรพรรณ, 2528)

#### 2.11.2 คลัลเซียมคาร์บอนेट (Calcium carbonate)

คลัลเซียมคาร์บอนे�ตที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปของชอล์กกับหินปูน หรืออาจอยู่ในรูปของ Dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , Ankerite  $\text{Ca}(\text{MgFe})(\text{CO}_3)_2$  คลัลเซียมคาร์บอนे�ตที่ใช้ในยางอาจเป็นพลาทิมจากธรรมชาติหรือสังเคราะห์ โดยกระบวนการทำให้ตกลอกก่อนคลัลเซียมคาร์บอนे�ตนิดที่ใช้ในยางแบ่งเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

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

### 3. พรีชิโน๊ท เวทติง (Precipitated Whiting)

### 4. ทรีท เวทติง หรือ ทรีท คัลเซียมคาร์บอเนต (Treated whiting หรือ Treated calcium carbonate)

โดยทั่วไปขนาดของคลัตเชี่ยนคาร์บอเนตมีขนาดใหญ่ ดังนั้นความด้านทานต่อแรงดึงซึ่งไม่ดีเท่ากับสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ เช่น เมมาร์ ยางธรรมชาติเมื่อใช้คลัตเชี่ยนคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมทำให้ความด้านทานต่อแรงดึงคงลงทันทีและคลัตเชี่ยนคาร์บอเนตขนาดเล็กจะทำให้ยางมีความด้านทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางที่ใช้คลัตเชี่ยนคาร์บอเนตปานกลาง แต่สำหรับยางเอสบีอาร์นั้น ปกติเป็นยางที่มีความด้านทานแรงดึงโดยทั่วไปต่ำ จึงต้องใช้สารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพ เช่น เมมาร์เพื่อเพิ่มความด้านทานต่อแรงดึง แต่ถ้าใช้คลัตเชี่ยนคาร์บอเนตอนุภาคเด็ก ซึ่งจะให้ความด้านทานต่อแรงดึงสูงกว่าเดิมเล็กน้อยแต่ถ้าใช้อุปภาคขนาดปานกลางจะไม่ทำให้ความด้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นเลย (พรพรม, 2528)

#### 2.11.3 ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่ดีที่สุดในบรรดาสารตัวเติมที่ไม่ใช่สีดำ มีสูตรโครงสร้างเป็น  $\text{SiO}_2$  และอาจมีน้ำผลักดันด้วย ซิลิกาที่นำมาใช้อาชอยู่ในรูปที่พบในธรรมชาติแล้วนำบดหรือเป็นซิลิกาที่เตรียมขึ้นมา

แร่ซิลิกาบด (Ground mineral silica) เป็นแร่ซิลิกาบดหรือทรายบดให้ละเอียด มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 200  $\mu\text{m}$  จะมีขนาดใหญ่ๆ มาก ใช้เป็นสารตัวเติมราคากูในยางทันควรร้อน เมื่อจากขนาดอนุภาคใหญ่ทำให้คุณสมบัติไม่ดีและมีพื้นที่ผิวน้อย ดังนั้นแร่ซิลิกาจะไม่มีผลในการสุก (Cure) ของยาง

#### อิทธิพลของการใช้ซิลิกากันยางมี 4 ประการคือ

1. อิทธิพลเนื่องจากขนาด ซิลิกามีขนาดเล็กพื้นที่ผิวนอก ขณะผสมยางจะเกิดความร้อนสูง อาจเป็นเหตุให้เกิดการสุกก่อนได้ร้าย

2. อิทธิพลเนื่องจากความเป็นกรด ซิลิกาเป็นสารที่มี pH เป็นกรดซึ่งทำให้ยางสุกช้าลง และผิวของซิลิกามีพันธะไฮโดรเจนดังนั้นจะทำให้เกิดการดูดสารตัวเร่งที่ผิวของซิลิกาได้ประมาณสารตัวเร่งจะลดลงทำให้ยางสุดช้าลงซึ่งอาจแก้ไขโดยการเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่ง

3. อิทธิพลที่ทำให้ยางแข็ง ซิลิกาจะทำให้ยางผสมสารนี้แข็งไม่สุก แข็งมาก

4. อิทธิพลเนื่องจากซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ ดังนั้นทำให้การเกิดพันธะกับยางซึ่งเป็นสารอินทรีย์จะไม่ดีเท่าที่ควรทำให้ยางมีโมดูลัส ความด้านทานต่อการสึกหรอต่ำกว่ายางที่ใช้เมมาร์ (พรพรม, 2528)

#### 2.11.4 ไชน่าเคลย์ (China clay)

โดยทั่วไปจะเป็น Kaolin ที่มีส่วนประกอบเป็น  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  นอกจานนี้อาจมีสารประกอบอื่นปน เช่น เหล็ก ทิทาเนียม คัลเซียม มักเนเซียม โปตัสเซียม โซเดียม และอาจมีแมงกานีสอยู่ด้วย คุณสมบัติของไชน่าเคลย์ที่ใช้ในยางมีความถ่วงจำเพาะ 2.60 กก/คิวที่เหลือหลังกรองผ่านตะแกรง (screen residue) หรือ กริต (grit) น้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงหลังจากการกรองด้วยตะแกรง 325 เมช จะเหลือกากน้อยที่สุด ถ้ามีกริตสูงจะทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงของยางลดลง การแตกเนื่องจากการหักงอไปมา (Flex cracking) ต่ำ ค่าไคเดคตริกของยางที่เป็นจนวนเสียงไป ทำให้มีดีที่ใช้ท่อ และเครื่องมือผสมและแปรรูปยางสักหรือ ปริมาณของกริตในไชน่าเคลย์ที่ตั้งแต่น้อยมากจนถึง 3.5% แต่สำหรับไชน่าเคลย์ที่คัดแล้วไม่รวมกริตเกิน 0.35% (การทดสอบหากริตทำโดยนำไชน่าเคลย์มาเติมโซเดียมไฟฟอสเฟตซึ่งจะเป็น peptising agent ช่วยให้ไชน่าเคลย์กระจายตัวได้ดี เติมน้ำลงไปกวอนอย่างเร็ว แล้วกรองผ่านตะแกรง หากที่ไม่ผ่านตะแกรงคือกริต นำไปทำให้แห้ง ซึ่งหายใจ)

ความชื้นในไชน่าเคลย์ไม่ควรเกิน 1% แต่ kaolin เป็นประเภทที่ไม่ดูดความชื้นถึงแม้จะสามารถดูดความชื้นสัมพัทธ์สูงถึง 90% ก็จะดูดความชื้นเข้าไปเพียง 1.3% เท่านั้น สีของไชน่าเคลย์ มีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีอ่อน การวัดความแตกต่างของสีของไชน่าเคลย์อาจทำได้ง่าย ๆ โดยนำไชน่าเคลย์ 2 ตัวอย่างมาวางบนพื้นขาวไกล์เดียงกันเอาช้อนบดให้ทั้งสองตัวอยู่ต่อกัน ดูดความแตกต่างของสีตรงรอยต่อนั้น แต่จะให้แน่นอนควรใช้เครื่องมือ The General electric brightness meter ซึ่งวัดการสะท้อนของแสงที่ต่ำจะบลลงบนสี และเปรียบเทียบกับมาตรฐานให้สีมาตรฐานมีค่าเป็น 100 ไชน่าเคลย์ชนิดละเอียด (hard clay) มีค่า 74-78 ไชน่าเคลย์ชนิดหยาบ (soft clay) มีค่า 78-81 แต่ถึงแม้ว่าสีของไชน่าเคลย์จะมีความสำคัญ แต่อานาจครอบคลุม (covering power) ของสีต่ำ (กำลังการแสดงออกของสีที่จะกลบสีของยาง) ทั้งนี้เนื่องจากคราชนีหักเหของแสงของไชน่าเคลย์ไกล์เดียงกับยางมาก

ไชน่าเคลย์ที่ใช้ในยางจะแบ่งเป็น 4 พากใหญ่ ๆ คือ

1. ไชน่าเคลย์ชนิดละเอียด (Hard clay)
2. ไชน่าเคลย์ชนิดหยาบ (Soft clay)
3. ไชน่าเคลย์ให้ความร้อน (Calcined clay)
4. ไชน่าเคลย์เคลือบสารเคมี (Treated clay)

#### **2.11.4.1 ไชน่าเกลีย์ชนิดคละເອີຍດ**

ເປັນໄຊນ່າເຄລຍ໌ທີ່ມີຂາດອນຸກາຄສ່ວນໃຫຍ່ຕໍ່ກວ່າ 2 ໄນຄຮອນ ມີສີຂາວກວ່າໜິດໜ້ານ ເປັນສາງຕັ້ງເຕີມເສຣິນປະສິທິພາບຮາຄາຖຸກ ທຳໄໝໜ້າງມື້ນອຸດັບສະແດງຄວາມດ້ານທານຕ່ອງແຮງດຶງສູງ ຄວາມດ້ານທານຕ່ອງການສຶກໂຮມຄືແລະຍາງທີ່ຍັງ ໄນວັດຄາໃນໜີວິສ ໂຄຊີຕື່ສູງຄ້ວ່າ ນອກຈາກນັ້ນຍາງທີ່ໄດ້ຈະນີຄວາມດ້ານທານໄຟຟ້າສູງ ນີ້ຍັນໃໝ່ມາກເພຣະນີຮາຄາຖຸກແລະສາມາດເສຣິນປະສິທິພາບຍາງເຖີ່ນທຸກໜິດ ກາຣໃຊ່ງານສ່ວນໃຫຍ່ຈະໃຊ້ໃນກາຣທຳສາຍພານດໍາເລີຍ ປະເກີນ ຍາງທ່ອ ຍາງຮອງພື້ນ ຕຸກຕາເກົ່າງໃຊ້ໃນບ້ານແລະໃໝ່ມາກທີ່ສຸດໃນກາຣທຳຮອງເຫຼົ່າ ເຫັນ ພົ້ນຮອງເຫຼົ່າ ສັນຮອງເຫຼົ່າ ເປັນຕົ້ນ

#### **2.11.4.2 ໄຊນ່າເຄລຍ໌ໜິດໝາຍານ**

ເປັນໄຊນ່າເຄລຍ໌ທີ່ມີອນຸກາຄໃຫຍ່ກວ່າ 2 ໄນຄຮອນ ມີສີຂາວມ່ານ ໃຊ້ເປັນສາງກິ່ງເສຣິນປະສິທິພາບ ຮາຄາຖຸກ ໄໝ້ຍາງທີ່ມື້ນອຸດັບສະແດງຄວາມດ້ານທານຕ່ອງແຮງດຶງສູງ ຄວາມດ້ານທານຕ່ອງການສຶກໂຮມຄືຂອງຍາງທີ່ຍັງ ໄນວັດຄາໃນໜີວິສ ໂຄຊີຕື່ສູງຄ້ວ່າຍາງທີ່ໃຊ້ໄຊນ່າເຄລຍ໌ຈະສູງກວ່າຍາງທີ່ໃຊ້ກັດເຊີມກາຣນອນເນັດ ຈະພວກວ່າຄວາມແໜ່ງແລະຄວາມດ້ານທານຕ່ອງແຮງດຶງຂອງຍາງທີ່ໃຊ້ໄຊນ່າເຄລຍ໌ຈະສູງກວ່າຍາງທີ່ໃຊ້ກັດເຊີມກາຣນອນເນັດ ແຕ່ກວາມກະເທັງຕົວຈະຕໍ່ກວ່າ ກາຣໃຊ່ງານນັກໃຊ້ໃນກາຣທຳຜົດກັບທີ່ຍາງທາງເຮົາກລ ແຕ່ໄນ້ອ່າວໃຊ້ໃນຍາງທີ່ຕ້ອງກາຣສີສົດໄສ

#### **2.11.4.3 ໄຊນ່າເຄລຍ໌ໃຫ້ຄວາມຮ້ອນ**

ເປັນໄຊນ່າເຄລຍ໌ໜິດລະເອີຍດທີ່ນໍາໄປໃຫ້ຄວາມຮ້ອນ ເພື່ອເອົານໍາທີ່ຮ່ວມອູ້ໃນໄຊນ່າເຄລຍ໌ອອກໄປ ຈະໄດ້ສາງຕັ້ງເຕີມໜິດເສຣິນປະສິທິພາບທີ່ມີສີຂາວ ໄໝ້ຍາງທີ່ມີຄວາມແໜ່ງ ຄວາມດ້ານທານຕ່ອງແຮງດຶງແລະຄວາມດ້ານທານໄຟຟ້າສູງກວ່າໄຊນ່າເຄລຍ໌ໜິດລະເອີຍດຮຽນດາ ໄຊນ່າເຄລຍ໌ໜິດນີ້ຈະໃຊ້ໃນກາຣຟີທີ່ຕ້ອງກາຣຍາງທີ່ເນັ້ນຄວາມດ້ານທານໄຟຟ້າເປັນເຮືອງສຳຄັນ

#### **2.11.4.4 ໄຊນ່າເຄລຍ໌ເຄລືອນສາງເຄມີ**

ເປັນໄຊນ່າເຄລຍ໌ໜິດລະເອີຍດ ໜິດພິເສດ ທີ່ກໍາກາຣເຄລືອນພິວຕ້າຍສາງເຄມີ ເຫັນເຄລືອນຄ້ວ່າຍາຮອະນິນ ເຄລືອນຄ້ວ່າໃໝ່ເລັນ ເປັນຕົ້ນ (ພຣພຣະ, 2528)

#### **2.11.5 ແປ້ງທັດຄົມ**

ເປັນພິສີຂາວປະກອບດ້ວຍ ມັກນີ້ເຊີມຊີດເຄຕແລະອຸ້ນເນີຍຊີດເຄຕໃຫ້ເປັນສາງຕັ້ງເຕີມເກື່ອຍໃນກາຣປະກອບທີ່ທັນຄວາມຮ້ອນ ເຫັນ ປະເກີນ ເປັນຕົ້ນ ສໍາຫັນແປ່ງທີ່ບໍລະເອີຍນາກ ອາຈໃຊ້ເປັນສາງຕັ້ງເຕີມກິ່ງເສຣິນປະສິທິພາບ ລໍາຫວັນຍາງທີ່ມີສີຈາງໄດ້ ແຕ່ຍັງໃຊ້ເປັນຕົວຫລຸດສິ່ນຍາງທີ່ຍັງໄໝສຸກໄມ້ໄໝຢາງແຫລ່ານີ້ມາເກະຕິດກັນຫຼືເກະຕິດກັນສາງອື່ນໆ (ພຣພຣະ, 2528)

## 2.12 สารที่ทำให้เกิดการวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)

การวัลคาไนซ์คือขบวนการการเปลี่ยนยางที่อ่อนในสภาพไม่คงตัวให้เป็นยางที่รักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่นหรือแข็งกระด้างโดยใช้สารวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นสารทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลซึ่งเรียกว่า Crosslink ซึ่งตรงจุดที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สารวัลคาไนซ์ที่สำคัญของยางธรรมชาติคือ กำมะถัน ส่วนยางสังเคราะห์ใช้ Dicumyl peroxide (DCP) (พรพรม, 2528)

## 2.13 สารตัวเร่ง (Accelerator)

สารตัวเร่ง คือ สารที่ช่วยให้ปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น ได้เร็วขึ้น ซึ่งสารตัวเร่งนี้มีอิทธิพลในอัตราการเกิดการ เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ในยางมากน้อยเพียงใดนั้น ดูได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความหนืด (Mooney Viscometer) และ เครื่องทดสอบลักษณะการวัลคาไนซ์ (Monsanto Oscillating Disk Rheometer, ODR) ซึ่งการเลือกใช้สารตัวเร่งแต่ละชนิดนั้นก็เลือกใช้ตาม คุณสมบัติของสารตัวเร่ง ตามความต้องการของลักษณะการสุกของยาง (Cure)

การแบ่งสารตัวเร่งเป็นหมวดหมู่ตามลักษณะ โครงสร้างทางเคมีของสารตัวเร่งนั้นดังนี้

### 2.13.1 หมูไดโไฮคาร์บามेट (Dithiocarbamate)

2.13.1.1 เกลือแอมโมเนียม (Ammonium Salts) เช่น PIPC

2.13.1.2 เกลือโลหะ (Metal Salts) เช่น SDBC

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

2.13.2 หมูแซนเซท (Xanthates) เช่น SIX, ZIX, ZBX

2.13.3. หมูไชยแรม (Thiurams)

2.13.3.1 ไชยแรมโมโนซัลไฟด์ (Thiuram Monosulphides) เช่น TMTM

2.13.3.2 ไชยแรมไคซัลไฟด์ (Thiuram Disulphides) เช่น TMTD

2.13.4 หมูไชอาโซล (Thiazole)

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

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

2.13.6 หมูอัลเดคิไซด์อะมีน (Aldehyde Armine Accelerator) เช่น Hexamethylene Tetramine

2.13.7 หมูเบส (Basic Accelerators)

2.13.7.1 กัวนิดีน (Guanidine) เช่น DPG, DOTG

2.13.8 ลำดับการเร่งเรียงจากเร็วไปช้าดังนี้

แซนเซท > ไดโไฮคาร์บามेट > ไชยแรม > ไชอาโซล > ซัลฟินามีด > อัลเดคิไซด์อะมีน > กัวนิดีน

### 2.13.9 สารตัวเร่งที่ดีความมีลักษณะดังนี้

1. สุกเร็วและระยะเวลา ก่อนที่ยางสุกยาง
2. มีความว่องไวในการเร่งทำให้เกิดการเชื่อมโดยระหว่างไม้เล็กถูกสูง
3. กระจายตัวในยางได้ดี
4. ให้ FLAT CURE
5. ใช้งานได้ในอุณหภูมิกว้าง
6. ผสมเข้ากับสารเคมีตัวอื่นได้ดี
7. สามารถเก็บรักษาไว้ได้นานโดยไม่เสื่อม (ทั้งในรูปเดียว ๆ หรือผสมกับยางเหลว)
8. ไม่ทำให้คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยางด้อยลง
9. ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้

สารตัวเร่งที่นิยมใช้กันมากคือ สารตัวเร่งพลาสติกที่เป็นกรด ได้แก่ ไฮอาโซล ซัลฟีนา ไมด์ ไฮด্রอยแลน ไดไฮด์โรคาร์บามेट เป็นต้น (พรพรณ, 2528)

### 2.14 สารกระตุ้น (Activator)

สารกระตุ้น คือสารที่ช่วยเสริมให้สารตัวเร่งทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทำให้ยางสุกได้อย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะสารตัวเร่งพลาสติกไฮอาโซลสารกระตุ้นเบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

**2.14.1 สารกระตุ้นพลาสติกอนินทรีย์** ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่นิยมใช้คือ ซิงค์ออกไซด์ ( $ZnO$ ) เมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้นความต้านทานต่อการฉีกขาดเพิ่มขึ้นทำให้ยางมีโมดูลัส (Modulus) สูง รักษารูปทรงขณะทำการสุกในเม็ดพิมพ์ได้ ค่าระยะที่ยืดยาง (Elongation) จะลดลงเมื่อใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณมากขึ้น ปริมาณที่ใช้ 3-5 phr ขึ้นไป

