

พอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนสำหรับการผลิตยางกันฝุ่น



นางสาวอัจฉรี ตระการวราภรณ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-130-099-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NATURAL RUBBER / POLYCHLOROPRENE RUBBER BLENDS  
FOR RUBBER BOOT PRODUCTION

MISS AUTCHAREE TRAGARNVARAPORN



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2543

ISBN 974-130-099-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนสำหรับการผลิต ยางกันฝุ่น
โดย	นางสาวอัจฉรี ตระการวราภรณ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ บารมี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นางวราภรณ์ ขจรไชยกูล

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น ส่วนหนึ่ง ของ การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจริต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ บารมี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(นางวราภรณ์ ขจรไชยกูล)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. เพียรพรรค ทิศคร)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรธน์ ประศาสน์สารกิจ)

อัฉริ ตรีการวารภรณ์ : พอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนสำหรับการผลิตยางกันฝุ่น. (NATURAL RUBBER / POLYCHLOROPRENE RUBBER BLENDS FOR RUBBER BOOT PRODUCTION) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ บารมี, อ. ที่ปรึกษาร่วม : นางวารภรณ์ ขจรไชยกูล, 156 หน้า. ISBN 974-130-099-9.

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการผสมธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนที่อัตราส่วนต่างๆ และเติมเขม่าดำเป็นสารเสริมแรงเพื่อใช้ในการผลิตยางกันฝุ่น โดยศึกษาผลของอัตราส่วนการผสมยางดังกล่าวและการเติมสารเชื่อมการผสมยางต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางผสมที่เสริมแรงด้วยเขม่าดำ ลักษณะการคงรูปของยางผสมได้จากการวิเคราะห์หรีโอกราฟี

ผลการทดลองแสดงว่า อัตราส่วนในการผสมยางและการเติมสารเชื่อมการผสมยางมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของยางผสม เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น สมบัติของยางก่อนการคงรูป ได้แก่ ความหนืด เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูปถึงร้อยละ 90 มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติของยางหลังการคงรูปทั้งก่อนและหลังการอบบ่มเร่งให้ยางเสื่อมสภาพที่  $100^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 22 ชั่วโมง ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ โมดูลัส ความแข็ง การยุบตัว และความสามารถทนต่อไอโซนีนนั้นปรับปรุงให้ดีขึ้นได้มากเมื่อเพิ่มยางพอลิคลอโรพรีน ในขณะที่ความยืดเมื่อขาด ความสามารถในการทนต่อการบวมตัวเนื่องจากน้ำมันหรือจาระบี และสมบัติความต้านทานการนำไฟฟ้ามีค่าลดลง แต่ความต้านทานแรงดึงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สำหรับสมบัติเชิงกลของยางผสมพบว่า ยางผสมมีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) และจุดยอดของ  $\tan \delta$  สองค่า ในขณะที่ยางชนิดเดียวมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) และจุดยอดของ  $\tan \delta$  เพียงค่าเดียวและมีลักษณะที่แคบกว่า อย่างไรก็ตามการเติมสารเชื่อมการผสมยางลงไปพบว่า อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) ทั้งสองค่าของยางผสมจะมีความแตกต่างกันน้อยลง แสดงว่าการผสมยางเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้นและยังช่วยเพิ่มความต้านแรงดึงได้เล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางผสมกับมาตรฐานยางกันฝุ่น พบว่าอัตราส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน ที่ 30 : 70 ไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง และที่ 40 : 60 โดยเติมสารเชื่อมการผสมยาง ยางมีค่าที่ได้มาตรฐานตามกำหนด ทั้งสองกรณีเตรียมโดยใช้เขม่าดำ N660 และทำให้คงรูปแบบระบบประสิทธิภาพ นอกจากนี้การใช้ยางธรรมชาติแทนที่ยางพอลิคลอโรพรีนจะลดต้นทุนในการผลิตยางกันฝุ่น และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติ

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิติ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



# #4272477923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : Natural rubber / Polychloroprene / Blend / Rubber blend / Rubber boot

AUTCHAREE TRAGARNVARAPORN : THESIS TITLE. (NATURAL RUBBER / POLYCHLOROPRENE RUBBER BLENDS FOR RUBBER BOOT PRODUCTION)

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DR. SHOOSHAT BARAMEE, THESIS

COADVISOR : VARAPORN KAJORNCHAIYAKUL, 156 pp. ISBN 974-130-099-9.

Rubber blends with varying natural rubber (NR) and polychloroprene (CR) ratio, using carbon black for reinforced, was studied for rubber boot production. The effects of the ratio and the homogenizing agent on the physical and mechanical properties of the blend were investigated. The cure characteristics of the rubber blend reinforced with carbon black were analyzed from the rheographs.

Experimental results showed that NR/CR ratio and homogenizing agent affect physical properties of the blend. When the NR/CR ratio was increased the properties of unvulcanisate, i.e. Mooney viscosity, rate of cure and time of cure to 90%, increased. The vulcanisate properties both before and after aging at 100°C for 22 h, i.e. specific gravity, modulus, hardness, compression set and ozone resistance, showed considerable improvement by the increase of polychloroprene while elongation at break, oil and grease resistance and anti-static properties decreased. But the tensile strength slightly increased. With regards to mechanical properties, the rubber blend appeared to have two glass transition temperatures ( $T_g$ ) and  $\tan \delta$  peaks whereas single rubber showed only one glass transition temperatures ( $T_g$ ) and narrower  $\tan \delta$  peak. However, with addition of homogenizing agent the difference of the two glass transition temperatures ( $T_g$ ) of the rubber blend became smaller. This indicated the improved homogeneity of the blend and thus its tensile strength was also slightly increased. When the properties of the rubber blend are compared with the specifications of rubber boot standard, the blend of natural rubber to polychloroprene at 30:70 without homogenizing agent and at 40:60 with homogenizing agent meet the standard specifications. Both have been prepared using N660 carbon black as reinforcement and cured with efficient vulcanizing system. Moreover, substitution of natural rubber for polychloroprene saves cost for rubber boot production and increases added value to natural rubber.

Department Chemical Technology

Field of study Chemical Technology

Academic year 2000

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ บารมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ คำสั่งสอน และความช่วยเหลือทุกอย่างเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้

ขอกราบขอบคุณ อาจารย์วราภรณ์ ขจรไชยกูล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือแนะนำแนวทางในการวิจัย และให้ข้อมูลในการวิจัย

ขอกราบขอบคุณ สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ เครื่องมือ เครื่องทดสอบ วัสดุดิบและสารเคมีต่างๆ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของสถาบันที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบคุณบริษัท PI-Chemical Innovation Ltd., บริษัทหจก.สตาร์ริบบเอร์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพนักงาน TOTO Drive Shaft ที่ให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลของยางกันฝุ่นเพลารถยนต์

ท้ายสุดนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ผู้ที่ให้กำเนิด เลี้ยงดูนิสิตด้วยความรักความเข้าใจตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ

### บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์.....	1
1.2 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 ยางกันฝุ่น.....	4
2.2 ยางธรรมชาติ.....	6
2.3 ยางพอลิคลอโรพรีน.....	11
2.4 การผสมยาง.....	18
2.5 สารเติมแต่งสำหรับยาง.....	20
2.6 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง.....	44
2.7 การทดสอบการแปรรูปและการคงรูป.....	49
2.8 งานวิจัยในอดีต.....	53
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	57
3.1 ยางและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	57
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	59
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	59
3.4 ขั้นตอนการทำงานวิจัย.....	59
3.5 สูตรยางผสมที่ใช้ในงานวิจัย.....	60
3.6 ขั้นตอนการบดผสมยาง.....	69
3.7 การทดสอบการแปรรูปและการคงรูป.....	71
3.8 การทดสอบสมบัติของยางผสมที่ผ่านการคงรูป.....	72

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	74
4.1 ความหนืดของยางผสม.....	99
4.2 เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูป.....	100
4.3 ความต้านทานแรงดึง.....	102
4.4 การยุบตัว.....	107
4.5 ความแข็ง.....	110
4.6 ความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับน้ำมันหรือจาระบี.....	112
4.7 ความต้านทานการนำไฟฟ้า.....	114
4.8 ความต้านทานการสัมผัสกับไอโซน.....	116
4.9 สันฐานวิทยาของยางผสม.....	117
4.10 ผลของอัตราส่วนในการผสมยางและผลจากการใช้ Homogenizing agent ต่อค่าโมดูลัสสโตเรช โมดูลัสสูญเสีย และค่า $\tan \delta$ ของยางผสม.....	120
4.11 การเปรียบเทียบสมบัติของยางผสมกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด.....	127
4.12 การคิดต้นทุนการผลิต.....	135
5. สรุปผลการทดลอง.....	137
ข้อเสนอแนะ.....	140
รายการอ้างอิง.....	141
ภาคผนวก.....	145
ภาคผนวก ก การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป.....	146
ภาคผนวก ข การคำนวณ.....	154
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	156

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1	แสดงคุณภาพของยางแท่ง เอส ที อาร์ ชนิดต่าง ๆ.....10
2.2	ยางพอลิคลอโรพรีนชนิดต่าง ๆ ในทางการค้า.....12
2.3	สมบัติต่าง ๆ ของยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีน.....17
2.4	สมบัติทางกายภาพของยางเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้น.....24
2.5	ตัวอย่างสารเคมีที่ให้กำมะถัน.....26
2.6	ตัวอย่างเขม่าดำเกรดต่าง ๆ ที่เรียกตามระบบ ASTM.....39
3.1	สมบัติของยางธรรมชาติ.....57
3.2	สมบัติยางพอลิคลอโรพรีน.....57
3.3	สมบัติของสารเชื่อมการผสมยางชนิด Struktol 60NS.....58
3.4	สูตรยางที่ใช้ในการหาสูตรควบคุมของยางพอลิคลอโรพรีน (Control CR).....61
3.5	สูตรยางที่ใช้ในการหาสูตรควบคุมของยางธรรมชาติ (Control NR).....62
3.6	สูตรยางที่ใช้ในการหาสูตรควบคุมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (Control blend NR/CR).....63
3.7	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง สำหรับสูตรที่ 14-35.....64
3.8	สูตรยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนไม่เต็ม Homogenize (Struktol 60NS) เพื่อศึกษาถึงผลจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนยางในยางผสม.....64
3.9	สูตรยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนเต็ม Homogenize (Struktol 60NS) เพื่อศึกษาถึงผลจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนยางในยางผสม.....65
3.10	สูตรยางที่ใช้ในการผลิตยางกันฝุ่นให้มีสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด โดยศึกษาในเรื่องของการปรับเปลี่ยนชนิดของเขม่าดำที่ใช้.....66
3.11	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง สำหรับสูตรที่ 36-42.....67
3.12	สูตรยางที่ใช้ในการผลิตยางกันฝุ่นให้มีสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด (ไม่เต็ม Homogenize) โดยศึกษาในเรื่องของการปรับเปลี่ยนปริมาณของเขม่าดำที่เลือกและระบบวัลคาไนซ์.....67
3.13	สูตรยางที่ใช้ในการผลิตยางกันฝุ่นให้มีสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด (เต็ม Homogenize) โดยศึกษาในเรื่องของการปรับเปลี่ยนปริมาณของเขม่าดำที่เลือกและระบบวัลคาไนซ์.....68
4.1	สมบัติทางกายภาพของยางสูตรควบคุมสำหรับยางพอลิคลอโรพรีน (Control CR)....81

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.2 ตารางแสดงการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่า physical properties หลังผ่านการทำ heat aging ที่ 100°C 22 hr. ของสูตร Control CR (สูตรที่ 7).....	83
4.3 สมบัติทางกายภาพของยางสูตรควบคุมสำหรับยางธรรมชาติ (Control NR).....	84
4.4 ตารางแสดงการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่า physical properties หลังผ่านการทำ heat aging ที่ 100°C 22 hr. ของสูตร Control NR (สูตรที่ 10).....	85
4.5 สมบัติของยางสูตรควบคุมสำหรับยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (Control blend NR/CR) ที่อัตราส่วน 30/70 ไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent).....	86
4.6 ตารางแสดงการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่า physical properties หลังผ่านการทำ heat aging ที่ 100°C 22 hr. ของสูตร Control blend NR/CR ที่อัตราส่วน 30/70 ไม่เติม Homogenizing agent (สูตรที่ 14).....	87
4.7 สมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนโดยไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent).....	88
4.8 สมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนโดยเติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent).....	90
4.9 สมบัติทางกายภาพของยางผสมเติม Homogenizing agent ที่ทำการศึกษาในเรื่องการปรับเปลี่ยนชนิดของเขม่าดำ.....	92
4.10 สมบัติทางกายภาพของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent ที่ทำการศึกษาในเรื่องการปรับเปลี่ยนปริมาณเขม่าดำและระบบที่ใช้ในการคงรูป.....	93
4.11 ตารางแสดงการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่า physical properties หลังผ่านการทำ heat aging ที่ 100°C 22 hr. ของสูตรที่ 36-39.....	94
4.12 สมบัติทางกายภาพของยางผสมเติม Homogenizing agent ที่ทำการศึกษาในเรื่องการปรับเปลี่ยนปริมาณเขม่าดำและระบบที่ใช้ในการคงรูป.....	95
4.13 ตารางแสดงการหาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่า physical properties หลังผ่านการทำ heat aging ที่ 100°C 22 hr. ของสูตรที่ 40-42.....	96
4.14 แสดงสมบัติทางกายภาพของยางผสมที่ทำการคัดเลือกจากการเปรียบเทียบกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด รวมถึงสูตรควบคุมสำหรับ CR และ NR.....	97
4.15 ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $t_g$ ) และ $\tan \delta$ ของยางผสมที่อัตราส่วนต่างๆ.....	122
4.16 มาตรฐานยางกันฝุ่นเพลลาที่กำหนด.....	127

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.17	เปรียบเทียบสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน ไม่เติม Homogenizing agent กับมาตรฐานยางกันฝุ่นเพลารถยนต์.....128
4.18	เปรียบเทียบสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน เติม Homogenizing agent กับมาตรฐานยางกันฝุ่นเพลารถยนต์.....130
4.19	เปรียบเทียบสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนที่ได้ จากการทดลองตอนที่ 2 และสูตรควบคุม NR และ CR กับมาตรฐานยางกันฝุ่น.....132
4.20	เปรียบเทียบสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนที่ทำ การปรับสูตรให้ผ่านมาตรฐาน และสูตรควบคุม NR และ CR กับมาตรฐานยางกันฝุ่น.133
4.21	แสดงสูตรยางผสมที่มีสมบัติเฉพาะของยางกันฝุ่นเพลาผ่านมาตรฐานที่กำหนด.....134
4.22	แสดงการคิดต้นทุนการผลิตในการผลิตยางกันฝุ่น.....136
5.1	สรุปสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น.....139



## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ตำแหน่งการใช้งานของยางกันฝุ่นเพลานในรถยนต์.....	4
2.2 ลักษณะของยางกันฝุ่นเพลา.....	5
2.3 ลักษณะของ cis – configuration ของยางธรรมชาติ.....	7
2.4 ลักษณะโครงสร้างของหน่วยย่อยคลอโรพรีน.....	11
2.5 การผลิตยางพอลิคลอโรพรีน.....	12
2.6 โครงสร้างของยางพอลิคลอโรพรีนแบบต่าง ๆ.....	15
2.7 การเชื่อมโยงของยางด้วยกำมะถัน.....	22
2.8 อิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกจนขาด.....	23
2.9 สมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปริมาณของการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้น.....	23
2.10 โครงสร้างของกำมะถัน rhombic.....	24
2.11 แสดงการเชื่อมโยงของยางโดยใช้สารเปอร์ออกไซด์.....	27
2.12 กลไกการเกิดการคงรูปของยางพอลิคลอโรพรีนโดยใช้โลหะออกไซด์.....	28
2.13 ส่วนประกอบภายในของเครื่อง Banbury mixer.....	45
2.14 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกลิ้ง.....	47
2.15 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดไฮโดรลิก.....	48
2.16 โรเตอร์และช่องใส่ยางของเครื่อง Mooney viscosity.....	49
2.17 กราฟอัตราเริ่มการคงรูปจากเครื่อง Mooney Viscometer.....	50
2.18 Oscillating disk rheometer.....	51
2.19 ลักษณะกราฟที่ได้จากเครื่อง ODR.....	51
2.20 ลักษณะของกราฟการคงรูปแบบต่าง ๆ.....	52
3.1 ขั้นตอนการทำงานวิจัย.....	70
4.1 ความหนืดของยางผสม.....	99
4.2 เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป.....	101
4.3 เวลาที่ยางใช้ในการคงรูป.....	101
4.4 ความต้านทานแรงดึงของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent.....	103
4.5 ความต้านทานแรงดึงของยางผสมเติม Homogenizing agent.....	103
4.6 ความยืดเมื่อขาดของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent.....	104
4.7 ความยืดเมื่อขาดของยางผสมเติม Homogenizing agent.....	104
4.8 โมดูลัสของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent.....	106



## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.9 โมดูลัสของยางผสมเติม Homogenizing agent.....	106
4.10 เปอร์เซ็นต์การยุบตัวของยางผสม.....	109
4.11 ความแข็งของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent.....	111
4.12 ความแข็งของยางผสมเติม Homogenizing agent.....	111
4.13 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent.....	113
4.14 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยางผสมเติม Homogenizing agent.....	113
4.15 ค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าของยางผสม.....	115
4.16 สัณฐานวิทยาของยางสูตรควบคุม กำลังขยาย 2500 เท่า.....	118
4.17 สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน ที่อัตราส่วน NR : CR คือ 90 : 10 phr กำลังขยาย 20 เท่า.....	118
4.18 สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน ที่อัตราส่วน NR : CR คือ 90 : 10 phr กำลังขยาย 2500 เท่า.....	119
4.19 สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน กำลังขยาย 800 เท่า.....	119
4.20 กราฟแสดงผลการทดสอบ DMA ของสูตรควบคุมยางพอลิคลอโรพรีน (สูตรที่ 7).....	123
4.21 กราฟแสดงผลการทดสอบ DMA ของสูตรควบคุมยางธรรมชาติ (สูตรที่ 10).....	124
4.22 กราฟแสดงผลการทดสอบ DMA ระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน ที่อัตราส่วน 30 : 70 ไม่เติม Homogenizing agent (สูตรที่ 38).....	125
4.23 กราฟแสดงผลการทดสอบ DMA ระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน ที่อัตราส่วน 40 : 60 เติม Homogenizing agent (สูตรที่ 41).....	126

# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์จากยางประเภทต่างๆ เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น เช่น ยางกันฝุ่น (Rubber Boot) ซึ่งมีการใช้กันมากในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ โดยมากมักผลิตจากยางสังเคราะห์ เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน ยางสังเคราะห์ที่นิยมใช้ เช่น ยางคลอโรพรีน, ยางไนไตรล์ เป็นยางที่มีราคาแพง ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง ในขณะที่ยางพารา (ยางธรรมชาติ) เป็นวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทย แต่ประสบปัญหาราคายางตกต่ำ มีสมบัติไม่เป็นไปตามต้องการสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์บางประเภท และยังมีสมบัติบางประการด้อยกว่ายางสังเคราะห์บางชนิดอีกด้วย ดังนั้น หากสามารถนำยางธรรมชาติที่มีอยู่มากในประเทศมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต ก็จะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตลงได้ จึงมีการปรับปรุงสมบัติของยางธรรมชาติให้ดีขึ้น ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การผสมยางธรรมชาติเข้ากับยางสังเคราะห์ การเตรียมอนุพันธ์ของยางธรรมชาติชนิดต่าง ๆ เช่น การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นต้น

การผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมทำกันเพราะว่าสามารถทำได้สะดวกโดยใช้เครื่องมือที่มีอยู่ในโรงงานอุตสาหกรรมยาง ในการผสมนี้สมบัติของยางสังเคราะห์ ได้แก่ ความต้านทานต่อการสึกหรอ ความต้านทานต่อความร้อน เป็นต้น เสริมให้ยางธรรมชาติสำหรับสมบัติของยางธรรมชาติ ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง การกระดอน ทำให้กระบวนการผลิตยางทำได้ง่ายขึ้น ความสามารถยึดติดกับเส้นใยและโลหะ สมบัติทางกายภาพด้านการสะสมความร้อนต่ำ ตลอดจนเรื่องราคา เป็นต้น ก็ช่วยเสริมให้แก่ยางสังเคราะห์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการออกสูตรยางกันฝุ่นที่ใช้ยางธรรมชาติผสมเข้าไปในยางสังเคราะห์ ในที่นี้คือ ยางพอลิคลอโรพรีน เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมสำหรับการผลิตยางกันฝุ่นตามมาตรฐานที่กำหนด รวมถึงการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน และผลจากการใช้สารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agents) ต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางผสมที่ผลิตได้ นอกจากนี้ยังมีการใช้สารตัวเติมผสมในยางเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น หรือเรียกว่าเป็น สารเสริมแรง (reinforcement) ในที่นี้ใช้เขม่าดำ (carbon black)

## วัตถุประสงค์

พัฒนาสูตรการผลิตยางกันฝุ่นจากพอลิเมอร์ผสมยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีน และศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางที่เตรียมได้

## ขอบเขตการดำเนินงานวิจัย

1. ทดสอบสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และการทดสอบยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่เป็นวัสดุดิบ เช่น ปริมาณสิ่งสกปรก, ปริมาณสารระเหย, ปริมาณเถ้า, ปริมาณไนโตรเจน, ดัชนีความอ่อนตัว, สี, ความหนืด เป็นต้น

2. กำหนดสูตรการทดลองที่ประกอบด้วยสารดังต่อไปนี้ในอัตราส่วนต่าง ๆ

ยางธรรมชาติชนิด STR 5L, ยางพอลิคลอโรพรีน, สารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agents), เขม่าดำ (carbon black), สารช่วยในการแปรรูป (Paraffinic oil และ Hiko tack), สารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป (Stearic acid), สารกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (6PPD และ Wax ozone), สารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (ETU, TMTD และ MBTS) และ สารวัลคาไนซ์ (Zinc oxide, Magnesium oxide และ Sulphur)

3. ปริมาณของยางธรรมชาติผสมยางพอลิคลอโรพรีนในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน และการเติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agents)

-อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ (NR) : ยางพอลิคลอโรพรีน (CR) เป็น 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90 และ 0 : 100 phr

-สำหรับสูตรที่ศึกษาการเติมสารเชื่อมการผสมยางจะเติมสารดังกล่าวในอัตราส่วน 5 phr

-ทดสอบสมบัติการคงรูปและการแปรรูปของยางผสมก่อนการคงรูป (Unvulcanized Compound) เช่น ความหนืด (Mooney Viscosity), เวลาที่ยางเริ่มคงรูป (Time Scorch) และ เวลาที่ใช้ในการคงรูป (Time cure 90 %)

4. ทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางผสม ดังนี้

-ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength)

-ความยืดเมื่อขาด (Elongation at break)

-การยุบตัวของยาง (Compression set)

-ความแข็ง (Hardness)

-ความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับอากาศและโอโซน (Ozone resistance)

-ความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับน้ำมันและจาระบี (Fluid resistance)

-ความสามารถในการต้านไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic testing)

- ทดสอบสมบัติเชิงกลของยางด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Thermal Analyzer
- ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope

### วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ทำการหาสูตรควบคุมและสูตรที่ใช้ในการบดผสมยาง
2. ศึกษาการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน และการเติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agents) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติ เชิงกลของยางผสม
3. เปรียบเทียบผลของสมบัติที่ได้กับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด เพื่อทำการเลือกสูตรที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติในยางผสมมากที่สุด และยังคงสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการผลิตยางกันฝุ่นได้ ( ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด )

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ได้สูตรและเทคนิคในการผลิตยางกันฝุ่น จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีน
2. ช่วยลดต้นทุนในการผลิตยางกันฝุ่น และเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้ยางธรรมชาติที่มีอยู่มากในประเทศให้มากขึ้น เป็นการเพิ่มมูลค่าของยางธรรมชาติ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

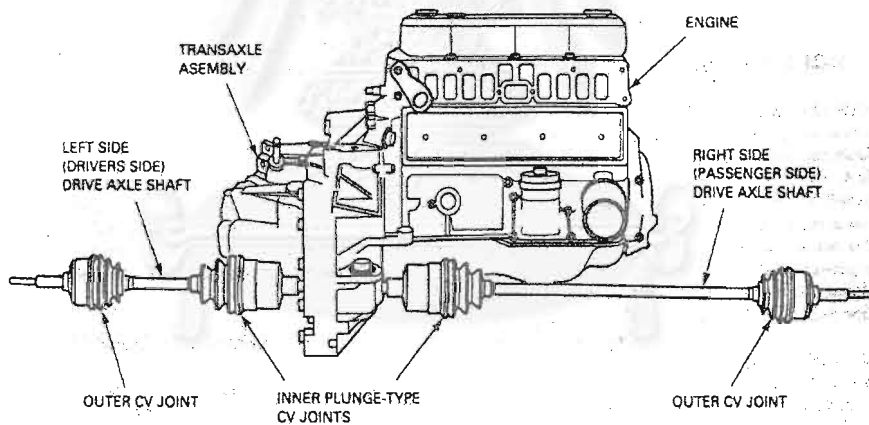
### ทฤษฎีและวารสารปริทรรศน์

#### 2.1 ยางกันฝุ่น (Rubber Boot) [1,25,32,37]

ยางกันฝุ่น (Rubber Boot) เป็นผลิตภัณฑ์ยางที่มีการใช้งานกันอย่างมากในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ โดยนำมาใช้เป็นยางอะไหล่รถยนต์ด้วยกัน 3 แห่ง คือ

- ยางกันฝุ่นพวงมาลัย (Boot seal for rack and steering gear)
- ยางกันฝุ่นเพลลา (Boot for front wheel drive axle seal)
- ยางกันฝุ่นเบรก (Boot-dust cover for drum brake assembly)

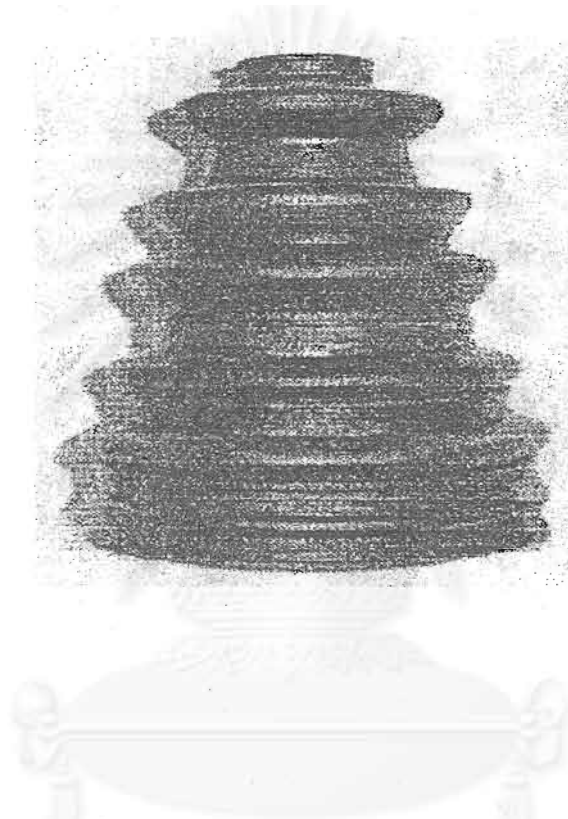
ในงานวิจัยนี้ สนใจศึกษาการผลิตยางกันฝุ่นบริเวณเพลลารถยนต์ซึ่งสามารถแสดงลักษณะการใช้งานได้ ดังรูป



รูปที่ 2.1 ตำแหน่งการใช้งานของยางกันฝุ่นเพลลาในรถยนต์ [32]

ยางกันฝุ่นเพลลา จะใช้เป็นยางหุ้มลูกปืนและเชื่อมตรงส่วนข้อต่อของเพลลาหน้าในรถยนต์ เพื่อประโยชน์ในการกันฝุ่น สิ่งเจือปน น้ำ ความชื้น อากาศ และน้ำมัน ไม่ให้เข้าไปภายใน เมื่อจากจะส่งผลทำให้ลูกปืนแตก และข้อต่อเสียหายได้ เป็นอันตรายต่อการขับขี่

ในการประกอบชิ้นส่วนของยางกันฝุ่นเข้ากับส่วนของลูกปืนและข้อต่อของเพลารถยนต์ จะต้องทำการเติมจาระบีหล่อลื่นไว้ภายใน โดยจาระบีที่ใช้จะต้องเป็นชนิดพิเศษ คือเป็นจาระบีเหลว ซึ่งประกอบด้วยโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ (Molybdenum-disulfide) หรือ โมลิบดีนัมแกรไฟต์ (Molybdenum-graphite) เป็นส่วนใหญ่ จาระบีดังกล่าวจะมีสมบัติในการทนความร้อนและทนต่อการเสียดสีที่ความเร็วรอบสูงๆ ได้ดี มีสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากจาระบีทั่วไปตรงที่จะไม่จับตัวเป็นก้อนเหนียวและแข็ง ช่วยหล่อลื่นการหมุนของดัลบลูกปืน



รูปที่ 2.2 ลักษณะของยางกันฝุ่นเพลลา [37]

ยางกันฝุ่น จะต้องมียุคสมัยที่ยืดหยุ่นได้ดีในทุกสภาพอากาศ มีความแข็งแรงพอต่อการแตกหรือการรั่วที่อาจเกิดขึ้นได้ และเนื่องจากชิ้นยางกันฝุ่นต้องสัมผัสกับน้ำมัน จาระบี และอากาศ ตลอดเวลา ดังนั้น ยางกันฝุ่นจึงต้องมีสมบัติในการทนต่อการบวมตัวเนื่องจากน้ำมัน และจาระบี (Fluid resistance) และสามารถทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการสัมผัสกับอากาศ (Ozone resistance) ซึ่งสมบัติดังกล่าวมักเป็นสมบัติของยางสังเคราะห์

ยางกันฝุ่นที่ใช้งานกันโดยทั่วไป มักผลิตจากยางสังเคราะห์ เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน ยางสังเคราะห์ดังกล่าว ได้แก่ ยางไนไตรล์ (NBR) และยางพอลิคลอโรพรีน (CR) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของยางที่มีสมบัติเฉพาะทาง มีราคาแพง

## 2.2 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) [16,21,31]

พืชที่ให้ยางธรรมชาติเป็นไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ เรียกว่าต้นยางพารา มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* ซึ่งแต่เดิมมีอยู่เฉพาะในทวีปอเมริกาใต้เท่านั้น และได้มีผู้นำมาปลูกในทวีปเอเชียและแอฟริกา ภูมิอากาศแบบร้อนชื้นจะเหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของต้นยางพารา เช่น ในแถบภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งในปัจจุบันสามารถผลิตยางธรรมชาติได้มากกว่า 90% ของยางธรรมชาติที่ใช้ในโลกที่เหลือได้มาจากแถบแอฟริกากลาง สำหรับประเทศไทยสามารถปลูกยางพาราได้งอกงามดีทางภาคใต้และภาคตะวันออก

เมื่อต้นยางโตเต็มที่แล้วชาวสวนจะเก็บน้ำยางโดยการกรีดเปลือกของลำต้น (tapping) ให้น้ำยางไหลซึมออกมา น้ำยางที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำมัน มีกลิ่นหอมเล็กน้อยประกอบด้วยอนุภาคยางเล็ก ๆ แขนงลอยอยู่ในน้ำในลักษณะอิมัลชัน (emulsion) มีเนื้อของแข็ง 30 - 40 % ขึ้นกับพันธุ์ของต้นยาง อายุของต้นยาง และฤดูกาล

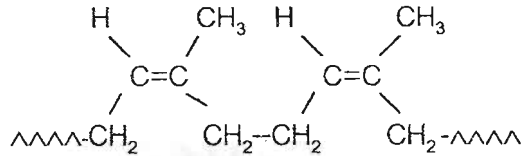
การแปรรูปน้ำยางให้เป็นยางดิบมีหลายลักษณะต่างๆ กัน คืออยู่ในรูปของน้ำยางข้น (concentrated latex) หรือยางดิบแห้งชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (ribbed smoked sheet, RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (air-dried sheet, ADS) ยางเครพขาว (crepes) หรือยางแท่ง (block rubber) เป็นต้น เพื่อให้เป็นวัตถุดิบป้อนโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ยางประเภทต่าง ๆ เช่น ยางรถยนต์ ยางล้อเครื่องบิน ที่นอนฟองน้ำ และรองเท้ายาง เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากยางมีสมบัติพิเศษแตกต่างจากวัสดุอื่น ๆ คือ มีความยืดหยุ่นดี นอกจากนี้ยังมีเนื้อที่บวม สามารถกั้นน้ำและอากาศไม่ให้ผ่านได้โดยง่าย อีกทั้งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ดังนั้นยางจึงเป็นวัสดุที่มีประโยชน์และมีคุณค่ามาก

ยางธรรมชาติเป็นยางที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตวัตถุสำเร็จรูปทั่วไปที่ไม่ต้องการสมบัติพิเศษ เช่น การทนต่อน้ำมัน หรือทนต่อความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นหลายชนิด แต่ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพื่อผลิตวัตถุสำเร็จรูปยางก็ยังสูงอยู่เนื่องจากยางธรรมชาติมีสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (tear strength) ดีมาก มีความสามารถในการกระดอน (resilience) สูง มีสมบัติเหนียวติดกันเองดีมาก การเกิดความร้อนสะสมต่ำ และมีความต้านทานต่อการซึมผ่านของแก๊สดี



### 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า พอลิไอโซพรีน (polyisoprene,  $(C_5H_8)_n$ ) ซึ่งได้จากหน่วยของไอโซพรีนต่อกันแบบหัวต่อหาง (head to tail) ลักษณะของ cis- configuration เป็นดังนี้



รูปที่ 2.3 ลักษณะของ cis - configuration ของยางธรรมชาติ [13]

ส่วนยางธรรมชาติชนิดอื่น ๆ เช่น ยางฮีเวีย (hevea rubber) มีโครงสร้างเป็น cis 1,4 polyisoprene ยางกัตตาเปอร์ชา (gutta-percha) และยางบาลาตา (balata) มีโครงสร้างเป็น trans 1,4 polyisoprene ซึ่งต้นกัตตาเปอร์ชาอยู่ในประเทศมาเลเซีย ส่วนบาลาตามีอยู่บริเวณชายฝั่งตะวันออกเฉียงเหนือของทวีปอเมริกาใต้ และในประเทศอินโดนีเซีย ซึ่งไม่ค่อยมีความสำคัญในทางการค้ามากนักมีการใช้งานน้อยแต่เดิมใช้ทำขนวนหุ้มสายเคเบิลได้นำ ปัจจุบันใช้ทำที่หุ้มลูกกอล์ฟและกาวพิเศษบางชนิดเท่านั้น ทั้งนี้เพราะน้ำยางเกิดการแข็งตัวได้เร็วมากในอากาศ

### 2.2.2 น้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex) [16]

น้ำยางที่ได้จากต้นยางมีสีขาวขุ่นข้นคล้ายน้ำนม มีกลิ่นหอมเล็กน้อย ความหนาแน่นประมาณ 0.975 - 0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่า pH 6.5 - 7.0 น้ำยางจะมีอนุภาคขนาดต่าง ๆ กันแขวนลอยหรือกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว (disperse medium) โดยอนุภาคเหล่านี้จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 5 ไมครอน และมีประจุเป็นลบซึ่งผลักดันตลอดเวลาจึงทำให้อนุภาคเหล่านี้สามารถแขวนลอย และคงสภาพเป็นยางเหลวอยู่ได้นานจนกว่าจะมีภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ มารบกวนจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

น้ำยางมีลักษณะเป็นสารละลายคอลลอยด์ (colloid) ชนิดที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (hydrosol) แต่มีลักษณะพิเศษ คือ น้ำยางมีลักษณะก้ำกึ่งระหว่างสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และสารที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) แต่ลักษณะที่ไม่ชอบน้ำจะเด่นชัดกว่า นอกจากนี้น้ำยางยังประกอบไปด้วยส่วนที่ไม่ใช่ยาง ได้แก่ สารพวกโปรตีนและกรดอะมิโน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และอนุมูลของโลหะเป็นต้น



### 2.2.3 ยางดิบแห้งชนิดต่าง ๆ [9]

#### 1) ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet, RSS)

ประเทศไทยสามารถผลิตยางแผ่นรมควันได้ประมาณ 80 % ของยางดิบที่ผลิตได้ทั้งหมดส่วนใหญ่ได้จากสวนยางขนาดเล็ก ซึ่งจะทำให้การแปรรูปน้ำยางสดเหล่านี้ให้เป็นยางแผ่นรมควัน (Smoked Sheet) โดยนำยางแผ่นดิบที่ได้มาผึ่งทำให้แผ่นยางที่ได้มีความชื้นลดลง สำหรับการจัดชั้นของยางนั้นจะดูด้วยสายตา โดยพิจารณาจาก ขนาด รูปร่าง ความหนา สี เนื้อราบนแผ่นยาง ความสม่ำเสมอของตำหนิจากการรมควัน ความชื้น สิ่งแปลกปลอม เป็นต้น

การจัดชั้นคุณภาพของยางแผ่นรมควันสามารถแบ่ง ได้เป็นชั้นต่าง ๆ ดังนี้ คือ

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ

เป็นยางแผ่นรมควันที่มีการควบคุมการผลิตอย่างเข้มงวด ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือร่องรอยของยางถูกรมควันมากเกินไป แผ่นยางต้องแห้งดี สะอาดรมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 1

ก้อนยางแต่ละก้อนต้องไม่ขึ้นรา ไม่ปรากฏจุดหรือร่องรอยของยางถูกรมควันมากหรือน้อยเกินไป ยางต้องแห้งดี สะอาด รมควันสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ปราศจากฟองอากาศ สิ่งสกปรก ตลอดจนสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 2

ก้อนยางแต่ละก้อนมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 5 % แผ่นยางมีฟองอากาศบ้าง แต่ปราศจากร่องรอยของการถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีจุดต่างของสิ่งสกปรกหรือสิ่งแปลกปลอม

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 3

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 10 % แผ่นยางมีจุดต่างและฟองอากาศบ้าง แต่ต้องไม่มีร่องรอยของยางถูกรมควันไม่สม่ำเสมอ ยางต้องแห้งดี สะอาด ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 4

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 20 % แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศ และร่องรอยของการถูกรมควันไม่ถูกต้องปานกลาง ยางต้องแห้งดี ไม่มีสิ่งแปลกปลอม

##### ยางแผ่นรมควันชั้น 5

ก้อนยางมีราขึ้นได้บ้าง แต่ต้องไม่เกิน 30 % แผ่นยางมีจุดต่าง ฟองอากาศ และร่องรอยของการถูกรมควันไม่ถูกต้องขนาดใหญ่

## 2) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air – Dried Sheet, ADS)

หนังสือมาตรฐานสากลว่าด้วยการจัดชั้นคุณภาพและการห่ออย่างธรรมชาติ (International Standards of Quality and Packing for Natural Grade The Green Book) หมายถึง “แผ่นยางที่มีสีใส ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตเช่นเดียวกับยางแผ่นรมควันทุกประการเพียงแต่จะต้องมีการควบคุมแต่ละขั้นตอนอย่างพิถีพิถัน และทำให้แห้งโดยไม่ต้องรมควัน” และต้องไม่มีการเติมสารอื่นนอกเหนือไปจากสารที่ได้รับการยกเว้น เช่น สารฟอกสีโซเดียมไบซัลไฟท์ (sodium bisulphite) และสารกันเชื้อราพาราไนโตรฟีนอล (paranitrophenol, PNP)

## 3) ยางเครพ (Crepes) ยางเครพที่ผลิตโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 พวก คือ

ก. ยางเครพที่ผลิตจากน้ำยางสด ได้แก่ ยางเครพขาว และยางเครพสีจางเป็นยางที่ไม่มีสารสีเหลือง กรรมวิธีผลิตไม่ทำให้ยางมีสีคล้ำหรือมีสีดำ มีการพิจารณาคัดเลือกพันธุ์ยางที่ใช้ในการผลิต น้ำยางที่จับตัวต้องเจือจางให้มีเนื้อยางแห้ง 20 % เติมโซเดียมไบซัลไฟท์ และสารฟอกสี

ข. ยางเครพคุณภาพต่ำ เป็นยางที่นำมาจากยางที่จับตัวแล้ว เช่น เศษยาง ในกระบวนการผลิตขณะที่ยางผ่านเข้าเครื่องจักรต้องฉีดน้ำยางตลอดเวลาเพื่อชะล้างทำความสะอาดชั้นตอนสุดท้ายจะรีดยางเป็นแผ่นเครพ ผึ่งให้แห้งในโรงผึ่ง

## 4) ยางแท่ง (Block Rubber)

ยางแท่งเป็นยางที่ทำจากน้ำยางและเศษก้อนยาง โดยทำให้ยางเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำมาอบด้วยความร้อนให้แห้งต่อจากนั้นจึงอัดเป็นแท่ง ยางแท่งเป็นยางที่มีการระบุคุณภาพมาตรฐานมีการใช้เครื่องจักรเข้ามาใช้ในกระบวนการผลิต บรรจุหีบห่อทันสมัยสะดวกในการขนส่งและใช้งาน ยางแท่งของประเทศไทยมีชื่อเรียกว่า เอส ที อาร์ (STR, Standard Thai Rubber) สมบัติที่ใช้ระบุเป็นคุณภาพมาตรฐานยางแท่ง ตามตารางที่ 2.1

## 5) ยางskim (Skim Rubber)

ยางskimเป็นผลิตผลจากหางน้ำยาง ซึ่งมีเนื้อยางแห้งอยู่ 3-7 % อันเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำยางข้น การผลิตยางskimโดยนำหางน้ำยางมาจับตัว ยางที่ได้จะมีสารที่ไม่ใช่ยางปะปนอยู่ เช่น โปรตีนซึ่งทำให้ยางมีกลิ่นเหม็น และปฏิกิริยาการทำให้ยางคงรูปเกิดขึ้นเร็ว โดยทั่วไปยางskimจะผลิตจำหน่ายในรูปของยางแท่งและยางเครพ

## 6) ยางความหนืดคงตัว (Viscosity Stabilized Rubber)

ยางชนิดนี้มีความหนืดต่ำและคงตัว ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนการบดยางผสมสารเคมีที่เรียกว่า การบดยางให้นิ่ม (mastication) จะทำให้ประหยัดพลังงานในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยที่สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ยางไม่เปลี่ยนแปลง ยางพวกนี้มีหลายชนิดด้วยกัน เช่น

- ยาง CV (Constant Viscosity Rubber) เป็นยางที่มีความหนืดคงที่
- ยาง LV (Low Viscosity Rubber) เป็นยางที่มีความหนืดต่ำ

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณภาพของยางแท่ง เอส ที อาร์ ชนิดต่าง ๆ [9]

สมบัติ	ชั้นยาง เอส ที อาร์							
	เอ็กซ์แอล	5 แอล	5	5 ซีวี	10	10 ซีวี	20	20 ซีวี
เปอร์เซ็นต์ผง ( กรอง 325 เมช) ไม่เกิน	0.02	0.04	0.04	0.04	0.08	0.08	0.16	0.16
เปอร์เซ็นต์เถ้า ไม่เกิน	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.50	0.80
เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจน ไม่เกิน	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
เปอร์เซ็นต์สิ่งระเหย ไม่เกิน	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
ดัชนีความอ่อนตัว ไม่เกิน	60	60	60	60	50	50	40	40
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po) ไม่ต่ำกว่า	35	35	30	-	30	-	30	-
สียางเทียบโดยไลบรอนด์ ไม่เกิน	4.0	6.0	-	-	-	-	-	-
รหัสชั้นสี	น้ำเงิน อ่อน	เขียว อ่อน	เขียว อ่อน	เขียว	น้ำ ตาล	น้ำ ตาล	แดง	แดง

#### 2.2.4 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติจะให้สมบัติเชิงกลสูง เนื่องจากเมื่อถูกยืดออกโมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้ความต้านทานแรงดึงสูง สมบัติการคืนตัวและการกระดอน (resilience) สูงกว่ายางสังเคราะห์อื่น ๆ การใช้สารเสริมแรง (reinforcing filler) เช่น เขม่าดำ (carbon black) จะปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น ยางธรรมชาติมีจุดอ่อนตัว (softening point) ประมาณ 120 องศาเซลเซียส มีความทนทานน้ำ กรดเจือจาง ด่างและเกลือได้ดี แต่กับออกซิเจน โอโซน แสงแดด และแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้ยางธรรมชาติเกิดการรอยแตก หรือเกิดการแตกหักได้ ซึ่งปริมาณโอโซน 100 ppm สามารถทำลายยางได้ภายใน 2 นาที และถ้าจุ่มยางธรรมชาติในกรด เช่น กรดไนตริก กรดซัลฟูริก กรดโครมิก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ จะถูกทำลายอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ความหนืดน้ำมันของยางธรรมชาติมีค่าต่ำมาก ยางธรรมชาติมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเป็นยางที่ไม่มีขั้ว มีมากในประเทศไทย ราคาถูก

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ยางที่ทำจากยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางล้อรถยนต์ ยางเครื่องบิน ยางรองคอคสะพาน ยางรองรับแรงสะเทือน หรือแผ่นดินไหว ยางชิ้นส่วนรถยนต์ และเฟอร์นิเจอร์พื้นรองเท้า กาวยาง ยางเส้นรัดของ เป็นต้น

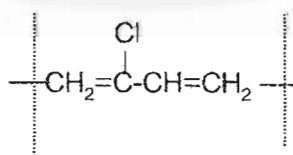
## 2.3 ยางพอลิคลอโรพรีน (Polychloroprene Rubber, CR) [10,16,43,46]

นีโอพรีน (Neoprene) เป็นชื่อเรียกโดยทั่วไปของยางคลอโรพรีน หรือ พอลิคลอโรพรีน (poly-2-chlorobutadiene) เป็นยางสังเคราะห์ทางการค้าชนิดแรกของโลก ถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกโดย W.H. Carothers และผู้ร่วมงาน ในปี ค.ศ. 1930 ต่อมาในปี ค.ศ. 1931 จึงเริ่มมีการผลิตขึ้นสำหรับการค้าโดย E.I. du Pont de Nemours & Company ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งในเวลาต่อมาได้ถูกใช้กระจายไปทั่วโลก ภายหลังจากพัฒนาและการผลิตเป็นเวลาเกือบ 40 ปี พบว่า มีผู้ผลิตยางชนิดนี้อย่างน้อย 7 บริษัท คือ

- E.I. du Pont de Nemours & Company (ในสหรัฐอเมริกาและไอร์แลนด์เหนือ)
- Showa Neoprene K.K. (ญี่ปุ่น)
- Petrotex (อเมริกา)
- Bayer-Baypren (เยอรมัน)
- Denki Kagaku-Denka (ญี่ปุ่น)
- Plastimere-Butaclor (ฝรั่งเศส)
- Skyprene-Toya Soda (ญี่ปุ่น)

### 2.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของยางพอลิคลอโรพรีน

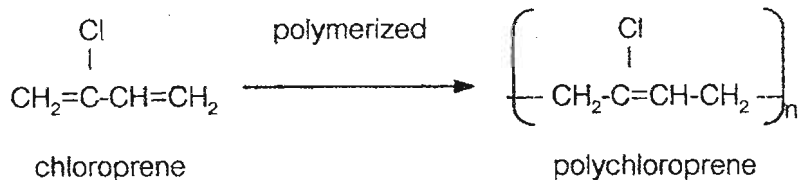
ยางพอลิคลอโรพรีน ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ คลอโรพรีน (2-chloro-1,3-butadiene) เชื่อมโยงกัน



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของหน่วยย่อยพอลิคลอโรพรีน: [43]

### 2.3.2 การผลิตยางพอลิคลอโรพรีน

ในปัจจุบัน การผลิตยางพอลิคลอโรพรีนส่วนใหญ่ ใช้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระในอิมัลชัน (free radical emulsion polymerization of chloroprene) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การผลิตยางพอลิคลอโรพรีน [16]

สมบัติของยางที่ได้ขึ้นกับเทคนิคในการสังเคราะห์ และสารเติมแต่งที่เติมเข้าไปในยาง ยางสังเคราะห์ที่ได้ มีทั้งที่เป็นของแข็งและเป็นน้ำยาง ตารางที่ 2.2 แสดงยางพอลิคลอโรพรีนชนิดต่างๆในทางการค้า

ตารางที่ 2.2 ยางพอลิคลอโรพรีนชนิดต่างๆ ในทางการค้า [16]

Du Pont Neoprene			
Grade	Mooney viscosity ; ML100°C	Principal features / Applications	Crystallisation rate*
AC		For impact adhesives	VH
AD		For impact adhesives	VH
GN	55-65	General purpose	M
GNA	55-65	Improved raw polymer stability	M
GRT	45-60	Good building tack	L
GS	45-60	Non-discolouring	M
GW	45-60	Very good tear strength and flex fatigue	M
W	45-54	Good ht. Resistance/ low compression set	H
W-M1	36-42	For cable and cellular product	M
WD	110-130	For low temperature applications	VL
WHV	110-130	For low cost , highly filled compound	M
WRT	45-54	for maximum resistance to crystallization	VL
WX	45-54	Slower curing than Neoprene W	M
TW	45-54	Good processing	L
TW100	95-105	For high filler loading	-
TRT	45-54	Most crystallisation resistant grade	VL

\* VH = very high : H = high : M = medium : L = low : VL = very low

ยางพอลิคลอโรพรีนที่เป็นของแข็ง แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

(1) General purpose neoprene ใช้งานกับผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยแม่แบบและด้วยการอัดรีดมีความถ่วงจำเพาะ 1.23 ถึง 1.25 ที่ 25°C มีสีเหลืองอำพัน (amber) ไปจนถึงสีขาว แบ่งได้ เป็น 3 ประเภทตามระบบของ Du Pont คือ G, W และ T type โดยแต่ละประเภทสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีก ดังต่อไปนี้