ซิงค์ออกไซด์เบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ  $ZnO$  (White Seal) ลักษณะ เป็นผงสีขาวละเอียดแต่หยาบกว่า  $ZnO$  ACTIVE ใช้ในงานที่ต้องการสีขาวหรือสีสดและ  $ZnO$  (ACTIVE) ลักษณะ เป็นผงละเอียดสีเหลือง ใช้ในกรณียางสีดำ เกรดสีธรรมชาติ

**2.14.2 สารกระตุ้นพลาสติกอนินทรีย์** ได้แก่ พลาสติกไนมัน เน่น กรดสเตรียริก กรดปาล์มมิติก ที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมยางคือ กรดสเตรียริก มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่นจันลีนเมือ ช่วยในการบดผสมให้เร็วขึ้น (พรพรณ, 2528)

## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

#### 3.1 วัสดุ

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

3.1.2 ยางสไตรีนบิวตาไดอีนกรด 1502 (Styrene Butadiene Rubber, SBR 1502) เป็นยาง สังเคราะห์ชนิดหนึ่งซึ่งผลิตขึ้นมาทดแทนยางธรรมชาติ โดยมีสมบัติใกล้เคียงกับยางธรรมชาติแต่มี สมบัติเชิงกลต่างกว่ายางธรรมชาติ เป็นยางที่ใช้ในงานทั่วไปและราคาไม่แพง มีหลายเกรดขึ้นกับ กระบวนการสังเคราะห์

3.1.3 ยางบิวตาไดอีนกรด 0150 (Butadiene Rubber, BR 0150) เป็นยางสังเคราะห์ชนิดหนึ่ง ที่มีความยืดหยุ่นสูงมาก มีสมบัติเด่นคือทนต่อการสึกกร่อน จึงนิยมใช้ผสมกับยางธรรมชาติหรือ ยางเอสบีอาร์ในการผลิตดอยยางรถ Dynel หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ต้องการความทนต่อการสึกกร่อนสูง

3.1.4 กรดสเตียริก (Stearic acid) ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นพวกลินทรี ทำหน้าที่เพิ่ม ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น มีลักษณะเป็นเกล็ดสี ขาวๆ จัดจำหน่ายโดย บริษัทอมฟีเรียล อินดัสเตรียล เคมีคัลล์ จำกัด

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

3.1.6 เอ็น-ไซคลอເຊກຊີລ-2-ເບນໂຈ້ໂຮອເຊີລຊ້ລີັນໄມດໍ (N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulphenamide, CBS) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งในหมู่ซัลฟีนาไมค์ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยาง ไมดูแล้วสูงมากและมีสมบัติทางกลดี

3.1.7 เตตราเมทธิล ไธยแรม ไดซัลไฟฟ์ (tetramethyl thiuram disulphide, TMTD) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่งในกลุ่มไธยแรม ไดซัลไฟฟ์ โดยสารตัวเร่งในกลุ่มไธยแรมจัดได้ว่าเป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงพิเศษ สำหรับยางธรรมชาติ

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

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

3.1.10 แคลเซียมคาร์บอนेट (Calcium Carbonate) ทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมกึ่งเสริมประสิทธิภาพ มีลักษณะเป็นผงสีขาวหม่น จัดจำหน่ายโดย บริษัท Shiraishi Kogyo Kaisha Company Limited

3.1.11 ไช่น่าเคลย์ (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 เมื่อเติมลงไปในยางจะทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดีขึ้น จัดจำหน่ายโดย บริษัท USSL Degussa Group United Silica (Siam) Ltd.

3.1.14 ไดเอทิลเจลีนไกลคอล (Diethylene glycol, DEG) ทำหน้าที่เป็นสารลดประสิทธิภาพในการผสมในยางที่ใช้ซิลิกาเป็นสารตัวเติม ทำให้เวลาในการวัลภาไนซ์เร็วขึ้น จัดจำหน่ายโดย บริษัท จีโอเช้าท์ 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 ชัยเจริญการห่าง จำกัด

3.2.2. เครื่องทดสอบลักษณะการวัลภาชนะชั้งอย่าง (Oscillating disk rheometer, ODR) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาเวลาที่ยางเกิดการคงรูป (หรือหาอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาวัลภาชนะชั้ง) ประกอบด้วยจานโลหะ (Rotor) ที่มีลักษณะเป็นเหมือนรูปดดกหัว ตัววนบนจานโลหะเป็นรูปวงกลมมีเส้นนูนรอบๆ จานโลหะ เรียงตามแนวรัศมีของจานโลหะ จานโลหะเป็นโลหะแข็งส่วนล่างของจานโลหะจะต่อ กันแห่ง โลหะทรงกระบอกมีเหลี่ยม แก้วงทำมุน 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 เครื่องอัดไฮดรอลิกสามารถปรับตั้งค่าอุณหภูมิและความดันที่กระทำต่อยางได้ตามต้องการ

3.2.4. เครื่องวัดความหนา ใช้เครื่องไมโครมิเตอร์แบบแบนกลมวัดค่าความลະเอียดถูกต้อง +/- 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 หน้าจอเป็นระบบดิจิตอลสามารถตั้งค่าต่างๆ ได้ มีเซลล์รับแรง (load cell) เป็นตัวแปลงสัญญาณค่าแรงดึงผ่านวงจรอิเล็กทรอนิกส์เป็นค่าแรงในหน่วยนิวตัน

3.2.6. เครื่องชั่งไฟฟ้า (Electrical balance) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น LIBBOR EB-220 ผลิตโดย บริษัท Shimadzu corporation ซึ่งได้ละเอียด 0.01 กรัม สามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 2,200 กรัม

### 3.3 วิธีดำเนินการ

#### 3.3.1 การทดสอบความอ่อนค่าความเค้น

นำชิ้นทดสอบรูปด้านเบลล์ มาทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบความทนทานต่อแรงดึง โดยดึงให้ยกออกที่ระยะยืด 100 เมตรเซ็นต์ แล้วปล่อยให้คืนตัวกลับสู่สภาพที่มีแรงกระทำเป็นศูนย์ ซึ่งการดึงและการคืนกลับกระทำด้วยอัตราเร็วเท่ากับ 200 มิลลิเมตรต่อนาที ถือเป็นการทดสอบ 1 รอบ ทำการทดสอบเช่นเดียวกันนี้ 3 ครั้ง เป็นจำนวน 7-8 รอบ วัดแรงที่ใช้ในการยืดหรือเดดตัวทุกๆ ระยะยืด 20 เมตรเซ็นต์

การคำนวณผล ค่าความเค้น คำนวณดังนี้

$$\text{Stress (MPa)} = \frac{\text{F}}{\text{A}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.1)$$

โดยที่ F = แรงที่ใช้ (นิวตัน)

A = พื้นที่หน้าตัดของยางขณะที่ไม่ได้ยืด (ตารางมิลลิเมตร)

การคำนวณผลค่าความเครียด คำนวณดังนี้

โดยที่  $L$  = ระยะห่างระหว่างปีดขยะที่ย่างขาดพ่อคิ (เซนติเมตร)

$L_0$  = ระยะห่างระหว่างเส้นที่ขีดบนยางเดิม (เซนติเมตร)

### 3.3.2 ศึกษาเปรียบเทียบความอ่อนค่าความเสี่ยงระหว่างย่างสังเคราะห์กับย่างธรรมชาติ

ในการทดลองนี้ใช้ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ ยางสไตรีนบิวตาไดอิน และยางบิวตาไดอิน โดยไม่ผสมสารตัวเติมและใช้การวัดค่าในช่วงค่าระบบกำมะถันปกติ ผสมยางกับสารเคมีตามสูตรมาตรฐาน ASTM D 3184-80 ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมเพนซ์

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

ทำการทดสอบย่างกับสารเคมีโดยใช้เครื่องทดสอบย่างสองลูกกลิ้ง 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

หลังจากนั้นนำยางคอมท่อปานด์ที่ได้ไปทดสอบลักษณะเฉพาะของการวัดความในช่อง

### 3.3.3 การทดสอบลักษณะการวัลภาชนะของยางคอมเปนเดิร์

นำยางคอมเปนเดิร์มาทำการทดสอบลักษณะการวัลภาชนะซึ่งด้วยเครื่อง Oscillating Disk Rheometer รุ่น GOTECH GT-7070-2S ตามมาตรฐาน ASTM D 2084-81 ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เมื่อนำยางคอมเปนเดิร์ใส่ลงในห้องไส้ยางที่ปิดมิดชิด ใช้ความดันกดยางให้อยู่ภายใต้ห้องน้ำในห้องมีจานโลหะรูปกรวยป้านสองด้านประบกันอยู่ (Biconical disk) งานโลหะดังกล่าวจะถูกห่อหุ้มด้วยยางคอมเปนเดิร์ที่ใส่เข้าไป การทดสอบถือว่าสิ้นสุดถึงเวลาที่กำหนดไว้ จากนั้นหาช่วงเวลาที่สามารถแปรรูปยางคอมเปนเดิร์ (scorch time ( $t_1$ ), min) หาเวลาในการวัลภาชนะซึ่ง (Cure time ( $t_{90}$ ), min)

### 3.3.4 การอัดยางเข้าแม่พิมพ์

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

### 3.3.5 การเตรียมตัวอย่างขั้นทดสอบ

ตัวอย่างขั้นทดสอบเตรียมตามมาตรฐาน ASTM D 412-80 ขั้นทดสอบแบบดัมเบลล์ เตรียมได้จากการตัดแผ่นยางคุณภาพดีที่มีรูปแบบตามมาตรฐานที่ต้องการตัวยี่ห้อที่มีลักษณะแบบกดตัดครึ่งเดียว เมื่อได้ขั้นทดสอบแล้วให้นำมาทำเครื่องหมาย ระยะห่างจะใช้ระยะห่างในการทดสอบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร การวัดความหนาของตัวอย่างยาง

### 3.3.6 ศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์

ยางสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ยางสไตรีนบิวตาไคลอีน และยางบิวตาไคลอีน วัลภาชนะซึ่งระบบกำมะถันปกติ โดยใช้สารตัวเติม 5 ชนิด คือ เวนม่าไดเกอร์ N330 และ N660 แคลเซียมคาร์บอเนต ไนน่าเคลย์ ทัลคัม และซิลิกา ในปริมาณ 40 phr ผสมยางกับสารเคมีตามสูตรมาตรฐาน ASTM D 3182-74 ดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 นำยางคอมเปนเดิร์ที่ได้ทดสอบลักษณะการวัลภาชนะซึ่งของยางคอมเปนเดิร์ ตามวิธีในข้อ 3.3.3 และนำยางอัดเข้าแม่พิมพ์ตามวิธีในข้อ 3.3.4 จากนั้นนำยางที่ได้ตัดขั้นทดสอบตามวิธีในข้อ 3.3.5 นำขั้นทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบความอ่อนค่าความเค้นตามวิธีในข้อ 3.3.1

ตารางที่ 3.2 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมยางคอมเพ่นด์ของยางบีอาร์

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 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมเพ่นด์ของยางเอสนีอาร์

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 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเข้ม่าดำที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์  
ยางสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ยางสไตรีนบิวตาไครอีนและยางบิวตาไครอีน วัสดุ  
ภายในซึ่ดวยระบบกำมะลันปกติ โดยใช้สารตัวเติม คือ เข้ม่าดำเกรด N 330 ในปริมาณ 10, 20, 30, 40  
และ 50 phr ทดสอบยาน้ำกับสารเคมีตามสูตรมาตรฐาน ASTM D 3182-74 คั่งตารางที่ 3.4 และ 3.5  
นำยางคอมเพ่นด์ที่ได้ทดสอบลักษณะการวัตถุภายในซึ่งของยางคอมเพ่นด์ ตามวิธีในข้อ 3.3.3 และนำ  
ยางอัดเข้าเบ้าพิมพ์ตามวิธีในข้อ 3.3.4 จากนั้นนำยางที่ได้ตัดชิ้นทดสอบตามวิธีในข้อ 3.3.5 นำชิ้น  
ทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบความอ่อนค่าความเค้นตามวิธีในข้อ 3.3.1

ตารางที่ 3.4 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมเพ่นด์ของยางบีอาร์

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 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมเพ่นด์ของยางเอสบีอาร์

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 ศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลค่าไนซ์ที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยาง

#### สังเคราะห์ที่มีเข้มข้นประมาณ 40 phr

ยางสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบนี้ คือ ยางสไตรีนบิวตาไดอีนและยางบิวตาไดอีน ผสมเข้มข้นประมาณ 40 phr โดยใช้การวัลค่าไนซ์ 4 ระบบ คือ ระบบกำมะถันปกติ ระบบอีวี ระบบเซนิวี ระบบสารให้กำมะถันผสมยางกับสารเคมีตามสูตร ดังตารางที่ 3.6 และ 3.7 นำยางคอมเปนเดิร์ท์ที่ได้ทดสอบลักษณะการวัลค่าไนซ์ของยางคอมเปนเดิร์ท ตามวิธีในข้อ 3.3.3 และนำยางอัดเจ้าเบ้าพิมพ์ตามวิธีในข้อ 3.3.4 จากนั้นนำยางที่ได้ตัดชิ้นทดสอบตามวิธีในข้อ 3.3.5 นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบความอ่อนค่าความเค้นตามวิธีในข้อ 3.3.1

ตารางที่ 3.6 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมเปนเดิร์ทของยางบีอาร์

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 ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในสูตรยางคอมเปนเดิร์ทของยางเอสนีอาร์

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 ศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วในการผิดรูปที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์**

**3.3.9.1 ยางที่ไม่สมสารตัวเติม**

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

**3.3.9.2 ยางที่สมสารตัวเติม**

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

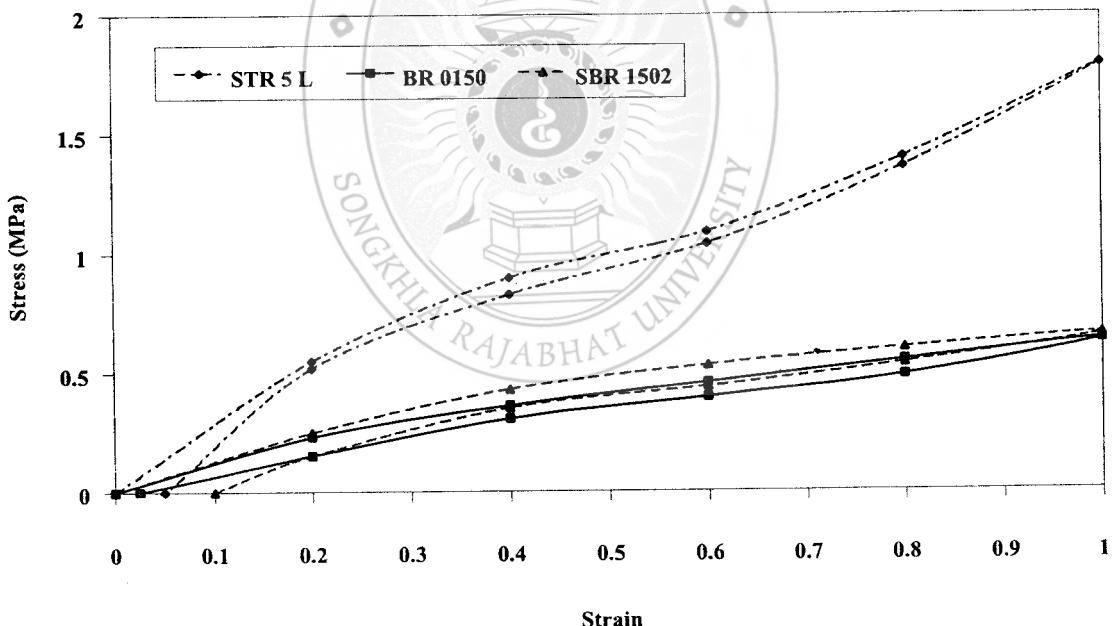


## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดสอบ

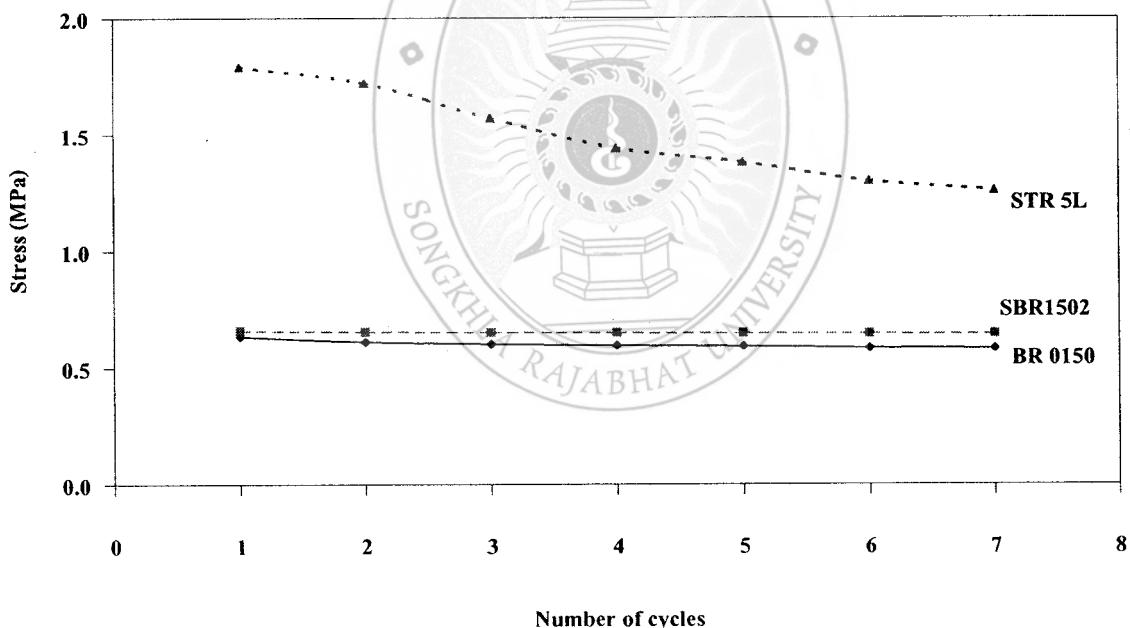
#### 4.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบความอ่อนค่าความเดินระหว่างยางสังเคราะห์กับยางธรรมชาติ

จากการทดสอบความเดินที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ของยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเอสทีอาร์ 5 แอล, ยางเอสบีอาร์ 1502 และยางบีอาร์ 0150 ที่อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปของเรกนีลักษณะดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเดินกับความเครียดของยางสังเคราะห์กับยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

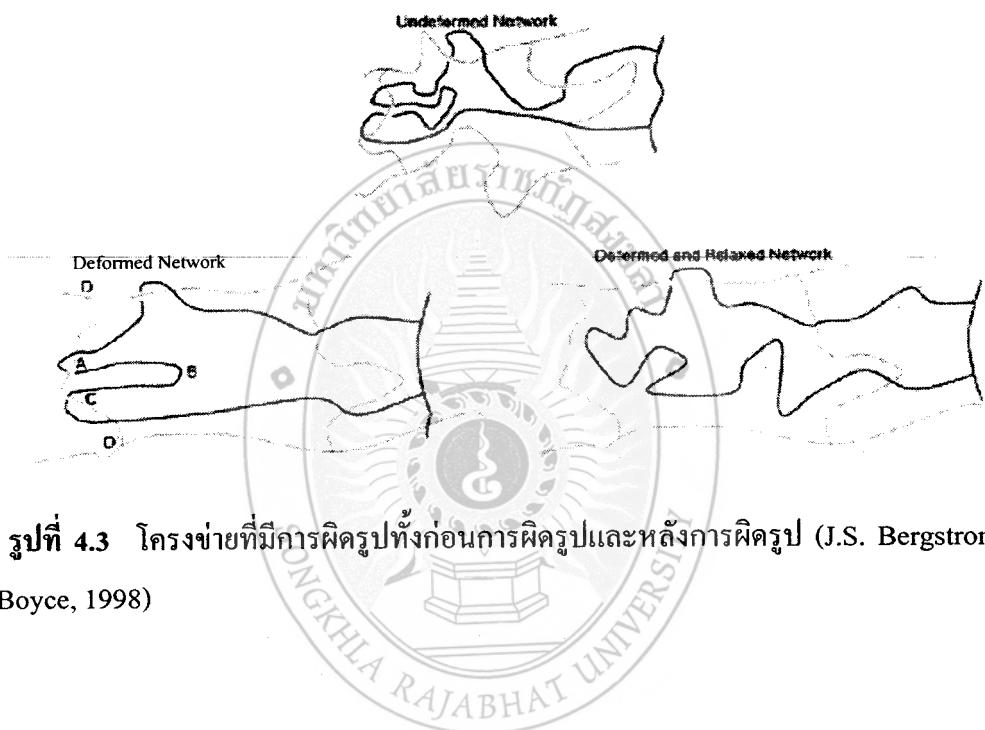
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.1 พบว่า ยางธรรมชาติชนิดยางแท่งเอสทีอาร์ 5 แสดงจะมีลักษณะ Loop ที่แนบกว่ายางเอสบีอาร์ 1502 และยางบีอาร์ 0150 เนื่องจากยางธรรมชาติไม่สามารถพลังงานไว้ในตัวมัน เมื่อได้รับแรงกระทำทำให้ความร้อนสะสมในยางน้อย ลักษณะ Loop จึงแคบ (พรพรผล, 2540) แต่ในยางเอสบีอาร์จะมีความร้อนสะสมเกิดขึ้นสูง ลักษณะ Loop จึงกว้างกว่ายางธรรมชาติ (บุญธรรม, 2530) ในยางธรรมชาติจะมีความเค้นสูงกว่ายางสังเคราะห์ เนื่องจากการมีโครงสร้างโน้ตเลกุลที่สม่ำเสมอทำให้โน้ตเลกุลของยางธรรมชาติ สามารถถูกผลักได้ขณะดึง โดยผลักที่เกิดขึ้นเป็นตัวเสริมความแข็งแรงจึงทำให้ยางธรรมชาติแข็งแรงโดยตัวมันเอง ยางธรรมชาติจึงมีความเค้นสูงกว่ายางที่ไม่ตอกผลักขณะดึง ซึ่งในยางสังเคราะห์ทั้งยางบีอาร์และยางเอสบีอาร์เป็นยางที่มีวิภาวดีอิน การเรียงตัวของอนองมอร์ไม่เป็นระเบียบ ทำให้โน้ตเลกุลไม่สามารถถูกผลักได้ขณะดึง (พรพรผล, 2535) ยางสังเคราะห์จึงมีความแข็งแรงต่ำ ความเค้นของยางจึงต่ำกว่ายางธรรมชาติ ยางเอสบีอาร์ให้ค่าความเค้นสูงกว่ายางบีอาร์ เนื่องจากยางเอสบีอาร์มีสไตรีนอยู่ในโคโพลิเมอร์จึงทำให้ยางเอสบีอาร์มีความแข็งแรงกว่ายางบีอาร์ค่าความเค้นจึงสูงกว่ายางบีอาร์ (แม่นและสมชัย, 2541)



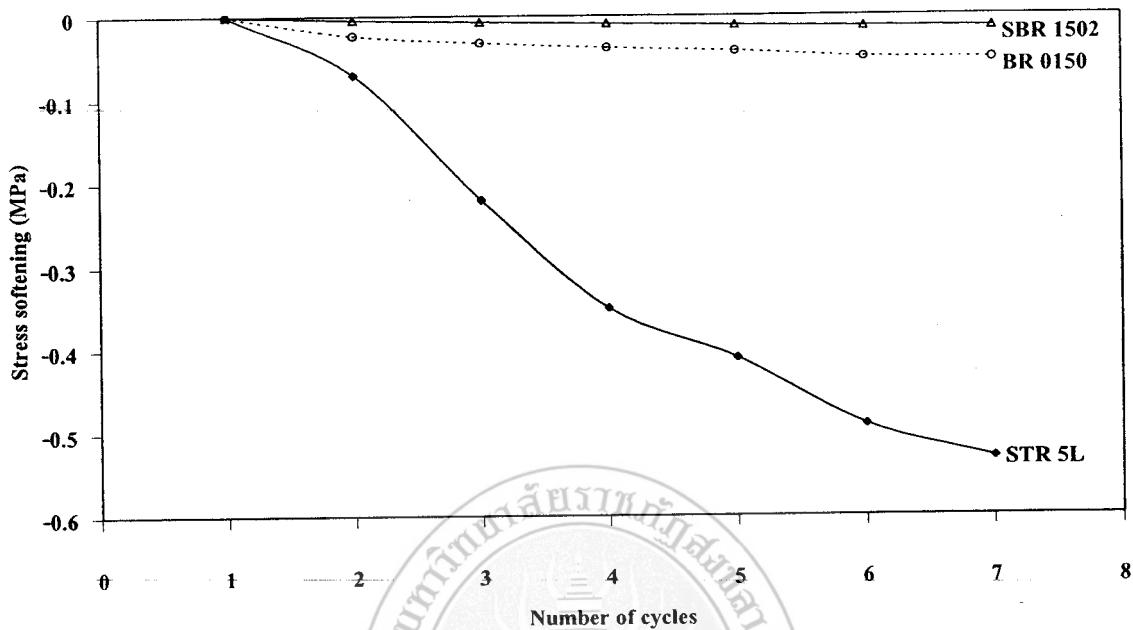
รูปที่ 4.2 ความอ่อนค่าความเค้นของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ไม่ผสมสารตัวเดิน

เมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำๆ แล้วนำค่าความเค้นที่รับยึด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิดรูปเต่าตะกรอบแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่า ค่าความเค้นของยางธรรมชาติลดลงตามจำนวนรอบในการดึงที่เพิ่มขึ้น โดยยางธรรมชาติมีค่าความเค้นลดลงมากกว่ายางบีอาร์ 0150 และยางเอสบีอาร์ 1502 ตามลำดับ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นยางที่มีความสม่ำเสมอในโครงสร้างโน้ตเลกุล ทำให้ยาง

ธรรมชาติตกพลีกได้เมื่อยืด ความคืบจึงสูง แต่ในยางเอสนบีอาร์มีกิ่งก้าน ทำให้การเชื่อมโยงเกิดแบบหลวม ๆ จึงทำให้โครงสร้างเป็นแบบไม่มีรูปร่างพลีก ความแข็งแรงของพันธะจึงลดลง ค่าความคืบจึงลดลงด้วย (แม่นและสมชัย, 2541) ยางเอสนบีอาร์ให้ค่าความคืบสูงกว่ายางบีอาร์ เนื่องจากยางเอสนบีอาร์มีสไตรินอยู่ในโครงโพลิเมอร์ซึ่งทำให้ยางเอสนบีอาร์มีความแข็งแรงกว่ายางบีอาร์ ค่าความคืบจึงสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากมีการเปลี่ยนท่าทางของโครงข่ายโมเลกุล คือ ตำแหน่งของจุดเชื่อมโยง และจุดเกี่ยวพันกันของเส้นโมเลกุลย้ายที่ไปจากตำแหน่งเดิม ดังรูปที่ 4.3 ทำให้ใช้แรงน้อยลงในการผิดรูปครั้งหลังๆ (ปรีชา, 2541)



รูปที่ 4.3 โครงข่ายที่มีการผิดรูปทั้งก่อนการผิดรูปและหลังการผิดรูป (J.S. Bergstrom และ M.C. Boyce, 1998)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม

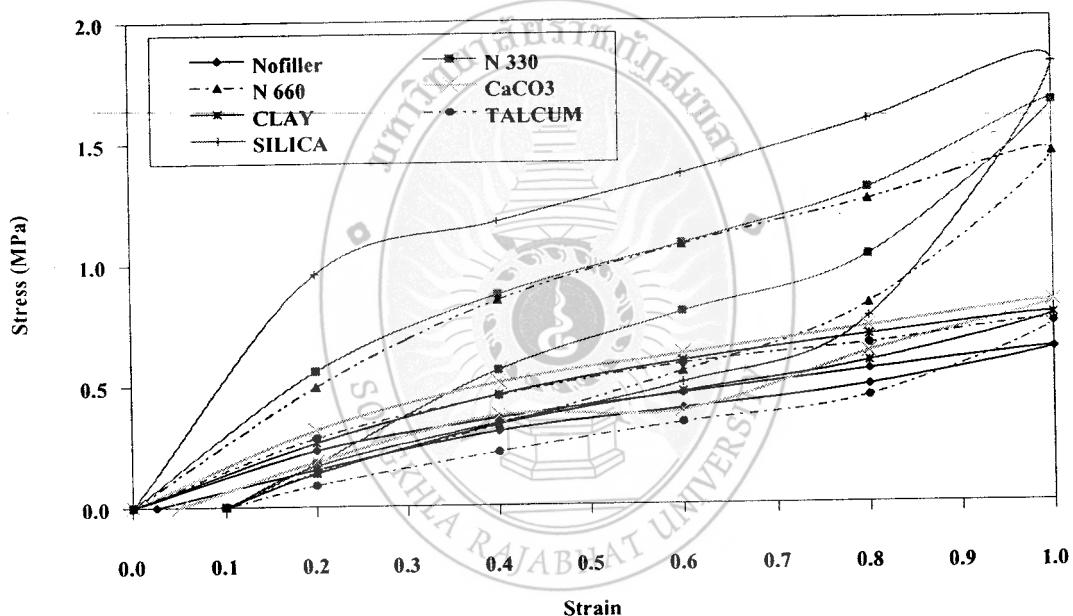
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมลักษณะดังรูปที่ 4.4 พบว่ายางธรรมชาติมีการลดลงของความเค้นสูงกวายางสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด ที่เป็นเห็นนี้เนื่องจากยางธรรมชาติมีสูตรโครงสร้างไม่เกลูลเป็น cis-1,4-polyisoprene มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนล้วน มีโครงสร้างไม่เกลูลที่สม่ำเสมอทำให้มีความแข็งแรงกวายางสังเคราะห์ เมื่อจำนวนรอบในการดึงเพิ่มขึ้นการลดลงของความเค้นของยางธรรมชาติจะลดลงมากเนื่องจากโครงสร้างที่สม่ำเสมอเมื่อถูกกระทำซ้ำๆ โครงสร้างจะจัดเรียงตัวอย่างสมบูรณ์แรงที่ใช้จึงลดลง ซึ่งยางธรรมชาติมีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นในตัวเมื่อถูกแรงกระทำสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้มาก เมื่อยืดออกครั้งหลังๆ แรงที่ดึงจะน้อยลงแต่ต้องใช้แรงอยู่ตลอด แต่ยางสังเคราะห์เมื่อถูกกระทำครั้งแรกยางจะเกิดการผิดรูปเกือบสมบูรณ์ทำให้กลับคืนสู่สภาพเดิมได้น้อยเมื่อดึงครั้งต่อไปแรงที่ใช้จะสม่ำเสมอ ซึ่งยางสังเคราะห์เมื่อยืดออกแล้วจะคืนกลับได้น้อย เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยทำให้การลดลงของความเค้นของยางสังเคราะห์น้อยกวายางธรรมชาติ

## 4.2 ผลการศึกษาอิทธิพลของชนิดสารตัวเติมที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยาง

### สังเคราะห์

#### 4.2.1 ยางบีอาร์

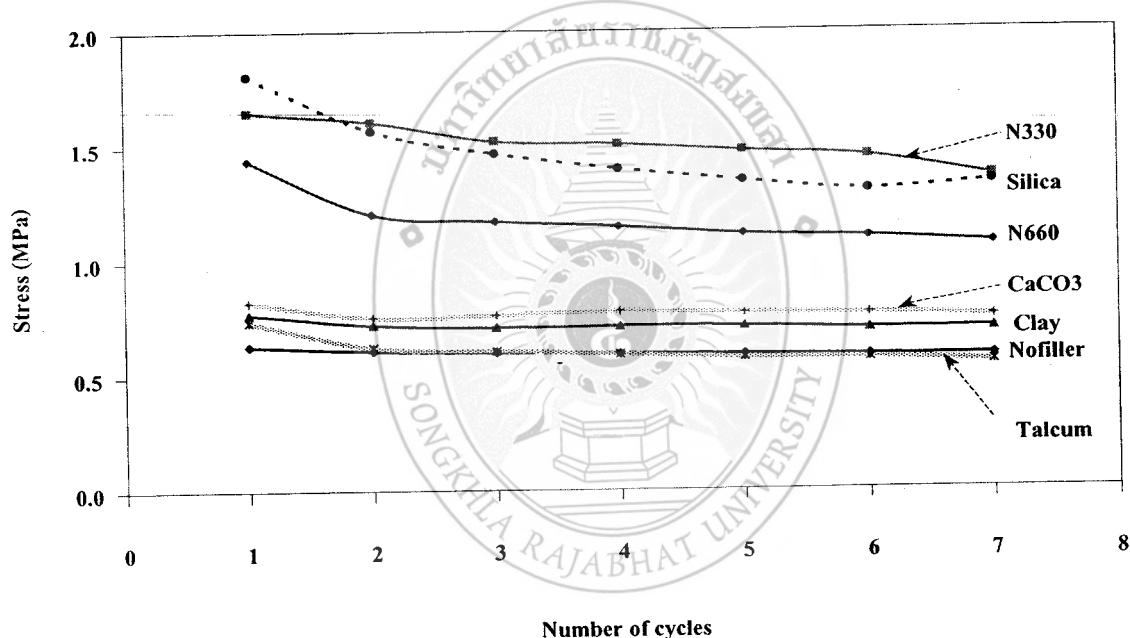
ศึกษาชนิดสารตัวเติมต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ ใช้สารตัวเติม 5 ชนิด คือ เนม่าดำเกรด N 660 และ N 330, แคลเซียมคาร์บอนเนต, ไชนาเคลย์, ทัลคัมและซิลิกา ในปริมาณ 40 phr ซึ่งวัสดุในชุดระบบกำมะถันปอกตี ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปของยางมีลักษณะรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก ลักษณะดังรูปที่ 4.5 พบว่ายางบีอาร์ที่ผสมสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพได้แก่ เนม่าดำและซิลิกา ทำให้ยางบีอาร์แข็งแรงขึ้นซึ่งยางบีอาร์เป็นยางที่ไม่ตกลหลักณะดึงยางทำให้มีองค์ประกอบต้องใช้สารตัวเติมที่เป็นตัวเสริมประสิทธิภาพยางจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 9 หรือ 10 เท่าตัว (พรพรรณ, 2535) เมื่อสังเกตรูปที่ 4.5 ซิลิกาจะมีความกว้างของ Loop มากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นๆ เนื่องจาก ซิลิกาเป็น

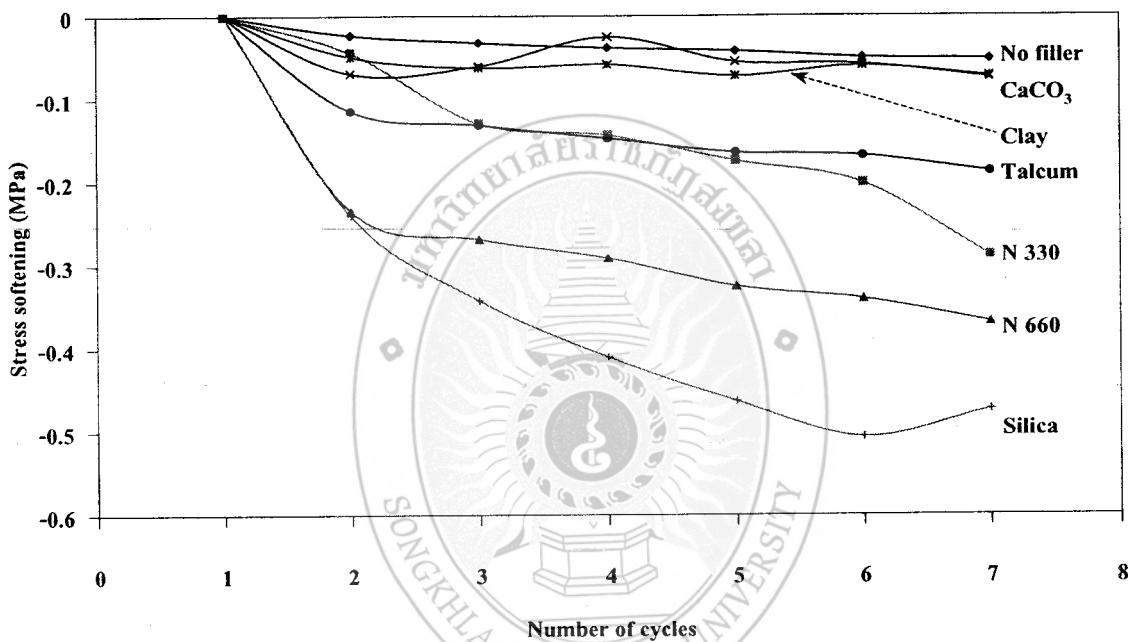
สารตัวเติมที่มีขนาดเล็กกว่าเบน่าค่าเดียวและยังเป็นตัวเสริมประสิทธิภาพเมื่อผสมกับยางบีโอาร์ ที่ต้องใช้สารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพจึงให้ค่าความเค้นสูงและมีพลังงานเก็บสะสมความร้อนเอาไว้มาก จึงมีความกว้างของ Loop มาก ซึ่งเป็นสารที่มีขั้นชั้นยางบีโอาร์เป็นยางที่ไม่มีขั้วทำให้เกิดพันธะกับซิลิกาได้ไม่ดีมากนัก เมื่อมีแรงมาระทำกับยางในครั้งแรกต้องใช้แรงดึงมากกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมชนิดอื่น เพราะซิลิกาเป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพและมีขนาดอนุภาคเล็กทำให้กระจายตัวในยางได้ดีเมื่อยางครั้งแรกใช้แรงมากเมื่อปล่อยแรงกลับพลังงานที่สะสมไว้ในเนื้อยางมาก แรงที่ใช้จึงน้อย Loop จึงกว้าง สารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอนेट, ไชน่าเคลย์, ทัลคัม เป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเบน่าค่าเดียวและซิลิกา ทำให้เมื่อผสมกับยางการกระจายตัวได้ไม่ดีเท่ากับยางที่มีอนุภาคเล็กกว่า ค่าความเค้นของยางจึงน้อยกว่ายางผสม เบน่าค่าและซิลิกา