- Neoprene GN เป็น general purpose neoprene ที่เก่าแก่ที่สุด สามารถวัลคาไนซ์ (Vulcanize) ได้อย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีการกระดอนตัวสูง มีความต้านทานการฉีกขาดดี แต่มีแนวโน้มที่จะเกิดการบ่มก่อนกำหนด (scorch) ได้มาก

- Neoprene GNA มีสมบัติทางกายภาพเหมือนยางเกรด GN แต่จะใช้กับสารประกอบที่มีสีดำ เพราะประกอบด้วยสารกันตัวออกซิไดซ์ (antioxidize) ที่มีสีเข้ม

- Neoprene GRT จะมีความต้านทานต่อการเกิดผลึกมากกว่ายางเกรด GN หรือ GNA และสารเพิ่มเสถียรภาพที่ใช้จะไม่มีสี

- Neoprene GT เมื่อเป็นยางดิบจะมีเสถียรภาพสูงมาก ความหนืด แนวโน้มของการบ่มก่อนกำหนด และอัตราการบ่ม (cure rate) จะคงที่ในระหว่างการเก็บรักษา สมบัติของผลิตภัณฑ์จะคล้ายกับยาง GN และมีความต้านทานต่อการเกิดผลึกคล้ายยาง GRT

- Neoprene W มีเสถียรภาพสูงมาก สามารถบดภายใต้ช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากโดยไม่ติดลูกกลิ้ง

- Neoprene WHV คล้ายยางเกรด W เกือบทุกอย่าง ยกเว้นค่า Mooney viscosity จะสูงกว่า สามารถผสมกับยางพอลิคลอโรพรีนอื่นๆ โดยเฉพาะยาง W เพื่อทำให้มีความหนืดเหมาะสมกับกระบวนการผลิต

- Neoprene WRT มีความต้านทานต่อการเกิดผลึกมากที่สุดชนิดหนึ่ง มีความหนืดเท่ากับยางเกรด W แต่มีความทนแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาดต่ำกว่าเล็กน้อย

- Neoprene WD เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของยาง WRT ที่มีความหนืดสูง แต่มีความต้านทานต่อการเกิดผลึก, อัตราการบ่ม และสมบัติของผลิตภัณฑ์เท่ากับยาง WRT เหมาะกับสารประกอบที่มีเอสเทอร์เป็นพลาสติกไซเซออร์ปริมาณมากในการทำให้มีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำมากๆ

- Neoprene WX มีความต้านทานต่อการเกิดผลึก, สมบัติของผลิตภัณฑ์ และการผลิตอยู่ระหว่างยาง W และยาง WRT

- Neoprene WB สารประกอบจะมีสภาพการอัดรีด (extrusion) ที่ดีมาก มีความต้านทานต่อการยุบตัวมากกว่ายางพอลิคลอโรพรีนเกรดอื่นๆ มีความต้านทานต่อการเกิดผลึกเท่ากับยาง WX และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากยาง WB จะทนทานต่อความร้อน น้ำมัน โอโซน และการยุบตัวได้เท่ากับหรือดีกว่ายาง W แต่ทนแรงดึง การฉีกขาดได้ต่ำกว่า

- Neoprene WK มีความต้านทานต่อการเกิดผลึกสูงมากมีความเหนียวปานกลาง เหมาะเป็นพิเศษในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยการอัดรีด และการรีดแผ่น

- Neoprene TRI เป็นยางที่มีความต้านทานต่อการเกิดผลึกสูงกว่ายางเกรด GRT และ WRT การขึ้นรูปและสมบัติของผลิตภัณฑ์คล้ายยางเกรด TW

(2) Adhesive Type Neoprene ยางนีโอพรีนประเภทนี้ จะถูกนำมาผลิตเป็นกาว ซึ่งมีทั้ง Neoprene AC,AD ที่มีการตกผลึกสูง และ Neoprene AF ที่มีการเกิดผลึกต่ำ ความถ่วงจำเพาะของยางเหล่านี้อยู่ระหว่าง 1.23 และ 1.25 ที่ 25°C โทลูอีนเป็นตัวทำละลายที่ดีของยาง AC และยาง AD ส่วนยาง AF ต้องใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วร่วมกับโทลูอีนเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของสารละลาย

(3) Special Purpose Neoprene ยางนีโอพรีนประเภทนี้ มีลักษณะจำเพาะแตกต่างจากยางนีโอพรีนอื่นๆ จึงเหมาะกับงานจำเพาะอย่าง มีความถ่วงจำเพาะระหว่าง  $1.23 \pm 0.2$  ที่ 25°C และสามารถแบ่งเป็นชนิดย่อยๆ ได้ดังนี้

- Neoprene FB and FC มีสีเหลืองอำพัน อ่อนนิ่ม เกิดผลึกได้บางส่วนเมื่อเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง และความเหนียวจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ใช้ในการทำกาวที่มีสมบัติพิเศษ

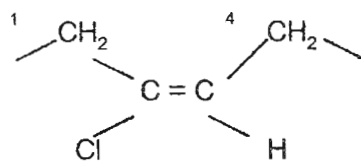
- Neoprene HC มีสีชมพูอ่อนๆ สามารถเกิดผลึกได้ดี และที่อุณหภูมิห้อง ยางชนิดชนิดนี้ จะแข็ง มีความเป็นผลึกสูง แต่จะอ่อนนิ่มและมีสภาพพลาสติก (plasticity) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ใช้ทำเปลือกหุ้มลูกกอล์ฟ, กาวชนิดพิเศษ และวัสดุเชื่อมประสาน เป็นต้น

- Neoprene KNR ความเหนียวจะลดลงได้โดยการทำแมสตีเคชัน ทำให้ยางมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่น ใช้ทำสารละลายความเข้มข้นสูง 25 ถึง 85 % เพื่อนำไปทำสารเคลือบปกป้องผิว (protective coatings)

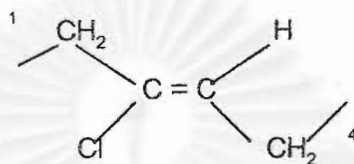
- Neoprene S เหนียว สีเหลืองอำพัน มีสภาพพลาสติก หรือความยืดหยุ่นสูง ไม่เกิดผลึกเมื่อเป็นเจล มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ใช้ทำพื้นรองเท้า ไม่ละลายในตัวทำละลายที่ใช้กับยางนีโอพรีน ชนิดอื่นๆ และไม่อาจรีดเป็นแผ่นเรียบได้

### 2.3.3 โครงสร้างของยางพอลิคลอโรพรีน

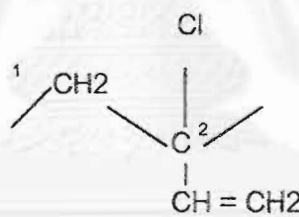
การสังเคราะห์ยางพอลิคลอโรพรีน ทำได้โดยใช้กระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชันด้วยอนุมูลอิสระเสรี (free-radical emulsion polymerization) เป็นการพอลิเมอไรซ์ 2-chloro-1,3-butadiene พอลิเมอไรท์ที่ได้ มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ 4 แบบ ดังรูปที่ 2.6 ส่วนใหญ่เป็น trans-1,4 ประมาณ 85% ; เป็น cis-1,4 ประมาณ 10% ; เป็น 1,2- ประมาณ 1.5% และ เป็น 3,4- ประมาณ 1%



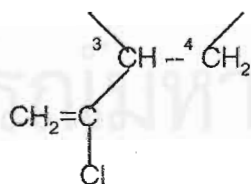
cis -1,4 - polychloroprene (10%)



trans -1,4 – polychloroprene (85%)



1,2 – polychloroprene (1.5%)



3,4 - polychloroprene (1%)

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของยางพอลิคลอโรพรีน แบบต่าง ๆ [16]



### 2.3.4 สมบัติของยางพอลิคลอโรพรีน

ยางพอลิคลอโรพรีน เป็นยางที่มีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้ว ความหนาแน่นสูง ยางที่ผลิตได้ในทางการค้าจะมีค่า  $T_g$  ประมาณ  $-43^{\circ}\text{C}$  และ  $T_m$  ประมาณ  $45^{\circ}\text{C}$  ในการจัดตัวส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเป็นแบบ trans-form จึงทำให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย ให้สมบัติเชิงกลสูง เนื่องจากเมื่อถูกยืดออกโมเลกุลจะเรียงตัวเป็นระเบียบทำให้ความต้านทานแรงดึงสูง มีสมบัติทางกายภาพคล้ายยางธรรมชาติ แต่มีสมบัติด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากการสัมผัสกับอากาศ, ความร้อนและสารเคมีดีกว่า เพราะยางพอลิคลอโรพรีนมีพันธะคูที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา จึงเกิดปฏิกิริยากับสารเคมีและออกซิเจนได้ยาก โดยยางพอลิคลอโรพรีนยังทนต่อสภาพที่สัมผัสกับน้ำมันปิโตรเลียมได้บ้าง แต่ไม่ทนต่อพวกอะโรมาติก เพราะยางพอลิคลอโรพรีนเป็นยางที่มีขั้ว เมื่อสัมผัสกับน้ำมันหรือจาระบีซึ่งไม่มีขั้วจึงไม่เกิดการละลายเข้ากัน นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการลวกติดไฟและยอมให้ก๊าซซึมผ่านต่ำ สามารถใช้ได้สำหรับช่วงความถี่ที่กว้างซึ่งเป็นสมบัติที่ดีสำหรับการแปรรูป สมบัติต่างๆของยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนแสดงดังตารางที่ 2.3

สารตัวเติมสำหรับยางพอลิคลอโรพรีนมีหลายชนิด ได้แก่ เขม่าดำ (carbon black), แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ), ซิลิกาและซิลิเกต (silicas and silicates) และไมกา (mica) ซึ่งการเติมสารตัวเติมดังกล่าวจะช่วยในการปรับปรุงสมบัติของยางพอลิคลอโรพรีนด้านต่างๆ ให้ดีขึ้นได้

ตัวอย่างการใช้งานที่สำคัญของยางพอลิคลอโรพรีน ถ้าเป็นพอลิคลอโรพรีนที่ได้จากการพอลิเมอไรซ์ที่อุณหภูมิต่ำ จะตกผลึกง่าย ดังนั้นจึงนิยมนำมาผลิตเป็นกาวยาง (adhesives) สำหรับยางพอลิคลอโรพรีนเกรดอื่นๆ มักนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พวกอะไหล่รถยนต์ (automotive part) ท่อหรือสายยาง สายพานลำเลียง ราวบันไดเลื่อน ปะเก็นและแผ่นบุภายในถังเก็บสารเคมี เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 สมบัติต่างๆของยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีน [4]

ASTM D1418 DESIGNATION	NR	CR
ASTM D2000 CLASSIFICATION	AA	BC
Density Mg/m <sup>3</sup>	0.93	1.23
Tensile Strength Mpa	20.69	20.69
Pure Gum psi	3000	3000
Reinforced Mpa	20.69	20.69
Psi	3000	3000
Hardness (Shore A) Range	20-90	20-95
Resilience		
Room Temperature	E	VG
Hot	E	VG
Tear Resilience	E	G
Abrasion Resilience	E	E
Atmospheric Aging Resilience	E	E
Oxidation Resilience	G	E
Ozone Resistance	F	VG
Heat Resistance	G	G
Low Temperature Flexibility	E	G
Compression Set	G	F-G
Permeability	F	L
Flame Resistance	P	G
Acid Resistance		
Dilute	E	VG
Concentration	F-G	G
Water Resistance	VG	G
Solvent Resistance		
Aliphatic Hydrocarbons	P	G
Aromatic Hydrocarbons	P	F
Oxygenated (Ketones, etc.)	G	P
Oil and Gasoline	P	G
Animal and Vegetable Oils	P-G	G
Dielectric Properties	E	VG

E = Excellent    VG = Very Good    G = Good    F = Fair    P = Poor    L = Low    VL = Very Low

## 2.4 การผสมยาง (Blending) [18,19,40]

ยางชนิดต่างๆ ส่วนใหญ่จะมีสมบัติที่ต้องการไม่ครบถ้วน ยางแต่ละชนิดอาจขาดสมบัติบางอย่างที่การผลิตผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ต้องการ ดังนั้นจึงเป็นผลให้เกิดการผสมยางตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปเพื่อให้สามารถนำไปผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่ต้องการอย่างครบถ้วน และการผสมยางยังช่วยแก้ปัญหาเรื่องราคาได้ด้วย

Blending คือ การผสมกันของวัตถุดิบ เช่น ยาง โดยยังไม่ทำการบดผสมกับสารเคมี

การผสมยางทำได้หลายวิธี ได้แก่

- การผสมในสถานะของน้ำยาง
- การผสมในสถานะของสารละลายยาง
- การผสมในสถานะน้ำยางร่วมกับสารละลายยาง
- การผสมโดยใช้เครื่องมือกล ( mechanical )
- การผสมโดยใช้เครื่องมือกลร่วมกับสารเคมี ( mechanochemical ) และ
- การผสมในสถานะของยางผง ( powdered or particulate form )

วิธีที่สะดวกในการใช้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมยาง คือ ใช้วิธีผสมโดยเครื่องมือกล ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ เครื่องบดผสมแบบระบบเปิด ( open mill – two roll mills ) หรือ เครื่องบดผสมแบบระบบปิด ( internal mixers ) โดยการผสมยางนี้อาจใช้ยางธรรมชาติผสมกับยางสังเคราะห์ หรือใช้ ยางสังเคราะห์ผสมกับยางสังเคราะห์ก็ได้

### 2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการ blend ยาง

- Polymer ratio
- Phase morphology
- Interfacial adhesion and crosslinking
- การกระจายตัวของ Filler ภายในยาง
- การกระจายตัวของ Plasticizer ภายในยาง
- การกระจายตัวของสารเชื่อมต่อกันภายในยาง

ปัจจัยอื่นที่มีผล ได้แก่ ค่าความหนืด และ ความแตกต่างทางด้านความมีขั้วของยางแต่ละชนิด

## 2.4.2 การใช้ยางผสม

ยางที่ใช้ผสมกัน จะไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันโดยสมบูรณ์ จะมียางอย่างหนึ่งกระจายอยู่ในยางอีกอย่างหนึ่ง คือ แยกเป็น 2 phase ได้แก่

- (1) Continuous phase เป็นส่วนของยางที่เป็นพื้น matrix
- (2) Disperse phase เป็นส่วนของยางที่เข้าไปกระจายในส่วนของ Continuous phase

เพื่อที่จะให้การกระจายของยางเกิดขึ้นได้ดีที่สุด ยางทั้งสองชนิดที่นำมาผสมกันควรจะมีความหนืดเท่าๆกัน โดยการตัดสินใจที่จะผสมยางเข้าด้วยกัน มีเหตุผลหลายประการ เช่น

- เพิ่มความสามารถในการแปรรูปของยางที่ใช้
- เพิ่มความทนทานต่อการเสื่อมของยาง
- เป็นการลดต้นทุน โดยผสมยางที่มีราคาถูกกว่าเข้าไป เช่น ยางธรรมชาติ

สิ่งสำคัญที่จะต้องระมัดระวังในการนำยางมาผสมกัน คือ ยางจะต้องมีการวัลคาไนซ์ไปพร้อมๆกัน

## 2.4.3 การประมาณค่าความหนาแน่นในการเชื่อมโยงโมเลกุล (crosslink density) ของยางผสมผ่านการวัลคาไนซ์ (vulcanized blend)

มีหลายวิธีด้วยกัน โดยจะเรียงลำดับตามการค้นพบก่อนหลัง ยกตัวอย่างเช่น

- (1) Sol-gel analysis ใช้เพื่อหาข้อมูลในการเกิด crosslink ของยางเพียง 1 ชนิด
- (2) Dynamic mechanical thermal analysis (DMA) มักใช้ในการบอกลักษณะของยางผสมที่ละลายเข้ากันได้ โดยวิธีนี้จะทำให้ทราบว่าการเกิดวัลคาไนซ์ในแต่ละเฟส (phase) ของยางผสมเป็นอย่างไร

(3) Differential scanning calorimetry (DSC) วิธีนี้ใช้ดูความหนาแน่นในการเกิด crosslink ของยางผสมจากค่าสมดุลของการพองตัวของยาง (equilibrium swelling)

- (4) Stress-Strain modeling ใช้ดูโครงสร้างของยางแต่ละตัวและยางผสม

## 2.5 สารเติมแต่งสำหรับยาง (Additive for Rubber) [8,16,24,28,41,47]

สารเติมแต่งต่าง ๆ ที่ผสมเข้าไปในยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติตามต้องการทั้งในระหว่างการผลิต การคงรูป และการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน ยางที่ผสมสารเคมีแล้วนี้ ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จนกว่าสารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยากับยาง ซึ่งอาจเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางไม่คงรูป (green compound หรือ uncured compound) ส่วนยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (vulcanization rubber)

ปกตินิยมบอกปริมาณของสารเติมแต่งทุกชนิดที่เติมเข้าไปในยางเทียบกับยาง 100 ส่วน โดยมีหน่วยเป็น phr (part per hundred of rubber) ทั้งนี้เพื่อความสะดวก หากมีการเปรียบเทียบสูตรยางที่มีปริมาณสารเคมีแตกต่างกัน และเขียนสูตรส่วนผสมยางมักเขียนเรียงลำดับสารที่จะเติมเข้าไปในยางก่อน - หลัง

### ประโยชน์ในการผสมยางกับสารเคมี

#### 1. เพื่อปรับปรุงสมบัติของยาง ด้วยยางมีสมบัติดังต่อไปนี้

ก. ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติก สมบัติเป็นพลาสติก คือ สมบัติของสารที่เมื่อนำน้ำหนักกดลงไปจะแบนออกและพยายามคงสภาพความแบน ส่วนสมบัติเป็นอีลาสติก คือ สมบัติของสารที่พยายามรักษาสภาพก่อนถูกแรงกระทำ เช่น เมื่อยืดยางออกแล้วปล่อยแรงให้ยางเป็นอิสระยางจะกลับคืนรูปเดิม คือเมื่อดึงออกจะยืดแต่เมื่อปล่อยกลับจะคืนกลับแต่ไม่เท่าเดิมการที่ยางมีสมบัติเป็นทั้งพลาสติกและอีลาสติกนี้ทำให้ไม่สามารถนำยางไปใช้งานได้โดยตรง

ข. ยางเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) คือ ที่อุณหภูมิต่ำ ยางจะแข็งกระด้าง แตกหักได้ง่าย แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นยางจะอ่อนนิ่มไหลแปรรูปไป การมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกทำให้สามารถนำยางไปใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่จำกัด

ค. ยางมีความแข็งแรงต่ำ ความต้านทานแรงดึงต่ำ และความต้านทานต่อการสึกหรอต่ำ

ง. ยางสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายหลายชนิด ยางเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่นยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 30,000 – 300,000 โมเลกุลเหล่านี้เมื่ออยู่รวมกันจะยึดกันด้วยแรงอ่อน ๆ ได้แก่ พันธะแวนเดอร์วาลส์ โมเลกุลจึงแยกจากกันได้ ง่ายโดยใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วหรือมีสัมประสิทธิ์ของการละลายใกล้เคียงกับยาง ดังนั้นยางจึงสามารถละลายได้ง่ายในตัวทำละลายต่าง ๆ

## 2. เพื่อเป็นตัวช่วยในกระบวนการแปรรูปยาง

ปกติในยางดิบที่ยังไม่ได้ผสมกับสารเคมีอื่นจะมีสมบัติเหนียว ซึ่งเกี่ยวกับความยืดหยุ่นของส่วนประกอบที่อยู่ในยางดิบ และทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการต่าง ๆ เช่น การรีดยางให้เป็นแผ่นเรียบจากเครื่องรีดเรียบ ซึ่งจะเห็นถึงความผิดปกติหรือความไม่สม่ำเสมอของยางเมื่อผ่านเครื่องรีดเรียบแต่หลังจากที่ได้เติมสารเคมี เช่น สารตัวเติม สารทำให้ยางอ่อนตัว จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องรีดเรียบมีผิวเรียบ และสามารถลดปัญหาเกี่ยวกับความไม่สม่ำเสมอของแผ่นยางได้

## 3. ทำให้ยางมีขอบเขตการใช้งานกว้างขึ้น

จากความเหมาะสมในการเลือกสารเคมีผสมในยาง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางอย่างมาก จากผลิตภัณฑ์ที่ไม่แข็งแรง ไม่ทน ไปจนถึงผลิตภัณฑ์ที่มีความสามารถในการทนความร้อน

## 4. เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต

การนำยางมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ ถ้าใช้แต่เนื้อยางล้วน ๆ จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงถ้าสามารถผสมสารตัวเติม (filler) ที่มีราคาถูกลงไปจะทำให้ลดต้นทุนการผลิตลง

### 2.5.1 สารทำให้ยางคงรูป หรือ สารวัลคาไนซ์ (Vulcanizing agent)

สารทำให้ยางคงรูป หรือสารวัลคาไนซ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (crosslink) เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางให้ดีขึ้น ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น เรียกว่า การคงรูป หรือ การวัลคาไนซ์ (vulcanization หรือ cure) การทำให้ยางคงรูปเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงของยางที่อยู่ในสภาพไม่คงตัวให้เป็นยางที่สามารถรักษารูปทรงได้ในลักษณะยืดหยุ่น หรือ แข็งกระด้าง โดยการใช้สารที่ทำให้ยางคงรูป (vulcanizing agent) ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล บริเวณตำแหน่งที่วงโคจรต่อปฏิกริยา

การทำให้ยางคงรูปจะทำให้ยางมีสมบัติที่เปลี่ยนไป คือ

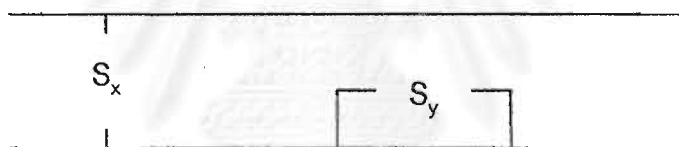
- 1) ยางเปลี่ยนโครงสร้างจากเส้นตรงเป็นร่างแหหรือเป็นแบบ 3 มิติ โดยการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ทำให้ยางเปลี่ยนจากวัสดุพลาสติกไปเป็นวัสดุอีลาสติกสูงขึ้น
- 2) สมบัติทางกายภาพ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกหรือ และความต้านทานต่อการฉีกขาดจะเพิ่มขึ้น
- 3) เปลี่ยนสภาพของยางจากการละลายในสารละลาย เป็นยางที่ไม่ละลายในสารละลายและไม่พองตัว
- 4) มีความทนทานต่อความร้อนและแสงเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากขึ้น

สารทำให้ยางคงรูปมี 3 ประเภทหลักๆ คือ กำมะถันและธาตุที่คล้ายกำมะถัน สารที่ให้กำมะถัน (sulphur donor) และสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน

### 2.5.1.1 การวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและธาตุที่คล้ายกำมะถัน

กำมะถันเป็นสารที่ทำให้ยางคงรูปที่นิยมใช้มากที่สุด ประมาณ 90 % และนิยมใช้กับยางที่ไม่อิ่มตัวซึ่งมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ได้แก่ ยางธรรมชาติ, ยางพอลิพิวทาไดอิน เป็นต้น เมื่อเติมกำมะถันเข้าไปในยางแล้วให้ความร้อนจะเกิดการคงรูปขึ้น โดยกำมะถันเป็นตัวเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง ทำใหยางมีสมบัติดีขึ้น คือ เมื่อร้อนไม่เหลวหรือเยิ้มเหนียว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น โดยกำมะถันจะเชื่อมต่อกับโมเลกุลของยาง ดังรูปที่ 2.7

โดยทั่วไปถ้าการคงรูปเกิดในระบบที่มีสารตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพดี ค่า  $x$  ควรจะมีค่าประมาณ 1 หรือ 2 และไม่มีโครงสร้างที่เป็นวง (cyclic) หรือมีน้อยมาก แต่ถ้าเป็นระบบที่ไม่มีประสิทธิภาพ ค่า  $x$  อาจมีค่าสูงถึง 8 และมีโครงสร้างที่เป็นวงเกิดขึ้นมาก ปริมาณกำมะถันที่รวมอยู่ในโครงสร้างร่างแหนี้ เรียกว่า สัมประสิทธิ์ของการคงรูป (coefficient of vulcanization) ซึ่งเป็นส่วนของกำมะถันที่เข้าร่วมตัวกับตัวยาง 100 ส่วน

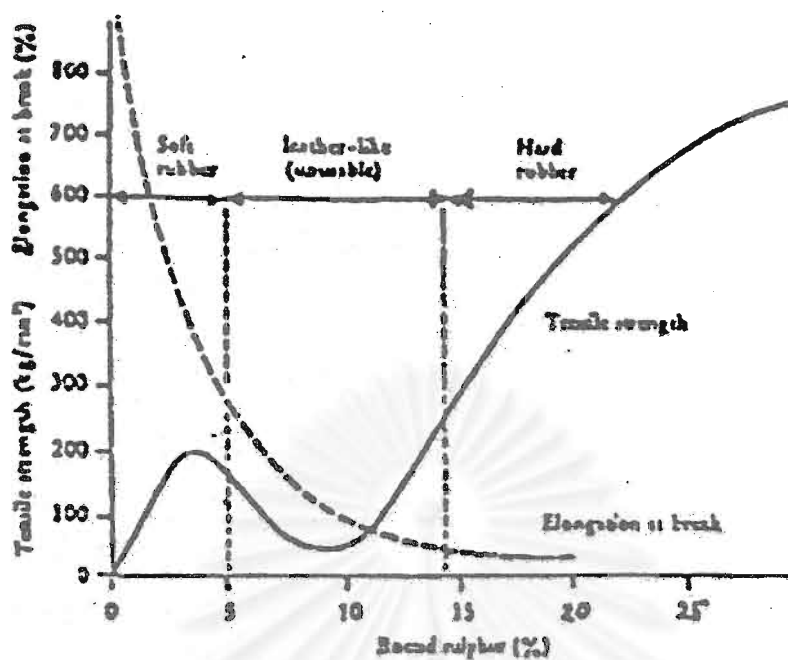


รูปที่ 2.7 การเชื่อมโยงโมเลกุลของยางด้วยกำมะถัน [16]

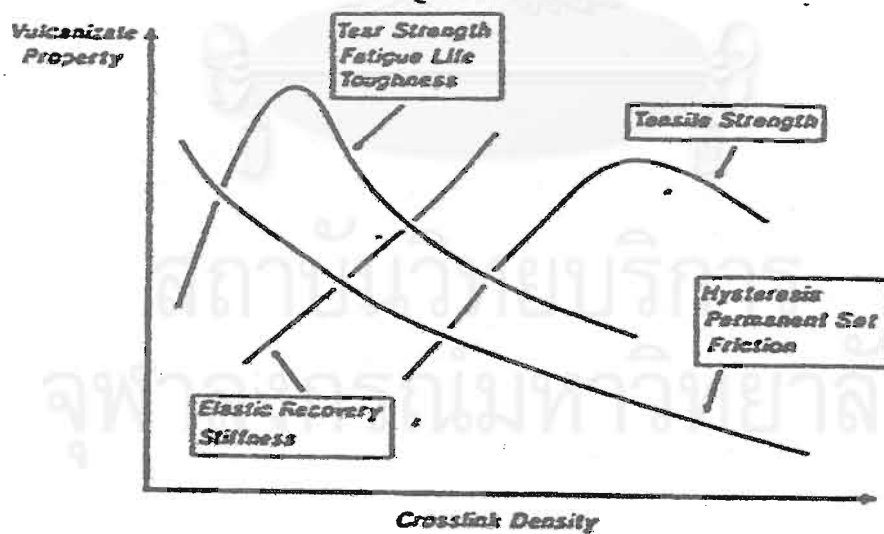
$S_x$  เป็นการเชื่อมโยงระหว่างสองโมเลกุล

$S_y$  เป็นการเชื่อมโยงภายในโมเลกุลเดียวกัน

ปริมาณของกำมะถันที่ใช้อยู่ในช่วง 1 – 3 phr แต่โดยทั่วไปมักไม่เกิน 2.5 phr เนื่องจากปริมาณกำมะถัน 2.5 phr จะทำให้ยางมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด การเชื่อมโยงทำให้โมเลกุลของยางมีขนาดใหญ่ขึ้นและปริมาณของกำมะถันที่ใช้จะมีผลต่อสมบัติของยาง ดังรูปที่ 2.8 แสดงผลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกจนขาด จะเห็นได้ว่าปริมาณกำมะถัน 0 – 5 phr ยางมีสภาพยืดหยุ่น ปริมาณกำมะถัน 5 – 15 phr ทำให้ยางมีลักษณะยืดได้เล็กน้อยคล้ายหนัง (leather like) เมื่อปริมาณกำมะถันมากกว่า 15 phr ทำให้ยางมีความแข็งมากเรียกว่า ebonite ในรูปที่ 2.9 และตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปและสมบัติทางกายภาพของยางเมื่อปริมาณของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 2.9 จะเห็นว่า ถ้าต้องการให้ยางคงสภาพความยืดหยุ่นได้ดี ปริมาณกำมะถันในยางไม่ควรเกิน 5 phr



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของปริมาณกำมะถันต่อความต้านทานแรงดึงและการยืดออกจนขาด [16]



รูปที่ 2.9 สมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อปริมาณของการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้น [34]



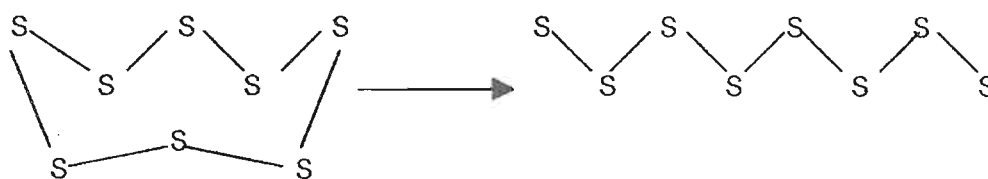
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของยางเมื่อปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุลเพิ่มขึ้น [21]

สมบัติ	การเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยงโมเลกุล
สมบัติที่ขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยงเท่านั้น	
ความเหนียว (โมดูลัส)	เพิ่มขึ้น
ความแข็ง	เพิ่มขึ้น
สมบัติที่บางส่วนขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยง	
การยืดออกจนขาด	ลดลง
การกระดอน	เพิ่มขึ้น
การบวมเนื่องจากสารละลาย	ลดลง
ความต้านทานต่อการสึกหรอ	เพิ่มขึ้น
ความต้านทานแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาด	เพิ่มขึ้น, แล้วลดลง

กำมะถันโดยทั่วไปมี 3 อัญรูป คือ

- ก.  $\alpha$ - sulphur หรือ rhombic sulphur
- ข.  $\beta$ - sulphur หรือ monoclinic sulphur : ที่ 96 องศาเซลเซียส  $\alpha$  - sulphur จะเปลี่ยนรูปไปเป็น  $\beta$  - sulphur
- ค.  $\gamma$ - sulphur หรือ plastic sulphur : เป็นกำมะถันอสัณฐานซึ่งไม่ละลายในยาง ทำได้โดยการนำกำมะถันมาทำให้ร้อนจนเหลว แล้วเทลงในน้ำเย็นทันที

กำมะถันที่ใช้ในการคงรูปยาง เป็นกำมะถันชนิด rhombic ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.10 คือ มีโครงสร้างเป็นวง ประกอบด้วยกำมะถัน 8 อะตอม  $S_8$  มีลักษณะเป็นผลึกละเอียด และหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 112 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 444 องศาเซลเซียส ถ้าให้ความร้อนแก่กำมะถันโครงสร้างที่เป็นวงจะแตกออกเป็นสาย นั่นคือ กำมะถันกำลังหลอมเหลว



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของกำมะถัน rhombic [16]

กำมะถันที่ใช้ในยางต้องเป็นกำมะถันที่ความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99.5 % มีเถ้าไม่เกิน 0.5 % ต้องไม่มีกรดปนอยู่เพราะจะทำให้เกิดการคงรูปได้ช้าลง มีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งขนาดอนุภาคยิ่งเล็กจะยิ่งทำให้กำมะถันกระจายในยางได้ทั่วถึง สำหรับการละลายของกำมะถันในยางจะขึ้นกับชนิดของยาง ซึ่งกำมะถันจะละลายในยางได้ประมาณ 0.8 ส่วนต่อยาง 100 ส่วน และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกำมะถันจะละลายได้มากขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ เมื่อตั้งทิ้งไว้กำมะถันที่เป็นส่วนเกิน จะตกผลึกออกมาที่ผิวยาง เรียกว่า เกิดการบลูม (blooming) คือ การที่กำมะถันเกิดการแยกตัวมาอยู่ที่ผิวยางที่ยังไม่คงรูป ทางแก้ไข คือ

1) ผสมกำมะถันเข้าไปในยางอุณหภูมิต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้

2) อาจใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายแทนกำมะถันธรรมดา ซึ่งเป็นแบบชนิดละลาย แต่กำมะถันไม่ละลายจะไม่คงตัว คือ เมื่อตั้งทิ้งไว้นาน ๆ จะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นกำมะถันชนิดละลายอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนเป็นกำมะถันชนิดละลายได้ภายในเวลา 10 - 20 นาที ซึ่งการเก็บรักษากำมะถันชนิดไม่ละลายต้องเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิไม่ละลายเปลี่ยนรูป

3) อาจใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายปนกับชนิดละลาย เช่น การใช้กำมะถันชนิดไม่ละลายประมาณ 70 % ของปริมาณทั้งหมด จะลดการตกผลึกของกำมะถันที่ผิวยางได้

การเติมกำมะถันลงในยางจะเติมหลังสุดในจำนวนสารเคมีทั้งหมด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปก่อนกำหนด (scorch)

#### ข้อดีของกำมะถัน

1. กำมะถันมีราคาค่อนข้างถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ
2. กระจายตัวในยางได้ง่าย
3. ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
4. มีผลโดยตรงต่อสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป จึงเป็นตัวควบคุมอัตราการเกิดการคงรูป

#### ข้อเสียของกำมะถัน

1. มีแนวโน้มทำให้เกิดการแยกตัวของกำมะถันมาอยู่ที่ผิวยาง
2. มีการติดสีของซัลไฟด์
3. เมื่อนำยางที่ผสมกำมะถันไปอบ จะมีความต้านทานต่อความร้อนไม่ดี
4. มีข้อจำกัดในการใช้ คือ ใช้ได้เฉพาะกับยางที่โมเลกุลไม่อิ่มตัว

นอกจากกำมะถันแล้วยังมีธาตุอื่น ๆ ที่คล้ายกำมะถัน ทำหน้าที่เป็นสารที่ทำให้ยางคงรูปได้แก่ ซีลีเนียม (selenium) และเทลลูเรียม (tellurium) มักใช้แทนกำมะถันเมื่อต้องการสมบัติในด้านความต้านทานต่อความร้อน แต่ปฏิกิริยาที่สารทั้งสองทำกับยางไม่ดีเท่ากับกำมะถัน และยัง

เป็นพิษอีกด้วยโดยทั่วไปนิยมใช้สารสองตัวนี้เป็นสารทำให้ยางคงรูปเสริมร่วมกับกำมะถัน ซึ่งทำให้ปริมาณกำมะถันที่ใช้ลดลง และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความต้านทานต่อความร้อนและไอน้ำ และยังมีโมดูลัสสูงขึ้นด้วย

#### 2.5.1.2 การวัลคาไนซ์ด้วยสารให้กำมะถัน (Sulphur donor)

นอกจากจะใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์โดยตรงแล้ว ยังอาจใช้สารที่สลายตัวให้กำมะถัน (sulphur donor) ที่อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ได้อีกด้วย สารเร่งวัลคาไนซ์หลายชนิดและสารประกอบที่คล้ายๆกัน สามารถเป็นแหล่งให้กำมะถันได้ บางครั้งอาจใช้สารให้กำมะถัน 3-4 phr ร่วมกับกำมะถันธรรมดาน้อยกว่า 1 phr และบางที่ไม่ใช้กำมะถันธรรมดาเลยก็ได้ ตัวอย่างสารเคมีที่ให้กำมะถันและเปอร์เซ็นต์ของกำมะถันที่ให้ออกมาดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างสารเคมีที่ให้กำมะถัน (sulphur donor) [8]

สารเคมีที่ให้กำมะถัน	เปอร์เซ็นต์กำมะถันที่ให้ออกมา	
	จากการคำนวณ	จากการทดลอง
Tetramethyl thiuramdisulphide (TMTD)	13.3	13
Tetremethyl thiuramtetrasulphide	31.6	32
Dipentamethylene thiuramtetrasulphide	25.0	25
2(Morpholinothio) benzothiazole	11.3	-
Dimorpholinylidysulphide	31.4	26.29
Dibutyl xanthogendisulphide	21.4	-
Diisopropyl xanthogendisulphide	26.9	-
Alkylphenolpolysulphide	-	23 , 28

สารประกอบที่ใช้จะสลายตัวให้อนุมูลเสรีที่อุณหภูมิของการวัลคาไนซ์ และรวมตัวกับโมเลกุลของยางทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลขึ้น ถึงแม้สารเคมีเหล่านี้จะให้กำมะถันออกมาไม่มาก แต่กำมะถันที่ออกมานี้มีประสิทธิภาพในการ crosslink มาก โดยมีกำมะถันต่อกันเพียง 1 หรือ 2 อะตอม (mono หรือ disulphidic crosslink) และไม่มีกำมะถันมาต่อกันเป็นวง จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความต้านทานต่อความร้อนและมีค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัว (compression set) ต่ำกว่ายางที่มีการวัลคาไนซ์แบบ polysulphidic crosslink ในระบบการวัลคาไนซ์ปกติ แต่ยางที่มีการ

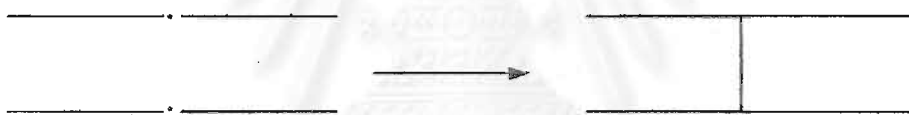
เชื่อมโยงแบบ polysulphidic crosslink จะมีสมบัติด้านทานการสึกหรอและการหักงอที่ดีกว่า ดังนั้นการแก้ไขเพื่อให้ ยางมีสมบัติดี จึงควรใช้สารที่ให้กำมะถันร่วมกับการใช้กำมะถัน

สารให้กำมะถันมีราคาแพงกว่ากำมะถันธรรมดา แต่มีข้อดี คือ จะลดการตกผลึกที่ผิวของยางซึ่งเกิดจากการใช้กำมะถันธรรมดา และจะช่วยให้เกิดความปลอดภัยในกระบวนการผลิต คือ ไม่เกิดการสุกก่อนกำหนด การคงรูปเกิดซ้ำกว่าการใช้กำมะถันธรรมดา เนื่องจากการวัลคาไนซ์จะยังไม่เกิดจนกว่ากำมะถันจะถูกปล่อยออกมา นอกจากนั้นสารที่เหลือหลังจากให้กำมะถันออกมาแล้ว อาจจะทำหน้าที่เป็นสารตัวเร่ง หรือสารกระตุ้นการวัลคาไนซ์

### 2.5.1.3 การวัลคาไนซ์ด้วยสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน แบ่งเป็น

#### (1) การวัลคาไนซ์ด้วยสารเปอร์ออกไซด์

ยางสังเคราะห์ซึ่งไม่มีพันธะคู่ภายในโมเลกุลจะไม่สามารถวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันและสารเร่งวัลคาไนซ์ได้ เช่น ยางซิลิโคน, ยาง EPM เป็นต้น จึงจำเป็นต้องใช้สารเปอร์ออกไซด์ในการวัลคาไนซ์อย่างเหล่านี้ สารดังกล่าวจะสลายตัวให้อนุมูลเสรีซึ่งเป็นตัวปฏิกิริยาไฮโดรเจนอะตอมออกจากยาง ทำให้เกิดอนุมูลเสรีขึ้นบนโมเลกุลของยาง และอนุมูลเหล่านี้จะมาเชื่อมโยงกันดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการเชื่อมโยงของยางโดยใช้สารเปอร์ออกไซด์ [16]

การเชื่อมโยงแบบนี้ สารวัลคาไนซ์ไม่ได้เข้าไปในโมเลกุลของยาง จะมีแต่เพียงพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนจากโมเลกุลของยางเท่านั้น ซึ่งมีเสถียรภาพดีมาก การเชื่อมโยงแบบนี้ อาจทำได้โดยใช้รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์

สารเปอร์ออกไซด์ที่เสถียร แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- เปอร์ออกไซด์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล แบ่งเป็น อะลิฟาติกและอะโรมาติก
- เปอร์ออกไซด์ที่ไม่มีหมู่คาร์บอกซิล แบ่งเป็นอะลิฟาติกและอะโรมาติกเช่นเดียวกัน

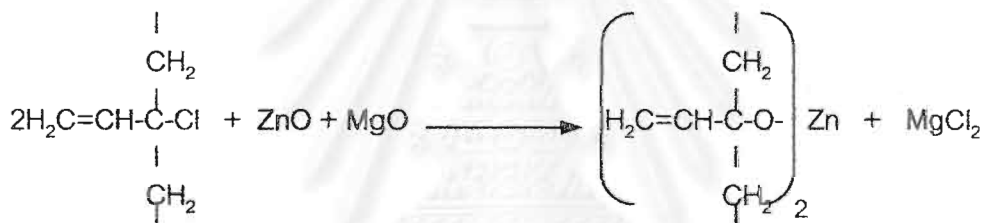
สารเปอร์ออกไซด์จะสลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน ดังนั้นจึงต้องเก็บรักษาไว้ในที่เย็น ซึ่งอุณหภูมิต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{F}$  และเก็บห่างจากแหล่งกำเนิดความร้อน ไม่ให้ถูกกับแสงแดด ประกายไฟ ระวังไม่ให้ถูกกระแทก ไม่ถูกกับตัวออกซิไดซ์ ตัวรีดิวซ์ กรดแร่ เป็นต้น

การวัลคาไนซ์ด้วยเปอร์ออกไซด์ทำใหยางไม่เกิดการบวมก่อนกำหนด มีสมบัติทางไฟฟ้าดี และมี compression set ต่ำ แต่มีข้อเสียคือ ราคาแพงและสมบัติบางอย่างด้อยกว่าการใช้กำมะถัน

## (2) การวัลคาไนซ์ด้วยโลหะออกไซด์ (metal oxides)

สามารถใช้ในการวัลคาไนซ์ยางสังเคราะห์บางชนิด ได้แก่ ยางพอลิคลอโรพรีน ซึ่งมีพันธะคู่ที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเนื่องจากมีคลอรีนอะตอมอยู่ในโครงสร้างของยาง ส่วนใหญ่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 4 phr ร่วมกับสังกะสีออกไซด์ (ZnO) 5 phr บางครั้งใช้ตะกั่วออกไซด์ เช่น litharge (PbO) และ red lead (Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) ในสูตรยางที่ต้องการสมบัติความทนต่อน้ำ (water resistance) และความต้านทานต่อการบวมตัว (swelling resistance)

สำหรับยางพอลิคลอโรพรีน การใช้โลหะออกไซด์ 2 ชนิดคือ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ร่วมกันสามารถควบคุมอัตราเร็วของการเกิดวัลคาไนเซชันและช่วยในการดูดซับคลอไรด์ที่เกิดขึ้นได้ ในการใช้งานจะเติมแมกนีเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นตัวจับคลอรีนและตัวป้องกันการเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลยางก่อนกำหนดลงไปก่อน แล้วจึงตามด้วยสังกะสีออกไซด์ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของยาง (crosslink agents) สามารถแสดงกลไกการเกิดการคงรูปของยางได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดการคงรูปของยางพอลิคลอโรพรีน โดยใช้โลหะออกไซด์ [47]

### 2.5.2 สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (Accelerator) [ 8,16 ]

ก่อนที่จะมีการค้นพบสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปของยางนั้น ชาลส์ กูดเยียร์ ได้ค้นพบวิธีการคงรูปยางธรรมชาติโดยใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว ซึ่งต้องใช้กำมะถันในปริมาณมาก และการคงรูปต้องใช้เวลาานที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสีคล้ำและเมื่อทิ้งไว้จะเกิดการซีมของกำมะถันออกมาที่ผิวต่อมาได้มีการค้นพบสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป และนำมาใช้ร่วมกับกำมะถันในการคงรูปยาง ซึ่งสารเร่งนี้จะช่วยลดเวลา ลดอุณหภูมิ และลดปริมาณกำมะถันที่ใช้ในการคงรูปลง นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์อีกด้วย

สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ คือ

- 1) ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปเพียงชนิดเดียว (primary accelerator) ให้พอเพียงที่จะคงรูปยางได้ตามเวลาที่ต้องการ
- 2) ระบบการใช้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ประกอบด้วย
  - สารชนิดที่ไว้ใช้ในปริมาณมาก เรียกว่า ตัวเร่งปฐมภูมิ (primary accelerator)

- สารชนิดที่ใช้ในปริมาณน้อย เรียกว่า ตัวเร่งทุติยภูมิ (secondary accelerator)
- 3) ระบบการใช้สารเร่งที่มีปฏิกิริยาช้า (delayed action accelerator) จะไม่เกิดปฏิกิริยาก่อนการคงรูป ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหาทางเกิดการคงรูปก่อนกำหนด

#### สมบัติของสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป

1. สามารถทำให้ยางคงรูปได้เร็ว
2. มีความไวในการเร่งให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลยางสูง
3. ละลายได้ดีในยาง
4. มีความปลอดภัยในกระบวนการผลิต
5. สามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสื่อมสภาพ
6. ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง
7. เข้ากันได้ดีกับสารเคมีอื่น ๆ ที่เติมเข้าไปในยาง
8. ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้
9. สมบัติต่าง ๆ ของยางไม่ลดลงเมื่อใช้เวลาในการคงรูปนาน
10. ไม่ทำให้เกิดผลเสียต่อสมบัติอื่น

#### ประเภทของสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป

สามารถจัดตามความเร็วในการเร่งให้ยางเกิดการคงรูป แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. สารเร่งที่มีปฏิกิริยาช้า (slow accelerators) ได้แก่ aniline เมื่อทำการคงรูปยางธรรมชาติ ใช้เวลา 90-120 นาที
2. สารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็วปานกลาง (moderately fast accelerators) ได้แก่ diphenylguanidien, hexamethylene tetramene ใช้เวลาในการคงรูปประมาณ 60 นาที
3. สารเร่งที่มีปฏิกิริยาเร็ว (fast accelerators) ได้แก่ mercaptobentothiazole, benzothiazyl disulfide ใช้เวลาในการคงรูปประมาณ 30 นาที
4. สารเร่งที่มีความเร็วมาก (ultra accelerators) ได้แก่ thiurams, dithiocarbamates, xanthates ใช้เวลาในการคงรูปน้อยกว่า 30 นาที

เมื่อมีการใช้ยางสังเคราะห์มากขึ้น สารเร่งที่มีการคงรูปที่จัดว่าเร็วหรือเร็วมากในยางธรรมชาติอาจกลายเป็นสารเร่งที่ช้าสำหรับยางสังเคราะห์จึงมีการจัดประเภทของสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูป โดยพิจารณาตามลักษณะโครงสร้างทางเคมี สามารถแบ่งได้เป็น 7 ประเภท คือ

- (1) กัวดินีน (Guanidine) จัดเป็นสารตัวเร่งที่ให้อัตราการคงรูปช้า เหมาะที่จะใช้กับยางหนาเพราะต้อง cure นาน ถ้าใช้ กัวดินีนเป็นสารตัวเร่งเสริมจะมีการกระตุ้นสูงมาก สารตัวเร่งกลุ่มนี้ นิยมใช้ในงานทำยางรถยนต์ รองเท้า สายไฟฟ้า เป็นต้น

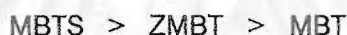
(2) อัลดีไฮด์-อะมีน (aldehyde-amine) เป็นกลุ่มตัวเร่งที่เป็นต่าง ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการคงรูปของยางได้

(3) ซัลฟีนามาไมด์ (sulphenamide) ประกอบด้วยส่วนที่เป็นไฮอาโซลและส่วนที่เป็นอะมีน ตัวเร่งกลุ่มนี้มี scorch time ยาวกว่ากลุ่มไฮอาโซล เพราะเมื่อได้รับความร้อนจะแตกตัวและให้เบส และ MBT ออกมา โดย MBT เป็นตัวก่อให้เกิดการวัลคาไนซ์ และเบสจะกระตุ้นให้ตัวเร่งทำงานได้เร็วขึ้น

(4) ไทอาโซล (thiazole) ประกอบด้วย 2-mercaptobenzothiazole และอนุพันธ์ของมัน ตัวอย่างของตัวเร่งกลุ่มนี้ ได้แก่

- 2-mercaptobenzothiazole (MBT)
- Dibenzothiazyl disulphide (MBTS)
- Zinc salt of 2-mercaptobenzothiazole (ZMBT)

ไฮอาโซลจัดอยู่ในกลุ่มของสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงปานกลาง โดยค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป (scorch time) ของตัวเร่งกลุ่มนี้ เรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้



(5) ไทยูแรม (thiurams) ตัวอย่างของตัวเร่งในกลุ่มนี้ ได้แก่

- Tetramethyl thiurammonosulphide (TMTM)
- Tetramethyl thiuramdisulphide (TMT , TMTD)
- Tetraethyl thiuramdisulphide (TET , TETD)
- Dimethyl diphenyl thiuramdisulphide
- Dipentamethylene thiuramtetrasulphide (DPTS)

ในจำนวนตัวเร่งทั้ง 5 ตัวนี้ TMTD และ TMTM เป็นตัวที่นิยมมากที่สุด

สำหรับไธยูแรมไดซัลไฟด์ เช่น TMTD และ TETD ถ้าใช้ปริมาณเล็กน้อย ปานกับกำมะถัน จะถือเป็นตัวเร่ง ระบบที่ใช้กำมะถันปริมาณเล็กน้อย เรียกว่า "EV-system" มาจาก Efficient vulcanizing system ระบบนี้จะให้ยางที่ทนต่อความร้อน และ compression set ดีขึ้น แต่สมบัติอื่น เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง และการแตกเนื่องจากการหักงอไปมาลดลง

ในการใช้งานไธยูแรม สามารถใช้ได้ 2 กรณี คือ

- ใช้เป็นตัวเร่ง ไธยูแรมจัดเป็นสารตัวเร่งที่มีความเร็วสูงพิเศษสำหรับยางธรรมชาติ สำหรับหมู ไธยูแรมด้วยตนเอง TMTD จัดเป็นตัวที่ cure เร็วที่สุด ยางที่ใช้ ไธยูแรมเป็นตัวเร่ง สามารถวัลคาไนซ์ได้หลายวิธี เช่น วัลคาไนซ์โดยใช้เครื่องอัดไอน้ำและอากาศร้อน ฯลฯ

- ใช้เป็นตัวเร่งเสริม (Secondary accelerator) ในบางครั้งไธยูแรมอาจใช้เป็นตัวเร่งเสริมกระตุ้นตัวเร่งอื่น เช่น ไฮอาโซล และ ซัลฟีนามาไมด์ได้

(6) ไดไทโอคาร์บาเมต (dithiocarbamates) เป็นตัวเร่งที่เร่งให้ยาง cure เร็วมาก ผลผลิตที่ได้มีสมบัติโปร่งใสและขาว ไม่มีรส ไม่มีกลิ่น สามารถใช้สัมผัสกับอาหารได้และใช้ในการทำอุปกรณ์การแพทย์

(7) แซนเทต (xanthates) เป็นกลุ่มตัวเร่งที่ใช้มากกับน้ำยางเนื่องจากละลายน้ำได้ ตัวเร่งชนิดนี้ cure เร็วมาก ดังนั้นจึงไม่ค่อยนิยมใช้ในยางแข็ง แต่อาจใช้ในกรณี เป็นสารละลายของยาง มักใช้ในอุตสาหกรรมน้ำยาง โดยเฉพาะยางพองน้ำจากน้ำยาง เนื่องจาก cure เร็วมาก ดังนั้น อุณหภูมิที่ควรใช้ควรจะต่ำประมาณ 80-110 °C และต้องใช้ ซิงค์ออกไซด์ช่วยกระตุ้นด้วย

สามารถเรียงลำดับความว่องไวจากเร็วไปช้า ได้ดังนี้

$$7 > 6 > 5 > 4 > 3 > 2 > 1$$

การกระตุ้นการทำงานของสารเร่งด้วยสารเร่ง มี 2 ประเภท คือ

1. การกระตุ้นสารเร่งที่คงรูปช้า โดยการใส่สารเร่งที่คงรูปได้เร็วกว่า เช่นการกระตุ้นสารพวกไทอาโซลและซัลฟิनाไมด์ ด้วยไทยูแรม และไดไทโอคาร์บาเมต
2. การกระตุ้นโดยใช้สารเร่งที่คงรูปช้ากว่า เช่น ไทยูแรมหรือไดไทโอคาร์บาเมต กระตุ้นโดยใช้กำนิติน ซึ่งสารเร่งรวมนี้จะเร็วกว่าสารเร่งเดิมทั้งสอง การกระตุ้นแบบนี้ เรียกว่า synergism ซึ่งเป็นการเสริมซึ่งกันและกัน ตัวอย่างเช่น กลุ่มไทอาโซลกับกำนิติน MBTS กับ DPG และ TMTD กับ MBT (ซึ่งจะทำให้โมดูลัสสูงกว่าการใช้สารเร่งเดี่ยว ๆ )

### 2.5.3 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป (Activator) [8,16]

สารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปเป็นสารที่เสริมตัวเร่ง โดยจะช่วยเร่งอัตราคงรูปของยางให้เร็วขึ้น โดยทำให้สารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเพื่อจะเกิดประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งสารกระตุ้นนี้จะเข้าไปทำปฏิกิริยาการเชื่อมโยงโมเลกุล สารกระตุ้นมีสมบัติที่สำคัญคือเมื่อเติมเข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อย จะทำให้ยางมีโมดูลัสสูงขึ้น ช่วยไม่ให้สารประกอบยางติดกับลูกกลิ้งที่ใช้ในการบดผสมยาง ช่วยในการกระจายตัวของสารเคมีในเนื้อยาง และในบางครั้งอาจไม่มีปฏิกิริยาการคงรูปเกิดขึ้นถ้าไม่มีสารกระตุ้น

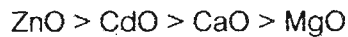
ชนิดของสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูป

1. พวกอนินทรีย์ ส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่
  - ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)
  - แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide, CdO)



- แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO)
- แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO)

ลำดับความว่องไวในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยา



ซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปแต่เป็นสารที่มีราคาค่อนข้างแพง โดยมากมักใช้ซิงค์ออกไซด์ประมาณ 3-5 phr ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็ก สามารถลดปริมาณการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ยางที่มีโมดูลัสสูง และยางมีลักษณะโปร่งใส

ซิงค์ออกไซด์สามารถจัดเกรดได้ตามความบริสุทธิ์ เนื่องจากปกติ ซิงค์ออกไซด์จะมีตะกั่วเจือปนอยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ยางมีสีคล้ำ จึงแบ่งซิงค์ออกไซด์ได้เป็น 2 ชนิด คือ white seal และ red seal โดย white seal มีตะกั่วอยู่ในปริมาณน้อย มักใช้ในยางสีขาว หรือสีสดใส ส่วน red seal จะมีตะกั่วอยู่ในปริมาณมาก และนิยมใช้ในยางสีดำ นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์บางชนิดที่มีอนุภาคเล็ก และอยู่ปนกับออกไซด์ของโลหะอื่น เรียกว่า active zinc oxide สามารถใช้ในยางได้ โดยเติมในปริมาณน้อย จะทำให้ยางใส มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น ได้แก่ โมดูลัส ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ เป็นต้น

2. พวกอินทรีย์ ที่สำคัญ คือ กรดไขมัน ได้แก่ กรดสเตียริก (stearic acid) กรดลอริก (lauric acid) กรดปาล์มมิติก (palmitic acid) เป็นต้น กรดไขมันเป็นสารที่จำเป็นในการใช้เป็นสารเสริมตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูปสำหรับสารเร่งปฏิกิริยาบางตัว โดยเฉพาะพวกไทอาโซล

สารกระตุ้นบางตัว อาจใช้เป็นสารวัลคาไนซ์สำหรับยางสังเคราะห์ได้ เช่น โลหะออกไซด์ พวก ZnO และ MgO จะนำมาใช้เป็นสารวัลคาไนซ์สำหรับยางพอลิคลอโรพรีน ดังได้กล่าวไว้แล้ว ในหัวข้อสารเคมีที่ใช้ในการวัลคาไนซ์ยาง

#### 2.5.4 สารตัวเติม (Filler) [8,16,24]

สารตัวเติม หมายถึง สารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางที่เติมลงไปในยางเพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น เชม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา เป็นต้น

สารตัวเติมที่เติมลงไปในยาง เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ดังนี้

- เพื่อลดต้นทุน
- เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของยาง
- เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต
- ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน
- เพิ่มอายุการใช้งานของยาง

#### การแบ่งชนิดของสารตัวเติม

สามารถแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิตและตามลักษณะ คือ

การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามการผลิต แบ่งได้เป็น 5 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีตามธรรมชาติ หรือจากผลพลอยได้จากธรรมชาติ แล้วนำมาบดให้ละเอียด ได้แก่

- แคลเซียมคาร์บอเนตจากหินปูน เปลือกหอย และชอล์ค
- แคลเซียมและแมกนีเซียมซิลิเกตจากแป้งทัลคัม
- ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica)

2. สารตัวเติมตามธรรมชาติที่ร่อนแยกความละเอียด เช่น คาโอลีน

3. สารตัวเติมที่ได้จากวิธีการตกตะกอน เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ไฮเดรตซิลิกา ไฮเดียมอลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และไฮเดรตอลูมิเนียมออกไซด์

4. สารตัวเติมในรูปของเชม่าต่าง ๆ เช่น เชม่าดำ ซิงค์ออกไซด์

5. สารตัวเติมประเภทที่มีการทำปฏิกิริยาที่ผิว (surface modified products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่นำสารตัวเติมมาทำปฏิกิริยาที่ผิว เพื่อให้สารตัวเติมนั้นเกาะติดแน่นกับยาง ซึ่งทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทัลคัม และซิลิกาที่ทำปฏิกิริยาที่ผิวหรือฉาบผิว

การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะ แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (particulated filler) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต
2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (fibrous filler) ได้แก่ แอสเบสทอส ผงเยื่อไม้
3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (resinous filler) ได้แก่ ฟีนอลิก เป็นต้น

### สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด

ก. สารตัวเติมพวกเสริมความแข็งแรง (reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยให้ยางมีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น คือ มีความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง เป็นต้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของสารตัวเติมมากขึ้นจะทำให้ยางมีความต้านทานต่อการกระดอนลดลง สารตัวเติมประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีอนุภาคขนาดเล็กประมาณ  $180 - 600 \text{ \AA}$  เป็นต้น

ข. สารตัวเติมพวกกึ่งเสริมความแข็งแรง (semi-reinforcing filler) เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมความแข็งแรงของยางได้บ้าง สารตัวเติมเหล่านี้มีขนาดอนุภาคปานกลาง เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และคาโอลิน เป็นต้น

ค. สารตัวเติมพวกช่วยลดต้นทุนการผลิต (diluent filler) เป็นสารตัวเติมประเภทนี้ไม่เสริมประสิทธิภาพความแข็งแรงให้กับยาง มีราคาถูก มีอนุภาคขนาดใหญ่ตั้งแต่  $10000 \text{ \AA}$  ขึ้นไป เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แป้งทาลค์ม แบเรียมซัลเฟต เป็นต้น สารตัวเติมประเภทนี้จะทำให้สมบัติทางกายภาพบางอย่างลดลง เช่น ความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอ แต่ปรับปรุงสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น ทำให้ความแข็งแรงและโมดูลัสดีขึ้น ทำให้กระบวนการแปรรูปง่าย ลดการบวมของยาง และช่วยลดต้นทุนการผลิตเพราะมีราคาถูก

### สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย ได้แก่

ก. แอสเบสทอส (asbestos) เป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ ช่วยเพิ่มสมบัติในด้านความทนทานต่อเปลวไฟ หรือความร้อนของยาง

ข. ผงเยื่อไม้ (wood flour) ได้จากการบดไม้ให้มีขนาดเล็ก มักใช้เป็นสารตัวเติมในยางประเภทเกรดต่ำ สารตัวเติมประเภทนี้ไม่มีผลต่อการคงรูปของยาง ถ้าใช้ในปริมาณมากจะทำให้ยางแข็งขึ้น และช่วยลดอัตราการหดตัวของยาง

สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน เรซินที่เติมเข้าในยางจะทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำใหยางแข็งขึ้น มักจะใช้สารตัวเติมที่เป็นผง เช่น เซม่าดำ และซิลิกา แต่สารเคมีที่เป็นผงนี้สามารถผสมเข้าไปในยางได้ในปริมาณที่จำกัด ถ้ามากเกินไปแล้วจะทำให้ผสมเข้ายาก ยางแห้งและมีความร้อนเกิดขึ้นในขณะผสม จึงมีการเลือกที่จะใช้พวกเรซินเติมลงไป ในยาง สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน ได้แก่ สไตรีนเรซิน และฟีนอลิกเรซิน

นอกจากนี้แล้วสารตัวเติมประเภทที่มีลักษณะเป็นเม็ด ยังแบ่งได้เป็นชนิดที่มีสีดำและชนิดที่ไม่ใช่สีดำ ซึ่งเซม่าดำเป็นสารตัวเติมชนิดที่มีสีดำที่นิยมใช้กันมาก ส่วนสารตัวเติมที่ไม่เป็นสีดำที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ ซิลิกา

### 2.5.4.1 ซิลิกา (Silica) [8]

ซิลิกามีชื่อทางเคมีว่า ซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide,  $\text{SiO}_2$ ) และอาจมีผลึกอยู่ด้วย ซิลิกาเป็นสารตัวเติมชนิดที่ไม่ใช่สีดำ (non black filler) ที่ดีที่สุดและนิยมใช้มาก เพราะเป็นสารตัวเติมชนิดที่เสริมความแข็งแรงให้กับยางด้วย มักใช้ในการผลิตภัณฑ์ยางพวกที่มีสีขาวหรือสีต่าง ๆ สามารถแบ่งซิลิกาได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ซิลิกาบด (ground mineral silica) เป็นแร่ซิลิกาบดหรือทรายบดละเอียด มีขนาดอนุภาคต่ำกว่า 200 เมช ( $75000 \text{ \AA}$ ) ซึ่งเป็นขนาดที่หยาบ ไม่ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง แต่มีราคาถูกจึงนิยมใช้เป็นสารตัวเติมในยางทนความร้อน เนื่องจากขนาดอนุภาคใหญ่จึงทำให้สมบัติไม่ดีและมีพื้นผิวน้อย การดูดซึมสารเร่งวัลที่ผิวจะมีน้อย ดังนั้นซิลิกาบดจึงไม่มีผลต่อเวลาในการคงรูปและไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์โปร่งแสง

2. ซิลิกาที่เตรียมจากการตกตะกอน (precipitated silica) โดยการนำทรายมาละลายในด่างให้กลายเป็นสารประกอบซิลิเกต จากนั้นจึงตกตะกอนเอาซิลิกา กลับออกมาล้างและทำให้แห้ง จะได้ซิลิกาผง ซึ่งมีน้ำปนอยู่ในอนุภาค ซิลิกาที่ได้มีฤทธิ์เป็นกลางถึงเป็นกรดเล็กน้อย มีขนาดอนุภาคตั้งแต่  $100 - 400 \text{ \AA}$

ซิลิกาชนิดนี้เป็นสารตัวเติมที่เสริมความแข็งแรงให้กับยางที่นิยมมากที่สุด โดยทำให้ยางมีความต้านทานแรงดึง การฉีกขาด และการสึกหรอ นอกจากนี้ยังทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปมักใช้กับการผลิตผลิตภัณฑ์พวกที่ต้องการลักษณะโปร่งแสง และมีสีสวย เช่น Hi-sil 255, Hi-sil 233, Ultrasil VN-3

3. ซิลิกาที่เตรียมจากการเผาไหม้ (furnace หรือ combustion หรือ fumesilica) ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{SiCl}_4$  (หรือ  $\text{SiHCl}_3$ ) กับไอน้ำในเปลวไฟของไฮโดรเจนและออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1400 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวให้ซิลิกาออกมา ซิลิกาชนิดนี้มีฤทธิ์เป็นกรด และมีขนาดอนุภาคเล็กมาก เสริมความแข็งแรงได้ดีมาก ทำให้ยางมีความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการสึกหรอ ซิลิกาชนิดนี้มีราคาแพงมากมักใช้เพื่อวัตถุประสงค์พิเศษกับยางซิลิโคน เป็นต้น

ซิลิกาที่เตรียมจากการตกตะกอนและการเผาไหม้ เมื่อใช้กับยางจะก่อให้เกิดการชะลอการคงรูป เนื่องจากผิวหน้าที่ไวต่อปฏิกิริยาของอนุภาคซิลิกา จะดูดซึมสารเร่งปฏิกิริยา คงรูป จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณของสารเร่งปฏิกิริยา คงรูป หรือใช้สารเคมีช่วยเร่งปฏิกิริยา คงรูป ได้แก่ พวกไกลคอล เช่น DEG และ PEG เป็นต้น หรือพวก อะมีน เช่น triethanolamine เป็นต้น โดยจะใช้ประมาณ 2 % ของปริมาณซิลิกาในยาง

### ผลของการใช้ซิลิกากับยาง

1. ผลเนื่องจากขนาดของซิลิกา ซิลิกามีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวมาก ขณะผสมยางจะเกิดความร้อนสูง อาจเป็นเหตุให้เกิดการคงรูปก่อนกำหนดได้ง่าย

ซิลิกามีลักษณะเป็นผงสีขาว เบา ร่วน ทำให้การผสมเข้าไปในยางทำได้ไม่่ง่ายนัก การผสมจะใช้เวลานานกว่าปกติ ซึ่งทำให้ยางเกิดการแตกของโมเลกุลได้ ทำให้สมบัติของยางตกลง ดังนั้นการผสมยางกับซิลิกาเพื่อไม่ให้เสียเวลานาน ไม่ควรผสมในเครื่องบดสองลูกกลิ้งแต่ควรผสมในเครื่องผสมแบบปิด กรณีที่ไม่มีเครื่องผสมแบบปิดและจำเป็นต้องผสมในเครื่องบดสองลูกกลิ้ง ต้องทำด้วยความระมัดระวังอย่าผสมนานเกินไป และขณะผสมให้เติมยางกับซิลิกาเท่านั้น อย่าเติมสารเคมีอื่นลงไป เนื่องจากจะทำให้การผสมยากขึ้น เมื่อผสมเสร็จให้ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน แล้วจึงเติมสารเคมีอื่นลงไป ส่วนการผสมในเครื่องผสมแบบปิดนั้นจะสามารถผสมแบบปกติได้

2. ผลเนื่องจากความเป็นกรดของซิลิกา ซิลิกาเป็นสารที่มี pH เป็นกรด ซึ่งทำให้เกิดการดูดสารตัวเร่งที่ผิวของซิลิกาได้ ปริมาณสารตัวเร่งจะลดลง ทำให้ยางคงรูปช้าลง ซึ่งแก้ไขได้โดยการเพิ่มปริมาณของสารตัวเร่ง หรือเติมสารประเภทที่เป็นตัวลดประสิทธิภาพ (deactivator) ของซิลิกา ลงไป สารเหล่านี้ ได้แก่ สารประกอบอะมีน และแอลกอฮอล์

สารประกอบอะมีนมักทำให้ยางเป็นสีน้ำตาล และมีประสิทธิภาพสูงกว่าแอลกอฮอล์ ส่วนแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ ได้แก่ PEG การใช้สารลดประสิทธิภาพมักจะใช้ประมาณ 2 % ของสารตัวเติมปริมาณจะมากหรือน้อยขึ้นกับประสิทธิภาพของสารตัวเติม [20] และอัตราการคงรูปที่ต้องการ ถ้าใช้ปริมาณสูงเกินไปจะทำให้การคงรูปเร็ว เกิดการคงรูปก่อนกำหนดได้ง่าย ถ้าปริมาณต่ำไปก็จะคงรูปช้า

3. อิทธิพลที่ทำให้ยางแข็ง ปกติการมีซิลิกาผสมอยู่ในยางจะทำให้ความแข็งของยางที่ยังไม่คงรูปสูงขึ้น

4. อิทธิพลเนื่องจากผิวซิลิกาเป็นสารอนินทรีย์ โดยปกติซิลิกาที่ได้จากการตกตะกอนเป็นซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ดังนั้นจึงทำให้ความต้านทานแรงดึง และการยืดออกจนขาดใกล้เคียงกับเขม่าดำ แต่จะมีความต้านทานต่อการสึกหรอ และโมดูลัสประมาณ 25 % ของเขม่าดำ (HAF) เพราะซิลิกามีผิวเป็นสารอนินทรีย์มาก ทำให้มีแรงยึดกับยางไม่ตึงนัก ซึ่งจะมีผลต่อความต้านทานต่อการสึกหรอและโมดูลัสของยาง แต่ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางที่ใช้ ซิลิกาสูงกว่ายางที่ใช้เขม่าดำ (HAF) มาก

#### 2.5.4.2 เขม่าดำ (Carbon black) [8,16,24]

เป็นกลุ่มของคาร์บอนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน โดยมีโครงสร้างของ quasi-graphitic การใช้งานเขม่าดำครั้งแรกถูกพบครั้งแรกที่ประเทศอังกฤษ ซึ่งเกือบทั้งหมดที่ผลิตได้จะนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ยาง นอกเหนือจากนี้จะนำไปใช้ในงานเกี่ยวกับหมึกพิมพ์ จุดประสงค์หลักของการใช้เขม่าดำในยาง ก็เพื่อเสริมแรงในด้านต่างๆ เช่น ความต้านทานแรงดึง โมดูลัส ความต้านทานต่อการสึกหรอ และความต้านทานต่อการฉีกขาด เป็นต้น

สมบัติของเขม่าดำ สมบัติของเขม่าดำขึ้นกับสิ่งสำคัญ 5 ประการ คือ

- ขนาดของอนุภาค (particle size) เขม่าดำที่ยิ่งมีขนาดเล็ก จะให้ยางที่มีความแข็งและสมบัติต่างๆมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ทำการผสมให้เข้ากับยางได้ยากขึ้นด้วย
- โครงสร้างของเขม่าดำ (structure) หมายถึง การจัดตัวระหว่างอนุภาคของเขม่าดำให้มีรูปร่างโครงสร้าง ถ้าเขม่าดำมีการจัดตัวต่อกันเป็นเส้นสายมาก แสดงว่ามีโครงสร้างสูง ถ้าการจัดตัวไม่ต่อกันหรือต่อกันน้อย แสดงว่ามีโครงสร้างต่ำ โดยเขม่าดำมีโครงสร้างต่างกันได้เนื่องจาก ความแตกต่างในกระบวนการเตรียมเขม่าดำนั้น

ผลของโครงสร้างของเขม่าดำที่มีต่ออย่างส่วนใหญ่จะมีผลทางด้าน การแปรรูป เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง จะทำให้การจัดตัวไม่แน่น สามารถผสมกระจายในยางได้ดี ทำให้การขึ้นรูปแบบ extrusion ได้ยางที่มีผิวเรียบ มีความหนืดสูงขึ้น แต่เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงนี้จะผสมเข้าไปในยางได้ในปริมาณที่น้อยกว่าเขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำ

- ลักษณะผิว การจัดตัวของคาร์บอนอะตอมในเขม่าดำจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ โดยเขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพต่ำ เช่น Thermal black จะมีการจัดตัวของคาร์บอนอะตอมเรียงขนานอย่างมีระเบียบ ในขณะที่เขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพสูง จะมีการจัดตัวของคาร์บอนอะตอมไม่เป็นระเบียบเท่า และยิ่งเขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็ก การจัดตัวของคาร์บอนอะตอมก็ยังไม่เป็นระเบียบมากขึ้น

การที่เขม่าดำที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ จะส่งผลให้มีการเกาะติดกับยางได้ไม่ดี การเสริมประสิทธิภาพของยางจึงต่ำลง

- สมบัติทางเคมีของผิว เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 90-99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยไฮโดรเจนจะอยู่กระจายตลอดทั้งอนุภาคของเขม่าดำ ส่วนออกซิเจนจะอยู่ที่ผิวของเขม่าดำและจับตัวในรูปของหมู่ฟีนอลิก คีโตนิก คาร์บอกซิลิก และแลคโตน นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณเล็กน้อยปนอยู่ในเขม่าดำด้วย ซึ่งไฮโดรเจน ออกซิเจน และกำมะถันดังกล่าวเป็นสาเหตุให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเขม่าดำต่างกัน ส่งผลต่อระบบการวัลคาไนซ์ของยาง

- ความเป็นรูพรุน (porosity) การมีรูพรุนมากหรือน้อยส่งผลต่อการวัดค่าไนซ์ของยางได้ เพราะรูพรุนนี้จะดูดเอาสารตัวเร่งเข้าไป ทำให้การคงรูปของยางช้าลงได้

#### การแบ่งเกรดของเขม่าดำ

เขม่าดำที่ผลิตขึ้น มักจะถูกตั้งชื่อโดยบริษัทผู้ผลิต โดยมากมักจะยึดหลักให้เขม่าดำเป็นพวก HAF, FEF หรือ ISAF โดยกำหนดไปว่า SAF มีค่าสูงสุด ISAF อยู่กลางระหว่าง SAF และ HAF เป็นต้น แต่ก็ยังมีปัญหายุ่งยากตามมาถ้าหากเขม่าดำที่ผลิตมีเกรดอยู่ระหว่าง ISAF และ HAF หรือ SAF และ ISAF ดังนั้นจึงได้มีการตั้งเกรดของเขม่าดำขึ้นใหม่ตามระบบที่ควรจะเป็นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ระบบ คือ

- (1) ASTM D 1765-67 (1967)
- (2) Heal and Beddoc
- (3) Wolf and Westinning

โดยในปัจจุบัน ระบบที่ได้รับความนิยม คือ ระบบ ASTM D 1765-67 (1967) ดังนั้นระบบอื่นๆ จึงจะไม่นำมากล่าวในที่นี้

ASTM D 1765-67 (1967) ในระบบนี้จะประกอบด้วยตัวหนังสือ 1 ตัว และตามด้วยตัวเลข 3 ตัว โดยตัวหนังสือจะระบุว่าการคงรูปเร็วหรือช้า เช่น N หมายถึง normal และ S หมายถึง slow ส่วนตัวเลข 3 ตัวที่ตามมาจะมีความหมายดังนี้ ตัวเลขตัวแรก หมายถึง พื้นที่ผิวของเขม่าดำ เช่น 1 = SAF, 2 = ISAF และ 3 = HAF เป็นต้น ตัวเลขที่ 2 และ 3 ทำการตั้งขึ้นลอยๆ แต่ก็ยังมีหลักการว่า ถ้าเขม่าดำมีโครงสร้างมาตรฐานก็ให้ตัวเลขตัวที่สองซ้ำกับตัวแรก และตัวที่สามลงท้ายด้วยศูนย์ ตัวอย่างเขม่าดำเกรดต่างๆ ที่เรียกตามระบบ ASTM แสดงได้ดังตารางที่ 2.6

#### ผลของเขม่าดำต่อยางที่ยังไม่ทำการวัลคาไนซ์

การนำเขม่าดำไปใช้กับยางจำเป็นต้องบดยางให้นิ่มก่อน โดยเขม่าดำจะทำให้ยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้เขม่าดำปริมาณและขนาดต่างกันจะมีผลต่อค่าความหนืดของยาง เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะทำให้ยางมีความหนืดสูงกว่าเขม่าดำที่อนุภาคใหญ่เมื่อใช้ในปริมาณเท่าๆ กัน

โครงสร้างของเขม่าดำก็มีผลต่อสมบัติของยางที่ยังไม่ผ่านการวัลคาไนซ์เช่นกัน โดยเขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงจะทำให้เวลาในการผสมลดลง อุณหภูมิในการผสมเพิ่มขึ้น เป็นต้น

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างเขม่าดำเกรดต่างๆ ที่เรียกตามระบบ ASTM [8]

ชื่อปกติ	ASTM D 1765
SAF	N-110
ISAF-LS	N-219
ISAF-LM	N-231
ISAF	N-220
ISAF-HS	N-242
EPC	S-300
MPC	S-301
HAF	N-330
HAF-HS	N-347
SRF	N-358
FF	N-440
FEF	N-550
HMF	N-601
GPF	N-660
MPF	N-785
FT	N-880
MT	N-990

#### ผลของเขม่าดำต่อสมบัติของยางวัลคาไนซ์

สมบัติของยางวัลคาไนซ์ ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการสึกหรอ ความล้า และความกระด้างตัวคืนกลับของยางจะขึ้นกับขนาดอนุภาคของเขม่าดำ ส่วนความแข็งแรงจะขึ้นกับโครงสร้างมากกว่าขนาดอนุภาค

- ความต้านทานแรงดึง เขม่าดำเกือบทุกตัวจะให้ความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ยกเว้น FT และ LB

- ความต้านทานต่อการสึกหรอ ขึ้นกับขนาดอนุภาคของเขม่าดำ ยิ่งอนุภาคเล็ก ความต้านทานต่อการสึกหรอจะสูง

- ความแข็งแรง ยางที่เติมเขม่าดำจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเขม่าดำที่ใช้ ถ้าเขม่าดำยังมีขนาดอนุภาคเล็ก ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นตาม



- ความต้านทานต่อการฉีกขาด เขม่าดำจะให้ความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่ง ถ้าเติมเขม่าดำลงไปอีกจะทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง โดยสมบัติดังกล่าวจะขึ้นกับขนาดอนุภาคของเขม่าดำ ถ้าขนาดอนุภาคยิ่งเล็ก ความต้านทานต่อการฉีกขาดจะสูง

- การกระด้างตัวคืนกลับ (rebound resilience) จะมีค่าลดลงเมื่อเติมเขม่าดำ และสารตัวเติมอื่นลงไป ยิ่งปริมาณสารตัวเติมมากเท่าไร ความกระด้างตัวจะลดลงมากเท่านั้น โดยเฉพาะถ้าขนาดอนุภาคของสารตัวเติมเล็ก ก็จะทำให้ความกระด้างตัวลดลงมาก

#### 2.5.4.3 แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) [8]

แคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดในธรรมชาติเกิดอยู่ในรูปของซอล์กกับปูน หรืออาจอยู่ในรูปของ dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , ankerite  $\text{Ca}(\text{MgFe})(\text{CO}_3)_2$  แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในยางอาจเป็นพวกที่มาจากธรรมชาติหรือสังเคราะห์โดยกระบวนการทำให้ตกตะกอน

แคลเซียมคาร์บอเนตชนิดที่ใช้ในยางแบ่งเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- ก. Ground limestone
- ข. Ground chalk หรือWhiting
- ค. Precipitated whiting
- ง. Treated whiting และ treated calcium carbonate

นอกจากนี้ยังมีสารตัวเติมอื่นๆ อีกหลายชนิด ได้แก่ แคลเซียมซิลิเกต แมกนีเซียมออกไซด์ ผงไมก้า โมลิบดินัมไดซัลไฟด์ แบ็งทอลคัม และสารตัวเติมเรซิน เป็นต้น

#### 2.5.5 สารช่วยในการแปรรูป (Plasticizer) [8,16]

เป็นสารที่เติมเข้าไปในยางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และเพิ่มความสามารถในการทำงาน ซึ่งสารช่วยในการแปรรูปจะทำให้ความแข็งแรงของยางลดลง และช่วยให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น

สารช่วยในการแปรรูปจะมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน ขึ้นกับหน้าที่และปริมาณการใช้ คือ

1. Processing acid คือ สารพลาสติกไซเซอร์ ที่ใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 phr เพื่อช่วยในการแปรรูปยาง และช่วยให้การผสมสารเคมีเข้าไปได้ง่ายขึ้น

2. Softener คือ สารพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในปริมาณ 5-15 phr ใช้เพื่อทำให้ยางนิ่มลงทั้งในขณะที่ยังไม่คงรูปและคงรูปแล้ว

3. Extender คือสารพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในปริมาณมากกว่า 15 phr ใช้เพื่อลดต้นทุนหน้าที่ของพลาสติกไซเซอร์

1. ช่วยในการแปรรูปยาง คือ ช่วยให้ยางทั้งที่คงรูปแล้วและยางที่ยังไม่คงรูปนิ่มลง ทำให้แปรรูปยางได้ง่ายขึ้น

2. เพื่อปรับปรุงสมบัติของยาง คือ มีความแข็งลดลง โมดูลัสลดลง แรงยึดออกจุนขาดของยางสูงขึ้น มีความยืดหยุ่นสูงขึ้น

3. ลดต้นทุน คือ การเติมพลาสติกไซเซออร์จะช่วยให้สามารถเติมสารตัวเติมได้มากขึ้น

4. เพื่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ คือ ทำใหยางยังคงมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ

5. เพื่อลดพลังงานในการแปรรูปยาง เนื่องจากพลาสติกไซเซออร์ทำใหยางนิ่มลง

พลาสติกไซเซออร์ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

ก. สารช่วยทำใหยางนิ่มโดยทางเคมี (chemical plasticizer) เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่เมื่อเติมเข้าไปในปริมาณเล็กน้อย จะทำใหยางนิ่มและลดเวลาของการบดยางลง มักใช้กับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ที่มีความหนืดสูง ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่และแปรรูปได้ยาก โดยใช้ประมาณ 2 phr ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับยาง

ข. สารช่วยทำใหยางนิ่มโดยทางกายภาพ (physical plasticizer) เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่เติมเข้าไปแล้วทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นระหว่างโมเลกุลของยาง ทำให้โมเลกุลยางเคลื่อนไหวได้ง่ายยางจะนิ่มลงแปรรูปได้ง่ายขึ้น เป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยากับยางและสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกับยางและสารอื่น ๆ ได้ ตัวอย่างเช่น น้ำมันปิโตรเลียม เป็นต้น

ชนิดของพลาสติกไซเซออร์

ในระยะแรกเป็นพวกน้ำมันพืช ระยะหลังจึงเริ่มมีน้ำมันปิโตรเลียม (ซึ่งราคาถูกกว่าน้ำมันพืช) เข้ามาแทนที่ ทำให้มีการเลือกใช้น้ำมันปิโตรเลียมมากขึ้น โดยชนิดของพลาสติกไซเซออร์ มีดังนี้

1. ยางสน
2. ผลิตภัณฑ์จากถ่านหิน
3. เรซิน และกรดอินทรีย์
4. ผลิตภัณฑ์จากน้ำมันปิโตรเลียม
5. น้ำมันเอสเทอร์

ในงานวิจัยนี้ พลาสติกไซเซออร์ที่เราใช้ คือ Paraffinic oil และ Napthenic oil ซึ่งจัดอยู่ในพลาสติกไซเซออร์ชนิดผลิตภัณฑ์จากน้ำมันปิโตรเลียม Hiko tack และสารช่วยการผสมยาง (Homogenizing agents) ซึ่งจัดอยู่ในพลาสติกไซเซออร์พวกเรซิน

การเลือกน้ำมันกับสมบัติของน้ำมันที่มีผลต่อยาง ต้องคำนึงถึงผล ดังนี้

1. ความเข้ากันได้ระหว่างยางกับน้ำมัน
2. สมบัติของยางที่วัลคาไนซ์
3. สีของยาง และ ความคงทนของสี
4. การขนถ่ายเคลื่อนย้าย และ การใช้

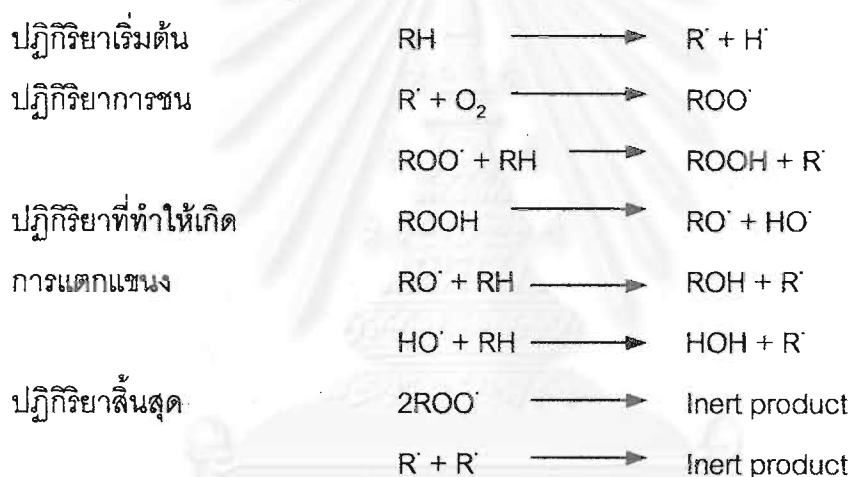
## 2.5.6 สารต้านทานยางเสื่อมสภาพ (Protective agent) [8,16]

โมเลกุลของยางธรรมชาติจะมีพันธะคู่อยู่ด้วยจึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพได้ โดยสาเหตุของการเสื่อมสภาพนี้เนื่องจากปฏิกิริยาของออกซิเจนและโอโซน ซึ่งการเสื่อมสภาพของยางจะเกิดช้ามากถ้าไม่มีสารเร่ง แต่ในธรรมชาติ แสง ความร้อน ความไม่บริสุทธิ์ของโลหะ ล้วนเป็นตัวเร่งตามธรรมชาติที่ทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

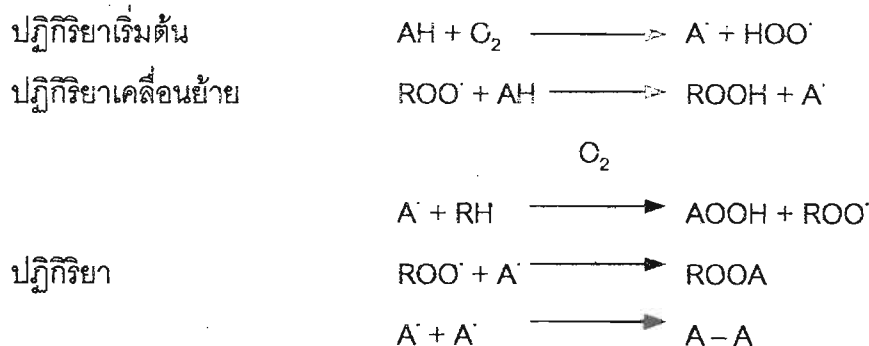
นอกจากนี้การอบยาง (aging) จะทำให้ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลง หรืออาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในทุกส่วนของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดรอยแตกที่ผิว ผิวแข็ง และสูญเสียความแข็งแรง

### ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันในยาง

ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันในยางเป็นแบบ Autooxidation นั่นคือผลของการเกิดออกซิเดชันจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้เร็วขึ้น โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

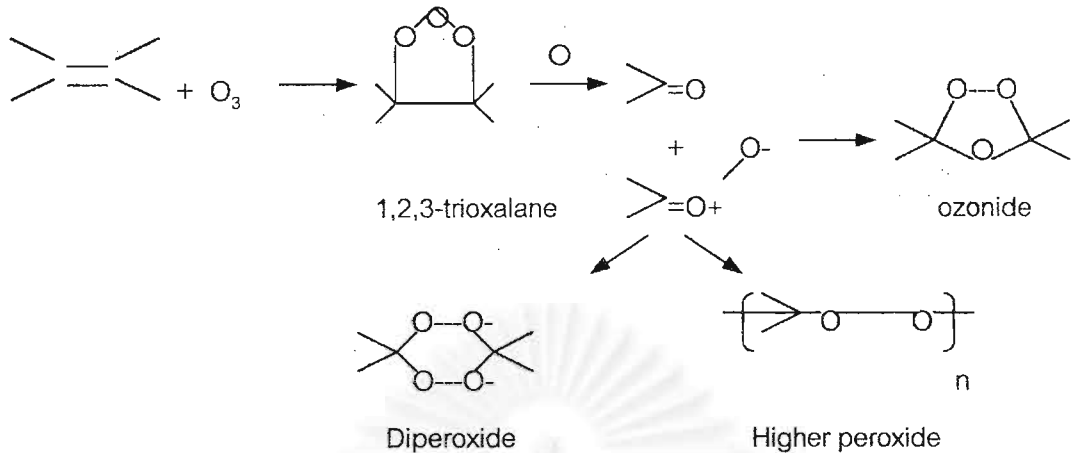


จากปฏิกิริยาดังกล่าว แสงและความร้อน จะเป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาเริ่มต้นเกิดได้เร็วขึ้น ถ้าสมมติให้แอนติออกซิแดนท์มีสูตรย่อเป็น AH และ RH เป็นสูตรย่อของยาง ปฏิกิริยาที่แอนติออกซิแดนท์ทำให้ปฏิกิริยาถูกใช้ในการออกซิเดชันของยางยุติลงแสดงได้ดังนี้



สารแอนติออกซิแดนท์ที่เป็นแบบป้องกันไม่ให้เกิดอนุมูลอิสระ มักเป็นสารที่ละลายสารเปอร์ออกไซด์ สารพวกนี้ได้แก่ dilauryl- $\beta$ -thiodipropionate (DLTP) และ trisononyl phenylphosphite (TNPP) เป็นต้น

ปฏิกิริยาระหว่างโอโซนกับยาง แสดงได้ดังกลไกต่อไปนี้



ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันยางเสื่อมสภาพและเพิ่มความทนทานของยางให้ดีขึ้น ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางจึงจำเป็นต้องมีการป้องกันยางเสื่อมสภาพ โดยใช้สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) หรือสารแอนติโอโซนแนนท์ (antiozonant) ซึ่งจะเข้าไปช่วยเคลือบผิวยางและทำปฏิกิริยาเป็นการยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ให้นานขึ้น

1. สารแอนติออกซิแดนท์ เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางที่เนื่องมาจากการที่ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับยาง โดยเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่า “ปฏิกิริยาออกซิแดนท์” โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ

ก. สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดตกสี (staining antioxidant) เป็นออกซิแดนท์ที่เป็นสารประกอบอะมีน (amine) หรืออนุพันธ์ของอะมีน ใช้กับยางที่มีสีดำ เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อใช้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ตกสี ได้แก่ para-phenylene diamine (PPD) เป็นต้น

ข. สารแอนติออกซิแดนท์ชนิดไม่ตกสี (non-staining antioxidant) เป็นสารประกอบฟีนอล (phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล ใช้กับยางที่มีสีโดยทั่วไป ซึ่งจะไม่เกิดการตกสี หรือตกสีเล็กน้อย ได้แก่ phenolic sulfide เป็นต้น

2. สารแอนติโอโซนแนนท์ โดยปกติโอโซนมีอยู่ในปริมาณน้อยประมาณ 1-10 ส่วนต่อร้อยล้านส่วน (pphm) แต่มีผลต่อยาง โดยทำให้ยางเกิดรอยแตก สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

ก. para-phenylene diamine (PPD) ซึ่งเป็นทั้งแอนติออกซิแดนท์และแอนติโอโซนแนนท์ เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำ ตัวที่นิยมใช้กันมากและให้สมบัติที่ดี คือ IPPD และ 6PPD ซึ่ง 6PPD จะมีสมบัติคล้ายกับ IPPD ต่างกันตรงที่ 6PPD จะมี โครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่กว่า โดย IPPD จัดเป็นสารแอนติออกซิแดนท์และแอนติโอโซนแนนท์ที่มี ประสิทธิภาพสูงสุดเท่าที่พบมา คือ ช่วยลดการแตกของยางเนื่องจากโอโซนได้อย่างชัดเจน ไม่ว่าในสภาวะ static หรือ dynamic แต่มีข้อเสีย คือ เกิดการตกสีได้

เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของ IPPD และ 6PPD จะพบว่า ความทนทานต่อการแตกเนื่องจากการหักงอของยางที่ใช้ IPPD จะเหนือกว่ายางที่ใช้ 6PPD แต่ภายหลังจากการที่ยางสัมผัสกับน้ำ หรือผ่านการอบในอากาศ จะพบว่า ยางที่ใช้ 6PPD จะมีสมบัติเหนือกว่ายางที่ใช้ IPPD

ข. ซีผึ้งพาราฟิน (paraffin wax) เป็นสารที่เติมลงไปนยางจะเกิดการซึมออกมาที่ผิวยาง กลายเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้โอโซนกระทบกับผิวของยาง ทำให้ยางมีความทนทานต่อโอโซน ซีผึ้งพาราฟินที่ใช้ในการป้องกันไม่ให้โอโซนทำปฏิกิริยากับยางควรมีสมบัติซึมออกมาที่ผิวของยางได้เร็ว ต้องเกาะยึดแน่นกับผิวยางและต้องมีปริมาณมากพอที่จะทำให้ผิวของยางมีซีผึ้งอยู่ตลอดเวลา

## 2.6 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber Manufacturing Process) [11,12,16,42]

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางประกอบด้วยขั้นตอนที่สำคัญ คือ การผสมยางกับสารเคมี (mixing) การทำให้ยางมีรูปร่างต่าง ๆ (forming) และการทำให้ยางคงรูป (vulcanizing)

### 2.6.1 การบดยางให้นิ่ม (Mastication) [11,12]

การบดยางให้นิ่ม คือ การที่ทำให้ยางซึ่งเป็นพวกพอลิเมอร์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เกิดการฉีกขาดของสายโมเลกุล มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง

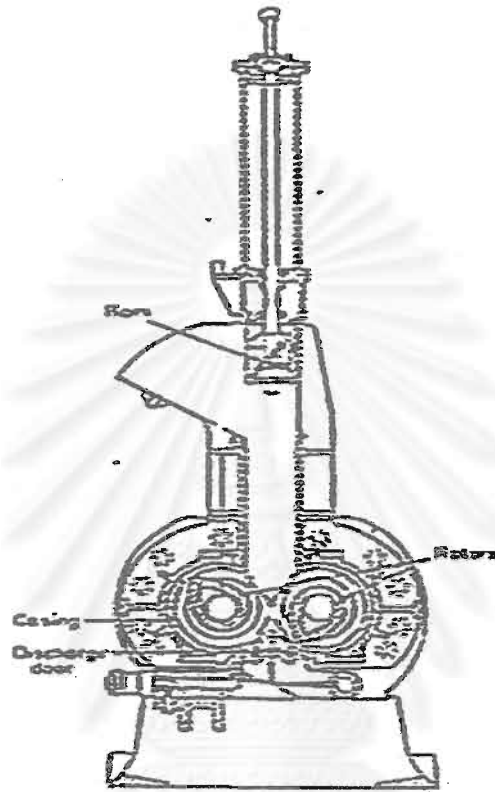
การบดยางให้นิ่ม เป็นวิธีการสำคัญและมักใช้กับยางธรรมชาติ เพราะยางธรรมชาติมีความหนืดสูงหรือแข็งเกินกว่าที่จะให้สารเคมีต่างๆ กระจายเป็นเนื้อเดียวกันได้ นอกจากนี้ยังจำเป็นในด้านการผสมยางเข้าด้วยกัน (blending) เพื่อการปรับค่าความหนืด (mooney viscosity) ของยางที่นำมาผสมกันให้มีค่าใกล้เคียงกัน เป็นการเพิ่มความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของยางผสม สามารถทำได้โดยการบดยางล้วนๆ ในตอนเริ่มแรกโดยไม่ผสมสารเคมีใดๆ

กลไกของการบดยางให้นิ่ม คือ ขณะที่ทำการบดยาง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำการตัดสายโมเลกุลยางและเกิดเรดิคัล (radical) ที่ปลายสายโมเลกุลที่ขาดออก ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง และความหนืดจึงลดลงด้วย

### 2.6.2 การบดผสมยางกับสารเคมี

เครื่องมือที่ใช้ในการบดผสมยางกับสารเคมีในระดับโรงงานอุตสาหกรรม แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องบดผสมแบบเปิด (open mill mixer) และเครื่องบดผสมแบบปิด (internal mixer)

### 2.6.2.1 เครื่องบดผสมแบบปิด [42]



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบภายในของเครื่อง Banbury mixer [16]

Banbury mixer เป็นเครื่องบดผสมแบบปิดที่นิยมใช้กันมาก เพื่อการบดผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว รูปที่ 2.13 แสดงส่วนประกอบภายในของเครื่อง Banbury mixer ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนป้อนยางเข้าเครื่อง (feeding module) ส่วนบดผสมยาง (mixer module) และส่วนขับเครื่อง (driving module) ส่วนป้อนยางเข้าเครื่อง ประกอบด้วยช่องสำหรับป้อนยาง และสารเคมี (feed hopper) และมีช่องเป็นรูปทรงกระบอกซึ่งภายในมีเครื่องกระทุ้ง (ram) เลื่อนขึ้นลง เพื่อกดยางและสารเคมีต่าง ๆ ให้เข้าสู่ห้องผสม (mixing chamber)

ส่วนผสมยางประกอบด้วยห้องบดซึ่งภายในมีโรเตอร์ (rotor) 2 ตัว เรียงขนานกันในแนวนอนและหมุนในทิศทางตรงข้ามด้วยความเร็วต่างกัน เพื่อให้ยางและสารเคมีถูกเหวี่ยงอย่างสม่ำเสมอผิวของโรเตอร์มีลักษณะเป็นใบมีด (rotor blades) จะดันให้ยางและสารเคมีบดผสมกันที่กลางห้องบดและขณะเดียวกันใบมีดจะตัดยางตามยาวด้วย การที่โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วต่างกันจึงเกิดการบดบดอย่างรุนแรง และการควบคุมอุณหภูมิอย่างถูกต้อง จะทำให้ใช้เวลาบดสั้นและยางที่ได้มีคุณภาพ

ส่วนขับเคลื่อนจะควบคุมการทำงานของโรเตอร์ที่อยู่ภายในห้องบด และควบคุมการเปิดปิดของประตู (discharge door) ที่อยู่ด้านล่าง เพื่อเปิดให้ยางที่บดผสมแล้วหล่นลงมา

การบดผสมยางกับสารเคมีในเครื่องบดผสมแบบปิด โดยทั่วไปจะบดผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ ยกเว้นพวกกำมะถัน การบดผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ ในเครื่องบดผสมแบบปิดต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการบด ลำดับการเติมสารลงไปบด ตลอดจนอุณหภูมิขณะบด

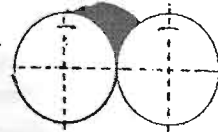
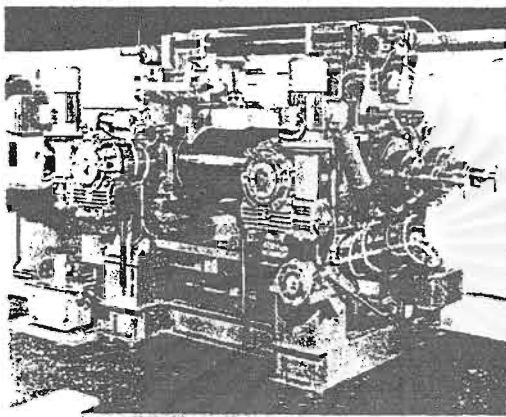
สารพวกน้ำมันใช้บดผสมพร้อมกับเขม่าดำและซิลิกา สำหรับอุณหภูมิขั้นสุดท้ายของการบดถ้าสูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ได้ เช่น มีฟองอากาศอยู่ในเนื้อยาง เกิดฝุ่นของสารเคมีเคลือบผิวหน้ายางที่ผสมสารเคมี ซึ่งสารเคมีเหล่านี้ถูกผสมในปริมาณที่มากเกินไปจนความสามารถที่จะละลายผสมปนกับยางได้ นอกจากนี้ยังเกิดการกระจายของสารเคมีไม่ทั่วถึงในเนื้อยาง การเลือกระยะเวลาและอุณหภูมิที่จะบดยางพิจารณาจากการกระจายของสารเคมีในเนื้อยาง และจากสมบัติทางกายภาพของยางซึ่งได้บดผสมสารทุกอย่างเรียบร้อยแล้ว