รูปที่ 4.6 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 40 phr

เมื่อพิจารณาความอ่อนค่าความเค้นของยางบีโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 40 phr ลักษณะดังรูปที่ 4.6 สารตัวเติมที่มีอนุภาคเล็กจะมีความเค้นสูงเมื่อจำนวนรอบในการดึงเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงมาระทำให้เกิดการผิดรูปช้าๆ กัน ทำให้เส้นโน้ตกลุบของยางเกิดการเปลี่ยนท่าการวางตัว เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างข่ายจุดเชื่อมโยงพันธะ จึงใช้แรงน้อยในการดึงครั้งหลังๆ จะสังเกตได้วายางที่ผสมสารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพ เช่น เบน่าค่า N 330, N 660 และ

ซิลิกาจะมีความอ่อนค่าความเค็นที่ลดลงของแต่ละรอบในการดึงมากกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอนเนต, ไชน่าเคลร์, ทัลคัม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยางที่ผสมสารตัวเติมเม่าดำเน N 330, N 660 และซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็ก เมื่อผสมกับยางทำให้ยางมีความแข็งแรงมาก แรงที่ใช้จึงมาก ความอ่อนค่าความเค็นของยางในแต่ละรอบการดึงจะลดลงมากกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมที่ไม่เสริมประสิทธิภาพทำให้มีความแข็งแรงน้อยลงที่ใช้จึงน้อยส่งผลให้ความอ่อนค่าความเค็นของยางในแต่ละรอบการดึงลดลงน้อยกว่า



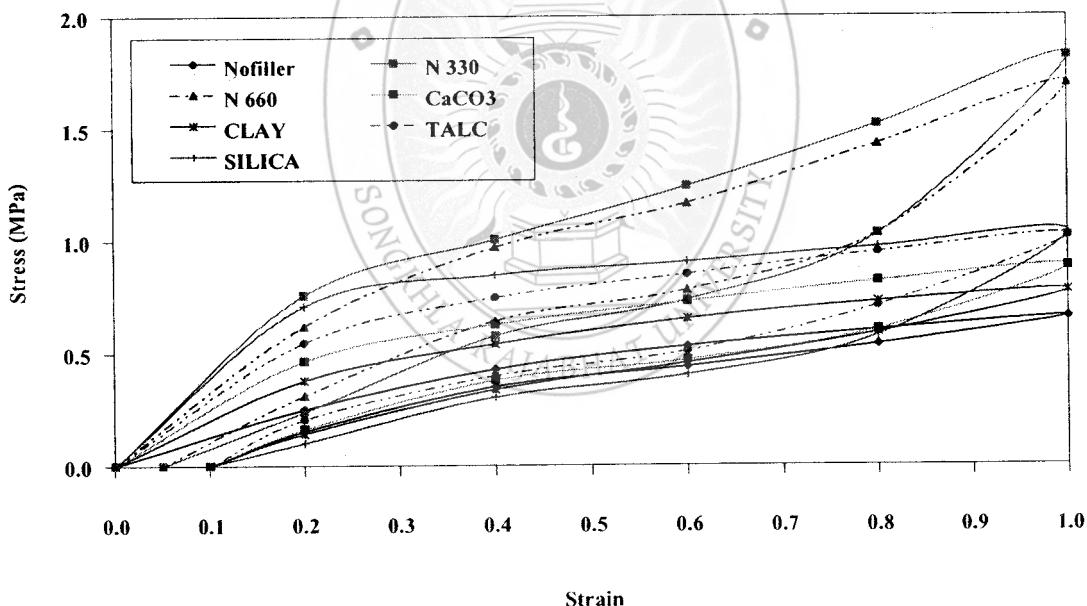
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค็นในยางบีโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค็นในยางบีโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ลักษณะดังรูปที่ 4.7 การลดลงของความเค็นในซิลิกานี้จะมีการลดลงของความเค็นมากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพื้นผิวของสารตัวเติมต่างชนิดกันการกระจายตัวจะแตกต่างกัน ที่เห็นได้ชัด พื้นผิวของซิลิกาพื้นที่ผิวที่ร่วมตัวกันจะแตกต่างกันที่การเชื่อมโยงกันของพื้นผิวซิลิกาจะแผ่ขยายออกมากกว่าก้อนจะรวมตัวกัน แต่กรณีของเขม่าดำเนการเชื่อมโยงจะเชื่อมต่อ กันที่บริเวณของพื้นผิวการคลอบคลุมจะน้อย พื้นที่ผิวของการกระจายของซิลิกาจึงกระจายตัวสูงกว่าเขม่าดำเน (Wang.Meng-Jiao ,1998) เมื่อเกิดการผิดรูปضاาๆ จำนวนรอบที่เพิ่มขึ้น ความเค็นลดลงเนื่องจากการ

ปรับตัวและการไฟลของ การพิครูป เป็นการลีน ไอลของเส้น โนเกลูลของโครงข่ายโครงสร้างพื้นที่ผิว ของซิลิกาจะเกิดการแตกหักแต่ละรอบมากกว่าสารตัวเติมชนิดอื่น ทำให้สังเกตได้ชัดถึงการลดลง ของความกึ่งของซิลิกา ส่วนสารตัวเติมชนิดอื่นที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ เช่น แคลเซียมคาร์บอนเนต, ไนร่าเคลล์ และ ทัลคัม นั้นจะมีรอยตำหนิเล็กๆ แต่ไม่ถือว่าเป็นสาเหตุของการลดลง ความกึ่งของซิลิกาที่ แรง ที่ใช้ในการดึงยางจึงน้อยกว่าการลดลงของความกึ่งของซิลิกา (C.M.Blow, 1978)

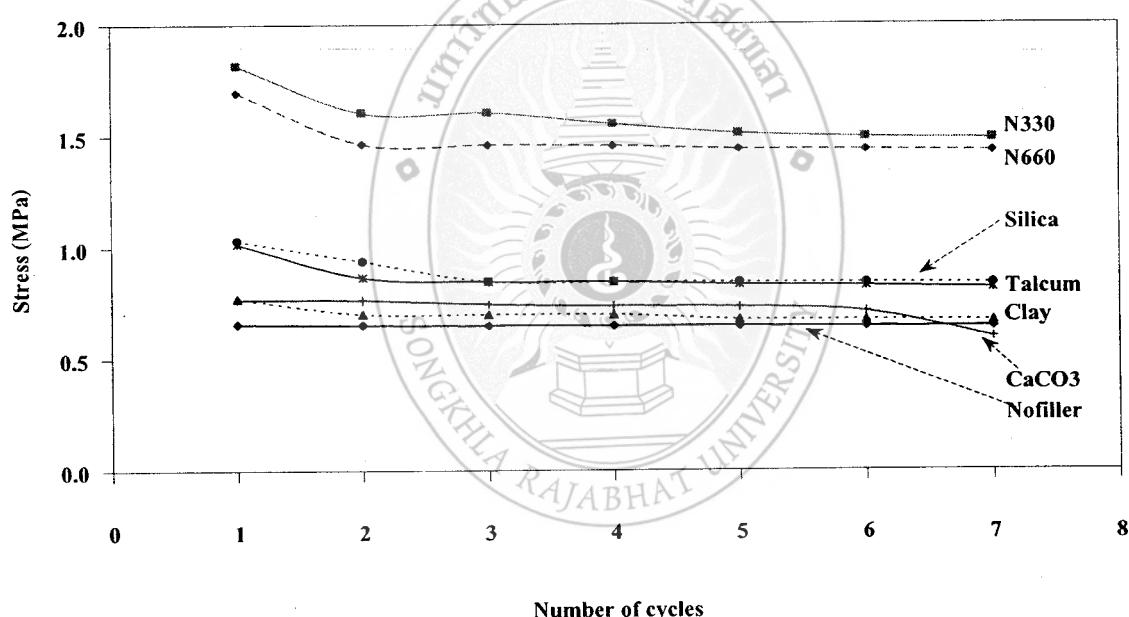
#### 4.2.2 ยางเอสบีอาร์

ศึกษาชนิดสารตัวเติมต่อความอ่อนค่าความกึ่งของยางเอสบีอาร์ ใช้สารตัวเติม 5 ชนิด คือ เขม่าดำเกรด N 660 และ N 330, แคลเซียมคาร์บอนเนต, ไนร่าเคลล์, ทัลคัมและซิลิกา ในปริมาณ 40 phr ชั่วเวลาในชุดวัสดุระบบกำมะถันปกติ ทดสอบความกึ่งที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการพิครูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการพิครูปของแรงมี ลักษณะดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความกึ่งกับความเครียดของยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 40 phr ชั่วเวลา 200 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้เกิดการพิครูปครั้งแรก

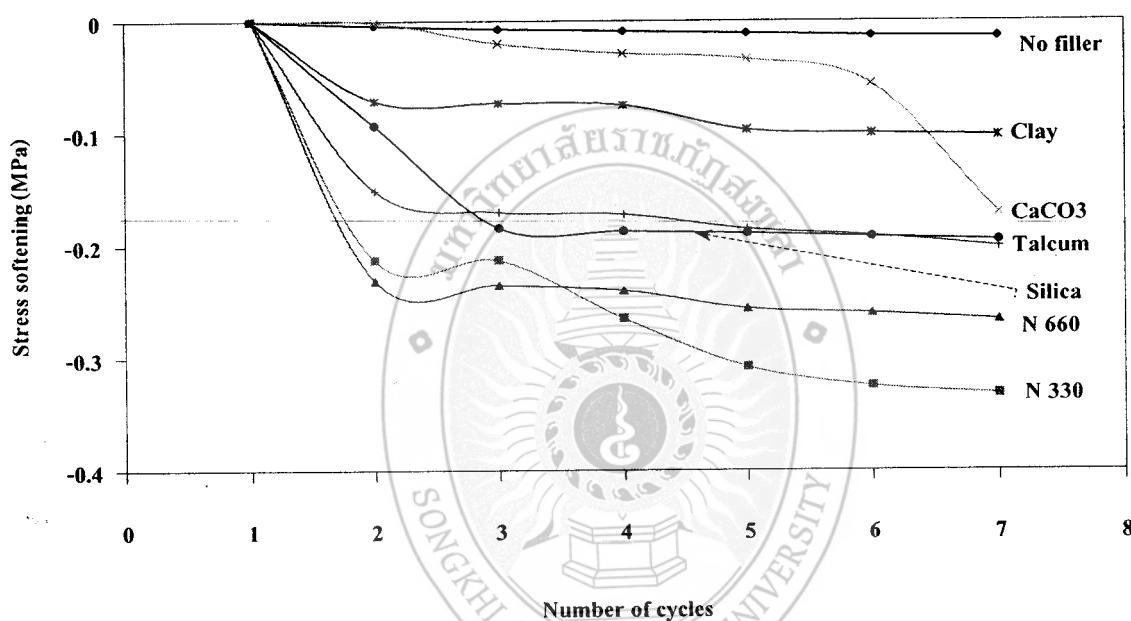
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความคื้นกับความเครียดของยางเอกสารที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรกลักษณะดังรูปที่ 4.8 พบว่ายางที่ใช้เขม่าดำเกรด N 330 เป็นสารตัวเติม จะมีค่าความคื้นสูงที่สุดรองลงมาคือ เขม่าดำเกรด N 660, ซิลิกา, ทัลคัม, แคลเซียมคาร์บอนेट, ไชน่าเคลล์ และยางที่ไม่มีสารตัวเติม ตามลำดับ ที่เป็นเห็นนี้เนื่องจากเขม่าดำเกรด N 330 เป็นสารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพและมีนาโนขนาดเล็กมาก เมื่อผสมกับยางจึงสามารถกระจายเข้าในยางและเกิดการเชื่อมโยงพันธะได้ดีกว่าสารตัวเติมชนิดอื่นๆ ค่าความคื้นจะสูง แต่ในสารตัวเติมไม่เสริมประสิทธิภาพและมีขนาดอนุภาคใหญ่เมื่อผสมในยางการกระจายตัวกระจายสม่ำเสมอได้ยากในยาง เม็ดตัวเติมที่ไม่กระจายทำให้เกิดความเข้มความคื้นขึ้นเมื่อยางถูกดึง จึงทำให้ความแข็งแรงของยางลดลง ความคื้นจะลดลง (ปรีชา, 2542)



รูปที่ 4.9 ความอ่อนค่าความคื้นของยางเอกสารที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในปริมาณ 40 phr

เมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำๆ แล้วนำค่าความคื้นที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิดรูปแต่ละรอบแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าความอ่อนค่าความคื้นของยางเอกสารที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่างๆ มีความอ่อนค่าความคื้นของยางลดลงเมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างของตัวโครงข่ายโมเลกุล จากการยืดที่ของจุดครอสลิงค์และจุดเกี่ยวพันจากตำแหน่งเดิม มีผลให้ใช้แรงน้อยลงในการดึงครั้งหลัง ความคื้นจะลดลง (ปรีชา, 2542)

จะสังเกตได้ว่ายางที่ผสมสารตัวเติมที่เสริมประสิทธิภาพ เช่น เบ้าดำ N 330, N 660 และซิลิกาจะมีความอ่อนค่าความเค้นที่ลดลงของในแต่ละรอบในการดึงมากกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมแคดเซียมคาร์บอนเนต, ไนไนโคลีท, ทัลคัม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยางที่ผสมสารตัวเติมเบ้าดำ N 330, N 660 และซิลิกามีขนาดอนุภาคเล็กเมื่อผสมกับยางทำให้ยางมีความแข็งแรงมากจะเกิดการพิครูปมากความอ่อนค่าความเค้นของยางในแต่ละรอบการดึงจะลดลงมากกว่ายางที่ผสมสารตัวเติมที่ไม่เสริมประสิทธิภาพทำให้มีความแข็งแรงน้อยลงที่ใช้งานอย่างส่งผลให้ความอ่อนค่าความเค้นของยางในแต่ละรอบการดึงลดลงน้อยกว่า



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสนีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางเอสนีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ ในปริมาณ 40 phr ลักษณะดังรูปที่ 4.10 พบว่า เบ้าดำมีการลดลงของความเค้นมาก เนื่องจากเมื่อผสมเข้ามาในยาง เบ้าดำจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของยางจะเกิดปฏิกิริยาการเข้ากันโดยกับยาง ทำให้ยางแข็งแรงขึ้น (Banks and Potter, 1997) เบ้าดำมีสมบัติเสริมประสิทธิภาพสูงจะมีการจัดเรียงตัวของสาร์บอนอะตอมไม่เป็นระเบียบยิ่งเข้าดำมีขนาดอนุภาคเล็กยิ่งขึ้นการจัดเรียงตัวของสาร์บอนอะตอมก็ยิ่งไม่เป็นระเบียบมากขึ้นลักษณะผิวจะมีผลต่อการเสริมประสิทธิภาพทำให้มีแรงมากการทำเข้าด้วยการจัดเรียงตัว

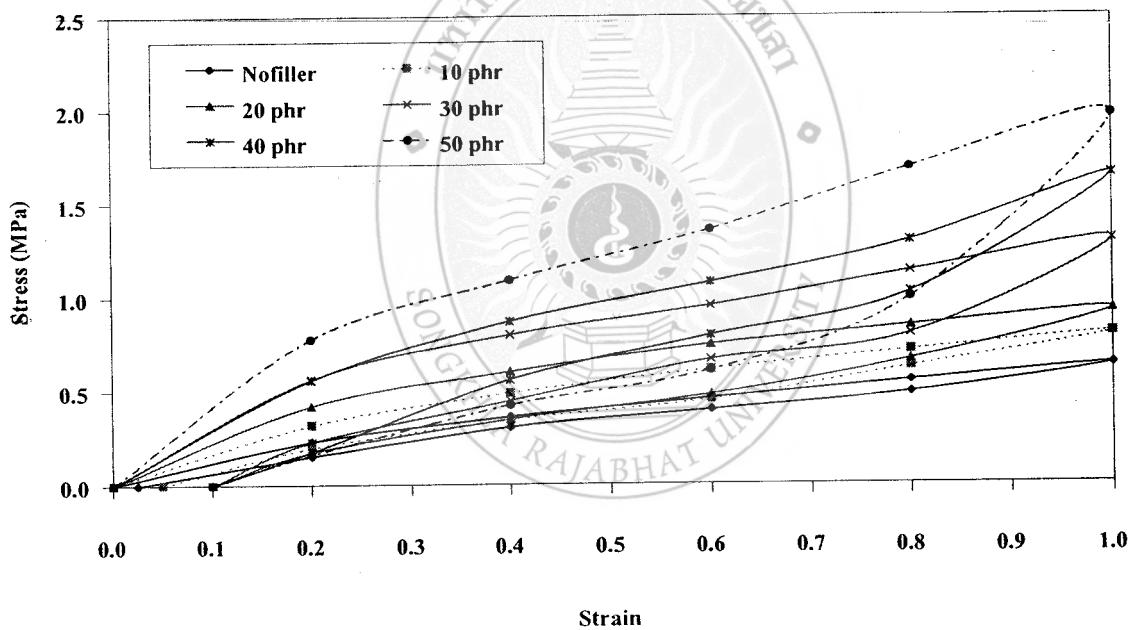
ของสารบอนอะตอมกึ่งเป็นระเบียบการลดลงของความเค้นเจ็งลดลงมากกว่า สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า เช่น แคลเซียมคาร์บอนेट ไนท์เคลย์และทัลคัม (พรพรม ,2528)

#### 4.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของปริมาณเขม่าดำที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยาง

##### สังเคราะห์

###### 4.3.1 ยางบีอาร์

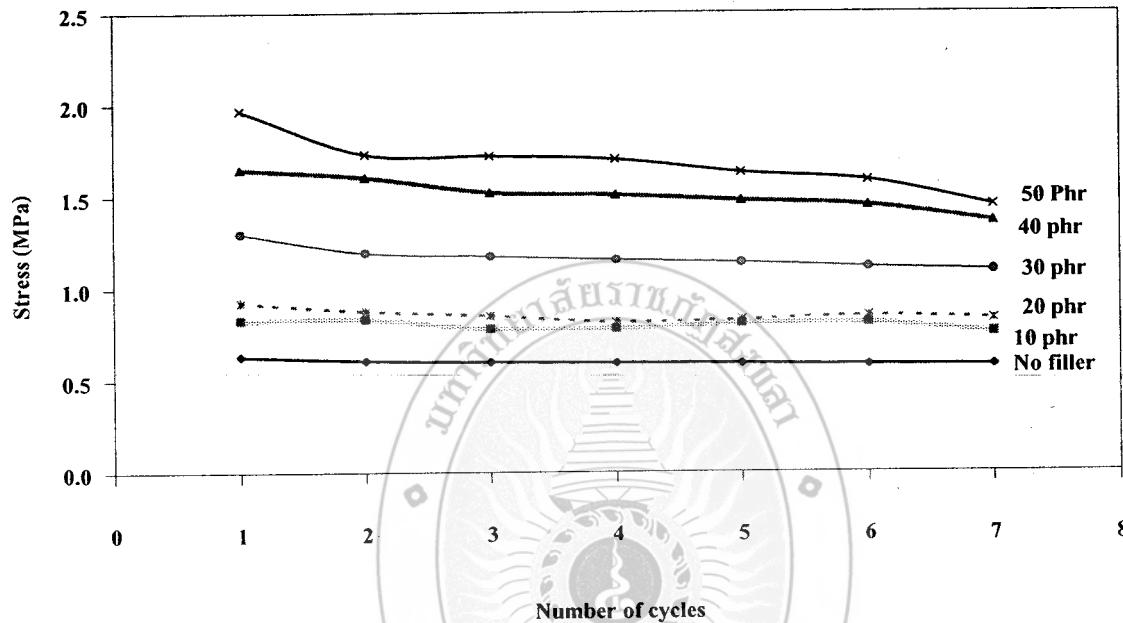
ศึกษาปริมาณเขม่าดำต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ แปรปริมาณเขม่าดำเกรด N 330 เป็น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ซึ่งวัสดุในชุดระบบกำมะถันปักกิ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปลอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปปะร้อนแรกมีลักษณะดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