เงื่อนไขที่ต้องกำหนดเมื่ออบผสมยางโดยเครื่องบดผสมแบบปิด คือ ลำดับของสารที่จะเติมลงไปบดผสมกับยางและทำการจับเวลาการปรับเครื่องบดผสมแบบปิด คือ จับเวลาการปรับเครื่องกระทุ้งขึ้น - ลง แรงดันของแรม อุณหภูมิสุดท้ายของการบด และระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการบด นอกจากนี้แล้วการบดผสมยังต้องคำนึงถึงความจุของเครื่องบดผสมด้วย โดยต้องมีการคำนวณปริมาณของยางผสมสารเคมีไม่เกินความจุของเครื่องบดผสมแบบปิด

สถาบันวิจัยบรการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.6.2.2 เครื่องบดผสมแบบเปิด [12,16]

เครื่องบดผสมแบบเปิดนี้จะเป็นแบบสองลูกกิ้ง (two-roll mill) ประกอบด้วยลูกกิ้ง 2 ลูก ที่มีขนาดเท่ากันวางในแนวนอน ให้แกนของลูกกิ้งขนานกัน



รูปที่ 2.14 เครื่องบดผสมแบบสองลูกกิ้ง [16]

การบดยางเริ่มด้วยการนำชิ้นยางเข้าไปในช่องว่างระหว่างสองลูกกิ้งที่กำลังหมุนอยู่ปรับความกว้างของช่องเพื่อให้บดยางขณะผ่านยางที่ผ่านช่องว่างระหว่างสองลูกกิ้ง ในตอนแรกจะมียางร่วงตกลงบนถาดรองรับได้ลูกกิ้งได้ เมื่อยางเกาะพันรอบลูกกิ้งในตอนแรกจะมีลักษณะไม่เรียบทั่วผิวลูกกิ้งคือ ยางที่พันรอบลูกกิ้งจะมีช่องที่ขาดเป็นรูอยู่ทั่วไป เมื่อบดต่อไปยางที่พันลูกกิ้งจะเริ่มเรียบขึ้น ขณะเดียวกันก็จะมีกองยางอยู่เหนือช่องว่างระหว่างลูกกิ้ง และต้องให้ยางผ่านลูกกิ้งซ้ำไปซ้ำมาหลายครั้ง เพื่อให้เกิดความสม่ำเสมอทั่วเนื้อยาง ซึ่งทำได้โดยใช้มีดตัดยาง (roll knife) ตัดยางที่พันอยู่บนลูกกิ้งลูกหน้าไปตามยางประมาณ 3 ใน 4 ของความยาวลูกกิ้ง ขณะเดียวกันใช้มีดอีกข้างหนึ่งมีวยางที่ถูกตัดเข้ามา โดยให้มีวยางยังคงทาบอยู่บนผิวลูกกิ้งจนกว่ากองยางที่ยังค้างอยู่บนช่องว่างลูกกิ้งใหม่

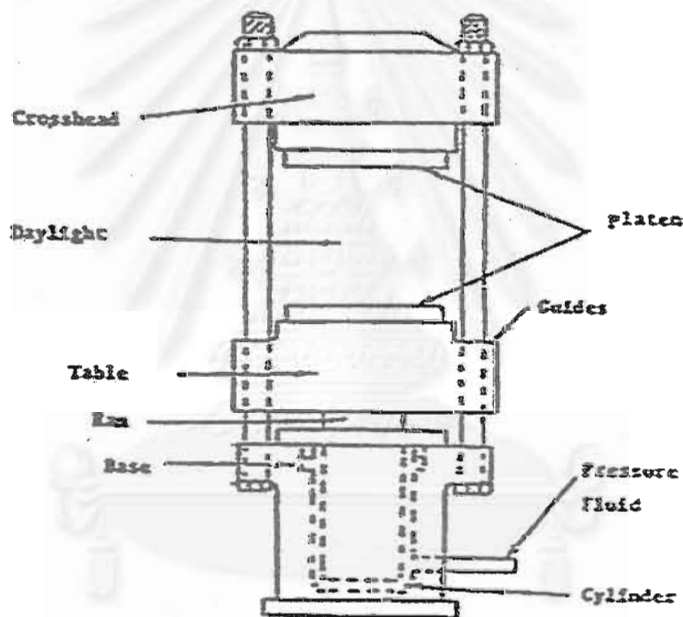
ในการใช้เครื่องบด 2 ลูกกิ้ง ควรคำนึงถึง

- อุณหภูมิของเครื่อง ควรปรับตั้งให้มีค่าเหมาะสมกับชนิดสารเคมีและสูตรยางที่จะบด
- ช่องว่างระหว่างลูกกิ้ง ควรปรับให้มีความเหมาะสมกับปริมาณยางที่จะบด



### 2.6.2.3 เครื่องอัดไฮดรอลิก [12,16]

การทำให้ยางคงรูปโดยวิธีอัด เป็นวิธีที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ยางประเภทที่ต้องใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป โดยวางแม่พิมพ์ที่บรรจุยางผสมยางสารเคมีแล้วลงบนแท่นของเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก รูปที่ 2.15 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดยางแบบแท่นอัดยางเคลื่อนขึ้น (up-stroking press) ซึ่งแท่นอัดยางแท่นล่างเป็นส่วนที่เคลื่อนขึ้นด้วยแรงอัดไฮดรอลิก ช่องระหว่างแท่นอัดยาง เรียกว่า daylight



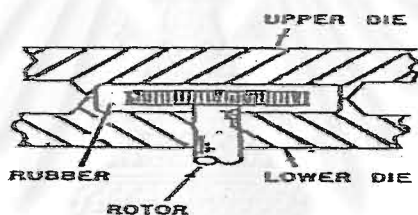
รูปที่ 2.15 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดไฮดรอลิก [16]

เครื่องอัดอาจมีได้หลายแท่นอัด ซึ่งจะเพิ่มจำนวนช่องว่าง (daylight) และทำให้อัดยางได้ครั้งละหลาย ๆ ชิ้น แท่นอัดอาจถูกทำให้ร้อนด้วยไอน้ำหรือน้ำมันหรือไฟฟ้า ซึ่งอุณหภูมิที่ต้องการจะถูกควบคุมโดยระบบอัตโนมัติ

## 2.7 การทดสอบการแปรรูปและการคงรูป [3,12,16]

### 2.7.1 การวัดความหนืดของยาง (Mooney viscosity) [3,16]

การวัดความหนืดของยางเป็นการวัดค่าความหนืดของยางที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เกิดการคงรูป โดยอาศัยหลักการให้แรงเฉือนหรือแรงบิด (torque) แก่ยางด้วยโรเตอร์ ซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่ ประมาณ  $2.00 \pm 0.02$  รอบต่อนาที เครื่องมือประกอบด้วยโรเตอร์เป็นรูปทรงกลม ซึ่งที่ผิวของโรเตอร์นี้จะเจาะเป็นร่องเพื่อป้องกันการไหลเลื่อนของยาง โดยโรเตอร์นี้จะอยู่ภายในห้องใส่ยาง ซึ่งเป็นช่องว่างรูปทรงกระบอกตัน ๆ และโรเตอร์จะหมุนโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า (รูปที่ 2.16) ส่วนชิ้นงานที่ทดสอบ ตัดเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5.5 เซนติเมตร แล้วเจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 25 กรัม ทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.16 โรเตอร์และช่องใส่ยางของเครื่อง Mooney viscosity [16]

การทดสอบทำได้โดยการตัดยางเป็นสองแผ่นให้มีขนาดพอเหมาะที่จะนำเข้าไปในห้องใส่ยาง ยางจะถูกอัดเข้าไปในช่องว่างด้วยความดันที่เหมาะสมภายใต้อุณหภูมิ  $100 \pm 0.5$  องศาเซลเซียส โดยให้ยางแผ่นหนึ่งวางบนโรเตอร์ อีกแผ่นวางไว้ข้างใต้ เมื่อโรเตอร์หมุนจะเกิดแรงเฉือนระหว่างผิว ส่วนแรงบิดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานต่อแรงเฉือนของยาง ซึ่งจะบอกถึงค่าความหนืดของยางในหน่วยของ MV (Mooney viscosity) โดยกำหนดให้แรงบิดขนาด  $8.30 \pm 0.02$  นิวตัน-เมตร เทียบเท่ากับ 100 MV เมื่อนำชิ้นงานเข้าไปแล้วจะทำให้ความร้อนกับสารประกอบยางเป็นเวลา 1 นาที ก่อนที่มอเตอร์จะเริ่มทำงาน สำหรับยางธรรมชาตินั้นการอ่านค่า MV จะอ่านหลังจากโรเตอร์หมุนไปประมาณ 4 นาที

ผลของการวัดความหนืดรายงานดังนี้ : 50 ML 1+ 4 (100 °C) หมายความว่า ยางนี้มีความหนืด 50 MV วัดที่ 100 องศาเซลเซียส โดยอุ่นยางเป็นเวลา 1 นาที และอ่านค่าความหนืดเมื่อมอเตอร์ทำงานไปแล้ว 4 นาที ส่วน L หมายถึง ขนาดของโรเตอร์ซึ่งเป็นจานโลหะขนาดใหญ่

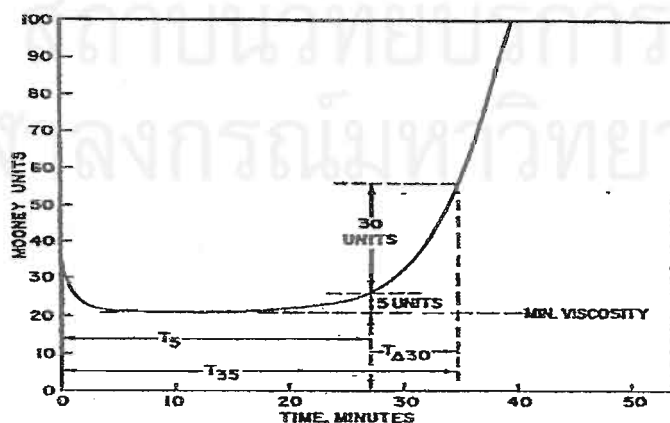
## 2.7.2 การวัดอัตราเริ่มการคงรูปของยางผสม [3,16]

ในทางปฏิบัติยางผสมอาจเกิดการคงรูปก่อนกำหนดขึ้นระหว่างการผสมและการแปรรูป โดยเฉพาะสารประกอบของยางธรรมชาติ จึงต้องเติมสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปเป็นสารสุดท้ายในการผสมสารต่าง ๆ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการคงรูปก่อนกำหนด นอกจากวัดค่าความหนืดของยางแล้วเครื่อง Mooney viscometer ยังสามารถวัดอัตราเริ่มการคงรูป (scorch time) ของยางผสมสารเคมีด้วย

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับยางที่ทำการผสมสารเคมีแล้ว สารเร่งปฏิกิริยาและสารกระตุ้นปฏิกิริยาการคงรูปจะเริ่มทำปฏิกิริยาซึ่งจะใช้ระยะเวลาหนึ่งอาจจะช้าหรือเร็วขึ้นกับอุณหภูมิและชนิดของสารเคมีที่ใช้ ในขณะเดียวกันเมื่อยางได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจะมีการอ่อนตัวลงอีกเล็กน้อย เมื่อผ่านระยะเวลาเริ่มต้นนี้ไปแล้วสารเคมีจะเริ่มทำปฏิกิริยากับยางเกิดพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของยางทำให้ยางเริ่มแข็งขึ้น เวลาที่ยางเริ่มแข็งตัวจนเห็นได้ชัดนี้เป็นเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปซึ่งยางจะไหลยากขึ้นเนื่องจากยางเริ่มคงรูปซึ่งปฏิกิริยาก็ยังดำเนินต่อไป ยางจะแข็งขึ้นตามลำดับจนปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์ สำหรับการทดสอบยางผสมจะใช้เครื่อง Mooney viscometer จะทำการทดสอบที่ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส

ลักษณะกราฟ Mooney scorch ที่ได้จากเครื่อง Mooney viscometer ดังรูปที่ 2.17 จะเห็นว่า ค่าความหนืดต่ำสุด (Mooney unit) และเวลาที่ได้จากค่าความหนืดต่ำสุดขึ้นไป 5 หน่วย เรียกว่า  $t_5$  ซึ่งกำหนดเป็นเวลาเริ่มการคงรูป (Mooney scorch time) และเวลาซึ่งได้จากค่าความหนืดต่ำสุดขึ้นไป 35 หน่วย เรียกว่า  $t_{35}$  และความชันของกราฟ คือ  $t_{35} - t_5 = t_{30}$  เรียกว่าดรรชนีการบ่ม (cure index) ซึ่งบอกถึงอัตราการเริ่มคงรูป (cure rate)

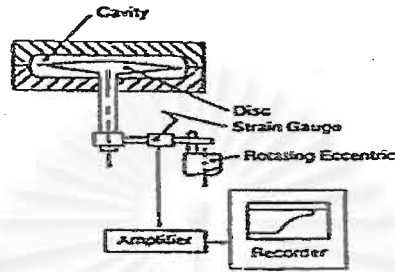
ถ้าดรรชนีการคงรูปมีค่าต่ำ (ความชันกราฟสูง) แสดงว่า ยางผสมเกิดการวัลคาไนซ์ได้เร็ว แต่ถ้าดรรชนีการคงรูปมีค่าสูง (ความชันกราฟน้อย) แสดงว่าการวัลคาไนซ์เกิดช้า



รูปที่ 2.17 กราฟอัตราเริ่มการคงรูปจากเครื่อง Mooney Viscometer [16]

การทดสอบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถกระทำต่อไปจนถึงขั้นที่ย่างเกิดการคงรูปเต็มที่ เนื่องจากความหนืดที่สูงมากขึ้นจนทำให้โรเตอร์ไม่สามารถหมุนต่อไปได้ จึงต้องหาเวลาที่ให้ทำให้ยางคงรูป โดยใช้เครื่อง curemeter ที่เรียกว่า "Monsanto Oscillating Disk Rheometer" (ODR)

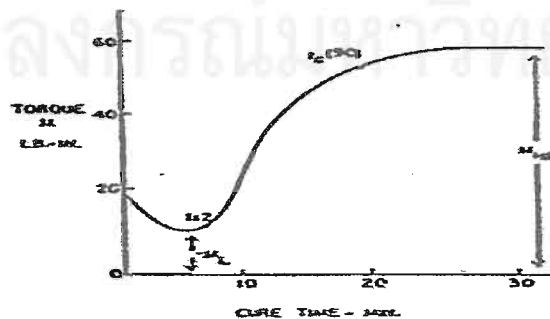
### 2.7.3 การทดสอบสมบัติการคงรูปโดย Monsanto Oscillating Disk Rheometer (ODR)



รูปที่ 2.18 Oscillating disk rheometer [34]

ODR เป็นเครื่องมือสำหรับหาเวลาในการคงรูปของยางผสม ประกอบด้วยโรเตอร์ที่เคลื่อนไหวในลักษณะแกว่งกลับไปกลับมา (oscillating disk) ตามองศาที่กำหนด ( $1^{\circ}$   $3^{\circ}$  หรือ  $5^{\circ}$ ) และใช้อุณหภูมิในการทดสอบ 140 – 160 องศาเซลเซียส ซึ่งเครื่องนี้จะวัดแรงที่ต้องใช้ (torque) ในการแกว่งโรเตอร์ที่จมอยู่ในตัวอย่างยาง โดยยางจะถูกวางไว้ในช่องที่ถูกอัดด้วยแรงอัดสูงและมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตามต้องการ การแกว่งของโรเตอร์นี้ไม่เป็นการทำลายตัวอย่างยางเหมือนเช่นการทดสอบยางด้วยเครื่อง Mooney viscometer

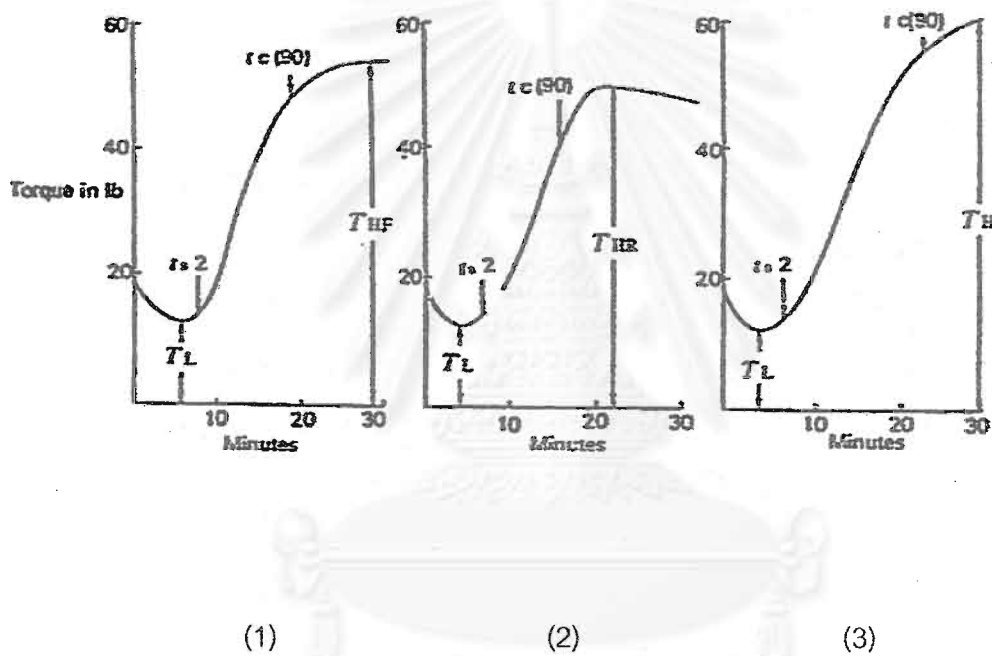
ขณะที่ปฏิกิริยาการคงรูปดำเนินไปนั้น แรงที่ต้องใช้จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และผลที่ได้จะถูกบันทึกลงเป็นกราฟ และจากกราฟแสดงให้เห็นถึงแรงต่ำสุด (minimum torque,  $M_L$ ) แรงสูงสุด (maximum torque,  $M_H$ ) เวลาที่ย่างเริ่มคงรูป (scorch time,  $t_{92}$ ) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป 90 % ( $t_{90}$ )



รูปที่ 2.19 ลักษณะกราฟที่ได้จากเครื่อง ODR [16]

ลักษณะของกราฟภายหลังการคงรูปเต็มที่แล้วมี 3 แบบ ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งขึ้นกับชนิดของยางผสม คือยางผสมบางชนิดภายหลังการคงรูปเต็มที่แล้ว จะมีลักษณะของ torque คงที่หรือสมดุลย์ ( $M_{HF}$ ) ส่วนยางธรรมชาติเมื่อผ่านการคงรูปเต็มที่แล้วจะมี torque ลดลงจากค่าสูงสุด (reversion) ซึ่งมีผลทำให้สมบัติของยางเสียไป ส่วนลักษณะการคงรูปอีกแบบหนึ่งเป็นแบบที่ torque เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (marching) คือ ไม่ถึงจุดสมดุลย์หรือไม่ถึงจุดสูงสุด

วิธีทดสอบ คือ ตัดยางเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร โดยใช้ torque 25 อุนทงมีประมาณ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 2.20 ลักษณะของกราฟการคงรูปแบบต่าง ๆ [16]

(1) ลักษณะการคงรูปคงที่ (2) ลักษณะการคงรูปที่ลดลง (3) ลักษณะการคงรูปที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

าลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.8 งานวิจัยในอดีต

พรพรรณ นิธิอุทัย [7] ทำการศึกษาการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ เพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยพบว่า จุดสูงสุดที่จะเติมยางธรรมชาติเข้าไปได้ มักอยู่ที่อัตราส่วนประมาณ 25-40% มิฉะนั้นสมบัติของยางหลักที่มีราคาแพงและสมบัติบางประการที่ดีกว่าจะลดลง กลายเป็นสมบัติของยางรองที่มีราคาถูกกว่าไป นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาถึงการผสมกันระหว่างยางพอลิคลอโรพรีน (CR) กับยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) พบว่า ปริมาณของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมจะต้องมีมากกว่า 60% มิฉะนั้น ยางผสมที่ได้จะไม่มีสมบัติที่คงทนต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซนและความสามารถในการทนน้ำมันได้เล็กน้อยเหมือนยางพอลิคลอโรพรีน

A.F. Younan, S.L. ABD-EL-MESSIEH, A.A. Gasser [22] ทำการศึกษาและหาค่าความสามารถในการยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่าน (Permittivity :  $\epsilon'$ ) และการสูญเสียทางต้านไฟฟ้า (Dielectric loss :  $\epsilon''$ ) สำหรับยางผสมที่มีอัตราส่วนของยางเอทิลีน-โพรพิลีน โมโนเมอร์ (EPDM) กับยางพอลิคลอโรพรีน (CR) ในช่วง 0-100 phr ภายใต้ช่วงความถี่ 400 Hz ถึง 60 kHz ที่อุณหภูมิห้อง (25°C) โดยพบว่าค่า permittivity และค่า dielectric loss จะลดลงเมื่อปริมาณ EPDM ในยางผสมเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงเรื่องของการใช้สารตัวเติมสีขาว เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ซิลิกา (silica) เป็นต้น ลงไป 40 phr ในยางผสม แล้วทำการทดสอบสมบัติทางด้านไฟฟ้าและสมบัติเชิงกล พบว่าการใช้ แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และซิลิกา (silica) ในยางผสมชนิดนี้จะช่วยปรับปรุงสมบัติ permittivity และ dielectric loss ได้ จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และซิลิกา (silica) ที่ใช้ พบว่า ที่ปริมาณ 20 phr จะให้ค่าสมบัติดังกล่าวดีที่สุด เช่นเดียวกับการใช้เขม่าดำที่ให้แนวโน้มเหมือนการใช้สารตัวเติมสีขาวทั้งด้านสมบัติและปริมาณที่ใช้

G. M. Bristow [30] ศึกษาผลของวิธีการผสมต่อสมบัติยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิบิวทาไดอีน (NR/BR) เป็น 75/25 ซึ่งพบว่า การผสมโดยวิธีต่าง ๆ (1) ใช้ยางธรรมชาติที่ไม่ได้ผ่านการบดให้นิ่ม และที่ผ่านการบดให้นิ่มในระดับค่าความหนืดมูนีโกล์เดียวกับ BR (2) ใช้ยางทั้งสองชนิดที่ผ่านการทำ pre-blending (3) ทำการผสมเขม่าดำระหว่างการผสมยางทั้งสองชนิด (ไม่มีการทำ pre-blending) โดยแปรเวลาการผสมยางก่อนที่จะเติมเขม่าดำ และ (4) บดผสมโดยเครื่องบดระบบปิดและเครื่องบด 2 ลูกกลิ้ง พบว่า วิธีการผสมที่ต่าง ๆ กันไม่มีผลต่อ cure behavior สมบัติของยางที่คงรูปแล้ว ได้แก่ resilience และ heat build up ของยางที่ผสมโดยตรง

ไม่ผ่านการบดให้นิ่ม ก่อนข้างดีกว่าการผสมโดยทำให้ยางนิ่ม หรือทำ preblend ก่อน ส่วนสมบัติอื่น ๆ ไม่แสดงความแตกต่างที่ชัดเจนเมื่อทำการบดผสมโดยวิธีต่างกัน

Krisna Kongsin and Michael V. Lewan [19] ทำการศึกษาการผสมกันระหว่างยางธรรมชาติและยางอะครีโลไนไตรล์ (NBR) โดยใช้ยางพอลิคลอโรพรีน (CR) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างคล้ายยางธรรมชาติ แต่มีความเป็นขั้ว (polar) มากกว่าเนื้อส่วนของคลอรีนในโมเลกุล เป็นตัวช่วยในการผสม พบว่า ยางพอลิคลอโรพรีนซึ่งมีค่าความสามารถในการละลาย (solubility parameter) อยู่ระหว่างยางทั้งสองที่จะทำการผสมกัน จะช่วยทำให้การผสมเข้ากันได้ดีขึ้น โดยปริมาณของยางพอลิคลอโรพรีนที่จะเติมลงไปแทนยางอะครีโลไนไตรล์แล้วทำให้ได้สมบัติทางด้านความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ดีที่สุด คือ 5 phr (NR/CR/NBR = 50/5/45) ซึ่งยังช่วยทำให้ขนาดเฟส (phase size) ของยางแต่ละตัวมีขนาดเล็กลง และช่วยทำให้การกระจายตัวของ การเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางผสมเกิดได้ดีขึ้นอีกด้วย

Leigh-Dugmore, Corish & Palmer and Bulgin Walker [40] พบว่ายางทุกชนิดจะมีสารตัวเติมที่เหมาะสมกับมันที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เขม่าดำ ซึ่งมีผลต่อสมบัติสำคัญหลายประการ เช่น ความต้านทานต่อแรงฉีกขาดและแรงดึง โดยยางต่างชนิดกันจะตอบสนองต่อชนิดและปริมาณของสารตัวเติมสำหรับสมบัติหนึ่งๆ ต่างกัน ดังนั้นจึงต้องควบคุมการกระจายตัวของสารตัวเติมในการผสมกับยาง การเติมเขม่าดำลงไปนยางผสมที่อัตราส่วน 50/50 จะพบว่า เขม่าดำจะสามารถเข้าไปกระจายตัวอยู่ในยางแต่ละชนิดได้ลดลงตามลำดับ คือ BR, SBR, CR, NBR, NR, EPDM และ IIR

Leszak Pyskio and Piotr Wilkonski [41] ศึกษาวิธี ที่จะช่วยลดค่าการใช้พลังงาน ระหว่างการบดผสมและระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์ พบว่า ทำได้โดยการใช้ Zinc salts ของกรดไขมันทั้งแบบอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว และการใช้สารประกอบของ aliphatic และ aromatic resin ที่เรียกว่า homogenizers ซึ่งสารดังกล่าวจะช่วยทำให้การผสมยางเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น ลดเวลาที่ใช้ในการบดผสม ทำให้ช่วยประหยัดการใช้พลังงานลงได้ โดยจากการทดลอง พบว่า สามารถช่วยประหยัดพลังงานได้สูงสุดถึง 15% นอกจากนี้ สารดังกล่าวยังช่วยในเรื่องการกระจายตัวของเขม่าดำในยางผสมให้ทั่วถึงได้อีกด้วย

Md Aris bin Ahmad [36] ทำการศึกษาการผสมกันระหว่างยางธรรมชาติกับยางไนไตรล์ โดยใช้สารเชื่อมการผสมยาง (homogenizing agent) คือ Struktol 60NS พบว่า ที่อัตราส่วนการผสมยางต่างๆ ปริมาณสารเชื่อมโมเลกุลยางที่ใช้เพียงแค่ 5 phr ก็พอ เพราะการใช้นี้จะ ไม่ส่งผลดีแต่อย่างใดในด้านต่างๆของการผสมยาง

Michael V. Lewan [40] พบว่าสำหรับยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติ high polarity เช่น NBR, CR จะผสมกับยางอื่น ๆ ได้ในสัดส่วนจำกัด แต่ก็ยังมีการผสม NR เพื่อปรับปรุงสมบัติด้าน building tack และยังทำให้ประหยัด ได้สมบัติของยางผสมที่มีความทนพอประมาณต่อการบวม เมื่อสัมผัสกับสารตัวทำละลาย หรือ น้ำมัน และทนโอโซนได้พอประมาณ

PE. Mallon [39] ทำการศึกษาทางพอลิคลอโรฟีนกับการทำให้เกิดปฏิกิริยาการคงรูปโดยใช้ ZnO และ MgO ด้วยเครื่อง DSC ซึ่งพบว่าปฏิกิริยาจะสิ้นสุดลงและสามารถอ่านค่าการเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลให้คงรูปของยางดังกล่าวได้ และปริมาณของคลอรินที่ ออกมาจะอยู่ในรูปของ  $ZnCl_2$  และ  $MgCl_2$  ที่เป็นเช่นนี้สามารถสรุปได้ว่า ZnO จะเป็นตัวช่วยในการจัดตัวในการเกิดการเชื่อมโยงของยาง ส่วน MgO จะเป็นตัวที่ช่วยเพิ่มเวลาที่ยางใช้ในการเริ่มต้นการคงรูป (scorch time) โดยการจับกับ HCl ที่ปล่อยออกมาในระหว่างการบดผสมกับสารเคมี

R.F. Grossman [42] ทำการศึกษาการผสมกันระหว่างยางพอลิคลอโรฟีน กับยางสไตรีนบิวทาไดอีน พบว่าจะให้แนวโน้มของการผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันสูงในทุกอัตราส่วนของการผสม โดยใช้ระบบการทำให้ยางคงรูปด้วยซิลเฟอร์ และใช้ TMTM เป็นสารเร่งการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป ซึ่งยางทั้งสองชนิดจะเกิดการวัลคาไนซ์ไปพร้อมๆ กัน

Spenadel and Sutphin [40] ทำการศึกษาการผสมกันระหว่างยางพอลิคลอโรฟีน (CR) และยางเอธิลีน-โพรพิลีน โมโนเมอร์ (EPDM) พบว่า จะให้ยางผสมที่มีสมบัติที่ดีในการทนต่อการสัมผัสกับโอโซนและสารเคมีต่างๆ และยังมีค่าการยุบตัว (compression set) ที่ลดต่ำลงจากเดิมด้วย



Sumanda Bandyopardhyay [45] ทำการศึกษาทางด้านสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางพอลิคลอโรพรีนกับยางธรรมชาติที่ผ่านการทำ epoxidized (ENR) ด้วยเครื่อง Dynamic mechanical thermal analysis (DMA) พบว่า การผสมกันระหว่างยางพอลิคลอโรพรีนในปริมาณสูงกับ ENR จะให้ลักษณะการผสมเป็นแบบ microheterogeneous ซึ่งเชื่อว่าจะเกิดจากการเกิด furanization ในส่วนของ ENR เนื่องจากการเกิด HCl จาก CR ในระหว่างการอัดยางที่อุณหภูมิสูง และพบว่า การเติมเขม่าดำชนิด HAF black ลงไปในยางผสมดังกล่าว จะช่วยเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา furanization และเพิ่มอัตราการเกิดการผสมที่เป็นแบบ microheterogeneous ของยางผสมได้ นอกจากนี้ยังพบว่า ในการผสมกันของยางพอลิคลอโรพรีนกับ ENR ที่อัตราส่วน 70/30 เมื่อทำการเติมสารตัวเติมชนิดต่างๆ ลงไป เช่น เขม่าดำ จะทำให้เกิดการแยก phase ของยางได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 ยางและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 ยางธรรมชาติ STR 5L (บริษัท ไทยปักษ์ใต้ จำกัด)

ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางธรรมชาติ (ตามวิธีทดสอบยางแห่ง เอส ที อาร์ [15])

สมบัติ	ผลการทดสอบ
ปริมาณผง (%)	0.016
ปริมาณเถ้า (%)	0.320
ปริมาณสิ่งระเหย (%)	0.540
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.570
ค่าดัชนีความอ่อนตัวของยาง	87.2
ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรก (Po)	35.0
สียางเทียบโดยไลวบอนด์	3.80
ความหนืด (Mooney unit)	63.96

##### 3.1.2 ยางพอลิคลอโรพรีน type W (บริษัทเคมีคัล อินโนเวชั่น จำกัด)

ตารางที่ 3.2 สมบัติยางพอลิคลอโรพรีน [27]

สมบัติ	ผลการทดสอบ
ส่วนประกอบ สีและลักษณะ	พอลิคลอโรพรีนที่ไม่มีส่วนของซัลเฟอร์ แผ่นหรือก้อนสีขาวครีม
สิ่งเจือปน	-
ปริมาณสิ่งระเหย (%)	1.3 , max.
ความหนืด (Mooney unit)	42-51
ความถ่วงจำเพาะ	1.24
อัตราการตกผลึก	ต่ำมาก

### 3.1.3 สารเชื่อมการผสมยาง : Homogenizing agents (บริษัท ซิลแอนด์เซลลาเซอร์ จำกัด)

ตารางที่ 3.3 สมบัติของสารเชื่อมการผสมยางชนิด Struktol 60NS (Homogenizing agents datasheet) [4]

สมบัติ	ผลการทดสอบ
ส่วนประกอบ	อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนเรซินสีอ่อน
ความถ่วงจำเพาะ	0.95
ปริมาณน้ำ (%)	-
Softening point (°C)	50
ความสามารถในการละลาย	good solubility in aromatic and chlorinated hydrocarbons

- 3.1.4 เขม่าดำชนิด N330, N550, N660 (Thai carbon black Co.,Ltd.)
- 3.1.5 แคลเซียมคาร์บอเนต (F.K. Thai Co.,Ltd.)
- 3.1.6 Stearic acid ( Imperial Co.,Ltd)
- 3.1.7 6PPD : N-phenyl-N'- 1,3 – dimethylbutyl-p-phenylenediamine (Flexsys Co.,Ltd.)
- 3.1.8 Wax ozone (Flexsys Co.,Ltd.)
- 3.1.9 Hiko tack (Flexsys Co.,Ltd.)
- 3.1.10 Paraffinic oil ( Gurny Mooning peter chemical Co.,Ltd)
- 3.1.11 Napthenic oil ( Gurny Mooning peter chemical Co.,Ltd)
- 3.1.12 Magnesium oxide (Goodyear Co.,Ltd.)
- 3.1.13 Zinc oxide ชนิด White seal (Univertures public Co.,Ltd)
- 3.1.14 ETU : ethylenethiourea (Chemical Innovation Co.,Ltd.)
- 3.1.15 MBTS : Dibenzthiazyl disulphide (Flexsys Co.,Ltd)
- 3.1.16 TMTD : Tetrathythiuram disulphide (Flexsys Co.,Ltd)
- 3.1.17 กำมะถัน (Loxley Public Co.,Ltd)

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องบดผสมแบบเปิด ชนิด 2 ลูกกิ้ง (two roll mill) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง x ความยาวลูกกิ้งเป็น  $8 \times 20$  นิ้ว

3.2.2 เครื่องอัดยางคงรูป (Hydraulic Press) ขนาดแท่นอัด  $20 \times 20$  นิ้ว แรงอัด 70 ตัน คือแรงอัดประมาณ 0.175 ตันต่อตารางนิ้ว

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- 3.3.1 เครื่องทดสอบหาความหนืดของยาง (Mooney viscometer) บริษัท Tech Pro.Inc
- 3.3.2 เครื่องทดสอบหาเวลาและลักษณะการคงรูปของยางผสม (Rheometer ชนิด moving die type) ของ บริษัท Monsanto : Model MDR 2000
- 3.3.3 เครื่องทดสอบแรงดึงของยาง (Tensile tester) บริษัท Instron calibration laboratory
- 3.3.4 เครื่องทดสอบการยุบและการคืนตัวของยาง
- 3.3.5 เครื่องทดสอบความแข็งของยาง บริษัท Shore Instrument and MFG.Co : Model 716 Durometer Hardness system
- 3.3.6 เครื่องหาค่าความถ่วงจำเพาะและน้ำหนักของยาง
- 3.3.7 เครื่องทดสอบความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับโอโซน
- 3.3.8 เครื่องทดสอบหาค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า (Antistatic)
- 3.3.9 Scanning Electron Microscope (SEM)
- 3.3.10 Dynamic Mechanical Thermal Analyzer (DMA)

### 3.4 ขั้นตอนการทำงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

- 3.4.1 การหาสูตรควบคุมการบดผสมยาง แบ่งเป็น
- การหาสูตรควบคุมสำหรับสูตรยางธรรมชาติ (Control NR)
  - การหาสูตรควบคุมสำหรับสูตรยางพอลิคลอโรพรีน (Control CR)
  - การหาสูตรควบคุมสำหรับสูตรยางธรรมชาติผสมยางพอลิคลอโรพรีน (Control blend NR/CR)
- 3.4.2 การศึกษาการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสม และผลจากการใช้สารเชื่อมการผสมยาง (Homogenize) โดยในการวิจัย เลือกลงใช้สูตรผสมสารเคมีที่ได้จากการหาสูตรควบคุมสำหรับการผสมยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน ในการทดลอง ส่วนที่ 1

### 3.4.3 การปรับสูตรยางให้มีสมบัติต่างๆ ผ่านมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด

ทำการทดลองโดยเลือกอัตราส่วนการผสมยางระหว่างยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนที่มีการเติมยางธรรมชาติเข้าไปในยางผสมในอัตราส่วนที่มากที่สุด แต่ยังคงสมบัติที่สำคัญของยางกันฝุ่นไว้ได้ เช่น ความสามารถในการทนต่อการบวมตัวเนื่องจากน้ำมันหรือจาระบี (Fluid resistance) และ ความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับโอโซน (Ozone resistance) ซึ่งอัตราส่วนที่มีสมบัติดังกล่าว ได้ทำการคัดเลือกจากการทดลองส่วนที่ 2 จากนั้นทำการปรับสูตรเพื่อให้ได้สมบัติต่างๆ ที่เหมาะสมและผ่านมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด

## 3.5 สูตรยางผสมที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับสูตรยางผสมเป็น phr (part per hundred of rubber) ที่ใช้ในการวิจัยแบ่งออกตามการทดลองได้เป็น 3 ส่วน คือ

### 3.5.1 สูตรยางที่ใช้ในการหาสูตรควบคุม

- สูตรควบคุมยางพอลิคลอโรพรีน (Control CR) ดังตารางที่ 3.4
- สูตรควบคุมยางธรรมชาติ (Control NR) ดังตารางที่ 3.5
- สูตรควบคุมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (Control blend NR/CR) ดังตารางที่ 3.6

3.5.2 สูตรยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง ดังตารางที่ 3.8 และเติมสารเชื่อมการผสมยาง ดังตารางที่ 3.9

3.5.3 สูตรยางที่คัดเลือกจากการทดลองตอนที่ 2 เพื่อใช้ในการผลิตยางกันฝุ่นให้ได้สมบัติตามมาตรฐานตามที่กำหนด โดยศึกษาในเรื่องของ

- การปรับเปลี่ยนชนิดเคมีดำ ดังตารางที่ 3.10
- การปรับเปลี่ยนปริมาณเคมีดำและระบบการวัลคาไนซ์สำหรับยางผสม ในส่วนที่ไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง ดังแสดงในตารางที่ 3.12 และในส่วนที่มีการเติมสารเชื่อมการผสมยาง ดังแสดงในตารางที่ 3.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 สูตรยางที่ใช้ในการหาสูตรควบคุมของยางพอลิคลอโรพรีน (Control CR)

สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)						
	สูตร 1	สูตร 2	สูตร 3	สูตร 4	สูตร 5	สูตร 6	สูตร 7
CR	100	100	-	-	-	-	-
N330	30	30	-	-	-	-	-
M/B (CR:N330)	-	-	130	130	130	130	130
Stearic acid	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Hiko tack	-	1	1	3	3	3	3
6PPD	2	-	-	2	2	2	2
Wax Ozone	-	3	3	1	1	1	1
Paraffinic Oil	2	-	-	-	-	-	-
MgO	4	4	4	4	4	4	4
ZnO	5	5	5	5	5	5	5
ETU	1	1	1	1	1	1.5	1
MBTS	-	1	1	-	1	-	1
TMTD	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
S	-	-	-	-	0.5	-	-
$\Sigma$	143.8	146.0	142.8	146.5	147.5	147.0	146.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 สูตรยางที่ใช้ในการหาสูตรควบคุมของยางธรรมชาติ (Control NR)

สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)		
	สูตร 8	สูตร 9	สูตร 10
NR	70	70	70
M/B (NR:N330)	60	60	60
Stearic acid	2	2	2
Hiko tack	-	-	3
6PPD	2	2	2
Paraffinic Oil	2	2	2
MgO	-	-	-
ZnO	5	5	5
MBTS	1	1	1
TMTD	0.4	0.4	0.3
ETU	-	-	-
S	1.5	1.5	1.5
$\Sigma$	143.9	143.8	146.8

หมายเหตุ M/B หมายถึง Masterbatch ซึ่งในที่นี้เตรียมได้จากการผสมยางเข้ากับเคมี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 สูตรยางที่ใช้ในการหาสูตรควบคุมยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ  
กับยางพอลิคลอโรพรีน (Control blend NR/CR)

สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)			
	สูตร 11	สูตร 12	สูตร 13	สูตร 14
NR	-	-	-	-
CR	70	70	70	70
M/B (NR:N330)	60	60	60	60
Stearic acid	1.5	1.5	1.5	1.5
Hiko tack	-	3	3	3
Wax ozone	1	1	1	1
6PPD	2	2	2	2
Paraffinic Oil	2	2	2	3
MgO	4	4	4	4
ZnO	5	5	5	5
MBTS	0.8	0.8	1	1
TMTD	0.2	0.2	0.2	0.2
ETU	1	0.7	0.5	0.7
S	1.2	1.2	1.2	1.2
$\Sigma$	148.7	151.4	151.4	152.6



ตารางที่ 3.7 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง สำหรับสูตรที่ 14-35

ชนิดสารเคมี	ปริมาณ (phr)
Stearic acid	1.5
Hiko tack	3
Wax ozone	1
6PPD	2
Paraffinic Oil	3
MgO	4
ZnO	5
MBTS	0.7
TMTD	1
ETU	0.2
S	1.2

ตารางที่ 3.8 สูตรยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนไม่เติม Homogenize (Struktol 60NS) เพื่อศึกษาถึงผลจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนยางในยางผสม

สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)			
	สูตร 14	สูตร 15	สูตร 16	สูตร 17
ยางธรรมชาติ	-	60	50	40
ยางพอลิคลอโรพรีน	70	10	20	30
เขม่าดำชนิด N330	-	-	-	-
M/B (NR:N330)	60	60	60	60
สารเคมีตามตารางที่ 3.7				

ตารางที่ 3.8 สูตรยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนไม่เติม Homogenize (Struktol 60NS) เพื่อศึกษาถึงผลจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนยางในยางผสม (ต่อ)

สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)				
	สูตร 18	สูตร 19	สูตร 20	สูตร 21	สูตร 22
ยางธรรมชาติ	30	20	10	20	10
ยางพอลิคลอโรพรีน	40	50	60	80	90
เขม่าดำชนิด N330	-	-	-	30	30
M/B (NR:N330)	60	60	60	-	-
สารเคมีตามตารางที่ 3.7					

ตารางที่ 3.9 สูตรยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนเติม Homogenize (Struktol 60NS) เพื่อศึกษาถึงผลจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนยางในยางผสม

สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)			
	สูตร 23	สูตร 24	สูตร 25	สูตร 26
ยางธรรมชาติ	60	50	40	30
ยางพอลิคลอโรพรีน	10	20	30	40
Struktol 60NS	5	5	5	5
เขม่าดำชนิด N330	-	-	-	-
M/B (NR:N330)	60	60	60	60
สารเคมีตามตารางที่ 3.7				

ตารางที่ 3.9 สูตรยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนเต็ม Homogenize (Struktol 60NS) เพื่อศึกษาถึงผลจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนยางในยางผสม (ต่อ)

สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)				
	สูตร 27	สูตร 28	สูตร 29	สูตร 30	สูตร 31
ยางธรรมชาติ	20	10	-	20	10
ยางพอลิคลอโรพรีน	50	60	70	80	90
Struktol 60NS	5	5	5	5	5
เขม่าดำชนิด N330	-	-	-	30	30
M/B (NR:N330)	60	60	60	-	-
สารเคมีตามตารางที่ 3.7					

ตารางที่ 3.10 สูตรยางที่ใช้ในการผลิตยางกันฝุ่นให้มีสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด โดยศึกษาในเรื่องของการปรับเปลี่ยนชนิดของเขม่าดำที่ใช้

สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)			
	สูตร 32	สูตร 33	สูตร 34	สูตร 35
ยางธรรมชาติ	10	10	10	10
ยางพอลิคลอโรพรีน	60	60	60	60
Struktol 60NS	5	5	5	5
เขม่าดำชนิด N330	-	-	-	-
เขม่าดำชนิด N550	-	10	-	-
เขม่าดำชนิด N660	-	-	15	15
M/B (NR:N330)	60	-	-	-
M/B (NR:N550)	-	60	-	30
M/B (NR:N660)	-	-	60	30
สารเคมีตามตารางที่ 3.7				

ตารางที่ 3.11 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง สำหรับสูตรที่ 36-42

ชนิดสารเคมี	ปริมาณ (phr)
Stearic acid	1.5
Hiko tack	3
Wax ozone	1
6PPD	2
MgO	4
ZnO	5

ตารางที่ 3.12 สูตรยางที่ใช้ในการผลิตยางกันฝุ่นให้มีสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด (ไม่เติม Homogenize) โดยศึกษาในเรื่องของการปรับเปลี่ยนปริมาณของเขม่าดำที่เลือกและระบบวัลคาไนซ์

สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)			
	สูตร 36	สูตร 37	สูตร 38	สูตร 39
NR	-	-	-	-
CR	70	70	70	70
ST 60NS	-	-	-	-
M/B (NR:N660)	60	60	60	60
N660	15	20	20	10
CaCO <sub>3</sub>	-	-	-	20
Paraffinic oil	3	-	-	-
Napthenic oil	-	3	3	3
MBTS	1	1	1	1
TMTD	0.2	0.2	0.4	0.4
ETU	0.7	0.7	0.7	0.7
S	1.2	1.2	0.8	0.8

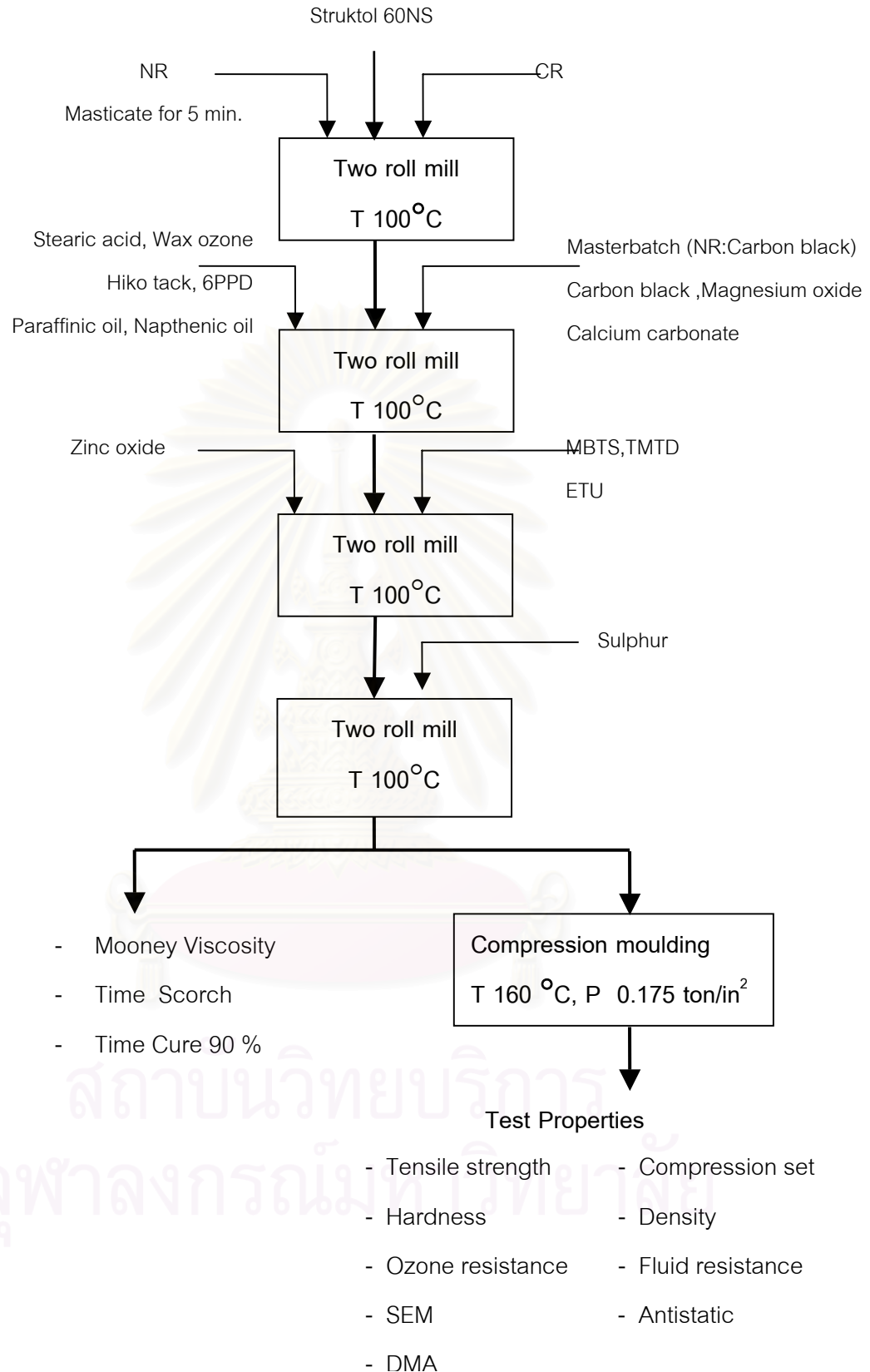
ตารางที่ 3.13 สูตรยางที่ใช้ในการผลิตยางกันฝุ่นให้มีสมบัติตามมาตรฐานที่กำหนด (เติม Homogenize) โดยศึกษาในเรื่องของการปรับเปลี่ยนปริมาณของเขม่าดำที่เลือกและระบบวัลคาไนซ์

สาร	ปริมาณที่ใช้ (phr)		
	สูตร 40	สูตร 41	สูตร 42
NR	10	10	10
CR	60	60	60
ST 60NS	5	5	5
M/B (NR:N660)	60	60	60
N660	20	20	10
CaCO <sub>3</sub>	-	-	20
Paraffinic oil	-	-	-
Napthenic oil	3	3	3
MBTS	1	1	1
TMTD	0.2	0.4	0.4
ETU	0.7	0.7	0.7
S	1.2	0.8	0.8