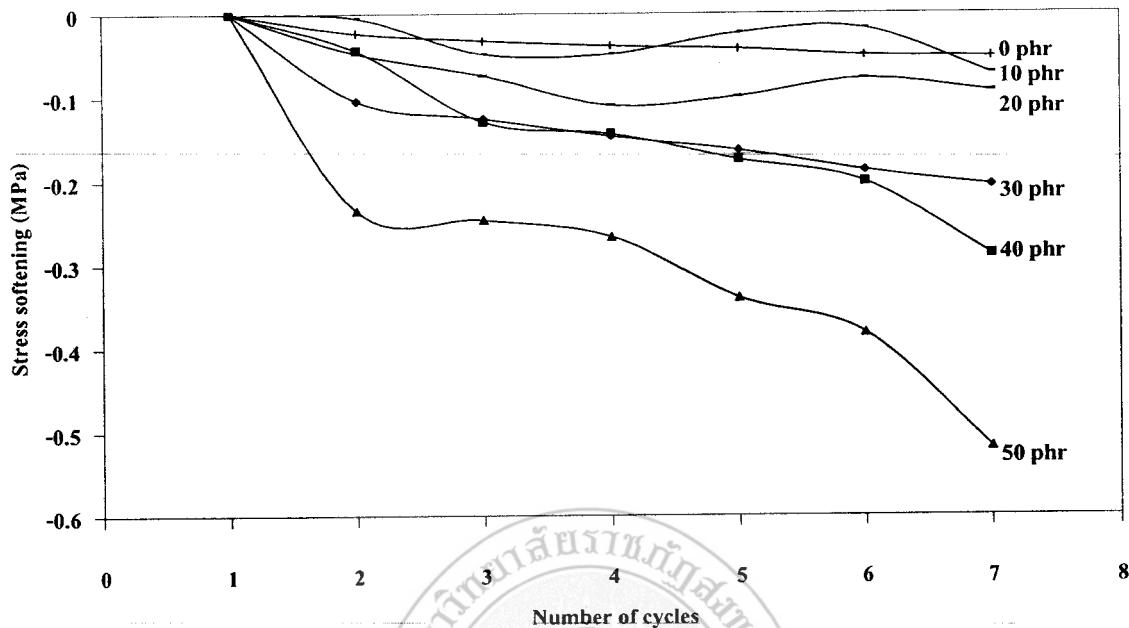
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรกลักษณะดังรูปที่ 4.11 พนวณเมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้น โดยยางที่มีเขม่าดำ 50 phr จะมีค่าความเค้นสูงที่สุด รองลงมาคือ ที่ปริมาณ 40, 30,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

เนื่องจากเมื่อยางที่ผสมสารตัวเติมถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปและปล่อยให้คืนกลับสู่รูปเดิม สารตัวเติมเป็นตัวดูดซับและเก็บสะสมพลังงานเอาไว้ ทำให้พลังงานที่ปล่อยออกมาน้ำสีสภาพเดิมมีน้อย ยิ่งปริมาณสารตัวเติมมากยิ่งเก็บสะสมพลังงานเอาไว้มาก ทำให้พลังงานที่ปล่อยออกมาน้ำสีสภาพเดิมนี้น้อย ลักษณะ Loop จึงกว้างขึ้น (Frederick R.Eirich, 1978)



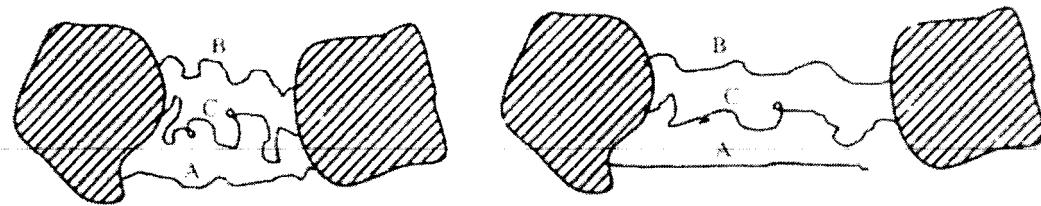
รูปที่ 4.12 ความอ่อนค่าความเดินของยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ

เมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำๆ แล้วนำค่าความเดินที่ระบุขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิดรูปแต่ละรอบแสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการดึง ความเดินของยางทุก ๆ ปริมาณสารตัวเติมมีค่าลดลงจากนั้นจะคงที่ตามไปด้วย โดยค่าความเดินของยางบีอาร์ที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณ 50 phr จะมีค่าความเดินสูงกว่าในปริมาณ 40, 30, 20, 10 phr และไม่มีสารตัวเติมตามลำดับ เนื่องจาก ความอ่อนค่าความเดินจะเกิดขึ้นในการผิดรูปครั้งแรกๆ ก่อนในรอบการผิดรูปครั้งที่ 1-3 จากนั้นยางจะเริ่มน้ำสีสภาพที่คงที่ในรอบการผิดรูปครั้งหลังๆ (M.Kluppel และ J.Schramm, 1998)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้นในยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ

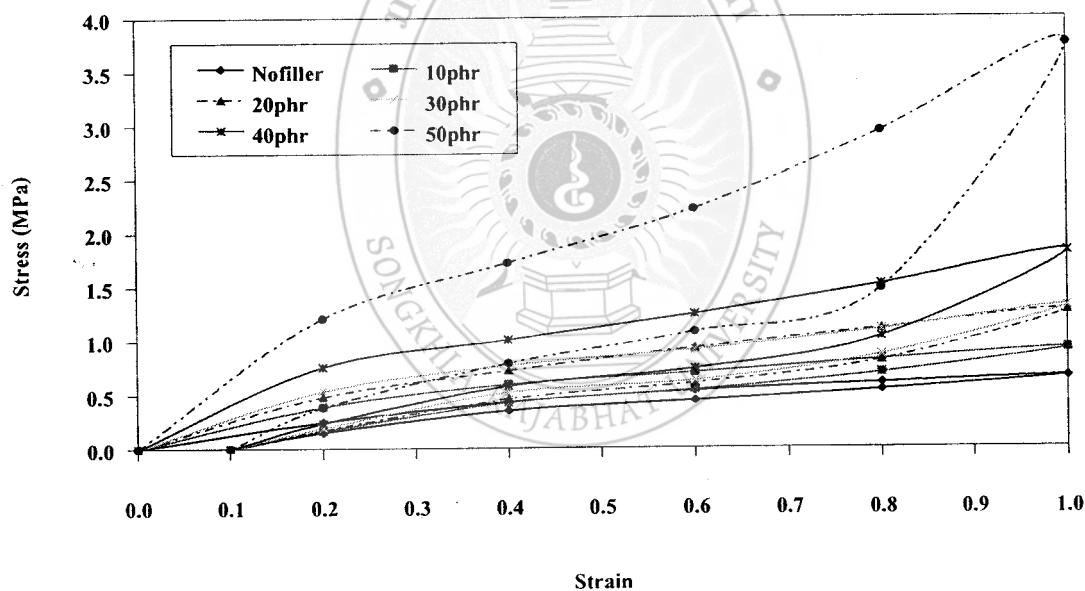
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค้น ในยางบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ มีลักษณะดังรูป 4.13 ปริมาณสารตัวเติมที่ 50 phr จะมีการลดลงของความเค้น สังเกตได้ว่ามีการลดลงมากกว่าที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณ 40, 30, 20, 10 phr ที่เป็นช่วงนี้เนื่องจาก การผสมเข้มข้นจะมีการรบอนอะตอน ที่มีไฮโดรเจนมาเกาะจะช่วยให้เขม่าดำเนินน้ำเริ่มประติกภาพมากขึ้นและการเกิดอนุมูลอิสระอยู่บนผิวของเขม่าดำเนินช่องอนุมูลอิสระนี้จะสร้างพันธะกับยาง ได้เมื่อโมเลกุลของยางแตกออกเป็นอนุมูลอิสระ (พรพรณ, 2528) ยิ่งเพิ่มเขม่าดำเนินทำให้ต้องใช้แรงมากในการผิตรูป เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้น โครงสร้างของเขม่าดำเนินจะเริ่มแตกหักทำให้ใช้แรงน้อยลง ดังรูปที่ 4.14 การลดลงของความเค้นของเขม่าดำเนินที่ปริมาณมากจึงเห็นได้ชัดกว่าที่ปริมาณ 40, 30, 20, 10 phr และไม่ผสมสารตัวเติม



รูปที่ 4.14 ลักษณะการขาดของยางไช่ (Marckmann et. al., 2001)

#### 4.3.2 ยางเอสบีอาร์

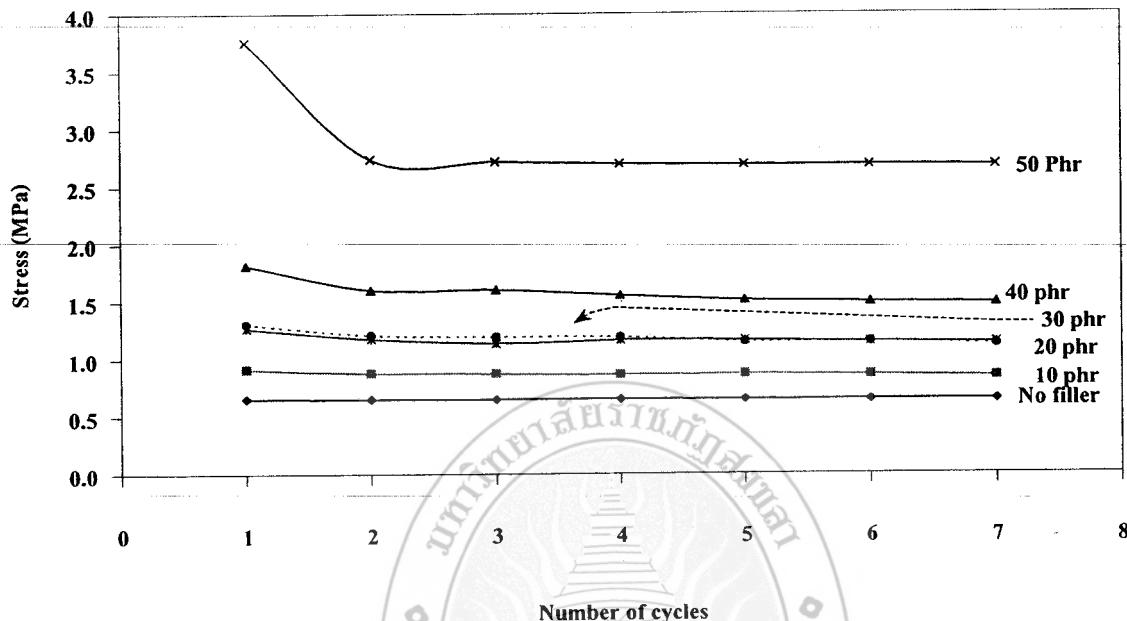
ศึกษาปริมาณเข้ม่าค่าต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์ แปรปริมาณเข้ม่าค่าเกรด N 330 เป็น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ซึ่งวัลภาไนซ์ด้วยระบบกำมะถันปกติ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เบอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปปะรอนแรกมีลักษณะดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติม และผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

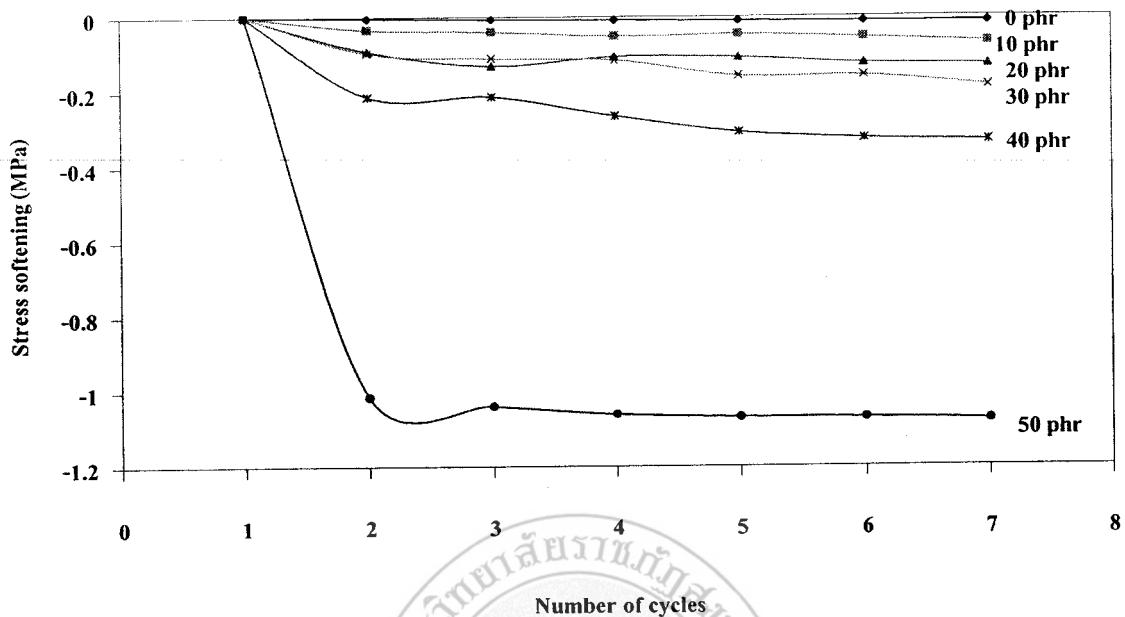
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสบีอาร์ที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรกลักษณะดังรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเข้ม่าค่า ค่าความเค้นจะเพิ่มขึ้น โดยยางที่มีเข้ม่าค่า 50 phr จะมีค่าความเค้นสูงที่สุดรองลงมาคือ ที่ปริมาณ 40, 30, 20, 10 และ ไม่มีสารตัวเติม ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสาร

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



รูปที่ 4.16 ความอ่อนค่าความเค้นของยางເອສບີອາຣ໌ທີ່ໄມ່ຜສນສາຮຕ້ວເຕີມແລ້ວຜສນສາຮຕ້ວເຕີມໃນປະມາມຕ່າງໆ

เมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปชำ້າ ແລ້ວນໍາค่าความเค้นທີ່ຮະບະຍືດ 100 ເປົ້ອເຊັ່ນຕົວຂອງการผิดรูปແຕ່ລະຮອນແສດງດັ່ງຮູບທີ່ 4.16 ພບວ່າ ຄໍາความເຄີນຂອງยางເອສບີອາຣ໌ທີ່ຜສນສາຮຕ້ວເຕີມໃນປະມາມຕ່າງໆ ລດລອງຕາມຈຳນວນຮອນໃນການຕຶງທີ່ເພີ່ມຂຶ້ນ ໂດຍຍາງເອສບີອາຣ໌ທີ່ຜສນສາຮຕ້ວເຕີມໃນປະມາມ 50 phr ມີຄໍາວາມເຄີນສູງກວ່າໃນປະມາມ 40, 30, 20, 10 phr ແລະ ໄນມີສາຮຕ້ວເຕີມ ຕາມລຳດັບເນື້ອງຈາກ ເນື້ອທຳການຜິດຮູປ້າ ໂມໂລເກຸລກເກີດກາເຮີຍຕົວແລະລື່ນໄກລ ທຳໄຫ້ສາຍໂຫ່ງທີ່ໄກ້ງອມມີຄວາມເປັນຮະບັບນາກຂຶ້ນ ແຮງທີ່ໃຫ້ນອຍລັງ ຄໍາວາມເຄີນຈຶ່ງລດລອງຕາມຈຳນວນຮອນທີ່ເພີ່ມຂຶ້ນດ້ວຍ



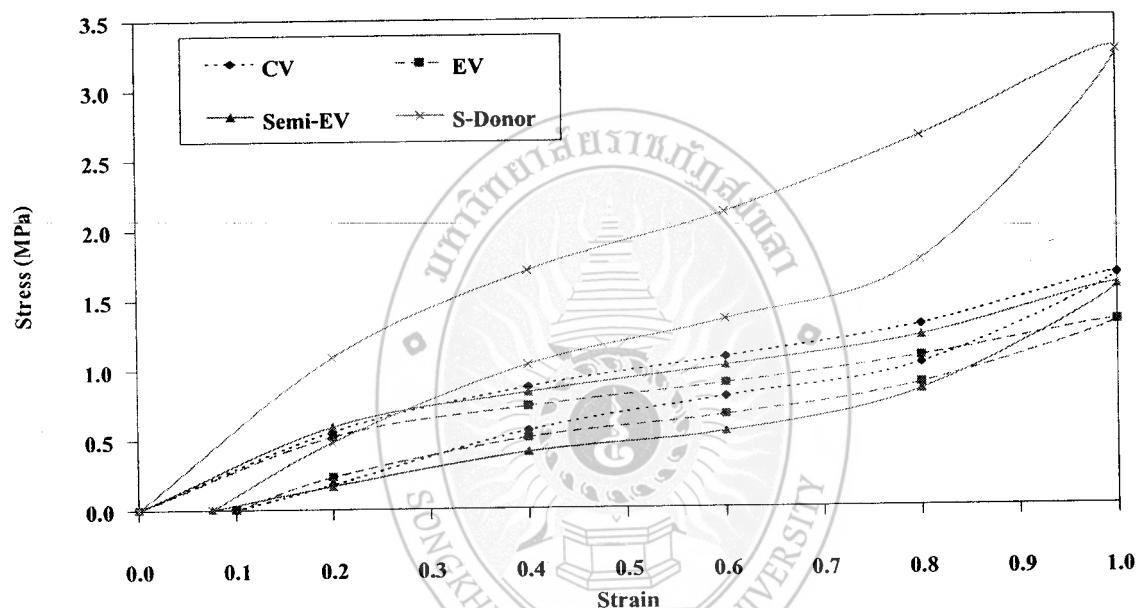
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค็นในยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค็นในยางเอสบีอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมในปริมาณต่าง ๆ ลักษณะดังรูปที่ 4.17 พบว่ายางที่ผสมสารตัวเติมในปริมาณ 50 phr การลดลงของความเค็นจะลดลงมากกว่าที่ปริมาณ 40, 30, 20, 10 และไม่ผสมสารตัวเติม เมื่อไส่เข้มขึ้น ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงเกิดการซื้อมโยงพันธะระหว่างโมเลกุลทำให้ยางมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งจากการออกแบบเดียวกันของยางจะเริ่มเกิดการแตกหัก พอกว้างต่อการแตกจะเริ่มขยายตัวขึ้น การเกิดรอยแตกเริ่มแรกเนื่องจากการเปลี่ยนอย่างถาวรไม่อาจกลับไปสู่สภาพสมบูรณ์ ทำให้การลดลงของความเค็นจะลดลง (แม้นแต่สมชัย, 2541) แต่เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นครั้งต่อไปแรงที่ใช้เริ่มน้อยลง การลดลงของความเค็นจึงเริ่มคงที่ ส่วนที่ปริมาณ 40, 30, 20, 10 และไม่ผสมสารตัวเติม นั้นการลดลงของความเค็นจะมีระดับลดลงน้อย