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.6 ขั้นตอนการบดผสมยาง

1. ชั่งน้ำหนักของสารต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.4 ถึงตารางที่ 3.13
2. บดยางธรรมชาติในเครื่องบดผสมแบบเปิด ชนิดสองลูกกลิ้งก่อนเป็นเวลา 5 นาที อุณหภูมิเริ่มต้น 70 องศาเซลเซียส เพื่อปรับค่าความหนืดของยางธรรมชาติให้ใกล้เคียงกับยางพอลิคลอโรพรีน
  - ความหนืดของยางธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 63.96
  - ความหนืดของยางพอลิคลอโรพรีน มีค่าเท่ากับ 53.49
  - ความหนืดของยางธรรมชาติหลังผ่านการบดเป็นเวลา 5 นาที (Mastication) มีค่าเท่ากับ 52.48
3. สำหรับสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 22 และสูตรที่ 36 ถึงสูตรที่ 39 ทำการบดผสมยางพอลิคลอโรพรีนให้เข้ากับยางธรรมชาติ ประมาณ 3 นาที สำหรับสูตรที่ 23 ถึงสูตรที่ 35 และสูตรที่ 40 ถึงสูตรที่ 42 ที่มีการเติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenize) ซึ่งในที่นี้ คือ Struktol 60NS ให้เติมสารดังกล่าวลงไปในระหว่างการบดผสมยางทั้งสองชนิด เพื่อให้การบดผสมยางเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น
4. เติมมาสเตอร์แบต (Masterbatch) ที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติและเขม่าดำลงไปทำการบดผสมกับยางผสมข้างต้นเป็นเวลา 2 นาที
5. เติม Stearic acid และ Wax ozone ลงไปบดผสมกับยางผสมเป็นเวลา 2 นาที
6. เติมผงเขม่าดำ แล้วตามด้วย Magnesium oxide, Hiko tack และ 6PPD ลงไปอย่างละครั้ง บดผสมกันเป็นเวลา 3 นาที การที่เติมเขม่าดำลงไปทีละครั้งเพื่อให้เขม่าดำบดผสมเข้ากับยางได้ง่ายขึ้น เนื่องจากเขม่าดำมีอนุภาคเล็กมากยากต่อการบดผสม
7. เติมผงเขม่าดำ, Magnesium oxide, Hiko tack และ 6PPD ที่เหลือ แล้วเติมน้ำมันพาราฟินิกสำหรับสูตรที่ 1 ถึงสูตรที่ 36 และน้ำมันแนฟทีนิกสำหรับสูตรที่ 37 ถึงสูตรที่ 42 ลงไป บดผสมต่อเป็นเวลา 2 นาที ทำการกวาดสารที่อยู่ในถาดรองสารเคมีที่เครื่องบดลงไปทำการบดผสมให้เข้ากันให้หมด เนื่องจากเขม่าดำมีขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการฟุ้งกระจาย
8. สำหรับสูตรที่ 39 และสูตรที่ 42 ที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปด้วย ให้ทำการบดผสมหลังจากเติมเขม่าดำ แล้วจึงทำตามขั้นตอนที่ 6 และ 7 ตามลำดับ
9. เติมสารตัวเร่ง ในที่นี้คือ MBTS, TMTD และ ETU ลงไปทำการบดผสมประมาณ 2 นาที
10. เติม Zinc oxide ลงไปทำการบดผสมต่อเป็นเวลาประมาณ 2 นาที แล้วจึงเติมกำมะถันลงไปบดผสมกับยาง 3-4 นาที เมื่อกำมะถันผสมเข้ากันกับยางผสมแล้ววัดอุณหภูมิยางทันทีที่นำออกจากลูกกลิ้ง และวัดอุณหภูมิของลูกกลิ้งทั้งสองด้วย เพื่อไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไป แล้วทำการชั่งน้ำหนักของยางที่บดผสมได้ เพื่อนำน้ำหนักที่หายไปค่าที่ถูกต้องไม่ควรเกิน 2 %



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการทำงานวิจัย

### 3.7 การทดสอบการแปรรูปและการคงรูป

ในการทดสอบความหนืด, เวลาที่ย่างเริ่มคงรูป และเวลาที่ใช้ในการคงรูป จะใช้ขึ้นทดสอบที่ได้หลังจากการบดผสมแล้วทิ้งไว้ 1 คืน

**3.7.1 ความหนืด** โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer ซึ่งทดสอบตาม ISO 289 – 1963 determination of viscosity of Natural and synthetic rubber by the shearing disc viscometer ซึ่งต้องให้ขึ้นทดสอบที่เป็นรูปวงกลม 2 ชั้น เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 44.5 มิลลิเมตร หนาประมาณ 5 มิลลิเมตร จะมีน้ำหนักประมาณ 20 กรัม นำยางประกบด้านบนและล่างของโรเตอร์ วางในช่องใส่ยางแล้วเดินเครื่องโดยจะทำการอุ่นเครื่องเป็นเวลา 1 นาที และ โรเตอร์จะหมุนวัดความหนืดเป็นเวลา 4 นาที ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

**3.7.2 เวลาที่ย่างเริ่มคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูป** โดยเครื่อง Rheometer ซึ่งทดสอบตาม ISO 3417-1977 (E) Rubber measurement of vulcanization characteristic with the oscillating disc curemeter ต้องให้ขึ้นทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส กว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 1.5 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ทดสอบที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

**3.7.3 การเตรียมขึ้นทดสอบ** สำหรับการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งใช้เวลาในการคงรูปที่วัดได้จากเครื่อง Rheometer ในงานวิจัยนี้มีการขึ้นรูป 3 แบบ ตามลักษณะของขึ้นทดสอบ คือ

ก. สี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 16 เซนติเมตร หนา 4 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น สำหรับทดสอบความต้านทานแรงดึงทั้งก่อนและหลังอบ ความสามารถในทนต่อการบวมตัวเนื่องจากน้ำมันหรือจาระบี และสมบัติในด้านการต้านทานนำไฟฟ้า (Antistatic) ใช้  $t_{C90}$  เป็นเวลาในการคงรูป

ข. สี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 16 เซนติเมตร หนา 4 มิลลิเมตร จำนวน 3 แผ่น สำหรับทดสอบความต้านทานต่อการสัมผัสกับไอโซน ใช้  $t_{C90}$  เป็นเวลาในการคงรูป

ค. ทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร หนา 1.4 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้น สำหรับการทดสอบการยุบตัว ใช้เวลาสองเท่าของ  $t_{C90}$  เป็นเวลาในการคงรูป

สังเกตได้ว่าเวลาที่ใช้ในการคงรูปของขึ้นทดสอบแต่ละชนิดใช้ไม่เท่ากันเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการคงรูปนั้นขึ้นกับความหนาของขึ้นทดสอบ คือ ขึ้นทดสอบที่ไม่หนามากมักจะใช้  $t_{C90}$  เป็นเวลาในการคงรูป ส่วนชิ้นงานที่มีความหนามากจะใช้เวลาเป็นสองเท่าของ  $t_{C90}$  เป็นเวลาในการคงรูป

นำยางที่คงรูปแล้วมาตัดให้เป็นรูปร่างตามมาตรฐานการทดสอบ แบบต่าง ๆ เพื่อทดสอบในขั้นตอนต่อไป โดยใช้เครื่องตัดตัวอย่างแบบใช้กำลังลม (compress air sample cutter)



### 3.8 การทดสอบสมบัติของยางผสมที่ผ่านการคงรูป

**3.8.1 ความต้านทานแรงดึง** ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 37 โดยเครื่อง Instron calibration laboratory และมีเลเซอร์เป็นเครื่องคอยจับระยะของการยืดของยาง load cell ที่ใช้มีขนาด 500 นิวตัน ความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที เมื่อถูกดึงจนขาด ข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อเข้ากับเครื่องทดสอบ

**3.8.2 การยุบตัว** ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM 395-89 โดยเครื่อง Compression set Tester MILANO/ITALIA ในงานวิจัยนี้ นำชิ้นทดสอบมาคดให้ได้ความหนาลดลง 25 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 9.5 มิลลิเมตรแล้วนำไปป้อนแรงด้วยความร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วนำออกมาตั้งทิ้งไว้ประมาณครึ่งชั่วโมงจึงนำมาวัดความหนาที่ลดลง แล้วนำมาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของชิ้นทดสอบ ค่าการยุบตัวน้อยแสดงว่ามีการคืนตัวที่ดี ค่าการยุบตัวมากแสดงว่ามีการคืนตัวไม่ดี

เปอร์เซ็นต์การยุบตัวสามารถคำนวณได้ตามสูตร

$$\text{การยุบตัว} = \frac{(\text{ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ} - \text{ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ}) \times 100}{(\text{ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ} - \text{ความหนาของแท่งเหล็ก})}$$

**3.8.3 ความแข็ง** ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2240 โดยเครื่อง Lever Loader Model 917 สำหรับยางที่ใช้ในการวิจัยนี้ใช้น้ำหนักถ่วง 1 กิโลกรัม และใช้ shore A เป็นหัววัดที่ใช้ในการทดสอบ ก่อนทำการทดสอบต้องทำการตรวจสอบการอ่านค่าความแข็งจากยางมาตรฐานที่ใช้กับ shore A ก่อน โดยมียางมาตรฐานดังนี้

A ความแข็ง 33.1	E ความแข็ง 71.8
B ความแข็ง 41.9	F ความแข็ง 80.5
C ความแข็ง 55.7	G ความแข็ง 90.1
D ความแข็ง 63.2	

การทดสอบกับยางมาตรฐานทำได้โดย ปรับระยะห่างระหว่างหัวกับฐานรองรับชิ้นทดสอบให้ได้ประมาณ 5 มิลลิเมตร วางตุ้มน้ำหนักถ่วงขนาด 1 กิโลกรัม บนแกนรองรับของหัววัด แล้วทำการทดสอบเครื่องด้วยยางมาตรฐานเป็นเวลา 1 วินาที เมื่อทดสอบกับยางมาตรฐานได้แล้วจึงนำชิ้นทดสอบมาทำการทดสอบเป็นเวลา 15 วินาที

สำหรับยางอ่อนจะใช้ shore A หรือ shore B และใช้ตุ้มน้ำหนักถ่วง 1 กิโลกรัม ส่วนยางแข็งจะใช้ shore C หรือ Shore D และใช้ตุ้มน้ำหนักถ่วง 5 กิโลกรัม

**3.8.4 การอบบ่มเร่งด้วยความร้อน** ทดสอบตาม ASTM D 573 โดยเครื่อง Ueshima ซึ่งทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติก่อนและหลังอบด้วยความร้อนสำหรับสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงและความแข็ง โดยนำชิ้นงานที่จะทดสอบเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นอย่างน้อยครึ่งชั่วโมงในอุณหภูมิที่จะทดสอบ แล้วนำไปทดสอบสมบัติที่ต้องการ

ตัวกลางที่ให้ความร้อนภายในตู้อบจะเป็นอากาศร้อนซึ่งหมุนเวียนอยู่ภายใน การให้ความร้อนต้องสม่ำเสมอทั่วถึง การวางชิ้นงานในตู้อบ ไม่สามารถวางชิ้นงานบนพื้นของตู้อบได้ เนื่องจากความร้อนที่ชิ้นงานได้รับนั้นจะไม่เท่ากันทั่วทั้งชิ้นงาน โดยชิ้นทดสอบจะถูกแขวนในแนวตั้ง โดยไม่สัมผัสกับตู้อบหรือสัมผัสกันเองเลย

**3.8.5 ความต้านทานต่อการสัมผัสเนื่องจากไอโซน** ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1149 โดยเครื่อง Test Chamber ซึ่งสามารถผลิตไอโซนขึ้นภายในได้ ในการทดสอบจะนำชิ้นงานที่ผ่านการยืดออก 20% ใน Test Chamber ที่มีความเข้มข้นของไอโซน 50 pphm ภายใต้สภาวะ static ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

**3.8.6 ความต้านทานต่อการบวมตัวเนื่องจากน้ำมันหรือจาระบี** ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 471 ในที่นี้ทำการศึกษาในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างในแง่ของปริมาตร คือการบวมตัว (Volume swelling) ของชิ้นงานหลังผ่านการสัมผัสหรือแช่ในน้ำมันหรือจาระบีที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 70 ชั่วโมง

เปอร์เซ็นต์การบวมตัว (% Volume swelling) สามารถคำนวณได้ตามสูตร

$$\% \text{Volume swelling} = \left[ \frac{(m_3 - m_4) - (m_1 - m_2)}{(m_1 - m_2)} \right] \times 100$$

โดย  $m_1$  = น้ำหนักของชิ้นงานในอากาศก่อนทดสอบ

$m_2$  = น้ำหนักของชิ้นงานในน้ำก่อนทดสอบ

$m_3$  = น้ำหนักของชิ้นงานในอากาศหลังทดสอบ

$m_4$  = น้ำหนักของชิ้นงานในน้ำหลังทดสอบ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนสำหรับการผลิตยางกันฝุ่น โดยศึกษาถึงผลของสัดส่วนของยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน และผลของสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agents) ซึ่งสมบัติที่ทดสอบมีทั้งสมบัติของยางก่อนการคงรูป (unvulcanized compounds) ได้แก่ ความหนืด (mooney viscosity) เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป ( $t_{s2}$ ) เวลาที่ใช้ในการคงรูป ( $t_{c90}$ ) และสมบัติของยางหลังการคงรูป (vulcanized compounds) ทั้งก่อนและหลังอบ (heat aging) ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ความต้านทานแรงดึง (tensile strength) ความยืดเมื่อขาด (%elongation at break) โมดูลัส (modulus) การยุบตัว (compression set) ความแข็ง (hardness) ความต้านทานต่อโอโซน (ozone resistance) การบวมตัวและเปลี่ยนแปลงปริมาตรเนื่องจากน้ำมัน (%volume swelling) ความต้านทานไฟฟ้าสถิตย์ (antistatic) สมบัติเชิงกล (dynamic mechanical thermal analysis) และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา (morphology) ของยางผสมด้วยภาพถ่ายจากเครื่อง scanning electron microscopy (SEM)

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้คือ

#### ตอนที่ 1 การหาสูตรควบคุมการบดผสมยาง

- Mooney Viscosity ของยางธรรมชาติมีค่าเท่ากับ 63.96
- Mooney Viscosity ของยางพอลิคลอโรพรีนมีค่าเท่ากับ 53.49
- Mooney Viscosity ของยางธรรมชาติหลังผ่านการทำ mastication 5 นาที มีค่าเท่ากับ 52.48

หมายเหตุ การทำ mastication ยางดังกล่าวเพื่อทำการปรับค่า mooney viscosity ของยางธรรมชาติให้มีค่าใกล้เคียงกับยางพอลิคลอโรพรีน ซึ่งทำให้การบดยางผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของยางสูตรควบคุมสำหรับยางพอลิคลอโรพรีน (Control CR) ตามสูตรการทดลองที่ 1-7

จากการทดสอบตามสูตรการทดลองที่ 1-7 พบว่า ในสูตรที่ 2 และ สูตรที่ 3 ซึ่งเป็นสูตรเดียวกัน ต่างกันแค่การใช้ยางผสมกับเขม่าดำ และการใช้ Masterbatch (CR:N330) จะมีค่าสมบัติต่างๆใกล้เคียงกันมาก จึงเป็นการยืนยันได้ว่าการใช้ยางผสมกับเขม่าดำ และการใช้ Masterbatch (CR:N330) ไม่ก่อให้เกิดความแตกต่างใดๆ ขึ้นกับความสะอาดในการใช้งาน

สำหรับการใช้ Hiko tack พบว่าค่า tensile strength ที่ได้ในสูตรที่ 1 ที่ไม่มีการเติม Hiko tack จะมีค่าต่ำกว่าสูตรอื่น เนื่องจากการบดผสมที่เข้ากันไม่ดีกับสารเคมี โดย Hiko tack เป็น processing aids ซึ่งช่วยให้การบดผสมดีขึ้นได้ ดังนั้นสูตรที่เติม Hiko tack จึงมีสมบัติที่ดีกว่า

ในส่วนของ Paraffinic oil ซึ่งมีการเติมในสูตรที่ 1 พบว่าไม่ได้ช่วยให้สมบัติต่างๆ ดีขึ้น เนื่องจาก Paraffinic oil ไม่สามารถละลายเข้ากับยางพอลิคลอโรพรีนได้ (พิจารณาในเรื่องของค่า Solubility Parameter) ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะผสมลงไปในสูตร Control CR แต่มักนำไปใช้ในสูตรที่มียางธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่

ในส่วนของ Wax. Ozone ที่ทำการบดผสมลงไป พบว่าไม่ได้ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพใดๆ แต่มีส่วนช่วยให้ผิวยางลื่น ไม่ติดลูกกลิ้งในการบดผสม นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการสัมผัสกับโอโซนได้

ในส่วนของ 6PPD ที่เป็นสาร Antioxidant พิจารณาดูจะเห็นว่า ในสูตรที่ 1 ที่มีการเติม 6PPD แต่ไม่เติม MBTS และ TMTD จะให้ผลทางด้านเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางสุก ( $t_{90}$ ) และเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป ( $t_{92}$ ) ใกล้เคียงกับสูตรที่ 3 ที่มีการเติม MBTS และ TMTD แต่ไม่เติม 6PPD รวมถึงทางด้านสมบัติต่างๆด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะ นอกจาก 6PPD จะมีสมบัติในการเป็น Antioxidant และช่วยลดการแตกเนื่องจากโอโซนแล้วยังสามารถใช้เป็นตัวกระตุ้นในการเกิดวัลคาไนซ์ได้อีกด้วยเป็นผลดีต่อการบดผสมยาง ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาการใช้ 6PPD ร่วมกับ MBTS และ TMTD ตามสูตรที่ 4 และ สูตรที่ 7 โดยพบว่า ทั้งสองสูตรมีค่าเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางสุก ( $t_{90}$ ) ใกล้เคียงกัน แต่ในสูตรที่ 7 ที่มีการเติม MBTS จะให้ค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป ( $t_{92}$ ) ที่นานกว่าสูตรที่ 4 ที่ไม่เติม เนื่องจาก MBTS มีผลในด้านการเพิ่มเวลาในการเริ่มเกิดการคงรูปของยางพอลิคลอโรพรีนได้

เมื่อพิจารณาจากค่า Mooney viscosity ของยางจะพบว่า ในสูตรที่ 6 ที่มีการเติมซัลเฟอร์ลงไปด้วยจะให้ค่า Mooney ที่สูงเกินไป ยางที่ได้มีลักษณะแข็งและมีค่า  $t_{90}$  ที่ยาว ดังนั้นจึงไม่ควรเติมซัลเฟอร์ ลงไปในการบดผสมสำหรับสูตร Control CR

สำหรับสูตรที่ 5 ที่มีการเพิ่มปริมาณ ETU ให้มากขึ้นเป็น 1.5 phr พบว่า การเพิ่มปริมาณสารตัวเร่งดังกล่าวไม่ได้ช่วยลดเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางสุก ( $t_{c90}$ ) และเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ 4 ซึ่งมีการใช้ ETU 1 phr พบว่ามีค่า  $t_{c90}$  ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องให้ปริมาณ ETU มากถึง 1.5 phr ใช้เพียง 1 phr ก็เพียงพอ

นอกจากนี้ ในด้านของการทำการบ่มเร่งด้วยความร้อน (heat aging) พบว่า ในสูตรที่ 7 มีการเปลี่ยนแปลงของค่าสมบัติทางกายภาพต่างๆ น้อยมาก ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และเมื่อพิจารณาจากค่าสมบัติต่างๆ เช่น เวลาที่ใช้ในการทำให้ยางสุก ( $t_{c90}$ ) และเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป ( $t_{g2}$ ) รวมถึงการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 4.16 จะเห็นว่าสูตรที่ 7 มีค่าสมบัติด้านต่างๆ ที่เหมาะสมที่สุด จึงเลือกสูตรที่ 7 เป็นสูตรควบคุมสำหรับยางพอลิคลอโรพรีน

ตารางที่ 4.3 แสดงสมบัติทางกายภาพของยางสูตรควบคุมสำหรับยางธรรมชาติ (Control NR) ตามสูตรการทดลองที่ 8-10

จากการทดลองตามสูตรการทดลองที่ 8-10 พบว่า มีการเพิ่มปริมาณ TMTD และซัลเฟอร์มากขึ้นจากสูตร Control CR เพื่อให้สอดคล้องกับชนิดของยางที่ทำการศึกษาในที่นี้คือยางธรรมชาติ ซึ่งจะเกิดการวัลคาไนซ์ได้ด้วยซัลเฟอร์ และ TMTD ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่มีสมบัติในการให้ซัลเฟอร์ (Sulphur donor) ในการเกิดวัลคาไนซ์ของยางธรรมชาติได้ โดยในสูตรที่ 8 ที่มีการเติม TMTD มากที่สุด คือ 0.4 phr จะให้ค่าเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางสุก ( $t_{c90}$ ) เร็วแต่ก็ทำให้ค่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป ( $t_{g2}$ ) ล้นลงไปด้วย จากนั้นจึงทำการลดปริมาณของ TMTD ลงเหลือ 0.3 phr โดยสนใจการเติม Hiko tack ซึ่งเป็นสารช่วยการผสม (Processing aids) เพื่อให้การบดผสมดีขึ้นและมีความใกล้เคียงกับสูตร Control CR ลงไปด้วย ตามสูตรที่ 10 พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสูตรที่ 9 ที่ไม่ได้เติม Hiko tack ค่า  $t_{c90}$  ของทั้งสองสูตรใกล้เคียงกันแต่สูตรที่ 10 มีค่า  $t_{g2}$  ที่ยาวกว่ารวมถึงในด้าน Compression set ก็มีค่าที่ต่ำกว่าไม่เกินจากมาตรฐานที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ ในเรื่องของ การหาค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหลังผ่านการทำ Heat aging ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าทั้งสองสูตรมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด โดยเมื่อทำการพิจารณาจากสมบัติต่างๆโดยรวมแล้ว จึงเลือกสูตรที่ 10 เป็นสูตรควบคุมสำหรับยางธรรมชาติ (Control NR)

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติทางกายภาพของยางสูตรควบคุมยางผสมสำหรับยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนที่อัตราส่วน 30/70 (Control Blend NR/CR) ตามสูตรการทดลองที่ 11-14

จากผลการทดลองตามสูตรที่ 11-14 พบว่า ในสูตรที่ 11 ที่มีการเติม ETU 1 phr สำหรับสูตรการผสมยางที่อัตราส่วนนี้ ไม่ได้ส่งผลต่อการลดค่าเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางสุก ( $t_{c90}$ ) ลงได้ และเมื่อพิจารณาถึงค่าสมบัติทางกายภาพต่างๆ เทียบกับมาตรฐานที่กำหนด พบว่า ค่าความแข็งของยางที่ได้มีค่าต่ำเกินไป และค่าการยุบตัว (Compression set) ที่ได้มีค่าสูงเกินไป จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของสารตัวเร่งต่างๆ รวมถึงการเติมสารช่วยในการผสม (Processing aids) ซึ่งในที่นี้ คือ Hiko tack ลงไปช่วยในการบดผสม และเพื่อให้ใกล้เคียงกับสูตร Control CR และ Control NR โดยพบว่าค่า  $t_{c90}$  และค่า  $t_{s2}$  ในแต่ละสูตรจะใกล้เคียงกัน เมื่อลด ETU ลงเหลือ 0.7 phr ตามสูตรที่ 12 พบว่าค่า  $t_{c90}$  ลดลง เนื่องจากการเติม Hiko tack จะช่วยทำให้การบดผสมเกิดได้ดีขึ้นและเมื่อทำการลด ETU ลงเหลือ 0.5 phr ร่วมกับการเพิ่มปริมาณ MBTS เป็น 1 phr ตามสูตรที่ 13 พบว่าค่า  $t_{c90}$  และค่า  $t_{s2}$  มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าปริมาณ ETU 0.5 phr มีค่าน้อยเกินไป ค่า  $t_{c90}$  จึงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำการเพิ่ม ETU เป็น 0.7 phr และใช้ MBTS 1 phr ตามสูตรที่ 14 พบว่าค่า  $t_{c90}$  และค่า  $t_{s2}$  มีค่าที่เหมาะสม และเมื่อพิจารณาในเรื่องสมบัติต่างๆ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติหลังผ่านการทำ Heat aging ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ยกเว้นค่าการยุบตัว (Compression set) ที่มีค่ามากเกินไปซึ่งจะได้ทำการปรับให้ได้ตามมาตรฐานในภายหลัง ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่ 14 เป็นสูตร Control blend NR/CR เพื่อทำการทดลองในด้านการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนยางในยางผสม และการศึกษาผลของสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) ต่อไป

**ตอนที่ 2** การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนยางในยางผสม และผลจากการใช้สารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent)

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนในอัตราส่วนต่างๆกันโดยไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) สำหรับสูตรการทดลองที่ 14-22

จากการทดสอบสูตรการทดลองที่ 14-22 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับมาตรฐานที่กำหนดแสดงดังตารางที่ 4.17 พบว่า อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) ที่ 30 : 70 , 20 : 80 และ 10 : 90 ให้สมบัติการทดสอบ เช่น ความต้านทานแรงดึง ความยืดเมื่อขาด

รวมถึงค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแรงดึงและความยืดเมื่อขาด การเปลี่ยนแปลงของค่าความแข็ง (hardness) หลังผ่านการอบ (heat aging) ความสามารถในการทนต่อการบวมตัวเนื่องจากน้ำมัน (% volume swelling) ความสามารถในการทนต่อโอโซน (ozone resistance) ผ่านเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนดไว้ แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ต้องการศึกษากการเติมยางธรรมชาติลงไปแทนที่ยางพอลิคลอโรพรีนสำหรับผลิตยางกันฝุ่นเพื่อลดต้นทุนการผลิตให้มากที่สุดโดยยังคงสมบัติของยางพอลิคลอโรพรีนให้ได้ตามมาตรฐานของยางกันฝุ่นที่กำหนดไว้ จึงเลือกอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) ที่ 30 : 70 ตามสูตรที่ 14 เป็นสูตรที่ใช้ในการผลิตยางกันฝุ่นต่อไป ซึ่งต้องทำการปรับค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัว (Compression set) ให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงเกินไปดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.19 นอกจากนี้ได้ทำการกำหนดให้ที่อัตราส่วนยางพอลิคลอโรพรีน 100 phr และยางธรรมชาติ 100 phr ตามสูตรที่ 7 และ 10 เป็นสูตรควบคุมตามลำดับ

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนในอัตราส่วนต่างๆ กัน โดยทำการเติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) ซึ่งในที่นี้ คือ Struktol 60 NS สำหรับสูตรการทดลองที่ 23-31

จากการทดสอบสูตรการทดลองที่ 23-31 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด แสดงดังตารางที่ 4.18 เช่นเดียวกับสูตรที่ 14-22 พบว่า อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) ที่ 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80 และ 10 : 90 ให้สมบัติการทดสอบด้านต่างๆผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ จึงเลือกอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ กับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) เติมสารเชื่อมการผสมยาง (homogenizing agent) ที่ 40 : 60 ตามสูตรที่ 28 เป็นสูตรที่ใช้ในการผลิตยางกันฝุ่นต่อไป ซึ่งต้องทำการปรับค่าเปอร์เซ็นต์การยุบตัว (Compression set) ให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงเกินไปดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ตอนที่ 3 การปรับสูตรยางให้มีสมบัติต่างๆ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด**  
(ทำการปรับสูตรการทดลองที่ 14 และ 28 ที่ได้จากการคัดเลือกในการทดลองตอนที่ 2)

ตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติทางกายภาพของยางผสมสูตรที่ 32-35 ซึ่งทำการศึกษาในเรื่องการปรับเปลี่ยนชนิดของเขม่าดำ

จากการทดสอบสูตรการทดลองที่ 32-35 ซึ่งทำการศึกษาในเรื่องชนิดของเขม่าดำ โดยเขม่าดำที่ใช้ในที่นี้ คือ

- N330 ซึ่งเป็นเขม่าดำประเภท High Abrasion Furnace black (HAF)
- N550 ซึ่งเป็นเขม่าดำประเภท Fast Extrusion Furnace black (FEF)
- N660 ซึ่งเป็นเขม่าดำประเภท General Purpose Furnace black (GPF)

พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบสมบัติของยางที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนดดังตารางที่ 4.16 ค่าสมบัติต่างๆ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ยกเว้น Compression set ซึ่งยังมีค่าที่สูงเกินไป แต่เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าค่าดังกล่าวมีแนวโน้มที่ลดลงจากเดิมในสูตรที่ 28 โดยได้ว่าการใช้เขม่าดำชนิด N660 จะให้ค่า Compression set ที่ต่ำกว่าการใช้เขม่าดำชนิดอื่น ดังนั้นในการทดลองเพื่อทำการปรับสูตรต่อไป จึงเลือกใช้สารตัวเติม คือ เขม่าดำชนิด N660

ตารางที่ 4.10 แสดงสมบัติทางกายภาพของยางผสมสูตรที่ 36-39 ที่ไม่ได้ทำการเติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) โดยศึกษาในเรื่องการปรับเปลี่ยนปริมาณเขม่าดำและระบบการวัลคาไนซ์

จากการทดสอบสูตรการทดลองที่ 36-39 และทำการหาค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพหลังผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.11 รวมถึงทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนดดังตารางที่ 4.16 พบว่า ทุกสูตรมีค่าสมบัติต่างๆ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ยกเว้นสมบัติด้าน Compression set ที่มีเพียงสูตรที่ 38 ซึ่งเป็นสูตรยางผสมที่อัตราส่วนยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนเป็น 30 : 70 ไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง ใช้สารตัวเติม คือ เขม่าดำชนิด N660 และระบบการวัลคาไนซ์แบบระบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanisation : EV System) เพียงสูตรเดียวที่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด



ตารางที่ 4.12 แสดงสมบัติทางกายภาพของยางผสมสูตรที่ 40-42 ที่ทำการเติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) โดยศึกษาในเรื่องการปรับเปลี่ยนปริมาณเซมาดำและระบบการวัลคาไนซ์

จากการทดสอบสูตรการทดลองที่ 40-42 และทำการหาค่าการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หลังผ่านการบ่มแรงด้วยความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4.13 รวมถึงทำการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนดดังตารางที่ 4.16 พบว่า จะให้ผลเช่นเดียวกันกับสูตรที่ 36-39 คือ ทุกสูตรมีค่าสมบัติต่างๆ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด ยกเว้นสมบัติด้านการยุบตัว (Compression set) ที่มีเพียงสูตรที่ 41 ซึ่งมีอัตราส่วนยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนเป็น 40 : 60 และทำการเติมสารเชื่อมการผสมยาง ใช้สารตัวเติม คือ เซมาดำชนิด N660 และระบบการวัลคาไนซ์ แบบระบบประสิทธิภาพ (Efficient Vulcanisation : EV System) เพียงสูตรเดียวที่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนด

ตารางที่ 4.14 แสดงสมบัติทางกายภาพของยางผสมที่ทำการเลือกขึ้นมาจากการเปรียบเทียบกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด (สูตรที่ 38 และสูตรที่ 41) รวมถึงสูตรควบคุมยางพอลิคลอโรพรีนและสูตรควบคุมยางธรรมชาติ (สูตรที่ 7 และสูตรที่ 10 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของยางสูตรควบคุมสำหรับยางพอลิคลอโรพรีน (Control CR)

สูตร	1	2	3	4	5	6	7
NR : CR	0 : 100	0 : 100	0 : 100	0 : 100	0 : 100	0 : 100	0 : 100
<u>สมบัติยางก่อนการคงรูป</u>							
Mooney Viscosity, (ML 1+4, 100°C)	66.50	54.78	57.13	54.34	59.68	82.57	71.84
Scorch time ( $t_{92}$ ), (min.)	0.83	1.13	1.27	1.08	0.98	1.02	1.16
Cure time ( $t_{90}$ ) at 160°C, (min.)	6.75	6.71	7.44	6.98	7.04	8.81	6.52
<u>สมบัติยางหลังการคงรูป</u>							
Specific gravity	1.36	1.36	1.36	-	-	-	1.36
Tensile strength ,(MPa)							
ก่อนอบ (25°C)	20.61	23.53	23.95	-	-	-	23.44
หลังอบ (100°C)	17.61	-	24.52	-	-	-	23.12
Elongation at break ,(%)							
ก่อนอบ (25°C)	440.00	546.70	491.00	-	-	-	432.96
หลังอบ (100°C)	289.10	-	488.50	-	-	-	423.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของยางสูตรควบคุมสำหรับยางพอลิคลอโรพรีน (Control CR) (ต่อ)

สูตร	1	2	3	4	5	6	7
Modulus at 100 % , (MPa)							
ก่อนอบ (25°C)	2.82	1.92	2.08	-	-	-	2.42
หลังอบ (100°C)	3.31	-	2.26	-	-	-	2.40
Modulus at 300 % elongation, (MPa)							
ก่อนอบ (25°C)	15.03	11.09	12.08	-	-	-	14.16
หลังอบ (100°C)	18.66	-	12.92	-	-	-	13.82
Hardness, (Shore A)							
ก่อนอบ (25°C)	63.00	56.60	58.80	-	-	-	58.50
หลังอบ (100°C)	64.00	-	59.30	-	-	-	59.60
Compression set at 100°C, 22 hr. , (%)	-	-	41.92	-	-	-	33.95

ตารางที่ 4.2 การหาค่า % การเปลี่ยนแปลงของค่า physical properties หลังผ่านการทำ heat aging ที่ 100°C 22 hr. ของสูตร Control CR (สูตรที่ 7)

Items	% Degradation
Hardness change (Shore A)	1.10
Tensile strength change (%)	-1.37
Elongation at break change (%)	-2.09



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 สมบัติทางกายภาพของยางสูตรควบคุมสำหรับยางธรรมชาติ (control NR)

สูตร	8	9	10
NR : CR	100 : 0	100 : 0	100 : 0
<u>สมบัติยางก่อนการคงรูป</u>			
Mooney Viscosity, (ML 1+4, 100°C)	40.32	49.38	27.42
Scorch time ( $t_{92}$ ), (min.)	1.13	1.25	1.92
Cure time ( $t_{90}$ ) at 160°C, (min.)	1.96	2.25	2.96
<u>สมบัติยางหลังการคงรูป</u>			
Specific gravity	1.07	1.07	1.05
Tensile strength ,(MPa)			
ก่อนอบ (25°C)	23.90	24.12	23.11
หลังอบ (100°C)	-	20.08	18.62
Elongation at break ,(%)			
ก่อนอบ (25°C)	472.60	611.60	577.20
หลังอบ (100°C)	-	451.80	491.80
Modulus at 100 % , (MPa)			
ก่อนอบ (25°C)	2.20	1.51	1.21
หลังอบ (100°C)	-	2.11	1.40
Modulus at 300 % elongation, (MPa)			
ก่อนอบ (25°C)	11.56	7.09	5.84
หลังอบ (100°C)	-	10.52	7.34
Hardness, (Shore A)			
ก่อนอบ (25°C)	54.90	53.50	43.10
หลังอบ (100°C)	-	56.20	47.70
Compression set at 100°C, 22 hr. , (%)	-	37.62	28.25

ตารางที่ 4.4 การหาค่า % การเปลี่ยนแปลงของค่า physical properties หลังผ่านการทำ heat aging ที่ 100°C 22 hr. ของสูตร Control NR (สูตรที่ 10)

Items	% Degradation
Hardness change (Shore A)	4.60
Tensile strength change (%)	-14.80
Elongation at break change (%)	-19.43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 สมบัติของยางสูตรควบคุมสำหรับยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (control blend NR/CR) ที่อัตราส่วน 30/70 ไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agents)

สูตร	11	12	13	14
NR : CR	30 : 70	30 : 70	30 : 70	30 : 70
<u>สมบัติยางก่อนการคงรูป</u>				
Mooney Viscosity, (ML 1+4,100°C)	29.22	29.53	32.07	46.18
Scorch time ( $t_{52}$ ), (min.)	1.31	1.46	1.69	1.65
Cure time ( $t_{90}$ ) at 160°C, (min.)	6.27	4.13	5.60	4.54
<u>สมบัติยางหลังการคงรูป</u>				
Specific gravity	1.28	-	-	1.27
Tensile strength ,(MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	20.13	-	-	21.79
หลังอบ (100°C)	17.58	-	-	19.33
Elongation at break ,(%)				
ก่อนอบ (25°C)	695.20	-	-	530.30
หลังอบ (100°C)	664.80	-	-	454.90
Modulus at 100 % ,(MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	1.01	-	-	2.50
หลังอบ (100°C)	1.27	-	-	2.97
Modulus at 300 % elongation, (MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	2.62	-	-	10.74
หลังอบ (100°C)	3.52	-	-	12.17
Hardness, (Shore A)				
ก่อนอบ (25°C)	42.90	-	-	55.60
หลังอบ (100°C)	45.40	-	-	59.40
Compression set at 100°C, 22 hr. ,(%)	59.55	-	-	67.59

ตารางที่ 4.6 การหาค่า % การเปลี่ยนแปลงของ physical properties หลังผ่านการทำ heat aging ที่ 100°C 22 hr. ของสูตร Control blend NR/CR ที่อัตราส่วน 30/70 ไม่เติม Homogenizing agent (สูตรที่ 14)

Items	% Degradation
Hardness change (Shore A)	3.80
Tensile strength change (%)	-11.29
Elongation at break change (%)	-14.22

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนโดยไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent)

สูตร	10	15	16	17	18	19	20	14	21	22	7
NR : CR (phr)	100 : 0	90 : 10	80 : 20	70 : 30	60 : 40	50 : 50	40 : 60	30 : 70	20 : 80	10 : 90	0 : 100
<u>สมบัติยางก่อนการคงรูป</u>											
Mooney Viscosity, ML(1+4)	27.42	36.41	42.40	39.69	38.68	39.69	42.53	46.18	61.99	78.12	71.84
t <sub>sz</sub> (min.)	1.92	1.08	0.90	1.13	1.08	1.13	1.17	1.65	1.04	0.98	1.16
t <sub>c90</sub> (min.)	2.96	1.96	1.96	2.29	2.42	2.87	3.67	4.54	5.79	6.54	6.52
<u>สมบัติยางหลังการคงรูป</u>											
Specific gravity	1.05	1.10	1.13	1.16	1.18	1.21	1.24	1.27	1.30	1.34	1.36
Tensile strength, (MPa)											
ก่อนอบ (25°C)	23.11	23.57	23.46	23.76	23.92	23.72	21.42	21.79	23.53	23.90	23.44
	(0.39)*	(2.15)	(0.90)	(0.44)	(0.60)	(0.61)	(0.86)	(0.50)	(2.52)	(1.97)	(1.34)
หลังอบ (100°C)	18.62	21.75	21.24	22.86	22.52	22.61	19.57	19.33	23.23	23.28	23.12
	(2.75)	(3.65)	(1.52)	(2.43)	(0.71)	(1.20)	(0.51)	(0.37)	(0.96)	(1.61)	(0.81)
Elongation at break, (%)											
ก่อนอบ (25°C)	577.20	609.85	605.10	611.20	599.60	595.30	532.80	530.30	491.50	456.50	432.96
	(28.10)	(12.19)	(33.00)	(9.74)	(15.11)	(15.04)	(38.11)	(25.30)	(57.10)	(47.00)	(29.33)
หลังอบ (100°C)	491.80	545.80	526.20	524.10	535.70	521.00	465.40	454.90	455.00	445.00	423.90
	(53.5)	(64.12)	(62.50)	(64.00)	(14.48)	(24.92)	(36.43)	(28.50)	(22.13)	(29.43)	(46.71)

\* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนโดยไม่เติมสารเชื่อมโมเลกุลยาง (Homogenizing agent) (ต่อ)

สูตร	10	15	16	17	18	19	20	14	21	22	7
Modulus at 100%, (MPa)											
ก่อนอบ (25°C)	1.21 (0.11)*	1.42 (0.15)	1.35 (0.19)	1.61 (0.22)	1.94 (0.43)	1.93 (0.31)	2.31 (0.44)	2.50 (0.43)	2.50 (0.19)	3.01 (0.41)	2.42 (0.12)
หลังอบ (100°C)	1.40 (0.09)	1.80 (0.20)	1.80 (0.18)	2.40 (2.40)	2.49 (0.37)	2.59 (0.56)	2.98 (0.46)	2.97 (0.16)	3.03 (0.33)	3.85 (1.93)	2.40 (0.20)
Modulus at 300%, (MPa)											
ก่อนอบ (25°C)	5.84 (0.44)	7.76 (0.47)	7.81 (0.36)	8.04 (0.58)	8.82 (0.90)	9.24 (0.99)	10.35 (1.12)	10.74 (1.24)	12.73 (0.57)	14.84 (1.51)	14.16 (0.46)
หลังอบ (100°C)	7.34 (0.56)	8.93 (0.91)	8.99 (0.63)	10.64 (0.50)	10.71 (0.86)	11.13 (1.66)	12.05 (1.19)	12.17 (1.01)	13.28 (1.62)	13.44 (4.16)	13.82 (1.81)
Hardness, (Shore A)											
ก่อนอบ (25°C)	43.10	48.20	49.40	49.60	52.40	53.30	54.60	55.60	59.80	63.70	58.50
หลังอบ (100°C)	47.70	52.50	52.60	54.30	56.10	57.60	59.20	59.40	62.30	66.20	59.60
Compression set at 100°C, 22 hr.	28.25 (2.00)	51.02 (0.44)	52.30 (2.00)	55.87 (1.71)	64.44 (1.76)	63.74 (1.23)	66.37 (0.10)	67.59 (0.59)	70.81 (0.66)	71.11 (1.09)	33.95 (1.31)
Ozone resistance at 40°C, 72 hr. [ozone] 50 pphm, 20% elongation	แตก	แตก	แตก	แตก	แตก	แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก
Fluid resistance at 100°C, 70 hr.	117.06	129.22	119.93	111.65	96.20	85.70	79.51	69.82	63.68	50.16	43.86
Antistatic, (ohms/cm <sup>2</sup> )	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>10</sup>

\* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนเติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) : Struktol 60 NS

สูตร	10	23	24	25	26	27	28	29	30	31	7
NR : CR ,(phr)	100 : 0	90 : 10	80 : 20	70 : 30	60 : 40	50 : 50	40 : 60	30 : 70	20 : 80	10 : 90	0 : 100
Struktol 60 NS ,(phr)	-	5	5	5	5	5	5	5	5	5	-
<u>สมบัติยางก่อนการคงรูป</u>											
Mooney Viscosity,ML(1+4)	27.42	36.39	37.99	35.72	35.6	36.9	35.91	40.38	51.85	68.20	71.84
t <sub>92</sub> ,(min.)	1.92	0.90	0.92	1.02	1.02	1.06	1.10	1.52	1.13	1.15	1.16
t <sub>90</sub> ,(min.)	2.96	1.90	1.86	2.24	2.20	2.44	3.26	4.38	5.62	6.23	6.52
<u>สมบัติยางหลังการคงรูป</u>											
Specific gravity	1.05	1.10	1.13	1.15	1.17	1.19	1.22	1.25	1.29	1.32	1.36
Tensile strength, (MPa)											
ก่อนอบ (25°C)	23.11 (0.39)*	24.85 (0.48)	23.58 (0.92)	23.27 (0.71)	23.25 (0.04)	22.15 (0.15)	21.67 (0.30)	21.74 (0.12)	26.27 (0.36)	26.36 (0.06)	23.44 (1.34)
หลังอบ (100°C)	18.62 (2.75)	25.58 (1.49)	24.44 (0.51)	23.30 (0.42)	21.70 (0.43)	21.09 (0.09)	21.20 (0.33)	21.72 (1.27)	24.10 (0.11)	25.12 (0.74)	23.12 (0.81)
Elongation at break, (%)											
ก่อนอบ (25°C)	577.20 (28.10)	678.00 (55.50)	633.90 (20.60)	640.50 (37.60)	609.20 (8.60)	546.90 (15.34)	573.20 (1.69)	564.70 (11.50)	582.10 (7.00)	479.60 (40.50)	432.96 (29.33)
หลังอบ (100°C)	491.80 (53.50)	570.20 (24.50)	559.60 (32.90)	555.10 (32.20)	534.90 (16.60)	557.90 (43.80)	548.70 (8.49)	456.20 (14.85)	497.00 (8.40)	464.00 (16.97)	423.90 (46.71)

\* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางกายภาพของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนเติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) : Struktol 60 NS (ต่อ)

สูตร	10	23	24	25	26	27	28	29	30	31	7
Modulus at 100%, (MPa)											
ก่อนอบ (25°C)	1.21 (0.11)*	1.08 (0.17)	1.46 (0.27)	1.49 (0.47)	1.64 (0.02)	1.76 (0.21)	1.87 (0.21)	2.11 (0.27)	2.38 (0.05)	2.80 (0.51)	2.42 (0.12)
หลังอบ (100°C)	1.40 (0.09)	1.88 (0.18)	1.92 (0.12)	1.92 (0.15)	2.27 (0.13)	2.27 (0.16)	2.32 (0.10)	2.88 (0.09)	2.91 (0.20)	3.09 (0.54)	2.40 (0.20)
Modulus at 300%, (MPa)											
ก่อนอบ (25°C)	5.84 (0.44)	5.81 (0.99)	7.72 (0.83)	7.79 (1.40)	8.22 (0.47)	8.33 (1.11)	8.83 (0.63)	9.53 (0.95)	11.51 (0.35)	14.46 (2.19)	14.16 (0.46)
หลังอบ (100°C)	7.34 (0.56)	9.49 (0.69)	9.80 (0.61)	9.39 (0.84)	10.36 (0.39)	9.85 (0.80)	9.74 (0.47)	11.97 (1.20)	13.80 (0.38)	14.80 (1.99)	13.82 (1.81)
Hardness, (Shore A)											
ก่อนอบ (25°C)	43.10	43.20	45.80	46.30	46.60	47.20	48.90	49.90	53.90	55.20	58.50
หลังอบ (100°C)	47.70	50.10	50.90	51.90	52.00	52.60	54.60	55.00	58.80	60.40	59.60
Compression set at 100°C, 22 hr.	28.25 (2.00)	45.02 (1.67)	47.02 (0.61)	47.03 (0.86)	48.02 (5.14)	51.58 (4.64)	55.42 (3.09)	57.77 (2.12)	63.39 (0.75)	72.66 (0.69)	33.95 (1.31)
Ozone resistance at 40°C, 72 hr. [ozone] 50 pphm, 20% elongation	แตก	แตก	แตก	แตก	แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก
Fluid resistance at 100°C, 72 hr.	117.06	107.23	96.14	88.89	85.20	81.55	73.72	64.95	53.32	47.81	43.86
Antistatic, (ohms/cm <sup>2</sup> )	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>10</sup>

\* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD.)