## 4.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของระบบการวัลค่าไนซ์ที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์ที่มีเข้มข้นปาร์เมต์ 40 phr

### 4.4.1 ยางบีอาร์

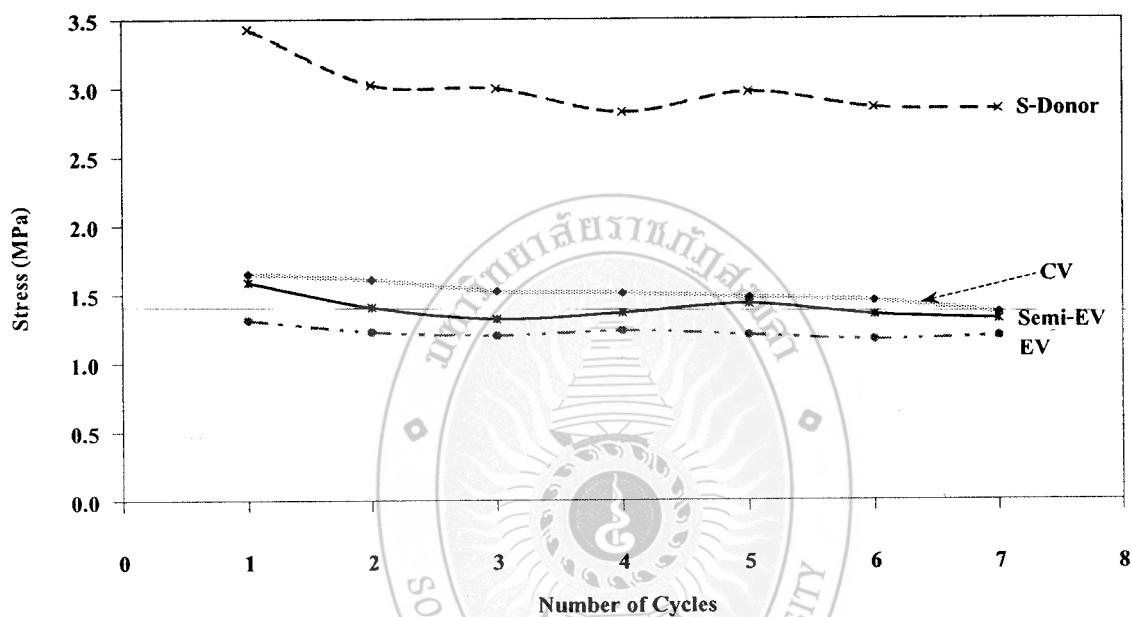
ศึกษาระบบการวัลค่าไนซ์ต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ที่มีเข้มข้นปาร์เมต์ 40 phr ใช้ระบบการวัลค่าไนซ์ 4 ระบบ คือ ระบบกำมะถันปกติ, ระบบอีวี, ระบบเซมิอีวี และระบบสารให้กำมะถัน ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปของยางบีอาร์ที่ระบุไว้ในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลค่าไนซ์ต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

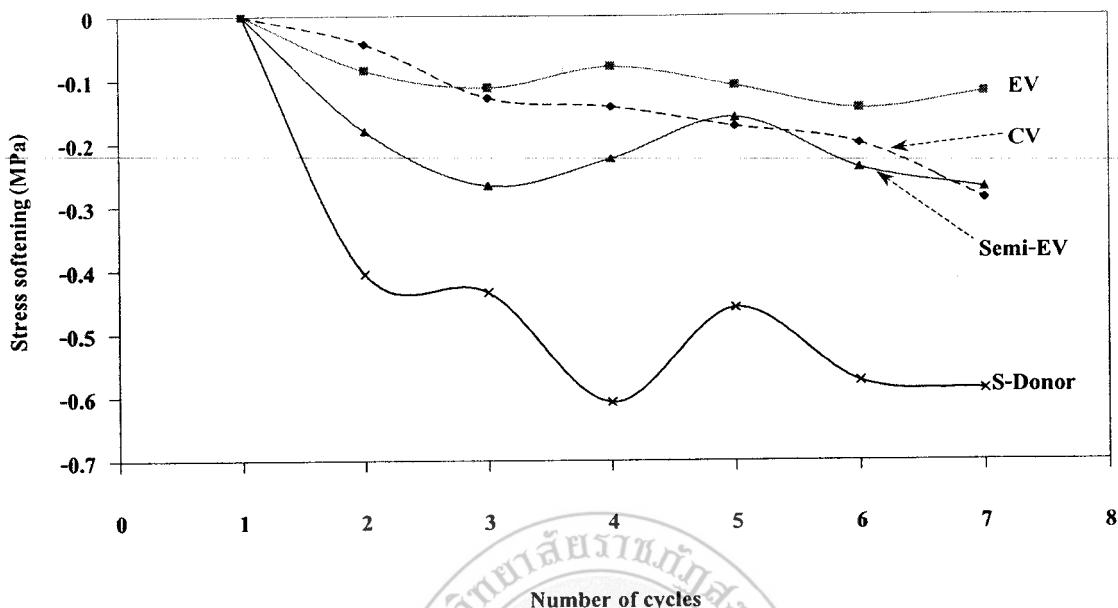
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลค่าไนซ์ต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรกลักษณะดังรูปที่ 4.18 พนวณระบบสารให้กำมะถัน (S-Donor) ให้ค่าความเค้นสูงที่สุด รองลงมาคือ ระบบกำมะถันปกติ (CV) ระบบ Semi – EV และ ระบบ EV ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระบบสารให้กำมะถันเป็นระบบที่ได้กำมะถันออกมากซึ่งกำมะถันนี้จะมีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงพันธะระหว่างโมเลกุลมาก ทำให้ยางมีความแข็งแรงกว่าระบบการวัลค่าไนซ์อื่นๆ จึงส่งผลให้ค่าความเค้นสูงกว่าระบบการวัลค่าไนซ์อื่นๆ ด้วย (พรพรรณ, 2528) ระบบกำมะถันปกติจะเกิดการเชื่อมโยงแต่ละพันธะด้วยกำมะถันหลาย ๆ หรือที่เรียกว่าพันธะ Polysulphidic ซึ่งมีผลให้ได้ความแข็งแรงสูงกว่าระบบการวัลค่าไนซ์แบบ EV ที่

พันธะเชื่อมโลหะมีกำมะถันเพียงหนึ่งตัวในหนึ่งพันธะหรือที่เรียกว่าพันธะ Monosulphidic (พรพรม, 2540) ส่วนระบบ Semi-EV จะเป็นระบบที่อยู่กึ่งกลางระหว่างระบบกำมะถันปกติและระบบ EV ซึ่งระบบ Semi-EV จะให้พันธะเชื่อมโลหะแบบ Polysulphidic และ Monosulphidic ในสัดส่วนที่เท่ากัน ระบบ Semi-EV จึงแข็งแรงกว่าระบบ EV แต่ไม่เท่าระบบกำมะถันปกติ (พรพรม, 2535)



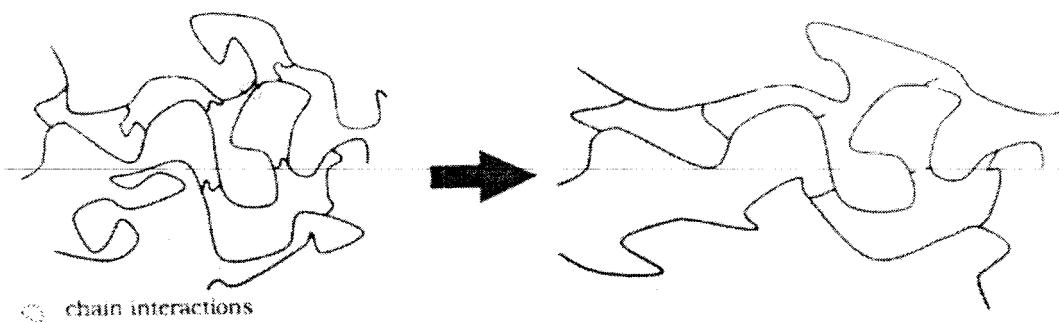
รูปที่ 4.19 ความอ่อนค่าความเดินของยางบีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลภาไนซ์ต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาความอ่อนค่าความเดินของยางบีอาร์ที่ใช้ระบบการวัลภาไนซ์ต่าง ๆ จากรูปที่ 4.19 พบว่าระบบสารให้กำมะถัน (S-Donor) ให้ค่าความเดินสูงที่สุด รองลงมาคือระบบกำมะถันปกติ (CV) ระบบ Semi-EV และ ระบบ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระบบสารให้กำมะถันเป็นระบบที่ได้กำมะถันออกมากซึ่งกำมะถันนี้จะมีประสิทธิภาพในการเชื่อมโลหะระหว่างโมเลกุลมาก ทำให้ยางมีความแข็งแรงกว่าระบบการวัลภาไนซ์อื่นๆ จึงส่งผลให้ค่าความเดินสูงกว่าระบบการวัลภาไนซ์อื่นๆ ด้วย (พรพรม, 2528) และเมื่อยางถูกกระทำชำเรา จำนวนรอบเพิ่มขึ้นความอ่อนค่าความเดินของยางลดลงสังเกตได้ว่าระบบการวัลภาไนซ์ที่ใช้กำมะถันมากจะมีความอ่อนค่าความเดินในแต่ละรอบลดลงมากกว่าระบบวัลภาไนซ์ที่มีปริมาณกำมะถันน้อยกว่า



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค็นในยางบีอาร์ที่ใช้ระบบวัลคaineซึ่งต่างๆ

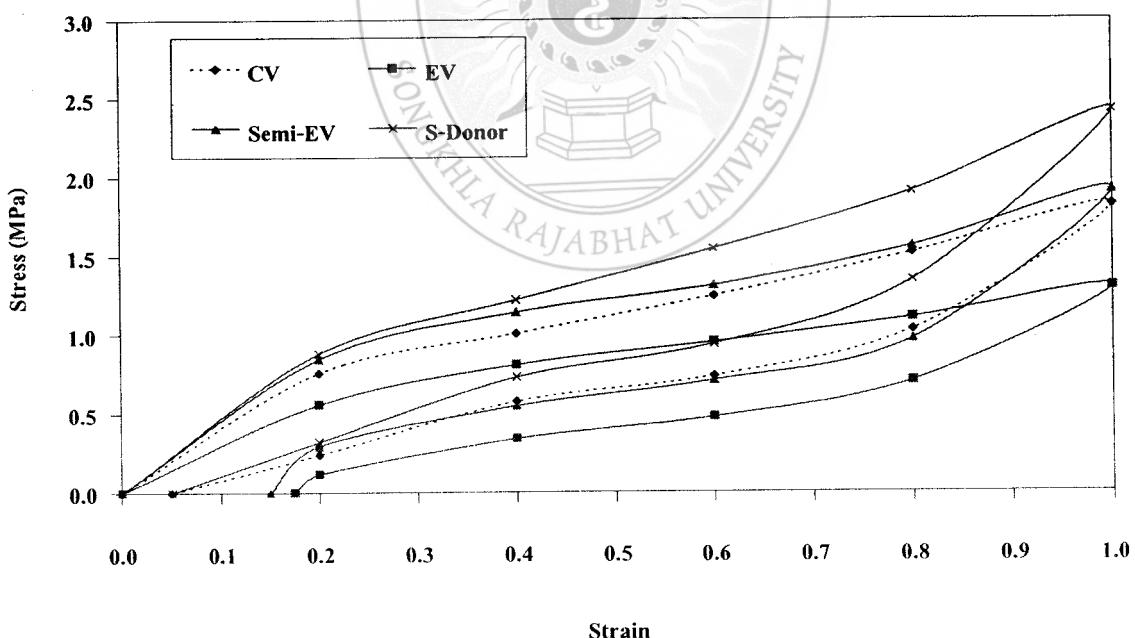
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบกับการลดลงของความเค็นในยางบีอาร์ที่ใช้ระบบวัลคaineซึ่งต่างๆ ลักษณะดังรูปที่ 4.20 พนว่าระบบสารให้กำมะถันจะมีการลดลงของความเค็นมากที่สุด ซึ่งจะต่างกับระบบวัลคaineซึ่งระบบกำมะถันปกติ ระบบอีวีและระบบเซนิอีวีที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก ระบบสารให้กำมะถันเป็นระบบที่มีพันธะเชื่อมโยงแบบ Monosulphidic เมื่อยางถูกกระทำสายโซ่ไมเลกุลจะหลุดออกจากพันธะยาก ทำให้ไมเลกุลเรียงตัวได้ยาก แต่ในระบบกำมะถันปกติเป็นระบบที่มีพันธะเชื่อมโยงแบบ Polysulphidic เมื่อยางถูกกระทำสายโซ่ไมเลกุลจะหลุดออกจากกันง่ายและสามารถต่อเข้าหากันได้ง่าย ทำให้ไมเลกุลเรียงตัวได้ การลดลงของความเค็นจึงลดลงไม่มาก ดังรูปที่ 4.21 (พรพรวณ, 2535)



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

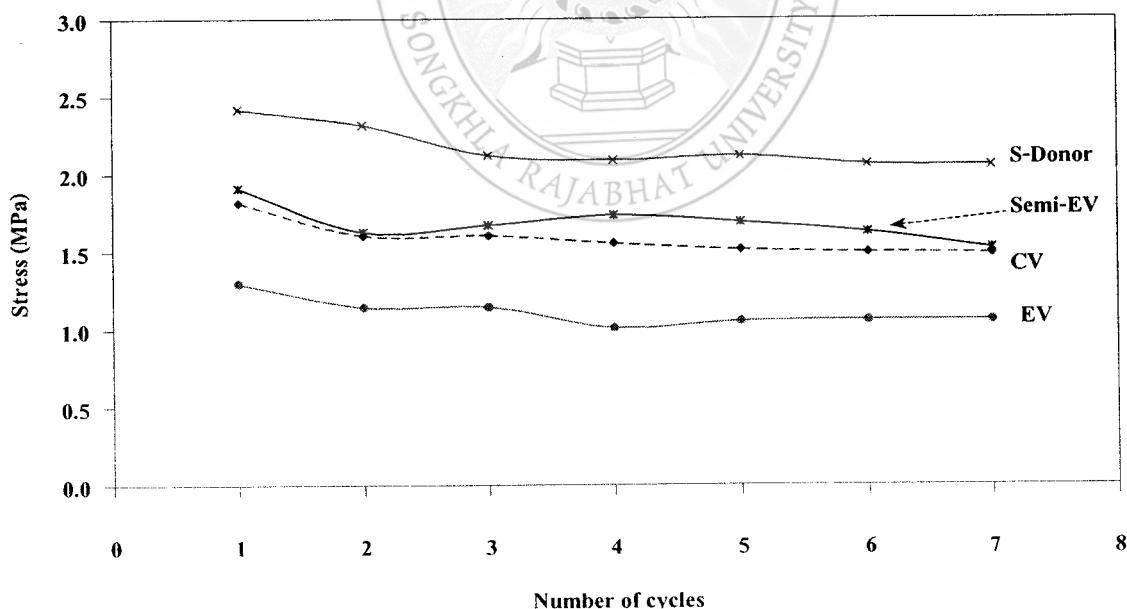
#### 4.4.2 ยางเอสบีอาร์

ศึกษาระบบการวัดค่าไนซ์ต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์ที่มีเข้ม่าคำปริมาณ 40 phr ใช้ระบบการวัดค่าไนซ์ 4 ระบบ คือ ระบบกำมะถันปกติ, ระบบอีวี, ระบบเซนิอีวี และระบบสารให้กำมะถัน ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เบอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการพิດรูป 200 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการพิดรูป่อนแรกมีลักษณะดังรูปที่ 4.22



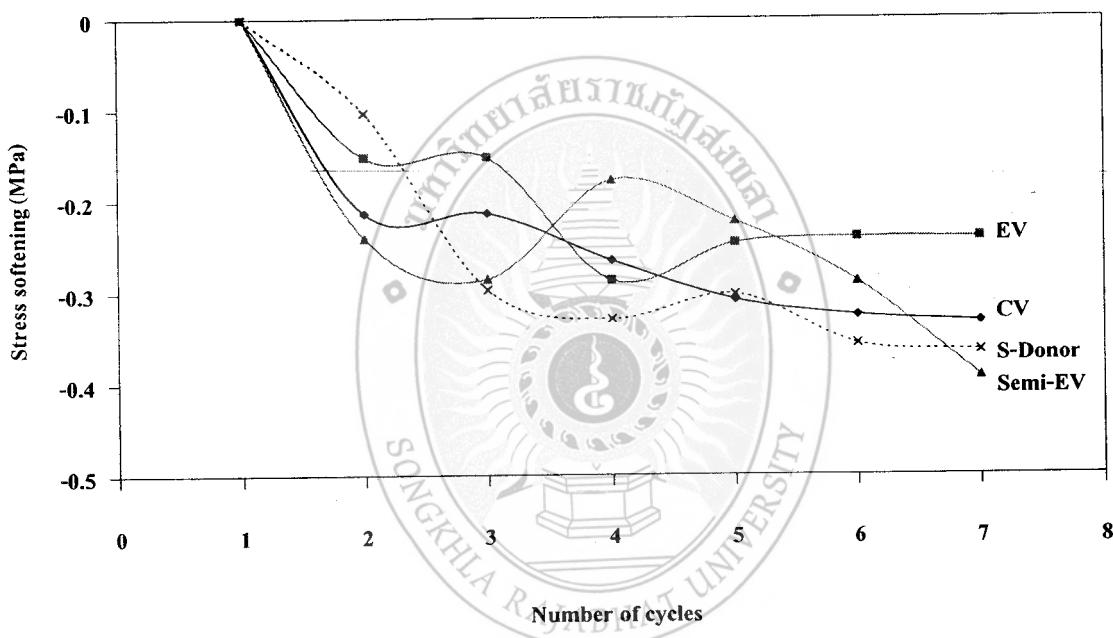
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสบีอาร์ที่ใช้ระบบการวัดค่าไนซ์ต่างๆ ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการพิดรูปครั้งแรก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของยางเอสนีอาร์ที่ใช้ระบบการวัดค่าไนซ์ต่างกันซึ่งถูกกระทาให้เกิดการผิดรูปครั้งแรกลักษณะดังรูปที่ 4.22 พบว่าระบบสารให้กำมะถัน (S-Donor) ให้ค่าความเค้นสูงที่สุด รองลงมาคือ ระบบ Semi-EV ระบบกำมะถันปกติ (CV) และระบบ EV ตามลำดับ ที่เป็นเห็นนี้เนื่องจาก ระบบสารให้กำมะถันเป็นระบบที่ได้กำมะถันออกมา ซึ่งกำมะถันนี้จะมีประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงพันธะระหว่างโมเลกุลมาก โดยระบบนี้จะเชื่อมโยงพันธะด้วยกำมะถัน ทำให้ยางมีความแข็งแรงกว่าระบบการวัดค่าไนซ์อื่นๆ จึงส่งผลให้ค่าความเค้นสูงกว่าระบบการวัดค่าไนซ์อื่นๆ ด้วย (พรพรรณ, 2528) พันธะที่ยาวจะอื้อต่อการเรียงตัวของโมเลกุลยาง ทำให้ยางมีความแข็งแรงสูง (พรพรรณ, 2535) ระบบกำมะถันปกติจะทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบ Polysulphidic แต่ในระบบ EV จะทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบ Monosulphidic (พรพรรณ, 2528) ซึ่งพันธะเชื่อมโยง Polysulphidic เป็นพันธะที่ยาวกว่าพันธะเชื่อมโยงแบบ Monosulphidic ดังนั้นในระบบกำมะถันปกติจึงแข็งแรงกว่าระบบ EV ซึ่งเมื่อสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของระบบการวัดค่าไนซ์ที่ให้ความเค้นสูงเมื่อปล่อยแรงการกลับคืนรูปร่างเดิมจะเกิดได้น้อย เพราะว่า จะเกิดพลังงานสะสมในเนื้อยาง ไวมาก ลักษณะ Loop จะกว้าง ในแต่ระบบการวัดค่าไนซ์ที่มีลักษณะความกว้าง Loop ไม่เท่ากัน



รูปที่ 4.23 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสนีอาร์ที่ใช้ระบบการวัดค่าไนซ์ต่างๆ

เมื่อพิจารณาความอ่อนค่าความเค้นของยางເອສນີອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ระบบກາວວັດຄາໄນ້ຫຼັງກັນຈາກຮູບທີ່ 4.23 ພບວ່າຮະບນສາຮໃກ້ກຳນະດັນ (S-Donor) ໃກ້າຄວາມເຄື່ອນໄຫວທີ່ສຸດ ຮອງລົງມາຄື່ອ ຮະບນ Semi -EV, ຮະບນກຳນະດັນປົກຕິ (CV) ແລະ ຮະບນ EV ຕາມລຳດັບ ແລະ ເນື່ອຍັງຖືກຮະທຳໜ້າ ຈີ່ ທີ່ຈຳນວນຮອບເພີ່ມຂຶ້ນຄວາມອ່ອນຄ່າຄວາມເຄື່ອນໄຫວທີ່ຈະລົດລົງທາມຈຳນວນຮອບທີ່ເພີ່ມຂຶ້ນ ທີ່ເປັນເຫັນນີ້ເນື່ອງຈາກ ຮະບນສາຮໃກ້ກຳນະດັນເປັນຮະບນທີ່ໄດ້ກຳນະດັນອອກມາເຊິ່ງກຳນະດັນນີ້ຈະມີປະສິທິພາບໃນກາຮ່ອມໂຢັງພັນຮະຮວ່າງໂມເລກຸມນາກ ທຳໄທ້ຍັງມີຄວາມແໜ່ງແຮງກວ່າຮະບນກາວວັດຄາໄນ້ອື່ນໆ ຈຶ່ງສ່າງຜລໃຫ້ຄ່າຄວາມເຄື່ອນໄຫວ (ພຣພຣະ, 2528)



ຮູບທີ່ 4.24 ຄວາມສັນພັນຮະຫວ່າງຈຳນວນຮອບກັບກາລດລົງຂອງຄວາມເຄື່ອນໄຫວຢັງເອສນີອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ຮະບນກາວວັດຄາໄນ້ຫຼັງໆ

ເນື່ອພິຈານາຄວາມສັນພັນຮະຫວ່າງຈຳນວນຮອບກັບກາລດລົງຂອງຢັງເອສນີອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ຮະບນກາວວັດຄາໄນ້ຫຼັງໆ ລັກນະຄົງຮູບທີ່ 4.24 ພບວ່າຮະບນສາຮໃກ້ກຳນະດັນຈະມີລັກນະກາລດລົງຂອງຄວາມເຄື່ອນໄຫວກວ່າຮະບນກາວວັດຄາໄນ້ອື່ນໆ ທີ່ເປັນເຫັນນີ້ເນື່ອງຈາກ ຮະບນສາຮໃກ້ກຳນະດັນນີ້ ພລັງງານພັນຮະເທົ່າກັນ 68 ກີໂໂລແຄລອຣີຕ່ອໂມລ ຮະບນກຳນະດັນປົກຕິມີພລັງງານພັນຮະນັອຍກວ່າ 64 ກີໂໂລແຄລອຣີຕ່ອໂມລ (ວຽກຮົ່ງ, 2541) ຈະເຫັນວ່າຮະບນສາຮໃກ້ກຳນະດັນມີພລັງງານພັນຮະມາກກວ່າຮະບນ

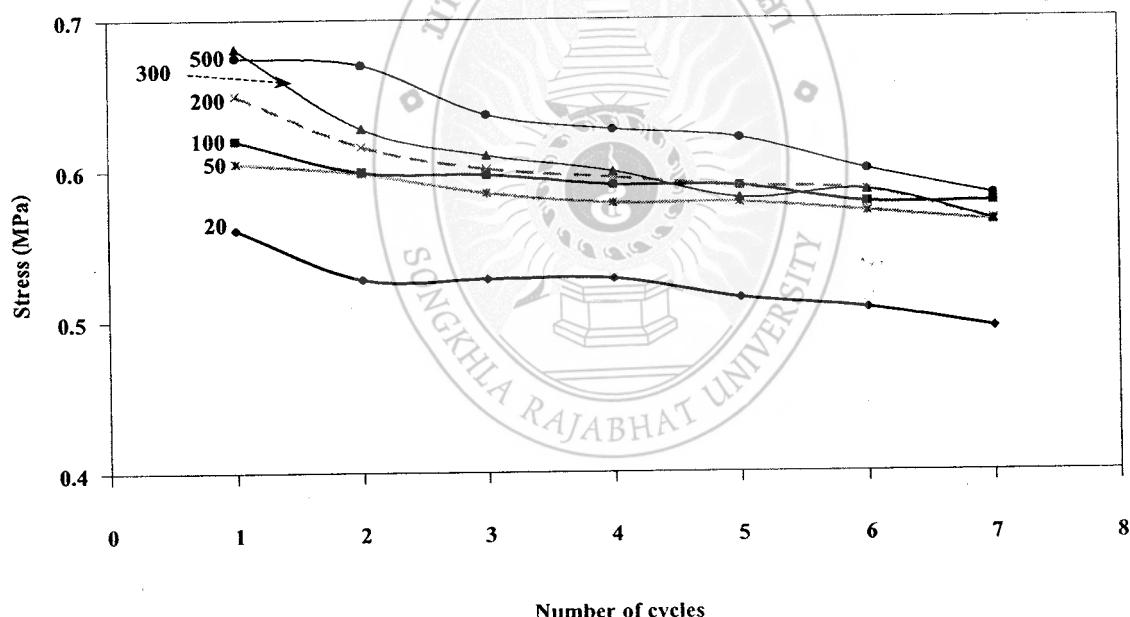
กำมะถันปกติ ซึ่งระบบที่มีพลังงานมากกว่าพันจะหลุดออกยากกว่า ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเรียงตัวของโมเลกุล การลดลงของความเค้นจึงลดลงมาก

#### 4.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราเร็วในการผิดรูปที่มีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์

##### 4.5.1 ยางไม่มีสารตัวเติม

###### 4.5.1.1 ยางบีอาร์

ศึกษาอัตราเร็วในการผิดรูปต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ที่ไม่มีสารตัวเติม ซึ่งวัสดุในชั้นด้านบนกำมะถันปกติ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูปที่ 20, 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปมีลักษณะดังรูป 4.25



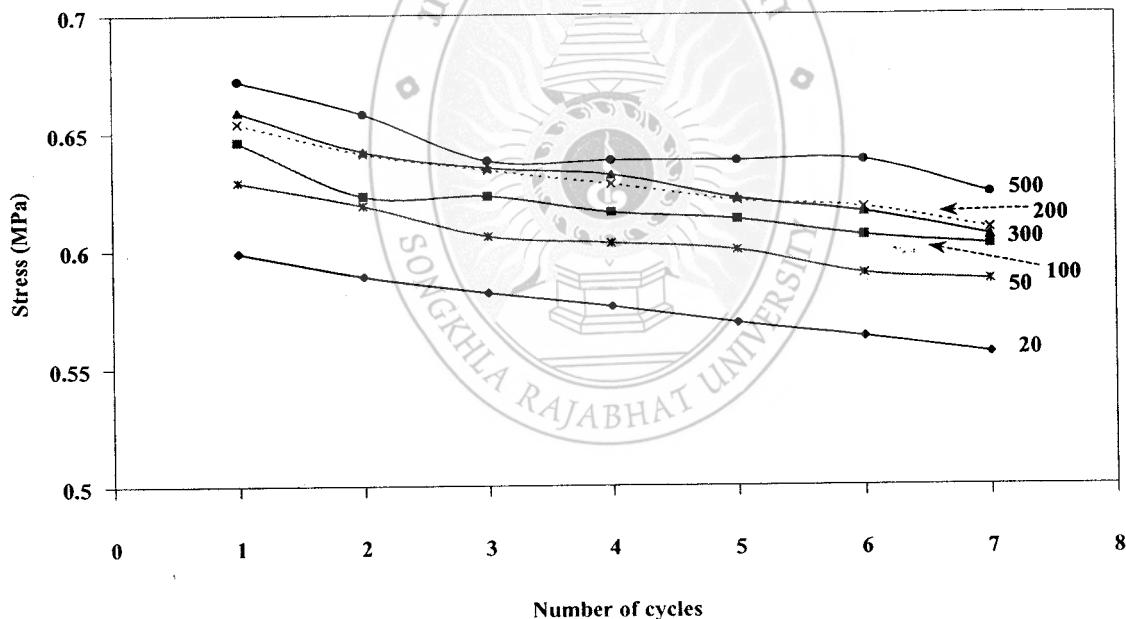
รูปที่ 4.25 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างๆ

เมื่อพิจารณาความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างกันจากรูปที่ 4.25 พนว่า เมื่อนำยางมาดึงที่อัตราเร็วสูง ความอ่อนค่าความเค้นจะสูงกว่าดึงที่อัตราเร็วต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก การดึงยางที่อัตราเร็วสูง ยางจะแข็งตึ่งมากขึ้นตามอัตราเร็วของการดึงที่เพิ่มขึ้น แรงที่ใช้จึงเพิ่มขึ้น ทำให้ความอ่อนค่าความเค้นของยางเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

(www.eng.su.ac.th, 2547) เมื่อกระทำให้เกิดการผิดรูปซ้ำๆ แล้วนำค่าความเดินที่ระยะยีด 100 เปอร์เซ็นต์ของการผิดรูปแต่ละรอบ สังเกตได้ว่ายางทุกอัตราเร็วนั้นจะเป็นไปแนวเดียวกันคือความอ่อนค่าความเดินของยางทั้ง 5 อัตราเร็วในการผิดรูปลดลง เมื่อจำนวนรอบการดึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากในการดึงยางครั้งแรกยางไม่เกยูกกระทำมาก่อน เมื่อยืดออกโมเลกุลยางยังจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อดึงครั้งหลัง ๆ ยางมีการจัดเรียงตัว แรงที่ใช้จึงน้อยลง ค่าความเดินจึงลดลงด้วย

#### 4.5.1.2 ยางเอสบีอาร์

ศึกษาอัตราเร็วในการผิดรูปต่อความอ่อนค่าความเดินของยางเอสบีอาร์ ซึ่งวัดค่าในช่วงระบบกำมะถันปกติ ทดสอบความเดินที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูปที่ 20, 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิดรูปมีลักษณะดังรูป 4.26



รูปที่ 4.26 ความอ่อนค่าความเดินของยางเอสบีอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างกัน

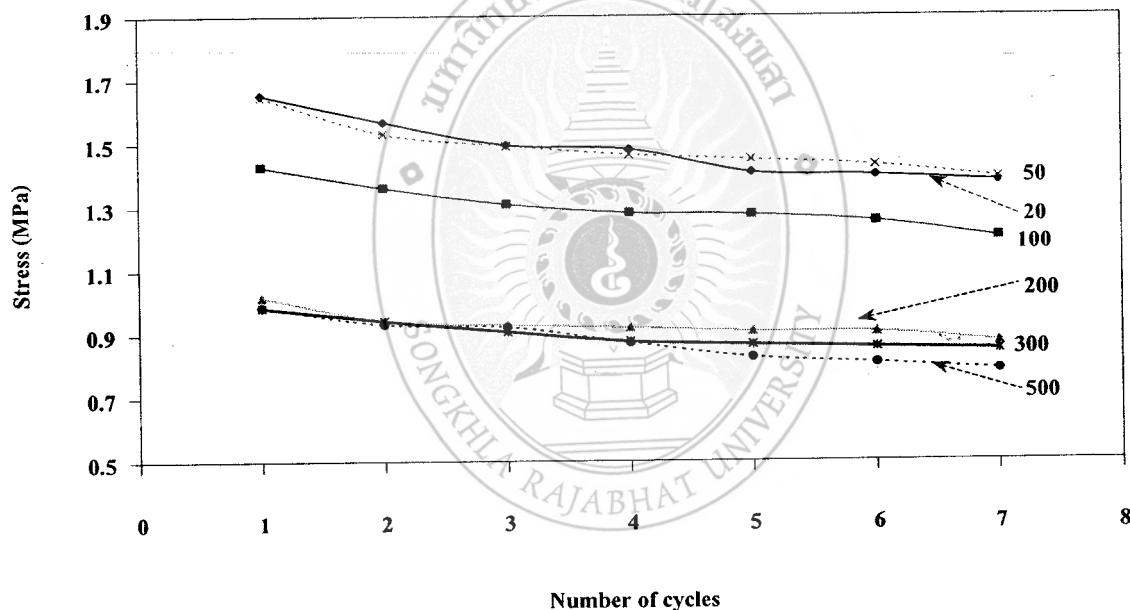
เมื่อพิจารณาความอ่อนค่าความเดินของยางเอสบีอาร์ที่ไม่มีสารตัวเติมโดยใช้อัตราเร็วในการผิดรูปต่างกันจากรูปที่ 4.26 พบว่า เมื่อนำยางมาดึงที่อัตราเร็วสูง ความอ่อนค่าความเดินจะสูงกว่าดึงที่อัตราเร็วต่ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก การดึงยางที่อัตราเร็วสูง ยางจะแข็งตึบมากขึ้นตามอัตราเร็วของการดึงที่เพิ่มขึ้น แรงที่ใช้จึงเพิ่มขึ้น ทำให้ความอ่อนค่าความเดินของยางเพิ่มขึ้นตามไป

ด้วย ([www.eng.su.ac.th](http://www.eng.su.ac.th), 2547) เมื่อกระทำให้เกิดการพิครูปช้าๆ แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของการพิครูปแต่ละรอบ สังเกตได้ว่ายางในทุกๆ อัตราเร็วนั้นจะแนวโน้มเดียวกันคือเมื่อจำนวนรอบการดึงเพิ่มขึ้น ความอ่อนค่าความเค้นของยางทั้ง 5 อัตราเร็วในการพิครูปลดลง

#### 4.5.2 ยางสมสารตัวเดิน

##### 4.5.2.1 ยางบีอาร์

ศึกษาอัตราเร็วในการพิครูปต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ที่ผสมเขม่าคำปริมาณ 40 phr ซึ่งวัสดุในชุดระบบกำมะถันปกติ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการพิครูปที่ 20, 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการพิครูปมีลักษณะดังรูปที่ 4.27

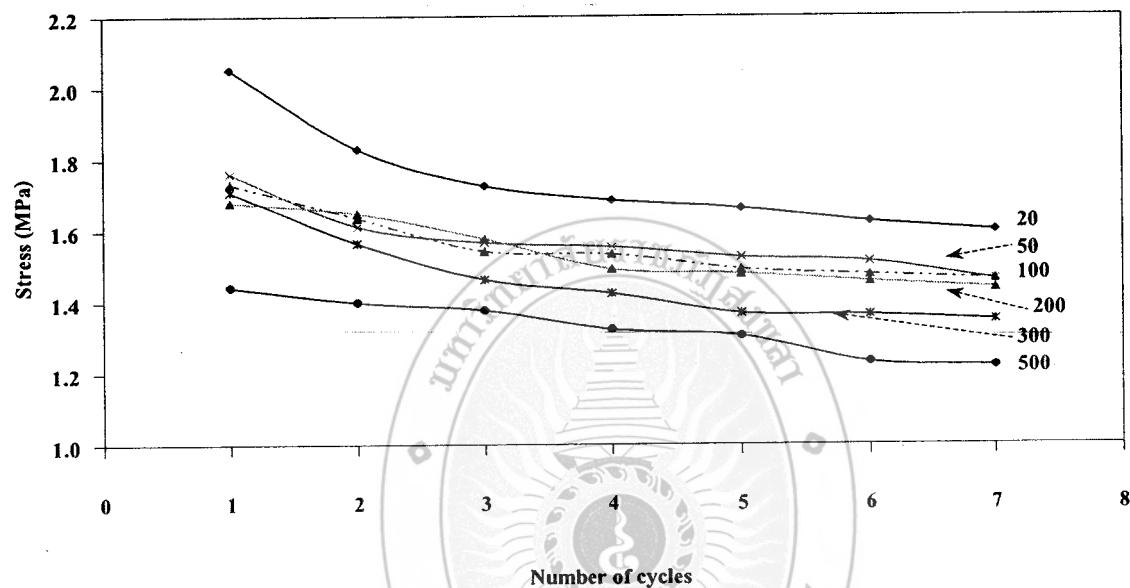


รูปที่ 4.27 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการพิครูปต่างกัน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.27 พบร่วมกันว่าเมื่อนำยางมาดึงที่อัตราเร็วต่ำ ความอ่อนค่าความเค้นจะสูงกว่าดึงที่อัตราเร็วสูง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อยางถูกกระทำด้วยอัตราการพิครูปต่างกัน การตอบสนองของโมเลกุลก็ต่างกันด้วย โดยการดึงยางที่อัตราเร็วต่ำ โมเลกุลยางค่อยๆ เกิดการจัดเรียงตัว ยางจึงแข็งแรงขึ้น แรงที่ใช้จึงเพิ่มขึ้น ความเค้นของยางเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่อกระทำให้เกิดการพิครูปช้าๆ แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะยืด 100 เปอร์เซ็นต์ของการพิครูปแต่ละรอบ พบร่วมกันว่า ค่าความเค้นของยางลดลงตามจำนวนรอบในการดึงที่เพิ่มขึ้น

#### 4.5.2.2 ยางเอสบีอาร์

ศึกษาอัตราเร็วในการผิครูปต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์ที่ผสม เวน่าดำเนิร์มาณ 40 phr ซึ่งวัสดุในชุดด้วยระบบกำมะถันปกติ ทดสอบความเค้นที่ระดับความเครียด 0-100 เบอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราเร็วในการผิครูปที่ 20, 50, 100, 200, 300 และ 500 มิลลิเมตรต่อนาที ได้ผลการทดสอบในการผิครูปมีลักษณะดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์ที่ใช้อัตราเร็วในการผิครูปต่างกัน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.28 พบว่าเมื่อนำยางมาดึงที่อัตราเร็วต่ำ ความอ่อนค่าความเค้นจะสูงกว่าดึงที่อัตราเร็วสูง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อยางถูกกระทำด้วยอัตราการผิครูปต่างกัน การตอบสนองของโมเลกุลก็ต่างกันด้วย ที่อัตราการผิครูปสูง โมเลกุลไม่สามารถจัดตัวได้ทัน ยางจึงมีสมบัติด้ายของแข็ง คือเมื่อยางเกิดการผิครูปโมเลกุลของยางจะแตกหักง่าย แรงที่ใช้ดึงจึงน้อย และเมื่อกระทำให้เกิดการผิครูปเข้า แล้วนำค่าความเค้นที่ระยะบีด 100 เบอร์เซ็นต์ของการผิครูปแต่ละรอบ พนว่าความอ่อนค่าความเค้นลดลงตามจำนวนรอบในการดึงที่เพิ่มขึ้น โดยโมเลกุลจะเกิดการลื้น ไคลและการเปลี่ยนโครงข่ายชุดเชื่อมโยงพื้นฐานและชุดเกี่ยวพันระหว่างโมเลกุล

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ในยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมจะมีความอ่อนค่าความเค้นสูงกว่ายางเอสนีอาร์ และยางบีอาร์ ที่ไม่ผสมสารตัวเติม
2. สารตัวเติมแต่ละชนิดมีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นต่างกัน ทั้งยางเอสนีอาร์และยางบีอาร์สารตัวเติมที่มีอนุภาคเล็กจะทำให้ความเค้นในยางสูงกว่าสารตัวเติมที่มีอนุภาคใหญ่กว่า
3. เมื่อบริษัทสารตัวเติมเพิ่มขึ้นค่าความเค้นก็เพิ่มขึ้นเช่นกันทั้งในยางเอสนีอาร์และยางบีอาร์
4. ระบบการวัดค่าไนซ์มิลลิต่อค่าความเค้นต่างกันในยางเอสนีอาร์และยางบีอาร์ถ้าปริมาณการเชื่อมโยงสูงทำให้มีค่าความเค้นสูง ซึ่งระบบการวัดค่าไนซ์แบบสารให้กำมะถันจะมีค่าความเค้นสูงของยางทั้ง 2 ชนิด
5. อัตราเร็วที่ใช้ในการทดสอบมีผลต่อความอ่อนค่าความเค้นของยางสังเคราะห์ ทั้งที่ผสมสารตัวเติมและไม่ผสมสารตัวเติม ในยางที่ผสมสารตัวเติม เมื่ออัตราเร็วต่ำค่าความเค้นสูง ในยางที่ไม่มีสารตัวเติม อัตราเร็วสูงค่าความเค้นเพิ่มขึ้น
6. เมื่อยางถูกกระทำชำ្លៃ ทำให้ความอ่อนค่าความเค้นของยางลดลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ชนิดและปริมาณสารตัวเติม ระบบการวัดค่าไนซ์ อัตราเร็วในการผิดรูป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาความอ่อนค่าความเคี้นในยางสังเคราะห์ชนิดอื่น เช่นยางไนไตรล์ ยางอีพีดีเอ็ม ยางคลอโรพրีน
2. ศึกษาความอ่อนค่าความเคี้นในยางเยลนด์ เช่นยางไนไตรล์กับยางธรรมชาติ ยางเออสบี อาร์กับยางธรรมชาติ
3. ศึกษาผลของปริมาณของน้ำมันต่อความอ่อนค่าความเคี้นของยาง



## บรรณานุกรม

บุญธรรม นิธอุทัย. 2530. ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์และคุณสมบัติ. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.

บุญธรรม นิธอุทัยและ ปรีชา ป้องกย. 2534. ปฏิบัติการเทคโนโลยียาง 2. ภาควิชาเทคโนโลยียาง และพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.

ปรีชา ป้องกย. 2541. “การใช้ยางทางวิศวกรรม” ยางและพอลิเมอร์ 2, 1 (มกราคม - มีนาคม 2541) หน้า 1 – 15.

ปรีชา ป้องกย. 2542. “Physical Properties and Their Meaning” ยางและพอลิเมอร์ 3, 4 (ตุลาคม - ธันวาคม 2542) หน้า 13 – 23.

ปรีชา ป้องกย. 2542. “Physical Properties and Their Meaning” ยางและพอลิเมอร์ 4, 1 (มกราคม - เมษายน 2543) หน้า 5- 10.

พรพรรณ นิธอุทัย. นปป. ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.

พรพรรณ นิธอุทัย. 2528. สารเคมีสำหรับยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.

พรพรรณ นิธอุทัย. 2540. เทคนิคการออกสูตรยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.

พรพรรณ นิธอุทัย. 2535. เอกสารประกอบการอบรมเทคโนโลยียางระยะสั้นเรื่อง เทคนิคการออกแบบสูตรยาง. ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.ปัตตานี.

แม่น อมรสิทธิ์และ สมชัย อัครวิทยา. 2541. วัสดุวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แม่กรอง-ชีล. กรุงเทพฯ

รากรน์ ชจร ไชยกุล. 2541. การออกแบบสูตรยางและกระบวนการผลิต. กรมวิชาการเกษตร. กรุงเทพฯ  
ASTM D 412-80. Standard Test Methods for Rubber Properties in Tension. Annual Book of  
ASTM Standard. Part. 37. 57-65.

## បរណានុករម (គោ)

- 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 fur Kautschuktechnologie e.v.

## บรรณานุกรม (คํอ)

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.

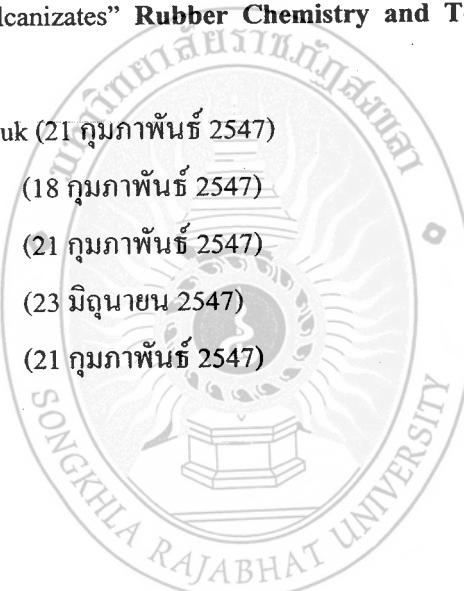
[www.christian81.free-online.co.uk](http://www.christian81.free-online.co.uk) (21 กุมภาพันธ์ 2547)

[www.eng.chula.ac.th](http://www.eng.chula.ac.th) (18 กุมภาพันธ์ 2547)

[www.eng.su.ac.th](http://www.eng.su.ac.th) (21 กุมภาพันธ์ 2547)

[www.mse.cornell.edu](http://www.mse.cornell.edu) (23 มิถุนายน 2547)

[www.sinrubtech.com.my](http://www.sinrubtech.com.my) (21 กุมภาพันธ์ 2547)



ภาควิชานักวิชาการ



## ภาคผนวก

### คำนวณ

$$\text{แรงดัน} (\text{Stress}) = F/A$$

เมื่อ  $F$  = แรงที่ใช้ดึง (นิวตัน)

$A$  = พื้นที่หน้าตัด (ตารางมิลลิเมตร)

เช่น แรงที่ใช้ดึง = 29.61 นิวตัน พื้นที่หน้าตัด = 20.28 ตารางมิลลิเมตร

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

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

เมื่อ  $L$  = ระยะที่ยืดยาว (มิลลิเมตร)

$L_0$  = ระยะก่อนยืดยาว (มิลลิเมตร)

เช่น ระยะก่อนยืดยาว = 20 มิลลิเมตร ระยะที่ยืดยาว = 40 มิลลิเมตร

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



ตารางที่ 1 ความเค้นกับความเครียดของยางที่ไม่มีสารตัวเติมซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

ความเครียด (Strain)	ความเค้น (Stress, MPa)		
	ยางธรรมชาติ	ยางเอสบีอาร์	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	จำนวนรอบการดึง (รอบ)						
	1	2	3	4	5	6	7
ยางธรรมชาติ	1.790	1.720	1.570	1.440	1.380	1.300	1.260
ยางเอสบีอาร์	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 การลดลงของความเค้นในยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมโดยทดสอบที่ความเร็ว 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					
	เข้มข้น เกรดN330	เข้มข้น เกรดN660	แคตเซียม คาร์บอเนต	โซน่าเคลร์	พัลคัม	ซิลิค้า
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 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมต่างชนิด  
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
เขมน้ำดำเกรด N330	1.651	1.607	1.522	1.508	1.477	1.450	1.363
เขมน้ำดำเกรด N660	1.440	1.206	1.172	1.149	1.115	1.100	1.072
แคลเซียมคาร์บอนเนต	0.824	0.755	0.764	0.779	0.769	0.766	0.750
ไชน่าเคลร์	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 การลดลงของความเค้นของยางบีโอาร์ที่ไม่ผสมสารตัวเติมและผสมสารตัวเติมต่างชนิด  
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
เขมน้ำดำเกรด N330	0	-0.044	-0.129	-0.143	-0.174	-0.201	-0.288
เขมน้ำดำเกรด N660	0	-0.234	-0.268	-0.291	-0.325	-0.34	-0.368
แคลเซียมคาร์บอนเนต	0	-0.069	-0.06	-0.025	-0.055	-0.058	-0.074
ไชน่าเคลร์	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 แสดงค่าความเค้นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ผสมเขม่าดำเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างกันซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

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 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างกัน โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

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 การลดลงของความเค้นของยางบีอาร์ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างกัน 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 แสดงค่าความเค้นกับความเครียดของยางบีอาร์ที่ใช้ระบบวัดค่าไนซ์ต่างกัน ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

ความเครียด (Strain)	ความเค็น (Stress, MPa) ที่ระบบการวัดค่าไนซ์			
	กำมะถันปกติ	อิวี	เซมิอิวี	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 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ที่ใช้ระบบการวัดค่าไนซ์ต่างกันผสมเขม่าคำที่ปริมาณ 40 phr โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ระบบการวัดค่าไนซ์	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
ระบบเซนอีวี	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 การลดลงของความเค้นของยางบีอาร์ที่ใช้ระบบการวัดค่าไนซ์ต่างกันผสมเขม่าคำที่ปริมาณ 40 phr โดยทดสอบที่ความเร็ว 200 มิลลิเมตรต่อนาที

ระบบการวัดค่าไนซ์	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
ระบบเซนอีวี	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 ความอ่อนค่าความเค้นของยางบีอาร์ไม่ผสมสารตัวเติมที่อัตราเร็วในการดึงต่างกัน

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 ความอ่อนค่าความเด่นของยางบีอาร์พสมเม็ดคำ 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 แสดงค่าความเด่นกับความเครียดของยางเอสนิอร์ที่ไม่ผสานสารตัวเติมและผสานสารตัวเติมต่างชนิดกันปริมาณ 40 phr ซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

ความเครียด (Strain)	ความเด่น (Stress , MPa) ในสารตัวเติม					
	เข้มคำ เกรดN330	เข้มคำ เกรดN660	แคลเซียม คาร์บอนเนต	ไนโตรเจลล์	ทัลคัม	ซิลิค้า
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 ความอ่อนค่าความเค้นของยางເອສີບອາຣ໌ທີ່ໄມ່ພສມສາຮຕັວເຕີມແລ້ວພສມສາຮຕັວເຕີມຕ່າງ  
ໜົດທີ່ປະມານ 40 phr ໂດຍທດສອບທີ່ຄວາມເຮົວ 200 ມິລືມຕົມຕ່ອນາທີ

ໜົດຂອງສາຮຕັວເຕີມ	ຈຳນວນຮອນກາຮົ່ງ (ຮອບ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ໄມ່ມີສາຮຕັວເຕີມ	0.657	0.653	0.65	0.648	0.646	0.644	0.643	0.628
ເບົນດຳກຣດ N330	1.818	1.605	1.605	1.553	1.510	1.493	1.486	1.476
ເບົນດຳກຣດ N660	1.696	1.465	1.461	1.456	1.440	1.436	1.420	1.422
ແຄລເຊີຍມາຮບອນເນຕ	0.766	0.765	0.746	0.737	0.732	0.710	0.595	0.503
ໄຟນ່າເຄລຍ	0.773	0.702	0.700	0.698	0.676	0.673	0.671	0.657
ທັລຄົມ	1.017	0.866	0.847	0.845	0.832	0.826	0.816	0.810
ຈິລິກາ	1.032	0.939	0.848	0.845	0.843	0.840	0.837	0.819

ตารางที่ 17 การลดลงຂອງความເກີນຂອງยางເອສີບອາຣ໌ທີ່ໄມ່ພສມສາຮຕັວເຕີມແລ້ວພສມສາຮຕັວເຕີມຕ່າງ  
ໜົດທີ່ປະມານ 40 phr ໂດຍທດສອບທີ່ຄວາມເຮົວ 200 ມິລືມຕົມຕ່ອນາທີ

ໜົດຂອງສາຮຕັວເຕີມ	ຈຳນວນຮອນກາຮົ່ງ (ຮອບ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ໄມ່ມີສາຮຕັວເຕີມ	0.657	0.653	0.65	0.648	0.646	0.644	0.643	0.628
ເບົນດຳກຣດ N330	1.818	1.605	1.605	1.553	1.510	1.493	1.486	1.476
ເບົນດຳກຣດ N660	1.696	1.465	1.461	1.456	1.440	1.436	1.420	1.422
ແຄລເຊີຍມາຮບອນເນຕ	0.766	0.765	0.746	0.737	0.732	0.710	0.595	0.503
ໄຟນ່າເຄລຍ	0.773	0.702	0.700	0.698	0.676	0.673	0.671	0.657
ທັລຄົມ	1.017	0.866	0.847	0.845	0.832	0.826	0.816	0.810
ຈິລິກາ	1.032	0.939	0.848	0.845	0.843	0.840	0.837	0.819

**ตารางที่ 18** แสดงค่าความเค้นกับความเครียดของยางเอสบีอาร์ที่ผสมเขม่าดำเป็นสารตัวเติมในปริมาณต่างกันซึ่งถูกกระทำให้เกิดการผิดรูปครั้งแรก

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** ความอ่อนค่าความเค้นของยางเอสบีอาร์ที่ผสมเขม่าดำในปริมาณต่างกัน 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 การลดลงของความเค็นของยางເອສນີອາຣ໌ທີ່ຜສມເຂັ້ມ່າດຳໃນປະມາມຕ່າງກັນ ໂດຍທດສອບ  
ທີ່ຄວາມເຮົວ 200 ນິລິລິມີໂຕຕ່ອນາທີ

ປະມາມເຂັ້ມ່າດຳ (phr)	ຈຳນວນຮອບການດຶງ (ຮອບ)						
	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 ແສດງຄ່າຄວາມເ肯ນກັບຄວາມເຄື່ອງຂອງຍາງເອສນີອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ຮະບບວັດຄາໄນ້ຕ່າງກັນ ຜົ່ງຖຸກ  
ກະທາໄຫ້ເກີດການຜິດຮູປຄັ້ງແຮກ

ຄວາມເຄື່ອງ (Strain)	ຄວາມເ肯ນ (Stress, MPa) ທີ່ຮະບບວັດຄາໄນ້			
	ກຳນະຄົນປົກຕົງ	ອື່ນ	ເຊີມອື່ນ	ສາງໄກ້ກຳນະຄົນ
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 ความอ่อนค่าความเค้นของยางເອສນີອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ຮະບນກວດຄາໄນ້ຫຼັງຕ່າງກັນຜສມເບມໍາດຳທີ່  
ປຣິມາລ 40 phr ໂດຍທດສອບທີ່ຄວາມເຮົາ 200 ມິລືລິມຕຣຕ່ອນາທີ

ຮະບນກວດຄາໄນ້ຫຼັງ	ຈຳນວນຮອບກວດດຶງ (ຮອບ)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ຮະບນກຳນະຄົນປົກຕິ	1.818	1.605	1.605	1.553	1.510	1.493	1.486	1.476
ຮະບນອົງ	1.297	1.145	1.145	1.010	1.051	1.057	1.057	1.036
ຮະບນເໜມອົງ	1.912	1.627	1.672	1.735	1.769	1.624	1.520	1.619
ຮະບນສາຮໃກ້ກຳນະຄົນ	2.418	2.315	2.121	2.089	2.116	2.062	2.054	1.995

ตารางที่ 23 การลดลงຂອງຄວາມເຄື່ນຂອງຍາງເອສນີອາຣ໌ທີ່ໃຊ້ຮະບນກວດຄາໄນ້ຫຼັງຕ່າງກັນຜສມເບມໍາດຳທີ່  
ປຣິມາລ 40 phr ໂດຍທດສອບທີ່ຄວາມເຮົາ 200 ມິລືລິມຕຣຕ່ອນາທີ

ຮະບນກວດຄາໄນ້ຫຼັງ	ຈຳນວນຮອບກວດດຶງ (ຮອບ)						
	1	2	3	4	5	6	7
ຮະບນກຳນະຄົນປົກຕິ	0	-0.213	-0.213	-0.265	-0.308	-0.325	-0.332
ຮະບນອົງ	0	-0.152	-0.152	-0.287	-0.246	-0.24	-0.24
ຮະບນເໜມອົງ	0	-0.24	-0.285	-0.177	-0.222	-0.288	-0.392
ຮະບນສາຮໃກ້ກຳນະຄົນ	0	-0.103	-0.297	-0.329	-0.302	-0.356	-0.364

ตารางที่ 24 ความອ່ອນຄ່າຄວາມເຄື່ນຂອງຍາງເອສນີອາຣ໌ໄໝ່ຜສມສາຮຕັມທີ່ອັຕຣາເຮົາໃນກວດດຶງຕ່າງກັນ

(ມິລືລິມຕຣ/ນາທີ)	ຈຳນວນຮອບກວດດຶງ (ຮອບ)							
	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 ความอ่อนค่าความเค็มของยาเส้นบีอาร์ผสานเข้มรำคำ 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