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางกายภาพของยางผสมเติม Homogenizing agent  
 ที่ทำการศึกษาในเรื่องการปรับเปลี่ยนชนิดของเขม่าดำ

สูตร	32	33	34	35
NR : CR : Homogenizing agent (ST 60NS)	40 : 60 : 5	40 : 60 : 5	40 : 60 : 5	40 : 60 : 5
<u>สมบัติยางก่อนการคงรูป</u>				
Mooney Viscosity, (ML 1+4, 100°C)	33.64	40.57	48.07	47.88
Scorch time ( $t_{s2}$ ), (min.)	1.40	1.23	1.13	1.21
Cure time ( $t_{c90}$ ) at 160°C, (min.)	3.63	3.65	3.25	3.54
<u>สมบัติยางหลังการคงรูป</u>				
Specific gravity	1.21	1.24	1.25	1.25
Tensile strength ,(MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	19.98	17.97	19.70	15.61
หลังอบ (100°C)	19.86	16.28	19.69	15.49
Elongation at break ,(%)				
ก่อนอบ (25°C)	696.60	428.30	514.80	413.00
หลังอบ (100°C)	576.10	372.80	433.10	347.00
Modulus at 100 % , (MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	1.61	2.81	2.40	2.50
หลังอบ (100°C)	2.36	2.90	3.29	3.42
Modulus at 300 % elongation, (MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	7.20	12.33	11.00	10.96
หลังอบ (100°C)	9.67	12.46	13.75	13.92
Hardness, (Shore A)				
ก่อนอบ (25°C)	47.40	56.40	55.00	56.90
หลังอบ (100°C)	55.50	59.30	61.70	62.90
Compression set at 100°C, 22 hr. , (%)	60.75	52.37	50.10	66.16
Ozone Resistance	----- No cracking -----			

ตารางที่ 4.10 สมบัติทางกายภาพของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent ที่ทำการศึกษาในเรื่อง การปรับเปลี่ยนปริมาณของเคมีดำและระบบที่ใช้ในการคงรูป

สูตร	36	37	38	39
NR : CR	30 : 70	30 : 70	30 : 70	30 : 70
<u>สมบัติยางก่อนการคงรูป</u>				
Mooney Viscosity, (ML 1+4,100°C)	52.14	54.63	54.87	50.39
Scorch time ( $t_{s2}$ ), (min.)	1.40	1.23	1.21	1.23
Cure time ( $t_{c90}$ ) at 160°C, (min.)	3.50	4.27	3.83	3.88
<u>สมบัติยางหลังการคงรูป</u>				
Specific gravity	1.22	1.22	1.22	1.26
Tensile strength ,(MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	19.72	18.58	18.04	16.08
หลังอบ (100°C)	18.37	16.95	17.63	13.82
Elongation at break ,(%)				
ก่อนอบ (25°C)	464.40	381.70	363.90	465.80
หลังอบ (100°C)	395.80	313.10	358.90	392.30
Modulus at 100 % , (MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	2.58	3.32	3.46	2.29
หลังอบ (100°C)	3.16	4.17	3.86	2.49
Modulus at 300 % elongation, (MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	13.06	14.84	15.24	9.84
หลังอบ (100°C)	14.04	15.87	15.29	10.38
Hardness, (Shore A)				
ก่อนอบ (25°C)	58.00	60.40	60.60	58.00
หลังอบ (100°C)	62.70	64.20	63.60	62.40
Compression set at 100°C, 22 hr. , (%)	52.11	52.25	37.04	42.55
Ozone Resistance	----- No cracking -----			

ตารางที่ 4.11 การหาค่า % การเปลี่ยนแปลงของค่า physical properties  
 หลังผ่านการทำ heat aging ที่ 100°C 22 hr. ของสูตรที่ 36-39

Items	% Degradation			
	36	37	38	39
Hardness change (Shore A)	4.70	3.80	3.00	4.40
Tensile strength change (%)	-6.85	-8.77	-2.27	-14.05
Elongation at break change (%)	-14.77	-17.97	-1.37	-15.78

จุฬาลง

ตารางที่ 4.12 สมบัติทางกายภาพของยางผสมเติม Homogenizing agent ที่ทำการศึกษา  
ในเรื่องการปรับเปลี่ยนปริมาณของเขม่าดำและระบบที่ใช้ในการคงรูป

สูตร	40	41	42
NR : CR : ST 60NS	40 : 60 : 5	40 : 60 : 5	40 : 60 : 5
<u>สมบัติยางก่อนการคงรูป</u>			
Mooney Viscosity, (ML 1+4,100°C)	48.51	49.07	47.82
Scorch time ( $t_{s2}$ ), (min.)	1.13	1.13	1.23
Cure time ( $t_{c90}$ ) at 160°C, (min.)	3.29	2.88	2.94
<u>สมบัติยางหลังการคงรูป</u>			
Specific gravity	1.19	1.20	1.23
Tensile strength ,(MPa)			
ก่อนอบ (25°C)	20.47	19.11	17.20
หลังอบ (100°C)	18.15	17.17	14.99
Elongation at break ,(%)			
ก่อนอบ (25°C)	462.00	417.00	458.50
หลังอบ (100°C)	403.90	359.80	437.90
Modulus at 100 % , (MPa)			
ก่อนอบ (25°C)	2.89	2.98	2.10
หลังอบ (100°C)	3.77	4.27	2.49
Modulus at 300 % elongation, (MPa)			
ก่อนอบ (25°C)	13.17	13.56	9.81
หลังอบ (100°C)	14.00	14.32	9.79
Hardness, (Shore A)			
ก่อนอบ (25°C)	56.60	57.40	53.30
หลังอบ (100°C)	60.70	60.10	56.30
Compression set at 100°C, 22 hr. , (%)	50.00	35.71	47.65
Ozone Resistance	----- No cracking -----		



ตารางที่ 4.13 การหาค่า % การเปลี่ยนแปลงของค่า physical properties  
 หลังผ่านการทำ heat aging ที่ 100°C 22 hr. ของสูตรที่ 40-42

Items	% Degradation		
	40	41	42
Hardness change (Shore A)	4.10	2.70	3.00
Tensile strength change (%)	-14.33	-10.15	-12.85
Elongation at break change (%)	-12.58	-13.72	-4.49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.14 สมบัติทางกายภาพของยางผสมที่ทำการคัดเลือกจากการเปรียบเทียบกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด รวมถึงสูตรควบคุมยางพอลิคลอโรพรีนและสูตรควบคุมยางธรรมชาติยางธรรมชาติ

สูตร	7	10	38	41
NR : CR ,(phr)	0 : 100	100 : 0	30 : 70	40 : 60
Struktol 60 NS ,(phr)	-	-	-	5
<u>สมบัติยางก่อนการคงรูป</u>				
Mooney Viscosity,ML(1+4)	71.84	27.42	54.87	49.07
t <sub>52</sub> ,(min.)	1.16	1.92	1.21	1.13
t <sub>90</sub> ,(min.)	6.52	2.96	3.83	2.88
<u>สมบัติยางหลังการคงรูป</u>				
Specific gravity	1.36	1.05	1.22	1.20
Tensile strength, (MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	23.44 (1.34)*	23.11 (0.39)	18.04 (1.19)	19.11 (0.54)
หลังอบ (100°C)	23.12 (0.81)	18.62 (2.75)	17.63 (0.61)	17.17 (1.01)
Elongation at break, (%)				
ก่อนอบ (25°C)	432.96 (29.33)	577.20 (28.10)	363.90 (37.20)	417.00 (19.90)
หลังอบ (100°C)	423.90 (46.71)	491.80 (53.50)	358.90 (17.80)	359.80 (31.40)

\* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

ตารางที่ 4.14 สมบัติทางกายภาพของยางผสมที่ทำการศึกษาจากการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ยางกัน  
ฝุ่นที่กำหนด รวมถึงสูตรควบคุมยางพอลิคลอโรพรีนและยางธรรมชาติยางธรรมชาติ (ต่อ)

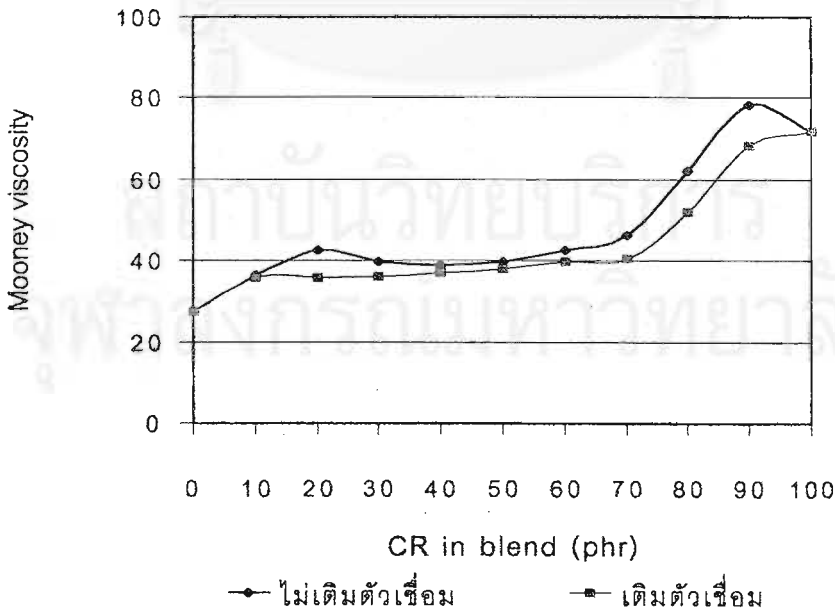
สูตร	7	10	38	41
Modulus at 100%, (MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	2.42 (0.12)*	1.21 (0.11)	3.46 (0.57)	2.98 (0.26)
หลังอบ (100°C)	2.40 (0.20)	1.40 (0.09)	3.86 (0.41)	4.27 (0.87)
Modulus at 300%, (MPa)				
ก่อนอบ (25°C)	14.16 (0.46)	5.84 (0.44)	15.24 (1.56)	13.56 (0.87)
หลังอบ (100°C)	13.82 (1.81)	7.34 (0.56)	15.29 (0.39)	14.32 (1.16)
Hardness, (Shore A)				
ก่อนอบ (25°C)	58.50	43.10	60.60	57.40
หลังอบ (100°C)	59.60	47.70	63.60	60.10
Compression set at 100°C, 22 hr.	33.95 (1.31)	28.25 (2.00)	37.04 (1.00)	35.71 (0.13)
Ozone resistance at 40°C, 72 hr. [ozone] 50 pphm, 20% elongation	ไม่แตก	แตก	ไม่แตก	ไม่แตก
Fluid resistance at 100°C, 70 hr.				
จาระบี (grease)	43.86	117.06	63.08	72.73
ASTM oil No. 1	8.55	100.70	23.33	33.06
Antistatic, (ohms/cm <sup>2</sup> )	10 <sup>10</sup>	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>

\* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)

4.1 ความหนืดของยางผสม (Mooney Viscosity)

สำหรับยางผสมที่ไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) ความหนืดของยางผสมที่ได้จากเครื่อง Mooney viscometer นี้ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.7 จากรูปที่ 4.1 พบว่าความหนืดของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น

สำหรับความหนืดของยางผสมเติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) เป็น 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากรูปที่ 4.1 พบว่าให้แนวโน้มค่าความหนืดเช่นเดียวกับสูตรยางผสมที่ไม่เติม Homogenizing agent คือ เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของยางผสมจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการพิจารณาจะเห็นว่า ค่าความหนืดของยางผสมที่ทำการเติม Homogenizing agent จะมีค่าที่ต่ำกว่าสูตรที่ไม่ได้ทำการเติม Homogenizing agent เล็กน้อย เนื่องจาก Homogenizing agent จัดเป็นสารช่วยในการผสมยาง (Processing aid) ดังนั้น เมื่อทำการเติมลงในยางผสม จึงส่งผลให้ยางทั้งสองชนิดผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น มีค่าความหนืดที่ลดลง



รูปที่ 4.1 ความหนืดของยางผสม

## 4.2 เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูป

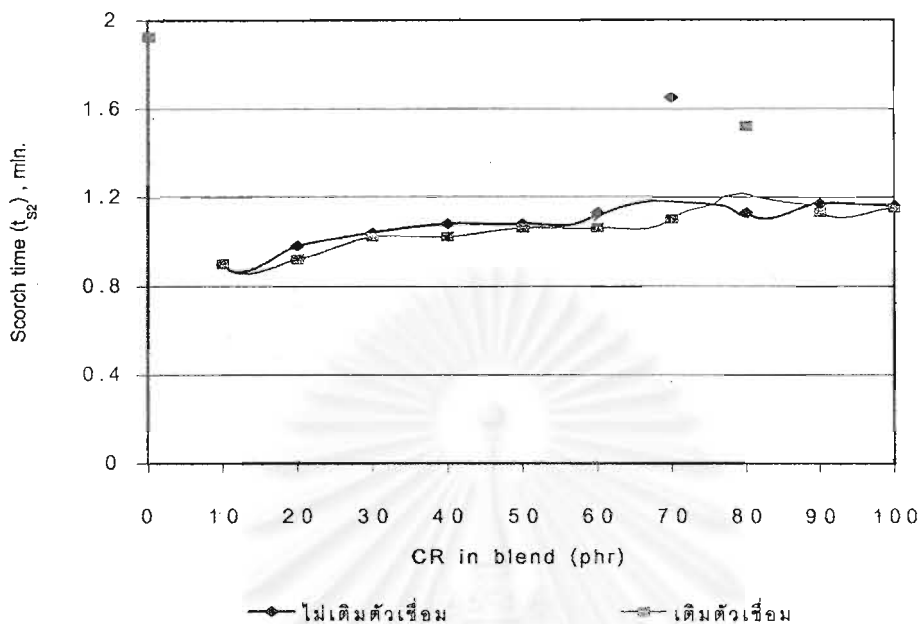
สำหรับยางผสมไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงใน ตารางที่ 4.7 จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าเวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป ( $t_{g2}$ ) และเวลาที่ใช้ในการคงรูปของยาง ( $t_{c90}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณยางพอลิคลอโรพรีนเพิ่มมากขึ้นทั้งนี้ก็เนื่องจากยางธรรมชาติมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบไม่อิมตัว มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันกับสารระบบวัลคาไนส์ได้มากกว่าพันธะคู่ของยางพอลิคลอโรพรีนซึ่งไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ทำให้ยางธรรมชาติสามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันในกระบวนการวัลคาไนส์ได้เร็วกว่ายางพอลิคลอโรพรีน นอกจากนี้ W. Hofmann [47] ยังได้ให้เหตุผลที่ทำให้ยางธรรมชาติสามารถเกิดการคงรูปได้เร็วกว่ายางสังเคราะห์ไว้อีก ดังนี้

- ยางธรรมชาติประกอบด้วย albumin และ amine ซึ่งเป็นตัวที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาในการคงรูป นอกจากนี้ในยางสังเคราะห์ยังมีส่วนที่เป็นกรดไขมัน (fatty acid) และส่วนของเรซิน ซึ่งเป็นตัวหน่วงในปฏิกิริยาการคงรูป ทำให้ยางธรรมชาติมีอัตราการคงรูปที่เร็วกว่ายางสังเคราะห์

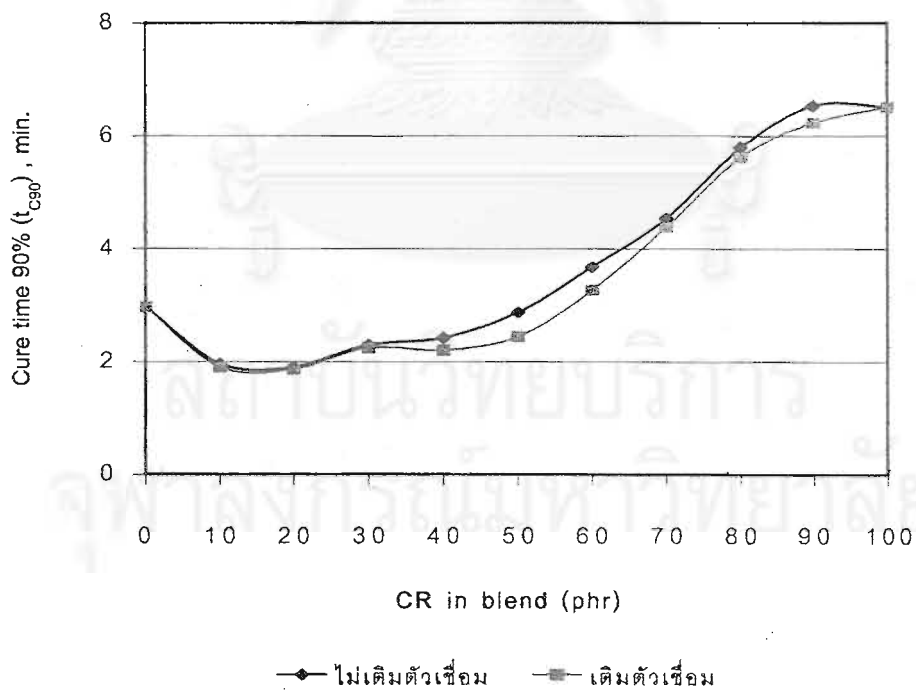
- ยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบโซ่ตรง (linear molecule) มากกว่า จึงมี โอกาสในการเกิดการคงรูปได้มากกว่ายางสังเคราะห์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบทรงกลม (sphere)

- อัตราการเกิดการคงรูปของยาง มักขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของกลุ่มที่อยู่ติดกับพันธะคู่ของยาง (lateral group) เช่น ในยางธรรมชาติมี lateral group คือหมู่เมทิล (methyl group) ซึ่งไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา สารวัลคาไนส์จึงเข้าทำปฏิกิริยาที่พันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าได้เลย ในขณะที่ยางสังเคราะห์ เช่น ยางพอลิคลอโรพรีน มี lateral group คือคลอรีน ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าพันธะคู่ในยาง ดังนั้นสารวัลคาไนส์จึงเข้าทำปฏิกิริยากับคลอรีนก่อน ทำให้อัตราการเกิดการคงรูปของยางธรรมชาติเร็วกว่าในยางสังเคราะห์

สำหรับยางผสมที่เติม Homogenizing agent ดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป ( $t_{g2}$ ) และเวลาที่ใช้ในการคงรูป ( $t_{c90}$ ) มีแนวโน้มเช่นเดียวกับยางผสมที่ไม่เติม Homogenizing agent คือ จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อพิจารณาดูจะเห็นว่าค่าเวลาดังกล่าวของยางผสมทั้งสองแบบจะมีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่สำหรับยางที่เติม Homogenizing agent อาจมีค่าที่ต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากยางทั้งสองชนิดผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.2 เวลาที่ยางเริ่มเกิดการคงรูป ( $t_{s2}$ )



รูปที่ 4.3 เวลาที่ยางใช้ในการคงรูป ( $t_{c90}$ )

### 4.3 ความต้านทานแรงดึง

#### 4.3.1 ความต้านทานแรงดึง ความยืดเมื่อขาดของยางผสม

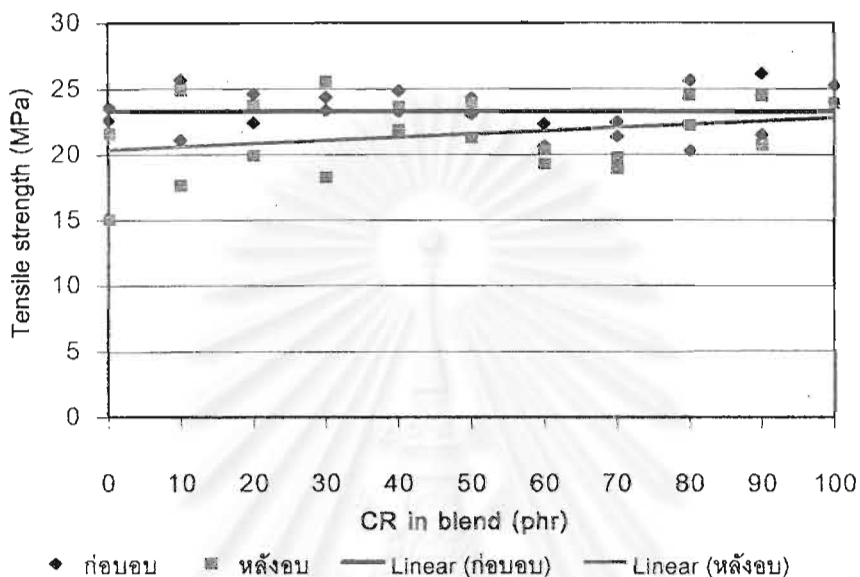
สำหรับยางผสมไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และความยืดเมื่อขาด (Elongation at break) ของยางผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.7 จากรูปที่ 4.4 และ 4.6 พบว่า เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงของยางผสมที่ได้ จะมีแนวโน้มที่ค่อนข้างคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยยางทั้งสองชนิดมีสมบัติทางด้าน strength ที่ใกล้เคียงกันมาก และมีค่าที่ค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนมีโครงสร้างเป็นแบบ Crystalline คือเรียงตัวเป็นระเบียบเมื่อถูกยืดให้ยาว เมื่อนำมาผสมกัน จึงสามารถทนต่อแรงดึงได้ดีและให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนสมบัติด้านความยืดเมื่อขาดพบว่าจะมีแนวโน้มที่ลดลงเนื่องจากยางผสมที่ได้มีความแข็งมากขึ้น

สำหรับยางผสมเติม Homogenizing agent ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และความยืดเมื่อขาด (Elongation at break) ของยางผสมที่อัตราส่วนยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากรูปที่ 4.5 และ 4.7 พบว่า จะให้แนวโน้มเดียวกันกับสูตรยางผสมที่ไม่ได้ทำการเติม Homogenizing agent แต่เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่า การเติม Homogenizing agent ลงไปในยางผสมจะช่วยปรับปรุงสมบัติทั้งสองอย่างให้ดีขึ้น คือมีค่าที่สูงขึ้นได้ เนื่องจาก ยางทั้งสองชนิดสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น สมบัติด้าน strength ของยางจึงดีขึ้น

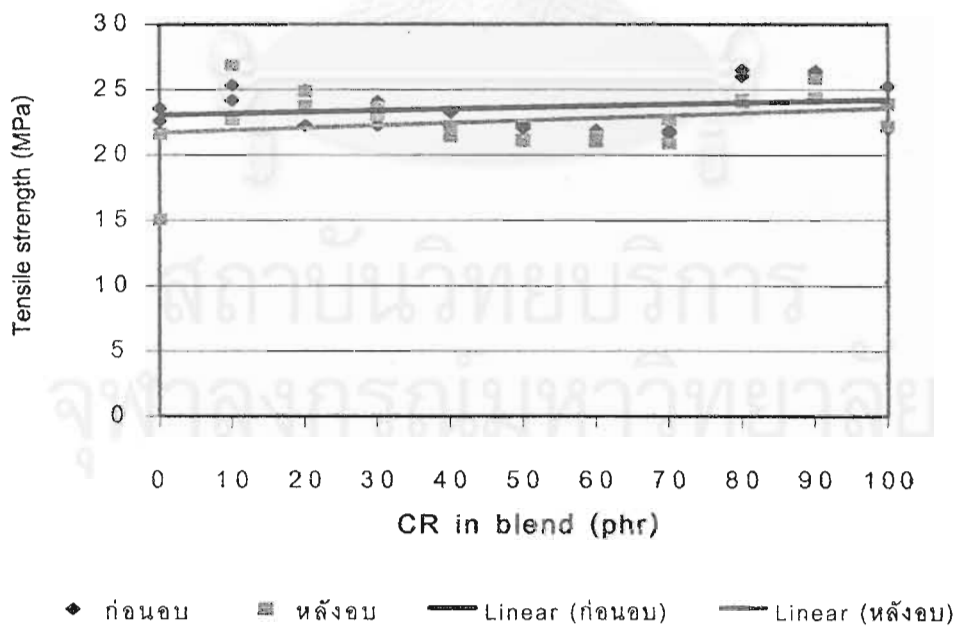
ในส่วนของการอบพบว่า ค่าสมบัติทั้งสองของยางผสมจะมีค่าที่ลดลงหลังจากผ่านกรอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง โดยเฉพาะในอัตราส่วนแรกๆ ที่มีปริมาณของยางธรรมชาติมาก เนื่องจากลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ มีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนโดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ยางเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

นอกจากนี้ในเรื่องของสารตัวเติม จะเห็นว่า การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่เซมาดำบาง ส่วนในสูตรที่ 39 และ 42 ดังตารางที่ 4.10 และ 4.12 ตามลำดับ จะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง

ของยางผสมลดลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตจัดเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง ในขณะที่ไซมาด้า เป็นสารตัวเติมที่ช่วยในการเสริมแรงในยางผสมได้

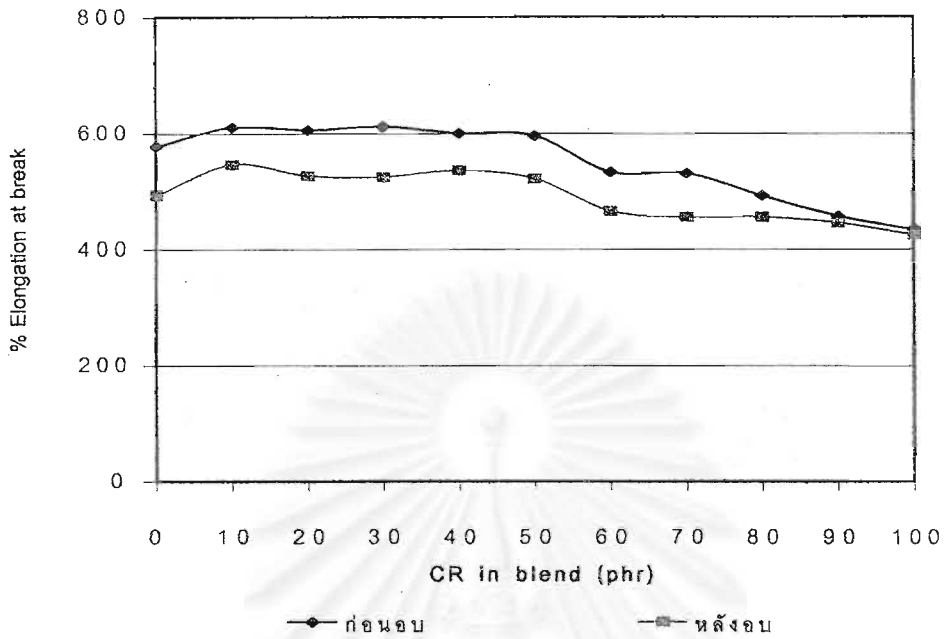


รูปที่ 4.4 ความต้านทานแรงดึงของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent

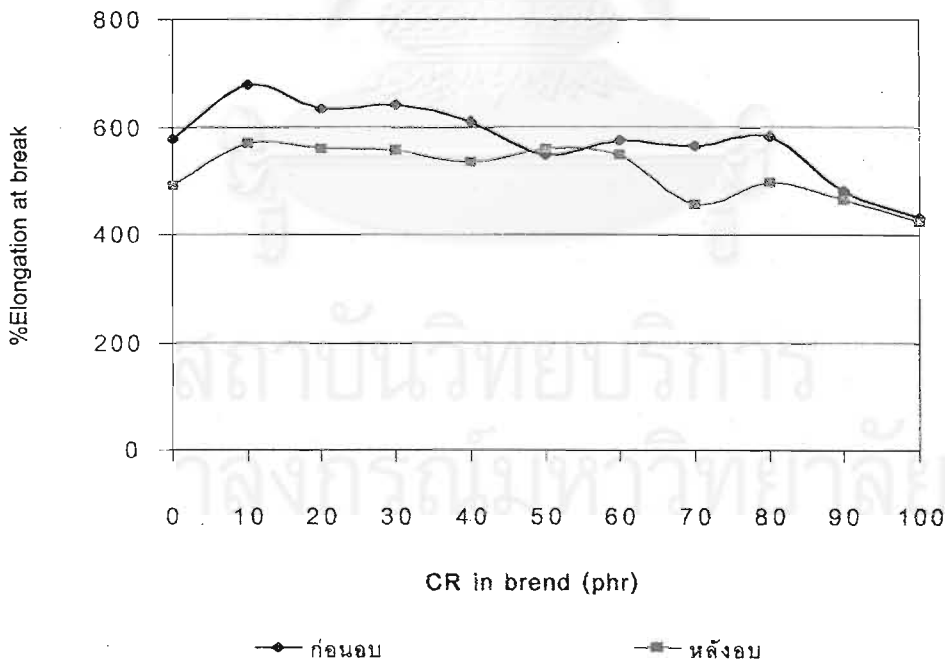


รูปที่ 4.5 ความต้านทานแรงดึงของยางผสมเติม Homogenizing agent





รูปที่ 4.6 ความยืดหยุ่นของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent



รูปที่ 4.7 ความยืดหยุ่นของยางผสมเติม Homogenizing agent

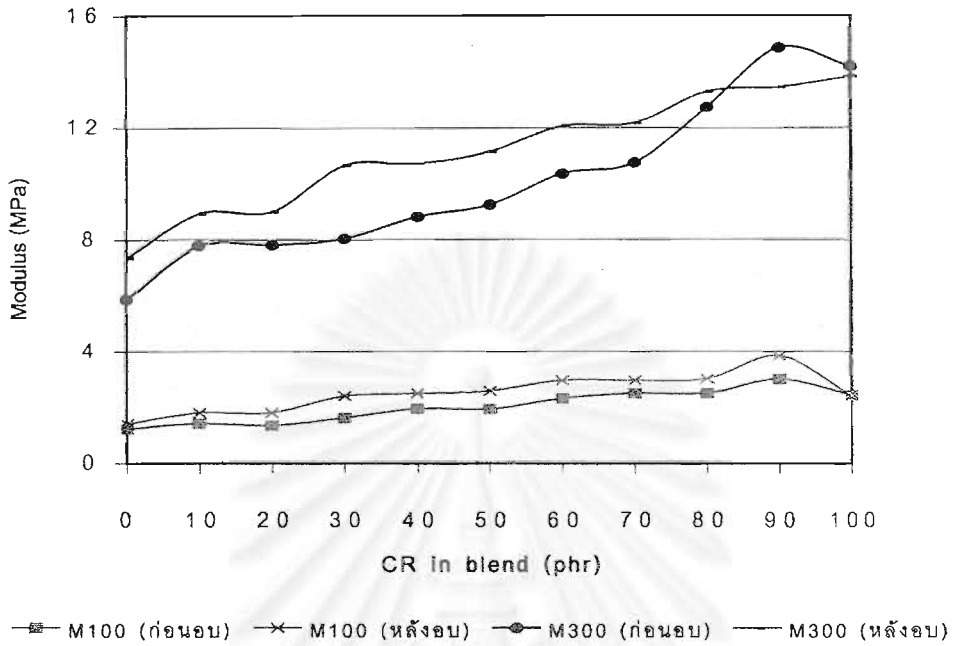
#### 4.3.2 ไมโครลัสของยางผสม

สำหรับยางผสมไม่เติม Homogenizing agent ค่าไมโครลัสของยางผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.7 จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น ค่าไมโครลัสที่การยืด 100% และ 300% จะมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าไมโครลัสของยางหลังผ่านการอบจะมีค่าสูงกว่าไมโครลัสก่อนอบ เนื่องจากยางผสมที่ได้มีความแข็งมากขึ้น โดยค่าไมโครลัสของยางผสมดังกล่าวจะมีค่าที่ค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากความเป็น Crystalline ของยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

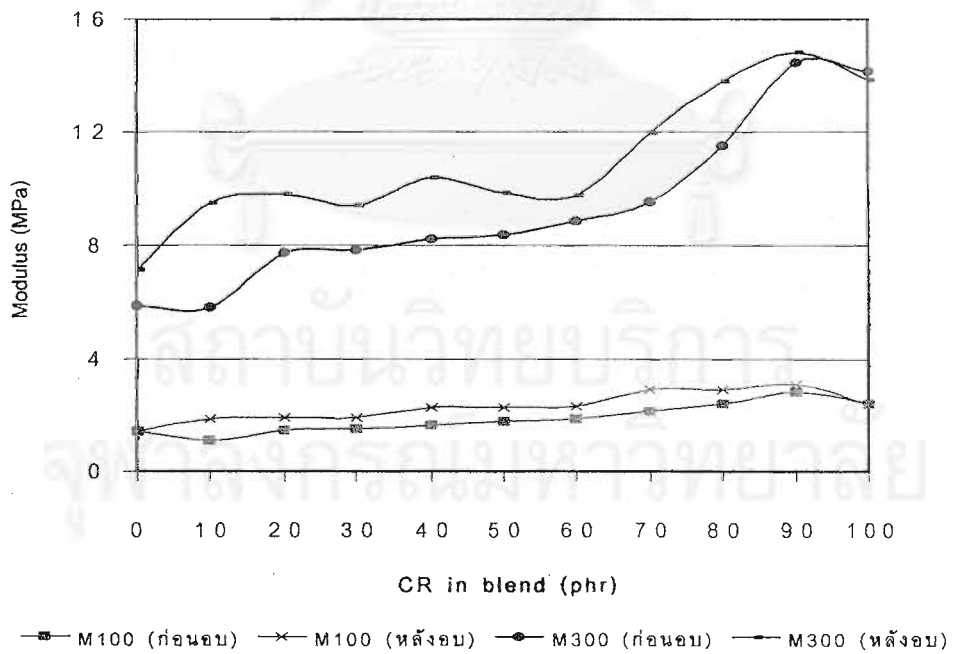
สำหรับยางผสมเติม Homogenizing agent ค่าไมโครลัสของยางผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากรูปที่ 4.9 พบว่าให้แนวโน้มเช่นเดียวกับยางผสมที่ไม่เติม Homogenizing agent คือไมโครลัสมีค่าเพิ่มขึ้นทั้งก่อนและหลังอบ เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ในเรื่องของสารตัวเติม จะเห็นว่า การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่เซม่าดำบางส่วนในสูตรที่ 39 และ 42 ดังตารางที่ 4.10 และ 4.12 ตามลำดับ จะส่งผลให้ค่าไมโครลัสของยางผสมลดลง เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตจัดเป็นสารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง ในขณะที่เซม่าดำเป็นสารตัวเติมที่ช่วยในการเสริมแรงในยางผสมได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 โมดูลัสของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent



รูปที่ 4.9 โมดูลัสของยางผสมเติม Homogenizing agent

#### 4.4 การยุบตัว

สมบัติการยุบตัวของยางผสม คือ สมบัติในการคงสภาพความเป็นอีลาสติกของยางภายใต้ความเค้นอัด (Compression set) อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง โดยใช้เครื่อง Compression set Method B ซึ่งเป็นการหาเปอร์เซ็นต์การยุบตัวของชิ้นทดสอบ ถ้ายางมีค่าการยุบตัวต่ำ แสดงว่ามีการคืนตัวดี ถ้าค่าการยุบตัวมากแสดงว่ายางมีการคืนตัวไม่ดี

สำหรับยางผสมไม่เติม Homogenizing agent ค่าการยุบตัวของยางผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.7 จากรูปที่ 4.10 พบว่า ค่าการยุบตัวของยางมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมมากขึ้นเนื่องจากความแข็งของยางที่เพิ่มขึ้น ทำให้ยางมีการคืนตัวที่ไม่ดี ค่าการยุบตัวจึงสูง

สำหรับยางผสมเติม Homogenizing agent ค่าการยุบตัวของยางผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากรูปที่ 4.10 ให้แนวโน้มเช่นเดียวกันกับยางผสมที่ไม่เติม Homogenizing agent แต่เมื่อพิจารณาจะเห็นว่า การเติม Homogenizing agent มีผลทำให้การยุบตัวของยางที่อัตราส่วนการผสมเดียวกันมีค่าที่ลดต่ำลงได้ เนื่องจากยางผสมมีความเข้าเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และการกระจายตัวของเขม่าดำเกิดได้ดีขึ้น

ขนาดอนุภาคของเขม่าดำเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 โดยสามารถเรียงลำดับเขม่าดำทั้งสามชนิดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตามขนาดของอนุภาคได้ดังนี้

$$N330 < N550 < N660$$

สมบัติด้านการยุบตัวของยาง (Compression set) ก็ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของเขม่าดำเช่นกัน คือ ในการใช้เขม่าดำปริมาณเท่ากัน เขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า จะให้ผลในการเสริมแรงได้น้อยกว่าเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า ส่งผลให้ยางที่ใช้สารเสริมแรงเป็นเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเมื่อถูกกดอัดและเกิดการยุบตัวแล้ว จะมีการคืนตัวที่ดีกว่า ค่า Compression set จึงต่ำกว่า ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองจะเห็นว่า การใช้เขม่าดำชนิด N660 จะให้ค่าการยุบตัวที่ต่ำที่สุดเนื่องจากมีขนาดอนุภาคใหญ่ที่สุด

ปริมาณของเขม่าดำที่ใช้มีผลต่อการยุบตัวเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.12 พบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำที่ใช้เพิ่มขึ้น สมบัติด้านการยุบตัวของยางผสมจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเป็นอิลาสติกของยางผสมลดลง เมื่อกดอัดแล้วยางยุบตัวลงและคืนตัวได้น้อย ค่า Compression set จึงสูงขึ้น

ในส่วนของระบบที่ใช้ในการคงรูปก็มีผลต่อการยุบตัวของยางเช่นกัน ในงานวิจัยนี้ การทดลองตอนที่ 1 และ 2 ใช้ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV system) ส่วนการทดลองตอนที่ 3 ใช้ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV system) ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การใช้ EV system ทำให้ค่าการยุบตัวมีค่าต่ำกว่าการใช้ระบบการคงรูปแบบอื่น ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี ทั้งนี้ W. Hoffman [47] ได้อธิบายไว้ว่า สัดส่วนของซัลเฟอร์ต่อสารตัวเร่งมีความสำคัญ เพราะเป็นตัวกำหนดชนิดของพันธะเคมีที่เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลต่อระบบการคงรูปของยาง โดยสามารถแบ่งได้ ดังนี้

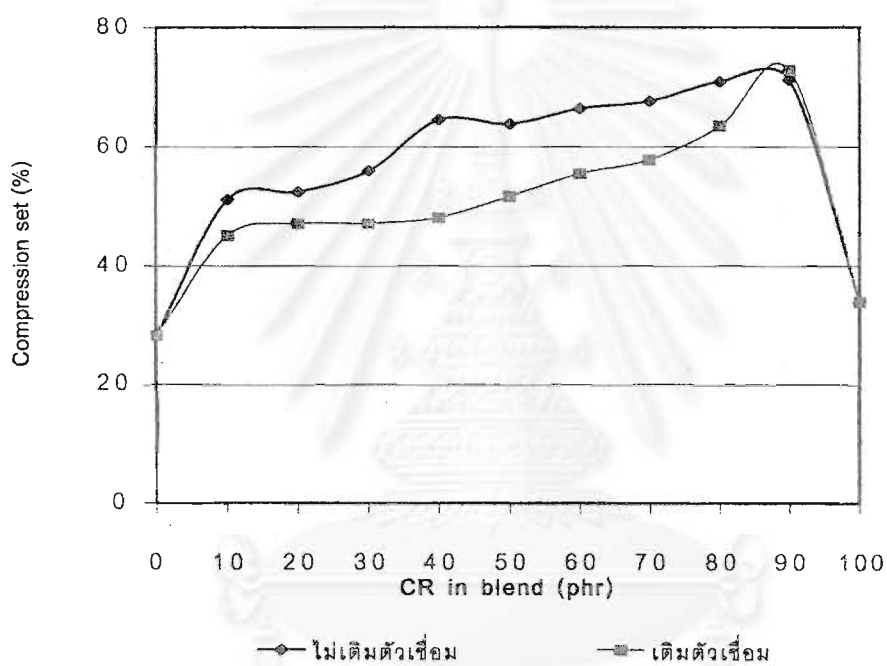
(1) ระบบธรรมดา (Conventional system, CV) ใช้ปริมาณซัลเฟอร์มาก คือ 2.0-3.5 phr และใช้สารตัวเร่งน้อย คือ 0.3-1.0 phr การคงรูประบบนี้เมื่อยางคงรูปเต็มที่ (optimum vulcanisation) จะเกิดพันธะเคมีแบบ polysulphide crosslinks และแบบ cyclic or chain modification

(2) ระบบประสิทธิภาพ (Efficient vulcanisation, EV system) ใช้ซัลเฟอร์น้อยคือ 0.25-0.8 phr ร่วมกับสารตัวเร่งปริมาณมาก คือ 2.1-5.0 phr การคงรูประบบนี้เมื่อยางคงรูปเต็มที่ ส่วนใหญ่เกิดพันธะเคมีแบบ monosulphide crosslinks และอาจเกิดแบบ chain modification บ้างเล็กน้อย

(3) ระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV system) เป็นระบบที่ใช้ปริมาณของซัลเฟอร์และสารตัวเร่งอยู่ระหว่างระบบทั้งสองข้างต้น คือ ใช้ซัลเฟอร์ประมาณ 1.0-2.0 phr ร่วมกับสารตัวเร่งประมาณ 1.0-2.5 phr

พันธะเคมีแบบ polysulphide ซึ่งมักเกิดขึ้นในระบบการคงรูปแบบ CV และ Semi-EV นั้น จะให้สมบัติทางกายภาพทั่วไปดี เช่น สมบัติความต้านทานต่อการดึง (tensile) การฉีกขาด การล้าตัว และการทนต่อการตกผลึก หรือการเรียงตัวของสายโมเลกุลยางที่อุณหภูมิต่ำ (low-temperature crystallisation) แต่พันธะแบบนี้จะทำให้ยางสูญเสียสมบัติความแข็งแรงต่างๆ เมื่ออบคงรูปไปนาน (overcure) และไม่ทนต่อการเสื่อมอายุเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังมีข้อเสียคือ ให้สมบัติการยุบตัวที่สูง (high compression set) ส่วนพันธะเคมีแบบ monosulphide ซึ่งเกิดขึ้นในระบบการคงรูปแบบ EV จะมีความเสถียรต่อความร้อนได้ดี ดังนั้นระบบการคงรูปแบบนี้จึงทนทาน

ต่อการเชื่อมเมื่อให้ความร้อนในการคงรูปนานและทนต่อการเสื่อมอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยังให้สมบัติด้านการยุบตัวที่ดี คือ มีค่าการยุบตัวต่ำที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการยุบตัวของยางผสม

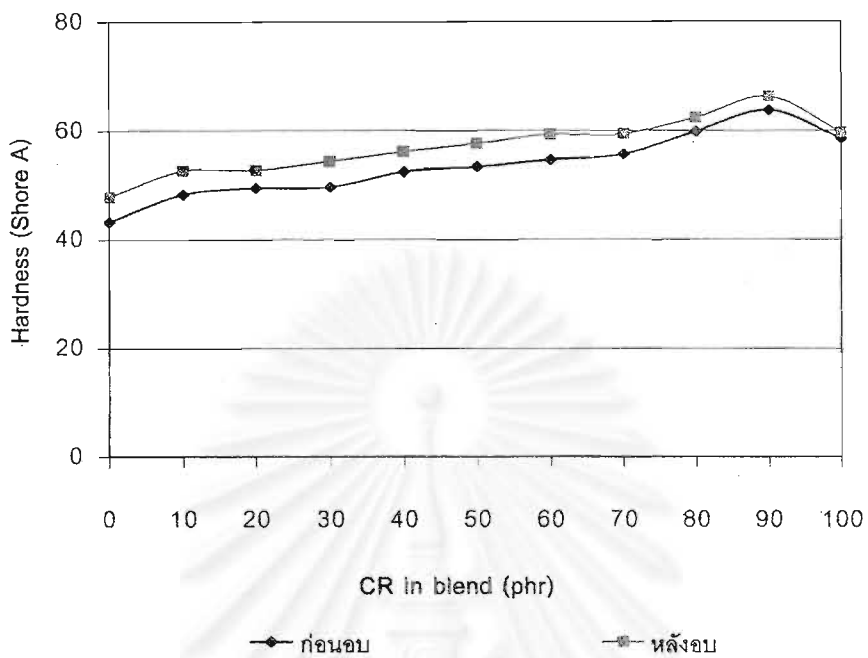
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.5 ความแข็ง

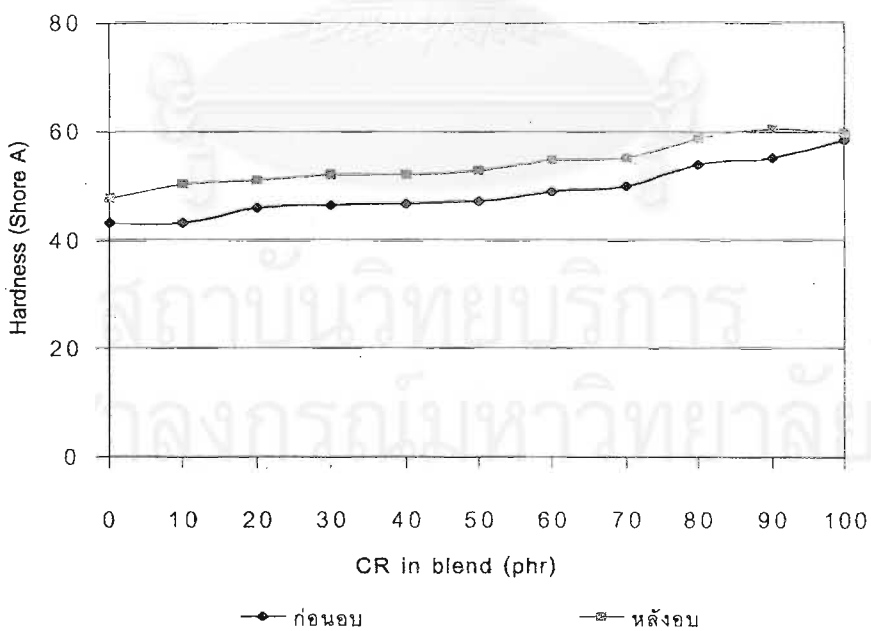
ความแข็งของยางผสมที่ไม่เติม Homogenizing agent ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ กับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.7 จากรูปที่ 4.11 พบว่า ความแข็งของยางผสมเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางผสมมีความแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อนำชิ้นทดสอบไปทำการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 22 ชั่วโมง พบว่า ค่าความแข็งของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นจากก่อนอบ

สำหรับความแข็งของยางผสมเติม Homogenizing agent ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติ กับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากรูปที่ 4.12 พบว่า ให้แนวโน้มเช่นเดียวกันกับยางผสมที่ไม่เติม Homogenizing agent ทั้งก่อนและหลังอบ โดยเมื่อพิจารณาดูจะเห็นว่า การเติม Homogenizing agent ลงในยางผสมจะส่งผลให้ความแข็งของยางผสมที่อัตราส่วนเดียวกันลดลงได้ เนื่องจากยางผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น ความแข็งจึงลดลง

ปริมาณเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นสามารถส่งผลให้ค่าความแข็งของยางผสมเพิ่มขึ้นได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.12 การที่ยางผสมแข็งขึ้นได้ เนื่องจาก ปริมาณของเขม่าดำที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความเป็นอิลาสติกของยางผสมลดลงได้ ยางจึงมีความแข็งเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 ความแข็งของยางผสมไม่เติม Homogenizing agent



รูปที่ 4.12 ความแข็งของยางผสมเติม Homogenizing agent

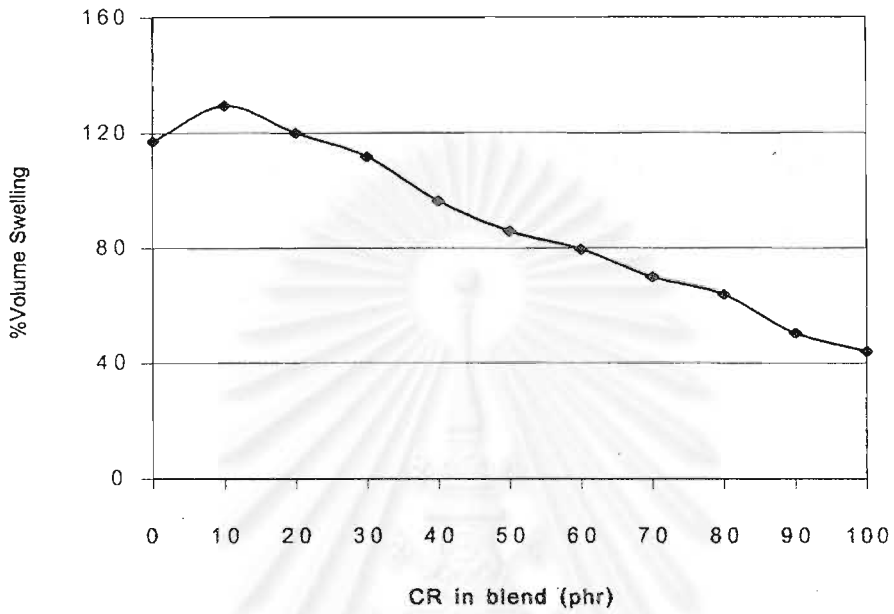


#### 4.6 ความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับน้ำมันหรือจาระบี

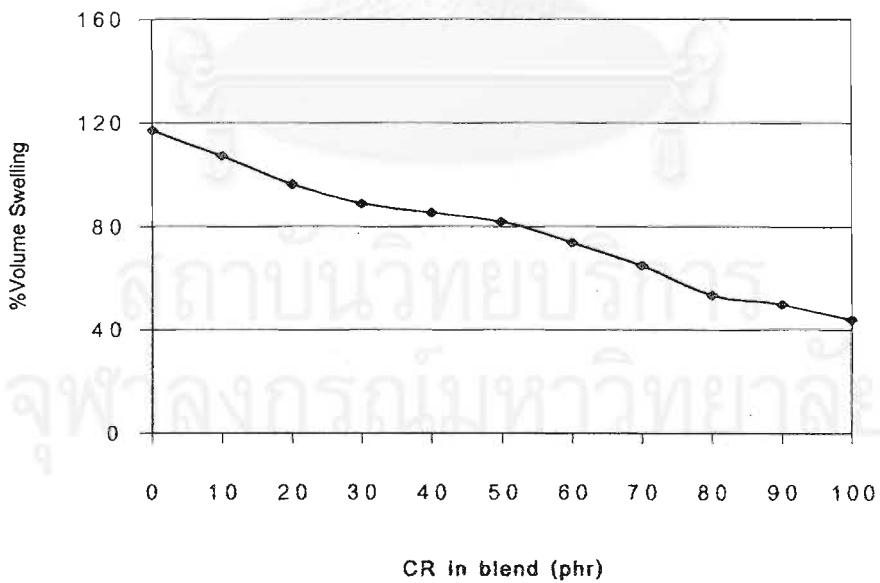
ทำการวัดออกมาในรูปของเปอร์เซ็นต์การบวมตัว หรือเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร (% Volume swelling : % $\Delta V$ )

% Volume swelling ของยางผสมที่ไม่เติม Homogenizing agent ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.7 จากรูปที่ 4.13 พบว่า ค่าการบวมตัวของยาง (% Volume swelling) จะลดลงเมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น นั่นคือ ยางผสมจะมีความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับน้ำมันหรือจาระบี (Fluid Resistance) มากขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวจึงลดลง เนื่องจากยางพอลิคลอโรพรีนมีสมบัติในการทนต่อการสัมผัสกับน้ำมันหรือจาระบี เพราะมีส่วนของคลอรีนในโครงสร้างโมเลกุลซึ่งทำให้ยางพอลิคลอโรพรีนเป็นยางที่มีขั้ว จึงไม่ละลายเข้ากับน้ำมันและจาระบีซึ่งไม่มีขั้ว ในขณะที่ยางธรรมชาติซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นยางที่ไม่มีขั้วจึงสามารถละลายเข้ากับน้ำมันและจาระบีได้ คือไม่มีสมบัติในการทนน้ำมันและจาระบี ดังนั้นในยางผสมที่มีอัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมมากจึงมีแนวโน้มที่จะทนต่อการบวมตัวได้ดีกว่า

สำหรับยางผสมที่ไม่เติม Homogenizing agent ที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 100 : 0, 90 : 10, 80 : 20, 70 : 30, 60 : 40, 50 : 50, 40 : 60, 30 : 70, 20 : 80, 10 : 90, 0 : 100 phr ดังแสดงในตารางที่ 4.8 จากรูปที่ 4.14 พบว่า ให้แนวโน้มเช่นเดียวกันกับยางผสมที่ไม่เติม Homogenizing agent แต่เมื่อพิจารณาดูจะเห็นว่าที่อัตราส่วนการผสมเดียวกัน การเติม Homogenizing agent ลงไปจะส่งผลให้ค่า % Volume swelling ลดลงได้เล็กน้อย เนื่องจากยางทั้งสองชนิดผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น จึงมีความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับน้ำมันและจาระบีได้มากขึ้น



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยางผสมไม่เต็ม Homogenizing agent



รูปที่ 4.14 เปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยางผสมเต็ม Homogenizing agent

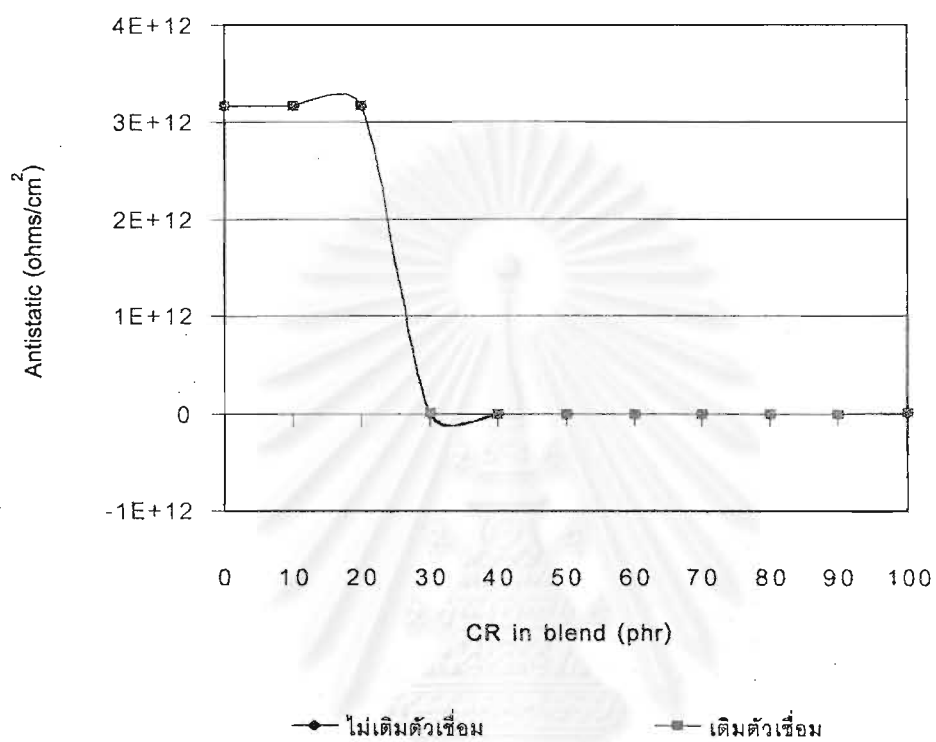
#### 4.7 ความต้านทานไฟฟ้าสถิตย์

เป็นการวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic) ของยางผสมโดยใช้เครื่องวัดความต้านทาน VOYAGER ที่ระบุช่วงความต้านทานเป็น 3 ช่วง ดังนี้

- (1) Conductive ความต้านทานตั้งแต่  $10^4$ - $10^5$  ohms/cm<sup>2</sup> เป็นช่วงที่นำไฟฟ้าได้
- (2) Static dissipative ความต้านทานตั้งแต่  $10^6$ - $10^{12}$  ohms/cm<sup>2</sup> นำไฟฟ้าเล็กน้อย
- (3) Insulative ความต้านทานมากกว่า  $10^{12.5}$  ohms/cm<sup>2</sup> ไม่นำไฟฟ้า

สำหรับยางผสมที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน (NR:CR) คือ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90, 0:100 phr ทั้งเติมและไม่เติม Homogenizing agent ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 จากรูปที่ 4.15 พบว่าสมบัติด้าน Antistatic ของยางผสมจะลดลงเมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มมากขึ้น นั่นคือ ยางผสมมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงมีสมบัติในการกันฝุ่น คือ ไม่จับฝุ่นที่ผิวยาง เนื่องจาก ยางพอลิคลอโรพรีนมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้เล็กน้อย คือ อยู่ในช่วง Static dissipative เพราะภายในโครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยส่วนของคลอรีน ซึ่งช่วยในการนำไฟฟ้าได้ ในขณะที่ยางธรรมชาติมีสมบัติในด้านความต้านทานการนำไฟฟ้าสูง คือ อยู่ในช่วง Insulative

ในส่วนของสารตัวเติมที่ใช้จะเห็นว่าส่งผลต่อค่า Antistatic ได้เช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.13 จากตาราง พบว่า ค่า Antistatic ของยางผสมสูตรที่ใช้เขม่าดำเป็นสารตัวเติมจะมีค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ Static dissipative เนื่องจากเขม่าดำจัดเป็นสารตัวเติมที่มีสมบัติในการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ ในขณะที่การใช้สารตัวเติมเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตจะให้ค่า Antistatic ของยางผสมค่อนข้างไปในช่วง Insulative เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมที่ไม่มีสมบัติในการเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า



รูปที่ 4.15 ค่าความต้านทานการนำไฟฟ้าของยางผสม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.8 ความต้านทานต่อการสัมผัสกับโอโซน

เป็นการวัดความสามารถของยางผสมในการทนต่อการสัมผัสกับโอโซนในสภาวะนิ่ง (Static) ที่ค่าการยืด 20 % ภายใต้สภาวะความเข้มข้นของโอโซนเป็น 50 pphm อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

สำหรับยางผสมที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน (NR:CR) คือ 100:0, 90:10, 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60, 30:70, 20:80, 10:90, 0:100 phr ทั้งที่เติมและไม่เติม Homogenizing agent ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า ค่าความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับโอโซนของยางผสมเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางพอลิคลอโรพรีนมีลักษณะโครงสร้างเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว มีส่วนของคลอรีนอยู่ภายใน ทำให้ยางพอลิคลอโรพรีนมีพันธะคู่ที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงมีความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับโอโซนได้ในระดับหนึ่ง ในขณะที่ยางธรรมชาติซึ่งมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเป็นยางที่ไม่มีขั้วและมีพันธะคู่ที่ไม่อิ่มตัว ว่องไวต่อปฏิกิริยา จึงเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศและโอโซนได้ง่าย ทำให้ไม่มีสมบัติในการทนต่อการสัมผัสกับโอโซน

นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาดูจะเห็นว่า การเติม Homogenizing agent ลงไปในยางผสม จะช่วยให้ความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับโอโซนดีขึ้นได้เล็กน้อย คือสามารถทนต่อโอโซนได้มากขึ้นเนื่องจากการผสมกันของยางทั้งสองชนิดเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.9 สัณฐานวิทยาของยางผสม

สัณฐานวิทยา (Morphology) ของยางผสม สามารถศึกษาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อทำการศึกษากาการผสมกันของยางสองชนิด ในที่นี้คือยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีน ว่าผสมเข้ากันได้ดีเพียงใด รวมถึงศึกษาผลของการใช้ Homogenizing agent

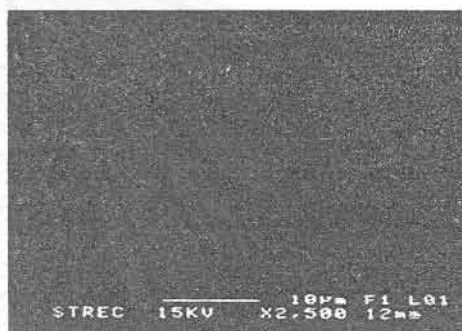
ในการทดลองนี้ เป็นการศึกษาสัณฐานวิทยาของยางผสมที่มีปริมาณอัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีนไม่เติม Homogenizing agent (NR : CR) คือ 90 : 10, 30 : 70 phr และยางผสมเติม Homogenizing agent (NR : CR) คือ 90 : 10, 40 : 60 phr นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาในส่วนของคุณสมบัติของยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนอีกด้วย ซึ่งขึ้นตัวอย่างที่ทำการศึกษาได้จากการตัดชิ้นทดสอบการบวมตัวด้วยจาระบี ดังรูปที่ 4.16 แสดงลักษณะ Morphology ของยางสูตรควบคุมยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนที่กำลังขยาย 2500 เท่า รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แสดงลักษณะ Morphology ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนที่อัตราส่วนคือ 90 : 10 phr กำลังขยาย 20 เท่าและ 2500 เท่าตามลำดับ และรูปที่ 4.19 แสดงลักษณะ Morphology ของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนที่กำลังขยาย 800 เท่า จากรูปดังกล่าว พบว่า phase size ของยางสูตรควบคุมยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนจะมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดและดีของยางในส่วนยางพอลิคลอโรพรีนจะมีสีที่เข้มกว่า ซึ่ง A. J. Tinker [19] ได้อธิบายไว้ว่าการที่มีสีเข้มนี้เกิดจากการที่มีคลอรีนในโมเลกุลของยางพอลิคลอโรพรีน

เมื่อทำการพิจารณาในส่วนของยางผสมที่อัตราส่วนเดียวกัน คือ NR : CR คือ 90 : 10 phr ไม่เติม Homogenizing agent ตามสูตรที่ 15 และที่เติม Homogenizing agent ตามสูตรที่ 23 ที่กำลังขยาย 20 เท่าและ 2500 เท่าตามรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนการผสมเดียวกัน การเติม Homogenizing agent ลงไปจะช่วยให้ยางผสมเข้ากันได้ดีขึ้น มีการแยกเฟสลดลง สังเกตได้จากรอยแตกที่เกิดเนื่องจากการบวมตัว และลักษณะการกระจายตัวของเฟสของยางทั้งสองชนิด คือยางที่เติม Homogenizing agent จะมีรอยแตกละเอียดกว่าและมีการกระจายตัวของยางทั้งสองเฟสที่ดีกว่า ซึ่งผลการทดลองในส่วนนี้สามารถนำไปอธิบายและยืนยันต่อค่าสมบัติต่าง ๆ ได้ว่า การเติม Homogenizing agent จะช่วยให้ยางทั้งสองชนิดผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น

ในส่วนของยางผสมที่อัตราส่วนต่างกัน พิจารณาจากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่าในส่วนของยางผสมที่ไม่เติม Homogenizing agent ดังภาพที่ (1) และ (2) และส่วนของยางผสมเติม Homogenizing agent ดังภาพที่ (3) และ (4) ทั้งสองแบบจะให้แนวโน้มที่เหมือนกันคือ เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรไพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น ความสามารถในการทนต่อสัมผัสกับน้ำมันและจาระบีจะเพิ่มขึ้น พิจารณาจากรอยแตก นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบในเรื่องของการเติม Homogenizing agent ก็จะทำให้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลข้างต้น คือ การเติม Homogenizing agent จะช่วยให้ยางผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น



(1)

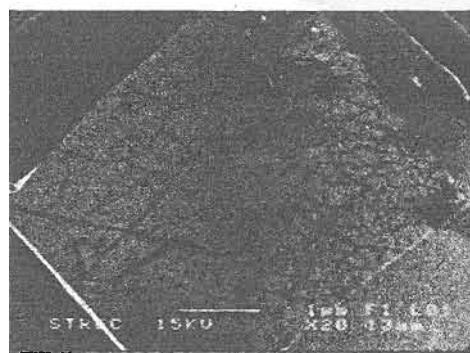


(2)

รูปที่ 4.16 สัณฐานวิทยาของยางสูตรควบคุม กำลังขยาย 2500 เท่า

(1) ยางธรรมชาติ

(2) ยางพอลิคลอโรไพรีน



(1)



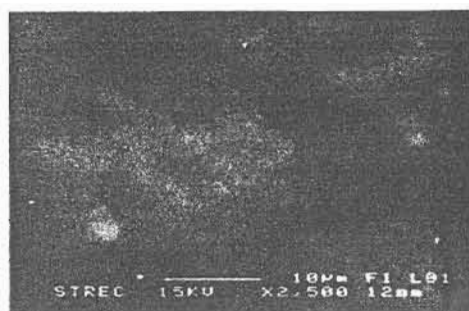
(2)

รูปที่ 4.17 สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรไพรีน

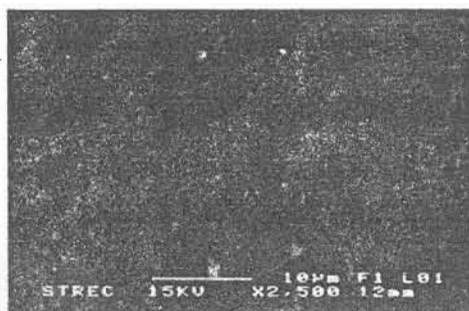
ที่อัตราส่วน NR : CR คือ 90 : 10 phr กำลังขยาย 20 เท่า

(1) ไม่เติม Homogenizing agent

(2) เติม Homogenizing agent



(1)



(2)

รูปที่ 4.18 สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน

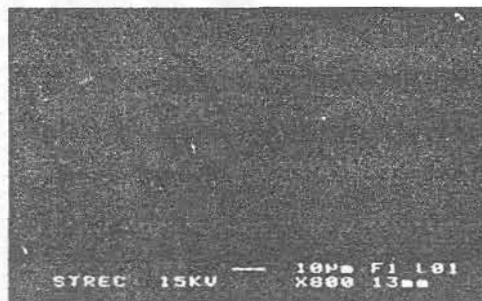
ที่อัตราส่วน NR : CR คือ 90 : 10 phr กำลังขยาย 2500 เท่า

(1) ไม่เติม Homogenizing agent

(2) เติม Homogenizing agent



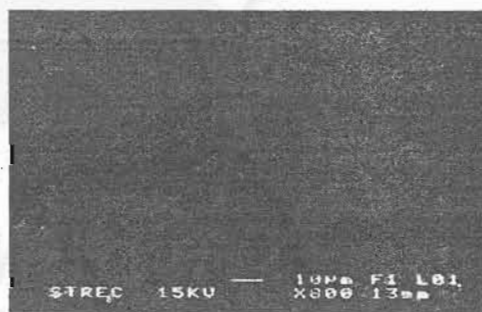
(1)



(2)



(3)



(4)

รูปที่ 4.19 สัณฐานวิทยาของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน กำลังขยาย 800 เท่า

(1) NR : CR คือ 90 : 10 phr ไม่เติม Homogenizing agent

(2) NR : CR คือ 30 : 70 phr ไม่เติม Homogenizing agent

(3) NR : CR คือ 90 : 10 phr เติม Homogenizing agent

(4) NR : CR คือ 40 : 60 phr เติม Homogenizing agent



#### 4.10 ผลของอัตราส่วนในการผสมยางและผลจากการใช้ Homogenizing agent ต่อค่าโมดูลัสสโตเรจ โมดูลัสสูญเสีย อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) และ $\tan \delta$ ของยางผสม

การศึกษาสมบัติของยางธรรมชาติผสมยางพอลิคลอโรพรีนที่อัตราส่วนต่างๆ ด้วยการทดสอบตามวิธี DMTA (Dynamic Mechanical Thermal Analysis) สามารถบอกสมบัติของยางผสมได้แก่ค่าโมดูลัสสโตเรจ โมดูลัสสูญเสีย อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) และ  $\tan \delta$  โดยการทดสอบสมบัติของยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนในสูตรควบคุมยางผสมที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีนเป็น 30 : 70 phr ไม่เติม Homogenizing agent และ 40 : 60 phr เติม Homogenizing agent

ค่าโมดูลัสสโตเรจ (Storage modulus) หรือ  $G'$  เป็นค่าที่แสดงถึง พลังงานสะสมในวัสดุที่ยืดหยุ่น (stored elastic energy in material) โดย

- รูปที่ 4.20 เป็นค่า  $G'$  ของสูตรควบคุมยางพอลิคลอโรพรีน (สูตรที่ 7) ช่วง glassy region คือ -100 ถึง -40 องศาเซลเซียส ช่วง transition region คือ -40 ถึง -20 องศาเซลเซียส และช่วง rubber plateau คือ -20 ถึง 50 องศาเซลเซียส
- รูปที่ 4.21 เป็นค่า  $G'$  ของสูตรควบคุมยางธรรมชาติ (สูตรที่ 10) ช่วง glassy region คือ -100 ถึง -70 องศาเซลเซียส ช่วง transition region คือ -70 ถึง -40 องศาเซลเซียส และช่วง rubber plateau คือ -40 ถึง 50 องศาเซลเซียส
- รูปที่ 4.22 เป็นค่า  $G'$  ของยางผสมที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน คือ 30 : 70 ไม่เติม Homogenizing agent (สูตรที่ 38) ช่วง glassy region คือ -100 ถึง -60 องศาเซลเซียส ช่วง transition region คือ -60 ถึง -20 องศาเซลเซียส และช่วง rubber plateau คือ -20 ถึง 50 องศาเซลเซียส
- รูปที่ 4.23 เป็นค่า  $G'$  ของยางผสมที่อัตราส่วนยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน คือ 40 : 60 เติม Homogenizing agent (สูตรที่ 38) ช่วง glassy region คือ -100 ถึง -60 องศาเซลเซียส ช่วง transition region คือ -60 ถึง -20 องศาเซลเซียส และช่วง rubber plateau คือ -20 ถึง 50 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.20 ถึง 4.23 จะเห็นว่า ค่าโมดูลัสสโตเรจจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงจากช่วง glassy region เป็น transition region เกิดเนื่องจาก ค่า  $G'' > G'$  เมื่อ

อุณหภูมิสูงขึ้น และมีแรงกระทำต่อแบบซ้ำๆ กัน (dynamic mechanical) ทำให้สายโมเลกุลของยางเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนในช่วง rubber plateau พบว่า ค่าโมดูลัสสโตเรซ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสำหรับทุกสูตรของยางผสม โดยมีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเป็นค่าที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะของยางผสมจาก glassy region เป็น rubbery region

ค่าโมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus) หรือ  $G''$  คือ พลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อน (energy dissipated as heat) จากรูปที่ 4.20 ถึง 4.23 จะเห็นว่าค่าโมดูลัสสูญเสีย มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าสโตเรซโมดูลัส

ผลของอัตราส่วนการผสมและการเติม Homogenizing agent กับค่า dynamic mechanical properties พิจารณาได้จากค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะของยางผสมจาก glassy region เป็น rubbery region และค่า  $\tan \delta$  (Loss tangent) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าโมดูลัสสูญเสียกับค่าโมดูลัสสโตเรซ ( $G''/G'$ ) ดังรูปที่ 4.20 ถึง 4.23 จากรูปจะเห็นว่า  $\tan \delta$  เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่ทำการทดสอบ ซึ่งค่า  $\tan \delta$  จะเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง transition region และพบว่า

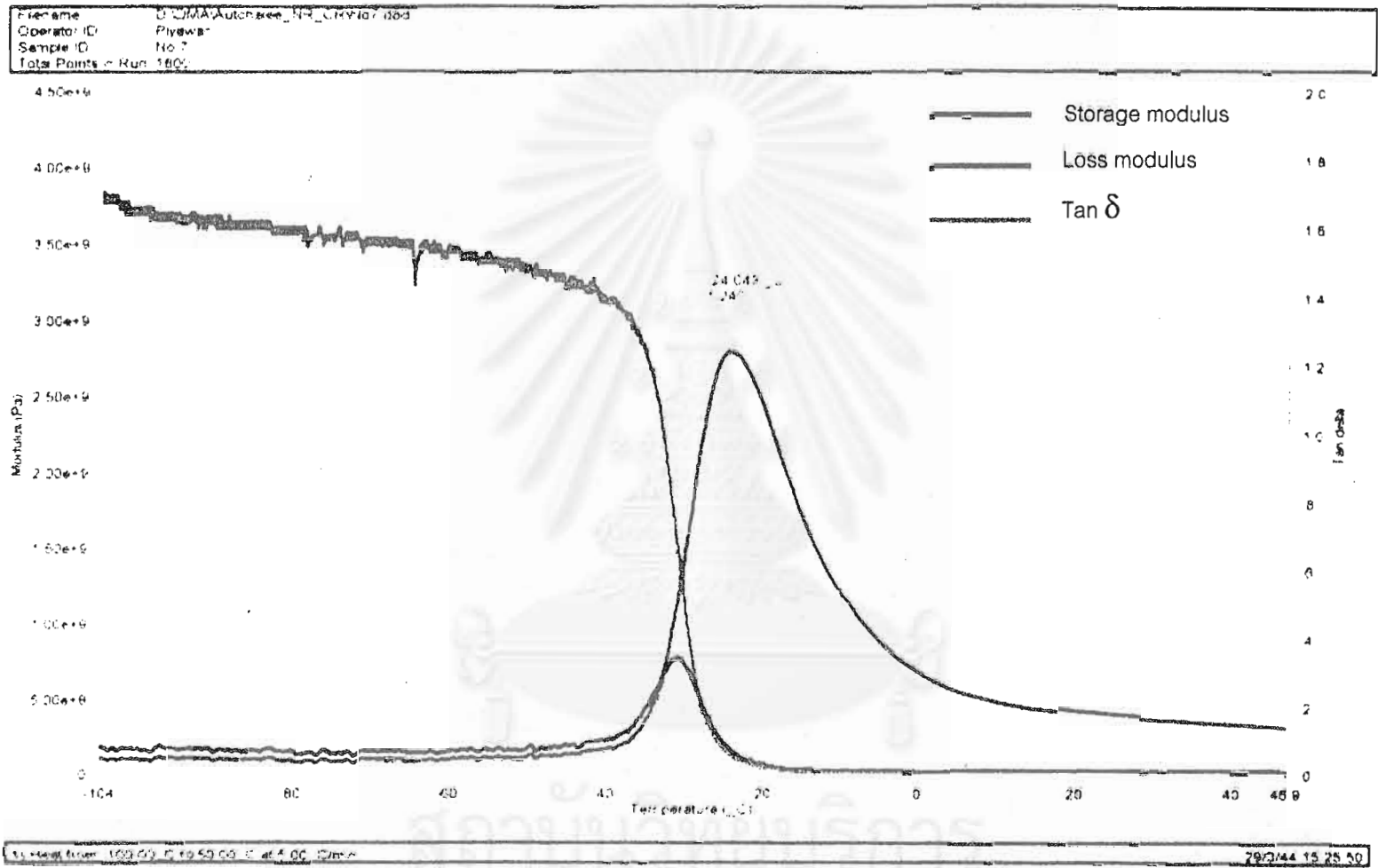
เมื่ออัตราส่วนของยางผสมต่างกัน ค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta$  ของยางผสมจะต่างกันด้วย แสดงดังตารางที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่า

- สำหรับสูตรควบคุมยางพอลิคลอโรพรีน (สูตร 7) และสูตรควบคุมยางธรรมชาติ (สูตร 10) ดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ จะมีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta$  เพียงค่าเดียว โดยลักษณะของ peak ที่ได้จะค่อนข้างแคบและปลายแหลม
- สำหรับสูตรยางผสม ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 เป็นการทดสอบยางผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีน เป็น 30 : 70 และ 40 : 60 phr (สูตรที่ 38 และ 41 ตามลำดับ) จะมีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) และค่า  $\tan \delta$  2 ค่า คือส่วนของยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนแยกออกจากกัน แสดงว่ายางทั้งสองชนิดผสมเข้ากันได้ไม่ดีนัก เนื่องจากยางทั้งสองชนิดมีความต่างขั้วกันจึงผสมเข้ากันได้ยาก โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกันจะพบว่า ในสูตรที่ 41 ที่ทำการเติม Homogenizing agent จะมีความแตกต่างของค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) น้อยกว่าในสูตรที่ 38 ที่ไม่ได้ทำการเติม Homogenizing agent ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าการใช้ Homogenizing agent จะช่วยให้ยางทั้งสองผสมเข้ากันได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.15 อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Tg) และ Tan  $\delta$  ของยางผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ

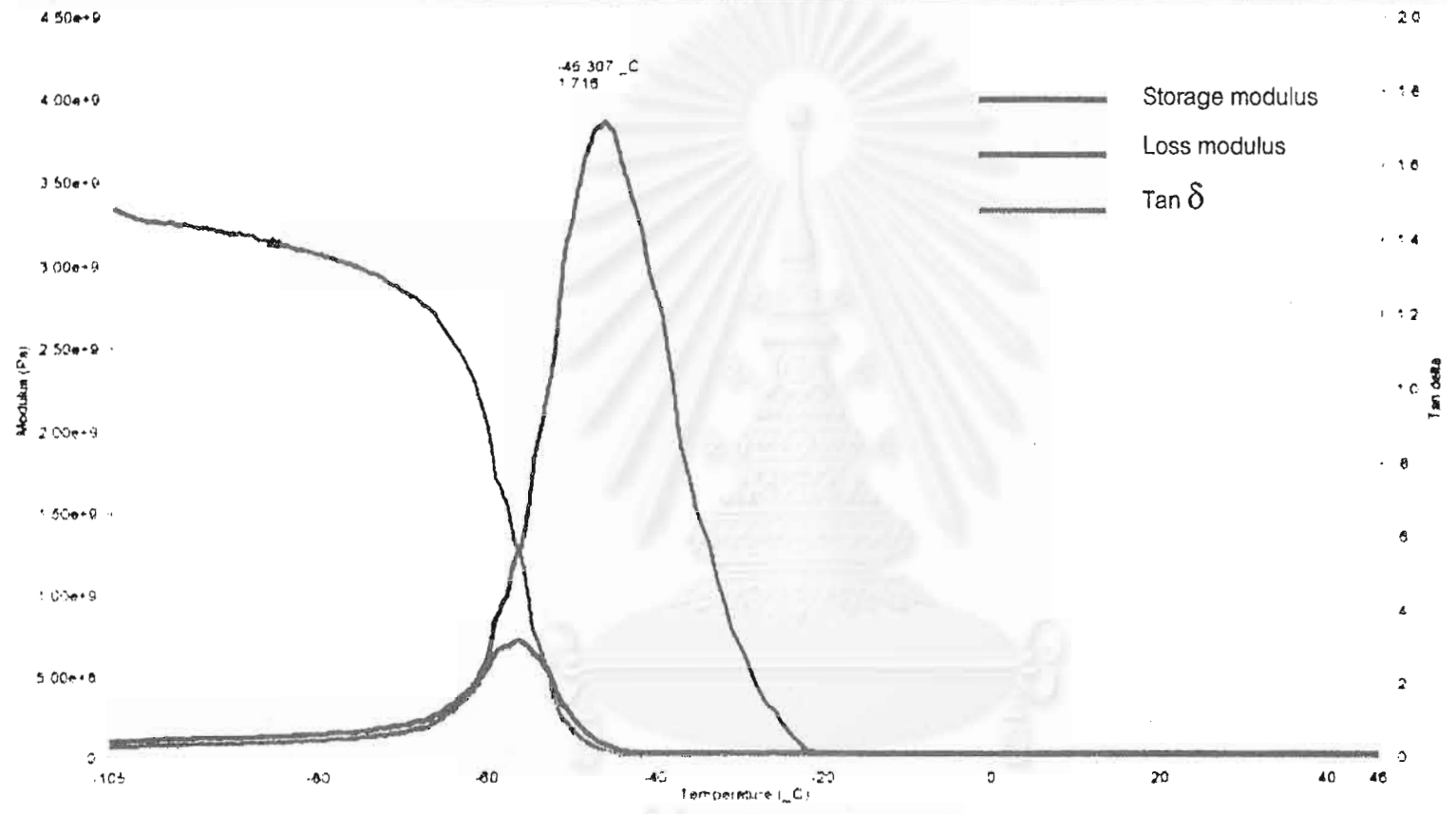
สูตร	Tan $\delta$	อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (Tg)	ผลต่างของค่า Tg
สูตรควบคุมยางพอลิคลอโรพรีน (สูตร 7)	1.240	-24.043	-
สูตรควบคุมยางธรรมชาติ (สูตร 10)	1.716	-46.307	-
สูตรยางผสม NR/CR คือ 30/70 ไม่เติม Homogenizing agent (สูตร 38)	0.201, 1.065	-53.910 , -23.647	-30.263
สูตรยางผสม NR/CR คือ 40/60 เติม Homogenizing agent (สูตร 41)	0.239, 1.180	-49.395 , -23.683	-25.712

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



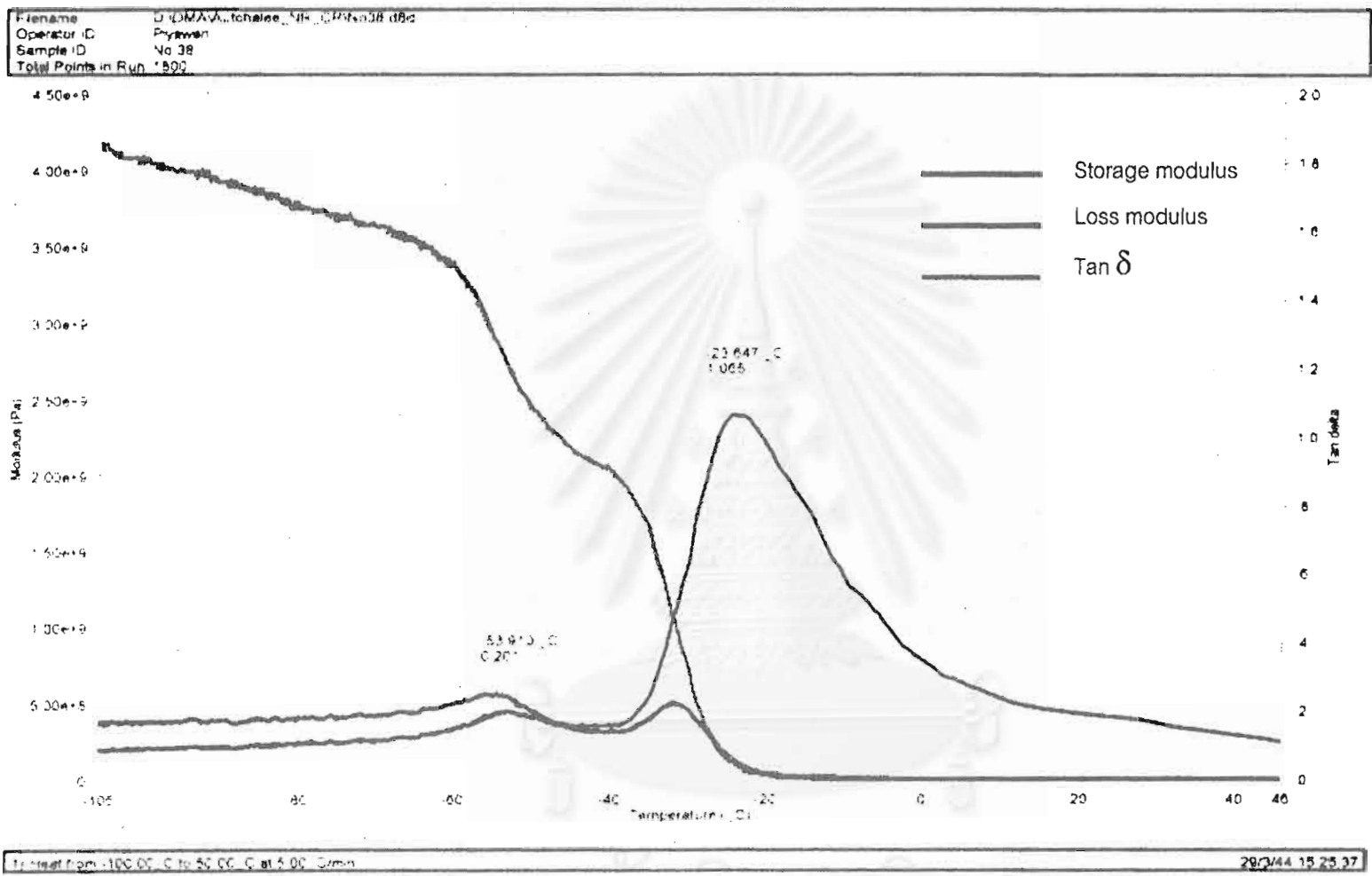
รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบ DMA ของสูตรควบคุมยางพอลิคลอโรพรีน (สูตรที่ 7)

Filename: D:\DMA\Autoclave\_NH\_CR\No 10 dbd  
 Operator ID: Piyawan  
 Sample ID: No 10  
 Total Points in Run: 1800

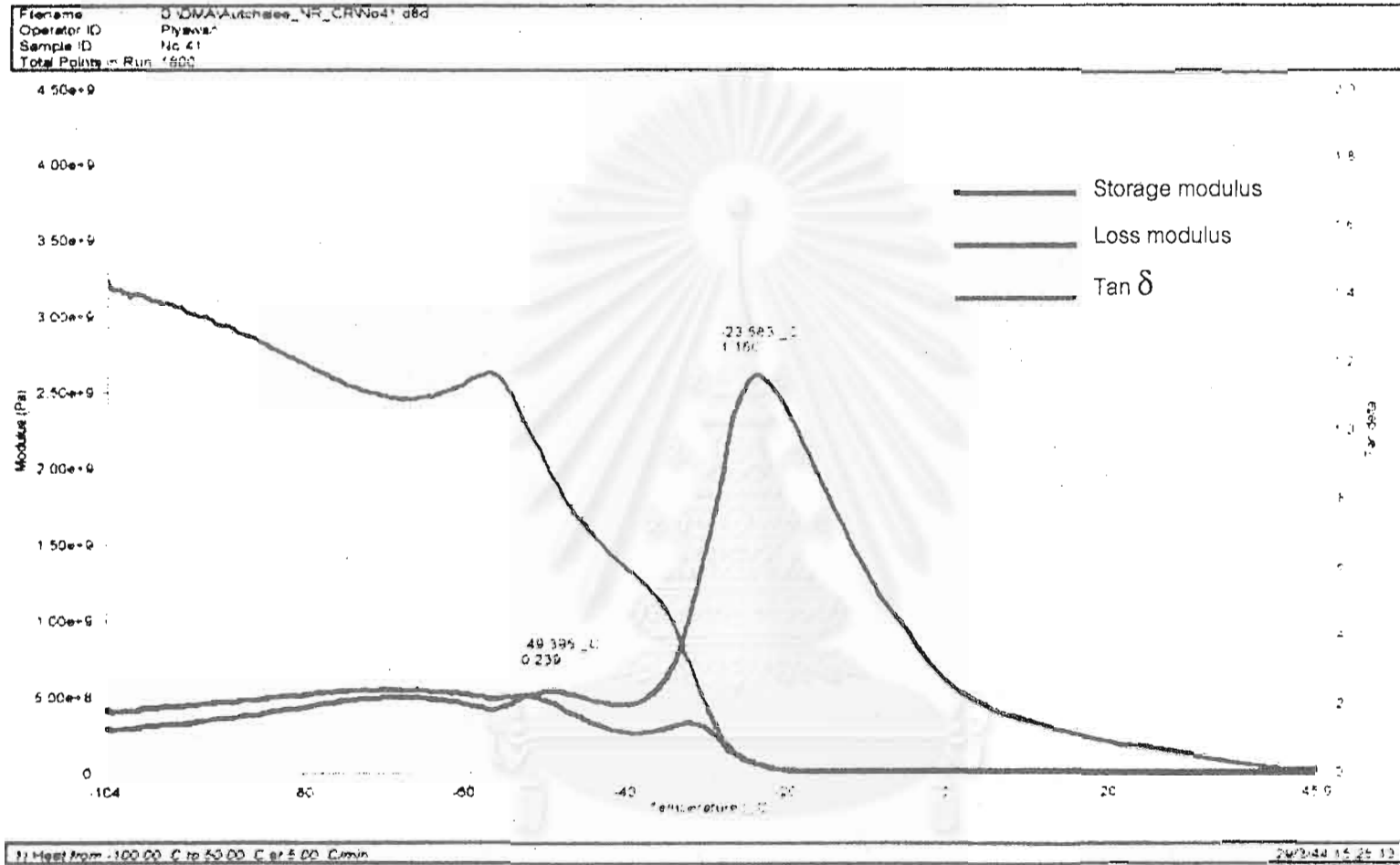


1) Heat from -120.00 C to 50.00 C at 5.00 C/min 20/2/44 15:29:09

รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบ DMA ของสูตรควบคุมยางธรรมชาติ (สูตรที่ 10)



รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบ DMA ระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน ที่อัตราส่วน 30 : 70 ไม่เติม Homogenizing agent (สูตรที่ 38)



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบ DMA ระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน  
ที่อัตราส่วน 40 : 60 เดิม Homogenizing agent (สูตรที่ 41)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.11 การเปรียบเทียบสมบัติของยางผสมกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด

ตารางที่ 4.16 มาตรฐานยางกันฝุ่นเพลลาที่กำหนด [5]

##### Basic Requirements

Items		Class 1
Ordinary state	Hardness (Shore A)	50±5 or 60±5
	Tensile strength (MPa)	14 , minimum
	Elongation at break (%)	350 , minimum
Heat Aged (Aging properteis)	Temp (°C)	100±2
	Duration (hr.)	22±1
	Hardness change (Shore A)	-5 to +10
	Percentage of degradation - % tensile change	±30%
	- % Elongation at break change	-50% , maximum
Compression set	Temp (°C)	100±2
	Duration (hr.)	22±1
	Compression per strain (%)	40 , maximum
Fluid Resistance	Temp (°C)	100±2
	Duration (hr.)	22±1
	%Volume change	+80% , maximum
State : After testing , There shall not be blister and peeling.		
Ozone Resistance	[Ozone] (pphm.)	50
	Temp (°C)	40
	Duration (hr.)	72
	Elongation (%) , static	20
State : The boot surface shall show no evidence of cracking under this condition		



ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน

ไม่เติม Homogenizing agent กับมาตรฐานยางกันฝุ่นเพลารถยนต์

สูตร	มาตรฐาน	(10)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(14)	(21)	(22)	(7)
NR:CR ,(phr)		100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60	30:70	20:80	10:90	
สมบัติยางก่อนการคงรูป												
Mooney Viscosity, ML(1+4)		27.42	36.41	42.4	39.69	38.68	39.69	42.53	46.18	61.99	78.12	71.84
t <sub>90</sub> ,(min.)		1.92	1.08	0.9	1.13	1.08	1.13	1.17	1.65	1.04	0.98	1.16
t <sub>99</sub> ,(min.)		2.96	1.96	1.96	2.29	2.42	2.87	3.67	4.54	5.79	6.54	6.52
สมบัติยางหลังการคงรูป												
Specific gravity		1.05	1.1	1.13	1.16	1.18	1.21	1.24	1.27	1.3	1.34	1.36
Tensile strength, (MPa)												
ก่อนอบ (25°C)	14,min.	23.11 (0.39)*	23.57 (2.15)	23.46 (0.90)	23.76 (0.44)	23.92 (0.60)	23.72 (0.61)	21.42 (0.86)	21.79 (0.50)	23.53 (2.52)	23.90 (1.97)	23.44 (1.34)
หลังอบ (100°C)	±30%	18.62 (2.75)	21.75 (3.65)	21.24 (1.52)	22.86 (2.43)	22.52 (0.71)	22.61 (1.20)	19.57 (0.51)	19.33 (0.37)	23.23 (0.96)	23.28 (1.61)	23.12 (0.81)
Modulus at 100%, (MPa)												
ก่อนอบ (25°C)		1.21 (0.11)	1.42 (0.15)	1.35 (0.19)	1.61 (0.22)	1.94 (0.43)	1.93 (0.31)	2.31 (0.44)	2.50 (0.43)	2.50 (0.19)	3.01 (0.41)	2.42 (0.12)
หลังอบ (100°C)		1.40 (0.09)	1.80 (0.20)	1.80 (0.18)	2.40 (2.40)	2.49 (0.37)	2.59 (0.56)	2.98 (0.46)	2.97 (0.16)	3.03 (0.33)	3.85 (1.93)	2.40 (0.20)
Modulus at 300%, (MPa)												
ก่อนอบ (25°C)		5.84 (0.44)	7.76 (0.47)	7.81 (0.36)	8.04 (0.58)	8.82 (0.90)	9.24 (0.99)	10.35 (1.12)	10.74 (1.24)	12.73 (0.57)	14.84 (1.51)	14.16 (0.46)
หลังอบ (100°C)		7.34 (0.56)	8.93 (0.91)	8.99 (0.63)	10.64 (0.50)	10.71 (0.86)	11.13 (1.66)	12.05 (1.19)	12.17 (1.01)	13.28 (1.62)	13.44 (4.16)	13.82 (1.81)

(\* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน : S.D.)

ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน

ไม่เติม Homogenizing agent กับมาตรฐานยางกันฝุ่นเพลารถยนต์ (ต่อ)

สูตร	มาตรฐาน	(10)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(14)	(21)	(22)	(7)
NR:CR ,(phr)		100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60	30:70	20:80	10:90	0:100
Elongation at break, (%)												
ก่อนอบ (25°C)	350 . min.	577.2 (28.10)*	609.85 (12.19)	605.1 (33.00)	611.2 (9.74)	599.6 (15.11)	595.3 (15.04)	532.8 (38.11)	530.3 (25.30)	491.5 (57.10)	456.5 (47.00)	432.96 (29.33)
หลังอบ (100°C)	-50% . max.	491.8 (53.50)	545.8 (64.12)	526.2 (62.50)	524.1 (64.00)	535.7 (14.48)	521 (24.92)	465.4 (36.43)	454.9 (28.50)	455 (22.13)	445 (29.43)	423.9 (46.71)
Hardness, (Shore A)												
ก่อนอบ (25°C)		43.1	48.2	49.4	49.6	52.4	53.3	54.6	55.6	59.8	63.7	58.5
หลังอบ (100°C)	-5 to +10	47.7	52.5	52.6	54.3	56.1	57.6	59.2	59.4	62.3	66.2	59.6
Compression set at 100°C, 22 hr.	40 . max.	28.25 (2.00)	51.02 (0.44)	52.3 (2.00)	55.87 (1.71)	64.44 (1.76)	63.74 (1.23)	66.37 (0.10)	67.59 (0.59)	70.81 (0.66)	71.11 (1.09)	33.95 (1.31)
Ozone resistance at 40°C, 72 hr. [ozone] 50 pphm elongation (static) 20%	ไม่แตก	แตก	แตก	แตก	แตก	แตก	แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก
Fluid resistance at 100°C, 72 hr. (Volume Swelling, %)	80% . max.	117.06	129.22	119.93	111.65	96.2	85.7	79.51	69.82	63.68	50.16	43.86
Antistatic, (ohms/cm <sup>2</sup> )		10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>10</sup>

(\* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน : S.D.)

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน

เติม Homogenizing agent กับมาตรฐานยางกันฝุ่นเพลารถยนต์

สูตร	มาตรฐาน	(10)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)	(31)	(7)
NR:CR ,(phr)		100:0	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50	40:60	30:70	20:80	10:90	0:100
Struktol 60 NS ,(phr)		-	5	5	5	5	5	5	5	5	5	-
สมบัติยางก่อนการคงรูป												
Mooney Viscosity,ML(1+4)		27.42	36.39	37.99	35.72	35.6	36.9	35.91	40.38	51.85	68.2	71.84
tS2 ,(min.)		1.92	1.02	0.9	1.1	1.06	1.13	1.15	1.52	1.02	0.92	1.16
tC90 ,(min.)		2.96	1.9	1.86	2.24	2.2	2.44	3.26	4.38	5.62	6.23	6.52
สมบัติยางหลังการคงรูป												
Specific gravity		1.05	1.1	1.13	1.15	1.17	1.19	1.22	1.25	1.29	1.32	1.36
Tensile strength, (MPa)												
ก่อนอบ (25°C)	14 .min.	23.11 (0.39)*	24.85 (0.48)	23.58 (0.92)	23.27 (0.71)	23.25 (0.04)	22.15 (0.15)	21.67 (0.30)	21.74 (0.12)	26.27 (0.36)	26.36 (0.06)	23.44 (1.34)
หลังอบ (100°C)	±30% , max.	18.62 (2.75)	25.58 (1.49)	24.44 (0.51)	23.30 (0.42)	21.70 (0.43)	21.09 (0.09)	21.20 (0.33)	21.72 (1.27)	24.10 (0.11)	25.12 (0.74)	23.12 (0.81)
Modulus at 100%, (MPa)												
ก่อนอบ (25°C)		1.21 (0.11)	1.08 (0.17)	1.46 (0.27)	1.49 (0.47)	1.64 (0.02)	1.76 (0.21)	1.87 (0.21)	2.11 (0.27)	2.38 (0.05)	2.80 (0.51)	2.42 (0.12)
หลังอบ (100°C)		1.40 (0.09)	1.88 (0.18)	1.92 (0.12)	1.92 (0.15)	2.27 (0.13)	2.27 (0.16)	2.32 (0.10)	2.88 (0.09)	2.91 (0.20)	3.09 (0.54)	2.40 (0.20)
Modulus at 300%, (MPa)												
ก่อนอบ (25°C)		5.84 (0.44)	5.81 (0.99)	7.72 (0.83)	7.79 (1.40)	8.22 (0.47)	8.33 (1.11)	8.83 (0.63)	9.53 (0.95)	11.51 (0.35)	14.46 (2.19)	14.16 (0.46)
หลังอบ (100°C)		7.34 (0.56)	9.49 (0.69)	9.80 (0.61)	9.39 (0.84)	10.36 (0.39)	9.85 (0.80)	9.74 (0.47)	11.97 (1.20)	13.80 (0.38)	14.80 (1.99)	13.82 (1.81)

(\* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน : S.D.)

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน

เติม Homogenizing agent กับมาตรฐานยางกันฝุ่นเพลารถยนต์ (ต่อ)

สูตร	มาตรฐาน	(10)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)	(31)	(7)
NR:CR ,(phr)		100 : 0	90 : 10	80 : 20	70 : 30	60 : 40	50 : 50	40 : 60	30 : 70	20 : 80	10 : 90	0 : 100
Elongation at break, (%)												
ก่อนอบ (25°C)	350 .min.	577.20 (28.10)*	678.00 (55.50)	633.9 (20.64)	640.5 (37.60)	609.2 (8.60)	546.9 (15.34)	573.2 (1.69)	564.7 (11.50)	582.1 (7.00)	479.6 (40.50)	432.96 (29.33)
หลังอบ (100°C)	-50%, max.	491.8 (53.50)	570.2 (24.50)	569.6 (32.90)	555.1 (32.20)	534.9 (16.60)	557.9 (43.80)	548.7 (8.49)	456.2 (14.85)	497 (8.40)	464 (16.97)	423.9 (46.71)
Hardness, (Shore A)												
ก่อนอบ (25°C)		43.1	43.2	45.8	46.3	46.6	47.2	48.9	49.9	53.9	55.2	58.5
หลังอบ (100°C)	-5 to +10	47.7	50.1	50.9	51.9	52	52.6	54.6	55	58.8	60.4	59.6
Compression set at 100°C, 22 hr.	40 .max.	28.25 (2.00)	45.02 (1.67)	47.02 (0.61)	47.03 (0.86)	48.02 (5.14)	51.58 (4.64)	55.42 (3.09)	57.77 (2.12)	63.39 (0.75)	72.66 (0.69)	33.95 (1.31)
Ozone resistance at 40°C, 72 hr. [ozone] 50 pphm elongation (static) 20%	ไม่แตก	แตก	แตก	แตก	แตก	แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก	ไม่แตก
Fluid resistance at 100°C, 72 hr. (Volume Swelling, %)	80%, max.	117.06	107.23	96.14	88.89	85.2	81.55	73.72	64.95	53.32	47.81	43.86
Antistatic, (ohms/cm <sup>2</sup> )		10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>12.5</sup>	10 <sup>10</sup>	10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>10</sup>

(\* ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน : S.D.)

ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบสมบัติของยางผลมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนที่คัดเลือกได้  
จากการทดลองตอนที่ 2 และสูตรควบคุมยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนกับมาตรฐานยางกันฝุ่น

Item		Spec.	สูตร			
			7	10	14	28
Ordinary state	Hardness (Shore A)	50±5 or 60±5	58.5	43.1	55.6	48.9
	Tensile strength (MPa)	14 , minimum	23.44	23.11	21.79	21.67
	Elongation at break (%)	350 , minimum	432.96	577.2	530.3	573.2
Heat Aged (Aging properties) at 100 °C 22 hr.	Temp (°C)	100±2				
	Duration (hr.)	22±1				
	Hardness change (Shore A)	-5 to +10	+ 1.1	+ 4.6	+ 3.8	+ 5.7
	Percentage of degradation - % tensile change	±30%	-1.37%	-19.43%	-11.29%	-2.17%
	- % Elongation at break change	-50% , maximum	-2.09%	-14.80%	-14.22%	-24.5%
Compression set at 100 °C 72 hr.	Temp (°C)	100±2				
	Duration (hr.)	22±1				
	Compression per strain (%)	40% , maximum	33.95	28.46	67.59	55.42
Fluid Resistance	Temp (°C)	100±2				
	Duration (hr.)	22±1				
	%Volume change	+80% , maximum	43.86%	117.06%	89.82%	73.72%
State : After testing , There shall not be blister and peeling.						
Ozone Resistance	[Ozone] (pphm.)	50	no	cracking	no	no
	Temp (°C)	40	cracking		cracking	cracking
	Duration (hr.)	72				
	Elongation (%) , static	20				
State : The boot surface shall show no evidence of cracking under this condition						

ตารางที่ 4.20 เปรียบเทียบสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนที่ทำการ  
ปรับสูตรให้ผ่านมาตรฐาน และสูตรควบคุมยางธรรมชาติและยางพอลิคลอโรพรีนกับมาตรฐานยางกันฝุ่น

Item		Spec.	สูตร			
			7	10	38	41
Ordinary state	Hardness (Shore A)	50±5 or 60±5	58.50	43.10	60.60	57.40
	Tensile strength (MPa)	14 , minimum	23.44	23.11	18.04	19.11
	Elongation at break (%)	350 , minimum	432.96	577.2	363.90	417.00
Heat Aged (Aging properties) at 100 °C 22 hr.	Temp (°C)	100±2				
	Duration (hr.)	22±1				
	Hardness change (Shore A)	-5 to +10	+ 1.10	+ 4.60	+3.00	+2.70
	Percentage of degradation					
	- % tensile change	±30%	-1.37%	-19.43%	-2.27%	-10.15%
- % Elongation at break change	-50% , maximum	-2.09%	-14.80%	-1.37%	-13.72%	
Compression set at 100 °C 72 hr.	Temp (°C)	100±2				
	Duration (hr.)	22±1				
	Compression per strain (%)	40% , maximum	33.95%	28.46%	37.04%	35.71%
Fluid Resistance	Temp (°C)	100±2				
	Duration (hr.)	22±1				
	%Volume change					
	- grease	+80% , maximum	43.86%	117.06%	63.08%	72.73%
- ASTM oil No. 1		8.55%	100.70%	23.33%	33.06%	
State : After testing , There shall not be blister and peeling.						
Ozone Resistance	[Ozone] (pphm.)	50	no	cracking	no	no
	Temp (°C)	40	cracking		Cracking	cracking
	Duration (hr.)	72				
	Elongation (%) , static	20				
State : The boot surface shall show no evidence of cracking under this condition						

จากตาราง เมื่อทำการเปรียบเทียบผลทดสอบสมบัติต่างๆ กับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนดตามตารางที่ 4.17 – 4.18 พบว่า ผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้มีสมบัติทางด้านกายภาพผ่านมาตรฐานที่กำหนดทั้งหมดทุกอัตราส่วนการผสม ยกเว้นสมบัติการยุบตัว (Compression set) นอกจากนี้เมื่อทำการพิจารณาสมบัติด้านความต้านทานต่อการบวมตัวด้วยน้ำมันหรือจาระบี (พิจารณาจากค่า % Volume swelling) สมบัติความต้านทานต่อการสัมผัสกับโอโซน (Ozone resistance) และสมบัติด้านการต้านทานไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะที่สำคัญของยางกันฝุ่นเพลารดยนต์พบว่า ไม่ผ่านมาตรฐานทุกอัตราส่วน สามารถแสดงได้ดังนี้

ตารางที่ 4.21 แสดงสูตรยางผสมที่มีสมบัติเฉพาะของยางกันฝุ่นเพลารดยนต์ผ่านมาตรฐานที่กำหนด

Tests	ไม่เติม Homogenizing agent	เติม Homogenizing agent
% Volume swelling	สูตรที่ 7,14,21-22	สูตรที่ 7,28-31
Ozone resistance	สูตรที่ 7,14,20-22	สูตรที่ 7,27-31
Antistatic	สูตรที่ 7,14,17-22	สูตรที่ 7,25-31

จากตารางข้างต้น สามารถทำการเลือกสูตรที่เหมาะสมต่อการผลิตยางกันฝุ่นโดยมีอัตราส่วนยางธรรมชาติในยางผสมมากที่สุด ได้ดังนี้

- สำหรับสูตรที่ไม่เติม Homogenizing agent เลือกสูตรที่ 14 (NR : CR คือ 30 : 70 phr)
- สำหรับสูตรที่เติม Homogenizing agent เลือกสูตรที่ 28 (NR : CR คือ 40 : 60 phr)

ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติของยางดังกล่าว จากตารางที่ 4.19 จะเห็นว่าสมบัติต่างๆ ผ่านมาตรฐานที่กำหนดทั้งหมด ยกเว้นสมบัติด้านการยุบตัว (Compression set) ที่มีค่าสูงเกินจากมาตรฐาน ดังนั้นจึงทำการปรับสูตรที่ 14 และ 28 ต่อไปจนได้สูตรที่เหมาะสมและผ่านมาตรฐานตามสูตรที่ 38 (NR : CR คือ 30 : 70) และสูตรที่ 41 (NR : CR : ST60NS คือ 40 : 60 : 5) ดังตารางที่ 4.20 จากตารางพบว่า ผลิตภัณฑ์ยางที่เตรียมได้มีสมบัติที่ผ่านมาตรฐานที่กำหนดทั้งหมด

#### 4.12 การคิดต้นทุนการผลิต

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาผลจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนและผลจากการใช้สารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) เพื่อนำไปใช้ในการผลิตยางกันฝุ่น โดยต้องการให้มีปริมาณยางธรรมชาติในยางผสมมากที่สุด แต่ยังคงสมบัติของยางกันฝุ่นอยู่ได้ เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต

สำหรับสูตรที่ 10 ซึ่งเป็นสูตรควบคุมสำหรับยางธรรมชาติ ถ้าทำการคิดต้นทุนในการผลิตจะได้สูตรยางที่มีต้นทุนที่ถูกกว่ามาก แต่สมบัติที่ได้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตยางกันฝุ่น เนื่องจากไม่ผ่านมาตรฐานที่กำหนด ดังนั้น ในที่นี้จะไม่แสดงการคิดต้นทุนของยางสูตรดังกล่าว

จากตารางที่ 4.22 พิจารณาการคิดต้นทุนของยางสูตรควบคุมสำหรับยางพอลิคลอโรพรีน (สูตรที่ 7) และยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนทั้งที่ไม่เติมและเติมสารเชื่อมการผสมยาง (NR : CR) ที่อัตราส่วนการผสมคือ 30 : 70 และ 40 : 60 phr (สูตรการทดลองที่ 38 และ 41 ตามลำดับ) พบว่า การใช้ยางธรรมชาติเข้าไปแทนที่ยางพอลิคลอโรพรีนที่อัตราส่วนการผสมเป็น 30 phr และ 40 phr ตามลำดับจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้มาก ในขณะที่ยังคงรักษาสสมบัติที่จำเป็นสำหรับการผลิตยางกันฝุ่นอยู่ได้ และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบการใช้ยางธรรมชาติทั้งสองอัตราส่วน จะเห็นว่า ทั้งสองสูตรต่างกันตรงที่อัตราส่วนของยางที่ใช้ และในสูตรที่ 41 ที่มีการใช้ยางธรรมชาติเป็น 40 phr ได้มีการเติม Homogenizing agent ลงไปทำการบดผสมด้วย พบว่า ต้นทุนที่คิดได้จากสูตรที่ 41 จะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากมีการใช้ปริมาณยางธรรมชาติมากกว่า ถึงแม้จะต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในส่วนของ Homogenizing agent ก็ตาม แต่ถ้าคำนึงถึงการใช้งานจริง การใช้ Homogenizing agent นั้นนอกจากจะช่วยให้การบดผสมเข้ากันได้ดี ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้นแล้วยังช่วยในด้านของการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการบดผสมอีกด้วย เพราะสารดังกล่าวช่วยให้ยางผสมพันลูกกลิ้งได้เร็วขึ้นจึงทำการบดผสมได้ง่ายขึ้น ดังนั้นจึงได้ว่าการใช้ยางธรรมชาติที่อัตราส่วนดังกล่าว นอกจากมีสมบัติที่เหมาะสมและผ่านมาตรฐานยางกันฝุ่นแล้ว ยังเป็นการช่วยในแง่การลดต้นทุนการผลิตและเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้ปริมาณยางธรรมชาติที่มีอยู่มากในประเทศ

ในงานวิจัยนี้ทำการคิดต้นทุนการผลิตเทียบต่อปริมาตร โดยพรพรรณ นิธิอุทัย [7] ได้ให้เหตุผลว่า เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยางที่ขายโดยทั่วไป จะขายในรูปของขนาดและจำนวนชิ้น ดังนั้นในการคิดต้นทุนการผลิตจึงมักคิดเป็นแบบต้นทุนต่อปริมาตรมากกว่าต้นทุนต่อน้ำหนัก



ตารางที่ 4.22 แสดงการคิดต้นทุนการผลิตในการผลิตยางกันฝุ่น

Items	ราคา (บาท/กก.)	สูตรที่ 7		สูตรที่ 38		สูตรที่ 41	
		น้ำหนักที่ใช้ (กก.)	ราคา (บาท)	น้ำหนักที่ใช้ (กก.)	ราคา (บาท)	น้ำหนักที่ใช้ (กก.)	ราคา (บาท)
NR	30	-	-	0.03	0.9	0.04	1.2
CR	160	0.1	16	0.07	11.2	0.06	9.6
ST 60NS	136	-	-	-	-	0.005	0.68
N330	21	0.03	0.63	-	-	-	-
N660	21	-	-	0.05	1.05	0.05	1.05
Napthenic oil	37	-	-	0.003	0.111	0.003	0.111
Stearic acid	23	0.0005	0.0115	0.0015	0.0345	0.0015	0.0345
Hiko tack	150	0.003	0.45	0.003	0.45	0.003	0.45
6PPD	172	0.002	0.344	0.002	0.344	0.002	0.344
Wax ozone	54	0.001	0.054	0.001	0.054	0.001	0.054
MgO	80	0.004	0.32	0.004	0.32	0.004	0.32
ZnO	56	0.005	0.28	0.005	0.28	0.005	0.28
MBTS	120	0.001	0.12	0.001	0.12	0.001	0.12
TMTD	118	0.0003	0.0354	0.0004	0.0472	0.0004	0.0472
ETU	360	0.001	0.36	0.0007	0.252	0.0007	0.252
S	10	-	-	0.0008	0.008	0.0008	0.008
Σ		0.1478	18.6049	0.1724	15.171	0.1774	14.5507
ต้นทุนต่อน้ำหนัก (บาท/กก.)			125.879		87.997		82.022
ความหนาแน่นของยางผสม (กรัม/ลบ.ซม.)			1.363		1.2183		1.2042
ต้นทุนต่อปริมาตร (บาท/ลบ.ม.)			171573		107207		98770.9
กำหนดให้ราคาต่อน้ำหนักของยางธรรมชาติเป็นแกน คือ 100							
ราคาเปรียบเทียบ/น้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติ			419.596		293.32		273.407
ราคาเปรียบเทียบ/ปริมาตรเทียบกับยางธรรมชาติ			571.91		357.36		329.236

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการผสมของยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนที่อัตราส่วนต่างๆ รวมถึงผลของการใช้สารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) ในที่นี้คือ ST 60NS เพื่อหาอัตราส่วนที่สามารถใช้ยางธรรมชาติในปริมาณมากที่สุด แต่ยังคงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางกันฝุ่นตามมาตรฐานที่กำหนด ทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ ผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การหาสูตรควบคุม จากการพิจารณาผลการทดลองและการเปรียบเทียบกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด พบว่า

- เลือกระบบสารเคมีตามสูตรที่ 7 เป็นสูตรควบคุมสำหรับยางพอลิคลอโรพรีน
- เลือกระบบสารเคมีตามสูตรที่ 10 เป็นสูตรควบคุมสำหรับยางธรรมชาติ
- เลือกระบบสารเคมีตามสูตรที่ 14 เป็นสูตรควบคุมสำหรับยางผสมที่อัตราส่วนต่างๆ

ระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน

2. การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนการผสมยาง เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น พบว่า

- สมบัติทางกายภาพของยางก่อนการคงรูป ได้แก่ ความหนืด เวลาที่ยางเริ่มคงรูปและเวลาที่ใช้ในการคงรูป มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

- สมบัติทางกายภาพของยางหลังการคงรูป ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ โมดูลัส ความแข็ง การยุบตัว และความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับไอโซน มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความยืดเมื่อขาด ความสามารถในการทนต่อการบวมตัวเนื่องจากการสัมผัสกับน้ำมันหรือจาระบี และสมบัติด้านการต้านทานไฟฟ้าสถิตย์ จะมีแนวโน้มที่ลดลง ส่วนความต้านทานแรงดึง จะมีค่าค่อนข้างคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

3. สมบัติทางกายภาพของยางหลังผ่านการอบ (Heat aging) ส่วนใหญ่จะมีแนวโน้มที่ลดลง ยกเว้นสมบัติด้านโมดูลัส และความแข็งที่มีค่าเพิ่มขึ้น

4. การเติมสารเชื่อมการผสมยาง ส่งผลให้ยางทั้งสองชนิดผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น พิจารณาจากสมบัติความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับน้ำมันหรือจาระบี และการศึกษาทางด้านสัญญาณวิทยาของยางผสม นอกจากนี้ยังช่วยปรับปรุงสมบัติความต้านทานแรงดึงได้เล็กน้อย

5. การใช้สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตแทนการใช้สารตัวเติมชนิดเสริมแรง เช่น เขม่าดำ จะส่งผลต่อค่าสมบัติของยางผสมได้ เช่น ความต้านทานแรงดึง โมดูลัส ความแข็งของยางจะลดลง นอกจากนี้พบว่าสมบัติการต้านทานไฟฟ้าสถิตย์ของยางผสมที่ใช้

แคลเซียมคาร์บอเนตแทนเขม่าดำจะมีค่าลดลงเช่นกัน เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตไม่มีสมบัติในการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของยาง

6. ชนิดและปริมาณของเขม่าดำมีผลต่อสมบัติของยาง โดยเขม่าดำที่มีอนุภาคใหญ่กว่าจะเสริมแรงได้น้อยกว่าเขม่าดำที่มีอนุภาคเล็ก ทำให้สมบัติการยุบตัวของยางผสมที่ใช้เขม่าดำที่มีอนุภาคใหญ่กว่ามีค่าต่ำกว่า ส่วนในด้านปริมาณของเขม่าดำ ถ้าปริมาณของเขม่าดำมาก จะส่งผลให้ความแข็งแรงของยางผสมเพิ่มขึ้น

7. ระบบการคงรูปต่างกัน จะส่งผลต่อสมบัติด้านการยุบตัวที่ต่างกันด้วย โดยการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV system) จะให้ค่าการยุบตัวที่ต่ำกว่าการใช้ระบบคงรูปแบบอื่น เนื่องจากความแตกต่างของพันธะเคมีที่เกิดขึ้นในการคงรูปแต่ละแบบ

8. สมบัติเชิงกลของสูตรควบคุมสำหรับยางธรรมชาติ ยางพอลิคลอโรพรีน และยางผสมที่อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน (NR:CR) เป็น 30 : 70 phr ไม่เติม Homogenizing agent และ 40 : 60 phr เติม Homogenizing agent พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าสโตเรจโมดูลัส โมดูลัสสูญเสีย จะมีค่าลดลงในช่วงต้นและคงที่ สามารถทำการพิจารณาผลของอัตราส่วนการผสมและการใช้ Homogenizing agent จากค่า  $T_g$  และ  $\tan \delta$  ซึ่งได้ว่าการใช้ยางเพียงชนิดเดียวตามสูตรควบคุมจะให้ค่า  $T_g$  และ  $\tan \delta$  เพียงค่าเดียว โดยลักษณะของ peak ที่ได้ค่อนข้างแคบและปลายแหลม ในขณะที่การใช้อย่างผสมจะให้  $T_g$  และ  $\tan \delta$  2 ค่า กล่าวคือยางทั้งสองชนิดผสมเข้ากันได้ไม่ดี แต่เมื่อทำการเติม Homogenizing agent ลงไปจะเห็นว่าความแตกต่างของค่า  $T_g$  ทั้ง 2 ค่าจะน้อยกว่าสูตรที่ไม่เติม Homogenizing agent แสดงว่ายางทั้งสองชนิดผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น

9. การเปรียบเทียบกับมาตรฐานยางกันฝุ่นที่กำหนด พบว่า ยางผสมที่อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิคลอโรพรีน (NR : CR) คือ 30 : 70 phr ไม่เติม Homogenizing agent (สูตรที่ 14) และ 40 : 60 phr เติม Homogenizing agent (สูตรที่ 28) มีสมบัติผ่านตามมาตรฐานทั้งหมด ยกเว้นสมบัติด้านการยุบตัวซึ่งมีค่าสูงเกินกำหนด จึงทำการปรับสูตรทั้งสองเพื่อให้มีสมบัติผ่านเกณฑ์ทั้งหมด ตามสูตรการทดลองที่ 38 และ 41 ตามลำดับ โดยเปลี่ยนชนิดเขม่าดำเป็น N660 และเปลี่ยนระบบที่ใช้ในการคงรูปของยางเป็นแบบระบบประสิทธิภาพ (EV system) พบว่าสมบัติทุกด้านผ่านมาตรฐานที่กำหนด

10. การใช้ยางธรรมชาติแทนที่ยางพอลิคลอโรพรีนที่อัตราส่วน 30 และ 40 phr นอกจากยังคงสมบัติสำหรับการผลิตยางกันฝุ่นแล้ว ยังช่วยช่วยลดต้นทุนในการผลิตลงได้ โดยที่อัตราส่วน NR : CR คือ 40 : 60 phr เติม Homogenizing agent จะมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด

ตารางที่ 5.1 สรุปสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีนเมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.1 สรุปสมบัติของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางพอลิคลอโรพรีน  
เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนในยางผสมเพิ่มขึ้น

สมบัติ	เมื่ออัตราส่วนของยางพอลิคลอโรพรีนเพิ่มขึ้น		
	ไม่เติม ST 60NS	เติม ST 60NS	เปรียบเทียบผลเมื่อเติม ST 60NS
Mooney Viscosity	+	+	-
t <sub>s2</sub>	+	+	=
t <sub>c90</sub>	+	+	=
Tensile strength	ก่อนอบ	=	+
	หลังอบ	=, (-)*	=, (-)
Elongation at break	ก่อนอบ	-	+
	หลังอบ	-, (-)	-, (-)
Modulus at 100 %	ก่อนอบ	+	=
	หลังอบ	+, (+)	+, (+)
Modulus at 300 %	ก่อนอบ	+	=
	หลังอบ	+, (+)	+, (+)
Hardness	ก่อนอบ	+	-
	หลังอบ	+, (+)	+, (+)
Compression set	+	+	-
Fluid resistance	+	+	+
Ozone resistance	+	+	+
Antistatic	-	-	=

#### หมายเหตุ

ST 60NS (Struktol 60NS) คือ Homogenizing agent

= สมบัติคงที่หรือใกล้เคียงกัน

- สมบัติลดลง

+ สมบัติเพิ่มขึ้น

\* สมบัติหลังผ่านการอบเทียบกับก่อนอบ

## ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ศึกษาอัตราส่วนของยางธรรมชาติ ยางพอลิคลอโรพรีน และการใช้สารเชื่อมการผสมยาง (Homogenizing agent) สำหรับการผลิตยางกันฝุ่นเท่านั้น ในการศึกษาต่อไปควรมีการศึกษาการผสมยางธรรมชาติกับยางสังเคราะห์ชนิดอื่น เช่น SBR, NBR เพื่อการผลิตยางกันฝุ่นตามมาตรฐาน
2. ในการบดผสมยางและการบดผสมสารเคมีในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องบดผสมแบบเปิด (two roll mill) ซึ่งอาจทำให้การบดยางทั้งสองชนิดที่มีความต่างช่วงและบดเข้ากันยาก บดผสมเข้ากันไม่ดีเท่าที่ควร ในการศึกษาต่อไปควรทำการบดผสมในเครื่องบดผสมแบบปิด (banbury mixer) ซึ่งอาจช่วยให้ยางทั้งสองเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น
3. ในงานวิจัยนี้ ใช้ยางธรรมชาติ STR 5L ซึ่งเป็นยางที่มีเกรดดี สีสวย และราคาแพงกว่ายางธรรมชาติ STR 20 แต่เนื่องจากยางกันฝุ่นที่ใช้มีการเติมเขม่าดำทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีดำ ดังนั้นในการศึกษาต่อไปควรใช้ยางธรรมชาติ STR 20 เป็นส่วนประกอบในการผลิตยางกันฝุ่นแทน และศึกษาในด้านสมบัติต่างๆ ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด
4. ในการใช้สารเชื่อมการผสมยาง นอกจากจะช่วยให้ยางผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้นแล้วยังสามารถลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานลงได้ด้วยเมื่อเทียบกับการผสมยางที่ไม่เติมสารเชื่อมการผสมยาง เนื่องจากยางผสมจะไม่ติดลูกกลิ้ง และลดเวลาที่ยางใช้ในการพันลูกกลิ้ง การบดผสมจึงง่ายขึ้น
5. ในการเลือกใช้งานนอกจากให้ได้สมบัติที่ต้องการแล้ว ยังต้องคำนึงถึงองค์ประกอบด้านอื่นๆ อีก เช่น พลังงานที่ใช้ สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตว่าเหมาะสมกับอัตราส่วนยางในช่วงไหน การบดผสมยางและสารเคมีที่ต้องเข้ากันดีพอเนื่องจากส่งผลต่อสมบัติบางอย่างได้ รวมถึงสูตรที่ใช้ในการบดผสม ซึ่งจะต้องมีการปรับให้เหมาะสมในแง่การผลิตและการนำไปใช้ต่อไป โดยสังเกตดูจะเห็นว่า ในงานวิจัยนี้อาศัยสาร antioxidant คือ 6PPD และ Wax ozone เข้าช่วยปรับปรุงสมบัติ Ozone resistance ของสูตรยางผสมที่มีการเติมยางธรรมชาติเข้าไป โดยจะใช้ในปริมาณที่มากกว่าสูตรสำหรับยางพอลิคลอโรพรีนเพียงชนิดเดียวประมาณเท่าตัว

## รายการอ้างอิง

1. กฤษฎา สุชีวะ. เทคโนโลยียาง. วารสารเทคโนโลยี. 2532.
2. นิลุบล เกียรติธนาวิทย์. ยางธรรมชาติทนน้ำมัน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2530.
3. นุชนาฏ ณ ระนอง. การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยาง. เอกสารประกอบการฝึกอบรมหลักสูตรเทคโนโลยียางธรรมชาติ. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2542.
4. บริษัทคิวซีโรล จำกัด. แผนผังการเลือกใช้วัสดุ. คู่มือการเลือกใช้วัสดุให้เหมาะกับลูกกลิ้งยาง
5. บริษัทหจก.สตาร์รับเบอร์. มาตรฐานยางกันฝุ่นเพลารถยนต์.
6. ปรีชา ป็องภัย. การทดสอบยางและผลิตภัณฑ์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย : ปัตตานี. 2534.
7. พรพรรณ นิธิอุทัย. ยาง : เทคนิคการออกสูตรยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 2528.
8. พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 2528.
9. พลชิต บัวแก้ว. เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรเทคโนโลยียางแห้ง. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2542.
10. พายัพ นามประเสริฐ. Introduction to Rubber Technology. วารสารกรมวิทยาศาสตร์ บริการ. 2535.
11. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง. กลุ่มอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง ศูนย์วิจัยยางสงขลา กรมวิชาการเกษตร. เอกสารฉบับที่ 135. 2530.
12. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. การออกสูตรยางและกระบวนการผลิต. เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรเทคโนโลยียาง (ยางสังเคราะห์). ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2541.
13. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. เทคโนโลยียางสังเคราะห์. เอกสารประกอบการฝึกอบรม หลักสูตรเทคโนโลยียางธรรมชาติ สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2542.
14. วราภรณ์ ขจรไชยกูล, วิชา เสวตกนิษฐ และปราณี บุญชัย. การหาสูตรยางที่มีสมบัติกันไฟ ฟอสฟอไรต์จากยางแห้ง. ศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ยาง สถาบันวิจัยยาง
15. สถาบันวิจัยยาง. การทดสอบมาตรฐานยางแห้ง เอส ที อาร์ กรุงเทพมหานคร. สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.



16. เสาวรจณี ช่วยจุลจิตรี. เทคโนโลยียาง. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2537.
17. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนสำหรับงานด้านวัสดุศาสตร์. คู่มือประกอบการอบรม ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
18. Andrew J. Tinker. Distribution of crosslinks in vulcanized blend. Rubber Chemistry and Technology. Vol.68 No.3. 1995.
19. Andrew J. Tinker and Kevin P. Jones. Blends of Natural Rubber: Novel Techniques for Blending with Speciality Polymers. Chapman & Hall. 1998.
20. An American National Standard. Standard Classification System for Rubber Products in Automotive Applications. Annual book of ASTM Standard. D2000 (1999).
21. A. D. Roberts. Natural Rubber Science and Technology. Brickendonbury : Oxford University Press. 1988.
22. A.F. Younan, S.L. ABD-EL-MESSIEH and A.A. Gasser. Electrical and Mechanical Properties of Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) –Chloroprene Rubber (CR) Blends loaded with White and Black Fillers. J. of Applied Polymer Science. Vol.70. 1998.
23. Bunpot. A Study of Structures-Properties of Rubber Vulcanisates by Dynamic Mechanical Analyzer. Master Thesis. Polymer Science Mahidol University.1994.
24. C. M. Blow and C. Hepburn. Rubber Technology and Manufacture. 2 nd. Edition. The Plastic and Rubber Institute. 1982.
25. Du Pont. Ltd. Du Pont Elastomers for the tough jobs in every automotive system.
26. Du Pont. Ltd. Engineering properties of Du Pont : Neoprene.
27. D. J. Elliott. Compounding NR for engineering application. NR Technical Bulletin. Malaysia.
28. Fred W. Barlow. Rubber Compounding : Principles, Materials and Techniques. 2 nd Edition : NewYork. Dekker. 1993.
29. G. Ivan and M. Glurginca. A spectroscopic sstudy on the chloroprene elastomer distribution. Material Plastic. Vol. 33 No. 4. 1996.

30. G. M Bristow. Effect of Mixing Procedure on Properties of Natural Rubber Blends with Polybutadiene. NR Technology Vol.49. part 1. 1978 : pp.1-5.
31. H.J. Stem. Rubber : Natural and Synthetic. 2 nd Edition : Palmerton Publishing Co.Inc. 1967.
32. James Halderman. Drive Axle Shafts and CV Jonits. Automotive steering, suspension and alignment. New Jersey Columbus : Ohio. 1995.
33. Japanese Industrial Standard. JIS D 2608 Automotive parts- Rubber boots for hydraulic brake wheel cylinders using a non-petroleum base hydraulic brake fluid. 1998.
34. J.E. Mark, B. Erman and F.R. Eirich. Science and Technology of Rubber. 2 nd. Edition : Sandiago. Academis Press. 1994.
35. Maeda, et al. Rubber composition for dust cover boots. United States Patent : 469406Z. 1987.
36. Md Aris bin Ahmak and M.A. wheelans. Blends of Natural rubber with Acrylonitrile-butadiene rubber : mixing and morphology of gum mixes. NR TECHNOLOGY. Vol. 15 part 4. 1984.
37. Mecatech POP CV Boot. Universal Application.
38. Peter J. Haines. Thermal Methods of Analysis: Principle Applications and problems. First Edition : (n.p.) 1995.
39. PE. Mallon. A DSC study of the crosslinking of Polychloroprene rubber with ZnO and MgO. J. of applied polymer science. Vol. 55 No. 5. 1995.
40. P.J. Corish. Elastomer blends. Science and Technology of rubber. Dunlop Research Centre. 1978.
41. Rubber Technology International. Fatty acid Zinc salts and aromatic/aliphatic resins (their effect on energy consumption during mixing). Poland.
42. R. F. Grossman. The Mixing of Rubber. 1 st Edition. London : Chapman & Hall. 1997.
43. R.M. Murray and Thompson. The Neoprene. E.I. Du Pont de Nemours & Co. 1963.
44. Schill & Seilacher (GmbIt & Co.). Struktol 60 NS : Homogenizing agents datasheet.



45. Sumanda Bandyopadhyay, P.P. De, D.K. Tripathy and S.K. De : Rubber Technology centre. Dynamic mechanical spectroscopic studies on the miscibility of polychloroprene/epoxidized natural rubber blend in presence of carbon black filler. Polymer. Vol. 36 No. 10. 1995.
46. Werner Hofmann. Rubber Technology Handbook. Hanser Publisher : NewYork. 1980
47. Werner Hofmann. Vulcanization and vulcanizing agents. MACLAREN AND SONS LTD. : London. 1967.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยางคงรูป

#### 1. ความต้านทานแรงดึง [3,6]

การทดสอบยางโดยการดึงให้ยืดออก เป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายและนิยมใช้กันมาก เพราะผลที่ได้สามารถบอกถึงสมบัติเชิงกลพื้นฐานของยาง เช่น ความต้านทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความเหนียว ความเปราะ และลักษณะการแตกหัก หรือฉีกขาดของยาง

ชิ้นงานที่นำมาทดสอบเป็นชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปให้เป็นแผ่น (sheet curve) มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร จากนั้นนำแผ่นยางที่ได้มาตัดด้วยเครื่องตัดตัวอย่างยางแบบใช้กำลังลม (compress air sample cutter) ให้เป็นรูปดัมเบลล์ โดยจะตัดชิ้นงานทางด้านแนวเครื่อง คือ ตัดชิ้นงานให้ดึงตามแนวที่ยางถูกบดออกมา จากนั้นนำมาทดสอบหาสมบัติความต้านทานแรงดึง โดยใช้ Load cell ขนาด 500 นิวตัน โดยมีเลเซอร์เป็นอุปกรณ์วัดความยืดของยาง ชุดเครื่องดึงต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อบันทึกผลการทดสอบ และสามารถพิมพ์ผลการทดสอบลงบนเครื่องพิมพ์ได้

ก่อนทำการทดสอบชิ้นงาน จะต้องวัดความหนาโดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่สามารถวัดได้ละเอียด  $\pm 0.005$  มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานมายึดจับด้วยหัวจับ (grip) เมื่อเริ่มทดสอบ หัวจับด้านบนจะเลื่อนขึ้น ขณะที่หัวจับด้านล่างอยู่กับที่ แรงที่ใช้ดึงชิ้นงานตลอดระยะยืดออกจะถูกบันทึกไว้จนยางถูกยืดจนขาด

ความเค้นดึง (tensile stress) หมายถึง แรงดึงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เดิมของชิ้นทดสอบ

$$S = F / A$$

โดย S เป็นความเค้นดึง (Mpa หรือ N/mm<sup>2</sup>)

F เป็นแรงดึง (N, นิวตัน)

A เป็นพื้นที่หน้าตัดเดิม (mm<sup>2</sup>, ตร.มม.)

โมดูลัส (modulus) หมายถึง ความเค้นดึงที่ความยืดที่กำหนด

เช่น โมดูลัส 300 % คือ ความเค้นที่ความยืด 300 %

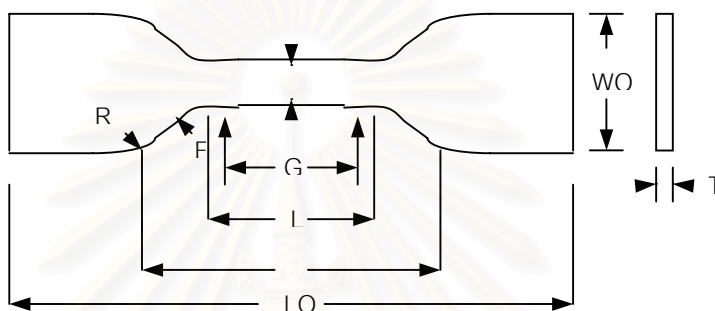
$$\text{โมดูลัส 300 \%} = F_m / A$$

เมื่อ  $F_m$  เป็นแรงดึงที่ทำให้ยางยืดออก 300 % (N)

ความยืดเมื่อขาดหรือความยืดสูงสุด (elongation at break) หมายถึง ส่วนยืดขาด หรือ ส่วนยืดสูงสุด

$$EB = [(L_u - L_o) / L_o] \times 100$$

เมื่อ	EB	เป็นความยืด (%)
	$L_u$	เป็นความยาวระหว่างขีดบนขึ้นทดสอบ (mm.)
	$L_o$	เป็นความยาวระหว่างขีดเดิม (mm.)



รูปที่ ก.1 ลักษณะขึ้นทดสอบความยาวแบบดัมเบลล์

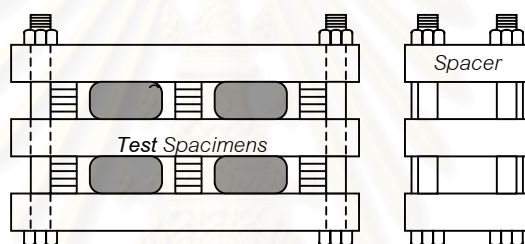
## 2. ความแข็ง (Hardness) [16]

การทดสอบความแข็งโดยใช้ Shore durometer มีหลายชนิดให้เลือกใช้ตามประเภทของวัสดุ เช่น Shore A ใช้กับยางที่นิ่ม Shore B ใช้กับยางที่แข็งและพลาสติก ในงานวิจัยนี้ใช้แบบ Shore A

ข้อควรระวังสำหรับการทดสอบความแข็ง คือ ความหนาของชิ้นงานที่ใช้วัดจะต้องหนามากกว่า 6 มิลลิเมตร แต่ถ้าความหนาของชิ้นงานไม่ถึง 6 มิลลิเมตร จะต้องนำชิ้นงานมาซ้อนกันให้ได้ความหนาตามที่ต้องการ ซึ่งอาจให้ผลที่คลาดเคลื่อนได้ เนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานด้วยกัน

### 3. การยุบตัว (Compression set) [3,16]

เป็นการวัดความสามารถของสารประกอบยาง ที่จะคงสมบัติความเป็นอีลาสติกภายใต้ความเค้นกด (compression stress) เป็นเวลานานๆ สามารถทำได้ 2 วิธี ในงานวิจัยนี้ใช้ Method B เป็นการทดสอบภายใต้ความหนาที่ถูกกดคงที่ ซึ่งจะกดขึ้นทดสอบลง 25 % ของความหนาเดิม เครื่องทดสอบประกอบด้วยแผ่นเหล็ก 2 แผ่นหรือมากกว่าตามรูปที่ ก.2 โดยขึ้นทดสอบที่วัดความหนาเรียบร้อยแล้วจะถูกกดอยู่ระหว่างแผ่นเหล็ก 2 แผ่นจนได้ความหนาตามต้องการ ซึ่งจะมีที่นอนเหล็กซึ่งหนาประมาณ 25 % ของความหนาของการกดภายใต้อุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เมื่อการทดสอบสิ้นสุดลง นำขึ้นทดสอบมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นวัดความหนาของขึ้นทดสอบอีกครั้ง แล้วนำไปคำนวณหาค่าการยุบตัวต่อไป



รูปที่ ก.2 เครื่องทดสอบการยุบตัวโดย Method B

### 4. การบ่มแรงด้วยความร้อน (Heat aging) [16]

ยางส่วนใหญ่จะเสื่อมคุณภาพระหว่างการเก็บและการใช้ สาเหตุของการเสื่อมมีหลายแบบ ซึ่งการทดสอบโดยการบ่มแรงสามารถทำนายอายุการใช้งานของยางได้

การบ่มแรงด้วยความร้อนเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด โดยเป็นการเปรียบเทียบสมบัติด้านความต้านทานแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง ก่อนและหลังได้รับความร้อนจากอากาศภายในตู้อบที่อุณหภูมิ  $100 \pm 1$  °C  $22 \pm 2$  ชั่วโมง ตัวกลางที่ให้ความร้อนในตู้อบจะเป็นอากาศร้อนซึ่งหมุนเวียนอยู่ภายในที่ความดันบรรยากาศ การให้ความร้อนต้องสม่ำเสมอทั่วถึง โดยขึ้นทดสอบจะถูกแขวนในแนวตั้งและต้องไม่สัมผัสกับตู้อบหรือสัมผัสกันเอง

## 5. ความต้านทานต่อของเหลวและการบวมตัว (Fluid resistance) [16]

เป็นการนำชิ้นทดสอบมาสัมผัสกับของเหลว ภายใต้สภาวะที่กำหนดทั้งอุณหภูมิและเวลา ผลการทดสอบที่ได้จะวัดออกมาอยู่ในรูปของการวัดการเปลี่ยนแปลงในสมบัติด้านต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่าง ได้แก่ การบวมตัว (swelling), การเปลี่ยนแปลงสีและน้ำหนัก, การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานแรงดึง ความแข็ง ในการทดสอบมักทำการทดสอบชิ้นงานกับของเหลวที่ต้องสัมผัสจริงในการใช้งาน หรืออาจใช้ของเหลวมาตรฐาน เช่น ASTM หรือ IRM oils ฯลฯ

ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (volume swelling) ชิ้นทดสอบที่ใช้จะมีขนาด 25x50x2 mm. และมักทำภายใต้สภาวะอุณหภูมิ คือ  $100 \pm 2$  °C เป็นเวลา 70 ชั่วโมง โดยก่อนนำไปทดสอบจะต้องทำการชั่งน้ำหนักของชิ้นทดสอบก่อน เมื่อผ่านการทดสอบแล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง ทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การบวมตัวของยาง

## 6. ความสามารถในการทนต่อการสัมผัสกับโอโซน (Ozone resistance) [16]

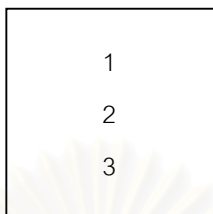
ความเข้มข้นของโอโซนในการทดสอบใช้ในช่วงตั้งแต่ 25-200 pphm ในมาตรฐานการทดสอบทั่วไปนิยมใช้ ค่าความเข้มข้นของโอโซนเป็น 50 pphm การวัดค่าความเข้มข้นของโอโซนโดยทั่วไปจะใช้วิธีให้ โอโซนทำปฏิกิริยาต่อกับโซเดียมไทโอซัลเฟต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของอิเล็กตรอน เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในวงจร



ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากโอโซน นิยมใช้เป็นแถบตรง (strip) ที่มีความกว้างไม่ต่ำกว่า 10 มิลลิเมตร หนา  $2.0 \pm 0.2$  มิลลิเมตร และยาวไม่น้อยกว่า 40 มิลลิเมตร ผิวหน้าเรียบสะอาดไม่มีรอยตัดหรือขาด โดยในการทดสอบจะต้องใช้ชิ้นตัวอย่างอย่างน้อย 3 ชิ้น สำหรับ 1 ตัวอย่าง และอุณหภูมิที่นิยมใช้ในการทดสอบ คือ  $40 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยทำการยืดชิ้นทดสอบออก 20 % นำชิ้นทดสอบไปไว้ในตู้ที่มีโอโซนตามสภาวะที่กำหนด สังเกตลักษณะและขนาดของรอยแตกที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน

## 7. ความต้านทานไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic)

เป็นการวัดค่าความต้านทานการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ของยางโดยใช้เครื่อง VOYAGER ซึ่ง จะทำการวัด 3 จุด ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 จุดวัดค่าความต้านทานการเกิดไฟฟ้าสถิตย์

โดยค่าที่วัดออกมา สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงด้วยกัน คือ

- นำไฟฟ้าได้ (Conductive) มีค่า Antistatic น้อยกว่า  $10^4 - 10^5$  ohms/cm<sup>2</sup>
- นำไฟฟ้าได้เล็กน้อย (Static dissipative) มีค่า Antistatic  $10^6 - 10^{12}$  ohms/cm<sup>2</sup>
- ไม่นำไฟฟ้า (Insulative) มีค่า Antistatic มากกว่า  $10^{12.5}$  ohms/cm<sup>2</sup>

## 8. การถ่ายภาพโดยวิธี SEM (Scanning electron microscopy) [17]

การใช้เครื่อง SEM (Scanning electron microscope) ตัวอย่างที่นำมาถ่ายภาพต้องแห้งและนำไฟฟ้า เนื่องจากระบบของกล้อง SEM ทำงานในระบบสุญญากาศ และใช้อิเล็กตรอน เป็นสื่อกลางในการกำเนิดสัญญาณภาพ ดังนั้นถ้าผิวของตัวอย่างไม่นำไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอน บางส่วนตกค้างอยู่บนผิวของตัวอย่าง เกิด charging effects ถ้าอิเล็กตรอนจะเลี้ยวเบนจาก บริเวณดังกล่าวทำให้ไม่สามารถควบคุมความสว่างและไม่สามารถโฟกัสภาพได้

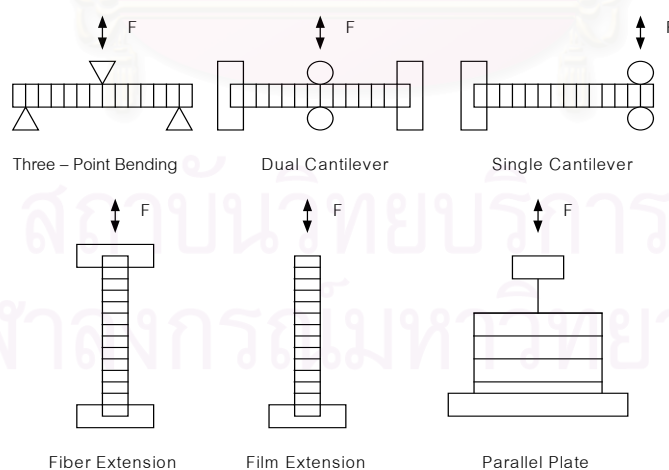
ถ้าต้องการถ่ายภาพตัวอย่างที่ไม่นำไฟฟ้า สามารถทำได้โดยการฉาบผิว (coating) ของตัวอย่างด้วยทอง (Au) ก่อน เพื่อให้ผิวของตัวอย่างมีสมบัตินำไฟฟ้า แต่ในการฉาบทองก็ ต้องมีความระมัดระวังไม่ให้มีความหนาหรือบางของทองมากเกินไป เพราะจะส่งผลต่อภาพถ่ายได้

หลักการทำงานของ SEM คือ การเกิดอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่างทำให้เกิด Secondary electron และจับสัญญาณภาพโดย Detector จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT ภาพที่ได้จะเป็นภาพขาวดำ ซึ่งสามารถขยายภาพได้ 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง

## 8. การทดสอบโดยวิธี DMA (Dynamic mechanical analysis) [23,38]

DMA เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล เช่น โมดูลัส และ  $\tan \delta$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ, เวลา, ความถี่, ความเค้น หรือการประกอบกันของตัวแปรเหล่านี้  $\tan \delta$  เป็นตัวบ่งชี้ที่ไวต่อ การเคลื่อนที่ทุกชนิดของโมเลกุลที่เกิดขึ้นในวัสดุแม้แต่ในภาวะของแข็ง และเป็นตัววิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับการวัดปริมาณของการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล (degree of crosslink), ฐานฐานวิทยาของพอลิเมอร์, ส่วนประกอบของพอลิเมอร์ผสมบล็อกโคพอลิเมอร์ และยังใช้บอกปริมาณของการบ่ม (extent of curing) ในเทอร์โมเซตเรซินได้อีกด้วย

### 9.1 ขีดความสามารถระบบในการวัดค่าของ DMA 7

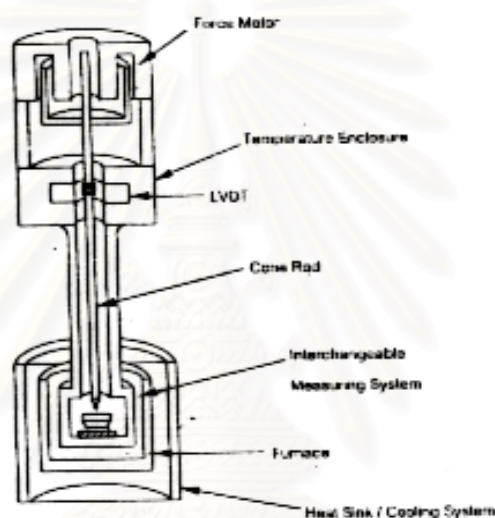


รูปที่ ก.4 ภาพการทดสอบด้วยเครื่อง DMA รูปแบบต่าง ๆ



## 9.2 หลักการ Dynamic mechanical properties

คือ สมบัติเชิงกลของวัสดุขณะที่อยู่ภายใต้แรงที่เป็นคาบ (periodic force) เมื่อให้แรงที่เป็นคาบกระทำต่อวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ ความเครียดจะเกิดในเฟสเดียวกับความเค้น ถ้าวัสดุนั้นมีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ วัสดุนั้นจะตอบสนองต่อแรง โดยความเครียดจะเกิดตามหลังเฟสของความเค้นเป็นมุม  $90^\circ$  แต่ถ้าวัสดุนั้นเป็น Viscoelastic ความเครียดจะเกิดตามหลังเฟสของความเค้นเป็นมุม โดยที่  $0^\circ < \delta < 90^\circ$



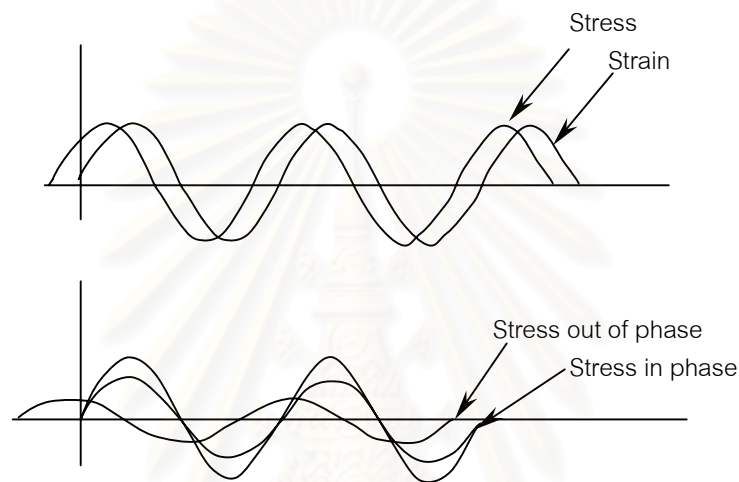
รูปที่ ก.5 ภาพแสดงภาคตัดขวางของ DMA 7

ตัวอย่างของการใช้งาน

DMA สามารถให้ข้อมูลต่างๆ ยกตัวอย่าง เช่น Storage modulus, Loss modulus,  $\tan \delta$ , การเปลี่ยนแปลงสถานะต่ออุณหภูมิ (thermal transition), ความเสถียรต่อรูปร่างเดิม, Multiphase characterization, สัณฐานวิทยาของผลึก (crystallite morphology), สมบัติในการรับแรงกระแทก (impact performance), สมบัติต่อการใช้งานเป็นเวลานาน (longtime behavior), ผลของพลาสติกไซเซออร์

Loss tangent ( $\tan \delta$ ) เป็นอัตราส่วนของพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของความร้อนต่อพลังงานที่สะสมไว้ในวัสดุที่ยืดหยุ่น

$$\begin{aligned} \text{สมการ} \quad \tan \delta &= \text{Loss modulus} / \text{Storage modulus} \\ &= G'' / G' \end{aligned}$$



รูปที่ ก.6 กราฟแสดงเฟสที่ต่างกันระหว่างความเค้นต่อความเครียดของ viscoelastic material

การทำงานของเครื่อง Force motor จะส่งแรงภาระสถิต (static load) และภาระพลวัต (dynamic load) กระทำต่อวัสดุที่นำมาทดสอบ โดยภาระสถิตเป็นสิ่งที่จำเป็นในการที่จะรักษาการสัมผัสกันของ probe กับวัสดุ ในขณะที่ภาระพลวัตทำให้เกิดการตอบสนองของแอมพลิจูดและเฟสของวัสดุนั้น การเปลี่ยนแปลงการขจัดเชิงพลวัต (dynamic displacement) ของวัสดุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการขจัดของ probe และ LVDT จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับคลื่นไซน์ของแรงที่กระทำต่อวัสดุ แอมพลิจูดของ LVDT จะสัมพันธ์กับค่า storage modulus ส่วนค่า phase lag จะสัมพันธ์กับค่า  $\tan \delta$

**ภาคผนวก ข**  
**การคำนวณต้นทุนการผลิต**

**1. การคิดต้นทุนต่อปริมาตร (บาท/ลบ.ม.)**

1.1 ราคาของสารเคมีแต่ละตัว (บาท)

$$\text{ราคา} = \text{ราคา (บาท/กิโลกรัม)} \times \text{น้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในแต่ละสูตร (กิโลกรัม)}$$

1.2 ต้นทุนต่อน้ำหนัก (บาท/กิโลกรัม)

$$\text{ต้นทุนต่อน้ำหนัก} = \frac{\text{ราคารวมของสารที่ใช้ในสูตรทั้งหมด (บาท)}}{\text{น้ำหนักรวมของสารที่ใช้ในสูตรทั้งหมด (กิโลกรัม)}}$$

1.3 ต้นทุนต่อปริมาตร (บาท/ลบ.ม.)

$$\text{ต้นทุนต่อปริมาตร} = \text{ต้นทุนต่อน้ำหนัก (บาท/กิโลกรัม)} \times \text{ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)} \times 1000$$

**2. การคิดต้นทุนการผลิตโดยเปรียบเทียบกับยางธรรมชาติเป็นแกน**

เทียบต้นทุนต่อน้ำหนักของยางและสารเคมีต่างๆ โดยใช้ยางธรรมชาติเป็นแกน

กำหนดให้ราคาต่อน้ำหนักของยางธรรมชาติเป็น 100

ราคายางธรรมชาติ 1 กิโลกรัม เป็น 30 บาท

2.1 ราคาเปรียบเทียบกับน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติ

$$\text{ราคาเปรียบเทียบกับน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติ} = \frac{\text{ราคาต้นทุนต่อน้ำหนัก} \times 100}{30}$$

2.2 ราคาเปรียบเทียบกับปริมาตรเทียบกับยางธรรมชาติ

$$\text{ราคาเปรียบเทียบกับปริมาตรเทียบกับ NR} = \text{ราคาเปรียบเทียบกับน้ำหนักเทียบกับ NR} \times \text{ความหนาแน่นของยาง}$$

## ตัวอย่างการคำนวณ

Items	ราคา (บาท/กก.)	สูตรที่ 7	
		น้ำหนักที่ใช้ (กก.)	ราคา (บาท)
NR	30	-	-
CR	160	0.1	16
ST 60NS	136	-	-
N330	21	0.03	0.63
N660	21	-	-
Napthenic oil	37	-	-
Stearic acid	23	0.0005	0.0115
Hiko tack	150	0.003	0.45
6PPD	172	0.002	0.344
Wax ozone	54	0.001	0.054
MgO	80	0.004	0.32
ZnO	56	0.005	0.28
MBTS	120	0.001	0.12
TMTD	118	0.0003	0.0354
ETU	360	0.001	0.36
S	10	-	-
$\Sigma$		0.1478	18.6049

ราคาของยางพอลิคลอโรพรีนเป็น  $160 \times 0.1 = 16$  บาท

ราคารวมของสารเคมีที่ใช้ในสูตรที่ 7 เป็น 18.6049 บาท

น้ำหนักของสารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในสูตรที่ 7 เป็น 0.1478 กิโลกรัม

ดังนั้น ต้นทุนต่อน้ำหนัก เป็น  $18.6049/0.1478 = 125.879$  บาท/กิโลกรัม

ความหนาแน่นของยางสูตรที่ 7 เป็น 1.363 กรัม/ลบ.ซม.

ดังนั้น ต้นทุนต่อปริมาตร เป็น  $125.879 \times 1.363 \times 1000 = 171,573$  บาท/ลบ.ม.

การคิดราคาเปรียบเทียบโดยมียางธรรมชาติเป็นแกน

ราคาเปรียบเทียบต่อน้ำหนักเทียบกับยางธรรมชาติ เป็น  $125.879 \times 100 = 12,587.9$  บาท

30

ราคาเปรียบเทียบต่อปริมาตรเทียบกับยางธรรมชาติเป็น  $12,587.9 \times 1.363 = 17,157.3$  บาท

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอัจฉรี ตระการวราภรณ์ เกิดวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย