

การใช้ยิปซัมจากเศษแม่แบบปูนปลาสเตอร์เป็นตัวเติมในยางธรรมชาติ

นายสิทธิพร งามสุรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF GYPSUM FROM WASTE PLASTER MOLDS AS FILLER IN NATURAL RUBBERS

Mr. Sittiporn Ngamsurat

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

ChulalongkornUniversity

Academic Year 2010

Copyright of ChulalongkornUniversity

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้เศษยิปซัมจากแม่แบบปูนปลาสเตอร์เป็นตัวเติม ในยางธรรมชาติ
โดย	นายสิทธิพรงามสุรัตน์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอติสร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาวี ศรีภูถัก)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอติสร)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์เสาวรจณี ช่วยจุลจิตร์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ไพพรรณ สันติสุข)

สิทธิพร งามสุรรัตน์ : การใช้ยิปซัมจากเศษแม่แบบปูนปลาสเตอร์เป็นตัวเติมในยางธรรมชาติ. (UTILIZATION OF GYPSUM FROM WASTE PLASTER MOLDS AS FILLER IN NATURAL RUBBERS). อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม :อ.ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด, อ.ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร, 215 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำแม่แบบปูนปลาสเตอร์ที่หมดอายุการใช้งานมาใช้ประโยชน์เป็นตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบกับยิปซัมทางการค้า และแคลเซียมคาร์บอเนตตัวเติมชนิดที่ใช้กันทั่วไป คือ แคลเซียมคาร์บอเนต รวมทั้งศึกษาการใช้งานธรรมชาติอิพอกซีไคซ์เป็นสารคู่ควบเพื่อเพิ่มสภาพความเข้ากันได้ระหว่างตัวเติมและยางธรรมชาติ การทดลองเริ่มจากการนำยางธรรมชาติในลักษณะของยางแท่งและสารเคมีที่จำเป็นสำหรับการวัลคาไนซ์รวมทั้งตัวเติม มาบดผสมกันด้วยเครื่องผสมระบบปิดและเครื่องบดสองลูกกลิ้งตามลำดับ นำยางคอมพาวด์ที่ได้ไปทดสอบสมบัติการคงรูปด้วยรีโอมิเตอร์ชนิดมูฟวิงดาเย จากนั้นทำให้คงรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ นำยางคงรูปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติด้านแรงดึง ความต้านทานแรงฉีกขาด สมบัติเชิงกลพลวัต รวมทั้งศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด จากผลการทดลองพบว่ายิปซัมที่ได้จากแม่แบบปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วนี้สามารถนำมาใช้เป็นตัวเติมไม่เสริมแรงในยางธรรมชาติได้ โดยทำให้ยางคงรูปมีสมบัติดีกว่าหรือใกล้เคียงกับการใช้ยิปซัมทางการค้าและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติม อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของตัวเติมเพิ่มขึ้นเกินกว่า 40 ส่วนในร้อยส่วนของเนื้อยาง (phr) ความทนแรงดึงของยางจะลดลง เนื่องจากตัวเติมเกิดการรวมตัวเป็นก้อน ส่วนความทนแรงฉีกขาดลดลงเมื่อปริมาณของตัวเติมเพิ่มขึ้นเกินกว่า 10 phr สำหรับผลของการใช้ธรรมชาติอิพอกซีไคซ์เป็นสารคู่ควบนั้น แม้ว่าผลการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัตจะชี้ให้เห็นถึงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับตัวเติมเมื่อมีการใช้สารคู่ควบก็ตาม แต่เนื่องจากยิปซัมนี้มีลักษณะเป็นตัวเติมไม่เสริมแรง ผลของยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์จึงไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับยางที่ไม่ได้ใช้ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์สารคู่ควบ

ภาควิชา...วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์.....ลายมือชื่อ.....ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 และเทคโนโลยีสิ่งทอ.....ลายมือชื่อ.....ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....
 ปีการศึกษา 2553.....ลายมือชื่อ.....ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

#5272578923: MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS : WASTE GYPSUM / NATURAL RUBBER / FILLER

SITTIPORN NGAMSURAT : UTILIZATION OF GYPSUM FROM WASTE PLASTER MOLDS AS FILLER IN NATURAL RUBBERS. ADVISOR: ASSOC. PROF. PRANUT POTIYARAJ, Ph.D., CO-ADVISOR: KANOKTIP BOONKERD, Ph.D., URAIWAN LEELA-ADISORN, Ph.D., 215 pp.

In this research, gypsum from waste plaster molds were reutilized as filler in natural rubber in comparison with a commercial gypsum as well as calcium carbonate, a general filler used in natural rubber. Effects of epoxidized natural rubber as a coupling agent were also studied so as to improve compatibility between rubber and filler. Natural rubber was mixed with vulcanizing chemicals and fillers in an internal mixer and a two-roll mill, respectively. Rubber compounds were examined for their curing characteristics using a moving die rheometer and were then cured in a compression molding machine. The vulcanizates were tested for their tensile properties and tear strength. The results indicated that gypsum from waste plaster molds can effectively be used as an inert filler in natural rubber. Mechanical properties of waste gypsum filled rubbers were comparable to those filled with the commercial gypsum and calcium carbonate. However, when the amount of filler was higher than 40 part per hundred rubbers (phr), the tensile strength decreased significantly. The tear strength also dropped when the amount of filler was higher than 10 phr. The decrease in these mechanical properties was due to filler agglomeration. When epoxidized natural rubber was used as a coupling agent, the dynamic mechanical properties clearly illustrated the enhancement of interaction between rubber and filler. However, as gypsum acted as an inert filler, the mechanical properties were almost similar to those without epoxidized natural rubber.

Department: Materials Science Student's Signature

Field of Study: Applied Polymer Science Advisor's Signature

& Textile Technology Co-advisor's Signature

Academic Year: 2553 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้นเป็นเพราะได้รับคำแนะนำทางวิชาการ ความเอื้อเฟื้อในด้านเครื่องมือ วัสดุดิบและสถานที่ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังได้รับความช่วยเหลือและแนะแนวในการทำวิทยานิพนธ์จากผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องซึ่งมีรายชื่อดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง อาจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด และ อาจารย์ ดร.อุไรวรรณ ลีลาอดิศร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาและแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
2. รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
3. รองศาสตราจารย์ เสาวรจณ์ ช่วยจุลจิตร์ และ รองศาสตราจารย์ ไพพรรณ สันติสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
4. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
5. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบ
6. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุดิบและเครื่องมือ
7. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนในด้านกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนสามารถสร้างสรรควิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. วารสารปริทรรศน์.....	4
2.1 ยางธรรมชาติ (natural rubbers, NR).....	4
2.1.1 ประวัติความเป็นมา.....	4
2.1.2 การสกัดน้ำยาง.....	5
2.1.3 โครงสร้างและสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ.....	6
2.1.4 รูปแบบของยางธรรมชาติ.....	9
2.1.5 การใช้งานยางธรรมชาติ.....	11
2.2 การคงรูปของยางธรรมชาติ (vulcanizate system).....	11
2.2.1 ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน (sulfur vulcanizate system).....	11
2.2.2 ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ (peroxide curing system).....	15
2.3 สารเคมีในยางธรรมชาติ(chemicalsinnatural rubber).....	17
2.3.1 สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators).....	17
2.3.2 สารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา (activators).....	21

บทที่

2.3.3	สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antioxidants).....	23
2.3.4	สารตัวเติม (fillers).....	30
1)	สารตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers).....	33
2)	สารตัวเติมไม่เสริมแรง (non-reinforcing fillers).....	37
2.4	ยิปซัม (gypsum).....	37
2.5	กระบวนการผลิตยางคงรูป เครื่องมือ และการผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติ.....	42
2.5.1	ลำดับการผสมสารเคมี และกลไกการผสมสารเคมี.....	42
2.5.2	เครื่องมือที่ใช้ผสมสารเคมีในยาง.....	47
2.6	สมบัติพื้นฐานและมาตรฐานการทดสอบยาง.....	53
2.6.1	สมบัติและการทดสอบคอมพาวด์.....	53
2.6.2	สมบัติและการทดสอบยางคงรูป.....	54
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	61
3.	วิธีการทดลอง.....	64
3.1	ขอบเขตของการทดลอง.....	64
3.2	วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	65
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	66
3.3.1	การเตรียมยางคอมพาวด์.....	66
3.3.2	การวิเคราะห์สมบัติของยางธรรมชาติ.....	67
3.4	วิธีการทดลอง.....	68
3.4.1	การเตรียมยิปซัมเหลือทิ้งจากแม่แบบปูนปลาสเตอร์.....	68
3.4.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบภายในสารตัวเติมชนิดต่างๆ.....	69
3.4.3	การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของตัวเติมชนิดต่างๆ.....	69
3.4.4	การผสมยางคอมพาวด์.....	69
3.4.5	การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์.....	72
3.4.6	การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ.....	73
3.4.7	การทดสอบสมบัติของขึ้นทดสอบยางคงรูป.....	73
1)	ความแข็ง (hardness).....	73

บทที่	
2) ความทนแรงดึง (tensile properties)	74
3) ความทนแรงฉีกขาด (tear strength)	75
4) การบวมตัวในน้ำมัน (oil swelling)	76
5) สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ภายใต้ความร้อน (Thermal gravimetric analysis, TGA)	56
6) สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical properties)	57
7) สัณฐานวิทยา (morphology)	58
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	80
4.1 องค์ประกอบของตัวเติมแต่ละชนิด	80
4.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของตัวเติม	82
4.3 คุณลักษณะของยางคงรูป	83
4.3.1 คุณลักษณะของยางธรรมชาติ/ตัวเติม	84
4.3.2 คุณลักษณะของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์/ตัวเติม	90
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล	96
4.4.1 ความแข็ง	96
4.4.2 สมบัติด้านแรงดึง	101
4.4.3 ความทนแรงฉีกขาด	109
4.5 ผลการทดสอบหาปริมาณพันธะเชื่อมขวางของยางคงรูป	112
4.6 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักภายใต้ความร้อน	116
4.7 สมบัติเชิงกลพลวัต	120
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	123
5.1 สรุปผลการทดลอง	123
5.2 ข้อเสนอแนะ	124
รายการอ้างอิง	125
ภาคผนวก	128

	ญ
	หน้า
บทที่	
ภาคผนวก ก.....	129
ภาคผนวก ข.....	151
ภาคผนวก ค.....	154
ภาคผนวก ง.....	160
ภาคผนวก จ.....	197
ภาคผนวก ฉ.....	202
ภาคผนวก ช.....	207
ภาคผนวก ซ.....	212
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	215

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการออกสูตรยาง	5
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบที่เป็นของแข็งในน้ำยางชนิดต่างๆ	6
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบน้ำยางที่ได้จากการกรีดจากต้น	6
ตารางที่ 2.4 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติ	8
ตารางที่ 2.5 ปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ใน ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน	15
ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้คงรูปในยาง	16
ตารางที่ 2.7 ชนิด ตัวอย่าง และหน้าที่ของสารตัวเร่งปฏิกิริยาอินทรีย์	18
ตารางที่ 2.8 ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM ของซิงก์ออกไซด์	21
ตารางที่ 2.9 ชื่อทางเคมีและชื่อย่อของสารป้องกันการเสื่อมสภาพกลุ่มต่างๆ แบ่งตามโครงสร้างทางเคมี	26
ตารางที่ 2.10 เกรดและการใช้งานของผงเขม่าดำ	34
ตารางที่ 2.11 Moh' s Hardness Scale ของแร่ที่มีอยู่ในธรรมชาติ	40
ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างค่าตัวแปรความสามารถในการละลายของยางและตัวเติมชนิดต่างๆ	45
ตารางที่ 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	65
ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมยิปซัมและยางคอมพาวด์	66
ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์สมบัติของยางธรรมชาติ	67
ตารางที่ 3.4 ลำดับการผสมสารเคมีในยาง	70
ตารางที่ 3.5 ปริมาณสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบยาง	71
ตารางที่ 3.6 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง	75
ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของตัวเติมชนิดต่างๆ	83
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมที่สูตรต่างๆ	119

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างพอลิไอโซพรีน.....	7
รูปที่ 2.2 ปฏิริยาการคงรูปยางด้วยกำมะถัน.....	13
รูปที่ 2.3 โครงสร้างการเชื่อมขวางแบบต่างๆ ของระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน.....	14
รูปที่ 2.4 บิวทิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N – tert – butyl – 2 – benzothiazole sulfonamide, TBSI).....	20
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของเตตระเบนซิลไทยยูแรมไดซัลไฟด์ (tetrabenzylthiuram disulfide, TBzTD).....	20
รูปที่ 2.6 กลไกการเสื่อมสภาพด้วยโอโซน.....	25
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของสารป้องกันการเสื่อมสภาพอนุพันธ์ต่างๆ.....	29
รูปที่ 2.8 เครื่องวัดหาขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ.....	31
รูปที่ 2.9 องค์ประกอบพื้นผิวของผงเขม่าดำ.....	33
รูปที่ 2.10 องค์ประกอบพื้นผิวของซิลิกา.....	37
รูปที่ 2.11 ระบบผลึกแบบมอนอคลินิก.....	38
รูปที่ 2.12 ผลึกยิปซัมแบบต่างๆ.....	38
รูปที่ 2.13 แผนผังลำดับการผสมสารเคมีต่างๆ ในยาง.....	43
รูปที่ 2.14 กลไกการเข้าไปในเนื้อยาง.....	44
รูปที่ 2.15 การกระจายของตัวเติมยาง.....	46
รูปที่ 2.16 การแตกตัวของตัวเติมในยาง.....	46
รูปที่ 2.17 เครื่องผสมต่อเนื่องแบบอัดรีด.....	47
รูปที่ 2.18 เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง.....	48
รูปที่ 2.19 การทำงานของลูกกลิ้งในเครื่องรีด 2 ลูกกลิ้งและตัวอย่างเครื่องรีด 2 ลูกกลิ้ง.....	49
รูปที่ 2.20 การกรีดและสลับไขว้เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวได้ดีขึ้น.....	49
รูปที่ 2.21 เครื่องผสมแบบปิด.....	50
รูปที่ 2.22 ลักษณะโรเตอร์แบบแบนบูรี.....	50
รูปที่ 2.23 ลักษณะโรเตอร์แบบอินเตอร์มิกซ์.....	51
รูปที่ 2.24 ลักษณะแรมรูปตัววี.....	52
รูปที่ 2.25 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (mooney viscometer).....	54

รูปที่ 2.26	ห้วงกบแบบต่างๆ และขั้นตอนทดสอบความแข็ง	55
รูปที่ 2.27	ตัวอย่างกราฟพล็อตระหว่างความเค้นกบและความเครียดกบ	57
รูปที่ 2.28	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุเมื่อได้รับแรงเฉือน	57
รูปที่ 2.29	การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงกลพลวัตในลักษณะกราฟซายน์	60
รูปที่ 2.30	โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์	62
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการวิจัย	64
รูปที่ 3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตัวเติมยิปซัม (ก) เครื่องบดจอร์- คร์ชเซอร์(ข) เครื่องบดพัลเวอร์ไรเซอร์ (ค) เครื่องคัดขนาดอนุภาค (ง) ตู้อบ	68
รูปที่ 3.3	เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	69
รูปที่ 3.4	เครื่องทดสอบหาขนาดอนุภาค laser light scattering	70
รูปที่ 3.5	เครื่องผสมแบบปิด	71
รูปที่ 3.6	เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง	72
รูปที่ 3.7	เครื่อง moving die rheometer	73
รูปที่ 3.8	เครื่องอัดแบบ	74
รูปที่ 3.9	เครื่องวัดความแข็งแบบชอร์	74
รูปที่ 3.10	เครื่องทดสอบเอนกประสงค์	75
รูปที่ 3.11	ลักษณะขั้นตอนทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 37 type II	75
รูปที่ 3.12	ลักษณะขั้นตอนทดสอบความทนแรงฉีกขาดตามมาตรฐานISO 34	76
รูปที่ 3.13	อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบการบวมตัวของยางในน้ำมัน	77
รูปที่ 3.14	เครื่อง thermogravimetric analyzer (TGA)	78
รูปที่ 3.15	เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต	79
รูปที่ 3.16	กล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	79
รูปที่ 4.1	เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทแกรมของตัวเติมแต่ละชนิด (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) ยิปซัมทางการค้า (ค) ยิปซัมเหลือทิ้ง	80
รูปที่ 4.2	อนุภาคของ (ก) ยิปซัมจากแม่แบบเหลือทิ้ง (ข) ยิปซัมทางการค้า ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า	81
รูปที่ 4.3	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต	82
รูปที่ 4.4	การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของยิปซัมการค้า	82

รูปที่ 4.5	การกระจายตัวขนาดอนุภาคของยิปซัมเหลือทิ้ง.....	83
รูปที่ 4.6	ลักษณะการคงรูปยางธรรมชาติ/ตัวเติมที่ปริมาณ 10 phr.....	84
รูปที่ 4.7	ลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต.....	85
รูปที่ 4.8	ลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า.....	85
รูปที่ 4.9	ลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง.....	86
รูปที่ 4.10	กราฟแรงบิดต่ำสุดของยางธรรมชาติ/ตัวเติม.....	87
รูปที่ 4.11	กราฟแรงบิดสูงสุดของยางธรรมชาติ/ตัวเติม.....	87
รูปที่ 4.12	ระยะเวลาสกร์ชของยางธรรมชาติ/ตัวเติม.....	88
รูปที่ 4.13	ระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ/ตัวเติม.....	89
รูปที่ 4.14	กราฟดัชนีอัตราคงรูปของยางธรรมชาติ/ตัวเติม.....	90
รูปที่ 4.15	ระยะเวลาสกร์ชของยางธรรมชาติ/ยิปซัมจากเศษแม่แบบปูนปลาสเตอร์.....	91
รูปที่ 4.16	ระยะเวลาสกร์ชของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต.....	91
รูปที่ 4.17	ระยะเวลาสกร์ชของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า.....	92
รูปที่ 4.18	ระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง.....	92
รูปที่ 4.19	ระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต.....	93
รูปที่ 4.20	ระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า.....	93
รูปที่ 4.21	ดัชนีอัตราคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง.....	94
รูปที่ 4.22	ดัชนีอัตราคงรูปของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต.....	95
รูปที่ 4.23	ดัชนีอัตราคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า.....	95
รูปที่ 4.24	ค่าความแข็ง (Shore A hardness) ของยางธรรมชาติ/สารตัวเติม.....	96
รูปที่ 4.25	ค่าความแข็งของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์.....	97
รูปที่ 4.26	ค่าความแข็งของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต.....	98
รูปที่ 4.27	ค่าความแข็งของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า.....	99
รูปที่ 4.28	ค่าความแข็งของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง.....	100
รูปที่ 4.29	กราฟความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ตัวเติม.....	101
รูปที่ 4.30	กราฟร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ตัวเติม.....	102
รูปที่ 4.31	กราฟ 100% มอดูลัสของยางธรรมชาติ/ตัวเติม.....	103
รูปที่ 4.32	กราฟ 200% มอดูลัสของยางธรรมชาติ/ตัวเติม.....	103

รูปที่ 4.33	กราฟ 300% มอดูลัสของยางธรรมชาติ/ตัวเต็ม.....	104
รูปที่ 4.34	กราฟความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต.....	105
รูปที่ 4.35	กราฟความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้ำ.....	106
รูปที่ 4.36	กราฟความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง.....	107
รูปที่ 4.37	กราฟร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต.....	108
รูปที่ 4.38	กราฟร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้ำ.....	108
รูปที่ 4.39	กราฟร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง.....	109
รูปที่ 4.40	กราฟความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ตัวเต็ม.....	110
รูปที่ 4.41	กราฟความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์.....	110
รูปที่ 4.42	กราฟความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต.....	111
รูปที่ 4.43	กราฟความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้ำ.....	111
รูปที่ 4.44	กราฟความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง.....	112
รูปที่ 4.45	ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ/ตัวเต็ม.....	113
รูปที่ 4.46	ความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ/ตัวเต็ม ที่มีปริมาณยางธรรมชาติ อิพอกซีไคซ์ร้อยละ 25 โดยโมลอยู่ (ก) 5 phr, (ข) 10 phr และ (ค) 15 phr.....	114
รูปที่ 4.47	ความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ/ตัวเต็ม ที่มีปริมาณยางธรรมชาติ อิพอกซีไคซ์ร้อยละ 50 โดยโมลอยู่ (ก) 5 phr, (ข) 10 phr และ (ค) 15 phr.....	115
รูปที่ 4.48	เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ตัวเต็มชนิดต่างๆ ที่มีปริมาณ 40 phr.....	116
รูปที่ 4.49	เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์/ตัวเต็มที่มีปริมาณ ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ (ก) ร้อยละ 25 โดยโมลและ (ข) ร้อยละ 50 โดยโมล.....	117
รูปที่ 4.50	เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ตัวเต็มแต่ละชนิด:(ก)แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) ยิปซัมการค้ำและ (ค) ยิปซัมจากเศษแม่แบบปูนปลาสเตอร์.....	118
รูปที่ 4.51	เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ตัวเต็มต่างๆ ที่มีปริมาณ 40 phr.....	120
รูปที่ 4.52	เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ที่มีหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมล ปริมาณ 15 phr/ยิปซัมเหลือทิ้งที่มีปริมาณ 40 phr.....	121
รูปที่ 4.53	เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ที่มีหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมล ปริมาณ 15 phr/แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีปริมาณ 40 phr.....	122

รูปที่ 4.54 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ
25 และ 50 โดยโมล ปริมาณ 15 phr/ยิปซัมการค้ำที่ปริมาณ 40 phr 122

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งนอกจากจะมีความสำคัญในเชิงการเกษตรแล้ว ยังมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องต่อเนื่องอีกหลายอุตสาหกรรม ก่อให้เกิดรายได้เข้าประเทศเป็นจำนวนมาก แม้ว่าในปัจจุบันจะสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติสม่ำเสมอและเหมาะสมกับการใช้งานแล้วก็ตาม แต่ปริมาณการใช้ยางธรรมชาติจากยางพารายังคงมีสัดส่วนสูง เนื่องจากแนวโน้มในการเลือกใช้วัสดุจากแหล่งทรัพยากรที่สามารถเกิดทดแทนใหม่ได้ (renewable resource) นั้นเอง

ในการใช้งานยางธรรมชาติ จำเป็นต้องนำมาผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์ (vulcanization) เพื่อให้ยางคงรูปที่ได้มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน นอกจากสารเคมีที่จำเป็นสำหรับกระบวนการวัลคาไนซ์แล้ว ยังอาจมีการใช้สารเติมแต่งอื่นเพื่อปรับปรุงสมบัติของยาง เช่น สารป้องกันการเสื่อมสภาพของยาง รวมทั้งตัวเติม (filler) ชนิดต่างๆ หน้าที่สำคัญประการหนึ่งของตัวเติมที่เป็นอนุภาคของแข็งไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ คือการเพิ่มความแข็งตึง (stiffness) ให้กับชิ้นงาน ตัวเติมสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ตัวเติมเสริมแรง (reinforcing filler) เช่น ผงเขม่าดำ ซิลิกา มอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งช่วยทำให้สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติดีขึ้น และตัวเติมไม่เสริมแรง (non-reinforcing filler, inert filler) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งไม่ได้ช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติให้เพิ่มขึ้นมากนัก แต่ด้วยราคาที่ถูกลงของตัวเติมประเภทนี้ จึงทำให้ถูกนำมาใช้เพิ่มเนื้อเพื่อลดต้นทุนของวัตถุดิบยางธรรมชาติ โดยทั่วไปปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเสริมแรงยางธรรมชาติ ได้แก่ ชนิดและโครงสร้างของตัวเติม ขนาดอนุภาค ลักษณะเฉพาะของพื้นผิว อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง รวมทั้งการกระจายตัวในเนื้อยาง

ยิปซัมเป็นแร่โลหะที่มีความแข็งไม่มากนัก คือประมาณระดับ 2 ตามมาตราความแข็งของโมห์ (Mohs' scale of hardness) มีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมซัลเฟตซึ่งมีน้ำรวมอยู่ด้วย (calcium sulphate dihydrate, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ยิปซัมถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้ทำแม่แบบพลาสติกในอุตสาหกรรมเซรามิก ใช้ทำปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ แผ่นยิปซัมอัด และแผ่นยิปซัมบอร์ดในงานก่อสร้าง นำมาทำชอล์กเขียนกระดาน รวมทั้งนำมาผลิตปุ๋ย

แม่แบบพลาสติกในอุตสาหกรรมเซรามิกมีอายุการใช้งานที่จำกัด กล่าวคือเมื่อผ่านการใช้งานมาระยะหนึ่งจะไม่สามารถใช้หล่อผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีได้ เมื่อหมดอายุการใช้งานแล้ว

แม่แบบเหล่านี้จะถูกนำไปกำจัดต่อไป ยิปซัมเหลือทิ้งเหล่านี้อาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น เกิดเป็นผงฝุ่นในอากาศ หรืออาจละลายลงสู่แหล่งน้ำ ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการนำแม่แบบพลาสติกที่หมดอายุการใช้งานเหล่านี้มาใช้ให้เป็นประโยชน์โดยการนำมาใช้เป็นตัวเติมสำหรับยางธรรมชาติ

สำหรับการนำยิปซัมมาใช้เป็นตัวเติมในพอลิเมอร์นั้น มีงานวิจัยพบว่ายิปซัมสามารถนำมาใช้เป็นตัวเติมในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิโพรพิลีน พอลิเอไมด์ 6 และพอลิไวนิลคลอไรด์ ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ดี และมีสมบัติทางด้านวิทยากระแสมะสมกับการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนด้วยกระบวนการฉีดแบบ ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำยิปซัมเหลือทิ้งมาใช้เป็นตัวเติมสำหรับยางธรรมชาติ โดยทดลองเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาติที่ใช้ยิปซัมเหลือทิ้งที่ได้มาจากแม่แบบพลาสติกหมดอายุแล้วเป็นตัวเติม กับยางธรรมชาติที่ใช้ยิปซัมทางการค้า รวมทั้งแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นตัวเติม นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการใช้สารคู่ควบ (coupling agent) ได้แก่ ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและยิปซัมอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของการใช้ยิปซัมจากแม่แบบปูนพลาสติกใช้แล้ว เป็นตัวเติมในยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับสมบัติของยางธรรมชาติที่ใช้ยิปซัมทางการค้าและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติม
2. ศึกษาผลของการใช้ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์เป็นสารคู่ควบในยางธรรมชาติที่ใช้ตัวเติมชนิดต่างๆ ได้แก่ ยิปซัมทางการค้า แคลเซียมคาร์บอเนต และยิปซัมจากแม่แบบปูนพลาสติกใช้แล้ว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการนำแม่แบบพลาสติกเหลือทิ้งเนื่องจากหมดอายุการใช้งานมาบดให้เป็นผงละเอียด แล้วนำไปอบให้แห้ง จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบของยิปซัมที่ได้ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน นำยิปซัมที่ได้ไปบดผสมกับยางธรรมชาติ และสารเคมีที่จำเป็นสำหรับการวัลคาไนซ์ รวมทั้งยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ซึ่งใช้เป็นสารคู่ควบ ทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ เพื่อนำยางคงรูปไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความแข็งแบบชอร์ สมบัติด้านแรงดึง ความต้านทานแรงฉีกขาด และการบวมตัวในน้ำมัน รวมทั้งศึกษาสัณฐานวิทยาของยางคงรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แนวทางในการปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติที่ใช้ยิปซัมจากแม่แบบปูนปลาสเตอร์ใช้แล้วเป็นตัวเติมโดยการใช้อย่างธรรมชาติอิพอกซีไดซ์เป็นสารคู่ควบ

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ยางธรรมชาติ [1] - [5]

2.1.1 ประวัติความเป็นมา

ยางธรรมชาติ (natural rubbers, NR) เป็นวัสดุที่มีการใช้งานกันอย่างต่อเนื่องและแพร่หลายตั้งแต่อดีตมาจนถึงปัจจุบัน ด้วยสมบัติในเรื่องของการยืดออกอย่างมากเมื่อได้รับแรงดึง โดยเทียบกับความยาวเดิม แต่ยางธรรมชาติที่ยังไม่ผ่านกระบวนการคงรูป (vulcanization) หรือที่เรียกว่ายางดิบนั้นมีข้อจำกัดของการใช้งานในด้านต่างๆ มากมายได้แก่ สมบัติเชิงกล (เช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด เป็นต้น) และความทนทานต่อสารเคมีและสารละลายต่างๆ ต่ำ จึงมีการนำยางมาผสมกับสารเคมีและพัฒนาชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใส่ลงไปเรื่อยๆ ทำให้การใช้งานของยางคงรูปได้รับความนิยมอย่างมาก เนื่องจากมีความแข็งแรงเชิงกลต่างๆ สูงขึ้นไม่แปรผันตามอุณหภูมิได้ง่าย ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น และมีความทนทานต่อสารเคมีและตัวทำละลายต่างๆ ได้ดีขึ้น นอกจากการคงรูปแล้ว การเลือกชนิดและปริมาณสารเคมีต่างๆ ที่ใส่ลงไปก็มีผลอย่างมากต่อสมบัติของยางที่ได้ ซึ่งการเลือกชนิดและกำหนดปริมาณสารเคมีต่างๆ เรียกว่า การออกสูตรยาง ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติต่างๆ ของยางคงรูปที่ได้ ดังนั้นผู้ออกสูตรยางต้องทำการศึกษาถึงผลของการเติมสารเคมีแต่ละชนิดและปริมาณที่เติมลงไปอีกด้วย และเพื่อให้ง่ายต่อการปรับสูตรยางนิยมเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปโดยใช้หน่วยปริมาณเป็น phr (part per hundred of rubber) ซึ่งหมายถึงปริมาณของสารเคมีแต่ละชนิดที่เติมลงไปเป็นหน่วยกรัมเมื่อเทียบกับยาง 100 กรัม ซึ่งตัวอย่างสูตรยางแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการออกสูตรยาง [2]

สารเคมี	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติ	100
ซิงก์ออกไซด์	5
กรดสเตียริก	3
Flecto H (สารป้องกันการเกิดออกซิเดชัน)	2
CBS (สารตัวเร่งปฏิกิริยา)	0.5
สารปมกำมะถัน (S8)	2.5
ซีลีกา	30
Multifunctional Additive (MFA)	0.0, 0.3, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.5, 10.0

2.1.2 การสกัดน้ำยาง

ยางพาราหรือยางธรรมชาติได้จากการกรีดยาง ส่วนมากเป็นน้ำยางจากต้นยางสายพันธุ์ *Hevea Braziliensis* ซึ่งมีต้นกำเนิดมาจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งน้ำยางที่ได้จากการกรีดยางจากต้นนั้นเรียกว่า น้ำยางสด (field latex) มีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น มีเนื้อยางแห้งประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (ขึ้นกับสายพันธุ์ของยาง อายุต้นยางและฤดูกาล) แขนงลอยอยู่ในน้ำ ก่อนนำมาใช้งานต้องแยกเนื้อยางแห้งออกจากน้ำก่อน โดยวิธีที่นิยมใช้คือ การนำไปปั่นเหวี่ยง (centrifugation) เพื่อลดปริมาณน้ำในยางออกบางส่วน ทำให้ปริมาณเนื้อยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก เรียกน้ำยางนี้ว่า น้ำยางข้น (concentrated latex) และหากวิเคราะห์ส่วนประกอบในเนื้อยางแห้งพบว่า มีสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีนและฟอสโฟลิพิด (phospholipid) ผสมอยู่ในปริมาณเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.2 – 2.3

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบที่เป็นของแข็งในน้ำยางชนิดต่างๆ [1]

องค์ประกอบ	น้ำยางสด	น้ำยางข้น	น้ำยางสทิม
	100 กรัม	50 กรัม	50 กรัม
DRC ¹	32.5 กรัม	30 กรัม 60%	2.5 กรัม 5.0%
TSC ²	36.0 กรัม	30.75 กรัม 61.50%	5.25 กรัม 10.50%
TSC – DRC	3.5 กรัม	0.75 กรัม 1.5%	2.75 กรัม 5.50%
VFA No. ³	0.10	0.060	0.040
Magnesium ion	200 ppm on Latex	120 ppm	80 ppm
Serum	64 กรัม	19.25 กรัม (38.50%)	44.75 กรัม (89.50%)
รวม	100 กรัม	50 กรัม 100%	50 กรัม 100%

¹ DRC = dry rubber content (ปริมาณเนื้อยางแห้ง)

² TSC = total solid content (ปริมาณของแข็งทั้งหมด)

³ VFA No. = volatile fatty acid number

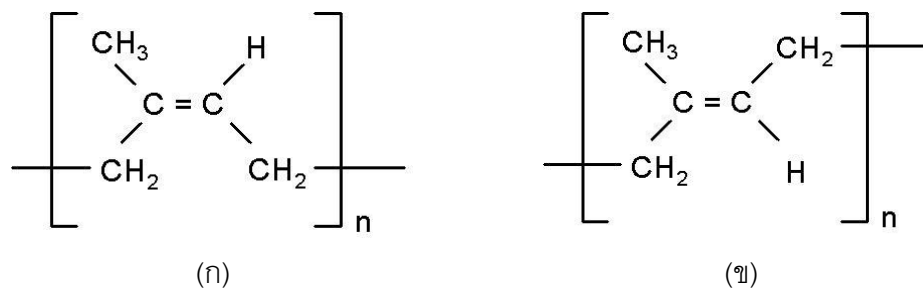
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบน้ำยางที่ได้จากการกรีดยางต้น [1]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (กรัม)	ร้อยละ
DRC	32.5	90.28
TSC – DRC	3.5	9.72
โปรตีน และ ฟอสโฟลิพิด	1 – 1.2	2.78 – 3.33
คาร์โบไฮเดรต	≤ 1	≤ 2.78
รวม	36	100

2.1.3 โครงสร้างและสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติประกอบด้วยพอลิไอโซพรีน (polyisoprene) ซึ่งมี 2 ไอโซเมอร์ คือ cis-1,4-polyisoprene อยู่ประมาณร้อยละ 99.6 โดยน้ำหนักและ trans-1,4-polyisoprene โดยมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.1 ยางธรรมชาติจัดเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear polymer) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมาก มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.93 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) และมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ประมาณ -72 องศา

เซลเซียส จากรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าในโครงสร้างของยางธรรมชาติมีพันธะคู่และหมู่แอลฟาเมธิลีน (α - methylene) ที่ว่องไวต่อสภาพอากาศทั้งออกซิเจน โอโซน รังสีอัลตราไวโอเล็ต อีกทั้งยังว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน คลอรีน ไฮโดรเจนคลอไรด์ เป็นต้น ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยากับสารเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไอโซพรีน

(ก) cis-1,4-polyisoprene (ข) tran-1,4-polyisoprene

โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางภาวะ เช่น ที่อุณหภูมิต่ำ ยางสามารถตกผลึกได้เรียกว่า low temperature crystallization และมีอัตราการตกผลึกสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่า -26°C องศาเซลเซียส ทำให้ยางมีความแข็งมากขึ้น ไม่สามารถผสมให้เข้ากับสารเคมีอื่นได้ แต่การเกิดผลึกในลักษณะนี้จะหายไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จึงเรียกได้ว่าการเกิดผลึกประเภทนี้แบบผันกลับได้ (reversible crystallization)

แต่อีกกรณีหนึ่งที่ทำให้ยางธรรมชาติเกิดผลึกนั้น เรียกว่า strain-induced crystallization เป็นการให้แรงเพียงเล็กน้อย (ยางยืดออกประมาณ 2 – 3 เท่าของความยาวเดิม) เพื่อให้สายโซ่โมเลกุลของยางมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบสามารถเกิดเป็นผลึกได้ในบางส่วน ทำให้ยางมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน คือเปลี่ยนจากโปร่งแสง (translucent) เป็นทึบแสง (opaque) อีกทั้งยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ดีขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาประเภทนี้ทำให้ยางเปลี่ยนสภาพ (เกิดผลึก) อย่างถาวร (irreversible/permanent crystallization)

นอกจากความสามารถในการเกิดผลึกแล้ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติต่างๆ ที่โดดเด่น ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติ [1]

สมบัติ	ลักษณะ
ความยืดหยุ่น (elasticity)	เมื่อให้แรงดึงยางจะสามารถยืดออกได้หลายเท่าของความยาวเดิม และเมื่อเอาแรงออกยางจะกลับคืนสู่สภาพปกติหรือใกล้เคียงสภาพเดิมได้อย่างรวดเร็ว
ความเหนียวติดกัน (tack)	มีสมบัติดีเยี่ยมและเป็นสมบัติเฉพาะของยางธรรมชาติที่นำไปทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ล้อรถยนต์ เป็นต้น
ความทนแรงดึง (tensile strength)	มีความทนต่อแรงดึงที่สูงมาก แม้ไม่มีการเติมตัวเติมเสริมแรง ซึ่งต่างกับยางสังเคราะห์ที่ต้องมีการเติมตัวเติมเสริมแรงเพื่อเพิ่มความทนต่อแรงดึงให้สูงขึ้น
ความทนแรงฉีกขาด (tear strength)	เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้เมื่อให้แรงดึงยืด ทำให้มีความทนทานต่อแรงฉีกขาดสูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง
สมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties)	มีการสูญเสียพลังงานความร้อนในระหว่างการใช้งานที่ต่ำและมีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูง
ความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance)	มีความต้านทานต่อการขัดถูที่สูงกว่ายางทุกชนิด แต่ด้อยกว่ายางเอสปรีอาร์เพียงเล็กน้อย
ความเป็นฉนวนไฟฟ้า (insulation)	เป็นฉนวนไฟฟ้าที่สูงมาก โดยมีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (specific resistivity) ประมาณ $10^{15} - 10^{16}$ Ohm.cm
ความทนต่อของเหลวและสารเคมี (liquid and chemical resistance)	สามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซนและโทลูอีน เป็นต้น แต่ความสามารถในการละลายลดลงเมื่อทำให้ยางคงรูป จึงสามารถเกิดได้แค่การบวมตัวเท่านั้น แต่มีความทนทานต่อตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น อะซิโตน อีทิลแอลกอฮอล์ กรดและด่างเจือจาง แต่ไม่ทนกรดไนตริกและกรดกำมะถันเข้มข้น
การเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (aging properties)	เนื่องจากมีพันธะคู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ยางธรรมชาติมีความไวต่อความร้อน ออกซิเจน โอโซน และแสงแดดอย่างมาก ทำให้ยางเสื่อมสภาพได้ง่าย

ตารางที่ 2.4 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติ (ต่อ)

สมบัติ	ลักษณะ
การหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature flexibility)	เนื่องจาก T_g ของธรรมชาติอยู่ที่ -72 องศาเซลเซียส ยางจึงสามารถรักษาความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำได้เป็นอย่างดี
การยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set)	ที่อุณหภูมิห้องและสูงปานกลาง ยางจะมีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดต่ำ แต่ที่อุณหภูมิต่ำยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกได้ ทำให้มีค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดที่สูงขึ้น
การกระด้างกระดอน (rebound resilience)	มีสมบัติการกระด้างกระดอนสูง เนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่ำ (hysteresis ต่ำ) จึงนิยมใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อเครื่องบิน เป็นต้น
อุณหภูมิการใช้งาน (service temperature)	อุณหภูมิการใช้งานของยางธรรมชาติอยู่ในช่วง -55 ถึง 70 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเก็บในอุณหภูมิต่ำเป็นเวลานาน ยางจะเกิดการตกผลึกทำให้มีความแข็งเพิ่มขึ้น ความยืดหยุ่นลดลง และถ้าเก็บในอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ยางจะเกิดการเสื่อมสภาพ ทำให้ความแข็งแรงเชิงกลต่างๆ ลดลง

2.1.4 ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ [3]

ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามลักษณะรูปแบบของยางดิบ ได้แก่

1) น้ำยาง

- น้ำยางสด ได้จากการสกัดที่กรี๊ดได้จากต้นยางพารา ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ

2.1.2

- น้ำยางข้น เป็นการนำน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นโดยน้ำยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นแล้วจะมีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 55 – 65 ซึ่งสูงกว่าน้ำยางสดที่มีปริมาณเนื้อยางประมาณร้อยละ 25 – 30 ทำให้สามารถทำการขนส่งได้ง่ายขึ้นเป็นอย่างมาก

2) ยางแผ่นผึ่งแห้ง เป็นยางที่ได้จากการนำน้ำยางมาจับตัวเป็นแผ่นโดยสารเคมีที่ใช้จะต้องตามเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนการทำให้แห้งอาจใช้วิธีการผึ่งลมในที่ร่มหรืออบในโรงอบก็ได้ แต่ต้องปราศจากควัน

3) ยางแผ่นรมควัน คือยางแผ่นผึ่งแห้งที่ผ่านกระบวนการรมควันตามมาตรฐานที่อุตสาหกรรมยางกำหนด เพื่อมิให้ยางเสียก่อนเวลาอันควรสามารถเก็บหรือขนส่งยางได้อย่างสะดวก

4) ยางเครพ เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยางไปรีดด้วยเครื่องรีดยางสองลูกกลิ้ง โดยทั่วไปเรียกว่าเครื่องเครพ จะมีการใช้น้ำในการทำความสะดวกในระหว่างการรีด เพื่อนำสิ่งสกปรกออกจากยางในขณะรีดยาง เนื่องจากยางที่ใช้โดยมากเป็นยางที่มีมูลค่าต่ำมีสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างมาก เช่น น้ำยางสกิม เศษยางก้นถ้วย เศษยางที่ติดบนเปลือกไม้หรือติดบนดิน และเศษยางที่ได้จากการผลิตยางแผ่นรมควัน เป็นต้น หลังจากรีดในเครื่องเครพแล้วจะนำยางไปผึ่งแห้ง หรืออบแห้งด้วยลมร้อน ยางเครพที่ได้จะมีสีค่อนข้างเข้ม และมีหลายรูปแบบ เช่น ยาง brown crepe, flat bark crepe, skim crepe และ blanket crepe เป็นต้น ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ส่วนยางเครพขาวเป็นยางเครพที่ได้มาจากน้ำยางที่มีการกำจัดสารเกิดสีในน้ำยางคือ สารบีตาแคโรทีน ซึ่งมีสีเหลืองอ่อน โดยการฟอกสียางให้มีสีขาวด้วยสารเคมี เช่น ไซลิลเมอแคปเทน (xylyl mercaptane) ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก หรือ โททิลเมอแคปเทน (totyl mercaptane) ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักและโซเดียมไบซัลไฟด์ (sodium bisulfide) ร้อยละ 0.5 – 0.75 โดยน้ำหนัก ก่อนการทำให้ยางจับตัวกันเป็นก้อนด้วยกรด ยางเครพขาวเป็นยางที่มีคุณภาพและราคาค่อนข้างสูง

5) ยางแท่ง ก่อนปี พ.ศ. 2508 ยางธรรมชาติที่ผลิตขึ้นมา ส่วนใหญ่จะผลิตในรูปของยางแผ่นรมควัน ยางเครพ หรือน้ำยางข้น ซึ่งยางธรรมชาติเหล่านี้จะไม่มีกระบวนการจัดชั้นยางที่ชัดเจน ตามปกติจะใช้สายตาในการพิจารณาตัดสินชั้นยาง ต่อมาในปี พ.ศ. 2508 สถาบันวิจัยยางมาเลเซีย (Rubber Research Institute of Malaysia) ได้มีการผลิตยางแท่งขึ้นเป็นแห่งแรก เพื่อเป็นการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของยางธรรมชาติให้ได้มาตรฐาน เหมาะสมกับการใช้งาน จนทำให้ยางแท่งเป็นยางธรรมชาติชนิดแรกที่ผลิตมาโดยมีการควบคุมคุณภาพให้ได้มาตรฐาน ตลอดจนมีการระบุคุณภาพของยางดิบที่ผลิตได้แน่นอน

6) ยางแท่งความหนืดคงที่ เป็นยางที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการควบคุมความหนืดของยางที่ใช้ในการแปรรูป เช่น อุตสาหกรรมยางท่อ อุตสาหกรรมทำ

7) ยางskim (skim rubber) เป็นยางธรรมชาติที่ได้จากการจับตัวน้ำยางskim (skim latex) ด้วยกรดแล้วนำยางที่ได้ไปทำการรีดแผ่นและทำให้แห้ง โดยน้ำยางskimเป็นน้ำส่วนที่เหลือจากการทำน้ำยางข้นด้วยการนำน้ำยางสดมาทำการเซนตริฟิวส์ แยกอนุภาคเม็ดยางออกจากน้ำ ซึ่งอนุภาคเม็ดยางเบากว่าน้ำ ส่วนใหญ่จึงแยกตัวออกไปเป็นน้ำยางข้น น้ำยางข้นที่ได้มีปริมาณเนื้อยางอยู่ร้อยละ 60 - 63 ซึ่งน้ำยางskimคือส่วนที่เหลือจากการเซนตริฟิวส์แยกเนื้อยางส่วนใหญ่ออกไปแล้ว ก็ยังมีส่วนของเนื้อยางออกมาด้วย ซึ่งเป็นเนื้อยางที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ๆ มีปริมาณเนื้อยางอยู่ร้อยละ 3 - 6

2.1.5 การใช้งานยางธรรมชาติ

การนำยางธรรมชาติไปใช้งานมีอยู่ 2 รูปแบบคือ รูปแบบน้ำยาง และรูปแบบยางแห้ง ในรูปแบบน้ำยางนั้นน้ำยางสดจะถูกนำมาแยกน้ำออกเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเนื้อยางขึ้นตอนหนึ่งก่อนด้วยวิธีการต่าง ๆ แต่ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคือการใช้เครื่องเซนตริฟิวส์ ในขณะที่การเตรียมยางแห้งนั้นมักจะใช้วิธีการใส่กรดอะซิติกลงในน้ำยางสด การใส่กรดอะซิติกเจือจางลงในน้ำยาง ทำให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน เกิดการแยกชั้นระหว่างเนื้อยางและน้ำ ส่วนน้ำที่ปนอยู่ในยางจะถูกกำจัดออกไปโดยการรีดด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูกกลิ้ง วิธีการหลักๆ ที่จะทำใหยางแห้งสนิทมี 2 วิธีคือ การรมควันยาง และการทำยางเครพ แต่เนื่องจากยางผลิตได้มาจากเกษตรกรจากแหล่งที่แตกต่างกัน ทำให้ต้องมีการแบ่งชั้นของยางตามความบริสุทธิ์ของยางนั้นๆ

2.2 การคงรูปยางธรรมชาติ

โดยปกติแล้วยางไม่สามารถใช้งานได้ดีหากไม่มีการเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ลงไป เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ไม่ดีและสมบัติเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิได้ง่าย อีกทั้งยังมีความทนทานต่อสารเคมีและสารละลายต่างๆ ที่ต่ำอีกด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการเติมสารเติมแต่งต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมสารที่ทำให้ยางคงรูป (curing/vulcanizing agent) เพื่อให้การใช้งานของยางมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยระบบการคงรูปที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมีดังนี้

2.2.1 ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน

ระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน (sulfur vulcanizate system, S_x) นั้นเป็นระบบที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางมากที่สุดเพราะเป็นระบบที่ใช้ต้นทุนต่ำ การคงรูปทำได้เร็ว อีกทั้งยังทำใหยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ข้อจำกัดของการคงรูปในระบบนี้คือ ยางที่จะนำมาคงรูปต้องมีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล กำมะถันจึงจะเข้าทำปฏิกิริยาการคงรูป โดยเกิดพันธะเคมีเป็นโครงร่างตา

ขายได้ ซึ่งยางที่สามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันนั้นได้แก่ ยางธรรมชาติ ยางเอสปีอาร์ (SBR) ยางไออาร์ (IR) ยางบีอาร์ (BR) และยางเอ็นบีอาร์ (NBR) เป็นต้น

1) ชนิดของกำมะถัน

ในอุตสาหกรรมยางแบ่งกำมะถันออกเป็น 2 ชนิดคือ กำมะถันรอมบิก (rhombic) และกำมะถันอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- กำมะถันรอมบิกเป็นกำมะถันที่นิยมใช้มากที่สุด ประกอบด้วยอะตอมของกำมะถัน 8 อะตอมจับตัวกันเป็นวงแหวน (S_8) สามารถตกผลึกได้ กำมะถันชนิดนี้สามารถละลายเข้าไปในพอลิเมอร์ในระดับหนึ่งเรียกว่า กำมะถันละลายได้ (soluble sulfur) ซึ่งการละลายได้บางส่วนของกำมะถันนี้จะก่อให้เกิดปัญหาการตกผลึกเป็นคราบสีเหลืองที่ผิวหน้าของยางคอมพาวด์ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า กำมะถันบลูม (sulfur bloom) การบลูมนี้จะไปทำให้สมบัติความเหนียวติดกันของยางคอมพาวด์เสียไป เกิดปัญหาในผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยสมบัตินี้เพื่อประกอบเป็นชิ้นส่วนต่างๆ จึงมีการใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมไปเช็ดผิวหน้าเพื่อกำจัดกำมะถันส่วนที่บลูมออกมา นอกจากนี้กำมะถันบลูมยังเกิดจากการใส่กำมะถันมากเกินไปจนทำให้มีส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเหลืออยู่ค่อนข้างมากและเคลื่อนตัวมาอยู่ที่ผิวหน้าของยางคอมพาวด์อีกด้วย แต่การบลูมนั้นไม่ได้เกิดจากกำมะถันเพียงอย่างเดียว ยังสามารถเกิดกับสารเคมีอื่นๆ โดยเฉพาะกลุ่มของสารตัวเร่งปฏิกิริยา

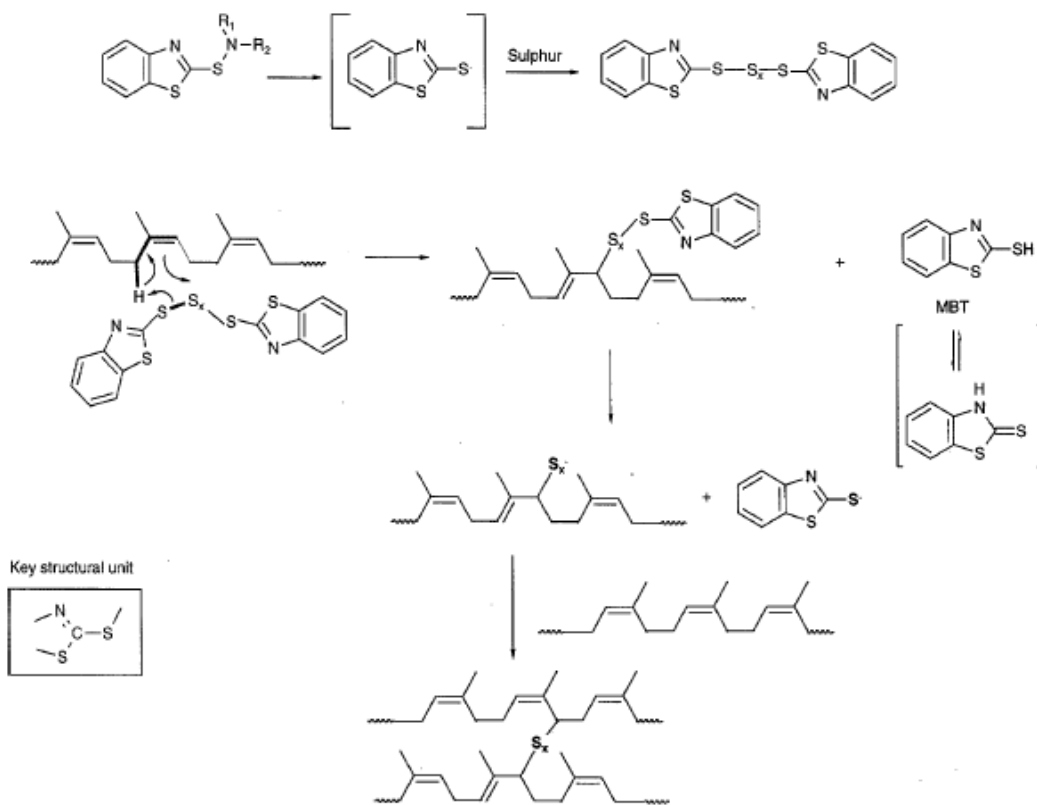
- กำมะถันอสัณฐานเกิดจากการเรียงตัวต่อกันของอะตอมกำมะถันจำนวนมาก จึงทำให้มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักสูง (~100,000 – 300,000) กำมะถันชนิดนี้จึงมีสมบัติที่ไม่ละลายในยางและตัวทำละลายส่วนใหญ่จึงเรียกกำมะถันชนิดนี้ว่า กำมะถันไม่ละลาย (insoluble sulfur) นิยมใช้เพื่อป้องกันการบลูมของกำมะถันทำให้ยางคอมพาวด์มีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดีขึ้น แต่ถ้าให้อุณหภูมิในการผลิตยางคอมพาวด์สูงเกิน 99 – 105 องศาเซลเซียส กำมะถันอสัณฐานจะเปลี่ยนโครงสร้างกลายเป็นกำมะถันรอมบิก ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิหากต้องการใช้กำมะถันอสัณฐานเป็นสารคงรูป เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาการบลูมเกิดขึ้นอีก

นอกจากอุณหภูมิที่เป็นปัจจัยที่เกี่ยวกับเรื่องการเปลี่ยนโครงสร้างแล้ว ความเป็นกรด – ด่าง ยังเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง โดยสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างสามารถเร่งให้กำมะถันอสัณฐานเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีไปเป็นกำมะถันรอมบิกได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังมีสารประกอบที่สามารถปล่อยเอมีนอิสระออกมาได้ เช่น ไดไทโอไดมอร์โฟลีน (dithiodi-morpholine,

DTDM) หรือสารตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มซัลฟิनाไมด์ (sulfonamide) ก็เป็นสารที่ทำให้กำมะถัน
 อัดแน่นเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็นกำมะถันได้เช่นกัน

2) กลไกการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยกำมะถัน

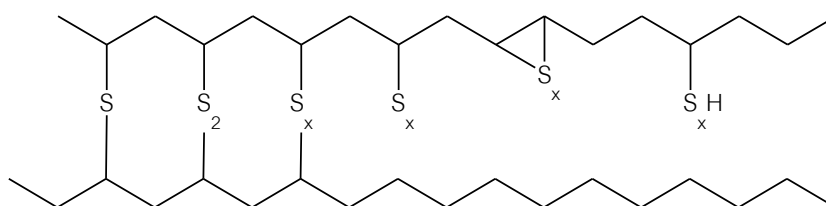
ปฏิกิริยาการควบแน่นเป็นปฏิกิริยาที่ค่อนข้างซับซ้อนและยังไม่สามารถระบุได้
 ชัดเจนในปัจจุบัน ทราบแต่เพียงว่าการควบแน่นเป็นปฏิกิริยาเชิงซ้อนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวกระตุ้น
 ให้กำมะถันสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับพันธะคู่ที่อยู่ในโมเลกุลของยางโดยการเกิดปฏิกิริยา
 เชิงซ้อนของสารกระตุ้นและสารตัวเร่งปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการควบแน่นด้วยกำมะถัน [3]

3) รูปแบบของการเชื่อมขวาง

ในระบบการคงรูปด้วยกำมะถันมีการเชื่อมขวางเกิดขึ้นได้หลายแบบดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยจะเห็นว่า การเชื่อมโยงอาจเกิดด้วยพันธะมอนอซัลไฟดิก (monosulfidic) ไดซัลไฟดิก (disulfidic) หรือพอลิซัลไฟดิก (polysulfidic) ก็ได้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างกำมะถันกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างการเชื่อมขวางแบบต่างๆ ของระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน [4]

ตัวอย่างเช่น ถ้าในระบบมีการใช้ปริมาณกำมะถันสูง การเชื่อมขวางจะเป็นแบบพอลิซัลไฟดิก ยางคงรูปที่ได้จะมีความยืดหยุ่นสูง มีสมบัติเชิงกล สมบัติเชิงพลวัตและความต้านทานต่อการล้าตัวที่ดี เรียกระบบการคงรูปนี้ว่า ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (conventional vulcanization, CV) แต่ถ้าในระบบมีการใช้อัตราส่วนของกำมะถันต่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำหรือไม่มีการเติมกำมะถันลงไปเลย แต่ใช้สารที่สามารถให้กำมะถันในระหว่างกระบวนการคงรูป (sulfur donor accelerator) การเชื่อมขวางส่วนใหญ่จะเป็นแบบมอนอซัลไฟดิกหรือไดซัลไฟดิก ซึ่งเรียกระบบการคงรูปในลักษณะนี้ว่า ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (efficient vulcanization, EV) สมบัติของยางคงรูปที่ได้นั้นจะเด่นในเรื่องของความมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงกว่า มีค่าการเสียรูปหลังการกดอัด (compression set) ที่ต่ำกว่า เนื่องจากพลังงานพันธะของ C – S สูงกว่าพลังงานพันธะของ S – S กล่าวคือ พลังงานพันธะของ C – S มีค่าประมาณ 279 กิโลจูลต่อโมล ส่วนพลังงานพันธะของ S – S มีค่าประมาณ 206 กิโลจูลต่อโมล ดังนั้นยางที่คงรูปด้วยระบบ EV จึงมีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงกว่ายางที่คงรูปด้วยระบบ CV นั่นเอง

เนื่องจากระบบการคงรูปของทั้งสองระบบมีข้อดีที่แตกต่างกัน บางครั้งจึงมีการเลือกใช้ระบบการคงรูปกึ่งประสิทธิภาพ (semi – EV) เพื่อให้ได้สมบัติที่ดีของทั้งสองระบบอยู่ในยางคงรูปซึ่งปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในแต่ละระบบนั้นแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณกำมะถันและสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน [5]

ระบบการคงรูป	ปริมาณกำมะถัน (phr)	ปริมาณสารตัวเร่งปฏิกิริยา (phr)
ระบบการคงรูปแบบดั้งเดิม (CV)	1.5 – 2.5	0.5 – 1.0
ระบบการคงรูปแบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi – EV)	0.5 – 1.2	1.5 – 2.5
ระบบการคงรูปแบบประสิทธิภาพ (EV)	0 – 0.2	2.5 – 3.5

4) การคงรูปในระบบที่ใช้สารเคมีที่ให้กำมะถัน

การคงรูปในระบบนี้เป็นการใช้สารเคมีในกลุ่มของสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถแตกตัวแล้วให้กำมะถันออกมา (sulfur donor accelerator) ถ้าหากมีการใช้สารเหล่านี้ในปริมาณมากหรือใช้แทนกำมะถัน พันธะซัลฟิดิกที่เกิดขึ้นจะเป็นชนิดมอนอหรือไดซัลฟิดิก ทำให้ระบบการคงรูปที่ได้นั้นจะเป็นการคงรูปในระบบ EV ซึ่งมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงเนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.2.2 ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์

ระบบการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์ (peroxide curing system, R-O-O-R) เป็นระบบการคงรูปด้วยสารเคมีที่มีเปอร์ออกไซด์อยู่ในโครงสร้างนิยมใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้าง เช่น EPM EVA CPE Q เป็นต้น หรือยางที่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุลในปริมาณน้อย เช่น HNBR EPDM เป็นต้น แต่การคงรูปด้วยระบบนี้ต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูงเนื่องจากสารเคมีที่ใช้มีราคาแพง อีกทั้งยังมีปัญหาเรื่องของกลิ่นจากสารที่เป็นผลพลอยได้จากการคงรูปด้วยระบบการคงรูปนี้ แต่ด้วยเหตุผลที่ว่าบางชนิดไม่มีหรือมีพันธะคู่ในปริมาณน้อยนั้นไม่สามารถคงรูปด้วยระบบกำมะถันที่มีราคาต้นทุนที่ถูกลงได้ จึงทำให้การคงรูปด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ยังได้รับความนิยมอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งสารประกอบเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้มีอยู่หลายชนิดดังนี้

1) ชนิดของเปอร์ออกไซด์

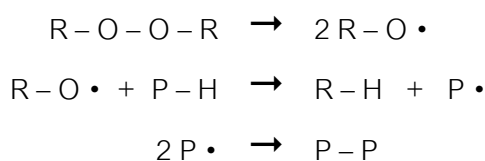
เปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ในกลุ่มไดอัลคิลเปอร์ออกไซด์ (dialkyl peroxide) ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างเปอร์ออกไซด์อินทรีย์ที่ใช้คงรูปในยาง [5]

ชื่อและสูตรทางเคมี	ชื่อทางการค้า	รูปแบบ	ความบริสุทธิ์ (ร้อยละ)	หมายเหตุ
เบนโซอิล เปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide)	Lucidol	ผงเปียกชื้น	80	เหมาะสำหรับ
	Lucidol B-70	กึ่งแข็งกึ่งเหลวใน phthalate plasticizer	70	ยางซิลิโคน เท่านั้นและผงที่
	Lucidol S-50	กึ่งแข็งกึ่งเหลว ในน้ำมันซิลิโคน	50	อยู่ในสภาพแห้ง อาจจะเปิดได้ง่าย
ไดคลอโรเบนโซอิล เปอร์ออกไซด์ (2,4 - dichlorobenzoyl peroxide)	Perkadox SD	ผงเปียกชื้น	50	เหมาะสำหรับ
	Perkadox PDB-50	กึ่งแข็งกึ่งเหลวใน phthalate plasticizer	50	ยางซิลิโคน เท่านั้นและผงที่
	Perkadox PDS-50	กึ่งแข็งกึ่งเหลว ในน้ำมันซิลิโคน	50	อยู่ในสภาพแห้ง อาจจะเปิดได้ง่าย
ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide)	Perkadox SB	ผง	95	เหมาะสำหรับ
	Perkadox BC-40	ผง	40	ยางธรรมชาติ
	Perkadox BM-50	ผง	50	ยางสังเคราะห์
	Dicup	ผง	96	โอเลฟิน และยาง
	Dicup 40C	ผง	40	ซิลิโคน
บิวทิลเปอร์ออกซี ไดเมทิลเฮกเซน (2,5-di-(t- butylperoxy)-2,5- dimethyl hexane)	Varox	ผง	50	เหมาะสำหรับ
	Luperco 101-XL	ผง	45	ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ โอเลฟิน และยาง ซิลิโคน
บิวทิลเปอร์ออกซีได ไอโซโพรพิลเบนซีน (di-(t-butyl peroxy)- diisopropylbenzene)	Vulcup	ผง	85	เหมาะสำหรับ ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ โอเลฟิน และยาง ซิลิโคน

2) กลไกการคงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์

เปอร์ออกไซด์จะได้รับการกระตุ้นจากแหล่งพลังงานภายนอก เช่น ความร้อน แสงแดด หรือแสงอัลตราไวโอเล็ต และสลายตัวได้เป็นอนุมูลอิสระ อนุมูลอิสระนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์โดยการดึงไฮโดรเจนมาจากพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์กลายเป็นพอลิเมอร์อนุมูลอิสระ และเมื่อพอลิเมอร์อนุมูลอิสระ 2 โมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยารวมตัวกัน จะได้พอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมขวางทางเคมีเกิดขึ้น ดังกลไกที่แสดงต่อไปนี้



2.3 สารเคมีในยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาตินอกจากจะเติมสารคงรูปเพื่อเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลและเสถียรภาพทางความร้อนแล้ว จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการเติมสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ โดยสารเติมแต่งแต่ละชนิดจะทำหน้าที่แตกต่างกันไป เช่น การเติมสารกระตุ้นปฏิกิริยาจะทำให้อัตราเร็วในการคงรูปเกิดขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น การเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพจะทำให้อายุการใช้งานของยางยาวนานขึ้น เป็นต้น โดยสารเติมแต่งที่จำเป็นในอุตสาหกรรมยางธรรมชาตินั้นมีดังนี้

- สารตัวเร่งปฏิกิริยา (accelerators)
- สารกระตุ้นปฏิกิริยา (activators)
- สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (antidegradants)
- ตัวเติม (fillers)
- สารคู่ควบ (coupling agents)
- สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ

2.3.1 สารตัวเร่งปฏิกิริยา

สารตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับยางธรรมชาติที่ใช้ในระบบการคงรูปด้วยกำมะถัน เนื่องจากปฏิกิริยาการคงรูปโดยอาศัยกำมะถันเพียงอย่างเดียวนั้นต้องใช้เวลาอย่างมากเพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการเติมสารตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปนั้น เพื่อเป็นการลดระยะเวลาในการคงรูปให้กับยางธรรมชาติ โดยสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางนั้นมีอยู่หลายประเภทดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ชนิด ตัวอย่าง และหน้าที่ของสารตัวเร่งปฏิกิริยาอินทรีย์ [5]

ชนิด	ตัวอย่าง	การใช้งาน
อัลดีไฮด์-เอมีน (aldehyde-amine)	สารที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง บิวทิลอัลดีไฮด์ (butylaldehyde) และ อะนิลีน (aniline)	- สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็ว - ใช้ในยางรีเคลมและยางแข็ง - มีความเป็นพิษสูง
เอมีน (amine)	เฮกซะเมทิลีนเตตระมีน (hexamethylene tetramine, HEXA)	- สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบช้า - มีผล delayed action - ใช้ในยางธรรมชาติ
กัวนิดีน (guanidine)	ไดฟีนิลกัวนิดีน (diphenyl guanidine, DPG)	- สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ ที่ใช้ ร่วมกับกลุ่มไทอะโซล
ไทโอยูเรีย (thiourea)	เอทิลีนไทโอยูเรีย (ethylene thiourea, ETU)	- สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็ว - ใช้ในยาง CR EPDM CSM และ ECO - มีความเป็นพิษสูง
ไทอะโซล (thiazole)	เบนโซไทอะซิลไดซัลไฟด์ (benzothiazyl disulfide, MBTS)	- สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วปาน กลาง - ใช้ในยางธรรมชาติและยาง สังเคราะห์ต่างๆ เช่น SBR IR NBR และ EPDM
ไทยูแรม (thiuram)	เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuram disulfide, TMTD)	- สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็ว - แยกตัวให้กำมะถันได้ - ใช้ในยางธรรมชาติและยาง สังเคราะห์ต่างๆ เช่น SBR IIR และ EPDM
ซัลฟิनाไมด์ (sulfenamide)	ไซโคลเฮกซิลเบนโซไทอะซิลซัลฟิ นาไมด์ (N-cyclohexyl-2-benzothiazyl sulfenamide, CBS)	- สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็ว - มีผล delayed action - ใช้ในยางธรรมชาติและยาง สังเคราะห์ต่างๆ เช่น SBR IR NBR และ EPDM

ตารางที่ 2.7 ชนิด ตัวอย่าง และหน้าที่ของสารตัวเร่งปฏิกิริยาอินทรีย์ (ต่อ)

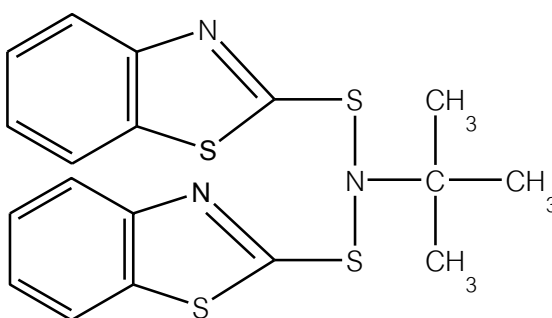
ชนิด	ตัวอย่าง	การใช้งาน
ไดไทโอคาร์บาเมต (dithiocarbamate)	ซิงก์ไดเมทิลไดไทโอคาร์บาเมต (zinc dimethyl dithiocarbamate ZDMC)	- สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วมาก ใช้ในยาง SBR และ IIR
แซนเทต (xanthate)	ไดบิวทิลแซนโทเจนไดซัลไฟด์ (dibutylxanthogen disulfide)	- สารตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเร็วมากที่สามารถคงรูปยางได้ที่อุณหภูมิต่ำ ใช้ในยางธรรมชาติและยาง SBR

ในการเลือกสารตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีความสำคัญอย่างมาก ถึงแม้ว่าในการออกสูตรยางในแต่ละครั้งจะใช้สารชนิดนี้เพียงเล็กน้อย ซึ่งหลักเกณฑ์โดยทั่วไปในการเลือกมีอยู่ 5 ประการคือ

- 1) สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องทำให้ยางคอมพาวด์ที่ได้มีระยะเวลาสกอร์ช (scorch time) ที่ยาวเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดยางตายในระหว่างกระบวนการผลิต
- 2) เมื่อปฏิกิริยาการคงรูปเริ่มเกิดขึ้น สารตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องทำให้อัตราเร็วในการคงรูปสูงขึ้นและความหนาแน่นของการเชื่อมขวางมากขึ้น
- 3) สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องมีอุณหภูมิที่เหมาะสมกับอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการคงรูปยาง
- 4) สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องทำให้ยางคงรูปยึดติดกับผ้าใบหรือโลหะที่ดี หากต้องใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการยึดติดกับสิ่งเหล่านี้
- 5) สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะต้องไม่ก่อให้เกิดปัญหาการบวม

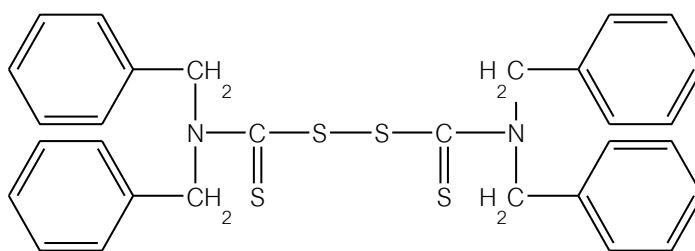
จากตารางที่ 2.7 จะสังเกตได้ว่าสารตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละตัวมีคุณสมบัติเด่นและการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันไป ซึ่งในอุตสาหกรรมยางบางแห่งมีการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดหรือมากกว่ามาใช้งานร่วมกัน โดยสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ลงไปมากกว่านั้นจะเรียกว่า สารตัวเร่งปฏิกิริยาปฐมภูมิ (primary accelerator) ส่วนสารตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ ที่มีปริมาณน้อยกว่าที่เหลือทั้งหมดจะเรียกว่า สารตัวเร่งปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary accelerator) โดยสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ทั้งหมดนี้จะทำงานร่วมกันและให้ผลที่เสริมกัน (synergistic effect) ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น

นอกจากหลักเกณฑ์การเลือกสารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 ประการที่กล่าวมาแล้ว ยังมีสิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งซึ่งให้ความสำคัญอยู่ในปัจจุบันนี้ นั่นคือ ความเป็นพิษของสารตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดสามารถปลดปล่อยสารไนโตรโซเอมีน (nitroso amine, $R_2 - N - N = O$) ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาหรือในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งสารไนโตรโซเอมีนนี้สามารถก่อให้เกิดมะเร็งในสัตว์ได้ โดยส่วนใหญ่จะพบในกลุ่มของสารตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกที่มีหมู่เอมีนทุติยภูมิ (secondary amine) นั่นก็คือกลุ่มซัลฟิनाไมด์ เช่น ไดไอโซโพรพิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N,N - diisopropyl - 2 - benzothiazole sulfenamide, DIBS) และกลุ่มไทยูแรม เช่น เตตระเมทิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetramethylthiuram disulfide, TMTD) เป็นต้น ดังนั้นควรหลีกเลี่ยงการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองกลุ่มนี้ และหันมาใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น ซึ่งในปัจจุบันบริษัทผู้ผลิตสารเคมีได้มีการผลิตสารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดใหม่ออกมาเพื่อทดแทนสารที่เป็นพิษเหล่านี้ เช่น บิวทิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์ (N - tert - butyl - 2 - benzothiazole sulfenamide, TBSI) ซึ่งมีเอมีนปฐมภูมิ (primary amine) อยู่ในโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 และ เตตระเบนซิลไทยูแรมไดซัลไฟด์ (tetrabenzylthiuram disulfide, TBzTD) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 บิวทิลเบนโซไทอะโซลซัลฟิनाไมด์

(N - tert - butyl - 2 - benzothiazole sulfenamide, TBSI)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมเลกุลของเตตระเบนซิลไทยูแรมไดซัลไฟด์

(tetrabenzylthiuram disulfide, TBzTD)

2.3.2 สารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา

สารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาเป็นสารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา คงรูป โดยการเข้ากระตุ้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น แต่กลไกในการทำงานค่อนข้างซับซ้อนและยังไม่ทราบแน่ชัด แต่มีการคาดเดาว่าสารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจะเข้าไปกระตุ้นสารตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร และสารประกอบเชิงซ้อนนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันในยางได้อย่างรวดเร็ว ทำให้อัตราการคงรูปในยางเกิดได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งสารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยานี้แบ่งได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

1) สารอนินทรีย์ เป็นสารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาที่เป็นออกไซด์ของโลหะ เช่น ซิงก์ออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide, MgO) ตะกั่วออกไซด์ (lead oxide, PbO, Pb₃O₄) โดยในอุตสาหกรรมนิยมใช้ซิงก์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด ซึ่งมีแหล่งผลิตมาจาก 2 แหล่งคือ การผลิตแบบฝรั่งเศส (French process) และการผลิตแบบอเมริกัน (American process) ซึ่งข้อกำหนดพื้นฐานต่างๆ ของซิงก์ออกไซด์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM แสดงดังตารางที่ 2.8 โดยปริมาณของโลหะออกไซด์ที่ใช้ในการออกสูตรยางแต่ละครั้งอยู่ที่ 2 – 4 phr

ตารางที่ 2.8 ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM ของซิงก์ออกไซด์ [5]

สมบัติ	แบบฝรั่งเศส	แบบอเมริกัน
ความบริสุทธิ์ (ร้อยละที่น้อยที่สุด)	99.5	99.0
ปริมาณกำมะถัน (ร้อยละที่มากที่สุด)	0.02	0.15
ความชื้นและสารระเหยได้อื่นๆ เมื่อทดสอบที่ 105 องศาเซลเซียส (ร้อยละที่มากที่สุด)	0.25	0.25
ปริมาณสิ่งปลอมปน (ร้อยละที่มากที่สุด)	1.0	2.0
ปริมาณอนุภาคที่เหลืออยู่หลังจากร่อนด้วย ตะแกรงร่อน (sieve) ขนาด 44 ไมครอน (ร้อยละที่มากที่สุด)	0.05	0.10
ปริมาณตะกั่ว (ร้อยละ)	0.002	0.10
ปริมาณแคดเมียม (ร้อยละ)	0.002	0.05
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม)	4.5	3.5

ส่วนออกไซด์ของตะกั่วจะใช้ในบางกรณีเท่านั้น เช่น ต้องการยางคงรูปที่มีความทนทานต่อการบวมพองในน้ำสูงมาก เนื่องจากการใช้งานออกไซด์ของตะกั่วในระบบการคงรูปด้วยกำมะถันจะทำให้ยางเปลี่ยนสีได้ เพราะตะกั่วอาจเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันเกิดเป็นตะกั่วซัลไฟด์ (lead sulfide) ที่มีสีดำ

นอกจากนี้ยังมีการใช้โลหะออกไซด์ร่วมกับกรดไขมัน ($C_{12} - C_{18}$) เพราะเมื่อโลหะออกไซด์และกรดไขมันทำปฏิกิริยากันจะได้สารประกอบที่สามารถละลายในยางได้ จึงทำให้มีอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาของรูปนั้นสูงขึ้น โดยกรดไขมันที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยางคือ กรดสเตียริก (stearic acid) ซึ่งนิยมใช้ในปริมาณ 1 – 3 phr

2) กรดอินทรีย์ ที่นิยมใช้คือกรดสเตียริก ซึ่งนอกจากจะเป็นสารที่เติมลงไปเพื่อทำงานร่วมกับออกไซด์ของโลหะแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (lubricant) ได้อีกด้วย โดยปัจจัยที่มีผลในการเลือกกรดสเตียริกนั้นคือ ปริมาณพันธะคู่ที่อยู่ในโมเลกุล กล่าวคือ พันธะคู่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับกำมะถันได้เช่นเดียวกับยาง ดังนั้นจึงมีมาตรฐานเพื่อกำหนดปัจจัยดังกล่าว นั่นคือมาตรฐาน ASTM ซึ่งได้แบ่งกรดสเตียริกออกเป็น 2 กลุ่มคือ

- กรดสเตียริกที่ใช้ในกรณีที่มีความไม่อิ่มตัวของกรดไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่ออัตราเร็วการคงรูป แบ่งเป็น 3 เกรดย่อยตามค่าไอโอดีน (iodine value) คือ

- 1) เกรดที่มีค่าไอโอดีนต่ำ (น้อยกว่า 8)
- 2) เกรดที่มีค่าไอโอดีนปานกลาง (น้อยกว่า 15)
- 3) เกรดที่มีค่าไอโอดีนสูง (น้อยกว่า 44)

- กรดสเตียริกที่ใช้ในกรณีที่มีความไม่อิ่มตัวของกรดอาจส่งผลกระทบต่ออัตราเร็วการคงรูป เป็นกรดสเตียริกที่มีความอิ่มตัวค่อนข้างสูงหรือมีค่าไอโอดีนต่ำ (น้อยกว่า 1) แบ่งเป็น 2 เกรดย่อยตามปริมาณกรดสเตียริกที่ใช้ คือ เกรดที่มีอัตราส่วนของกรดปาล์มมิติกและกรดสเตียริกเป็น 50 : 40 และเกรดที่มีอัตราส่วนของกรดปาล์มมิติกและกรดสเตียริกเป็น 30 : 65

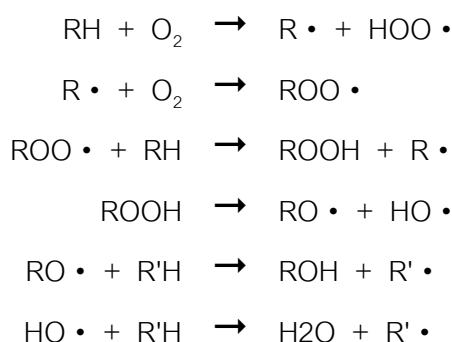
3) สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง เป็นสารที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มค่า pH ของยางให้สูงขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราเร็วในการคงรูปของยางสูงขึ้นด้วย ตัวอย่างของสารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นด่างคือ ไดบิวทิลอะมิโนโอเลเอต (dibutylaminooleate) ไดฟีนิลกวานิดีนฟทาเลต (diphenylguanidinephthalate) และสารประกอบเอมีน เช่น มอนอ-, ได-, ไตร-เอทานอลเอมีน (mono-, di-, tri-ethanolamine) ไดเบนซิลเอมีน (dibenzylamine) และ มอนอ-, ได-บิวทิลเอมีน (mono-, di-butylamine) เป็นต้น

2.3.3 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ

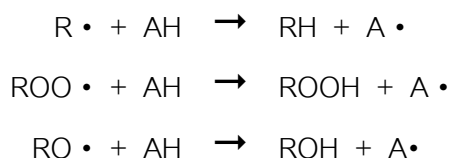
ยางธรรมชาติเป็นยางที่ว่องไวต่อสภาพแวดล้อมที่สูง เช่น ออกซิเจน โอโซน และแสงแดด เป็นต้น เนื่องจากโมเลกุลของยางมีพันธะคู่ซึ่งว่องไวต่อการทำปฏิกิริยามาก ทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพเร็วหากไม่มีการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ โดยสารชนิดนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โอโซน แสงแดด ฯลฯ ได้เร็วกว่าพันธะคู่ในยาง ทำให้ยืดอายุการใช้งานยางให้เสื่อมสภาพช้ากว่าปกติได้ โดยการเสื่อมสภาพด้วยสารและสภาวะต่างๆ มีกลไกที่แตกต่างกันไปดังนี้

1) การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากออกซิเจน (oxygen aging)

ยางคงรูปที่มีพันธะคู่หลงเหลืออยู่ในโมเลกุลสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศได้ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระ (free radical) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



การหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ทั้งหมดนั้นทำโดยการเติมสารป้องกันการเสื่อมสภาพ (AH) เพื่อไปจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาข้างต้น โดยมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



2) การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโลหะหนัก (rubber – poison aging)

โลหะหนักหลายชนิด เช่น ทองแดง แมงกานีส เหล็ก โคบอลต์ และนิกเกิล เมื่อมีการปนเปื้อนในยางจะสามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ แต่โลหะเหล่านี้ต้องอยู่ในรูปที่ละลายในยางได้เท่านั้น เช่น คอปเปอร์โอเลเอต (Cu – oleate) เป็นสารที่สามารถละลายในยางได้ดี จึงทำให้ยางเกิดการเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว

3) การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน (heat aging)

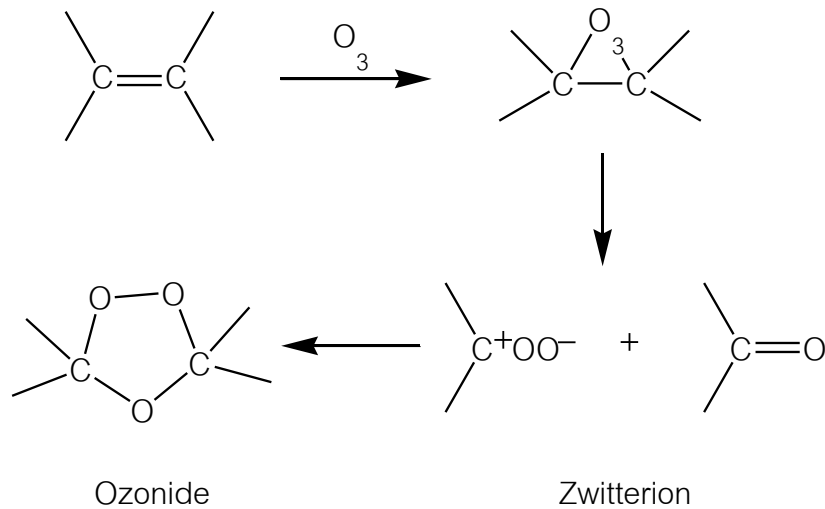
ความร้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของยางแม้ว่าจะอยู่ในสภาพที่ไร้ออกซิเจนก็ตาม โดยปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น การสลายตัวเชิงความร้อนของการเชื่อมขวาง และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของยางที่ไวต่อความชื้น เป็นผลทำให้ยางอ่อนตัว แต่การเสื่อมสภาพจากความร้อนภายใต้ภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะเกิดได้ช้ากว่าในภาวะที่มีออกซิเจน

4) การล้าตัว (fatigue)

การเสื่อมสภาพเมื่อยางได้รับแรงเชิงพลวัตจะทำให้ยางมีรอยแตก โดยเริ่มจากที่บริเวณผิวหน้าและจะขยายใหญ่ขึ้น จนทำให้ยางเกิดการประลัย (failure) ในที่สุด ซึ่งรอยแตกที่เกิดขึ้นมักมีทิศทางในแนวตั้งฉากกับทิศทางของความเค้น สำหรับในยางธรรมชาติจะเกิดรอยแตกได้อย่างรวดเร็ว แต่รอยแตกจะขยายตัวได้ช้ากว่ายางชนิดอื่นๆ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการเชื่อมขวางของยางด้วยเช่นกัน

5) การเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากโอโซน (ozone aging)

รอยแตกเล็กๆ ที่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพนั้นนอกจากจะเกิดจากการล้าตัวเมื่อได้รับแรงพลวัตแล้ว อีกสาเหตุหนึ่งที่สำคัญมากจากการทำปฏิกิริยากับโอโซนในบรรยากาศ โดยกลไกการเสื่อมสภาพจากโอโซนนี้ยังไม่ทราบแน่ชัดแต่คาดว่าเกิดจากการทำปฏิกิริยาผ่านกลไกดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กลไกการเชื่อมสภาพด้วยโอโซน

ซึ่งเมื่อโอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับยางและเกิดเป็นโอโซนไนด์ (ozonide) ซึ่งเป็นหมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดการแตกตัวจากการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยางหากยางได้รับแรงดึงอย่างสม่ำเสมอก็จะทำให้เกิดรอยขาดที่ต่อเนื่องและรวดเร็วขึ้น

6) การเกิดรอยแตกต่อเนื่อง (crazing effect)

สำหรับยางที่ไม่ได้มีแรงภายนอกมากกระทำ ก็สามารถเกิดการเชื่อมสภาพได้เช่นกันหากเก็บไว้นานๆ โดยเฉพาะเก็บไว้บริเวณที่ได้รับแสงแดดหรือแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยจะเกิดรอยแตกที่เรียกว่า craze มีลักษณะคล้ายผิวหนังหรือหนังช้าง ซึ่งมองดูคล้ายกับการเกิดบลูมของกำมะถันหรือตัวเติมอื่นๆ แต่สามารถแก้ไขได้ด้วยวิธีอื่นนอกจากการเติมสารป้องกันการเชื่อมสภาพนั่นก็คือ การเติมตัวเติมที่สามารถดูดซับรังสีจากแสงแดดได้ เช่น ผงเขม่าดำ เป็นต้น

7) ปรากฏการณ์ฟรอสติง (frosting phenomenon)

เป็นการเชื่อมสภาพเมื่อยางถูกใช้งานในสภาวะที่มีโอโซน ความชื้น และอุณหภูมิสูง ซึ่งจะเปลี่ยนสภาพผิวของยางจากที่เคยมันวาวกลายเป็นพื้นผิวที่ด้าน จะเกิดกับยางที่มีสีอ่อนๆ เท่านั้น และจะพบในยางที่ไม่ได้รับแรงเค้น ซึ่งถ้าหากได้รับความเค้นด้วย โอโซนจะกลายเป็นปัจจัยหลักในการเกิดการเชื่อมสภาพและจะเกิดรอยแตกที่ต่อเนื่องดังที่กล่าวไปแล้วในตอนต้น ซึ่งกลไกการเชื่อมสภาพข้างต้นเหล่านี้ถูกยับยั้งโดยการเติมสารป้องกันการเชื่อมสภาพที่แตกต่างกันไปดังตารางที่ 2.9 และตัวอย่างโครงสร้างโมเลกุลของสารป้องกันการเชื่อมสภาพชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.7

ตารางที่ 2.9 ชื่อทางเคมีและชื่อย่อของสารป้องกันการเสื่อมสภาพกลุ่มต่างๆ
แบ่งตามโครงสร้างทางเคมี [5]

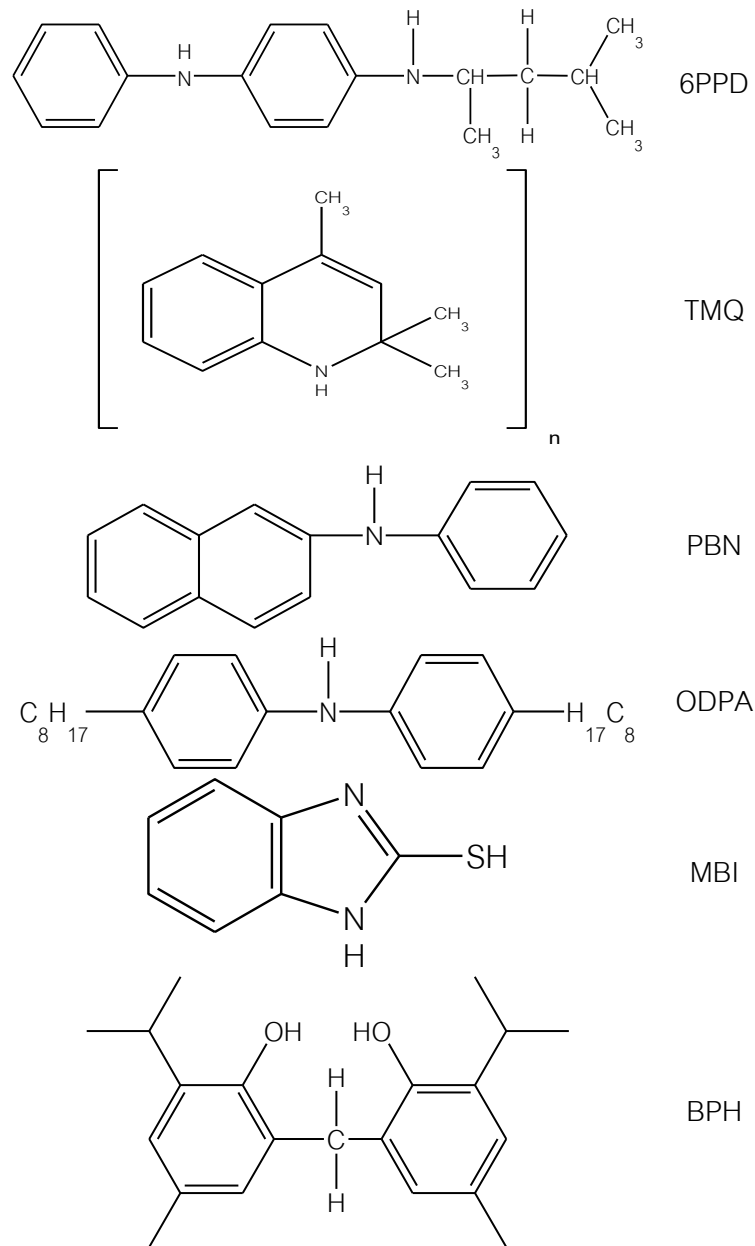
ชื่อทางเคมี	ชื่อย่อ
<p>กลุ่มอนุพันธ์ของฟีนิลลีนไดเอมีน (phenylenediamine derivatives) (เปลี่ยนสีอย่างรุนแรง)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ไอโซโพรพิลฟีนิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N – isopropyl – N' – phenyl – p – phenylenediamine) - ไดเมทิลบิวทิลฟีนิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N – (1,3 – dimethylbutyl) – N' - phenyl – p – phenylenediamine) - ไดเมทิลเพนทิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N,N' – bis – (1,4 – dimethylpentyl) – p – phenylenediamine) - เอทิลเมทิลเพนทิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N,N' – bis – (1 – ethyl – 3 methylpentyl) – p – phenylenediamine) - ไดโทลิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N,N' – ditolyl – p – phenylenediamine) - ไดแนฟทิลฟีนิลลีนไดเอมีน (N,N' – di – β – naphthyl – p – phenylenediamine) 	<p>IPPD</p> <p>6PPD</p> <p>77PD</p> <p>DOPD</p> <p>DTPD</p> <p>DNPD</p>

ตารางที่ 2.9 ชื่อทางเคมีและชื่อย่อของสารป้องกันการเสื่อมสภาพกลุ่มต่างๆ
แบ่งตามโครงสร้างทางเคมี (ต่อ)

ชื่อทางเคมี	ชื่อย่อ
<p>กลุ่มอนุพันธ์ของไดไฮโดรควิโนลีน (dihydroquinoline derivatives) (เปลี่ยนสีอย่างรุนแรง)</p> <ul style="list-style-type: none"> - เอทอกซีไตรเมทิลไดไฮโดรควิโนลีน (6 – ethoxy – 2,2,4 – trimethyl – 1,2 – dihydroquinoline) - พอลิเมออร์ของไตรเมทิลไดไฮโดรควิโนลีน (2,2,4 – trimethyl – 1,2 – dihydroquinoline) 	<p>ETMQ</p> <p>TMQ</p>
<p>กลุ่มอนุพันธ์ของแนฟทิลเอมีน (naphthylamine derivatives) (เปลี่ยนสีอย่างรุนแรง)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ฟีนิลแอลฟาแนฟทิลเอมีน (phenyl – α – naphthylamine) - ฟีนิลเบต้าแนฟทิลเอมีน (phenyl – β – naphthylamine) 	<p>PAN</p> <p>PBN</p>
<p>กลุ่มอนุพันธ์ของไดฟีนิลเอมีน (diphenylamine derivatives) (เปลี่ยนสีอย่างรุนแรง)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ออกทิลเลตไดฟีนิลเอมีน (octylated diphenylamine) - สไตรีนเลตไดฟีนิลเอมีน (styrenated diphenylamine) - ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการควบแน่นของอะซิโตน/ดิสฟีนิลเอมีน (acetone/ disphenylamine condensation product) 	<p>ODPA</p> <p>SDPA</p> <p>ADPA</p>
<p>กลุ่มอนุพันธ์ของเบนซิมิดาโซล (benzimidazole derivatives) (ไม่เปลี่ยนสี)</p> <ul style="list-style-type: none"> - เมอร์แคปโตเบนซิมิดาโซล (2 – mercaptobenzimidazole) - ซิงก์เมอร์แคปโตเบนซิมิดาโซล (zinc – 2 – mercaptobenzimidazole) - เมทิลเมอร์แคปโตเบนซิมิดาโซล (methyl – 2 – mercaptobenzimidazole) - ซิงก์เมทิลเมอร์แคปโตเบนซิมิดาโซล (zinc – 2 – methylmercaptobenzimidazole) 	<p>MBI</p> <p>ZMBI</p> <p>MMBI</p> <p>ZMMBI</p>

ตารางที่ 2.9 ชื่อทางเคมีและชื่อย่อของสารป้องกันการเสื่อมสภาพกลุ่มต่างๆ
แบ่งตามโครงสร้างทางเคมี (ต่อ)

ชื่อทางเคมี	ชื่อย่อ
<p>กลุ่มอนุพันธ์ของบิสฟีนอล (bisphenol derivatives) (ไม่เปลี่ยนสียาง)</p> <ul style="list-style-type: none"> - เมทิลีนเมทิลบิวทิลฟีนอล (2,2' – methylene – bis – (4 – methyl – 6 – tert – butylphenol)) - เมทิลีนเมทิลไซโคลเฮกซิลฟีนอล (2,2' – methylene – bis – (4 – methyl – 6 – cyclohexylphenol)) - ไอโซบิวทิลิดีนเมทิลบิวทิลฟีนอล (2,2' – isobutylidene – bis – (4 – methyl – 6 – tert – butylphenol)) 	<p>BPH</p> <p>CPH</p> <p>IBPH</p>
<p>กลุ่มอนุพันธ์ของมอนอฟีนอล (monophenol derivatives) (ไม่เปลี่ยนสียาง)</p> <ul style="list-style-type: none"> - ไดบิวทิลครีซอล (2,6 – di – tert – butyl – p – cresol) - อัลคิลเลตฟีนอล (alkylated phenol) - สไตรีนตและอัลคิลเลตฟีนอล (styrenated and alkylated phenol) - สไตรีนตฟีนอล (styrenated phenol) 	<p>BHT</p> <p>APH</p> <p>SAPH</p> <p>SPH</p>
<p>สารกลุ่มอื่นๆ (ไม่เปลี่ยนสียาง)</p> <ul style="list-style-type: none"> - อนุพันธ์ของเบนโซฟูราน (benzofuran derivatives) - อีโนลอีเทอร์ (enoether) - พอล리카ร์โบไดอิมิด (polycarbodiimide) 	<p>BD</p> <p>EE</p> <p>PCD</p>



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของสารป้องกันการเสื่อมสภาพอนุพันธ์ต่างๆ [6]

โดยการออกสูตรยางแต่ละครั้งนิยมใช้ปริมาณของสารป้องกันการเสื่อมสภาพในช่วง 1 – 3 phr สาเหตุที่เติมสารนี้ลงไปปริมาณไม่มากนักนั้นเป็นเพราะสารป้องกันการเสื่อมสภาพเหล่านี้จะเข้าไปขัดขวางกระบวนการตัดขาดโมเลกุลของยางอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (thermo – oxidative breakdown) ทำให้ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นและสำหรับหลักการในการเลือกสารป้องกันการเสื่อมสภาพนั้นมีดังนี้

- การเปลี่ยนสียางและทำให้ยางตกลสี
- ความสามารถในการระเหย
- ความสามารถในการละลาย
- เสถียรภาพทางเคมี
- ความเข้มข้นที่เหมาะสม
- ราคา
- ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2.3.4 ตัวเติม

ตัวเติม (filler) เป็นสารเติมแต่งที่เติมลงไปเพื่อจุดประสงค์หลายประการ ได้แก่ สมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด และความแข็ง เป็นต้น ทำให้กระบวนการผลิตยางคอมพาวด์ทำได้ง่ายขึ้น หรือเติมลงไปเพื่อลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น ซึ่งหากจะแบ่งประเภทของตัวเติมนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามความสามารถในการเสริมแรง คือ ตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers) เช่น ผงเขม่าดำ (carbon black) หรือซิลิกา เป็นต้น และอีกชนิดหนึ่งคือตัวเติมไม่เสริมแรงหรือตัวเติมเฉื่อย (non-reinforcing or inert fillers) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมฟอสเฟต ไมกา เป็นต้น ซึ่งการที่จะบอกว่าตัวเติมชนิดใดเป็นตัวเติมเสริมแรงได้นั้น จะมีปัจจัยต่างๆ ในการพิจารณาดังนี้

- ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ (particle size and specific surface area)
- โครงสร้างของตัวเติม (filler structure)
- ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของพื้นผิว (surface activity)
- ความเป็นกรด – ด่าง (pH value)

1) ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ

ปัจจัยทั้งสองมักจะใช้ในการพิจารณาควบคู่กันไปกล่าวคือ ตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคที่เล็ก จะมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยน้ำหนักที่สูง ทำให้มีพื้นที่ที่จะเกิดอันตรกิริยากับยางได้มากขึ้น โดยทั่วไปนั้นสารตัวเติมเสริมแรง เช่น ผงเขม่าดำจะมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิ (primary particle) ที่เล็กมาก ซึ่งจะไม่อยู่กันแบบเดี่ยวๆ แต่จะหลอมหรือรวมตัวกันเป็นกลุ่มเรียกว่า แอกรีเกต (aggregate) แต่ด้วยธรรมชาติของสารแล้ว สารประเภทเดียวกันย่อมมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันมากกว่าสารต่างประเภท ดังนั้นแอกรีเกตหลายกลุ่มอาจจับตัวกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นอีก

เรียกว่า แอกลอเมอเรต (agglomerate) ซึ่งจะทำให้สมบัติต่างๆ ของยางคงรูปลดลงโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดอนุภาคหรือพื้นที่ผิวจำเพาะนั้นมีอยู่หลายเทคนิค เช่น เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคมาสเตอร์ไซเซอร์ (mastersizer) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) และเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET (เป็นทฤษฎีที่เกิดจากการคิดค้นของ Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett และ Edward Teller) เป็นต้น โดยเครื่องที่ใช้ทดสอบแต่ละชนิดมีลักษณะดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแต่ละเครื่องจะมีเทคนิคและข้อจำกัดในการใช้งานแตกต่างกันไป



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.8 เครื่องวัดหาขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะ

(ก) SEM (ข) BET และ (ค) มาสเตอร์ไซเซอร์

2) โครงสร้างของตัวเติม

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าตัวเติมบางชนิดจะไม่อยู่กันแบบอนุภาคเดี่ยวๆ เช่น ผงเขม่าดำ แต่จะอยู่กันเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า โครงสร้าง (structure) ซึ่งแอกกรีเกตจะเป็นโครงสร้างแบบปฐมภูมิ (primary filler structure) ส่วนแอกลอเมอเรตจะมีโครงสร้างแบบทุติยภูมิ (secondary filler structure) ซึ่งโครงสร้างแต่ละโครงสร้างจะมีระดับของการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน กล่าวคือ ระดับการจับตัวเป็นกันมากและเป็นระเบียบสูง ทำให้เกิดช่องว่างน้อย ตัวเติมชนิดนี้จะ

เรียกว่ามี โครงสร้างต่ำ (low structure) แต่ในทางกลับกันหากตัวเติมชนิดใดที่มีการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนน้อย ทำให้เกิดปริมาณช่องว่างมาก ตัวเติมชนิดนี้จะเรียกว่ามี โครงสร้างสูง (high structure) ซึ่งลักษณะโครงสร้างจะสามารถบอกได้ว่าตัวเติมชนิดใดเป็นตัวเติมแบบเสริมแรงหรือไม่เสริมแรงกล่าวคือ หากตัวเติมชนิดใดมีโครงสร้างสูงคือมีช่องว่างที่จะทำให้ยางสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ได้มาก การเสริมแรงก็จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าตัวเติมที่มีโครงสร้างต่ำคือมีช่องว่างที่จะทำให้ยางแทรกตัวเข้าไปได้น้อยนั่นเอง ซึ่งวิธีการวัดปริมาณระดับโครงสร้างของตัวเติมโดยการวัดความสามารถในการอัดตัว (compressibility) หรืออาศัยการดูดซึมของเหลวของตัวเติมซึ่งของเหลวที่นิยมใช้คือไดบิวทิลฟทาเลต (dibutylphthalate, DBPA) ค่าที่ได้จะเรียกว่า ค่า DBPA ซึ่งแสดงผลในรูปของปริมาณ DBPA ที่ถูกดูดซึมต่อปริมาณตัวเติม 100 กรัม

3) ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของพื้นผิว

ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของพื้นผิว หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นการหาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนพื้นผิวของตัวเติม ซึ่งหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของตัวเติมต้องมีความสัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของยางด้วย กล่าวคือยางชนิดใดมีความเป็นขี้สูง เช่น NBR CR ก็จะสามารถทำปฏิกิริยากับผงเขม่าดำหรือซิลิกาได้ดี เนื่องจากผงเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชันหลายชนิด เช่น คาร์บอกซิล (carboxyl) ไฮดรอกซิล (hydroxyl) หรือ ซิลิกาที่มีหมู่ซิลานอล (silanol, - OH) เป็นต้น สำหรับการทดสอบหาความว่องไวของตัวเติมต่อยางนั้นทำได้ค่อนข้างยาก และยังไม่ีมาตรฐานการทดสอบที่แน่นอน แต่ปัจจุบันนิยมใช้ปริมาณของยางบาวด์ (bound rubber) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมเป็นตัวบ่งบอกความว่องไว ในการทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของตัวเติม

4) ความเป็นกรด - ด่าง

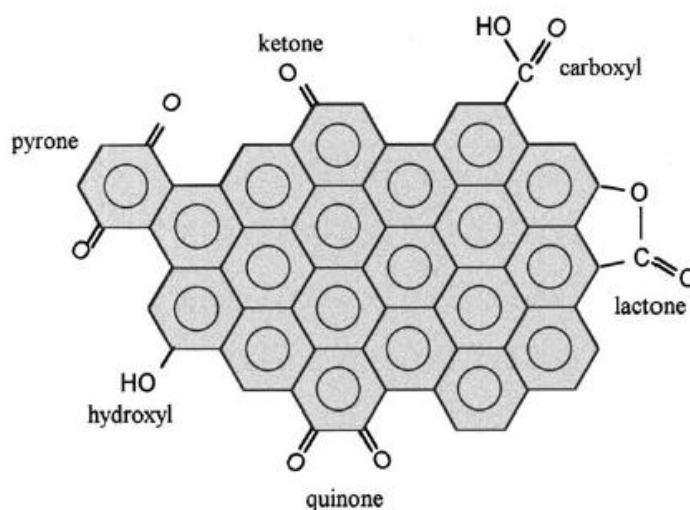
สำหรับความเป็นกรด - ด่างนั้นไม่มีผลโดยตรงต่อสมบัติการเสริมแรงของยางคงรูป แต่จะมีผลกับกระบวนการคงรูปของยางกล่าวคือ ตัวเติมที่มีฤทธิ์เป็นกรดจะไปหน่วงปฏิกิริยาการคงรูปของยางได้ และสำหรับการทดสอบหาความเป็นกรด - ด่างนั้น ทำได้โดยนำตัวเติมร้อยละ 5 - 10 โดยน้ำหนักมาแขวนลอยอยู่ในน้ำแล้ววัดค่า pH ของน้ำนั้น

จากปัจจัยทั้ง 4 ข้อในการระบุถึงประเภทของตัวเติมที่กล่าวมาแล้วนั้น สามารถแบ่งตัวเติมออกเป็น 2 ประเภทคือ ตัวเติมเสริมแรงและตัวเติมไม่เสริมแรง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) ตัวเติมเสริมแรง (reinforcing fillers)

สำหรับตัวเติมเสริมแรงนั้นมีทั้งสารที่เป็นสีดำคือผงเขม่าดำ (carbon black) และสารที่เป็นสีอ่อน (light colored fillers) คือซิลิกา ซึ่งสมบัติของสารตัวเติมทั้งสองมีดังนี้

- ผงเขม่าดำ เป็นตัวเติมที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมยางปัจจุบัน มีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุคาร์บอนมีขนาดอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10 – 100 นาโนเมตร โดยอนุภาคของผงเขม่าดำนั้นมีลักษณะเป็นทรงกลมจับตัวเป็นกลุ่มก้อนเรียกว่า แอกรีเกตมีองค์ประกอบของพื้นผิวดังรูปที่ ซึ่งจะสังเกตว่าที่พื้นผิวประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันหลายชนิด เช่น คาร์บอกซิล คาร์บอนิล ไฮดรอกซิล เป็นต้น ทำให้ลักษณะพื้นผิวของผงเขม่าดำนี้เป็นรูพรุน ไม่เรียบ และเนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นธาตุคาร์บอน จึงทำให้มีความสามารถในการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบพื้นผิวของผงเขม่าดำ [7]

ซึ่งลักษณะของผงเขม่าดำจะแตกต่างกันไปตามกรรมวิธีการผลิตซึ่งมีอยู่ 3 แบบดังนี้

- 1) เฟอร์เนซแบล็ค (furnace black)
- 2) เทอร์มอลแบล็ค (thermal black)
- 3) ชาเนลแบล็ค (channel black)

และในปัจจุบันนิยมแบ่งผงเขม่าดำออกเป็นเกรดต่างๆ หลายชนิดตามลักษณะการคงรูป ขนาดอนุภาค ซึ่งจะใช้ในอุตสาหกรรมยางที่แตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 เกรดและการใช้งานของผงเขม่าดำ [5]

เกรด	การใช้งาน
N110	ให้การเสริมแรงดีที่สุด นิยมใช้ทำดอกยางรถทั่วไปและรถวิ่งทางวิบาก ทำแผ่นรองสะพานและสายพานลำเลียง
N121	คล้าย N110 แต่มีโครงสร้างสูงกว่า จึงทำให้ออกยางมีการสึกหรอสูงกว่าแต่มีการกระจายตัวได้ดีพอๆ กับซีรี่ย์ N200
N134	ให้ความต้านทานต่อการขีดถูที่สูงกว่า N121 ใช้ผลิตดอกยางรถบรรทุกและรถยนต์โดยสาร
N220	ให้ความต้านทานต่อการขีดถู ความทนทานต่อการฉีกขาด และสมบัติแรงดึงสูงมาก การนำไฟฟ้าปานกลาง ใช้ผลิตดอกยางรถบรรทุกและรถยนต์โดยสาร รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานเชิงกลต่างๆ
N231	มีโครงสร้างต่ำ ความต้านทานต่อการขีดถูสูง ใช้ในการผลิตยางล้อรถที่ต้องการสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดสูงๆ
N234	ให้ความต้านทานต่อการขีดถูสูงกว่า N220 สามารถอัดผ่านหัวตาย (die) ได้ดี ใช้ได้กับยางทุกประเภท
N299	คล้าย N234 ใช้ผลิตยางล้อรถบรรทุกและรถโดยสาร ใช้ผลิตดอกยางและผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานเชิงกลต่างๆ
N326	มีโครงสร้างต่ำ ให้การเสริมแรงที่ดี การใช้งานคล้ายกับ N299
N330	ให้ความต้านทานต่อการขีดถู ความทนต่อแรงดึง และความทนต่อการฉีกขาดสูง ยางมีสมบัติกระด้างกระดอนที่ดี มีกระบวนการผลิตที่ง่าย ใช้งานได้หลากหลาย โดยเฉพาะการผลิตยางล้อและผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานเชิงกลต่างๆ

ตารางที่ 2.10 เกรดและการใช้งานของผงเขม่าดำ (ต่อ)

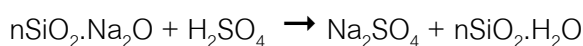
เกรด	การใช้งาน
N339	ให้ความต้านทานต่อการขูดและมีความต้านทานต่อการล้าตัวที่สูงกว่า N347 สามารถอัดผ่านหัวตายได้ดี นิยมใช้ปรับปรุงกระบวนการผลิตในกรณีที่มีการใช้ผงเขม่าดำแบบโครงสร้างสูง
N343	ให้ความต้านทานต่อการขูดสูง และให้สมบัติในกระบวนการผลิตที่ดีคล้ายกับ N339 แต่จะมีโครงสร้างที่สูงกว่า นิยมใช้ผลิตดอกยางรถยนต์โดยสารและรถบรรทุก
N347	ให้สมบัติด้านกระบวนการผลิตที่ดีมาก ทำให้สามารถใช้น้ำมันในปริมาณสูงได้โดยไม่ทำให้ค่าการบวมตัวหลังอัดผ่านตายสูงขึ้นมากนัก ใช้ได้ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ใช้ผลิตดอกยางและผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้งานเชิงกลต่างๆ
N351	ให้ความต้านทานต่อการขูดสูงพอๆ กับ N330 มีโครงสร้างสูง จึงทำให้ยางมีค่ามอดุลัสสูง แต่มีกระบวนการผลิตที่ง่าย มีสมบัติเชิงพลวัตที่สูงมาก นิยมใช้ในการผลิตดอกยางและโครงยางล้อ
N358	มีโครงสร้างสูงมาก ทำให้สามารถรับน้ำมันได้มากกว่าเกรดอื่นๆ ใช้ผลิตดอกยางและผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้งานเชิงกลต่างๆ
N550	ให้ความต้านทานต่อการขูดปานกลาง ให้ความทนทานต่อแรงดึงที่ดี ยางหดตัวน้อย และมีการบวมตัวหลังอัดผ่านตายที่ต่ำ ให้สมบัติการกระเด็งกระดอนที่ค่อนข้างสูง ส่วนใหญ่ใช้ผลิตโครงยางล้อ ท่อยาง ปลอกหุ้มสายเคเบิล รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเสถียรภาพทางรูปร่างสูง
N650	มีโครงสร้างสูง ให้การเสริมแรงปานกลาง ค่าการบวมตัวหลังอัดผ่านตายต่ำ อัดผ่านตายได้ง่าย มีกระบวนการผลิตที่ง่ายและราคาไม่แพง ใช้ในการผลิตโครงยางล้อ แก้มยางล้อ ปลอกหุ้มสายเคเบิล ท่อยาง และยางในของยางรถ
N660	ให้การเสริมแรงปานกลาง เกิดความร้อนขณะการใช้งานต่ำ ทำให้ยางมีกระบวนการผลิตที่ง่าย เป็นเกรดที่ใช้งานโดยทั่วไป
N762	ให้สมบัติการกระเด็งกระดอนและเชิงกลพลวัตที่ดี มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายนอกให้เป็นพลังงานความร้อน (hysteresis) ต่ำ สามารถเติมลงไปได้อย่างได้ในปริมาณสูง ให้การเสริมแรงปานกลาง ส่วนใหญ่ใช้ผลิตสายพาน ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีอัดผ่านตาย และผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

ตารางที่ 2.10 เกรดและการใช้งานของผงเขม่าดำ (ต่อ)

เกรด	การใช้งาน
N772	ให้สมบัติการกระเด็นกระดอนและเชิงกลพลวัตที่ดี ให้การเสริมแรงปานกลาง ใช้ในการผลิตยางล้อและผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานเชิงกลต่างๆ
N774	ให้สมบัติการกระเด็นกระดอนสูงและสมบัติเชิงกลพลวัตที่ดี มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายนอกให้เป็นพลังงานความร้อนต่ำ สามารถเติมลงไปได้อย่างได้ในปริมาณสูง ให้การเสริมแรงปานกลาง ส่วนใหญ่ใช้ผลิตสายพาน ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยวิธีอัดผ่านตาย

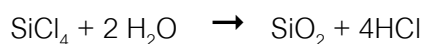
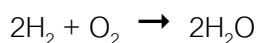
-ซิลิกา (silica) เป็นตัวเติมที่มีสีอ่อน นิยมนำมาทำเป็นตัวเติมเพื่อเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์อีกประเภทหนึ่ง ผลิตได้จาก 2 กรรมวิธีคือ

1) การตกตะกอน (precipitation) ทำโดยการตกตะกอนสารละลายอัลคาไลซิลิเกตด้วยกรดซัลฟูริกดังสมการ



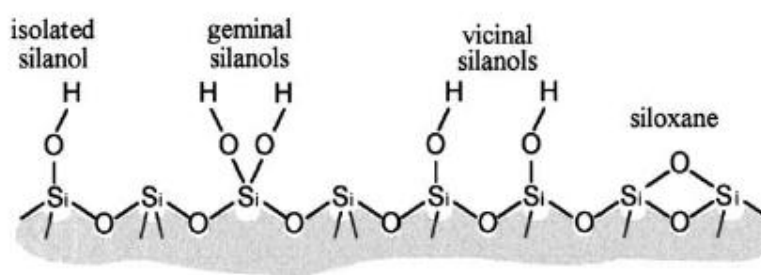
จากนั้นนำไปทำให้เป็นกลางและล้างสารละลายต่างๆ ออกโดยการกรอง จะได้สารที่เรียกว่าพรีซิพิเตตซิลิกา (precipitated silica) ซึ่งเป็นซิลิกาที่นิยมใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง

2) การเผา (pyrogenic) เป็นการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงของซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (silicon tetrachloride, SiCl_4) ในบรรยากาศของไฮโดรเจนและออกซิเจน แล้วทำให้เย็นตัวลงทันทีดังสมการ



ซิลิกาที่ได้จากการเผาเรียกว่า ฟูมซิลิกา (fumed silica) หรือแอนไฮดรัสซิลิกา (anhydrous silica) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงกว่าซิลิกาชนิดแรก แต่มีราคาสูงกว่าและกระบวนการผลิตยางเป็นไปได้ยากกว่า เนื่องจากอนุภาคปฐมภูมิมีขนาดเล็กมาก (7 – 15 นาโนเมตร)

โครงสร้างพื้นผิวของซิลิกาแสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าประกอบไปด้วยหมู่ของไฮดรอกซิลเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับผงเขม่าดำ แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ ซิลิกามีหมู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพียงหมู่เดียวเท่านั้น ส่วนผงเขม่าดำมีทั้งหมู่ที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ทำให้ซิลิกาเข้ากับสารที่ไม่มีขั้วเช่นยางธรรมชาติได้ยาก จึงมีการตัดแปรหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิวของซิลิกาเพื่อให้เข้ากับสารที่ไม่มีขั้วได้มากขึ้น หรือลดความว่องไวของการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวลงโดยการเติมสารอื่นลงไป เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol, PEG) เป็นต้น



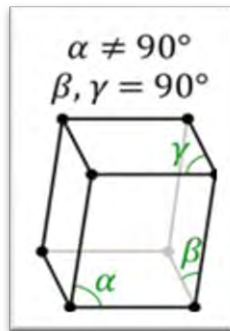
รูปที่ 2.10 องค์ประกอบพื้นผิวของซิลิกา [7]

2) ตัวเติมไม่เสริมแรง (non-reinforcing fillers) [5]

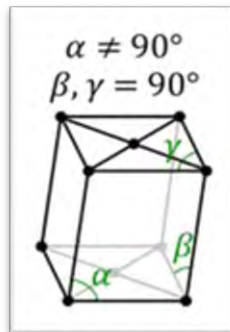
เป็นตัวเติมประเภทที่ใช้ผสมกับยางเพื่อเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติบางประการ หรือส่วนใหญ่นิยมเติมลงไปในยางเพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต ตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงจะเรียกว่า สารเสริมแรง (reinforcing filler) ซึ่งจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก (มีพื้นที่ผิวสูง) ได้แก่ ผงเขม่าดำ (carbon black) เกรดต่างๆ และผงเขม่าขาวหรือซิลิกา เป็นต้น ส่วนตัวเติมที่ไม่ช่วยเสริมแรง (inert filler or non-reinforcing filler) แต่นิยมใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ ดินขาว (clay) แป้งแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น

2.4 ยิปซัม (gypsum)

แร่อยิปซัม (gypsum) จัดเป็นแร่ตระกูลซัลเฟตในหมวดแร่ซัลเฟตที่มีน้ำ โดยมีสูตรองค์ประกอบทางเคมีเป็น $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ โดยที่มาของชื่อมาจากคำภาษากรีก เป็นชื่อดั้งเดิมของแร่ที่มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นแร่ที่มีระบบผลึกแบบนอร์มอลมอนอคลินิก (normal monoclinic) หรือระบบหนึ่งแกนเอียง (2/m) ดังรูปที่ 2.11



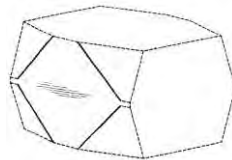
(ก) simple monoclinic



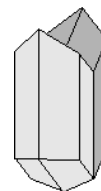
(ข) centered monoclinic

รูปที่ 2.11 ระบบผลึกแบบมอนอคลินิก

ผลึกที่เกิดขึ้นของยิปซัมมักจะเป็นรูปผลึกเดี่ยวดังรูปที่ 2.12 (ก) เช่น อาจจะเป็นรูปแท่งกระดาน หรือปลายตัดรูปทรงเพชร (diamond-shaped) มักเกิดผลึกแฝดรูปร่างคล้ายนกนางแอ่น (swallowtail twins) ดังรูปที่ 2.12 (ข) ยิปซัมในภาษาไทยเรียกว่าเกลือจีด



(a) Diamond-shaped



(b) Swallowtail twins

รูปที่ 2.12 ผลึกยิปซัมแบบต่างๆ

สมบัติทางกายภาพสามารถแสดงได้ดังนี้

1) สี ยิปซัมไม่มีสี หรือมีสีขาวไปจนถึงเทา ในบางครั้งก็อาจมีสิ่งเจือปนที่ทำให้มีสีได้ เช่น สีเหลือง แดง น้ำตาล ปะปนได้เช่นกัน

2) สีผง ไม่มีสีจนถึงสีขาว

3) ความวาว อาจวาวแบบแก้วหรือวาวแบบมุกบนระนาบแนวแตกเรียบหรือแบบเส้นไหม ในพวกชาติินสปาร์

4) การให้แสงผ่าน โปร่งใสหรือโปร่งแสง

5) ความแข็ง แบ่งตาม Moh's Hardness scale อยู่ในระดับ 2 ซึ่งแข็งกว่า talc (ตารางที่ 2.11)

6) ความถ่วงจำเพาะ 2.32

7) แนวแตกเรียบและรอยแตก แนวแตกเรียบ 3 แนว แนวแตกเรียบ [010] ชัดเจน มักจะสามารถแยกเป็นแผ่นบางๆ ได้ แนวแตกเรียบ [100] มักแสดงรอยแตกโค้งเว้ารูปฝ่าหอย และแนวแตกเรียบ [011] มักแสดงรอยแตกแบบเสี้ยนไม้ (ในพวกชาติินสปาร์)

8) ความเหนียว เปราะว่น ส่วนที่เป็นแผ่นบางๆอาจโก่งงอได้เล็กน้อย

นอกจากนี้ยังอาจเกิดเป็นมวลเม็ดอัดกันแน่น เรียกว่า “อะลาบาสเทอร์” (alabaster) หรือเป็นกลุ่มของผลึกที่มีลักษณะเป็นเสี้ยนหรือเส้นใยอัดรวมกันแน่น เรียกว่า “ซาตินสปาร์” (satin spar) หรือบางครั้งอาจเกิดเป็นแผ่นตั้งแต่บางถึงหนา หากมีเนื้อใสเหมือนแก้วเรียกว่า “เซเลไนต์” (selenite)

องค์ประกอบของยิปซัมนั้น มีอัตราส่วนของ $\text{CaO} : \text{SO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 32.6 : 46.5 : 20.9$ เมื่อมีการสูญเสียน้ำ (dehydration) จะค่อยๆ มีการเปลี่ยนแปลง โดยจำนวนโมเลกุลของน้ำจะลดลงหรือเป็น $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียสและจะเปลี่ยนไปเป็นแร่แอนไฮไดรต์ (CaSO_4) ที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส ขึ้นไป

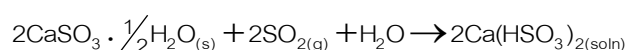
ยิปซัมที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติจัดอยู่ในกลุ่มของ แร่อีแวพอไรต์ (evaporite) ซึ่งเป็นกลุ่มแร่ที่ตกผลึกจากน้ำทะเล (brine) โดยเกิดสะสมตัวในแอ่งระเหยขนาดใหญ่ (evaporite basin) บริเวณชายฝั่งทะเลในเขตภูมิอากาศแห้งแล้ง หรือในทะเลสาบชายทะเล (lagoon basin) ซึ่งจากสภาวะแวดล้อมดังกล่าวนี้เมื่อน้ำทะเลเกิดการระเหยออกไปจากแหล่งสะสมตัวเป็นจำนวนมาก ทำให้น้ำที่เหลือมีความเข้มข้นสูงขึ้นจนถึงจุดที่แร่กลุ่มนี้สามารถตกผลึกออกมาได้

ตารางที่ 2.11 Moh's Hardness Scale ของแร่ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

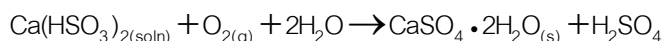
Index Mineral	Scale	Common Objects
Diamond	10	
Corundum	9	
Topaz	8	
Quartz	7	Steel file (6.5)
Orthoclase	6	
Apatite	5	Glass (5.5) Knife blade (5.1)
Fluorite	4	Wire Nail (4.5)
Calcite	3	Penney (3.5) Fingernail (2.5)
Gypsum	2	
Talc	1	

ในบางครั้ง การนำยิปซัมที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยาเคมีมาใช้ประโยชน์ก็สามารถทำได้ เช่นเดียวกับยิปซัมที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแต่อาจจะมีปัญหาและความยุ่งยากซับซ้อนบางประการ เช่น ฟลูแก๊สยิปซัม, ฟอสฟอรัสยิปซัม และ ฟลูออโรแอนไฮไดรต์ ดังนี้

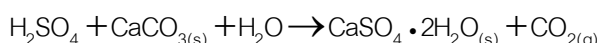
ฟลูแก๊สยิปซัม (flue-gas gypsum) เป็นวัสดุที่ได้จากกระบวนการกำจัดแก๊สกำมะถัน (SO_2) ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงธรรมชาติเช่นถ่านหินต่างๆ และน้ำมัน โดยเฉพาะในสถานีผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะผ่านหินปูน (limestone) หรือหินปูนที่แขวนลอยจากสารอื่น (lime suspension) สวนทางกับแก๊สกำมะถันที่ออกมา ให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ pH ต่ำกว่า 5 ลงมาเพื่อให้แคลเซียมซัลไฟต์ (calcium sulfite) เปลี่ยนไปเป็นแคลเซียมไบซัลไฟต์ที่ละลายน้ำได้ (Soluble calcium bisulfite) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



แคลเซียมไบซัลไฟต์นี้ถูกออกซิไดซ์ง่ายโดยแก๊สออกซิเจนจากอากาศได้เป็นฟลูแก๊สยิปซัม $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้

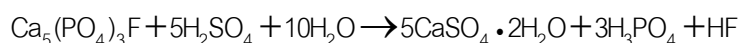


กรดซัลฟิวริกที่ได้จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับหินปูนที่เหลือได้ยิปซัมเพิ่มขึ้น ดังปฏิกิริยา



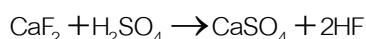
ผลึกยิปซัมที่ได้จะมีขนาดที่โตขึ้นจัดตัวกันแน่นขึ้น มีลักษณะเป็นผงแขวนลอยในน้ำ (suspension) สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยใช้ไฮโดรไซโคลอน (hydrocyclone) และตามด้วย แวคูอัมดรัมฟิลเตอร์ (vacuum drum filter) หรือ การหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ยิปซัมที่ได้จะมีลักษณะเป็นผงละเอียด มีความชื้นสูง มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง มีปริมาณน้ำ (free water content) น้อยกว่าร้อยละ 10

ฟอสไฟยิปซัม (phosphogypsum) เป็นผลพลอยได้จากการผลิตกรดฟอสฟอริกแบบเปียก (wet phosphoric acid) จากหินฟอสเฟต (phosphate rocks, fluorapatite) และกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) ดังสมการเคมี



ปริมาณของฟอสไฟยิปซัมที่ผลิตจึงสูงมาก ซึ่งนอกจากจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของการผลิตกรดแล้ว ยังเพิ่มขึ้นตามปริมาณของการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตอีกด้วย ฟอสไฟยิปซัมนี้อาศัยลักษณะเป็นผงละเอียด ชื้น มีปริมาณน้ำประมาณร้อยละ 20-30 และปริมาณมลทินก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพของหินและกระบวนการที่ใช้ ประมาณว่ามีการผลิตฟอสไฟยิปซัม 1.7 ตัน ต่อแร่หินฟอสเฟต 1 ตัน หรือฟอสไฟยิปซัม 5 ตัน ต่อ ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (phosphorus pentoxide, P_2O_5) ในปัจจุบันประมาณร้อยละ 4 ของฟอสไฟยิปซัมเท่านั้นที่ถูกนำมาใช้งาน ปัญหาใหญ่ก็คือ ปริมาณน้ำและมลทินที่ติดมามีสูงมาก การใช้ยิปซัมธรรมชาติยังถูกกว่าการที่จะแต่งแร่ให้บริสุทธิ์ก่อนนำมาใช้ในอุตสาหกรรม ปริมาณที่ผลิตต่อปีเกินความต้องการใช้ยิปซัมธรรมชาติและแอนไฮไดรต์ (anhydrite) รวมกันของประชากรโลกในแต่ละปีมากนัก

ฟลูออโรแอนไฮไดรต์ (fluoroanhydrite) แอนไฮไดรต์ เป็นผลพลอยได้จากการผลิตกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) จากกรดซัลฟิวริกและฟลูออโรสปาร์ ซึ่งในแต่ละปีมีปริมาณมากโดย 1 ตันของฟลูออโรสปาร์สามารถผลิตแอนไฮไดรต์ได้ถึง 1.75 ตัน ซึ่งฟลูออโรแอนไฮไดรต์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยิปซัมในประเทศเยอรมนีและประเทศใกล้เคียงเท่านั้น สำหรับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นของกระบวนการนี้ คือ



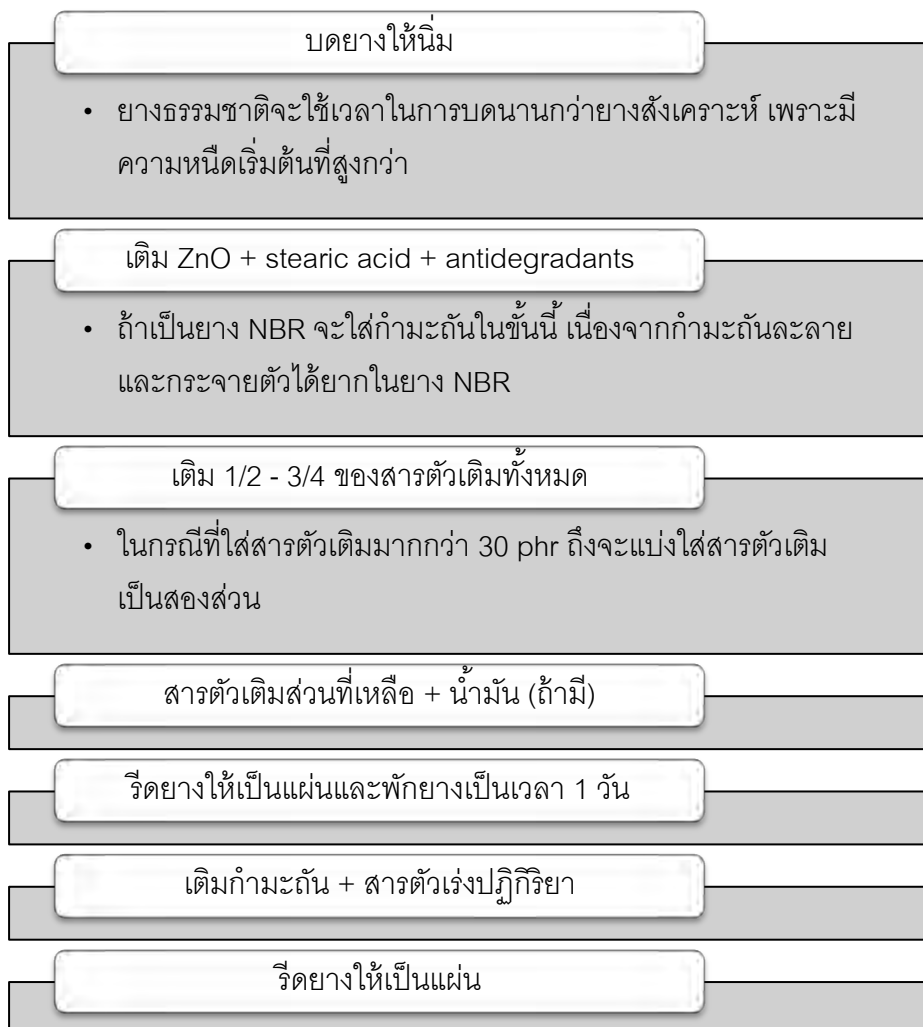
เศษยิปซัม (gypsum scraps) จากอุตสาหกรรมเซรามิกและการหล่อโลหะยังไม่มีกรรมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมยิปซัมอย่างจริงจัง เนื่องจากมีปริมาณน้อย และการกำจัดมลพิษให้ออกจาก slip casting ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง

2.5 กระบวนการผลิตยางคงรูปเครื่องมือและการผสมสารเคมีกับยางธรรมชาติ

2.5.1 ลำดับการผสมสารเคมี และกลไกการผสมสารเคมี

1) ลำดับการผสมสารเคมี

หลังจากการออกสูตรยางแล้ว จำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาถึงลำดับการผสมสารเคมีชนิดต่างๆ กระจายตัวในเมตริกซ์ของยางได้อย่างสมบูรณ์ที่สุดและเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของยางคงรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง ความทนแรงฉีกขาด เป็นต้น โดยลำดับของการผสมสารเคมีแสดงดังแผนผังในรูปที่ 2.13 เริ่มจากการบดยางให้นิ่มเพื่อลดความหนืดของยางให้ต่ำลง จากนั้นเติมซิงก์ออกไซด์ กรดสเตียริก และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ จากนั้นเติมตัวเติมลงไปประมาณ 1/2 ถึง 3/4 เท่าของตัวเติมทั้งหมด ต่อไปใส่ตัวเติมที่เหลือและน้ำมัน (ถ้ามี) จากนั้นรีดยางเป็นแผ่นและพักยางเป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ยางมีการระบายความร้อนและจัดเรียงสายโซ่โมเลกุล



รูปที่ 2.13 แผนผังลำดับการผสมสารเคมีต่างๆ ในยาง

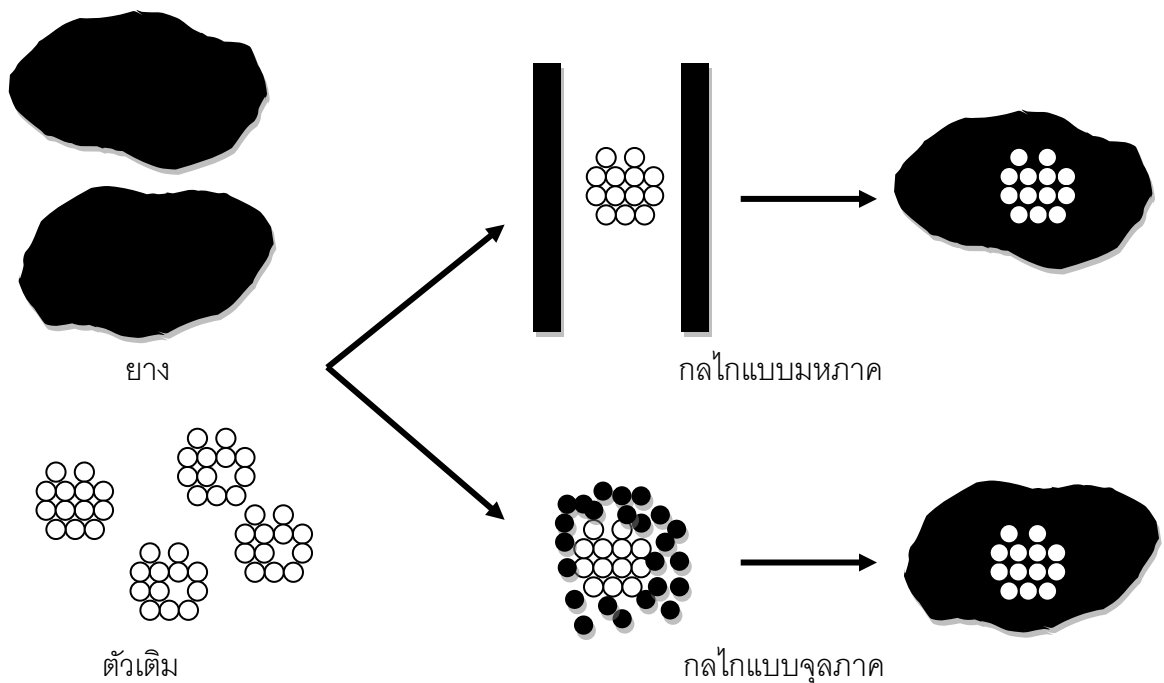
2) กลไกการผสมสารเคมี

การทำให้ยางมีสมบัติที่ดีนั้น ลำดับและเครื่องมือที่ใช้ในการผสมมีส่วนสำคัญที่ทำให้กลไกต่างๆ เกิดขึ้นได้ดี ซึ่งกลไกที่จะกล่าวต่อไปนี้เป็นจุดมุ่งหมายสำคัญที่ควรเกิดขึ้นในการผสมสารเคมีในแต่ละครั้ง โดยประกอบไปด้วย 3 กลไกคือ

การเข้าไปในเนื้อยางของตัวเติม (incorporation)

จากลำดับการผสมที่ต้องมีการบดยางให้นิ่มเป็นการลดความหนืดของยางเพื่อให้ยางสามารถรับตัวเติม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลไกกล่าวคือ เมื่อยางได้รับแรงเฉือนและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะขึ้นกับขนาดของแรงเฉือน โดยในกลไกแรกเป็นกลไกระดับมหภาค คือการที่ยางคลายตัวกลับคืนรูปร่างเมื่อแรงเฉือนที่มากกระทำหมดไปและโอบล้อม

เอาตัวเต็มไว้ในยาง ส่วนอีกกลไกหนึ่งคือกลไกระดับจุลภาค เกิดจากยางได้รับแรงเฉือนที่สูงมาก จนเกิดการฉีกขาดเป็นชิ้นขนาดเล็กลง จากนั้นยางชิ้นเล็กๆ นี้จะเข้าไปโอบล้อมเอาตัวเต็มไว้ ภายใน ซึ่งกลไกระดับมหภาคจะสามารถสังเกตเห็นได้ง่าย ส่วนกลไกระดับจุลภาคจะไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ขั้นตอนเหล่านี้เรียกรวมว่า wetting ดังกลไกที่แสดงในรูปที่ 2.14 โดยทั่วไปแล้วปัจจัยที่มีผลต่อการเข้ารวมตัวกันได้มากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความเป็นขั้วของตัวเต็มกล่าวคือ หากตัวเต็มมีสภาพขั้วต่ำหรือไม่มีขั้วจะเข้ากันได้ดีกับยางที่มีสภาพขั้วต่ำหรือไม่มีขั้ว และในทำนองเดียวกันตัวเต็มที่มีสภาพขั้วสูงจะเข้ากันได้ดีกับยางที่มีสภาพขั้วสูงเช่นกัน



รูปที่ 2.14 กลไกการเข้าไปในเนื้อยางของตัวเต็ม

ระดับความเป็นขั้วของยางและตัวเต็มสามารถบอกได้ด้วยค่า ตัวแปรความสามารถในการละลาย (solubility parameter) โดยมีตัวอย่างค่าของตัวเป็นนี้แสดงดังตารางที่ 2.12 ซึ่งหากยางและตัวเต็มใดๆ มีค่าตัวแปรความสามารถในการละลายใกล้เคียงกัน ความสามารถในการละลายหรือเข้ากันได้ก็จะมีมากขึ้น

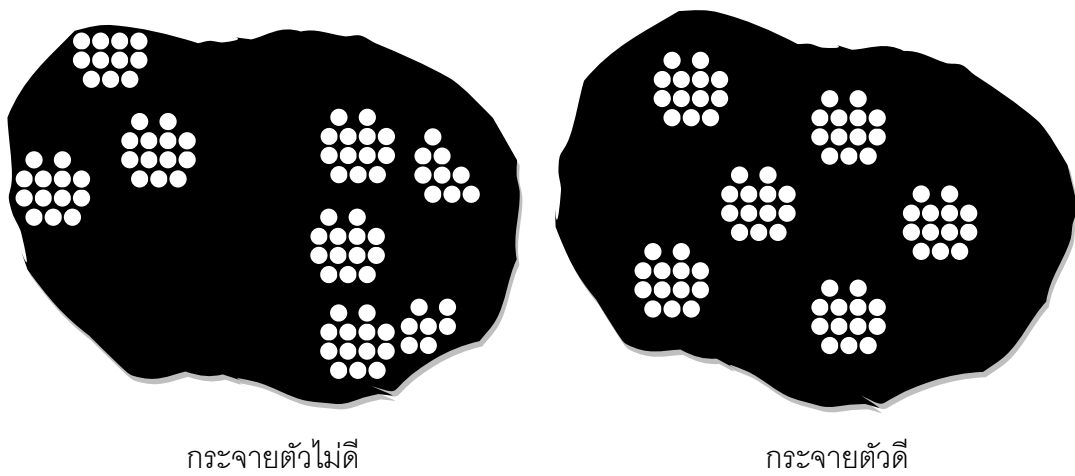
ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างค่าตัวแปรความสามารถในการละลายของยางและตัวเติมชนิดต่างๆ

ยางและตัวเติมชนิดต่างๆ	ค่าตัวแปรความสามารถในการละลาย (MPa ^{1/2})
ซิลิโคน	14 – 15
PE, EPM, EPDM	16
NR, BR, IIR	16 – 17
SBR	17 – 18
CR, CSM, NBR บางเกรด	18 – 19
สารหล่อลื่นและสารช่วยในกระบวนการผลิต	17 – 19
PVC, ECO, ACM, NBR บางเกรด	19 – 20
ผงเขม่าดำ	24 – 30
ทัลคัม, ดินขาว, whiting	26 – 28
ซิลิกา	28 – 36

อีกปัจจัยหนึ่งที่จะทำให้อัตราเร็วของการรวมตัวกันระหว่างยางกับตัวเติมขึ้นอยู่กับความสามารถในการไหลของยางกล่าวคือ ขึ้นอยู่กับความหนืดของยางนั่นเอง ซึ่งหากความหนืดของยางลดต่ำลงยางจะไหลได้ดีขึ้น ตัวเติมจะเข้าไปในยางมากขึ้น ทำให้อัตราเร็วในการรวมตัวกันสูงขึ้นตามไปด้วย อีกวิธีหนึ่งคือการตัดยางให้เป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของยาง ทำให้สามารถสัมผัสและรับตัวเติมได้มากและเร็วขึ้น ส่งผลให้อัตราเร็วในการรวมตัวกันสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้การปรับลดความเร็วรอบของโรเตอร์ให้ต่ำลงก็เป็นการช่วยให้ยางกับตัวเติมเข้ากันได้ดีขึ้น เนื่องจากเป็นการลดการฟุ้งตัวของตัวเติม ปัจจัยสุดท้ายคือการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อลดความหนืดของยางทำให้เข้ากับตัวเติมได้ดีขึ้นด้วย

การกระจายตัวของตัวเติม (distribution)

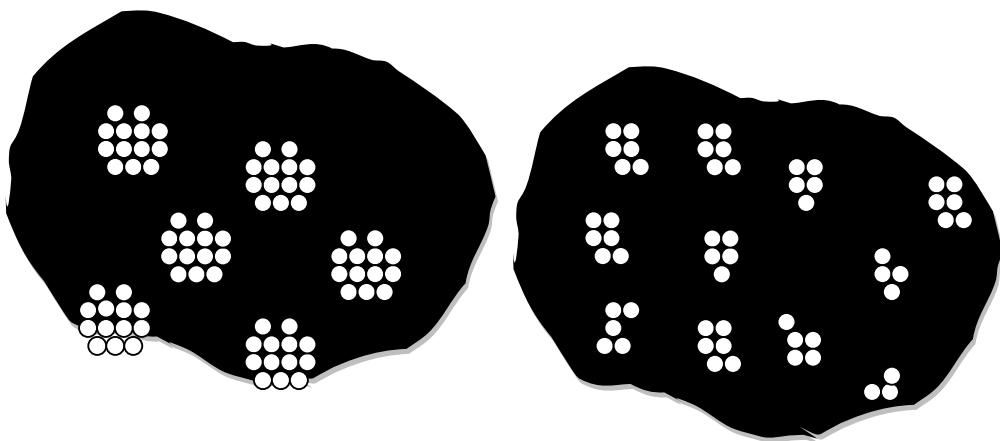
การไหลของยางหลังจากที่ยางกับตัวเติมรวมตัวกันแล้ว เป็นการทำให้ตัวเติมกระจายตัวอยู่ในเนื้อยางซึ่งการกระจายตัวนี้เป็นกระบวนการที่เกิดอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาของการผสม ซึ่งเป้าหมายของการผสมคือการทำให้ตัวเติมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.15 โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกระจายตัวของตัวเติมนั้นได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วรอบในการหมุนโรเตอร์ ความดันแรม และอัตราส่วนปริมาตรของยางคอมพาวด์ต่อปริมาตรของห้องผสม (fill factor)



รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของตัวเต็มในยาง

การแตกตัวของตัวเต็ม (dispersion)

การแตกตัวของตัวเต็มมีความสำคัญอย่างยิ่งกับตัวเต็มประเภทเสริมแรง เพราะการแตกตัวของตัวเต็มนี้จะส่งผลต่อสมบัติของยางคงรูป โดยกลไกการแตกตัวนี้เกิดขึ้นจากการแตกตัวของแอกไกลเมอเรตขนาดใหญ่ที่ถูกโอบล้อมโดยยางด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในการผสม จากนั้นแอกไกลเมอเรตที่มีขนาดเล็กลงจะมีการกระจายตัวในเนื้อยางที่เกิดจากการไหลของยางต่อไป จนได้เป็นแอกกรีเกตซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดที่ได้จากกระบวนการผสม ซึ่งการผสมนี้จะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อตัวเต็มเกิดแอกกรีเกตและกระจายตัวอยู่ในเนื้อของยางได้อย่าง สม่ำเสมอดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การแตกตัวของตัวเต็มในยาง

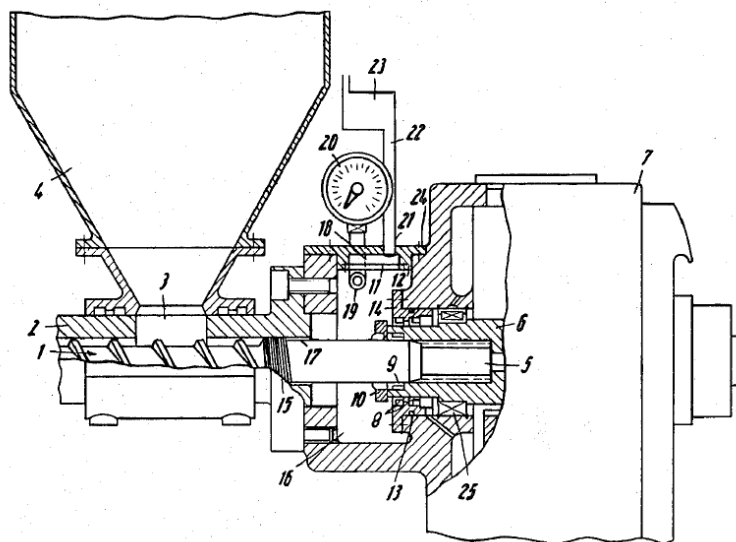
ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการแตกตัวของตัวเติมคือ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสม แต่ควรหลีกเลี่ยงการผสมที่นานเกินไปเพราะถึงแม้ว่าแรงเฉือนจะเกิดได้มากขึ้น แต่จะทำให้สมบัติเชิงกลของยางลดลงได้เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของยางลดต่ำลงและยางอาจเกิดการเสื่อมสภาพจากความร้อนได้

2.5.2 เครื่องมือที่ใช้ผสมสารเคมีในยาง

การผสมยางมีเครื่องมือที่ใช้ผสมในอุตสาหกรรม แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การผสมแบบต่อเนื่อง (continuous process) และการผสมแบบแบตช์ (batch process) ซึ่งมีเครื่องมือดังต่อไปนี้

1) เครื่องผสมแบบต่อเนื่อง (continuous mixer)

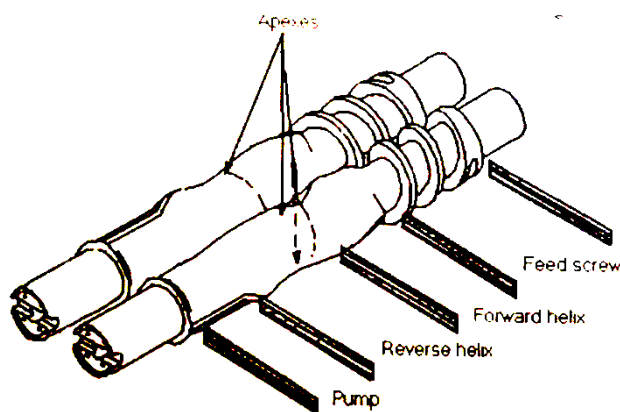
เครื่องมือชนิดนี้แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ เครื่องผสมแบบสกรูเดี่ยว (single screw) และ เครื่องผสมแบบสกรูคู่ (twin screw) ซึ่งสกรูที่ใช้จะมีลักษณะพิเศษกว่าสกรูในเครื่องอัดรีด (extruder) ทั่วๆ ไป กล่าวคือ สกรูถูกออกแบบพิเศษเพื่อให้ยางที่ไหลผ่านช่องเกลียวของสกรูได้รับการบดขนาดและผสมกับสารเคมีต่างๆ มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ประมาณ 5 โดยตัวของสกรูแบ่งเป็น 3 บริเวณได้แก่ บริเวณป้อนสาร (feed zone) บริเวณผสม (mixing zone) และบริเวณที่ปล่อยสารออกจากเครื่อง (discharge zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และ 2.18



รูปที่ 2.17 เครื่องผสมต่อเนื่องแบบอัดรีด

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการผสมแบบต่อเนื่องคือ อัตราการผลิต (production rate) ความเร็วรอบในการหมุนของสกรู (screw speed) การตั้งค่าขนาดช่องปล่อยยางคอมพาวด์ (discharge orifice setting) และอุณหภูมิของห้องผสม (mixing chamber temperature)

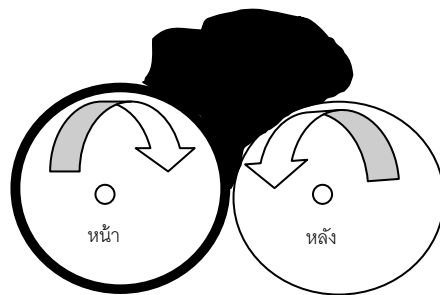
แม้ว่าเครื่องผสมแบบต่อเนื่องจะทำให้กำลังการผลิตที่สูงกว่าเนื่องจากมีความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต ให้ยางคอมพาวด์มีความสม่ำเสมอ และปรับเปลี่ยนสูตรยางได้ง่าย แต่ปัญหาหลักที่พบเมื่อใช้เครื่องผสมประเภทนี้คือ รูปแบบของวัตถุดิบ เช่น ยาง ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของยางแท่งมากกว่ายางผง ทำให้การป้อนยางดิบเป็นไปได้ยาก อีกทั้งยางยังมีสมบัติความเหนียวติดกันที่ดี การป้อนยางเข้าไปในเครื่องจึงทำได้ยากเช่นกัน อีกทั้งการทำความสะดวกยังทำได้ยากเป็นต้น ทำให้เครื่องผสมชนิดนี้ไม่ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมยางเท่าที่ควร



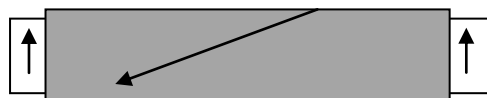
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างสกรูคู่ของบริษัทฟาเรลคอร์ปอเรชัน

2) เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill)

เครื่องรีด 2 ลูกกลิ้งมีองค์ประกอบหลักและการทำงานของลูกกลิ้งแต่ละลูกดังรูปที่ 2.19 ซึ่งจากรูปเป็นการหมุนเข้าหากันของลูกกลิ้งทั้งสองและแต่ละลูกจะมีอัตราเร็วในการหมุนแตกต่างกัน โดยที่ลูกกลิ้งที่อยู่ด้านหน้า (ติดกับผู้ปฏิบัติงาน) จะมีอัตราเร็วในการหมุนของลูกกลิ้งต่ำกว่าลูกกลิ้งที่อยู่ด้านหลังประมาณ 1.05 – 1.50 เท่า ซึ่งอัตราส่วนนี้เรียกว่า friction ratio โดยการผสมจะเริ่มจากการรีดยางบนลูกกลิ้งหลายๆ รอบเพื่อให้โมเลกุลของยางถูกตัดขาด ส่งผลให้ความเหนียวของยางลดลงเพื่อจะได้รับสารเคมีต่างๆ ได้ดี จากนั้นทำการกรีดยางและสลับไขว้เพื่อให้การผสมมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งการกรีดและสลับไขว้นั้นแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 การทำงานของลูกกลิ้งในเครื่องรีด 2 ลูกกลิ้งและตัวอย่างเครื่องรีด 2 ลูกกลิ้ง

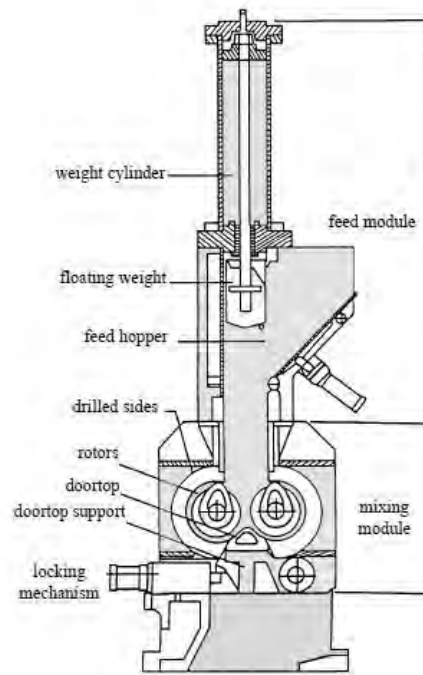


รูปที่ 2.20 การกรีดและสลับไขว้เพื่อให้สารเคมีกระจายตัวได้ดีขึ้น

จุดเด่นของการผสมโดยใช้เครื่องรีด 2 ลูกกลิ้งคือ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองที่แคบที่สุดมีค่าสูง ทำให้สารเคมีต่างๆ สามารถเข้าผสมและกระจายตัวในยางได้ดี นอกจากนี้การระบายความร้อนยังเกิดขึ้นได้ดีเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศมีมาก อย่างไรก็ตามข้อเสียของการใช้เครื่องผสมประเภทนี้ยังมีอยู่หลายประการคือ ใช้เวลาในการผสมนาน ผู้ปฏิบัติงานต้องมีทักษะที่ดีและมีความสม่ำเสมอ มีความสกปรกสูงเนื่องจากฝุ่นละอองที่อยู่ในอากาศ และควบคุมความสม่ำเสมอของคุณภาพการผสมในแต่ละครั้งได้ยาก เป็นต้น

3) เครื่องผสมแบบปิด (internal mixer)

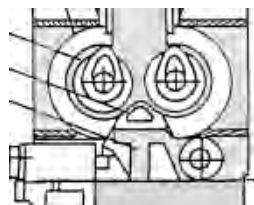
เป็นเครื่องผสมที่นิยมใช้งานมากที่สุดในอุตสาหกรรมยางปัจจุบัน เครื่องผสมชนิดนี้ประกอบไปด้วยห้องผสม โรเตอร์ แรม ระบบหล่อเย็น และระบบให้ความร้อน ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 เครื่องผสมแบบปิด

4) เครื่องผสมแบบปิดแบนนบุรี (banbury-type internal mixer)

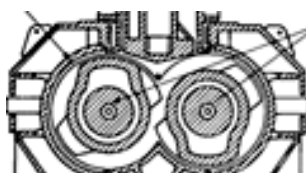
เป็นเครื่องผสมแบบปิดที่นิยมใช้มากที่สุด โดยโรเตอร์ทั้งสองเป็นแบบ non – interlocking หรือ non – intermeshing คือรัศมีการหมุนโรเตอร์จะไม่คาบเกี่ยวกันดังรูปที่ 2.22 ซึ่งแรงเฉือนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างผนังห้องผสมกับปีกของโรเตอร์ สาเหตุที่เครื่องผสมชนิดนี้ได้รับความนิยมคือ ปริมาณของยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างมาก เนื่องจากโรเตอร์มีขนาดไม่ใหญ่มากนั่นเอง



รูปที่ 2.22 ลักษณะโรเตอร์แบบแบนนบุรี

5) เครื่องผสมแบบปิดอินเทอร์มิกซ์ (intermix-type internal mixer)

โรเตอร์ของเครื่องผสมแบบปิดชนิดนี้เป็นแบบ intermeshing คือรัศมีการหมุนของโรเตอร์ทั้งสองจะคาบเกี่ยวกันดังรูปที่ 2.23 โดยแรงเฉือนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างปีกของโรเตอร์ ซึ่งเครื่องผสมชนิดนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมและโรเตอร์ได้ดีกว่าเครื่องผสมแบบปิดแบบนบุรี ทำให้การกระจายตัวและการแตกตัวของสารเคมีต่างๆ เกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ ความแปรปรวนแต่ละครั้งค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามโรเตอร์ของเครื่องผสมแบบปิดประเภทนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้ปริมาณของยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างน้อย จึงไม่ค่อยได้รับความนิยมเท่ากับเครื่องผสมแบบปิดแบบนบุรี



รูปที่ 2.23 ลักษณะโรเตอร์แบบอินเทอร์มิกซ์

6) เครื่องผสมแบบปิดที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (variable intermeshing clearance-type internal mixer)

มีลักษณะการจัดวางของโรเตอร์ทั้งสองเป็นแบบคาบเกี่ยวกัน แต่สามารถปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ทั้งสองระหว่างการผสม ทำให้เป็นผลดีคือ การปรับโรเตอร์ให้มีระยะห่างในช่วงแรกทำให้สามารถป้อนยางและสารเคมีเข้าไปได้ง่ายขึ้น และการปรับลดระยะห่างระหว่างโรเตอร์ในขณะที่ผสมเพื่อเพิ่มแรงเฉือนให้สูงขึ้น ทำให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวและแตกตัวได้ดีในยาง

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิดมีดังต่อไปนี้

ชนิดของเครื่องผสม (mixer type) การเลือกใช้เครื่องผสมมีส่วนสำคัญต่อสมบัติของยางคงรูป เนื่องจากจะส่งผลต่อการกระจายตัวของสารเคมีต่างๆ ที่เติมลงไปในยาง ถ้าหากเครื่องผสมใดมีประสิทธิภาพสูง คือมีการทำให้สารเคมีกระจายตัวและแตกตัวในยางได้มากเท่าไร ราคาของเครื่องผสมก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ความดันแรม (ram pressure) แรมจะทำหน้าที่เป็นช่องเปิดเพื่อเติมสารเคมีลงไประหว่างการผสมและดันลงเพื่อกดยางและสารเคมีต่างๆ ให้เข้าไปอยู่ในห้องผสม ซึ่งลักษณะแรมที่นิยมใช้คือรูปตัววี ดังแสดงในรูปที่ 2.24 โดยแรงดันแรมจะมีผลต่อการผสมด้วยเช่นกันกล่าวคือ หากใช้

แรงดันแรมสูงเกินไปจะไปขัดขวางการทำงานของโรเตอร์ ทำให้ความสามารถในการไหลของยางลดลงส่งผลต่อการกระจายตัวและการแตกตัวของสารเคมีต่างๆ ในยาง แต่ถ้าหากใช้แรงดันแรมต่ำเกินไปจะทำให้สารเคมีที่เติมลงไปเข้ากับยางได้น้อยลงเนื่องจากเกิดพื้นที่ว่างจากการที่ความดันแรมต่ำนั่นเอง



รูปที่ 2.24 ลักษณะแรมรูปตัววี

ความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์ (rotor speed) จะแตกต่างกันไปตามชนิดของยางที่ใช้ในแต่ละสูตร โดยปกติจะอยู่ในช่วง 40 – 60 รอบ/นาที แม้ว่าการเพิ่มรอบการหมุนของโรเตอร์จะทำให้เวลาที่ใช้ในการผสมลดลง แต่การใช้ความเร็วรอบที่มากจนเกินไปจะส่งผลต่ออุณหภูมิในระหว่างการผสมของยางเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ยางมีความหนืดลดลงซึ่งเป็นผลกระทบต่อเนื่องกับกลไกการผลต่างๆ (การเข้าไปในเนื้อยางของตัวเติม การแตกตัว และการกระจายตัว เป็นต้น) อีกทั้งยังเป็นการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการใช้พลังงานในการผสมสูงกว่าปกติ

ปริมาณยางคอมพาวด์ต่อการผสมแต่ละครั้ง (batch size) ขึ้นกับปริมาตรของห้องผสม ซึ่งปกติจะไม่เติมยางและสารเคมีต่างๆ ลงไปพอดีกับปริมาตรของห้องผสมเนื่องจากจะทำให้การผสมไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร จึงมีการคำนวณปริมาณของยางและสารเคมีต่างๆ เพื่อที่จะเติมสารเหล่านี้ลงไปผสมและให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยค่าที่กำหนดปริมาณนี้คำนวณได้จากการนำค่าปริมาตรของห้องผสม (v) คูณกับค่าความหนาแน่นรวมของยางคอมพาวด์ และคูณกับค่าคงที่หนึ่งเรียกว่า ฟิลแฟกเตอร์ (fill factor, f) ซึ่งโดยปกติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 – 0.8 ดังสมการ (2.1) คือ

$$\text{fill factor, } f = \frac{\text{volume of materials (rubber+ingredients)}}{\text{volume of mixing chamber}} \quad (2.1)$$

อุณหภูมิ (temperature) เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยางเนื่องจากไปทำให้ยางเกิดกลไกการผสมต่างๆ (การเข้าไปในเนื้อยางของตัวเติม การแตกตัว และการกระจายตัว) ซึ่งอุณหภูมิของยางจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระหว่างการผสม ดังนั้นจำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็นเพื่อเป็นการระบายความร้อนให้กับห้องผสมทำให้ยางมีอุณหภูมิไม่สูงจนเกินไป อีกทั้งยังมีการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อวัดอุณหภูมิ (thermocouple) ไว้ภายในห้องผสมอีกด้วย แต่อุณหภูมิที่วัดค่าได้นี้ยังไม่ใช่อุณหภูมิที่แท้จริงของยางขณะทำการผสม ในปัจจุบันจึงพยายามคิดค้นเทคนิคต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิที่แท้จริงของยาง เช่น การใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด เป็นต้น ทำให้การอ่านค่าอุณหภูมิของยางขณะผสมมีความแม่นยำมากขึ้น

ระยะเวลาที่ใช้ในการผสม (mixing time) ควรจะไม่มากหรือน้อยจนเกินไปกล่าวคือ หากใช้ระยะเวลาในการผสมน้อยเกินไปจะทำให้กลไกการผสมของยางกับตัวเติม (การเข้าไปในเนื้อยางของตัวเติม การแตกตัว และการกระจายตัว) ไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นได้อย่างไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร แต่ถ้าหากใช้ระยะเวลาการผสมมากเกินไปจะทำให้สมบัติต่างๆ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลของยางลดลง เนื่องจากยางมีโอกาสเสื่อมสภาพจากความร้อนและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมากจนเกินไป

ข้อดีของการใช้เครื่องผสมแบบปิดมีหลายประการคือ คุณภาพการผสมยางคอมพาวด์ในแต่ละครั้งมีความสม่ำเสมอ ลดความแปรปรวนจากการผสมของผู้ปฏิบัติงาน ปริมาณของยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้งค่อนข้างมากและระยะเวลาที่ใช้ในการผสมค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องรีด 2 ลูกกลิ้ง นอกจากนี้การดูแลรักษาความสะอาดยังทำได้ง่ายกว่าอีกด้วย แต่เครื่องผสมชนิดนี้ยังมีข้อเสียอยู่บ้างคือ การถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้อย่างยาก ต้องทำความสะอาดห้องผสมทุกครั้งหลังการผสมเสร็จสิ้นในแต่ละครั้งและเครื่องผสมชนิดนี้ยังมีราคาสูงอยู่ในปัจจุบัน

2.6 สมบัติพื้นฐานและมาตรฐานการทดสอบสมบัติยาง

2.6.1 สมบัติและการทดสอบยางคอมพาวด์

ยางคอมพาวด์มีสมบัติที่แตกต่างกันไป ตามชนิดของยาง ชนิดและปริมาณของสารเคมีที่เติมลงไปในส่วนยางแต่ละสูตร สมบัติที่พบบ่อยคือ ความสามารถในการไหลที่แสดงในรูปของความหนืด (viscosity) นั่นเอง ซึ่งทางเทคนิคจะเรียกความหนืดนี้ว่า ความหนืดมูนนี่ (mooney viscosity) โดยตัวอย่างเครื่องทดสอบความหนืดนี้แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (mooney viscometer)

นอกจากความหนืดแล้ว สมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของยางคอมพาวด์คือ สมบัติการคงรูป โดยเฉพาะการคงรูปก่อนระยะเวลาอันควร (premature vulcanization) หรือที่เรียกว่า ระยะเวลาสกอร์ช (scorch time, t_{52}) ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการคงรูปยาง ถ้าหากคำนวณระยะเวลาเหล่านี้ไม่มากพอ จะทำให้การคงรูปเกิดก่อนที่ยางจะเริ่มไหล ส่งผลให้ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดความไม่สม่ำเสมอหรือตำหนิ (defect) ทำให้สมบัติต่างๆ โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลลดลง ดังนั้นผู้ออกแบบสูตรยางควรคำนึงถึงระยะเวลาสกอร์ชเป็นสำคัญ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปก่อนระยะเวลาอันควร

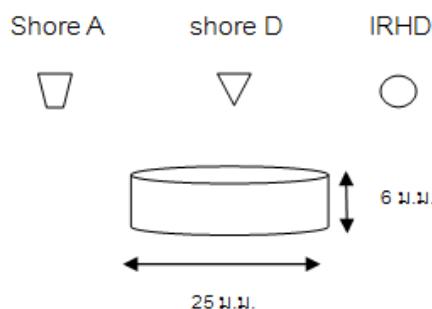
2.6.2 สมบัติและการทดสอบยางคงรูป

หลังจากการคงรูปยางแล้ว การระบุถึงคุณภาพหรือมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ยางสามารถทำได้โดยการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลพลวัต และสัณฐานวิทยา เป็นต้น ซึ่งสมบัติต่างๆ เหล่านี้มีการกำหนดมาตรฐานการทดสอบไว้ ซึ่งแต่ละประเทศหรือองค์กรจะเป็นผู้กำหนดขึ้นเพื่อใช้อ้างอิงถึงผลการทดสอบสมบัติดังกล่าว ซึ่งสมบัติพื้นฐานมีดังต่อไปนี้

1) สมบัติเชิงกล (mechanical properties)

ความแข็ง (hardness)

เป็นการทดสอบความต้านทานของพื้นผิวต่อการทะลุทะลวงของตัวกดที่มีขนาดและลักษณะเฉพาะของแต่ละมาตรฐาน ซึ่งหน่วยที่ใช้วัดความแข็งนั้นมี 2 หน่วยคือหน่วย IRHD (International Rubber Hardness Degree) และหน่วยชอร์ (shore unit) ซึ่งประกอบ ด้วยตัวกดสองประเภทคือแบบชอร์เอ (shore A) และแบบชอร์ดี (shore D) โดยหัวกดแต่ละประเภทแสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 หัวกดแบบต่างๆ และขั้นตอนทดสอบความแข็ง

ซึ่งหัวกดแต่ละประเภทจะใช้งานกับวัสดุที่แตกต่างกันโดย หัวกดแบบชอร์เอจะใช้กับวัสดุที่มีความอ่อนมากๆ ซึ่งจะคล้ายกับการใช้งานของหัวกดแบบ IRHD เช่น ยางธรรมชาติ เป็นต้น ส่วนหัวกดแบบชอร์ดีจะใช้สำหรับวัสดุที่มีความแข็งมาก (มากกว่า 90 ชอร์เอ)

สมบัติด้านแรงดึง (tensile properties)

เป็นสมบัติที่บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานแรงดึงที่มากกระทำกับยาง แรงดึงที่ว่านี้คือความเค้น (stress, σ) ที่ให้กับชิ้นทดสอบ ทำให้ชิ้นทดสอบยืดออกตามแนวแรงที่ให้เรียกว่าระยะยืดหรือความเครียด (strain, ϵ) ซึ่งทั้งสองจะมีความสัมพันธ์แบบผกผันกัน ซึ่งทั้งความเค้นและความเครียดนี้มีสูตรการคำนวณดังสมการ (2.2) และ (2.3) ดังนี้

$$\sigma = F/A \quad (2.2)$$

$$\epsilon = \Delta L/L_0 \quad (2.3)$$

เมื่อ	F	คือค่าแรงดึง
	A	คือค่าพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบที่ได้รับแรง
	ΔL	คือระยะที่ยางเกิดการยืดตัว
	L_0	คือความยาวเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ

ความทนต่อแรงดึง (tensile strength) เป็นค่าแรงดึงสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เมื่อใช้อัตราเร็วในการดึงคงที่ นิยมระบุในหน่วยของเมกะปาสคาล (MPa) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีค่าความทนต่อแรงดึงที่แตกต่างกัน สำหรับยางที่สามารถเกิดผลึกได้เมื่อได้รับแรงดึง (strain induced crystallization) เช่น ยางธรรมชาติ เป็นต้น

การยืดตัว (elongation) คือการยืดตัวของชิ้นทดสอบเมื่อได้รับแรงถูกค่าหนึ่ง ซึ่งจะแสดงเป็นร้อยละของการยืดตัวเทียบกับความยาวเริ่มต้น เช่น การยืดตัวที่ 200% คือชิ้นทดสอบที่ยืดออกเป็น 3 เท่าของความยาวเริ่มต้น เป็นต้น และ

มอดุลัส (modulus) ซึ่งสำหรับยางแล้ว ค่ามอดุลัสหมายถึงความเค้นที่ต้องใช้ในการยืดยางให้ได้ค่าการยืดตัวตามที่กำหนดไว้ เช่น 100% มอดุลัส (M100) มีค่าเท่ากับ 10 MPa หมายถึงการดึงยางให้มีการยืดตัวออก 100% ของความยาวเดิม ต้องใช้แรงดึงหรือความเค้นเท่ากับ 10 MPa เป็นต้น

สมบัติด้านแรงกด (compressive properties)

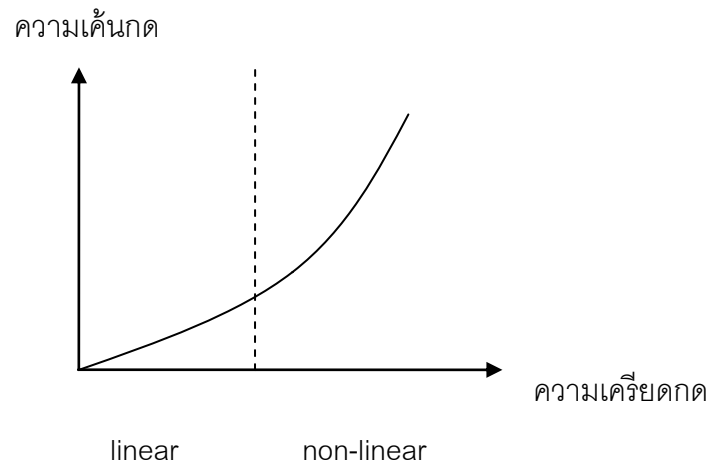
เป็นสมบัติที่สำคัญไม่แพ้กับสมบัติแรงดึงเนื่องจากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่มักได้รับแรงกดมากกว่าแรงดึงเมื่อใช้งานจริง ซึ่งค่าที่รายงานผลจะมีลักษณะคล้ายกับแรงดึง กล่าวคือ ค่าความเค้นกด (compressive stress, σ_c) และค่าความเครียดกด (compressive strain, ϵ_c) ซึ่งมีสูตรการคำนวณคล้ายกับความเค้นและความเครียดของสมบัติแรงดึงแสดงดังสมการ (2.4) และ (2.5) คือ

$$\sigma_c = F/A \quad (2.4)$$

$$\epsilon_c = \Delta L/L_0 \quad (2.5)$$

เมื่อ	F	คือค่าแรงกด
	A	คือค่าพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบที่ได้รับแรงกด
	ΔL	คือระยะที่ย่างเกิดการยุบตัว
	L_0	คือความหนาเริ่มต้นของชิ้นทดสอบ

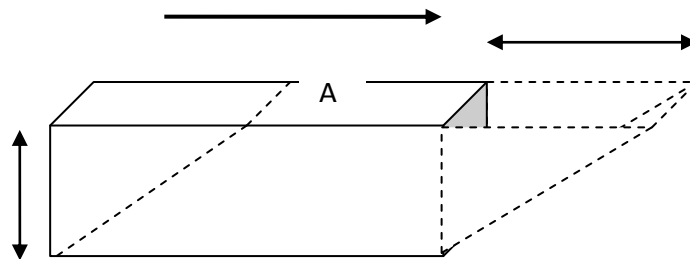
ส่วนค่ามอดุลัสของแรงกดจะแตกต่างกับค่ามอดุลัสของแรงดึงกล่าวคือ ค่ามอดุลัสของแรงกดจะได้จากความชันของกราฟในช่วงต้นๆ ที่พล็อตระหว่างความเค้นกดและความเครียดกดดังตัวอย่างกราฟในรูปที่ 2.27 ซึ่งค่ามอดุลัสของแรงกดนี้จะใช้ได้กับค่าความเครียดต่ำๆ เท่านั้น เนื่องจากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดกดจะเป็นเส้นตรง



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างกราฟพล็อตระหว่างความเค้นกดและความเครียดกด

สมบัติด้านแรงเฉือน (shear properties)

เป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงที่มากระทำมีทิศขนานกับพื้นที่หน้าตัดที่ได้รับแรง
ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุเมื่อได้รับแรงเฉือน

$$\tau = F/A \quad (2.6)$$

$$\gamma = x/h \quad (2.7)$$

เมื่อ	F	คือค่าแรงเฉือน
	A	คือค่าพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบที่ได้รับแรงเฉือน
	x	คือระยะพื้นที่ผิวด้านที่ได้รับแรงและเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
	h	คือความสูงของชิ้นทดสอบ

ส่วนค่ามอดุลัสเฉือนก็สามารถวัดค่าได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนได้เช่นกัน แต่ในกรณีของมอดุลัสเฉือนนี้สามารถวัดค่าได้ค่อนข้างสะดวกมากกว่าค่ามอดุลัสกดเนื่องจากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างความเค้นเฉือนและความเครียดเฉือนนั้นค่อนข้างเป็นเส้นตรง ซึ่งโดยทั่วไปมอดุลัสเฉือนของยางจะมีค่าค่อนข้างต่ำ นั่นคือสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายนั่นเอง

สมบัติด้านการฉีกขาด (tear properties)

เป็นค่าความทนทานต่อแรงที่มากระทำเพื่อให้ขึ้นทดสอบฉีกขาดเป็น 2 ส่วน มีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร (N/mm) ซึ่งการเกิดรอยแตกและการขยายตัวของรอยแตกของผลิตภัณฑ์อันเนื่องมาจากการใช้งานนั้น ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการประลัย (failure) ขึ้นได้ ดังนั้นการฉีกขาดมีแนวโน้มที่จะสะสมความเค้นตรงบริเวณรอยบากหรือตำหนิต่างๆ เมื่อได้รับแรงขึ้นงานก็จะขาดออกเป็น 2 ส่วน

2) สมบัติทางกายภาพ (physical properties)

ความทนต่อการขัดถู (abrasion resistance)

เป็นการสูญเสียที่พื้นผิวของวัสดุเมื่อได้รับแรงขัดถู ซึ่งการทดสอบนี้มักใช้กับงานที่นำไปใช้ในงานพลวัต เช่น ยางล้อรถ เป็นต้น โดยค่าที่รายงานสมบัติความต้านทานการขัดถูคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction coefficient) ซึ่งมีปัจจัยต่างๆ ที่เป็นตัวกำหนดได้แก่ รูปร่างของขึ้นทดสอบ ลักษณะทางพื้นผิวของยางและวัสดุที่ใช้ขัดถู อุณหภูมิและความดันขณะทำการทดสอบ (หรือสภาวะของการใช้งานจริง) และความเร็วในการขัดถู เป็นต้น ซึ่งหากต้องการรักษาสภาพพื้นผิวให้คงอยู่ได้นานไม่เสื่อมสภาพเร็ว ควรมีการเติมสารหล่อลื่นหรืออาศัยการปรับสภาพพื้นผิวยางด้วยกระบวนการทางเคมี เป็นต้น

ความต้านทานต่อของเหลว (liquid resistance)

ถึงแม้ว่ายางคงรูปจะสามารถทนต่อสารเคมีและสารละลายต่างๆ ได้ดีกว่ายางดิบก็ตาม แต่หากยังมีการใช้งานในสภาวะต่างๆ ที่ยังต้องได้รับสารเคมีหรือละลายต่างๆ เช่น น้ำมัน กรด หรือด่าง บ่อยๆ หรือเป็นเวลานานแล้ว ยางคงรูปก็สามารถเสื่อมสภาพได้ โดยจะเกิดการบวมตัว (swelling) ได้เช่นกัน ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีเหล่านั้น และประเภทของยาง ซึ่งจะมีความทนต่อสารเคมีและตัวทำละลายที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้งานยางคงรูปควร

คำนึงถึงสถานะของการใช้งานจริงด้วย ซึ่งหากยางที่ได้สัมผัสกับสารเคมีต่างๆ แล้วจะมีการดูดซึมสารละลายไว้ ทำให้ปริมาตรและสมบัติทางกายภาพของยางเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการดูดซึมนี้อาจเกี่ยวข้องกับตัวแปรของการละลาย (solubility parameter) ซึ่งกล่าวไปแล้วในตอนต้น

สมบัติการติดไฟ (flammability)

เนื่องจากยางโดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล จึงสามารถติดไฟได้ง่าย เช่น ยางธรรมชาติ หรือยางสไตรีนบิวตะไดอีน (SBR) เป็นต้น อีกทั้งยังไม่สามารถดับไฟได้ด้วยตัวเองเมื่อนำเปลวไฟออก แต่ยางสังเคราะห์บางชนิดสามารถต้านทานต่อการติดไฟ และบางชนิดสามารถดับไฟได้ด้วยตัวเองเมื่อเอาเปลวไฟออก เช่น ยางคลอโรพรีน (CR) ยางคลอโรซัลไฟเนตพอลิเอธิลีน (CSM) หรือยางฟลูออโรคาร์บอน (FKM) เป็นต้น เนื่องจากยางเหล่านี้มีอะตอมของสารที่มีความสามารถในการต้านการติดไฟได้แก่ คลอรีน โบรมีน หรือฟลูออรีน เป็นต้น โดยอะตอมเหล่านี้จะปล่อยก๊าซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นสารช่วยในการเผาไหม้ของวัสดุ โดยจะเข้าไปขัดขวางไม่ให้ก๊าซออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับวัสดุ ทำให้วัสดุสามารถดับไฟได้เอง เนื่องจากมีปริมาณก๊าซออกซิเจนไม่เพียงพอนั่นเอง

3) สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

ความร้อนสะสมและฮิสเทอรีซิส (heat buildup and hysteresis)

ยางหลังจากได้รับแรงเพื่อทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่าง หากนำแรงออกแล้วปล่อยให้ยางคืนสู่สภาพปกติ จะเกิดการสูญเสียพลังงานเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปต่อหนึ่งรอบของการให้แรงเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะเรียกว่า ฮิสเทอรีซิส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 – ร้อยละของการกระเดื่องกระดอน และความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกสะสมอยู่ในยางทำให้ยางมีอุณหภูมิสูงขึ้นขณะใช้งาน เนื่องจากแรงที่ให้แก่ยางนั้นมีความถี่สูง ยางจึงไม่สามารถระบายความร้อนออกได้ทัน ทำให้อัตราการเกิดความร้อนสูงกว่าอัตราการระบายความร้อน หากมีการใช้งานยางเป็นเวลานานยางจะเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนที่สะสมอยู่ภายในนั่นเอง

การนำความร้อน (thermal conductivity)

เป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในวัสดุชิ้นเดียวกัน (ถ่ายเทจากบริเวณที่มีวัสดุมีพลังงานความร้อนสูงไปยังบริเวณที่มีพลังงานความร้อนต่ำ) ซึ่งปกติยางจะมีการนำความร้อนที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับวัสดุอื่นๆ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการนำความ

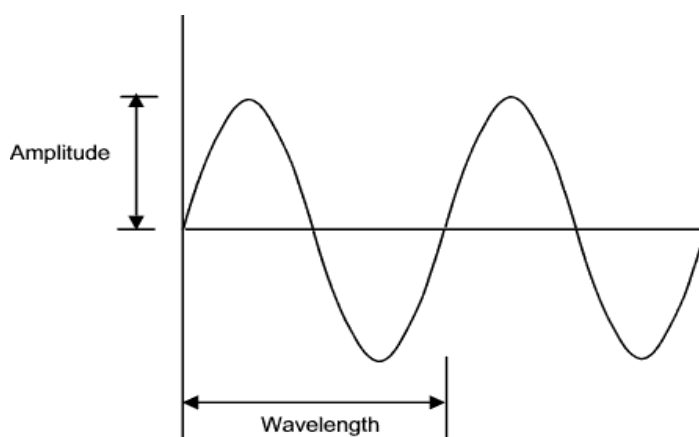
ร้อนได้แก่ ชนิดของยาง ประเภทและปริมาณของสารเคมีหรือตัวเติมที่ใช้ในระบบยางนั้นๆ โดยสมการ (2.8) เป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับการนำความร้อนคือ

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.8)$$

โดยที่	$\frac{dQ}{dt}$	คืออัตราการถ่ายเทพลังงาน
	$\frac{\partial T}{\partial x}$	คืออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระยะในทิศทางที่เกิดการถ่ายเทพลังงาน
	A	คือพื้นที่ผิวที่ตั้งฉากกับทิศทางที่เกิดการถ่ายเทพลังงาน และ
	k	คือค่าการนำความร้อน (thermal conductivity)

4) สมบัติเชิงพลวัต (dynamic mechanical properties)

ยางนิยมนำไปใช้งานที่เกิดจากการให้แรงเป็นรอบๆ (cycle) เช่น ยางล้อรถ เป็นต้น แล้วศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางที่ได้รับแรงนี้ ซึ่งลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะมีลักษณะเป็นกราฟไซน์ (sine wave/sine curve) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบขึ้น – ลงเป็นรอบๆ นั้นเอง โดยตัวอย่างกราฟไซน์แสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงกลพลวัตในลักษณะกราฟไซน์

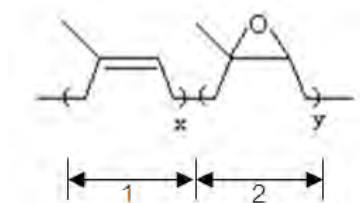
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการบดผสมยางธรรมชาติเพื่อเตรียมนำไปขึ้นรูป นอกจากจะต้องใช้สารเคมีที่จำเป็นสำหรับการวัลคาไนซ์และสารเคมีเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของยางแล้ว ยังต้องใช้ตัวเติม (filler) ชนิดต่างๆ เพื่อให้สมบัติของยางคงรูปเหมาะสมกับการใช้งาน หน้าที่สำคัญประการหนึ่งของตัวเติมที่เป็นอนุภาคของแข็งไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ คือการเพิ่มความแข็งตึง (stiffness) ให้กับชิ้นงาน ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการเสริมแรงยางธรรมชาติได้แก่ ชนิดและโครงสร้างของตัวเติม ขนาดอนุภาค ลักษณะเฉพาะของพื้นผิว อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง รวมทั้งการกระจายตัวในเนื้อยาง ซึ่งตัวเติมที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภทตามขนาดของอนุภาคคือ ตัวเติมประเภทเสริมแรง (reinforcing fillers) ตัวอย่างเช่น ผงเขม่าดำ ซิลิกา มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นต้น ซึ่งตัวเติมประเภทนี้ทำให้สมบัติของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นอย่างมากแม้ว่าจะเติมลงไปปริมาณน้อยเช่น การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณเพียง 3 phr ลงในยางธรรมชาติ ทำให้ความทนแรงดึงและความทนแรงฉีกขาดเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 89.5 และ 61.6 ตามลำดับ [8] และตัวเติมที่เหลืออีกชนิดหนึ่งคือ ตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง (non-reinforcing fillers) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ยิปซัม เป็นต้น ซึ่งตัวเติมประเภทนี้ไม่ได้ทำให้สมบัติของยางธรรมชาติเพิ่มขึ้นมากนัก แต่ด้วยราคาที่ถูกลงของตัวเติมประเภทนี้ จึงทำให้ถูกนำมาใช้เพิ่มเนื้อเพื่อลดต้นทุนของวัตถุดิบยางธรรมชาติกันอย่างกว้างขวาง

ยิปซัมเป็นแร่โลหะที่มีความแข็งไม่มากนัก คือประมาณระดับ 2 ตามมาตราความแข็งของโมห์ (Mohs' scale of hardness) มีองค์ประกอบหลักคือแคลเซียมซัลเฟตซึ่งมีน้ำรวมอยู่ด้วย (calcium sulphate dihydrate, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ยิปซัมถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น นำมาทำแม่แบบพลาสติกในอุตสาหกรรมเซรามิก นำมาทำปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ แผ่นยิปซัมอัดและแผ่นยิปซัมบอร์ดสำหรับใช้ในงานก่อสร้าง นำมาทำซอล์กเขียนกระดานและปุ๋ย ยิปซัมอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น เกิดเป็นผงฝุ่นในอากาศ หรืออาจจะละลายลงสู่แหล่งน้ำ [9] ยิปซัมสามารถนำมาใช้เป็นตัวเติมในพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ พอลิโพรพิลีน พอลิเอไมด์ 6 และพอลิไวนิลคลอไรด์ ซึ่งให้ประสิทธิภาพในการเสริมแรงที่ดี และมีสมบัติทางด้านวิทยาการเหมาะสมกับการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนด้วยกระบวนการฉีดแบบ [10,11]

อย่างไรก็ตามความเข้ากันได้ที่น้อยลงระหว่างยางธรรมชาติและตัวเติมที่มากขึ้น ยังเป็นปัญหาทำให้สมบัติต่างๆ ของยางธรรมชาตินั้นไม่ดีเท่าที่ควร จึงมีการศึกษาและปรับปรุงความสามารถในเรื่องของความเข้ากันได้ (compatibility) ระหว่างยางธรรมชาติและตัวเติมชนิดต่างๆ ซึ่งวิธีที่นิยมและศึกษากันอย่างมากในปัจจุบันคือ การเติมสารคู่ควบ (coupling agent) ซึ่งมี

หมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน 2 หมู่ โดยหมู่แรกจะเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติและหมู่ที่เหลือจะเข้ากันได้ดีกับตัวเติม ซึ่งในปัจจุบันมีสารควบตัวหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการนำมาศึกษาเรื่องการปรับปรุงความสามารถในการขึ้นรูป (processibility) นั่นคือยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลแสดงดังรูปที่ 2.30 ซึ่งจากโครงสร้างโมเลกุลนั้นจะเห็นว่า ส่วนที่ 1 เป็นส่วนที่มีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับยางธรรมชาติ จึงมีความเข้ากันได้ค่อนข้างมาก และในส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่มีหมู่อีพอกซี ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้วและว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับตัวเติม โดยจะศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีการใช้ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์นี้เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้กันเป็นจำนวนมาก



รูปที่ 2.30 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์

โดยพบว่ายางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มีความสามารถในการซึมผ่านของอากาศที่ต่ำมาก มีความทนน้ำมันสูง รวมทั้งมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันที่สูงกว่ายางธรรมชาติ จึงมีความสนใจในการนำยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ไปใช้งาน โดยเฉพาะการนำไปเตรียมยางผสมหรือคอมพอลสิต เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มีหมู่อีพอกซีไดซ์ที่มีขั้วเอื้อให้เกิดอันตรกิริยากับองค์ประกอบอื่นในระบบได้ดี [12]

เมื่อนำยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ในอัตราส่วน 75:25 และ 50:50 มาเสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ 5 phr เทียบกับยางธรรมชาติ พบว่าสามารถเตรียมนาโนคอมพอลสิตที่เป็นแบบเอ็กซ์โฟลิตเกตได้เมื่อใช้ยางผสม โดยเฉพาะบริเวณที่เป็นรอยต่อระหว่างเฟสทั้งสอง มอนต์มอริลโลไนต์ยังช่วยให้เฟสของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มีขนาดเล็กและกระจายตัวในเฟสของยางธรรมชาติได้ดีขึ้น ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของยางผสมที่เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ดีขึ้น [13]

Teh และคณะศึกษาการนำยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์มาเป็นสารควบตัวสำหรับยางธรรมชาติเสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ โดยพบว่าที่ปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 2 phr เมื่อปริมาณของหมู่อีพอกซีไดซ์และปริมาณของยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์เพิ่มขึ้น ยางธรรมชาติมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น [14] โดยที่บางอัตราส่วนให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วย

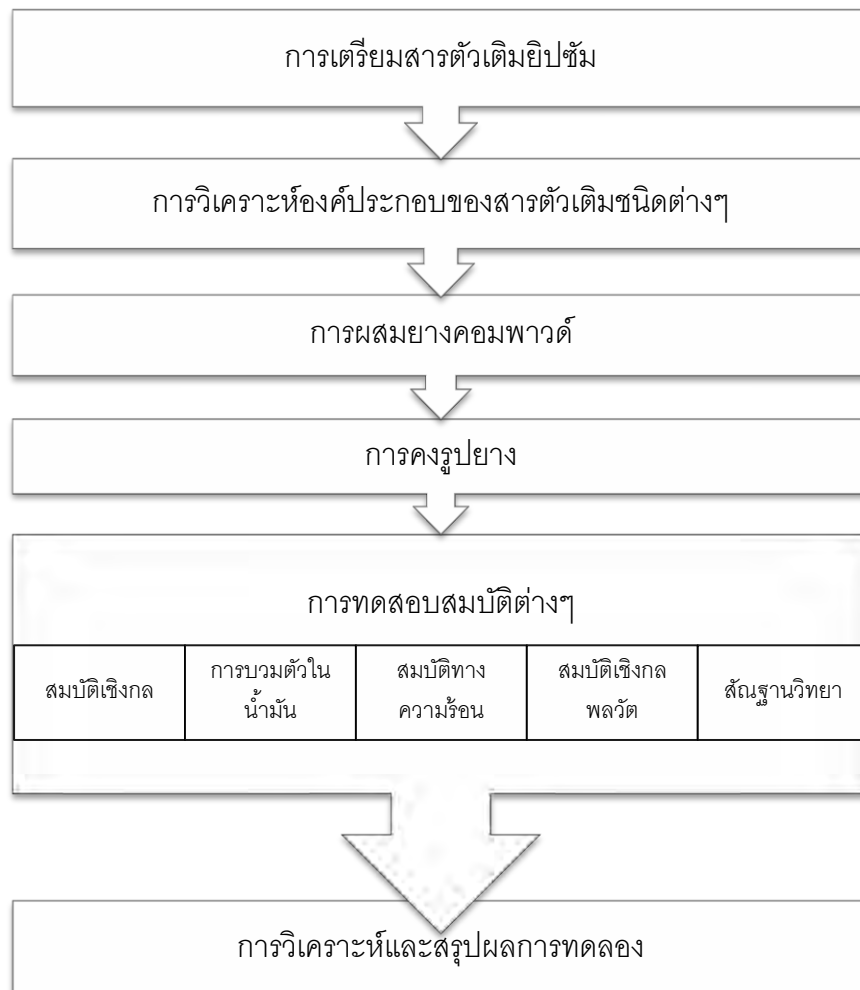
ผงเขม่าดำ 50 phr และซิลิกา 30 phr [15] นอกจากนี้พบว่ายางธรรมชาติที่เสริมแรงด้วยมอนต์-มอริลโลไนต์มีความทนแรงดึงและการยืดตัวออกที่จุดขาดต่ำลงเมื่อปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์มากกว่า 2 phr และเมื่อปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้นจาก 2 phr เป็น 4 6 8 และ 10 phr ตามลำดับ ความแข็งและมอดุลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่การการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (compression set) ลดลง

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการใช้ประโยชน์จากยิปซัมซึ่งเป็นองค์ประกอบของแม่แบบปูนปลาสเตอร์ โดยมุ่งเน้นศึกษาความเป็นไปได้ในการนำยิปซัมทั่วไปทางการค้าและจากแม่แบบปลาสเตอร์ที่เสื่อมสภาพแล้วมาเป็นตัวเติมในยางธรรมชาติ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับตัวเติมที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบัน คือ แคลเซียมคาร์บอเนต พร้อมทั้งศึกษาการนำยางธรรมชาติอิพอกซีได้ซ์มาเป็นสารคู่ควบเพื่อเพิ่มสภาพความเข้ากันได้ระหว่างยิปซัมและยางธรรมชาติ

บทที่ 3 วิธีการทดลอง

3.1 ขอบเขตของการทดลอง

งานวิจัยนี้เริ่มจากการเตรียมตัวเติมยิปซัมจากการนำแม่แบบปูนปลาสเตอร์มาบดแล้วนำไปอบและคัดขนาดอนุภาคโดยใช้ตะแกรงร่อน จากนั้นนำไปผสมกับยางและสารเคมีต่างๆ จะได้เป็นยางคอมพาวด์ จากนั้นนำไปหาสภาวะของการคงรูปยางเพื่อขึ้นรูปยางเป็นชิ้นทดสอบแล้วนำยางคงรูปไปทดสอบสมบัติต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.2 วัตถุติดและสารเคมี

วัตถุติดและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุติดและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุติดและสารเคมี	ชื่อทางการค้า/ เกรด	บริษัท
ยางธรรมชาติ	เกรด STR5L	บริษัท ศักดารุ่งเรืองกิจ จำกัด (ประเทศไทย)
ซิงก์ออกไซด์	ทางการค้า	บริษัท ศักดารุ่งเรืองกิจ จำกัด (ประเทศไทย)
กรดสเตียริก	ทางการค้า	บริษัท ศักดารุ่งเรืองกิจ จำกัด (ประเทศไทย)
N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD)	ทางการค้า	บริษัท ศักดารุ่งเรืองกิจ จำกัด (ประเทศไทย)
2,2-Dibenzothiazole Disulfide (MBTS)	ทางการค้า	บริษัท ศักดารุ่งเรืองกิจ จำกัด (ประเทศไทย)
สารบ่มกำมะถัน (S ₈)	ทางการค้า	บริษัท ศักดารุ่งเรืองกิจ จำกัด (ประเทศไทย)
ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกซีไดซ์ร้อยละ 25 โดยโมล (ENR25)	ทางการค้า	บริษัท San-Thap International จำกัด (ประเทศไทย)
ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกซีไดซ์ร้อยละ 50 โดยโมล (ENR50)	ทางการค้า	บริษัท San-Thap International จำกัด (ประเทศไทย)
แคลเซียมคาร์บอเนต	ทางการค้า	บริษัท ซีพี เคมีคัล อินดัสทรี จำกัด (ประเทศไทย)
ยิปซัมการค้า	ทางการค้า	บริษัท ซีพี เคมีคัล อินดัสทรี จำกัด (ประเทศไทย)
แม่แบบพลาสติกเทอร์เหลือทิ้ง	-	-
สารละลายโพลูอิน	เกรด AR	ห้างหุ้นส่วน ไถ่เซ่งล้ง จำกัด (ประเทศไทย)

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 การเตรียมยางคอมพาวด์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเติมยิปซัมและยางคอมพาวด์แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมยิปซัมและยางคอมพาวด์

เครื่องมือ	ยี่ห้อ/รุ่น	สถานที่ตั้งเครื่องมือ
ตะแกรงร่อนขนาด 100 mesh	-	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องชั่ง	METTLER TOLEDO AB204-S/FACT	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องบดหยาบ (jaw crusher)	PE150*250	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องบด disc plate pulverizer	UA 010F-001	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
หม้อบด vibration mill	MM 400	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องร่อนขนาดอนุภาค (sieve shaker)	AT200	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตู้อบ (Oven)	SFCN-301	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องผสมแบบปิด (internal mixer)	MX500-D75L90	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องผสม 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill)	LRM-S-110	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding machine)	LP-S-50	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2 การวิเคราะห์สมบัติของยางธรรมชาติ

เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์สมบัติของยางธรรมชาติ แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์สมบัติของยางธรรมชาติ

เครื่องมือ	ยี่ห้อ/รุ่น	สถานที่ตั้งเครื่อง
เครื่อง X-Ray diffractometer, XRD	Bruker D8 advance	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค Laser light scattering	Malvern 2000	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องทดสอบความแข็ง (hardness tester)	Durometer hardness system shore A	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่อง Moving die rheometer, MDR	A022S	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องทดสอบความทนแรงดึง (Instron universal testing machine)	5843	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical analyzer, DMA)	METTLER TOLEDO 861 ^o	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เครื่องเทอร์โมแกรวิเมตริกแอนนาไลเซอ์ (Thermogravimetric analyzer, TGA)	METTLER TOLEDO TGA/SDTA 851 ^o	ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM)	SPI-MODULE	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 การเตรียมยิปซัมเหลือทิ้งจากแม่แบบปูนปลาสเตอร์

นำแม่แบบปูนปลาสเตอร์ที่หมดอายุการใช้งานแล้วมาล้างและตากให้แห้ง แล้วนำมาบดด้วยเครื่องบดจอร์คซ์เซอร์ (jaw crusher) และเครื่องบดละเอียดพัลเวอร์ไรเซอร์ (pulverizer) แล้วบดอีกครั้งด้วยหม้อบด จากนั้นนำมาคัดขนาดอนุภาคโดยใช้ตะแกรงร่อนและเครื่องร่อนขนาดอนุภาค (sieve and sieve shaker) แล้วนำไปอบด้วยเครื่องอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเต็มยิปซัมแสดงไว้ในรูปที่ 3.2



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวเต็มยิปซัม (ก) เครื่องบดจอร์คซ์เซอร์ (ข) เครื่องบดพัลเวอร์ไรเซอร์ (ค) เครื่องคัดขนาดอนุภาค (ง) ตู้อบ

3.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบภายในตัวเติมชนิดต่างๆ

หลังจากการบดแม่แบบปูนปลาสเตอร์เพื่อเตรียมเป็นตัวเติมเรียบร้อยแล้ว นำตัวเติมได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต ยิปซัมทางการค้า และยิปซัมที่เตรียมขึ้นเอง มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบภายในด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffractometer, XRD) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

3.4.3 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของตัวเติมชนิดต่างๆ

ตรวจสอบขนาดอนุภาคของตัวเติมชนิดต่างๆ ด้วยเทคนิคการกระเจิงของแสงเลเซอร์ (laser light scattering) ด้วยเครื่องทดสอบรุ่น Mastersizer ของบริษัท Malvern จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องทดสอบหาขนาดอนุภาค laser light scattering

3.4.4 การผสมยางคอมพาวด์ [16]

ขั้นแรกเริ่มจากการบดยาง (mastication) ให้ยางมีความหนืดลดลงด้วยเครื่องผสมแบบปิดดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบการหมุนของโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที (round per minute, rpm) และใช้ค่าฟิลแฟกเตอร์เท่ากับ 0.7 เพื่อให้ยางสามารถรับสารตัวเตรียมชนิดต่างๆ ได้ดี จากนั้นใส่สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ลงไปยกเว้นสารคงรูป (กำมะถัน) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา (MBTS) ลงไปตามปริมาณที่คำนวณไว้โดยน้ำหนักหลังจากครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว นำมาผสมด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งในรูปที่ 3.6 จากนั้นเก็บในอุณหภูมิห้องจนกว่ายางคอมพาวด์จะเข้าสู่ภาวะสมดุลกับอุณหภูมิห้อง

ขั้นที่สองเป็นการใส่สารคงรูป (กำมะถัน) และสารตัวเร่งปฏิกิริยา (MBTS) ลงไปในยางคอมพาวด์ที่ผสมไว้ในตอนต้นในเครื่องผสมแบบปิดภายใต้ภาวะเดิมจนครบระยะเวลาที่กำหนดแล้วนำออกมารีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้งจำนวน 4 รอบ และเก็บยางไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนนำไปหาสภาวะของการคงรูปและขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป ซึ่งขั้นตอนการผสมแสดงดังตารางที่ 3.4 ส่วนปริมาณของสารเคมีแต่ละชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 ลำดับการผสมสารเคมีในยาง [17]

ขั้นตอนที่ 1

ลำดับ	สารเคมี	เวลา (นาทีที่)
1	ยางธรรมชาติ	0 – 3
2	ซิงก์ออกไซด์ + กรดสเตียริก	3 – 4
3	6PPD	4 – 5
4	½ ของตัวเติม	5 – 6.5
5	ตัวเติมที่เหลือ	6.5 – 8
พักยาง 24 ชั่วโมง		

ขั้นตอนที่ 2

ลำดับ	สารเคมี	เวลา (นาทีที่)
1	ยางคอมพาวด์	0 – 1
2	กำมะถัน + MBTS	1 – 4
พักยาง 24 ชั่วโมง		



รูปที่ 3.5 เครื่องผสมแบบปิด



รูปที่ 3.6 เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง

ตารางที่ 3.5 ปริมาณสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการเตรียมสารประกอบยาง

สารเคมี	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติเกรด STR5L	100
ซิงก์ออกไซด์	2
กรดสเตียริก	2
สารต้านออกซิเดชัน (6PPD)	2
สารตัวเร่งปฏิกิริยาการคงรูป (MBTS)	2
สารคงรูปกำมะถัน (S_8)	1.8
ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกซีไดซ์ ร้อยละ 25 โดยโมล (ENR25)	5, 10, 15
ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อีพอกซีไดซ์ ร้อยละ 50 โดยโมล (ENR50)	5, 10, 15
แคลเซียมคาร์บอเนต	10, 20, 30, 40, 50
ยิปซัมทางการค้า	10, 20, 30, 40, 50
ยิปซัมที่เตรียมจากแม่แบบพลาสติกเทอร์มอดายู	10, 20, 30, 40, 50

3.4.4 การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์ [18]

การทดสอบสมบัติการคงรูปของยางคอมพาวด์ระบุโดยอาศัยเครื่อง moving die rheometer (MDR) รุ่น A0225S จากบริษัท CG ENGINEERING จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ตามมาตรฐาน ASTM D5289-95



รูปที่ 3.7 เครื่อง moving die rheometer (MDR)

ปริมาณยางคอมพาวด์ที่ใช้ประมาณ 5 กรัมต่อการทดสอบ 1 ครั้ง วางลงระหว่างจานหมุนที่ให้ความร้อนอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ยางจะเกิดการคงรูป ค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบนี้ได้แก่ แรงบิดต่ำสุด (minimum torque, M_L) แรงบิดสูงสุด (maximum torque, M_H) เวลาสกอร์ช (scorch time, t_{s2}) เวลาที่ผ่านการคงรูปไปแล้วร้อยละ 90 (90% cure time, t_{c90}) และดัชนีอัตราการคงรูป (cure rate index, CRI) เพื่อนำไปขึ้นรูปขึ้นทดสอบสมบัติต่างๆ และวิเคราะห์สมบัติการคงรูปของยางต่อไป ซึ่งค่าดัชนีอัตราการคงรูปคำนวณได้จากสมการ (3.1)

$$CRI = \frac{100}{t_{c90} - t_{s2}} \quad (3.1)$$

3.4.5 การขึ้นรูปขึ้นทดสอบ

หลังจากได้ภาวะการคงรูปของยางคอมพาวด์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง MDR แล้ว จะนำยางคอมพาวด์มาขึ้นรูปเป็นขึ้นทดสอบด้วยเครื่องอัดแบบ (compression molding

machine) รุ่น LP-S-50 ของบริษัท Labtech ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์



รูปที่ 3.8 เครื่องอัดแบบ

3.4.6 การทดสอบสมบัติของชิ้นทดสอบยางคงรูป [19]

1) ความแข็ง (hardness)

ทดสอบความแข็งตามมาตรฐาน ASTM D2240 ด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ (durometer) ชนิดชอร์เอ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยเตรียมชิ้นทดสอบให้มีความหนามากกว่า 3 มิลลิเมตร วัดห่างจากขอบชิ้นงานอย่างน้อย 12 มิลลิเมตร และวัดอย่างน้อย 6 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งห่างกันไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย



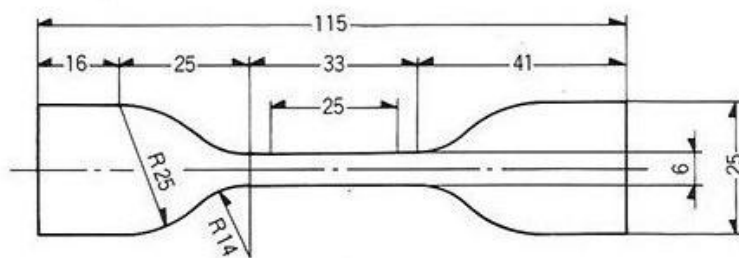
รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความแข็งแบบชอร์

2) สมบัติด้านแรงดึง

ทดสอบสมบัติด้านแรงดึง (tensile properties) ตามมาตรฐาน ISO 37 type II โดยใช้เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ Instron universal testing machine รุ่น 5843 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ด้วยอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวจับยึดชิ้นงาน 500 มิลลิเมตรต่อนาที โหลดเซลล์ขนาด 1 กิโลนิวตัน ดึงชิ้นทดสอบที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบเอนกประสงค์



รูปที่ 3.11 ลักษณะชิ้นทดสอบสมบัติด้านแรงดึงตามมาตรฐาน ISO 37 type II [20]

ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงนี้แสดงไว้ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึง

สมบัติ	การคำนวณ
ค่าความทนแรงดึง (tensile strength, σ)	$\text{stress}(\sigma) = \frac{F}{A}$
ระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break, ϵ)	$\text{EB}(\delta) = \left[\frac{L - L_0}{L_0} \right] \times 100$
100% มอดุลัส (M100)	ความเค้นเมื่อมีระยะยืดถึง 100% ของระยะเริ่มต้น
200% มอดุลัส (M200)	ความเค้นเมื่อมีระยะยืดถึง 200% ของระยะเริ่มต้น
300% มอดุลัส (M300)	ความเค้นเมื่อมีระยะยืดถึง 300% ของระยะเริ่มต้น

3) ความทนแรงฉีกขาด (tear strength)

ทดสอบโดยตัดชิ้นทดสอบให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.12 แล้วใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Instron universal testing machine รุ่น 5843 เช่นเดียวกับการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงโดยใช้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวจับยึดชิ้นงาน 500 มิลลิเมตร โหลดเซลล์ขนาด 1 กิโลนิวตัน



รูปที่ 3.12 ลักษณะชิ้นทดสอบความทนแรงฉีกขาดตามมาตรฐาน ISO 34 [21]

4) การบวมตัวในน้ำมัน (oil swelling) [22]

เป็นการทดสอบหาปริมาณการคงรูปของยางที่ผ่านการคงรูปแล้วโดยการวัดการบวมตัวในน้ำมัน ด้วยอุปกรณ์และสารเคมีดังแสดงในรูปที่ 3.13 การทดสอบเริ่มจากการตัดยางให้มีขนาดความกว้าง x ยาว x หนา ประมาณ 0.5 x 3 x 0.2 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักและจดบันทึกน้ำหนักความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่สี่ จากนั้นใส่ในขวดสีชาแล้วเทสารละลายโทลูอีนลงให้เต็มขวด ปิดฝาแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 สัปดาห์ เมื่อครบกำหนดแล้วนำขึ้นทดสอบออกมาเช็ดด้วยกระดาษชำระเบาๆ แล้วชั่งน้ำหนักขึ้นงานจดบันทึกน้ำหนักความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่สี่อีกครั้ง จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติอีก 2 วัน แล้วนำมาชั่งน้ำหนักครั้งสุดท้ายแล้วจดบันทึกน้ำหนักความละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่สี่ จากนั้นนำค่าที่จดบันทึกไว้ไปคำนวณตามสมการ (3.2) และ (3.3)



รูปที่ 3.13 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบการบวมตัวของยางในโทลูอีน

$$-\ln(1-V_r) - V_r - \chi V_r^2 = 2V_t \eta_{\text{swell}} V_r^{1/3} - \frac{2V_r}{f} \quad (3.2)$$

โดยที่

$$V_r = \frac{\left[\frac{W_d - W_f}{\rho_d - \rho_f} \right]}{\left[\frac{W_d - W_f}{\rho_d - \rho_f} \right] + \left[\frac{W_s - W_d}{\rho_t} \right]} \quad (3.3)$$

เมื่อ ρ_d คือความหนาแน่นของยาง (g/cm^3)
 ρ_f คือความหนาแน่นของตัวเติมแต่ละชนิด

- ρ_t คือความหนาแน่นของโพลีเอทิลีน (0.862 g/cm³)
- W_d คือน้ำหนักชิ้นทดสอบหลังจากเอาออกจากโพลีเอทิลีนเป็นเวลา 2 วัน (กรัม)
- W_f คือน้ำหนักของตัวเต็มในชิ้นทดสอบ (กรัม)
- W_s คือน้ำหนักของชิ้นทดสอบหลังทำให้บวมตัวด้วยโพลีเอทิลีน (กรัม)
- V_r คือสัดส่วนปริมาตรของยางในชิ้นทดสอบที่บวมตัวเป็นเจลในโพลีเอทิลีน
- V_t คือ molar volume ของโพลีเอทิลีน (106.2 cm³/mol)
- χ คือ rubber-solvent interaction parameter (0.39)
- f คือฟังก์ชันของการคงรูปด้วยระบบก้ำมะถัน (4)
- η_{swell} คือจำนวนของการคงรูปต่อหน่วยปริมาตร (mol/cm³)

5) สมบัติทางความร้อน

วิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิค Thermal gravimetric analysis (TGA) ด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer ดังแสดงในรูปที่ 3.14 เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัว (degradation temperature, T_d) ของชิ้นงานตัวอย่าง โดยชั่งน้ำหนักของชิ้นงานตัวอย่างประมาณ 3 – 10 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะอะลูมินา (alumina crucible) แล้วทดสอบในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียไปเป็นร้อยละ (% weight loss)



รูปที่ 3.14 เครื่อง thermogravimetric analyzer (TGA)

6) สมบัติเชิงกลพลวัต

วิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัตรุ่น METTLER TOLEDO 861^o ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ภายใต้ลักษณะการทดสอบแบบ shear ใช้เพื่อจับชิ้นงานที่มีขนาด 5 × 5 × 1 มิลลิเมตร ทดสอบภายใต้ความถี่ 1 เฮิรตซ์ ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -80 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเหลวในการลดอุณหภูมิในการทดสอบ



รูปที่ 3.15 เครื่องวิเคราะห์สมบัติเชิงกลพลวัต

7) สัณฐานวิทยา

เคลือบตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบสมบัติด้านแรงดึงด้วยทองคำบนส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) รุ่น SPI-MODULE ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยใช้ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ (kV) ส่องที่กำลังขยาย 500 และ 1000 เท่า



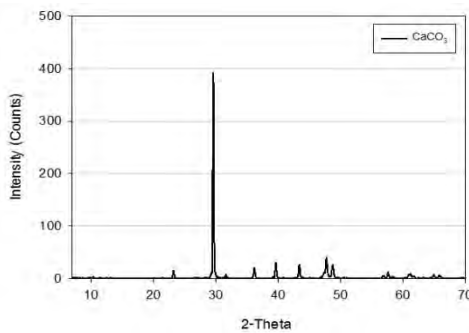
รูปที่ 3.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

บทที่ 4

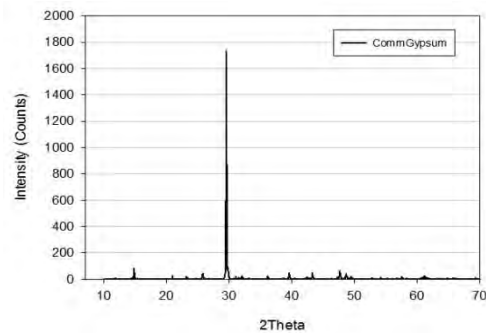
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 องค์ประกอบของสารตัวเติมแต่ละชนิด

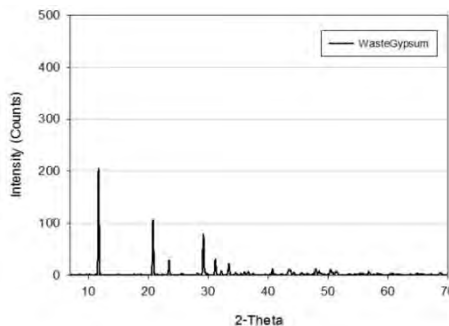
เมื่อนำแม่แบบปูนปลาสเตอร์ที่หมดอายุการใช้งานมาเตรียมเป็นตัวเติมยิปซัม แล้ววิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทเมทรี (X-Ray diffractometry, XRD) เทียบกับตัวเติมอีก 2 ชนิดคือ แคลเซียมคาร์บอเนตและยิปซัมทางการค้า ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นฟีกเอกลักษณ์ของตัวเติมทั้งสาม นอกจากนี้ยังพบอีกว่าในรูปที่ 4.1 (ข) และ (ค) เป็นเอกลักษณ์ของยิปซัมที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันกล่าวคือ รูปที่ 4.1 (ข) เป็นฟีกเอกลักษณ์ของแคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (calcium sulfate hemihydrates, $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) เนื่องจากตัวเติมชนิดนี้ไม่ได้ผ่านการขึ้นรูปเป็นแม่แบบปลาสเตอร์มาก่อน ส่วนในรูปที่ 4.1 (ค) เป็นฟีกเอกลักษณ์ของแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต (calcium sulfate dehydrate, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งผ่านการขึ้นรูปเป็นแม่แบบปลาสเตอร์มาแล้ว จึงทำให้ยิปซัมทั้งสองมีเอกลักษณ์ที่แตกต่างกัน



(ก)



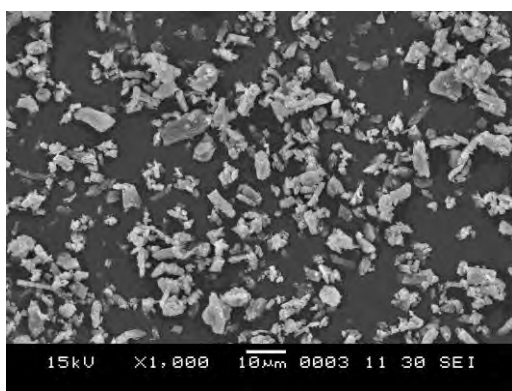
(ข)



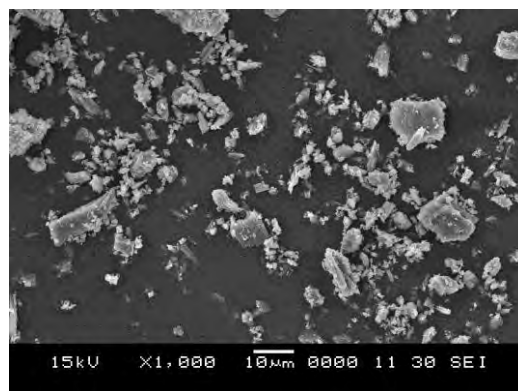
(ค)

รูปที่ 4.1 เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมของตัวเติมแต่ละชนิด (ก) แคลเซียมคาร์บอเนต (ข) ยิปซัมทางการค้า (ค) ยิปซัมเหลือทิ้ง

จากรูปที่ 4.1 (ข) และ (ค) พบว่ายิปซัมเหลือทิ้งมีระดับของความเป็นผลึกน้อยกว่า ยิปซัมทางการค้า ซึ่งปรากฏพิกที่เด่นชัดที่สุดเพียงพิกเดียว แสดงให้เห็นว่าเกิด preferred orientation ซึ่งความจริงแล้วเป็นเฮมิไฮเดรต แต่เนื่องจากเกิด preferred orientation และอาจเกิดการ suppress baseline หรือการรบกวนของสัญญาณทำให้พิกอื่นเห็นได้ไม่ชัดเจน แต่ในกรณีของยิปซัมที่เตรียมขึ้นเองนั้นมีน้ำผลึกทั้งที่เป็นเฮมิไฮเดรตและไดไฮเดรตเป็นองค์ประกอบ [22] การที่พบน้ำผลึกทั้งสองอย่างนี้ในผงยิปซัมเกิดจากการนำผงยิปซัมเหลือทิ้งที่ทำการบดละเอียดแล้วไปอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นและทำให้การร่อนผ่านตะแกรงเพื่อคัดขนาดทำได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดการสลายตัวของน้ำผลึกบางส่วนออกไป



(ก)



(ข)

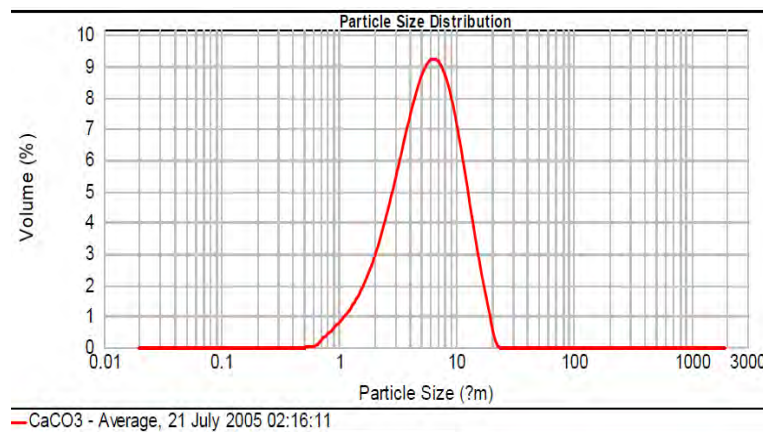
รูปที่ 4.2 อนุภาคของ (ก) ยิปซัมจากแม่แบบเหลือทิ้ง (ข) ยิปซัมทางการค้า ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่ายิปซัมจากแม่แบบเหลือทิ้งที่เตรียมได้นั้น มีปริมาณของน้ำผลึกสูงกว่ายิปซัมทางการค้า และน้ำผลึกนี้สามารถระเหยออกจากผลึกของยิปซัมได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส แต่เมื่อนำอนุภาคดังกล่าวไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าผงยิปซัมยังคงจับตัวเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากสามารถดูดความชื้นได้ดี ทำให้การแตกแรงแทนอยู่ในช่วงแคบ

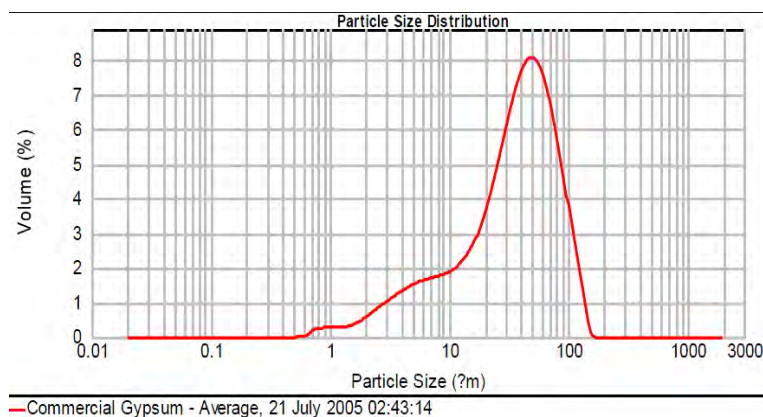
4.2 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (particle size analysis)

หลังจากการเตรียมตัวเติมชนิดต่างๆ เรียบร้อยแล้ว นำไปวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคโดยอาศัยเครื่องวัดการกระเจิงของแสงเลเซอร์ (laser light scattering) จากบริษัท Malvern รุ่น Mastersizer 2000 ให้ผลดังรูปที่ 4.3 – 4.5

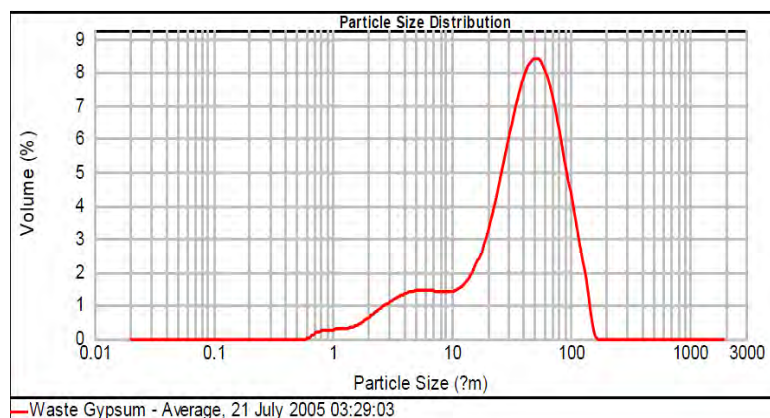
จากรูปที่ 4.3 เป็นการกระจายตัวอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าส่วนมากอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ที่ประมาณ 6 – 7 ไมโครเมตร อีกทั้งยังมีการกระจายตัวของอนุภาคที่สม่ำเสมอมากกว่าเมื่อเทียบกับยิปซัมการค้ำและยิปซัมเหลือทิ้งที่แสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ กล่าวคือ ยิปซัมการค้ำและยิปซัมเหลือทิ้งส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาคประมาณ 40 ไมโครเมตร อีกทั้งยังมีการกระจายของขนาดอนุภาคที่มากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตอีกด้วย



รูปที่ 4.3 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.4 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของยิปซัมการค้ำ



รูปที่ 4.5 การกระจายตัวขนาดอนุภาคของยิปซัมเหลือทิ้ง

และสามารถสรุปเป็นตารางดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุดคือประมาณ 6.43 ไมโครเมตร ตามด้วยยิปซัมการค้ำและยิปซัมเหลือทิ้งคือประมาณ 41.96 และ 45.14 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของตัวเติมชนิดต่างๆ

ชนิดตัวเติม	Specific surface area (m ² /g)	Surface weighted mean (µm)	Vol. weighted mean (µm)
แคลเซียมคาร์บอเนต	1.44	4.17	6.43
ยิปซัมการค้ำ	0.19	13.43	41.96
ยิปซัมเหลือทิ้ง	0.19	13.93	45.14

จากรูปที่ 4.3 – 4.5 และตารางที่ 4.1 สามารถสรุปได้ว่าแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด ตามด้วยยิปซัมการค้ำและยิปซัมเหลือทิ้งตามลำดับ

4.3 คุณลักษณะของยางคองรูป (cure characteristics)

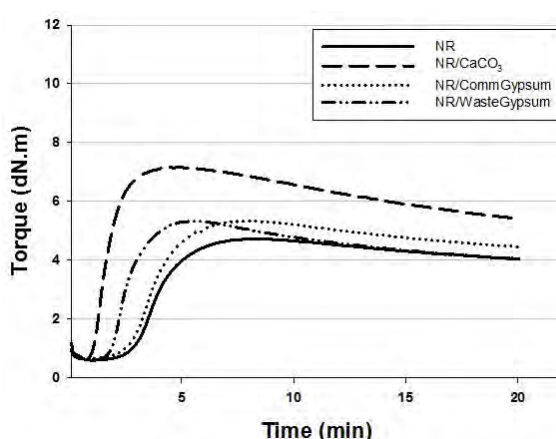
หลังจากผสมยางกับตัวเติมชนิดต่างๆ แล้วก่อนที่จะขึ้นรูปขึ้นทดสอบสมบัติต่างๆ ต้องนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะของยางที่จะนำไปคองรูปก่อน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ moving die rheometer (MDR) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที/ขึ้นทดสอบ ซึ่งค่าที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์เครื่องนี้ได้แก่ ค่าแรงบิดต่ำสุด (minimum torque, M_L) ค่าแรงบิดสูงสุด

(maximum torque, M_H) ระยะเวลาสกอร์ช (scorch time, t_{S2}) เวลาที่ผ่านการคงรูปไปแล้ว ร้อยละ 90 (cure time, t_{C90}) และค่าดัชนีอัตราการคงรูป (cure rate index, CRI) เป็นต้น ซึ่งผลของชนิดและปริมาณตัวเติมที่มีต่อคุณลักษณะของการคงรูปแสดงดังรูปที่ 4.3 – 4.20 ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ผลออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์และส่วนที่มีการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์

4.3.1 คุณลักษณะของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

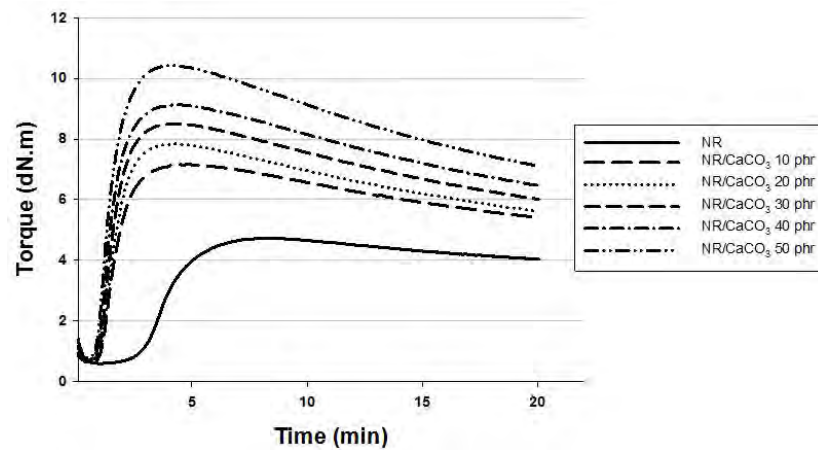
เป็นการศึกษาผลของตัวเติมต่อการคงรูปของยางธรรมชาติโดยไม่มีการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ลงไป โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6 – 4.11

จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงการคงรูปของยางที่มีการเติมตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 10 phr พบว่ายางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนตให้ค่าแรงบิดที่สูงที่สุด ส่วนในกรณีของยางธรรมชาติที่มีการเติมยิปซัมทางการค้าและยิปซัมที่เตรียมขึ้นเองให้ค่าแรงบิดที่ใกล้เคียงกัน และทั้งหมดให้ค่าแรงบิดที่มากกว่ายางธรรมชาติ อันเนื่องมาจากการเติมวัสดุที่มีความแข็งมากกว่าลงไปทำให้ต้องใช้แรงในการบิดมากขึ้นเพื่อให้จำนวนรอบของการบิดคงที่ ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่ายิปซัมการค้าและยิปซัมเหลือทิ้งที่สามารถกระจายตัวในยางได้ดีกว่า ทำให้ค่าแรงบิดมีค่าสูงกว่า ส่วนยิปซัมการค้าและยิปซัมเหลือทิ้งที่ให้ค่าแรงบิดใกล้เคียงกัน เนื่องจากตัวเติมทั้งสองมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกันคือ 41.96 และ 45.14 ตามลำดับ ส่งผลให้แรงบิดมีค่าใกล้เคียงกัน

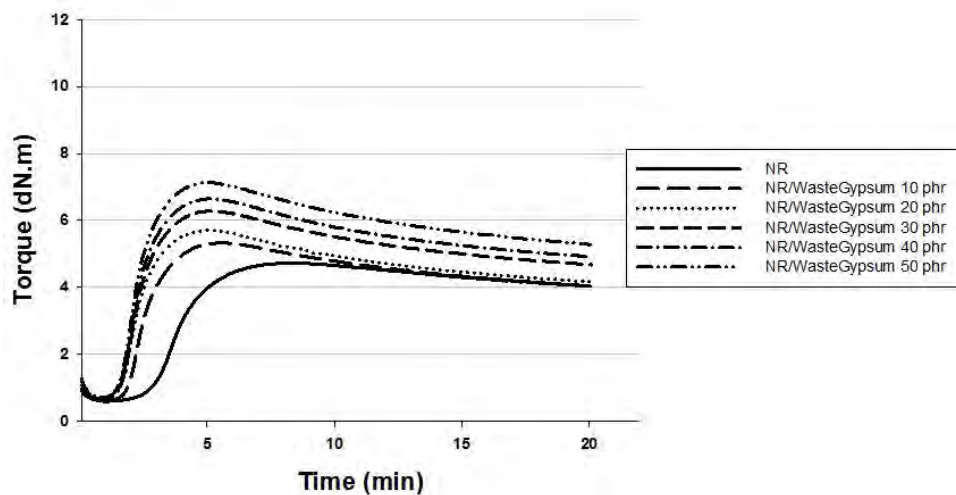


รูปที่ 4.6 ลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ/ตัวเติมที่ปริมาณ 10 phr

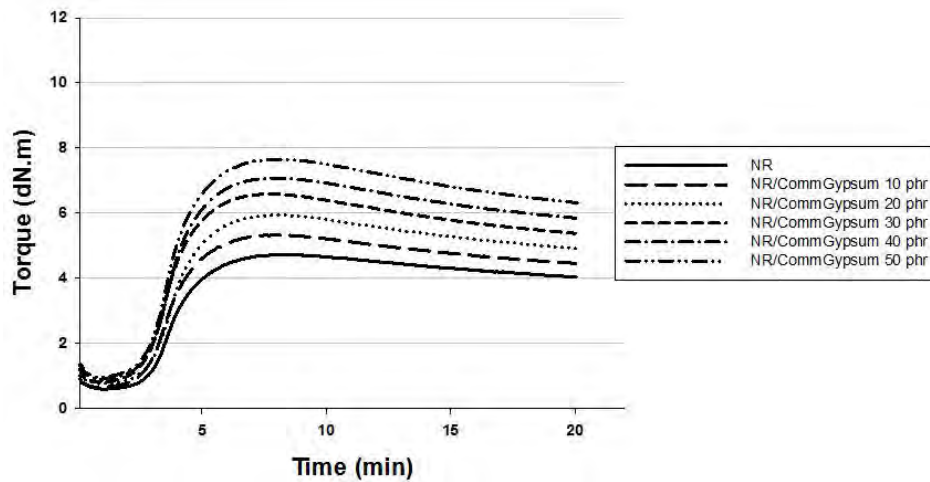
จากรูปที่ 4.7 – 4.9 เป็นลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ/ตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ได้ปริมาณตัวเติมที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0 10 20 30 40 และ 50 phr พบว่าเมื่อปริมาณของตัวเติมที่ใส่มากขึ้น ทำให้ค่าแรงบิดของยางคอมพาวด์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มปริมาณของตัวเติมทำให้ไปขัดขวางการไหลของยาง ทำให้ยางเคลื่อนตัวได้ยากขึ้นจึงต้องใช้แรงบิดสูงขึ้นเพื่อให้ยางสามารถไหลได้เป็นปกตินั่นเอง



รูปที่ 4.7 ลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต

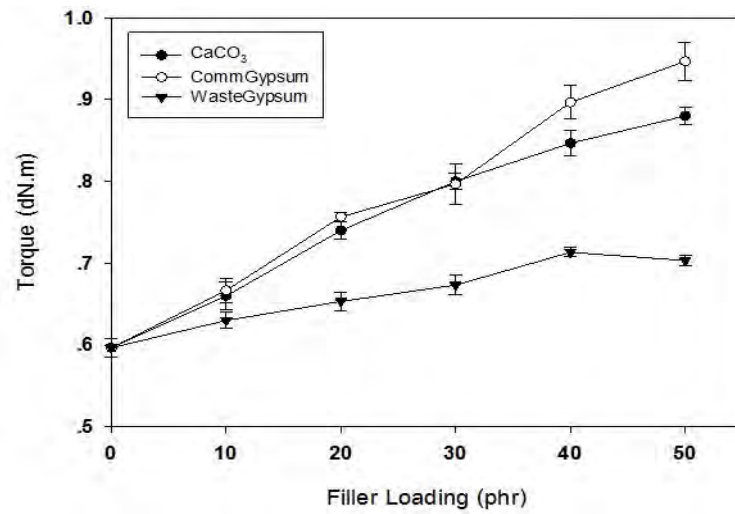


รูปที่ 4.8 ลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า

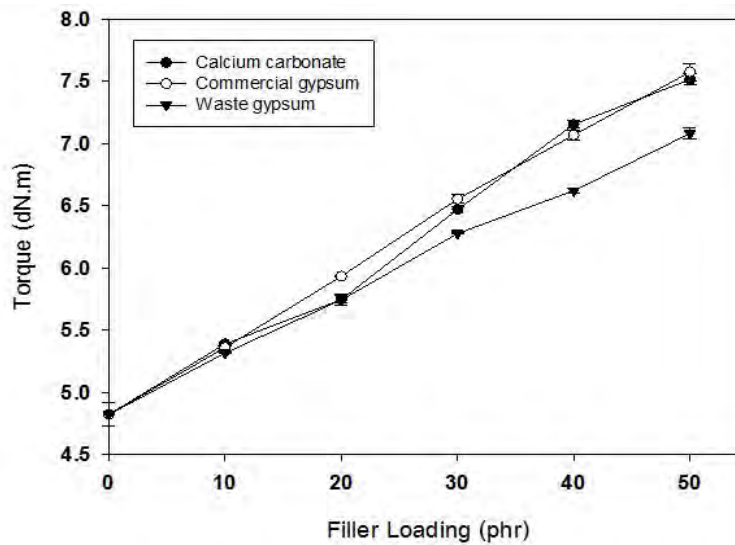


รูปที่ 4.9 ลักษณะการคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง

ต่อไปเป็นกราฟแรงบิดเปรียบเทียบกันของปริมาณตัวเติมแต่ละชนิดที่เติมลงไปตั้งแต่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 phr ตามลำดับ แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงค่าแรงบิดต่ำสุด (M_L) และค่าแรงบิดสูงสุด (M_H) ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณของตัวเติมที่ใส่ลงไปยางธรรมชาติเพิ่มมากขึ้นทำให้ทั้งค่าแรงบิดต่ำสุดและค่าแรงบิดสูงสุดของยางคงรูปสูงขึ้นเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการรวมตัวกันของตัวเติมเข้าไปในยาง ไปเพิ่มความหนืดและโมดูลัสของยางผสมให้สูงขึ้น เมื่อพิจารณาชนิดของตัวเติมในพารามิเตอร์ทั้งสองนี้ก็จะเห็นว่ายิปซัมทางการค้ามีผลในการเพิ่มค่าแรงบิดต่ำสุดมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและยิปซัมเหลือทิ้งตามลำดับ เนื่องจากอนุภาคของตัวเติมแต่ละชนิดเข้าไปขวางการไหลของยาง ถ้าหากตัวเติมใดมีขนาดอนุภาคเล็ก ก็จะมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับยางได้มาก ก็จะส่งผลต่อการไหลของยาง ทำให้ยางผสมมีความหนืดสูงขึ้นนั่นเองแต่การเพิ่มขึ้นของแรงบิดสูงสุดของตัวเติมมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.10 กราฟแรงบิดต่ำสุดของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

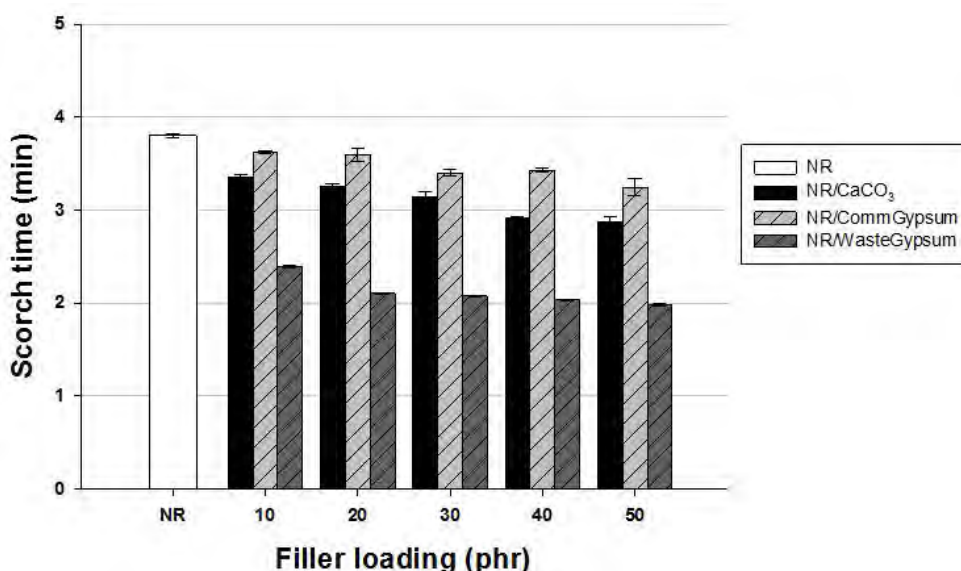


รูปที่ 4.11 กราฟแรงบิดสูงสุดของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

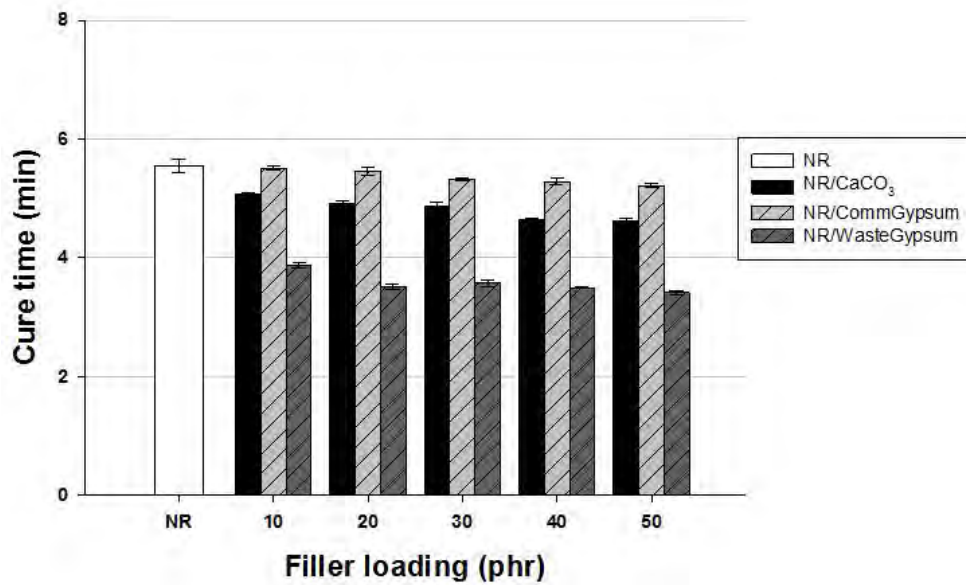
ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ายับยั้งทางการค้ากระจายตัวในเนื้อยางด้วยขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและยิบซัมเหลือทิ้งตามลำดับ

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เป็นผลของการเติมตัวเติมชนิดต่างๆ ที่มีผลกับระยะเวลาสกอร์ชและระยะเวลาการคงรูปตามลำดับ โดยผลดังแสดงในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าการเติมตัวเติมลงไปทำให้ระยะเวลาสกอร์ชลดลงอย่างมีนัยสำคัญจนถึงปริมาณตัวเติมที่ 50 phr ยิ่งไปกว่านั้นระยะเวลาสกอร์ชลดลงอย่างมากเมื่อมีการเติมยิปซัมเหลือทิ้งลงไปในยาง ทั้งนี้เป็นผลมาจากตัวเติมยิปซัมเหลือทิ้งนั้นมีองค์ประกอบอยู่หลายชนิด จากผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมในรูปที่ 4.1 (ก) จะสังเกตได้ว่าตัวเติมยิปซัมเหลือทิ้งมีส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ที่เป็นสารตระกูลซิลิเกตและยังมีสิ่งเจือปนจากการหล่อแบบพิมพ์ด้วยน้ำดิน ซึ่งอาจทำหน้าที่ไปกระตุ้นให้การคงรูปเกิดได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ทำให้การเติมยิปซัมที่เหลือทิ้งมีผลต่อการลดลงของระยะเวลาสกอร์ชมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและยิปซัมทางการค้าตามลำดับ

ส่วนระยะเวลาในการคงรูปยางคอมพาวด์เมื่อเติมตัวเติมชนิดต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.13 โดยการเติมยิปซัมเหลือทิ้งลงไปนั้น จะไปลดระยะเวลาการคงรูปของยางได้อย่างมากเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต แต่ในการเติมยิปซัมทางการค้าลงไปไม่ทำให้ระยะเวลาการคงรูปเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งปริมาณการเติมที่มากขึ้นไม่เป็นผลต่อการลดลงของระยะเวลาการคงรูปเท่าใดนัก



รูปที่ 4.12 ระยะเวลาสกอร์ชของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

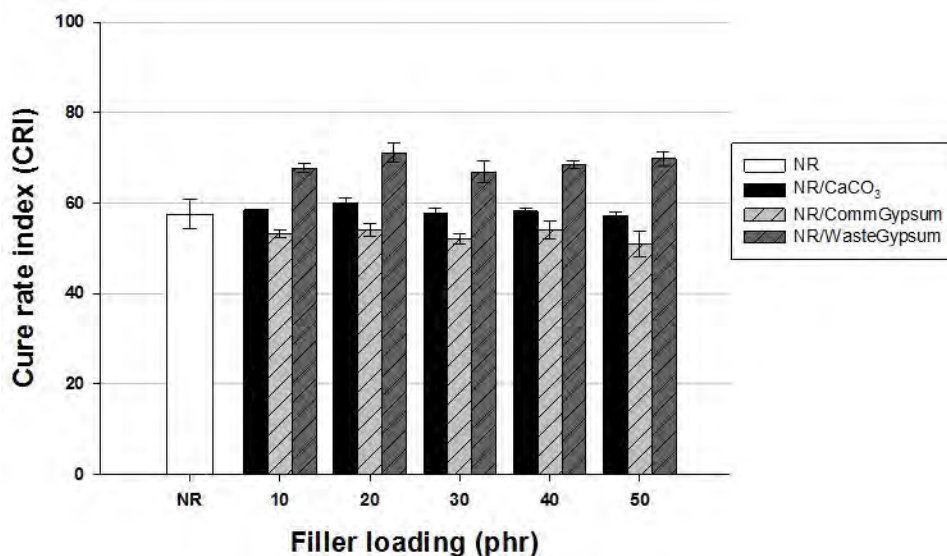


รูปที่ 4.13 ระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

ดัชนีอัตราคงรูป (cure rate index, CRI) เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยระยะเวลาการคงรูป (t_{C90}) และระยะเวลาสกอรัช (t_{S2}) ดังสมการต่อไปนี้

$$CRI = \frac{100}{t_{C90} - t_{S2}}$$

ซึ่งจากรูปที่ 4.14 พบว่าค่าดัชนีอัตราคงรูปของยิปซัมที่เตรียมขึ้นเองมีค่ามากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและยิปซัมทางการค้าตามลำดับ แต่เมื่อเติมสารตัวเติมแต่ละชนิดในปริมาณที่สูงขึ้น ไม่ทำให้ค่าดัชนีอัตราคงรูปของยางเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.14 กราฟดัชนีอัตราการคงรูปของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

สรุปได้ว่าค่าดัชนีอัตราการคงรูปขึ้นกับชนิดของสารตัวเติม แต่ไม่ขึ้นกับปริมาณของสารตัวเติม

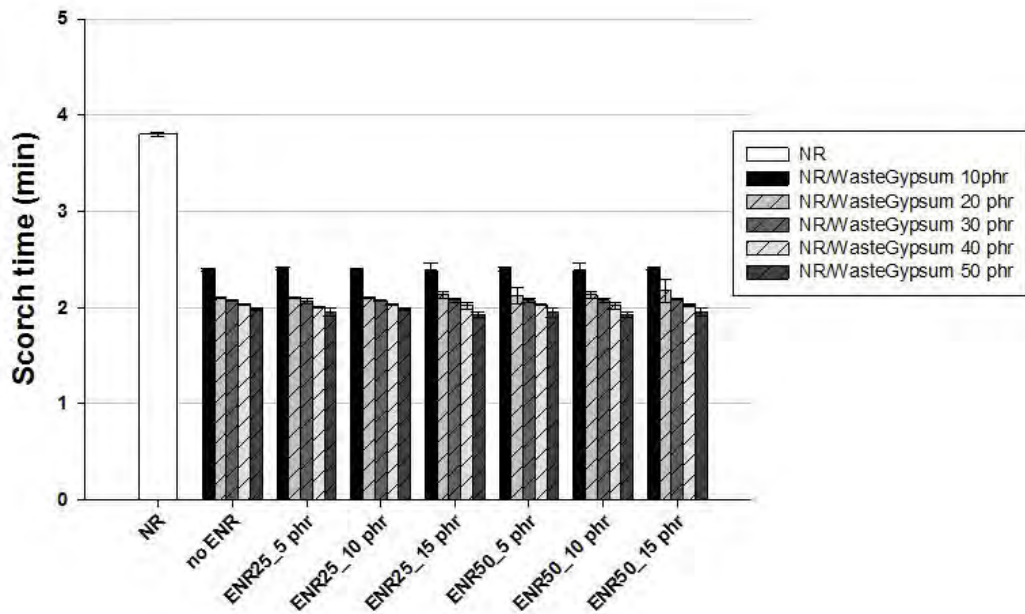
4.3.2 คุณสมบัติของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ตัวเติม

เป็นการศึกษาผลของการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่มีต่อคุณสมบัติของยางคงรูป ซึ่งยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่ทำการศึกษานี้มี 2 ชนิดคือ ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่มีหมู่อีพอกซีอยู่ปริมาณร้อยละ 25 โดยโมล (epoxidized natural rubber 25, ENR25) และยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่มีหมู่อีพอกซีอยู่ปริมาณร้อยละ 50 โดยโมล (epoxidized natural rubber 50, ENR50) โดยกำหนดปริมาณการเติม ENR ทั้งสองชนิดนี้เป็น 5 10 และ 15 phr ซึ่งให้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.15 – 4.23

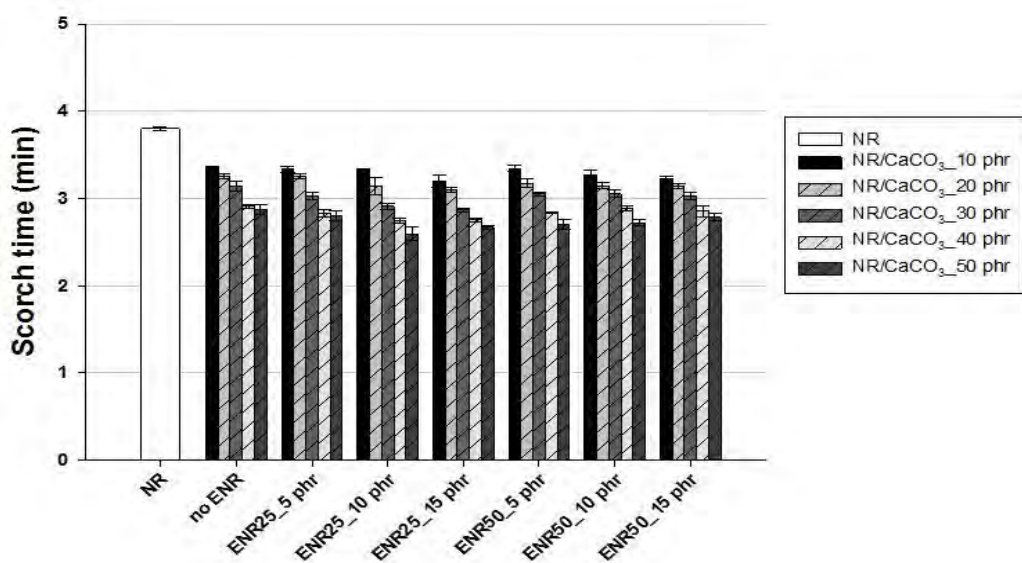
จากรูปที่ 4.15 – 4.17 เป็นระยะเวลาสกรอชของยางผสมที่มีตัวเติมเป็นอีปซัมเหลือทิ้ง แคลเซียมคาร์บอเนตและอีปซัมทางการค้าตามลำดับ และการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ที่มีหมู่อีพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมลในปริมาณ 5 10 และ 15 phr

พบว่าการใส่ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ลงไปไม่ทำให้ระยะเวลาสกรอชเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด แต่สาเหตุหลักเกิดจากชนิดของตัวเติม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอีปซัมเหลือทิ้ง ทั้งนี้เป็นผลมาจากตัวเติมอีปซัมเหลือทิ้งนั้นมีองค์ประกอบอยู่หลายชนิด จากผลเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโทแกรมใน

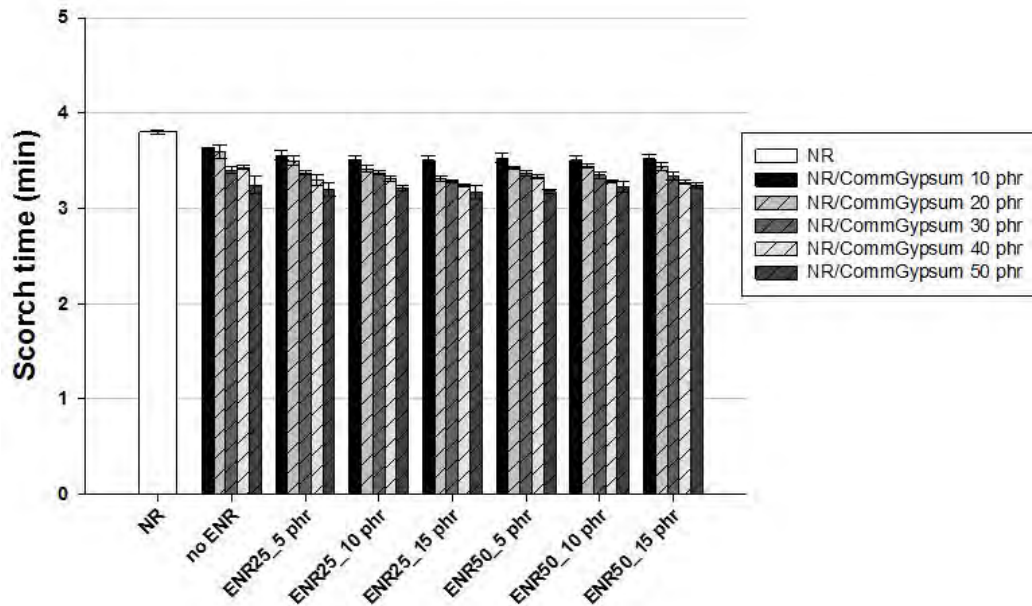
รูปที่ 4.1 (ก) จะสังเกตได้ว่าตัวเติมยิปซัมเหลือทิ้งมีส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ที่เป็นสารตระกูลซิลิเกต และยังมีสิ่งเจือปนจากการหล่อแบบพิมพ์ด้วยน้ำดิน ซึ่งอาจทำหน้าที่ไปกระตุ้นให้การคงรูปเกิดได้รวดเร็วยิ่งขึ้นจากยิปซัมที่เดิมขึ้นเองมีผลต่อการลดระยะเวลาสกอร์ชมากกว่าแคลเซียมคาร์บอเนตและยิปซัมทางการค้าตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ระยะเวลาสกอร์ชของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง

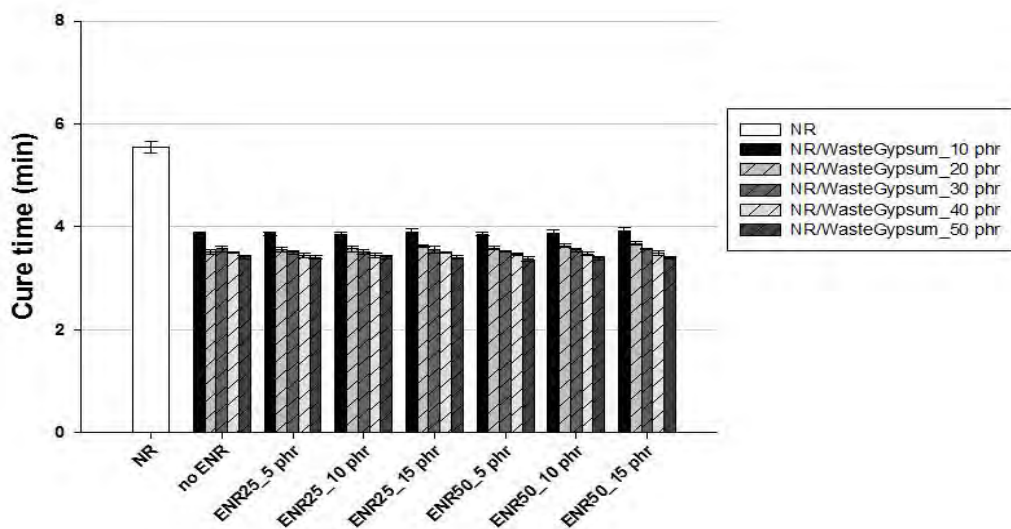


รูปที่ 4.16 ระยะเวลาสกอร์ชของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต

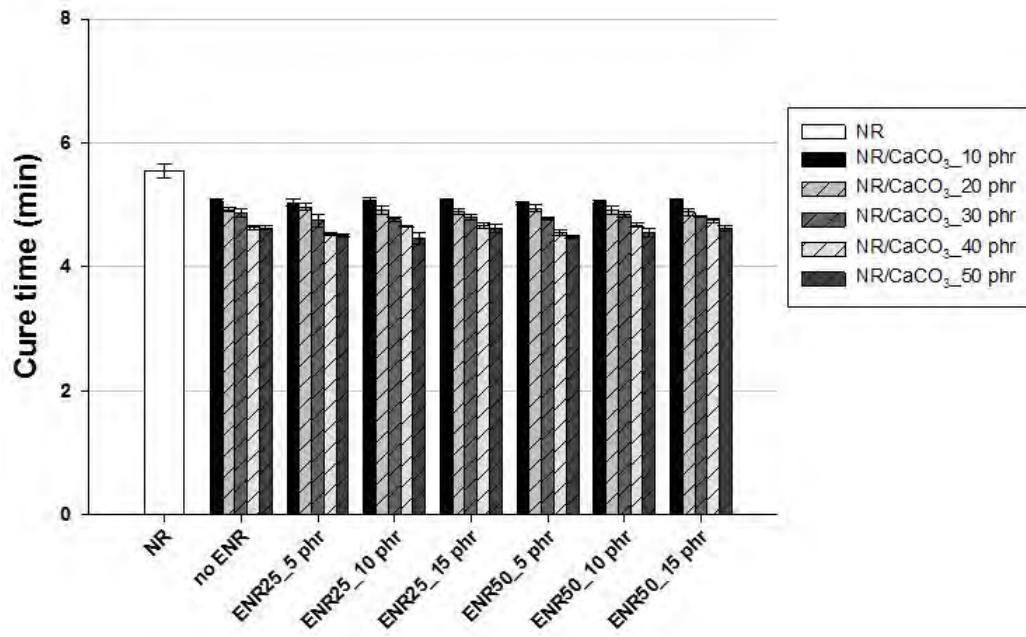


รูปที่ 4.17 ระยะเวลาสกอรัชของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้ำ

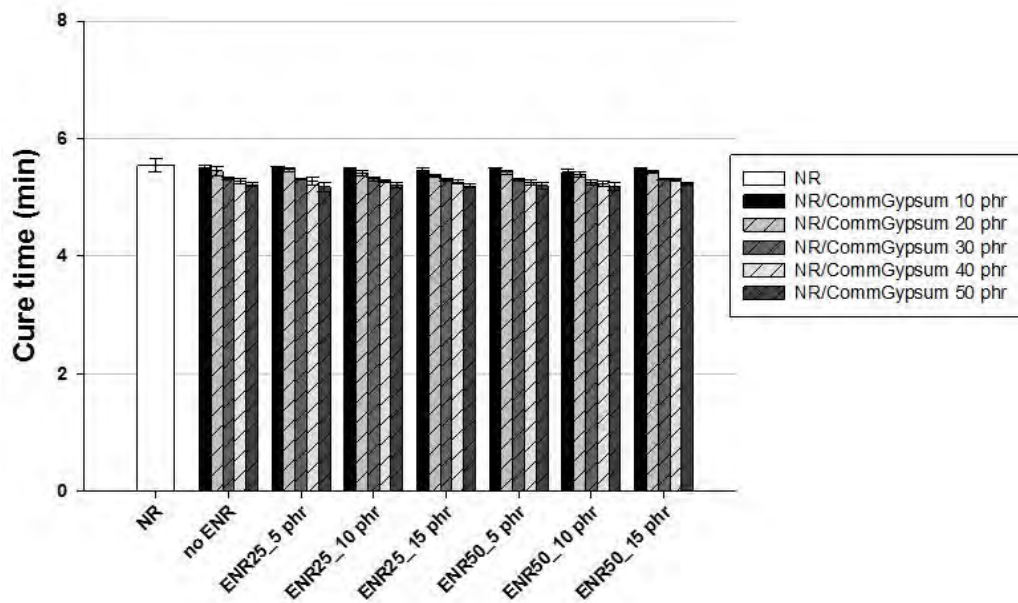
ส่วนระยะเวลาในการคงรูปยางคอมพาวด์เมื่อเติมตัวเติมชนิดต่างๆ ที่มีการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่ชนิดและปริมาณต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.18 – 4.20 โดยการเติมยิปซัมเหลือทิ้งลงไปนั้น ให้ผลเช่นเดียวกับการไม่ใส่ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ลงไป โดยจะไปลดระยะเวลาการคงรูปของยางได้อย่างมากเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต แต่ในการเติมยิปซัมทางการค้าลงไปไม่ทำให้ระยะเวลาการคงรูปเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งปริมาณการเติมที่มากขึ้นไม่เป็นผลต่อการลดลงของระยะเวลาการคงรูปเท่าใดนัก



รูปที่ 4.18 ระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง

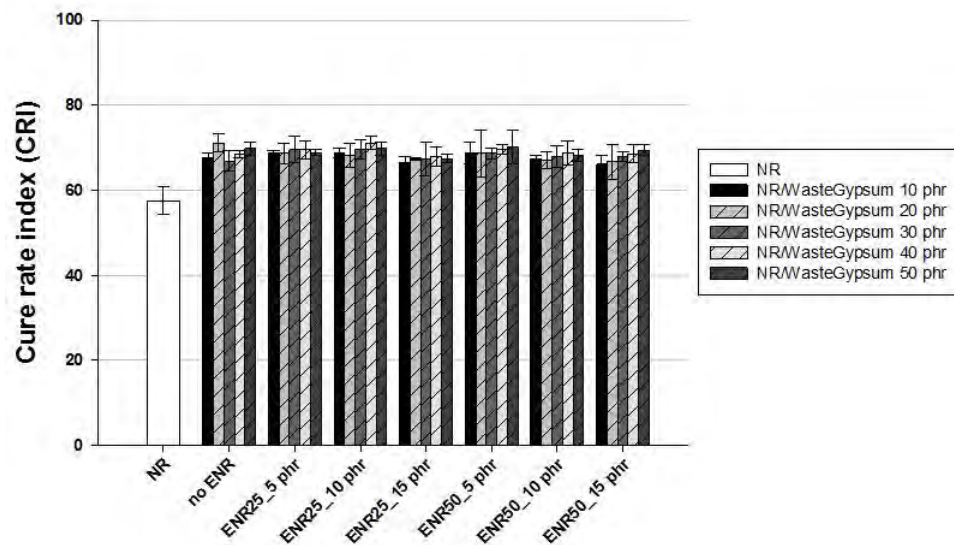


รูปที่ 4.19 ระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต

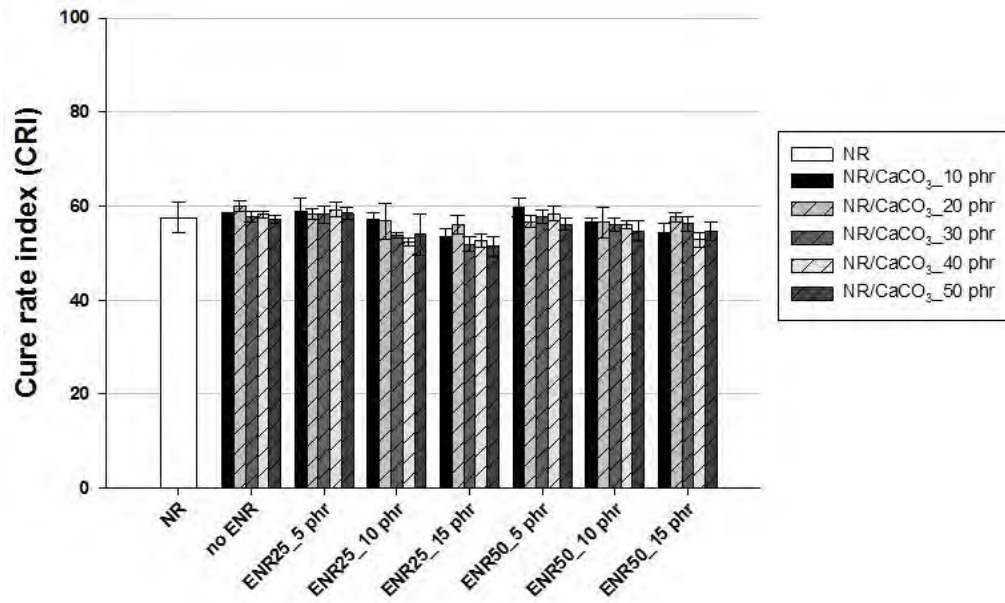


รูปที่ 4.20 ระยะเวลาการคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า

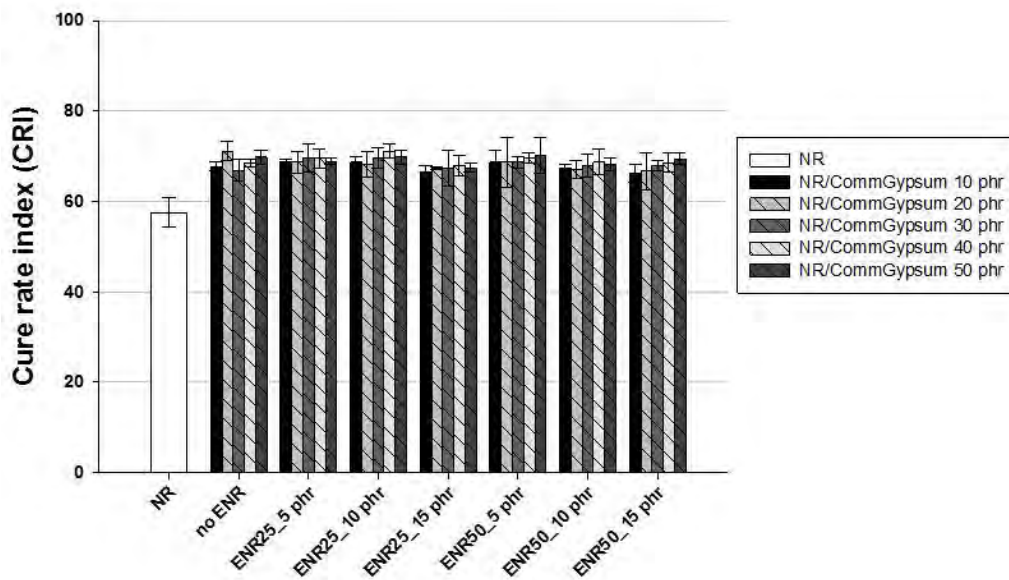
จากรูปที่ 4.21 – 4.23 เป็นการศึกษาค่าผลของการใส่ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ทั้งที่มี หมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ ร้อยละ 50 ในปริมาณ 5 10 และ 15 phr ที่ใส่ตัวเติมยิปซัมเหลือทิ้ง แคลเซียมคาร์บอเนต และยิปซัมการค้ำ ตามลำดับ ต่อดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมพาวด์ พบว่า การใส่ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ลงไปนั้นไม่ได้ทำให้ดัชนีอัตราการคงรูปของยางคอมพาวด์ เปลี่ยนแปลงในกรณีของตัวเติมยิปซัมเหลือทิ้งและยิปซัมการค้ำ แต่ให้ค่าที่สูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์และตัวเติมยิปซัมเหลือทิ้งและยิปซัมการค้ำลงไป และให้ค่าลดลงตามปริมาณของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่เติมลงไปแต่ให้ค่าลดลงไม่มากนักในกรณีของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต และให้ค่าที่ใกล้เคียงกันกับยางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์และตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.21 กราฟดัชนีอัตราการคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง



รูปที่ 4.22 กราฟดัชนีอัตราการคงรูปของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.23 กราฟดัชนีอัตราการคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า

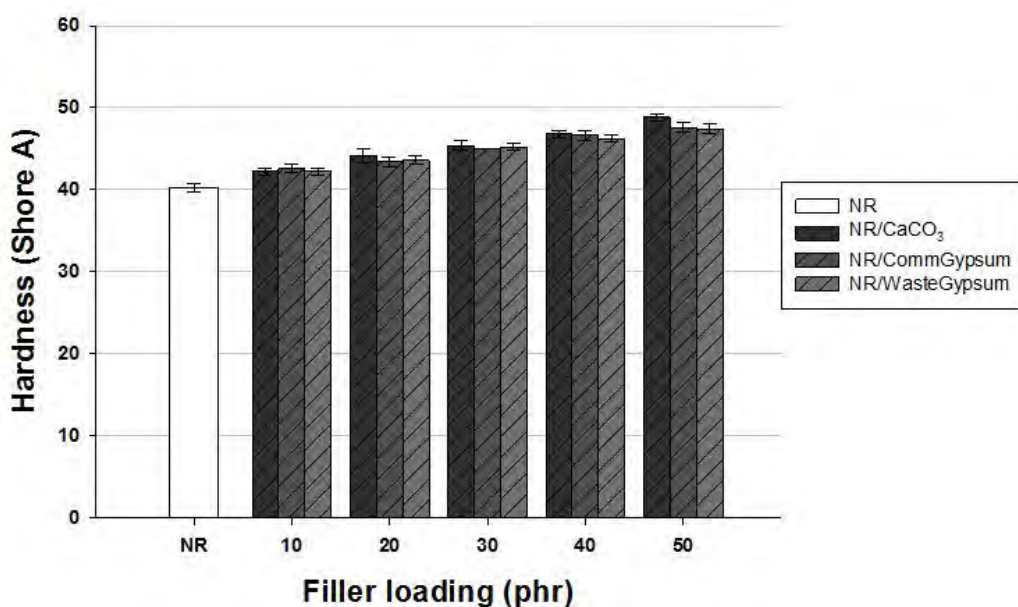
4.4 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

4.4.1 ความแข็ง (hardness)

ความแข็ง คือ ความต้านทานต่อการกดให้เป็นรอย การวัดความแข็งเป็นการวัดสมบัติที่พื้นผิวของวัสดุ ทั้งนี้วัสดุแต่ละชนิดจะมีความแข็งเป็นเช่นไร ก็ขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุลและองค์ประกอบของวัสดุนั้น ผลการวัดค่าความแข็ง (Shore hardness) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.24 – 4.28

ความแข็งของวัสดุเชิงประกอบมีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติที่ไม่มีการเติมตัวเติม เนื่องจากตัวเติมชนิดต่างๆ กล่าวคือทั้งแคลเซียมคาร์บอเนต ยิปซัมทางการค้าและยิปซัมเหลือทิ้งล้วนแล้วแต่เป็นแร่อนินทรีย์ซึ่งแม้จะไม่แข็งมากแต่ก็แข็งกว่ายางธรรมชาติมาก การเติมตัวเติมเหล่านี้ลงไปจึงทำให้ความแข็งของชิ้นงานสูงขึ้น

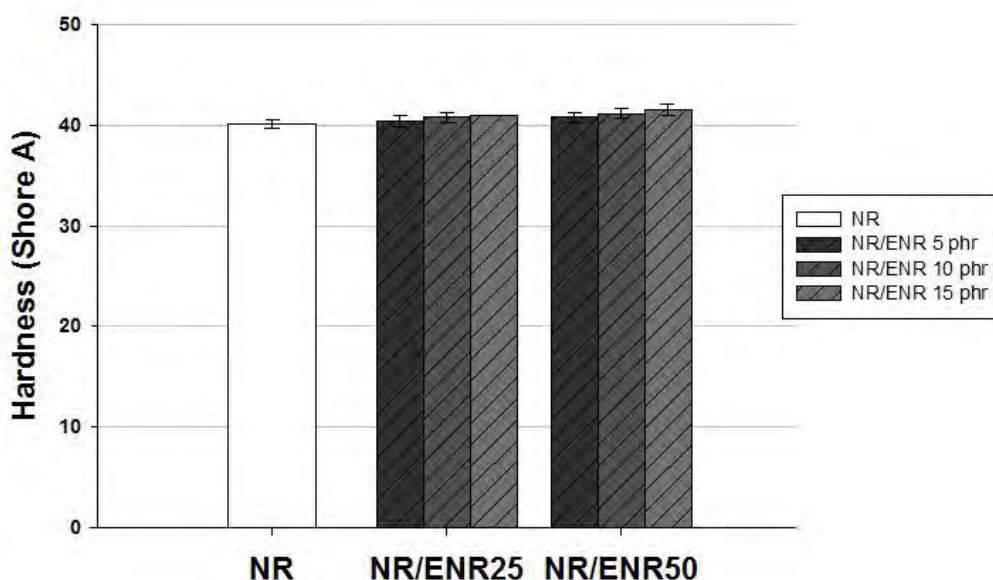
ซึ่งจากกราฟรูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นว่าตัวเติมทั้งสามชนิดมีความแข็งใกล้เคียงกันทำให้ค่าความแข็งของยางธรรมชาติ/ตัวเติมให้ผลที่ใกล้เคียงกัน และเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวเติมที่ใส่ลงไปตั้งแต่ 10 phr ไปจนถึง 50 phr แต่เพิ่มขึ้นไม่มากนักเนื่องจากตัวเติมทั้งสามจัดอยู่ในกลุ่มแร่อนินทรีย์ที่มีความแข็งของโมห์ (Moh 's scale hardness) อยู่ในช่วง 2 – 3 เท่านั้น



รูปที่ 4.24 ค่าความแข็ง (Shore A hardness) ของยางธรรมชาติ/สารตัวเติม

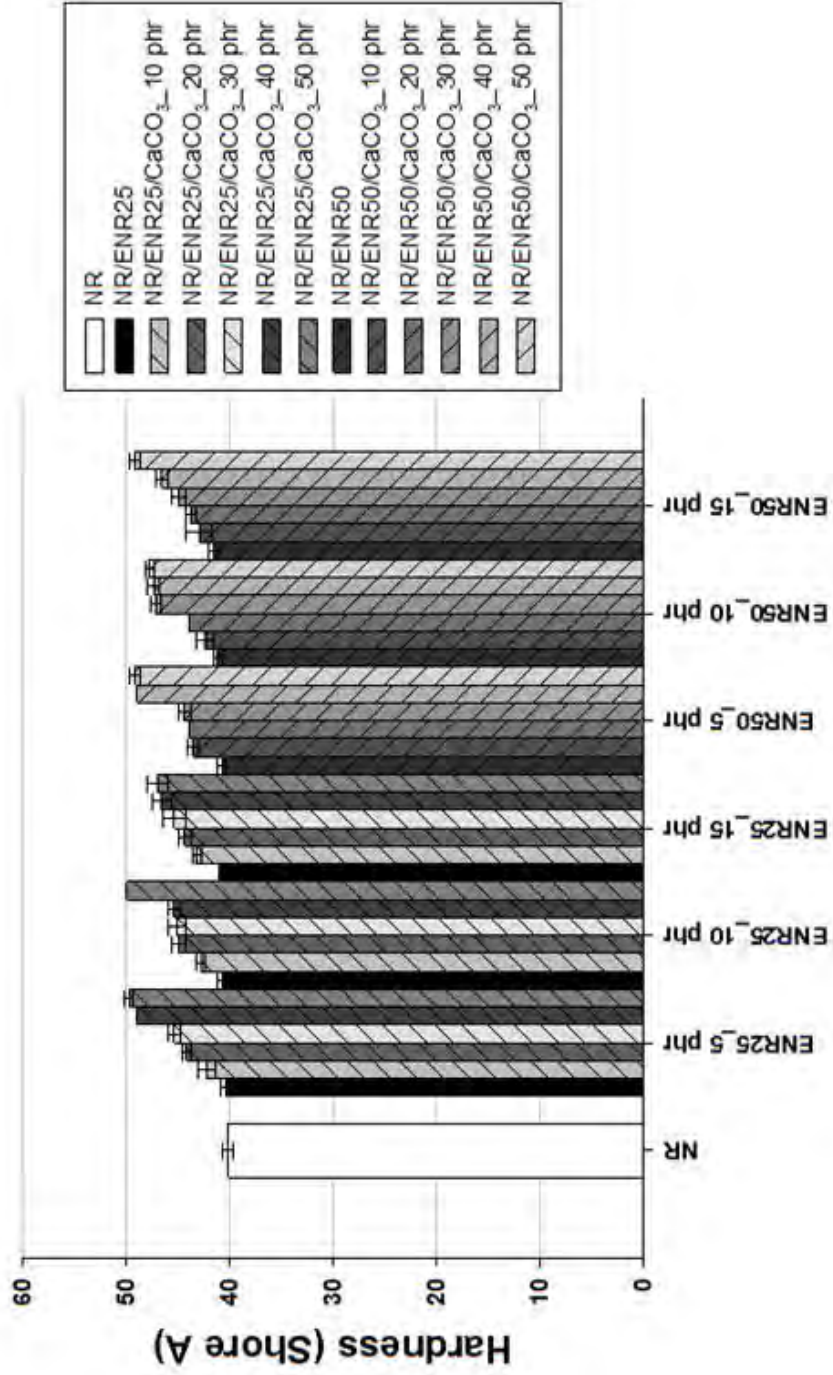
ต่อไปเป็นการศึกษาความแข็งของยางธรรมชาติ/ตัวเติมที่มีการใส่ยางธรรมชาติอิพอกซี ไตซ์ร้อยละ 25 และร้อยละ 50 ที่ปริมาณ 5, 10 และ 15 phr ให้ผลแสดงดังรูปที่ 4.25 ถึง 4.28

จากรูปที่ 4.25 เป็นค่าความแข็งของยางธรรมชาติที่มีการเติมยางธรรมชาติอิพอกซี ไตซ์ในความเข้มข้นและปริมาณต่าง สังกัดได้ว่าการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไตซ์ไม่ทำให้ค่าความแข็งเปลี่ยนแปลงเท่าใดนักโดยแนวโน้มค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติอิพอกซีไตซ์มากขึ้นจาก 5 10 ถึง 15 phr ตามลำดับ เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกซีไตซ์เป็นวัสดุที่อ่อนนิ่มและมีความยืดหยุ่นสูงเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ

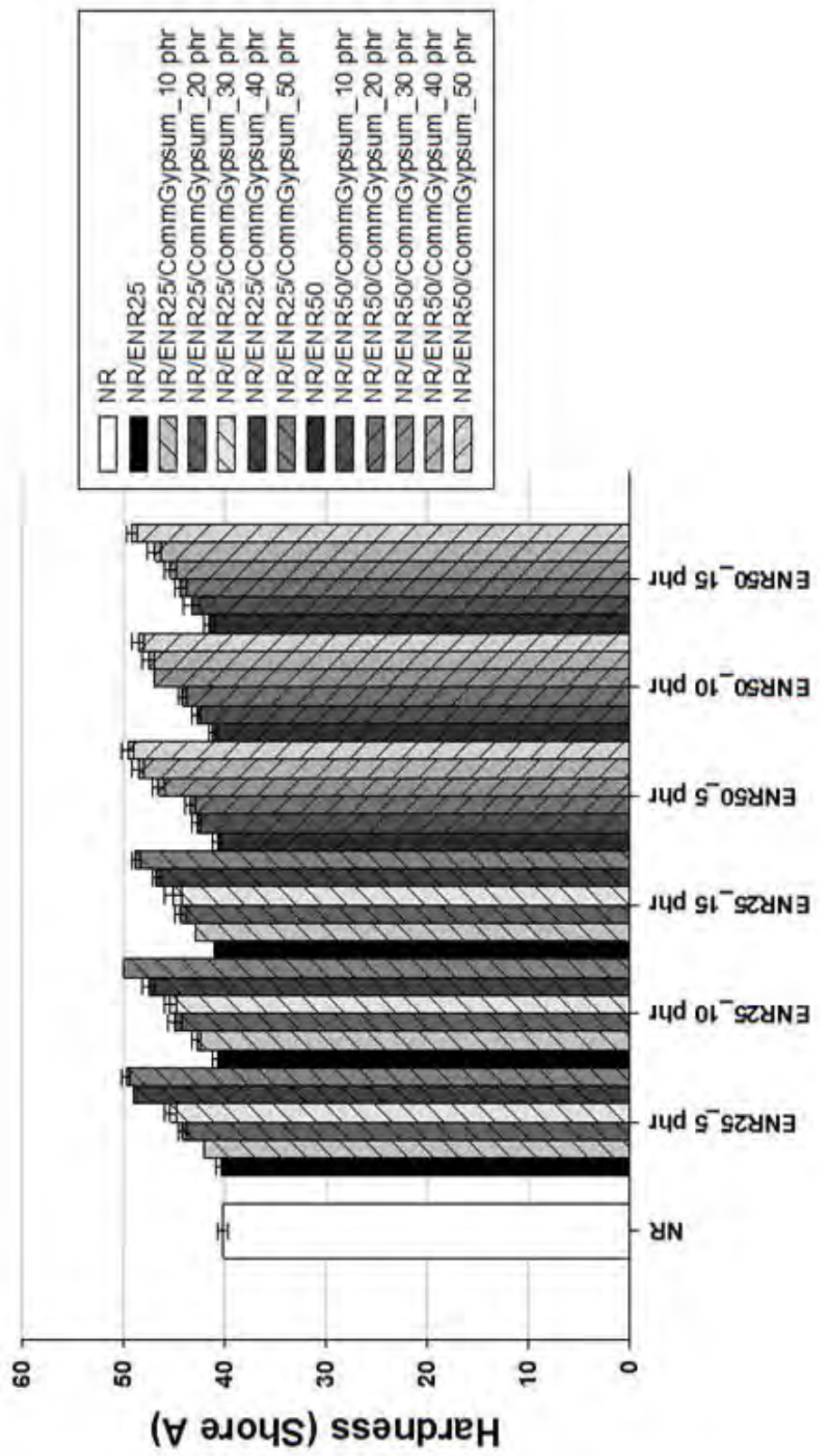


รูปที่ 4.25 ค่าความแข็งของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไตซ์

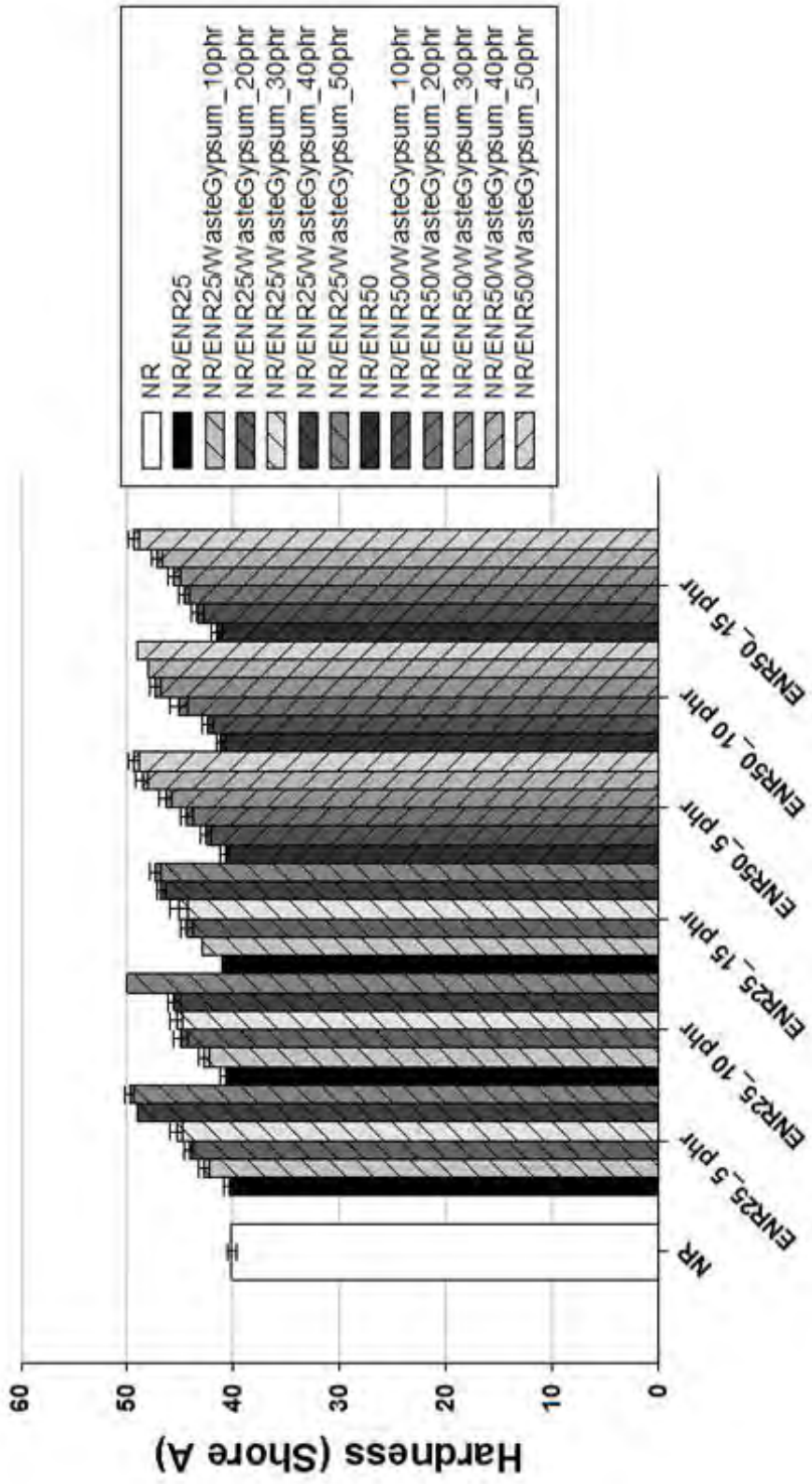
และจากรูปที่ 4.26 - 4.28 เป็นค่าความแข็งของยางธรรมชาติ/ตัวเติมชนิดต่างๆ ที่มีการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไตซ์ พบว่าแนวโน้มของค่าความแข็งมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวเติมมากขึ้น ซึ่งให้ผลที่เป็นแนวโน้มเดียวกันและให้ค่าใกล้เคียงกันกับยางธรรมชาติ/ตัวเติมที่ไม่มี การใส่ยางธรรมชาติอิพอกซีไตซ์ดังเหตุผลที่กล่าวไปแล้วว่ายางธรรมชาติอิพอกซีไตซ์มีลักษณะอ่อนนิ่มและยืดหยุ่นคล้ายกับยางธรรมชาติ จึงไม่ส่งผลต่อความแข็งของวัสดุเชิงประกอบมากนัก



รูปที่ 4.26 ค่าความแข็งของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.27 ค่าความแข็งของยางธรรมชาติ/อีพ็อกซีคาร์ดีอัม

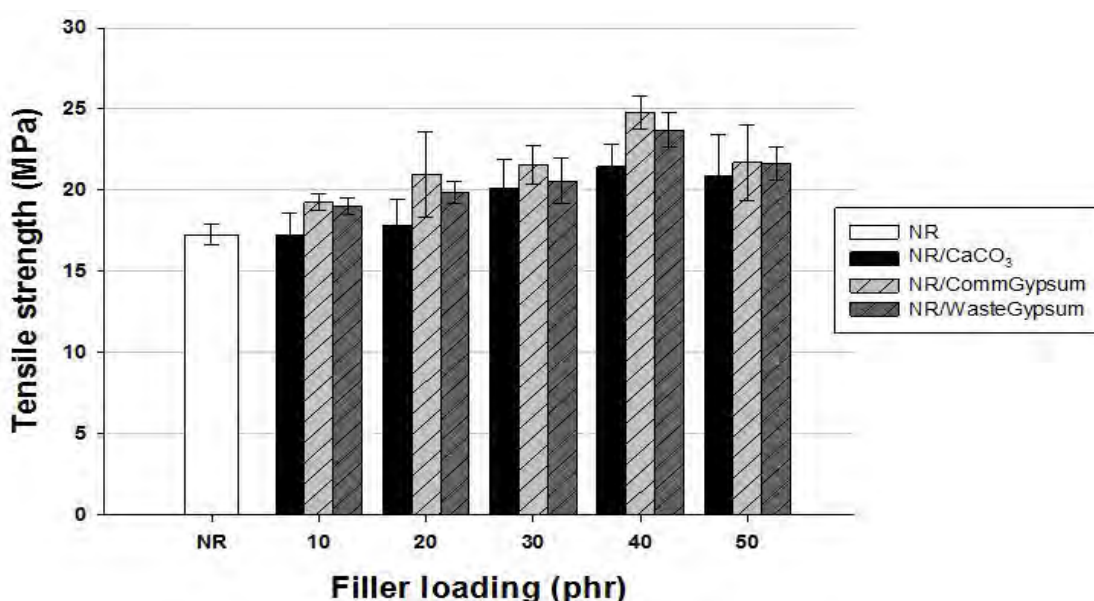


รูปที่ 4.28 ค่าความแข็งของยางธรรมชาติ/อีป็อกซีที่เติมเหล็กที่

4.4.2 สมบัติด้านแรงดึง (tensile properties)

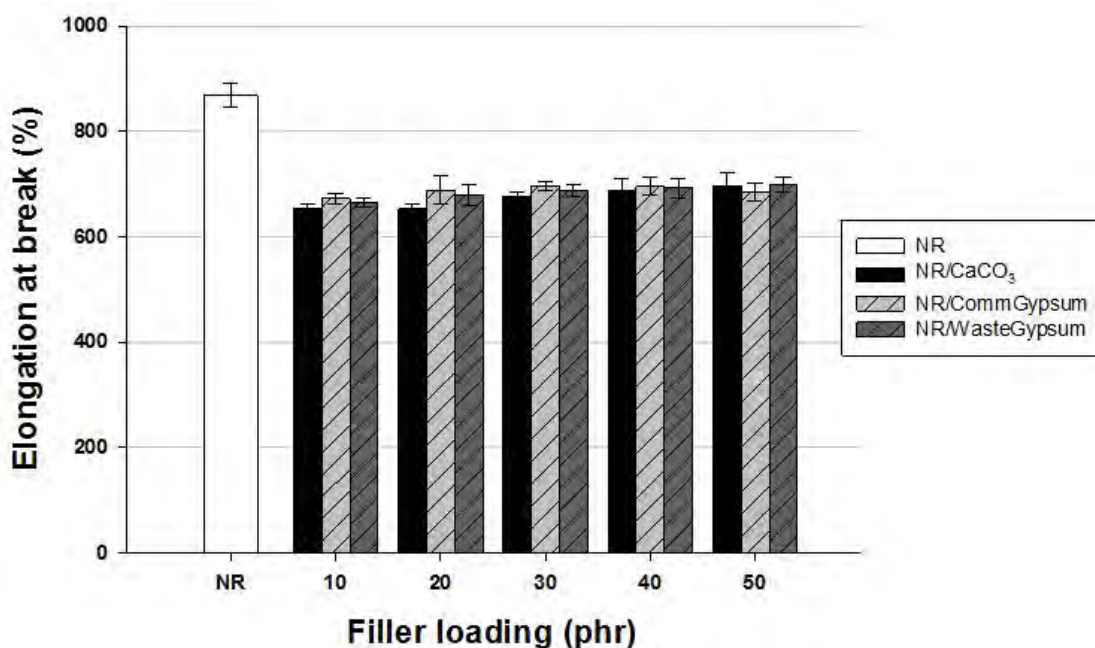
การทดสอบวัสดุโดยการดึง เป็นวิธีการทดสอบที่ง่ายและนิยมใช้กันมาก เพราะสามารถบอกถึงสมบัติเชิงกลพื้นฐานของวัสดุได้ เช่น ความทนแรงดึง (tensile strength) การยืดตัวที่จุดขาด (elongation at break) และมอดุลัส (modulus) เป็นต้น โดยทั่วไปนิยมนำค่าความเค้นดึงกับระยะที่ยืดดึงออกของชิ้นทดสอบมาเขียนเป็นกราฟที่เรียกว่ากราฟความเค้น-ความเครียด (stress-strain curve) ซึ่งกราฟความเค้น-ความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้

จากรูปที่ 4.29 เป็นกราฟความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่าเมื่อปริมาณของตัวเติมชนิดต่างๆ สูงขึ้น ทำให้ความทนแรงดึงมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณตัวเติม 50 phr ความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบลดลงทั้งนี้อาจเป็นเพราะการที่ตัวเติมกระจายตัวอยู่ในยางธรรมชาติมากขึ้นทำให้เมทริกซ์ของยางเกิดความไม่ต่อเนื่องมากขึ้น เมื่อดึงชิ้นงานพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับตัวเติมขาดออกจากกันเกิดเป็นช่องว่างของอากาศขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการแตกหักที่จุดนี้ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ที่ปริมาณตัวเติมสูงขึ้น ยิปซัมอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ได้และกระจายตัวไม่ดีของตัวเติมเหล่านั้น และเมื่อพิจารณาถึงผลของชนิดตัวเติมพบว่ายิปซัมทางการค้าทำให้ค่าความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบสูงกว่าตัวเติมชนิดอื่นๆ ในปริมาณตัวเติมที่เท่ากัน ตามด้วยยิปซัมเหลือทิ้งและแคลเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 กราฟความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

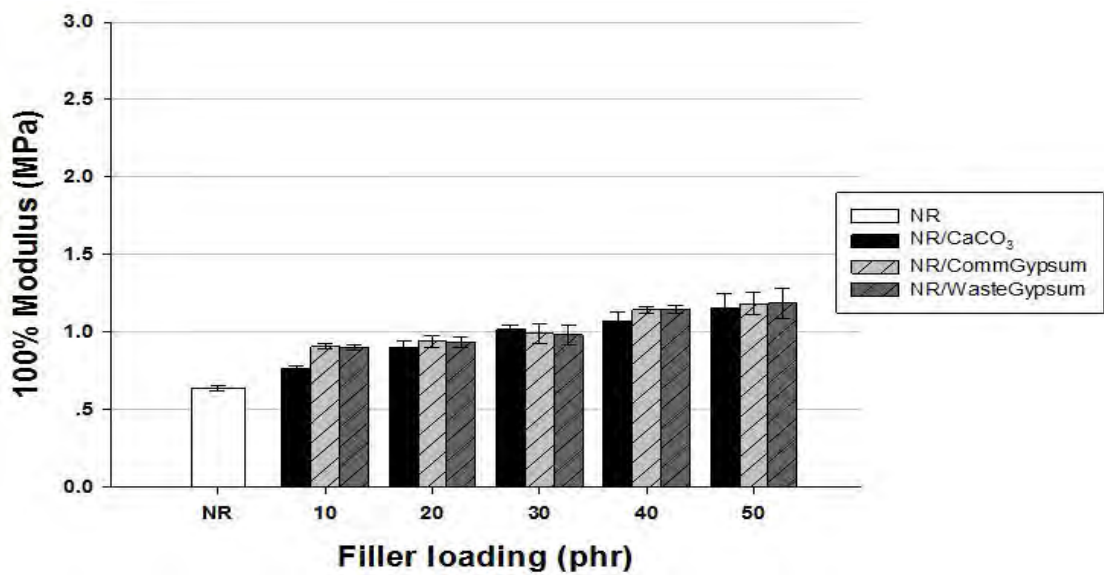
จากรูปที่ 4.30 พบว่าการเติมตัวเติมลงในยางธรรมชาติทำให้ร้อยละของการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่ตัวเติมชนิดต่างๆ นั้นเป็นวัสดุที่มีความเฉื่อย (inert) ต่อการเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับยางธรรมชาติ ความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับตัวเติมจึงน้อยมาก ทำให้ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าต่ำลง ตั้งแต่การเติมตัวเติมลงไปปริมาณ 10 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดที่มีการเติมลงไป จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมมักเกิดการขาดออกจากกันในระหว่างการดึงยืดที่บริเวณรอยต่อระหว่างยางธรรมชาติกับตัวเติมก่อนที่จะเกิดการขาดออกจากกันของเนื้อยางธรรมชาติ แต่เมื่อมีการใส่ตัวเติมลงไปปริมาณสูงขึ้น ไม่ทำให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลงอีก แม้ว่าจะมีการใส่ตัวเติมลงไปถึง 50 phr ก็ตาม



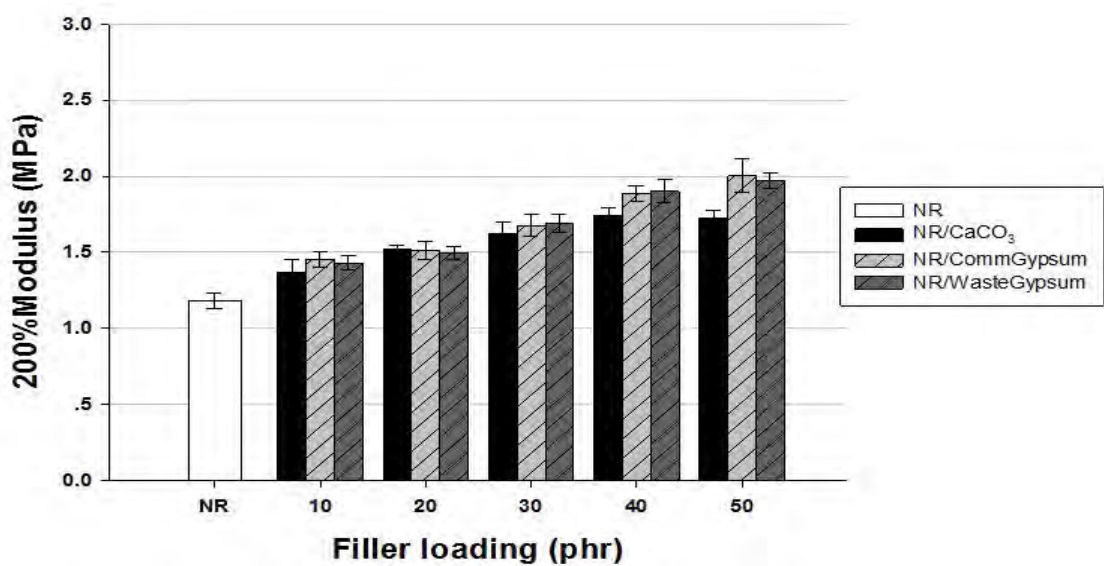
รูปที่ 4.30 กราฟร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

จากรูปที่ 4.31 - 4.33 แสดงกราฟ 100%, 200% และ 300% มอดูลัสของยางธรรมชาติ/ตัวเติมชนิดต่างๆ พบว่าค่ามอดูลัสเหล่านี้มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการใส่ตัวเติมลงไปปริมาณมากขึ้น เนื่องจากยางเป็นวัสดุที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นสูง เมื่อใส่ตัวเติมที่มีความแข็งถึงแม้ว่าตัวเติมแต่ละชนิดนั้นจะมีความแข็งของโมห์ เพียง 2 เท่านั้น แต่เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติแล้วถือว่าแข็งกว่ามาก ซึ่งเมื่อเติมสิ่งที่มีความแข็งมากกว่าย่อมทำให้ยางผสมมีค่ามอดูลัสที่สูงขึ้น

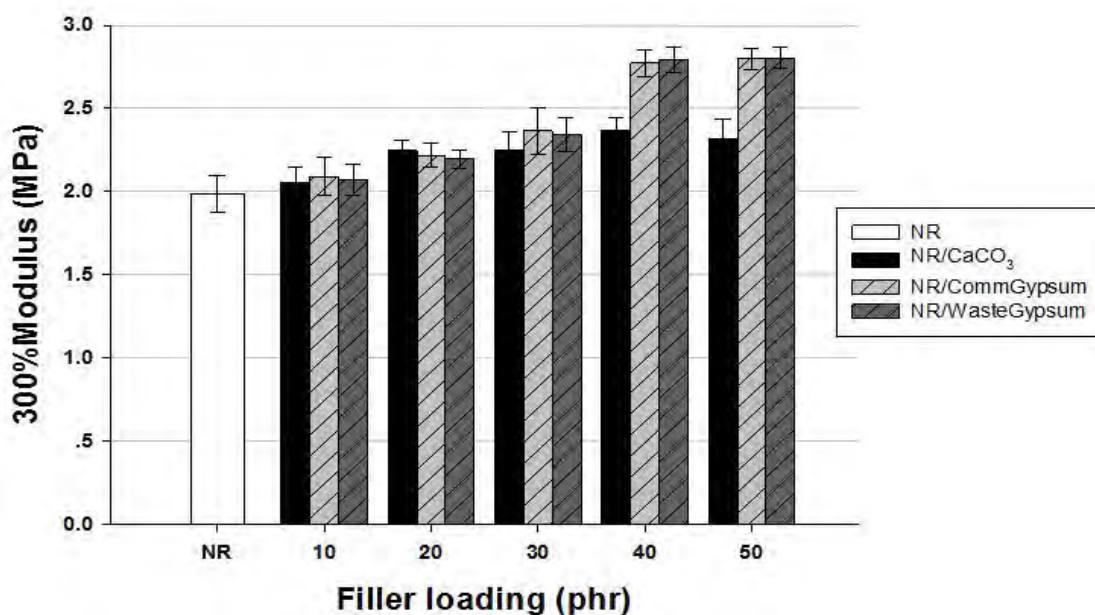
เนื่องจากต้องใช้แรงมากกว่าในหน่วยพื้นที่เท่ากันเพื่อให้ยางคงรูปยืดออก นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมยิปซัมทั้งแบบทางการค้าและแบบเหลือทิ้งส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยางธรรมชาติมีค่าสูงกว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณสารตัวเติม 40 phr เป็นต้นไป



รูปที่ 4.31 กราฟ 100% มอดูลัสของยางธรรมชาติ/ตัวเติม



รูปที่ 4.32 กราฟ 200% มอดูลัสของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

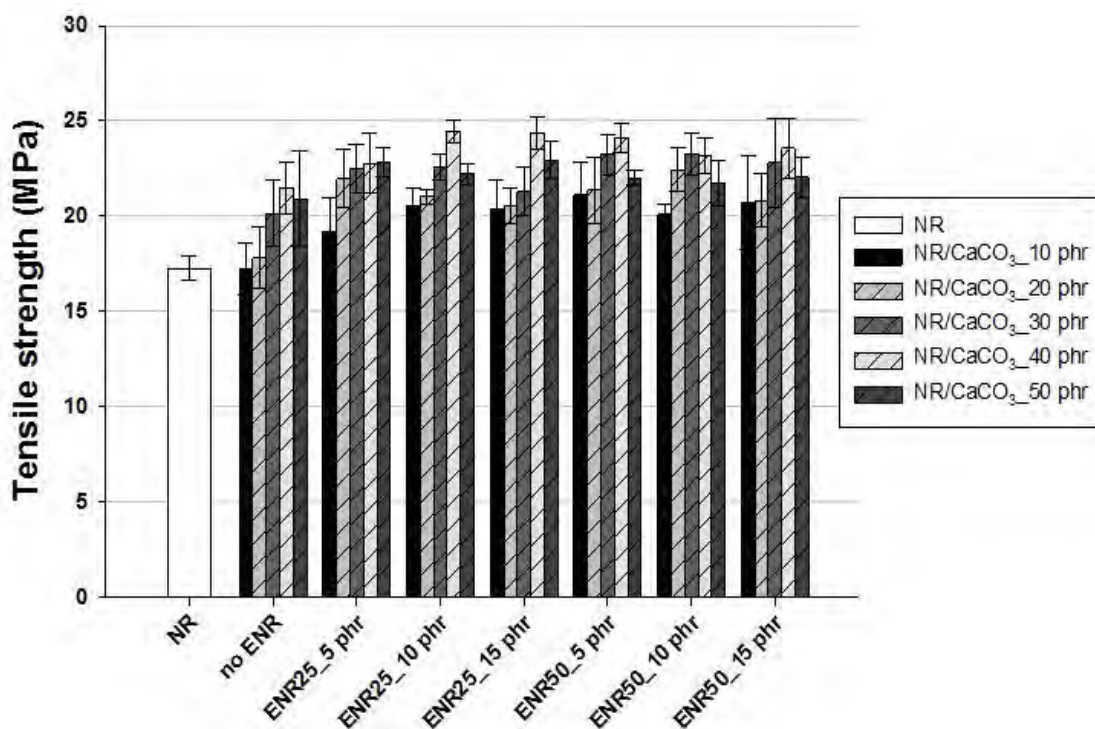


รูปที่ 4.33 กราฟ 300% มอดูลัสของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

ต่อไปเป็นการศึกษาผลของการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีต่อสมบัติด้านแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.34 – 4.36 เป็นผลของการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีต่อความทนแรงดึง และรูปที่ 4.37 – 4.39 เป็นผลของการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีต่อร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ตามลำดับ

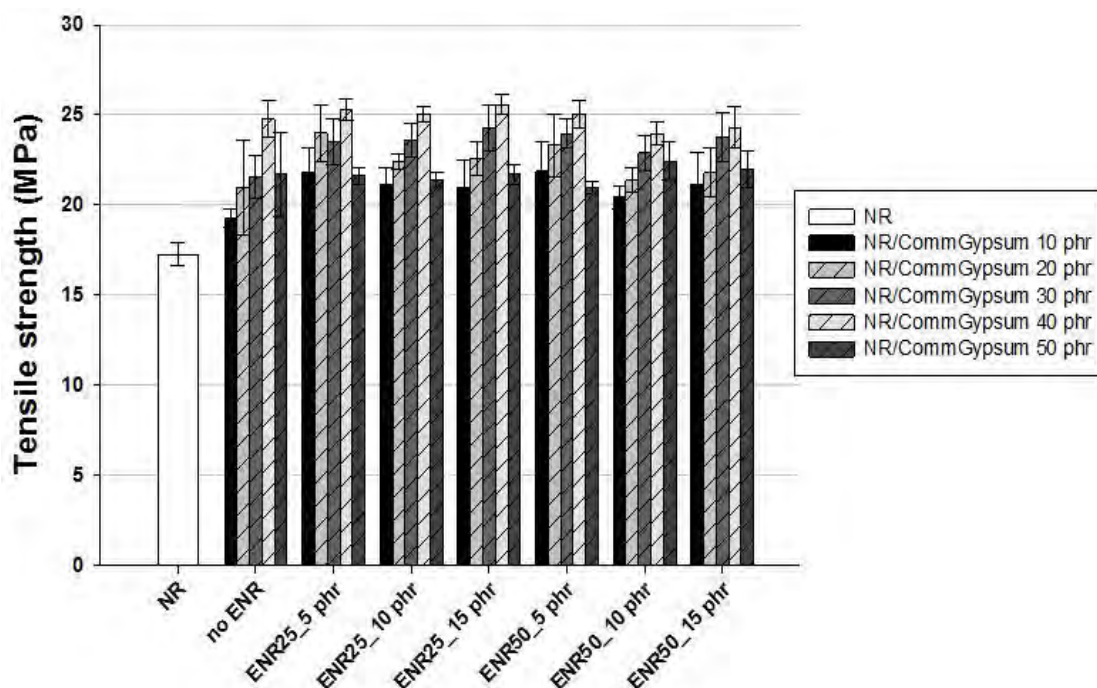
ในรูปที่ 4.34 เป็นกราฟความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าเมื่อปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตสูงขึ้น ทำให้ความทนแรงดึงมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณตัวเติม 50 phr ความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบลดลงทั้งนี้อาจเป็นเพราะการที่ตัวเติมกระจายตัวอยู่ในยางธรรมชาติมากขึ้นทำให้เมทริกซ์ของยางเกิดความไม่ต่อเนื่องมากขึ้น เมื่อตั้งขึ้นงานพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์กับตัวเติมขาดออกจากกันเกิดเป็นช่องว่างของอากาศขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการแตกหักที่จุดนี้ได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ที่ปริมาณตัวเติมสูงขึ้น แคลเซียมคาร์บอเนตอาจเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ได้และกระจายตัวไม่ดีของแคลเซียมคาร์บอเนต และเมื่อพิจารณาถึงผลของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีต่อความทนแรงดึงพบว่า ทำให้ค่าความทนแรงดึงสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับแคลเซียมคาร์บอเนตมีมากขึ้น และเมื่อใส่ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 โดยโมล (ENR25) ลงไปมากขึ้น จะทำ

ให้ความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากขึ้น แต่ในกรณีของยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 50 โดยโมล (ENR50) เมื่อปริมาณที่ใส่สูงขึ้นไปกลับไม่ทำให้ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเกิดจากปริมาณหมู่อิพอกซี ซึ่งเป็นหมู่ที่มีขั้วเกิดการรวมตัวกันเองแทนที่จะเกิดอันตรกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต



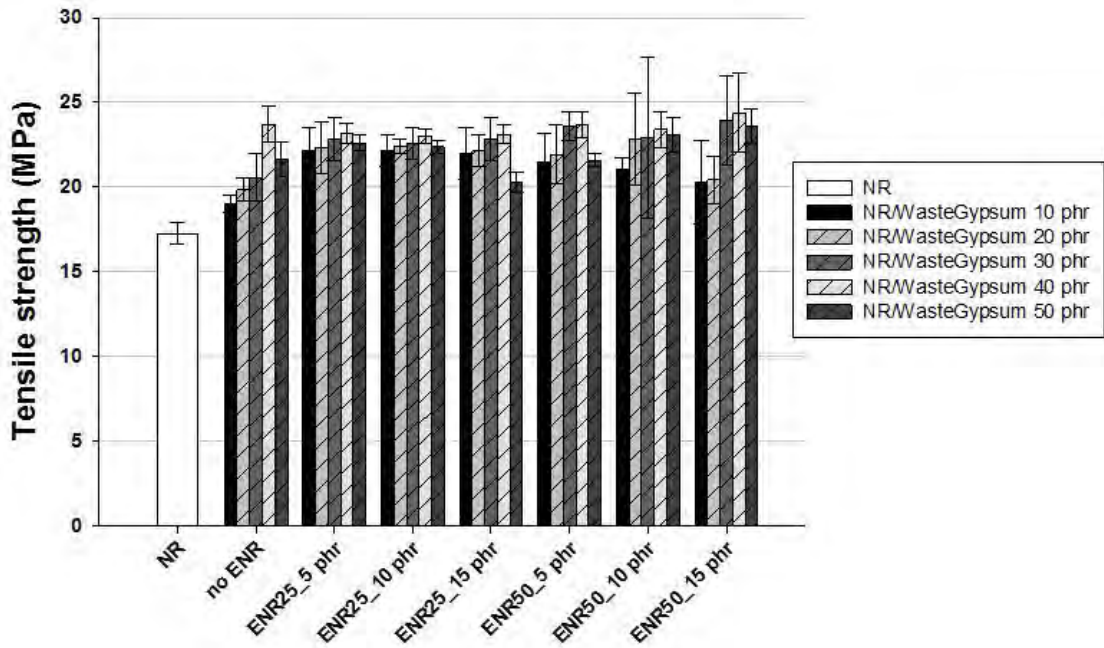
รูปที่ 4.34 กราฟความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต

ค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมกรณีที่มีการใส่ยิปซัมการค้า แสดงดังรูปที่ 4.35 พบว่าการใส่ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมล ไม่ทำให้สมบัตินี้เพื่อสูงขึ้นแต่อย่างใด เนื่องจากการยิปซัมการค้ามีความเข้ากันได้กับยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมลได้ยาก อีกทั้งขนาดอนุภาคของยิปซัมการค้ามีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต ดังนั้นยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมล จึงไม่ช่วยเพิ่มค่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมให้สูงขึ้นได้



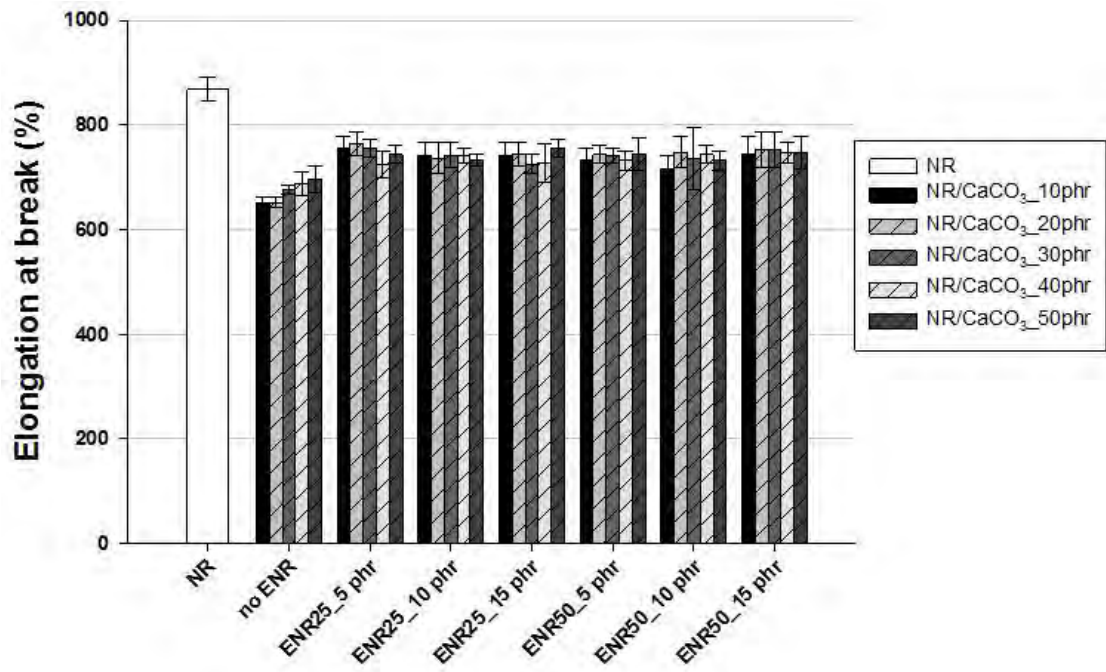
รูปที่ 4.35 กราฟความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า

ในกรณีของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่ยิปซัมเหลือทิ้งและยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมลที่ปริมาณต่างๆ ต่อความทนแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.36 พบว่าความทนแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 โดยโมล มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่มีการใส่ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมล เนื่องจากหมู่อิพอกซีที่อยู่ในยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์สามารถเกิดอัตรกิริยาได้ดีกับประจุบวกของสารกระจายลอยตัว (defloculants) ที่อยู่ในยิปซัมเหลือทิ้ง จึงทำให้ความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับยิปซัมเหลือทิ้งมีมากขึ้น แต่ในกรณีของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 50 โดยโมล กลับให้ค่าความทนแรงดึงที่ต่ำลง ซึ่งเป็นผลมาจากการจับตัวรวมกันเป็นก้อนของยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์และยิปซัมเหลือทิ้ง เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 50 โดยโมล มีหมู่อิพอกซีอยู่มากเกินไปนั่นเอง

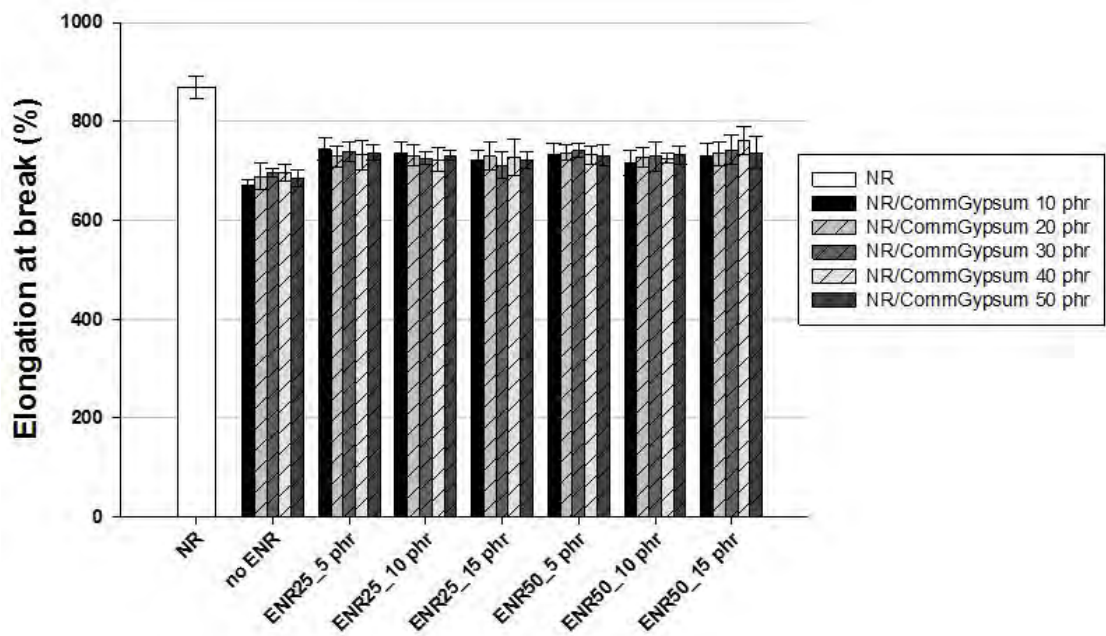


รูปที่ 4.36 กราฟความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง

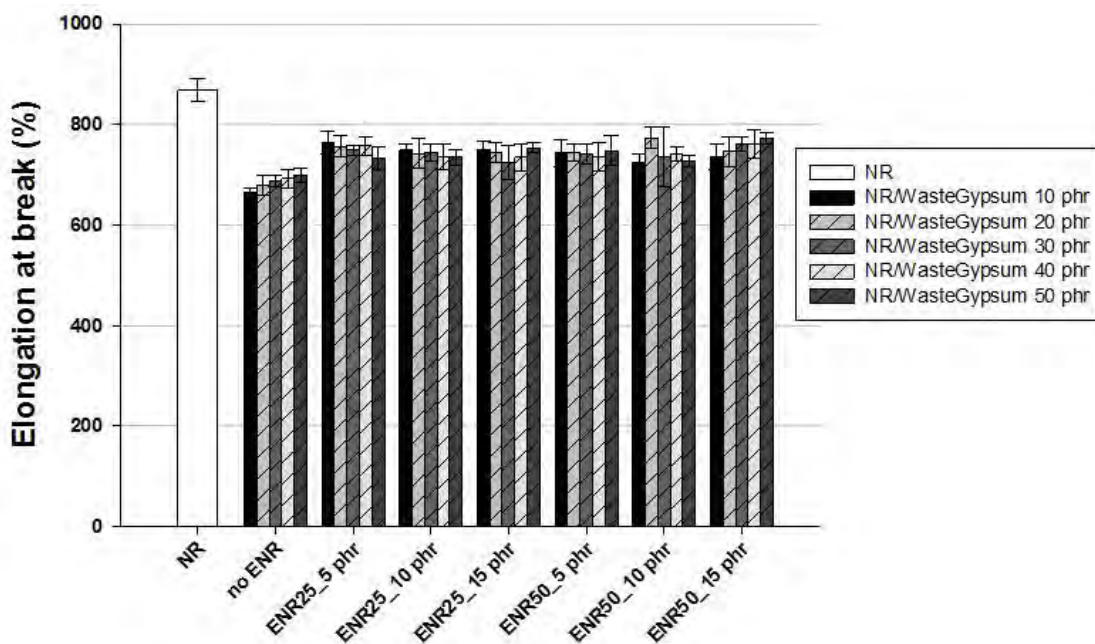
จากรูปที่ 4.37 – 4.39 เป็นกราฟร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมที่มีการใส่ตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ยิปซัมการค้ำ และยิปซัมเหลือทิ้งตามลำดับ พบว่าการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมล ลงในยางธรรมชาติทำให้ร้อยละของการยืดตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่ใส่ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีปริมาณหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมล ที่ปริมาณตัวเติมเท่ากัน อีกทั้งยังมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีความเหนียวและมีความยืดหยุ่นสูง ในขณะที่ตัวเติมชนิดต่างๆ นั้นเป็นวัสดุที่มีความเฉื่อย (inert) ต่อการเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับยางธรรมชาติสูง ความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติกับตัวเติมจึงน้อยมาก ทำให้ร้อยละของการยืดตัว ณ จุดขาดมีค่าต่ำลง ตั้งแต่การเติมตัวเติมลงไปปริมาณ 10 phr ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยที่สุดที่มีการเติมลงไป จึงทำให้พอลิเมอร์ผสมมักเกิดการขาดออกจากกันในระหว่างการดึงยึดที่บริเวณรอยต่อระหว่างยางธรรมชาติกับตัวเติมก่อนที่จะเกิดการขาดออกจากกันของเนื้อยางธรรมชาติ แต่เมื่อมีการใส่ตัวเติมลงไปปริมาณสูงขึ้น ไม่ทำให้อัตราการยืดตัว ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมลดลงอีก แม้ว่าจะมีการใส่ตัวเติมลงไปถึง 50 phr ก็ตาม



รูปที่ 4.37 กราฟร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.38 กราฟร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า

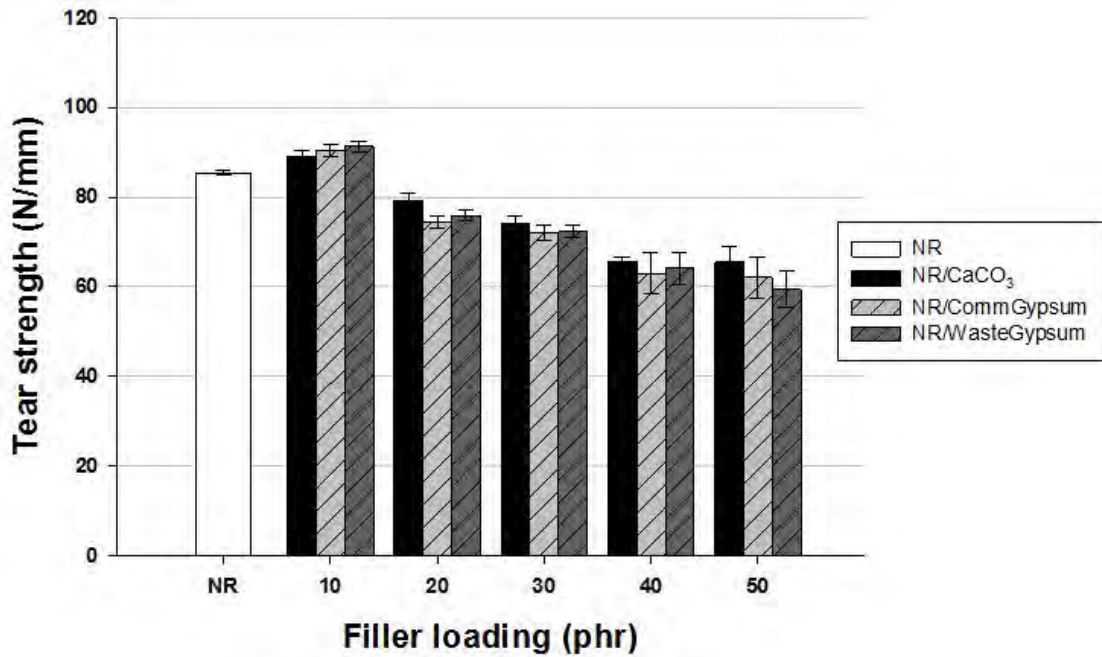


รูปที่ 4.39 กราฟร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง

4.4.3 ความทนแรงฉีกขาด (tear strength)

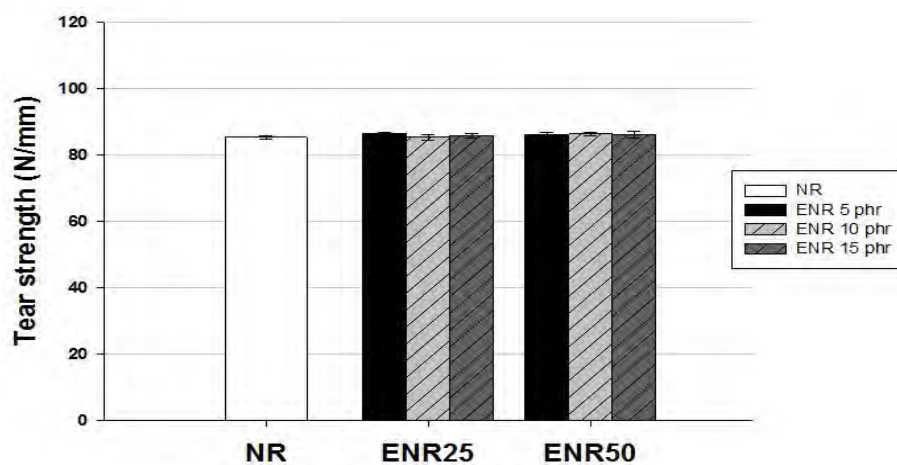
ความทนต่อแรงฉีกขาดเป็นการให้แรงเพื่อทำให้ชิ้นทดสอบฉีกขาดต่อหน่วยความหนา มีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร (N/mm) หรือกิโลนิวตันต่อเมตร (kN/m) การทดสอบนี้จะวัดความต้านทานต่อการฉีกขาดเนื่องจากชิ้นทดสอบมีลักษณะที่ไม่สมมาตร (anisotropy) จึงเกิดเป็นจุดรวมความเค้น ซึ่งเป็นจุดที่ทำให้ชิ้นทดสอบเริ่มฉีกขาดออกจากกัน ซึ่งผลจากการทดสอบความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์/ตัวเติมต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.37 – 4.41

จากรูปที่ 4.40 เป็นผลของตัวเติมต่างๆ ในปริมาณตั้งแต่ 10 20 30 40 และ 50 phr ที่ใส่ลงไปยางธรรมชาติพบว่า ที่ปริมาณ 10 phr ของตัวเติมทุกชนิดให้ค่าความทนต่อแรงฉีกขาดที่สูงที่สุดและมากกว่ายางธรรมชาติที่ไม่ได้มีการใส่ตัวเติมลงไป และเริ่มให้ค่าที่ลดลงและน้อยกว่ายางธรรมชาติเมื่อมีการใส่ตัวเติมลงไป ปริมาณ 20 phr เนื่องจากความเข้ากันได้ยากระหว่างยางธรรมชาติและตัวเติมแต่ละชนิดอีกทั้งในปริมาณของตัวเติมที่สูงที่สุดคือ 50 phr จะให้ค่าความทนแรงฉีกขาดที่ต่ำที่สุดอันเนื่องมาจากตัวเติมมีความเป็นแอกไกลเมอร์ที่สูงมาก



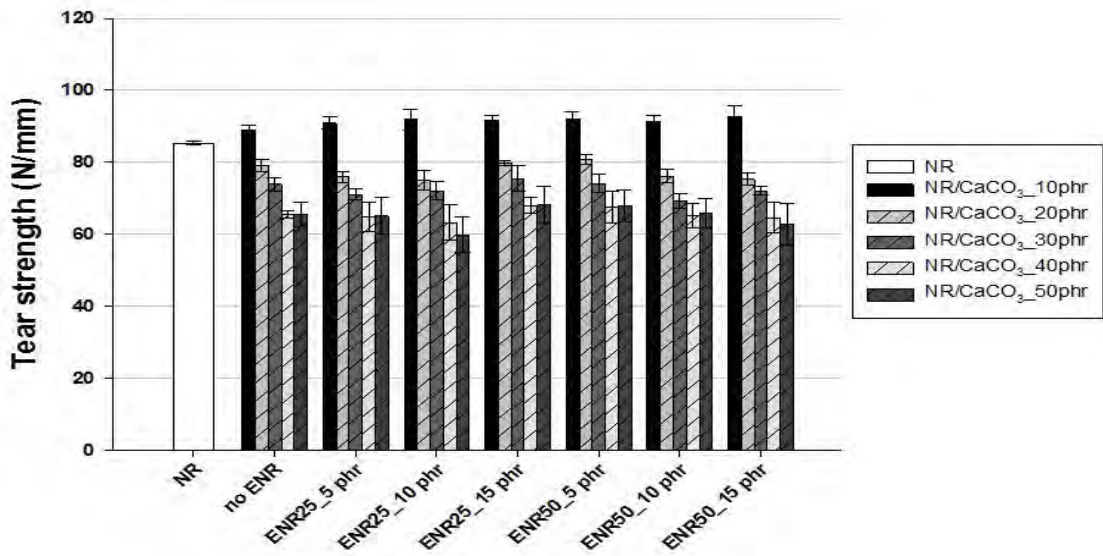
รูปที่ 4.40 กราฟความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่ชนิดและปริมาณต่างๆ ที่มีต่อความทนแรงฉีกขาดดังแสดงในรูปที่ 4.41 พบว่าทั้งชนิดและปริมาณของยางธรรมชาติไม่มีผลทำให้ค่าความทนแรงฉีกขาดของยางคงรูปสูงขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์มีลักษณะที่คล้ายกับยางธรรมชาติคือมีความยืดหยุ่น แต่ไม่มีความแข็งเกร็ง (rigid) จึงไม่ได้ทำให้ค่าความทนแรงฉีกขาดสูงขึ้นแต่อย่างใด

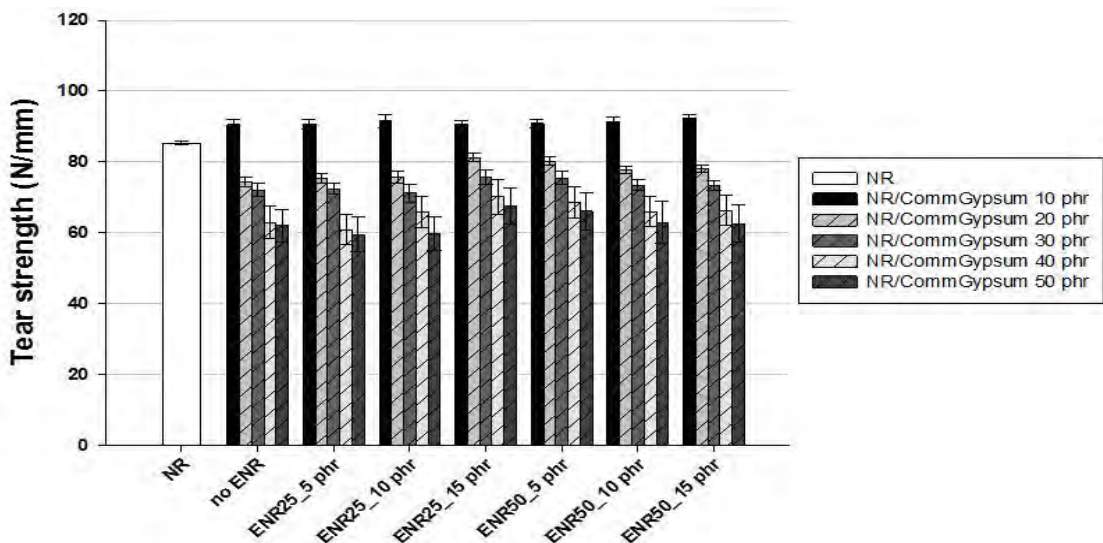


รูปที่ 4.41 กราฟความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์

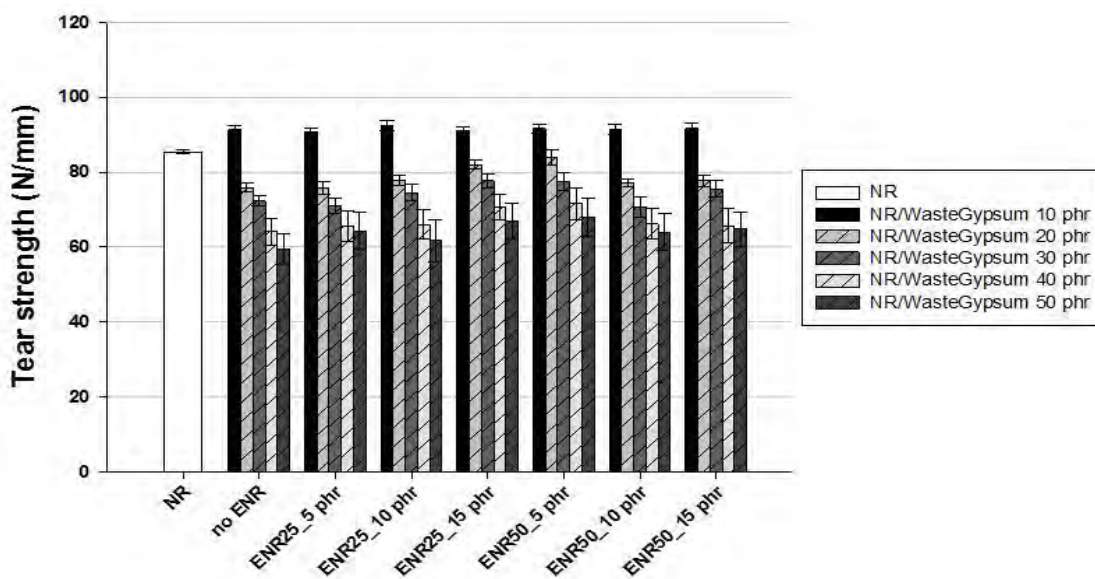
และเมื่อมีการใส่ตัวเติมทั้งสามชนิดในปริมาณต่างๆ ให้ค่าความทนแรงฉีกขาดแสดงดังรูปที่ 4.42 – 4.44 พบว่าการใส่ตัวเติมในปริมาณ 10 phr ทำให้ค่าความทนแรงฉีกขาดสูงที่สุด และเริ่มลดลงเรื่อยๆ ตั้งแต่ปริมาณตัวเติมที่ 20 phr เป็นต้นไปจนถึง 50 phr ซึ่งเป็นผลของความเข้ากันไม่ได้ของยางธรรมชาติกับตัวเติมชนิดต่างๆ แม้ว่าจะมีการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไดไซในปริมาณต่างๆ ก็ไม่ช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความทนแรงฉีกขาดให้เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของตัวเติมมีมากกว่าการเกิดอันตรกิริยาระหว่างยางกับตัวเติม



รูปที่ 4.42 กราฟความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.43 กราฟความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า



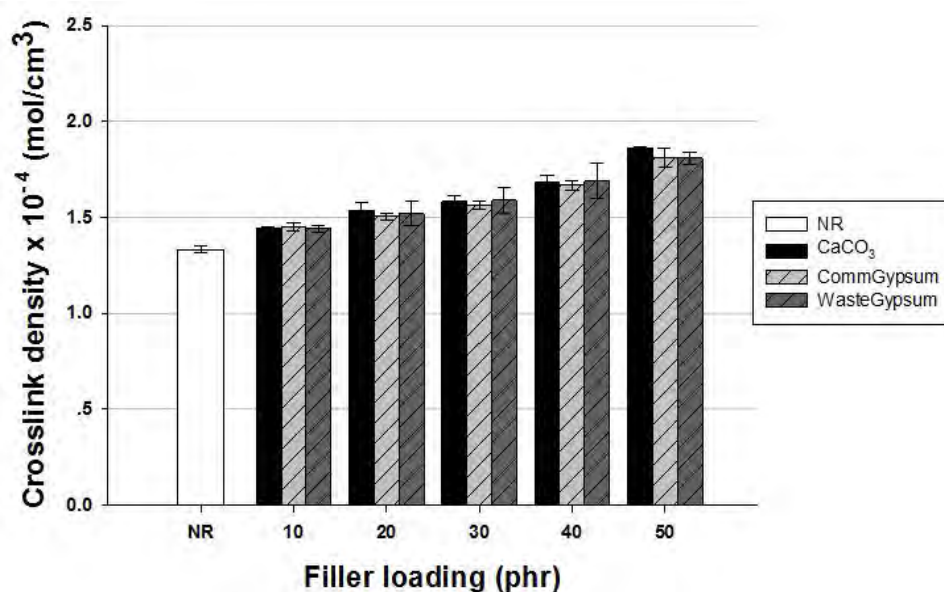
รูปที่ 4.44 กราฟความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง

4.5 ผลการทดสอบหาปริมาณพันธะเชื่อมขวางของยางคงรูป (crosslink density, η)

การเติมกำมะถันในยางธรรมชาติหรือที่เรียกว่ากระบวนการคงรูป (vulcanization) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยางโดยกำมะถัน ได้ยางที่มีโครงสร้างแบบเชื่อมโยง (crosslink) หรือร่างแห (network) ทำให้ยางเปลี่ยนสมบัติจากอ่อนนิ่ม เป็นยางที่มีสมบัติแข็งและเหนียวขึ้น เหมาะแก่การที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งจะศึกษาได้จากการบวมตัวของยางในน้ำมัน (ในที่นี้ใช้สารละลายโทลูอีน) หลังจากแช่ยางที่คงรูปแล้วตามสภาวะที่กำหนด จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density, η) โดยอาศัยสมการที่ (3.2) และ (3.3)

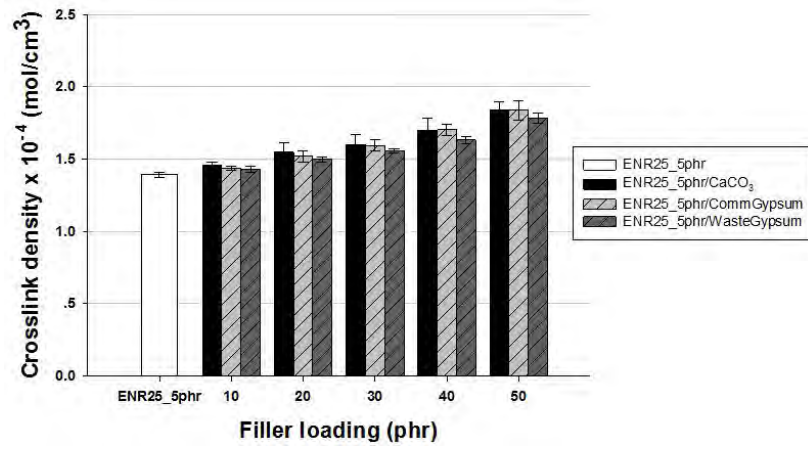
การทดสอบนี้เป็นการละลายสารเคมีต่างๆ ออกยกเว้นกำมะถันที่คงรูปกับยางธรรมชาติเป็นการหาความหนาแน่นหรือปริมาณพันธะเชื่อมขวางระหว่างยางธรรมชาติกับกำมะถัน และผลของการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซัลไฟด์ลงไปต่อความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวาง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.45 – 4.47

จากรูปที่ 4.45 แสดงค่าความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ/ตัวเติม ที่ไม่มีการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ พบว่าค่าความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณตัวเติมที่ใส่มีมากขึ้นและตัวเติมทั้งสามให้ผลที่ใกล้เคียงกัน เป็นผลมาจากปริมาณตัวเติมที่มีความเฉื่อยสูงอีกทั้งยังไม่มีหมู่ฟังก์ชันที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของสารละลายไทลลูอินได้

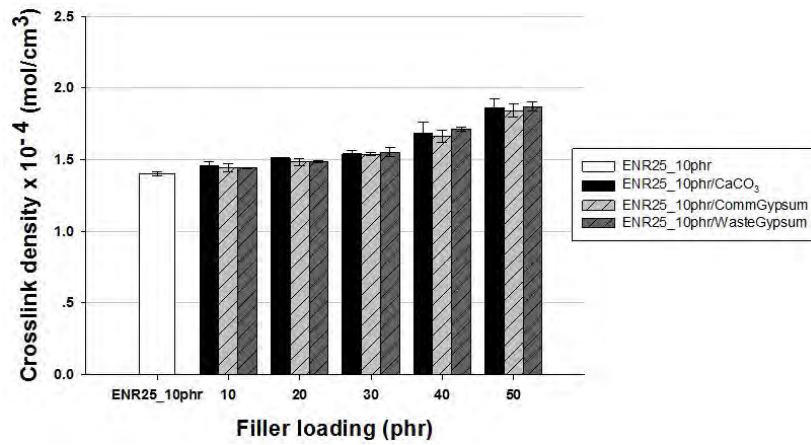


รูปที่ 4.45 ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ/ตัวเติม

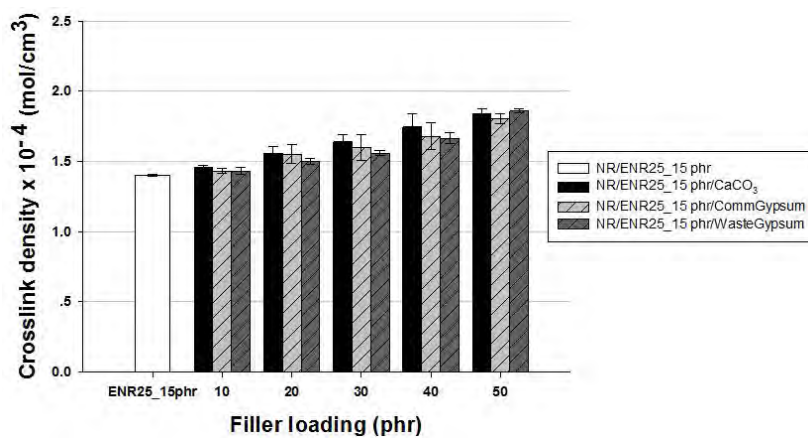
และจากรูปที่ 4.46 และ 4.47 เป็นการศึกษาผลของการใส่ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ทั้งที่มีหมู่อีพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ ร้อยละ 50 ในปริมาณ 5 10 และ 15 phr พบว่า ค่าความหนาแน่นปริมาณการเชื่อมขวางไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวเติมที่ใส่ลงไป เนื่องจากตัวเติมกับยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ไม่ค่อยเกิดอันตรกิริยาระหว่างกันมากเท่าใดนัก



(ก)

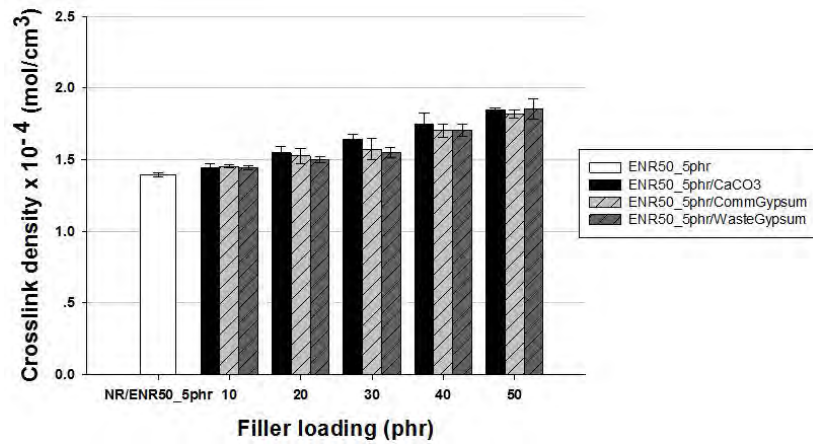


(ข)

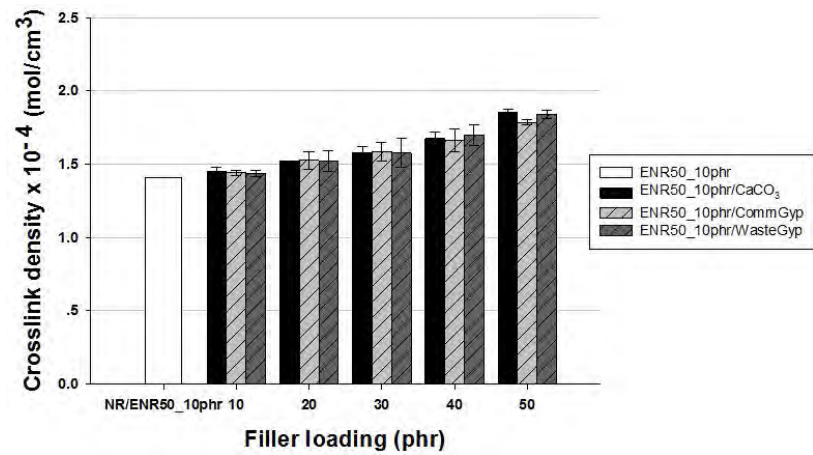


(ค)

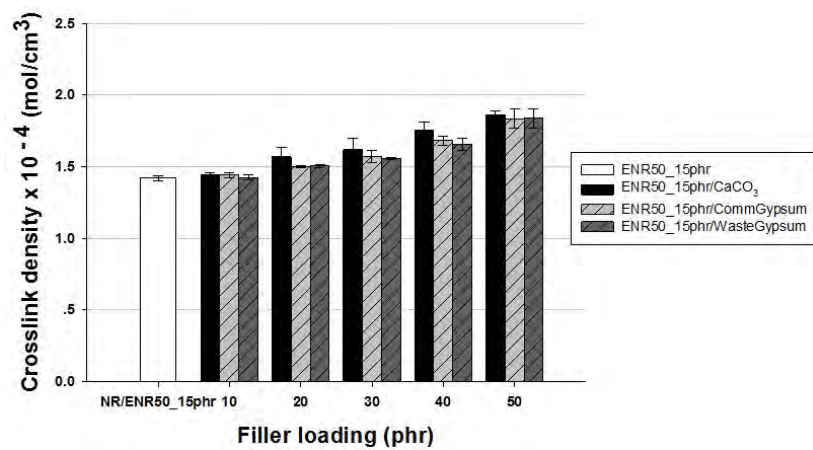
รูปที่ 4.46 ความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ/ตัวเติม ที่มีปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไดร์ร้อยละ 25 โดยโมลอยู่ (ก) 5 phr, (ข) 10 phr และ (ค) 15 phr



(ก)



(ข)



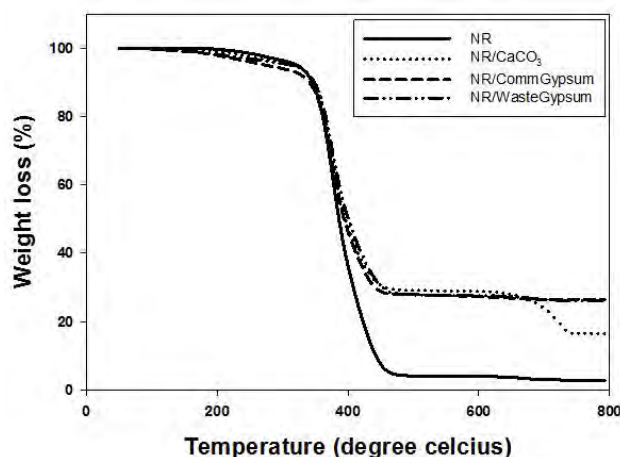
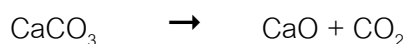
(ค)

รูปที่ 4.47 ความหนาแน่นพันธะเชื่อมขวางของยางธรรมชาติ/ตัวเติม ที่มีปริมาณยางธรรมชาติฟอกซีไดร์ร้อยละ 50 โดยโมลอยู่ (ก) 5 phr, (ข) 10 phr และ (ค) 15 phr

4.6 สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermal gravimetric analysis, TGA)

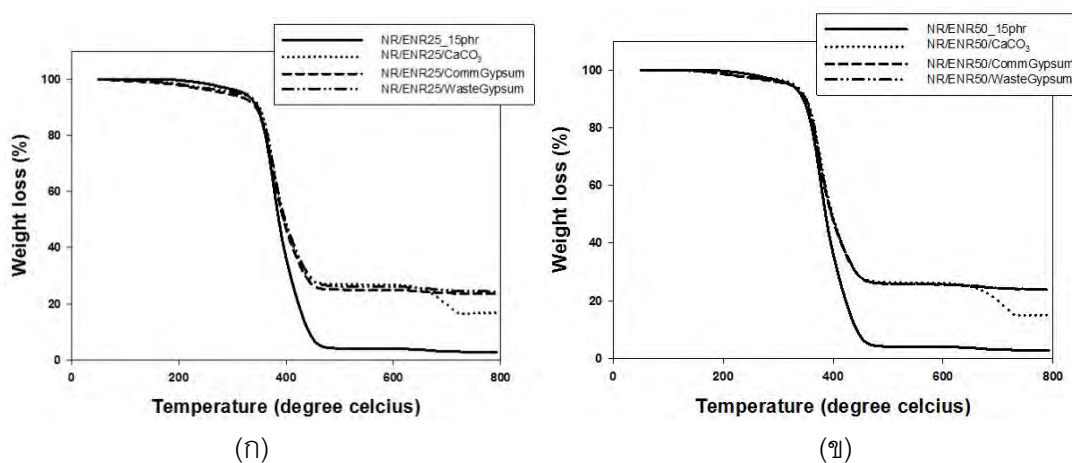
การทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักภายใต้ความร้อนด้วยเทคนิค TGA เป็นการหาอุณหภูมิการสลายตัวของยางผสม (degradation temperature, T_d) และความเข้ากันได้ของสารเคมีต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.48 ถึง 4.50

โดยรูปที่ 4.48 แสดงเทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ตัวเติมชนิดต่างๆ ที่ปริมาณ 40 phr พบว่าการเติมตัวเติมต่างๆ ลงไปไม่ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของยางผสมเปลี่ยนไป แต่ยังมีส่วนของสารที่หลงเหลือจากการทดสอบที่ปริมาณร้อยละ 20 – 30 ซึ่งเป็นปริมาณของตัวเติมที่ใส่ลงไปในยาง เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของตัวเติมแต่ละชนิดมีค่าสูงกว่า 1000 องศาเซลเซียส แต่ในกรณีของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต มีการสลายตัวครั้งที่สองเกิดขึ้นซึ่งเป็นอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงของแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



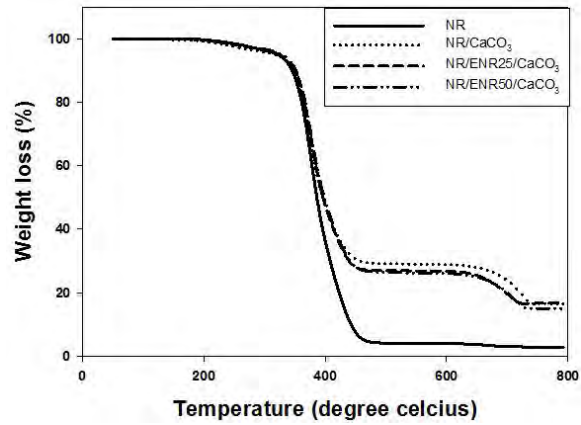
รูปที่ 4.48 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ตัวเติมชนิดต่างๆ

จากเทอร์โมแกรมในรูปที่ 4.49 เป็นการศึกษากการสลายตัวของตัวเติมด้วยความร้อนเมื่อมีการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ทั้งปริมาณอีพอกซีร้อยละ 25 และ 50 โดยโมลที่ปริมาณ 40 phr พบว่ายางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงภายใต้ความร้อนแต่อย่างใด เนื่องจากยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์สามารถเข้ากันได้กับยางธรรมชาติจึงไม่เกิดการแยกเฟส และยังคงให้ค่าอุณหภูมิเริ่มเกิดการสลายตัวและอุณหภูมิสิ้นสุดการสลายตัวที่ใกล้เคียงกับยางธรรมชาติดังแสดงในตารางที่ 4.1

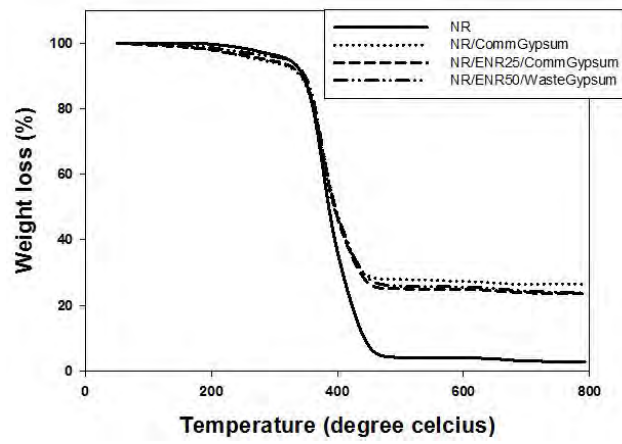


รูปที่ 4.49 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ตัวเติมที่ปริมาณยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ (ก) ร้อยละ 25 โดยโมลและ (ข) ร้อยละ 50 โดยโมล

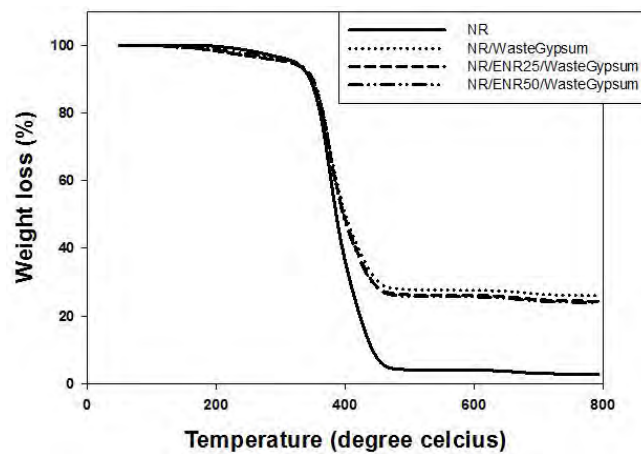
และเมื่อศึกษาผลของตัวเติมแต่ละชนิดที่ปริมาณ 40 phr ที่มีการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์ลงไปพบว่า ให้ผลเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ/ตัวเติม คือมีปริมาณเถ้า (char) หลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักชิ้นตัวอย่างทั้งหมด ซึ่งเป็นปริมาณตัวเติมอินทรีย์ที่มีอุณหภูมิการสลายตัวที่สูงมากเมื่อเทียบกับยางธรรมชาติคงรูป ส่วนในกรณีของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตพบว่าการสลายที่ 2 ครั้งดังแสดงในรูปที่ 4.50 (ก) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตไปเป็นแคลเซียมออกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีปริมาณเถ้าหลงเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักชิ้นตัวอย่างทั้งหมด



(ก)



(ข)



(ค)

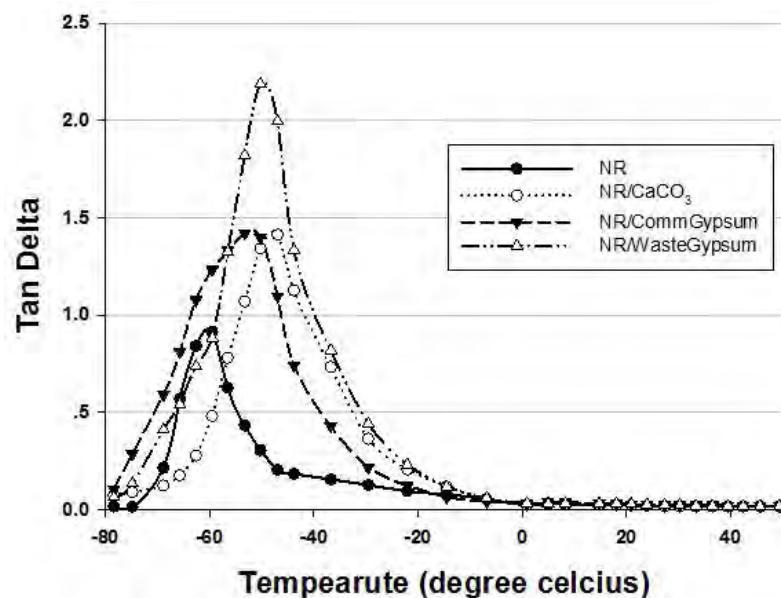
รูปที่ 4.50 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ตัวเติมแต่ละชนิด: (ก)แคลเซียมคาร์บอเนต
(ข) ยิปซัมการค้าและ (ค) ยิปซัมเหลือทิ้ง

ตารางที่ 4.2 คุณนหภูมิการสลายตัวของยางผสมที่สูตรต่างๆ

ยางผสมที่ปริมาณ ตัวเติม 40 phr	คุณนหภูมิเริ่มการ สลายตัวครั้งที่ 1 (องศาเซลเซียส)	คุณนหภูมิสิ้นสุด การสลายตัว ครั้งที่ 1 (องศาเซลเซียส)	คุณนหภูมิเริ่มการ สลายตัวครั้งที่ 2 (องศาเซลเซียส)	คุณนหภูมิสิ้นสุด การสลายตัว ครั้งที่ 2 (องศาเซลเซียส)
NR	343.61	428.21	-	-
NR/CaCO ₃	343.16	427.42	671.17	735.73
NR/Commercial gypsum	343.02	427.10	-	-
NR/Waste gypsum	344.10	428.40	-	-
NR/ENR25/CaCO ₃	343.56	427.53	655.12	722.70
NR/ENR25/Com- mercial gypsum	344.15	427.35	-	-
NR/ENR25/Waste gypsum	343.63	428.32	-	-
NR/ENR50/CaCO ₃	342.97	427.26	667.52	728.22
NR/ENR50/Com- mercial gypsum	343.28	432.48	-	-
NR/ENR50/Waste gypsum	342.63	427.28	-	-

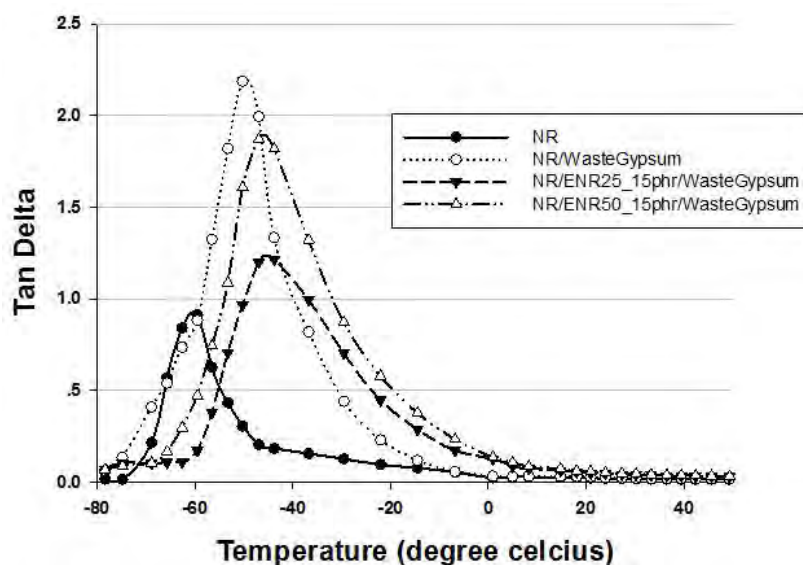
4.7 สมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical properties)

สมบัติเชิงกลพลวัตเป็นสมบัติเชิงกลอย่างหนึ่งของวัสดุที่มีการให้แรงเป็นรอบๆ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของวัสดุต่อแรงที่มากระทำ ซึ่งสามารถบอกอุณหภูมิกลาสทรานซิชันและอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติกับตัวเติมได้ ซึ่งจากรูปที่ 4.51 เป็นเทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ตัวเติมต่างๆ ที่ปริมาณ 40 phr พบว่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติ/ตัวเติมเลื่อนจาก -60 องศาเซลเซียสไปอยู่ที่ประมาณ -50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการที่สายโซ่โมเลกุลของยางถูกขัดขวางการเคลื่อนที่จากตัวเติมที่เป็นของแข็ง ทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนที่ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าแทนเดลตา (tangent delta) ของยางธรรมชาติที่ใส่แคลเซียมคาร์บอเนตกับยิปซัมการค้ำมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 1.4 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติมากกว่าตัวเติมยิปซัม แสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติเกิดอันตรกิริยากับตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตกับยิปซัมการค้ำได้มากกว่ายิปซัมเหลือทิ้ง จึงมีการเติมยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ลงไปเพื่อปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างเฟสทั้งสอง ซึ่งในรูปที่ 4.51 – 4.54 เป็นเทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ตัวเติมที่มีการใส่ยางธรรมชาติอีพอกซีไคซ์ที่ปริมาณสูงสุดคือ 15 phr เพื่อศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.51 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ตัวเติมต่างๆ ที่ปริมาณ 40 phr

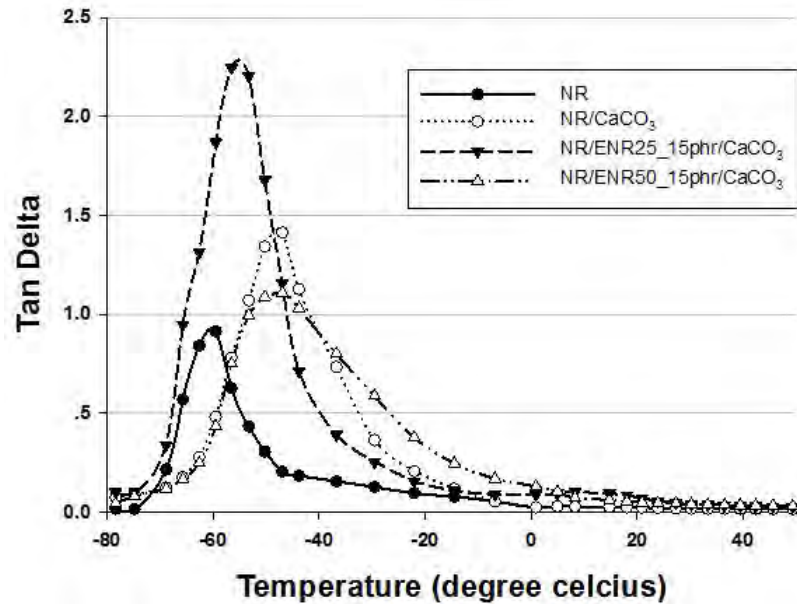
จากรูปที่ 4.52 เป็นเทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้งปริมาณ 40 phr ที่มีการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ปริมาณ 15 phr พบว่า tan delta มีค่าลดลงเนื่องจากยิปซัมเหลือทิ้งสามารถเกิดอันตรกิริยากับยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ในส่วนที่เป็นหมู่อิพอกซี เนื่องจากในยิปซัมเหลือทิ้งมีสิ่งเจือปนจากการหล่อแบบน้ำดินที่เรียกว่าสารกระจายลอยตัว (deflocculant) ซึ่งเป็นสารเติมแต่งทางเคมีที่เป็นพอลิเมอร์ประจุบวกทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สารเคมีคอลลอยด์จับตัวกันเป็นก้อนตกตะกอนออกมา ตัวอย่างเช่น อนุพันธ์เอрил-อัลคิลของกรดซัลฟูริก (aryl-alkyl derivative of sulfuric acid) ส่งผลทำให้หมู่อิพอกซีกับประจุบวกของสารดีฟลอคคูแลนต์เกิดอันตรกิริยากันได้มากขึ้น ทำให้ค่า tan delta ลดลง



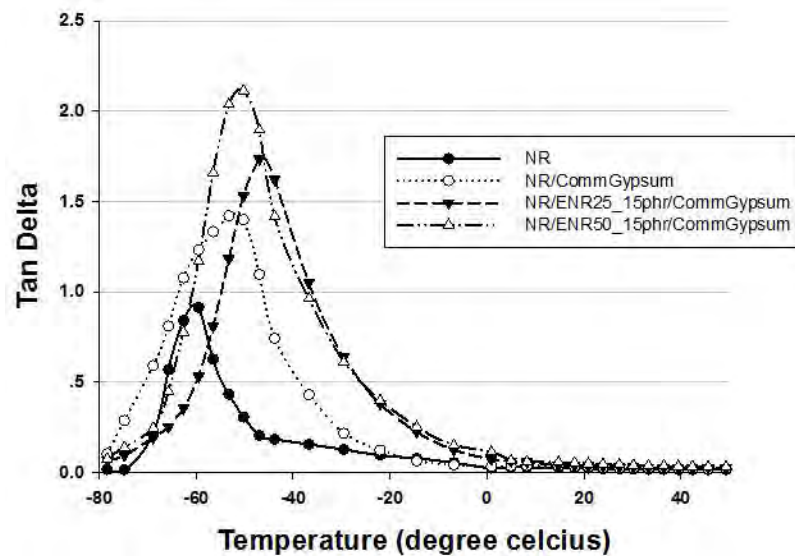
รูปที่ 4.52 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมล ปริมาณ 15 phr/ยิปซัมเหลือทิ้งที่ปริมาณ 40 phr

แต่ในส่วนของตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตและยิปซัมทางการค้าที่เติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.53 และ 4.54 พบว่าค่า tan delta ที่ได้กลับเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวเติมทั้งสองเป็นตัวเติมที่เฉื่อยต่อการเกิดอันตรกิริยา แม้ว่ายิปซัมการค้าจะมีเอกลักษณ์คล้ายกับยิปซัมเหลือทิ้ง แต่ยิปซัมการค้าไม่ได้ผ่านการนำไปขึ้นรูปและหล่อแบบมาก่อน จึงไม่มีการเจือปนของสารที่มีขั้ว ดังนั้นการเติมยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์จึงไม่ได้ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับตัวเติมเพิ่มขึ้นเท่าใดนักในกรณีของแคลเซียมคาร์บอเนตและไม่ได้ปรับปรุงอันตรกิริยาระหว่างยิปซัมกับ

ยางธรรมชาติ ในทางกลับกันการเติมยางธรรมชาติออกพิกซีไดซ์เป็นการเติมหมู่ที่มีขั้วลงไปทำให้เพิ่มความไม่เข้ากันระหว่างระบบให้เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.53 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมล ปริมาณ 15 phr/แคลเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณ 40 phr



รูปที่ 4.54 เทอร์โมแกรมของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ที่มีหมู่อิพอกซีอยู่ร้อยละ 25 และ 50 โดยโมล ปริมาณ 15 phr/ยิปซัมการค้าที่ปริมาณ 40 phr

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1. ยิปซัมที่ได้จากเศษแม่แบบพลาสติกที่หมดอายุการใช้งานแล้วสามารถนำมาใช้เป็นตัวเติมประเภทไม่เสริมในยางธรรมชาติได้ โดยให้ผลใกล้เคียงกับแคลเซียมคาร์บอเนตและยิปซัมการค้าซึ่งเป็นตัวเติมประเภทไม่เสริมแรงที่ใช้กันทั่วไปในยางธรรมชาติ
2. จากผลการทดสอบขนาดอนุภาคของตัวเติมแต่ละชนิดพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดอนุภาคเล็กที่สุด ตามมาด้วยยิปซัมการค้าและยิปซัมเหลือทิ้งตามลำดับ
3. การใช้ยิปซัมที่ได้จากเศษแม่แบบพลาสติกและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติมในยางธรรมชาติส่งผลให้ระยะเวลาการคงรูปของยางคอมพาวด์ลดลงตามปริมาณของตัวเติมที่ใส่เข้าไป แต่การใช้ยิปซัมทางการค้าไม่ส่งผลเท่าใดนัก
4. ยางคอมพาวด์ที่ใช้ยิปซัมที่ได้จากเศษแม่แบบพลาสติกเป็นตัวเติมมีดัชนีอัตราการคงรูปสูงกว่ายางคอมพาวด์ที่ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตหรือยิปซัมการค้าเป็นตัวเติม
5. การใช้ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์เป็นสารควบแน่นไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการคงรูปของยางธรรมชาติที่ใช้ยิปซัมเหลือทิ้ง ยิปซัมทางการค้า และแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติมมากนัก
6. การใช้ยิปซัมเหลือทิ้งและแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวเติมในยางธรรมชาติส่งผลให้ความทนแรงดึงและมอดูลัสเพิ่มขึ้นตามปริมาณของตัวเติมที่ใส่เข้าไป โดยยิปซัมการค้าสามารถเพิ่มความทนแรงดึงและมอดูลัสได้มากที่สุด รองลงมาคือยิปซัมเหลือทิ้งและแคลเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ ในขณะที่การใส่ตัวเติมนี้ทำให้ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง และเมื่อปริมาณของตัวเติมสูงกว่า 40 phr สมบัติด้านแรงดึงจะต่ำลง เนื่องจากตัวเติมเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน
7. การใส่ตัวเติมทำให้ความทนแรงฉีกขาดสูงขึ้นเมื่อใช้ปริมาณของตัวเติมไม่เกิน 10 phr
8. จากการวิเคราะห์น้ำหนักภายใต้ความร้อนพบว่าการใช้ตัวเติมและยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของชิ้นทดสอบยางธรรมชาติ

9. จากการทดสอบสมบัติเชิงกลพลวัต เมื่อมีการใช้ยางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์เป็นสารคู่ควบแม้ว่าจะไม่มีส่วนช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลเท่าใดนัก แต่สามารถชี้ให้เห็นว่ายางธรรมชาติอิพอกซีไคซ์ช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและตัวเติมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้สารดัดแปรเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและตัวเติม ยิปซัมเหลือทิ้ง รวมทั้งเพิ่มการกระจายตัว เพื่อให้สามารถใช้ตัวเติมในปริมาณมากขึ้นได้
2. ศึกษาการใช้ยิปซัมจากเศษแม่แบบพลาสติกอรีในการเสริมแรงกับยางประเภทอื่นๆ

รายการอ้างอิง

- [1] พงษ์ธร แซ่อู๋. ยาง: ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2537.
- [2] พงษ์ธร แซ่อู๋ และ ชาศริต สิริสิงห. ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ. ปทุมธานี: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2550.
- [3] เสาวนีย์ ก่ออุดมกุลรังษี. การผลิตยางธรรมชาติ (Natural Rubber Productions). พิมพ์ครั้งที่ 4, สงขลา: ภาควิชาเทคโนโลยียางและพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2547.
- [4] Kumar, Ch.S S.R., and Nijasure, A.M. Vulcanization of Rubber: How to Alter Molecular Structure and Influence Physical Properties. Resonance (April 1997): 55-59.
- [5] Dick, J.S. Rubber Technology: Compounding and Testing for Performance. OH, USA: Alpha Technologies, Akron, 2001.
- [6] Van, C.M. Rubber Chemicals (Revised and Enlarged Edition). Delft, Holland: Plastics and Rubber Research Institute TNO, 1973.
- [7] Jean, L.L. Rubber – filler interactions and rheological properties in filled compounds. Prog. Polym. Sci.27 (2002): 627-687.
- [8] Li, P. Y., Wang, L., Song, G. J., Yin, L. L., Qi, F., Sun, L. D., Characterization of high-performance exfoliated natural rubber/organoclay nanocomposites. J. Appl. Polym. Sci 109 (2008): 3831-3838.
- [9] Nengovhela, N. R., Strydom, C. A., Maree, J. P., Oosthuizen, S., Theron, D. J. Recovery of sulphur and calcium carbonate from waste gypsum. Water SA 33 (2007): 741-747.
- [10] Kowalska, E., Wielgosz, Z. The use of phosphogypsum as a filler for thermoplastics, part I: The use of phosphogypsum as a filler for polyolefine compositions. J. Reinf. Plast. Comp 21 (2002): 1013-1026.

- [11] Kowalska, E., Kawinska, B. The use of phosphogypsum as a filler for thermoplastics, part II: Phosphogypsum as a filler for polyamide 6 and for PVC. *J. Reinf. Plast. Comp* 21 (2002): 1043-1052.
- [12] Nakason, C., Kaesaman, A., Sainamsai, W., Kiatkamjonwong, S. Rheological behavior of reactive blending of epoxidized natural rubber with cassava starch and epoxidized natural rubber with natural rubber and cassava starch. *J. Appl. Polym. Sci.* 91 (2004): 1752-1762.
- [13] Arroyo, M., Lopez-Manchado, M. A., Valentin, J. L., Carretero, J. Morphology/behaviour relationship of nanocomposites based on natural rubber/epoxidized natural rubber blends. *Compos. Sci. Technol.* 67 (2007): 1330-1339.
- [14] Teh, P. L., Ishak, Z. A. M., Hashim, A. S., Karger-Kocsis, J., Ishiaku, U. S. Effects of epoxidized natural rubber as a compatibilizer in melt compounded natural rubber-organoclay nanocomposites. *Eur. Polym. J.* 40 (2004): 2513-2521.
- [15] Teh, P. L., Ishak, Z. A. M., Hashim, A. S., Karger-Kocsis, J., Ishiaku, U. S. On the potential of organoclay with respect to conventional fillers (carbon black, silica) for epoxidized natural rubber compatibilized natural rubber vulcanizates. *J. Appl. Polym. Sci.* 94 (2004): 2438-2445.
- [16] Flory PJ, editor. *Principles of polymer chemistry*. Ithaca (NY): Cornell University; 1953.
- [17] Akinlabi, A.K., Okieimen, F.E., Egharevba, F., Malomo, D. Investigation of the effect of mixing schemes on rheological and physico-mechanical properties of modified natural rubber blends. *Mater. Des.* 27 (2006): 783-788.
- [18] ASTM D 5289 – 95. *Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Rotorless Cure Meter*. ASTM International. PA, United States West: Conshohocken, 1995 (reapproved 2001).

- [19] James, E.M., Burak, E. and Frederick, R.E. The Science and Technology of Rubber. MA, USA: Elsevier Academic Press, 2005.
- [20] Dumbbell co.,ltd. Specimen ISO37 [ออนไลน์], 2554. แหล่งที่มา:
<http://www1.odn.ne.jp/aal63880/CUTTER01-E.htm> [2552, มีนาคม 5].
- [21] IDES Inc. tear strength specimen ISO 34 [ออนไลน์], 2554. แหล่งที่มา:
http://www.ides.com/property_descriptions/ISO34-1.asp [2552, มีนาคม 5].
- [22] Christopher, W.S. Raw Materials for Glass and Ceramics: Sources, Process, and Quality Control. New Jersey, US. 2006.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คุณลักษณะของยางคงรูป (cure characteristics) จากเครื่องวิเคราะห์ MDR

ตาราง ก – 1 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
NR STR5L	0.59	4.72	3.80	5.66	8.34	53.76
NR STR5L	0.61	4.88	3.78	5.45	7.70	59.88
NR STR5L	0.59	4.87	3.82	5.52	7.87	58.82
Average	0.60	4.82	3.80	5.54	7.97	57.49
SD	0.01	0.09	0.02	0.11	0.33	3.27

ตาราง ก - 2 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
NR/CaCO3_10phr	0.65	5.38	3.36	5.07	7.49	58.48
NR/CaCO3_10phr	0.65	5.38	3.37	5.08	7.40	58.48
NR/CaCO3_10phr	0.68	5.41	3.33	5.04	7.19	58.48
average	0.66	5.39	3.35	5.06	7.36	58.48
SD	0.02	0.02	0.02	0.02	0.15	0.00
NR/CaCO3_20phr	0.73	5.78	3.27	4.95	7.47	59.52
NR/CaCO3_20phr	0.75	5.72	3.22	4.91	6.86	59.17
NR/CaCO3_20phr	0.74	5.74	3.27	4.90	7.23	61.35
average	0.74	5.75	3.25	4.92	7.19	60.02
SD	0.01	0.03	0.03	0.03	0.31	1.17
NR/CaCO3_30phr	0.81	6.49	3.16	4.93	7.09	56.50
NR/CaCO3_30phr	0.80	6.48	3.08	4.80	7.14	58.14
NR/CaCO3_30phr	0.79	6.44	3.18	4.89	7.21	58.48
average	0.80	6.47	3.14	4.87	7.15	57.71
SD	0.01	0.03	0.05	0.07	0.06	1.06
NR/CaCO3_40phr	0.85	7.13	2.93	4.66	6.75	57.80
NR/CaCO3_40phr	0.83	7.14	2.90	4.60	6.72	58.82
NR/CaCO3_40phr	0.86	7.19	2.90	4.63	6.79	57.80
average	0.85	7.15	2.91	4.63	6.75	58.14
SD	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.59
NR/CaCO3_50phr	0.88	7.47	2.89	4.65	6.80	56.82
NR/CaCO3_50phr	0.87	7.51	2.91	4.63	6.96	58.14
NR/CaCO3_50phr	0.89	7.56	2.81	4.58	6.74	56.50
average	0.88	7.51	2.87	4.62	6.83	57.15
SD	0.01	0.05	0.05	0.04	0.11	0.87

ตาราง ก - 3 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมทางการค้า

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
NR/gypcomm_10phr	0.65	5.33	3.63	5.54	8.21	52.36
NR/gypcomm_10phr	0.68	5.37	3.61	5.50	8.17	52.91
NR/gypcomm_10phr	0.67	5.38	3.64	5.49	7.71	54.05
average	0.67	5.36	3.63	5.51	8.03	53.11
SD	0.02	0.03	0.02	0.03	0.28	0.87
NR/gypcomm_20phr	0.75	5.94	3.55	5.46	7.92	52.36
NR/gypcomm_20phr	0.76	5.93	3.67	5.51	8.28	54.35
NR/gypcomm_20phr	0.76	5.93	3.56	5.37	7.92	55.25
average	0.76	5.93	3.59	5.45	8.04	53.98
SD	0.01	0.01	0.07	0.07	0.21	1.48
NR/gypcomm_30phr	0.80	6.59	3.37	5.34	7.67	50.76
NR/gypcomm_30phr	0.77	6.52	3.44	5.33	7.56	52.91
NR/gypcomm_30phr	0.82	6.55	3.39	5.29	7.56	52.63
average	0.80	6.55	3.40	5.32	7.60	52.10
SD	0.03	0.04	0.04	0.03	0.06	1.17
NR/gypcomm_40phr	0.89	7.07	3.41	5.33	8.07	52.08
NR/gypcomm_40phr	0.88	7.03	3.45	5.23	8.29	56.18
NR/gypcomm_40phr	0.92	7.10	3.43	5.28	7.87	54.05
average	0.90	7.07	3.43	5.28	8.08	54.11
SD	0.02	0.04	0.02	0.05	0.21	2.05
NR/gypcomm_50phr	0.96	7.65	3.34	5.18	7.85	54.35
NR/gypcomm_50phr	0.96	7.55	3.16	5.20	8.10	49.02
NR/gypcomm_50phr	0.92	7.52	3.23	5.25	7.90	49.50
average	0.95	7.57	3.24	5.21	7.95	50.96
SD	0.02	0.07	0.09	0.04	0.13	2.95

ตาราง ก - 4 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
NR/wastegypsum_10phr	0.64	5.32	2.39	3.86	5.61	68.03
NR/wastegypsum_10phr	0.63	5.31	2.41	3.91	5.41	66.67
NR/wastegypsum_10phr	0.62	5.32	2.38	3.84	5.43	68.49
average	0.63	5.32	2.39	3.87	5.48	67.73
SD	0.01	0.01	0.02	0.04	0.11	0.95
NR/wastegypsum_20phr	0.64	5.70	2.10	3.47	4.99	72.99
NR/wastegypsum_20phr	0.66	5.79	2.11	3.56	5.27	68.97
NR/wastegypsum_20phr	0.66	5.74	2.10	3.50	5.09	71.43
average	0.65	5.74	2.10	3.51	5.12	71.13
SD	0.01	0.05	0.01	0.05	0.14	2.03
NR/wastegypsum_30phr	0.68	6.27	2.07	3.53	5.31	68.49
NR/wastegypsum_30phr	0.68	6.28	2.07	3.54	5.25	68.03
NR/wastegypsum_30phr	0.66	6.28	2.08	3.64	5.23	64.10
average	0.67	6.28	2.07	3.57	5.26	66.87
SD	0.01	0.01	0.01	0.06	0.04	2.41
NR/wastegypsum_40phr	0.71	6.64	2.03	3.50	5.07	68.03
NR/wastegypsum_40phr	0.71	6.62	2.03	3.50	5.21	68.03
NR/wastegypsum_40phr	0.72	6.60	2.04	3.48	5.13	69.44
average	0.71	6.62	2.03	3.49	5.14	68.50
SD	0.01	0.02	0.01	0.01	0.07	0.82
NR/wastegypsum_50phr	0.70	7.13	1.97	3.43	5.10	68.49
NR/wastegypsum_50phr	0.70	7.04	1.98	3.38	4.91	71.43
NR/wastegypsum_50phr	0.71	7.07	1.99	3.43	5.05	69.44
average	0.70	7.08	1.98	3.41	5.02	69.79
SD	0.01	0.05	0.01	0.03	0.10	1.50

ตาราง ก - 5 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/แคลเซียมคาร์บอเนต

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR25/5_CaCO3_10/1	0.58	5.20	3.30	5.09	7.77	55.87
ENR25/5_CaCO3_10/2	0.60	5.42	3.34	5.02	7.27	59.52
ENR25/5_CaCO3_10/3	0.60	5.37	3.36	4.99	7.16	61.35
average	0.59	5.33	3.33	5.03	7.40	58.91
SD	0.01	0.12	0.03	0.05	0.33	2.79
ENR25/5_CaCO3_20/1	0.58	5.79	3.22	4.91	7.09	59.17
ENR25/5_CaCO3_20/2	0.59	5.76	3.26	4.96	7.12	58.82
ENR25/5_CaCO3_20/3	0.57	5.79	3.28	5.03	7.25	57.14
average	0.58	5.78	3.25	4.97	7.15	58.38
SD	0.01	0.02	0.03	0.06	0.09	1.08
ENR25/5_CaCO3_30/1	0.66	6.25	3.07	4.84	7.33	56.50
ENR25/5_CaCO3_30/2	0.64	6.21	2.98	4.64	6.93	60.24
ENR25/5_CaCO3_30/3	0.67	6.22	3.03	4.76	6.90	57.80
average	0.66	6.23	3.03	4.75	7.05	58.18
SD	0.02	0.02	0.05	0.10	0.24	1.90
ENR25/5_CaCO3_40/1	0.69	6.87	2.79	4.50	6.68	58.48
ENR25/5_CaCO3_40/2	0.70	6.91	2.83	4.55	6.97	58.14
ENR25/5_CaCO3_40/3	0.71	6.83	2.88	4.52	6.89	60.98
average	0.70	6.87	2.83	4.52	6.85	59.20
SD	0.01	0.04	0.05	0.03	0.15	1.55
ENR25/5_CaCO3_50/1	0.74	7.46	2.80	4.52	6.85	58.14
ENR25/5_CaCO3_50/2	0.72	7.30	2.86	4.53	6.77	59.88
ENR25/5_CaCO3_50/3	0.76	7.41	2.75	4.49	6.61	57.47
average	0.74	7.39	2.80	4.51	6.74	58.50
SD	0.02	0.08	0.06	0.02	0.12	1.24

ตาราง ก – 5 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/แคลเซียมคาร์บอเนต (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR25/10_CaCO3_10/1	0.64	5.32	3.31	5.01	6.89	58.82
ENR25/10_CaCO3_10/2	0.63	5.34	3.33	5.11	6.65	56.18
ENR25/10_CaCO3_10/3	0.64	5.33	3.33	5.09	6.39	56.82
average	0.64	5.33	3.32	5.07	6.64	57.27
SD	0.01	0.01	0.01	0.05	0.25	1.38
ENR25/10_CaCO3_20/1	0.67	6.03	3.24	4.88	7.38	60.98
ENR25/10_CaCO3_20/2	0.68	6.06	3.13	4.99	7.24	53.76
ENR25/10_CaCO3_20/3	0.67	5.99	3.05	4.85	7.36	55.56
average	0.67	6.03	3.14	4.91	7.33	56.76
SD	0.01	0.04	0.10	0.07	0.08	3.76
ENR25/10_CaCO3_30/1	0.69	6.17	2.88	4.76	6.24	53.19
ENR25/10_CaCO3_30/2	0.69	5.85	2.90	4.74	7.39	54.35
ENR25/10_CaCO3_30/3	0.71	6.12	2.95	4.80	6.53	54.05
average	0.70	6.05	2.91	4.77	6.72	53.86
SD	0.01	0.17	0.04	0.03	0.60	0.60
ENR25/10_CaCO3_40/1	0.67	6.53	2.71	4.65	6.33	51.55
ENR25/10_CaCO3_40/2	0.69	6.57	2.75	4.63	6.51	53.19
ENR25/10_CaCO3_40/3	0.72	6.73	2.77	4.67	5.84	52.63
average	0.69	6.61	2.74	4.65	6.23	52.46
SD	0.03	0.11	0.03	0.02	0.35	0.84
ENR25/10_CaCO3_50/1	0.74	7.05	2.64	4.54	6.17	52.63
ENR25/10_CaCO3_50/2	0.74	7.11	2.65	4.35	6.10	58.82
ENR25/10_CaCO3_50/3	0.72	6.94	2.50	4.48	5.87	50.51
average	0.73	7.03	2.60	4.46	6.05	53.99
SD	0.01	0.09	0.08	0.10	0.16	4.32

ตาราง ก - 5 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/แคลเซียมคาร์บอเนต (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR25/15_CaCO3_10/1	0.50	5.05	3.12	5.03	6.38	52.36
ENR25/15_CaCO3_10/2	0.52	5.14	3.22	5.10	6.51	53.19
ENR25/15_CaCO3_10/3	0.50	5.08	3.26	5.07	6.91	55.25
average	0.51	5.09	3.20	5.07	6.60	53.60
SD	0.01	0.05	0.07	0.04	0.28	1.49
ENR25/15_CaCO3_20/1	0.58	5.54	3.12	4.89	6.26	56.50
ENR25/15_CaCO3_20/2	0.59	5.58	3.10	4.83	6.31	57.80
ENR25/15_CaCO3_20/3	0.57	5.56	3.07	4.93	6.26	53.76
average	0.58	5.56	3.10	4.88	6.28	56.02
SD	0.01	0.02	0.03	0.05	0.03	2.06
ENR25/15_CaCO3_30/1	0.65	5.95	2.89	4.76	6.03	53.48
ENR25/15_CaCO3_30/2	0.65	5.93	2.87	4.81	6.05	51.55
ENR25/15_CaCO3_30/3	0.65	5.88	2.85	4.83	5.96	50.51
average	0.65	5.92	2.87	4.80	6.01	51.84
SD	0.00	0.04	0.02	0.04	0.05	1.51
ENR25/15_CaCO3_40/1	0.70	6.25	2.77	4.69	6.08	52.08
ENR25/15_CaCO3_40/2	0.68	6.24	2.73	4.67	6.30	51.55
ENR25/15_CaCO3_40/3	0.70	6.24	2.77	4.61	6.11	54.35
average	0.69	6.24	2.76	4.66	6.16	52.66
SD	0.01	0.01	0.02	0.04	0.12	1.49
ENR25/15_CaCO3_50/1	0.66	6.56	2.69	4.55	5.98	53.76
ENR25/15_CaCO3_50/2	0.65	6.63	2.65	4.61	5.93	51.02
ENR25/15_CaCO3_50/3	0.66	6.66	2.67	4.69	6.11	49.50
average	0.66	6.62	2.67	4.62	6.01	51.43
SD	0.01	0.05	0.02	0.07	0.09	2.16

ตาราง ก - 5 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/แคลเซียมคาร์บอเนต (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR50/5_CaCO3_10/1	0.67	5.36	3.30	5.04	6.61	57.47
ENR50/5_CaCO3_10/2	0.66	5.44	3.37	5.02	6.82	60.61
ENR50/5_CaCO3_10/3	0.66	5.41	3.35	4.99	6.42	60.98
average	0.66	5.40	3.34	5.02	6.62	59.68
SD	0.01	0.04	0.04	0.03	0.20	1.93
ENR50/5_CaCO3_20/1	0.66	5.44	3.14	4.87	6.68	57.80
ENR50/5_CaCO3_20/2	0.69	5.47	3.15	4.96	6.69	55.25
ENR50/5_CaCO3_20/3	0.69	5.52	3.23	4.99	6.55	56.82
average	0.68	5.48	3.17	4.94	6.64	56.62
SD	0.02	0.04	0.05	0.06	0.08	1.29
ENR50/5_CaCO3_30/1	0.70	6.09	3.03	4.81	6.72	56.18
ENR50/5_CaCO3_30/2	0.70	6.13	3.06	4.76	6.65	58.82
ENR50/5_CaCO3_30/3	0.71	6.18	3.07	4.78	6.19	58.48
average	0.70	6.13	3.05	4.78	6.52	57.83
SD	0.01	0.05	0.02	0.03	0.29	1.44
ENR50/5_CaCO3_40/1	0.76	6.85	2.83	4.60	6.17	56.50
ENR50/5_CaCO3_40/2	0.75	6.83	2.85	4.53	6.26	59.52
ENR50/5_CaCO3_40/3	0.75	6.83	2.83	4.52	6.16	59.17
average	0.75	6.84	2.84	4.55	6.20	58.40
SD	0.01	0.01	0.01	0.04	0.06	1.66
ENR50/5_CaCO3_50/1	0.81	7.31	2.69	4.50	6.30	55.25
ENR50/5_CaCO3_50/2	0.80	7.29	2.76	4.50	6.61	57.47
ENR50/5_CaCO3_50/3	0.79	7.35	2.66	4.46	6.30	55.56
average	0.80	7.32	2.70	4.49	6.40	56.09
SD	0.01	0.03	0.05	0.02	0.18	1.20

ตาราง ก – 5 คุณลักษณะของยางคงรูป ของยางธรรมชาติ/ENR/แคลเซียมคาร์บอเนต (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR50/10_CaCO3_10/1	0.62	5.09	3.22	5.01	5.99	55.87
ENR50/10_CaCO3_10/2	0.60	5.06	3.31	5.07	6.08	56.82
ENR50/10_CaCO3_10/3	0.63	5.04	3.29	5.03	6.29	57.47
average	0.62	5.06	3.27	5.04	6.12	56.72
SD	0.02	0.03	0.05	0.03	0.15	0.81
ENR50/10_CaCO3_20/1	0.67	5.73	3.14	4.92	6.60	56.18
ENR50/10_CaCO3_20/2	0.69	5.71	3.12	4.99	6.36	53.48
ENR50/10_CaCO3_20/3	0.68	5.71	3.18	4.85	5.99	59.88
average	0.68	5.72	3.15	4.92	6.32	56.51
SD	0.01	0.01	0.03	0.07	0.31	3.22
ENR50/10_CaCO3_30/1	0.71	6.17	3.05	4.88	5.92	54.64
ENR50/10_CaCO3_30/2	0.72	6.10	3.10	4.84	6.17	57.47
ENR50/10_CaCO3_30/3	0.74	6.15	3.01	4.80	6.26	55.87
average	0.72	6.14	3.05	4.84	6.12	55.99
SD	0.02	0.04	0.05	0.04	0.18	1.42
ENR50/10_CaCO3_40/1	0.74	6.49	2.89	4.65	6.10	56.82
ENR50/10_CaCO3_40/2	0.72	6.48	2.91	4.70	5.88	55.87
ENR50/10_CaCO3_40/3	0.75	6.51	2.86	4.67	6.03	55.25
average	0.74	6.49	2.89	4.67	6.00	55.98
SD	0.02	0.02	0.03	0.03	0.11	0.79
ENR50/10_CaCO3_50/1	0.77	6.98	2.75	4.60	5.79	54.05
ENR50/10_CaCO3_50/2	0.79	7.04	2.68	4.57	6.24	52.91
ENR50/10_CaCO3_50/3	0.79	7.07	2.73	4.48	5.98	57.14
average	0.78	7.03	2.72	4.55	6.00	54.70
SD	0.01	0.05	0.04	0.06	0.23	2.19

ตาราง ก – 5 คุณลักษณะของยางคงรูป ของยางธรรมชาติ/ENR/แคลเซียมคาร์บอเนต (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR50/15_CaCO3_10/1	0.64	5.20	3.26	5.03	6.01	56.50
ENR50/15_CaCO3_10/2	0.64	5.14	3.19	5.10	6.30	52.36
ENR50/15_CaCO3_10/3	0.65	5.21	3.22	5.07	6.39	54.05
average	0.64	5.18	3.22	5.07	6.23	54.30
SD	0.01	0.04	0.04	0.04	0.20	2.08
ENR50/15_CaCO3_20/1	0.69	5.46	3.15	4.87	6.76	58.14
ENR50/15_CaCO3_20/2	0.70	5.51	3.11	4.83	6.08	58.14
ENR50/15_CaCO3_20/3	0.70	5.60	3.17	4.94	6.21	56.50
average	0.70	5.52	3.14	4.88	6.35	57.59
SD	0.01	0.07	0.03	0.06	0.36	0.95
ENR50/15_CaCO3_30/1	0.70	5.83	3.02	4.80	5.90	56.18
ENR50/15_CaCO3_30/2	0.72	5.82	3.08	4.81	5.92	57.80
ENR50/15_CaCO3_30/3	0.71	5.84	3.00	4.83	5.91	54.64
average	0.71	5.83	3.03	4.81	5.91	56.21
SD	0.01	0.01	0.04	0.02	0.01	1.58
ENR50/15_CaCO3_40/1	0.75	6.48	2.92	4.75	5.58	54.64
ENR50/15_CaCO3_40/2	0.73	6.42	2.85	4.78	5.89	51.81
ENR50/15_CaCO3_40/3	0.74	6.46	2.79	4.71	5.63	52.08
average	0.74	6.45	2.85	4.75	5.70	52.85
SD	0.01	0.03	0.07	0.04	0.17	1.56
ENR50/15_CaCO3_50/1	0.80	6.74	2.74	4.60	5.50	53.76
ENR50/15_CaCO3_50/2	0.78	6.80	2.82	4.58	5.74	56.82
ENR50/15_CaCO3_50/3	0.79	6.76	2.79	4.67	5.75	53.19
average	0.79	6.77	2.78	4.62	5.66	54.59
SD	0.01	0.03	0.04	0.05	0.14	1.95

ตาราง ก - 6 คุณลักษณะของยางคงรูป ของยางธรรมชาติ/ENR/ยิปซัมทางการค้า

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR25/5_commgyp10/1	0.58	5.17	3.50	5.53	8.09	49.26
ENR25/5_commgyp10/2	0.56	5.16	3.60	5.51	7.42	52.36
ENR25/5_commgyp10/3	0.49	5.36	3.56	5.49	7.19	51.81
Average	0.54	5.23	3.55	5.51	7.57	51.14
SD	0.05	0.11	0.05	0.02	0.47	1.65
ENR25/5_commgyp20/1	0.70	5.81	3.45	5.44	7.10	50.25
ENR25/5_commgyp20/2	0.70	5.79	3.50	5.50	7.09	50.00
ENR25/5_commgyp20/3	0.70	5.80	3.55	5.48	6.96	51.81
Average	0.70	5.80	3.50	5.47	7.05	50.69
SD	0.00	0.01	0.05	0.03	0.08	0.98
ENR25/5_commgyp30/1	0.71	6.18	3.35	5.32	7.07	50.76
ENR25/5_commgyp30/2	0.70	6.20	3.40	5.31	6.89	52.36
ENR25/5_commgyp30/3	0.72	6.25	3.37	5.29	7.43	52.08
Average	0.71	6.21	3.37	5.31	7.13	51.73
SD	0.01	0.04	0.03	0.02	0.27	0.85
ENR25/5_commgyp40/1	0.85	6.92	3.31	5.34	7.49	49.26
ENR25/5_commgyp40/2	0.82	6.88	3.35	5.25	7.43	52.63
ENR25/5_commgyp40/3	0.84	6.92	3.23	5.21	7.82	50.51
Average	0.84	6.91	3.30	5.27	7.58	50.80
SD	0.02	0.02	0.06	0.07	0.21	1.70
ENR25/5_commgyp50/1	0.87	7.41	3.25	5.11	7.36	53.76
ENR25/5_commgyp50/2	0.88	7.40	3.23	5.27	7.56	49.02
ENR25/5_commgyp50/3	0.85	7.36	3.11	5.16	7.37	48.78
Average	0.87	7.39	3.20	5.18	7.43	50.52
SD	0.02	0.03	0.08	0.08	0.11	2.81

ตาราง ก - 6 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/ยิปซัมทางการค้า (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR25/10_commgyp10/1	0.64	5.23	3.49	5.50	6.81	49.75
ENR25/10_commgyp10/2	0.66	5.23	3.49	5.49	6.74	50.00
ENR25/10_commgyp10/3	0.67	5.23	3.56	5.44	6.86	53.19
Average	0.66	5.23	3.51	5.48	6.80	50.98
SD	0.02	0.00	0.04	0.03	0.06	1.92
ENR25/10_commgyp20/1	0.64	5.53	3.41	5.37	7.35	51.02
ENR25/10_commgyp20/2	0.63	5.51	3.45	5.43	7.31	50.51
ENR25/10_commgyp20/3	0.65	5.54	3.38	5.45	7.81	48.31
Average	0.64	5.53	3.41	5.42	7.49	49.94
SD	0.01	0.02	0.04	0.04	0.28	1.44
ENR25/10_commgyp30/1	0.73	6.03	3.37	5.33	7.51	51.02
ENR25/10_commgyp30/2	0.73	6.02	3.35	5.33	7.05	50.51
ENR25/10_commgyp30/3	0.74	6.05	3.39	5.28	7.28	52.91
Average	0.73	6.03	3.37	5.31	7.28	51.48
SD	0.01	0.02	0.02	0.03	0.23	1.27
ENR25/10_commgyp40/1	0.82	6.37	3.28	5.30	6.45	49.50
ENR25/10_commgyp40/2	0.82	6.40	3.31	5.27	6.61	51.02
ENR25/10_commgyp40/3	0.83	6.44	3.34	5.25	6.51	52.36
Average	0.82	6.40	3.31	5.27	6.52	50.96
SD	0.01	0.04	0.03	0.03	0.08	1.43
ENR25/10_commgyp50/1	0.85	6.59	3.23	5.25	5.84	49.50
ENR25/10_commgyp50/2	0.87	6.63	3.18	5.20	5.92	49.50
ENR25/10_commgyp50/3	0.87	6.67	3.23	5.16	5.83	51.81
Average	0.86	6.63	3.21	5.20	5.86	50.27
SD	0.01	0.04	0.03	0.05	0.05	1.33

ตาราง ก - 6 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/อีปซีมทางการค้า (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR25/15_commgyp10/1	0.64	4.92	3.52	5.49	7.17	50.76
ENR25/15_commgyp10/2	0.66	5.05	3.54	5.41	6.84	53.48
ENR25/15_commgyp10/3	0.62	5.10	3.45	5.47	6.54	49.50
Average	0.64	5.02	3.50	5.46	6.85	51.25
SD	0.02	0.09	0.05	0.04	0.32	2.03
ENR25/15_commgyp20/1	0.73	5.43	3.30	5.40	6.95	47.62
ENR25/15_commgyp20/2	0.72	5.46	3.29	5.35	6.84	48.54
ENR25/15_commgyp20/3	0.71	5.47	3.35	5.37	7.04	49.50
Average	0.72	5.45	3.31	5.37	6.94	48.56
SD	0.01	0.02	0.03	0.03	0.10	0.94
ENR25/15_commgyp30/1	0.76	5.87	3.28	5.29	6.83	49.75
ENR25/15_commgyp30/2	0.75	5.79	3.26	5.33	7.38	48.31
ENR25/15_commgyp30/3	0.75	5.81	3.29	5.30	7.19	49.75
Average	0.75	5.82	3.28	5.31	7.13	49.27
SD	0.01	0.04	0.02	0.02	0.28	0.83
ENR25/15_commgyp40/1	0.79	6.20	3.22	5.22	7.00	50.00
ENR25/15_commgyp40/2	0.77	6.18	3.24	5.27	6.88	49.26
ENR25/15_commgyp40/3	0.78	6.20	3.25	5.30	6.97	48.78
Average	0.78	6.19	3.24	5.26	6.95	49.35
SD	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.61
ENR25/15_commgyp50/1	0.87	6.56	3.16	5.15	6.98	50.25
ENR25/15_commgyp50/2	0.85	6.66	3.24	5.20	7.22	51.02
ENR25/15_commgyp50/3	0.86	6.61	3.10	5.21	7.73	47.39
Average	0.86	6.61	3.17	5.19	7.31	49.56
SD	0.01	0.05	0.07	0.03	0.38	1.91

ตาราง ก - 6 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/อีปซีมทางการค้า (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR50/5_commgyp10/1	0.68	5.42	3.55	5.50	6.85	51.28
ENR50/5_commgyp10/2	0.70	5.42	3.47	5.51	6.97	49.02
ENR50/5_commgyp10/3	0.70	5.41	3.56	5.50	6.47	51.55
Average	0.69	5.42	3.53	5.50	6.76	50.62
SD	0.01	0.01	0.05	0.01	0.26	1.39
ENR50/5_commgyp20/1	0.72	5.87	3.43	5.45	7.02	49.50
ENR50/5_commgyp20/2	0.73	5.84	3.41	5.39	6.68	50.51
ENR50/5_commgyp20/3	0.73	5.66	3.44	5.44	7.48	50.00
Average	0.73	5.79	3.43	5.43	7.06	50.00
SD	0.01	0.11	0.02	0.03	0.40	0.50
ENR50/5_commgyp30/1	0.80	6.31	3.37	5.30	7.13	51.81
ENR50/5_commgyp30/2	0.79	6.32	3.34	5.33	7.51	50.25
ENR50/5_commgyp30/3	0.81	6.40	3.39	5.29	7.42	52.63
Average	0.80	6.34	3.37	5.31	7.35	51.57
SD	0.01	0.05	0.03	0.02	0.20	1.21
ENR50/5_commgyp40/1	0.85	6.93	3.31	5.21	7.40	52.63
ENR50/5_commgyp40/2	0.85	6.94	3.35	5.28	7.38	51.81
ENR50/5_commgyp40/3	0.85	6.93	3.33	5.26	7.23	51.81
Average	0.85	6.93	3.33	5.25	7.34	52.09
SD	0.00	0.01	0.02	0.04	0.09	0.47
ENR50/5_commgyp50/1	0.79	7.42	3.20	5.20	6.29	50.00
ENR50/5_commgyp50/2	0.80	7.54	3.16	5.26	6.85	47.62
ENR50/5_commgyp50/3	0.79	7.44	3.18	5.13	6.52	51.28
Average	0.79	7.47	3.18	5.20	6.55	49.63
SD	0.01	0.06	0.02	0.07	0.28	1.86

ตาราง ก - 6 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/อีปซีมทางการค้า (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR50/10_commgyp10/1	0.62	5.21	3.50	5.43	6.24	51.81
ENR50/10_commgyp10/2	0.60	5.22	3.46	5.37	6.47	52.36
ENR50/10_commgyp10/3	0.61	5.16	3.56	5.47	6.81	52.36
Average	0.61	5.20	3.51	5.42	6.51	52.18
SD	0.01	0.03	0.05	0.05	0.29	0.31
ENR50/10_commgyp20/1	0.67	5.62	3.46	5.37	6.83	52.36
ENR50/10_commgyp20/2	0.69	5.66	3.42	5.35	6.87	51.81
ENR50/10_commgyp20/3	0.68	5.64	3.45	5.45	6.54	50.00
Average	0.68	5.64	3.44	5.39	6.75	51.39
SD	0.01	0.02	0.02	0.05	0.18	1.23
ENR50/10_commgyp30/1	0.76	6.04	3.32	5.26	6.71	51.55
ENR50/10_commgyp30/2	0.77	6.15	3.34	5.30	6.83	51.02
ENR50/10_commgyp30/3	0.77	6.09	3.39	5.21	6.80	54.95
Average	0.77	6.09	3.35	5.26	6.78	52.50
SD	0.01	0.06	0.04	0.05	0.06	2.13
ENR50/10_commgyp40/1	0.82	6.61	3.27	5.25	6.83	50.51
ENR50/10_commgyp40/2	0.84	6.63	3.30	5.25	6.90	51.28
ENR50/10_commgyp40/3	0.83	6.60	3.29	5.17	6.90	53.19
Average	0.83	6.61	3.29	5.22	6.88	51.66
SD	0.01	0.02	0.02	0.05	0.04	1.38
ENR50/10_commgyp50/1	0.87	7.03	3.21	5.11	7.05	52.63
ENR50/10_commgyp50/2	0.86	7.07	3.18	5.23	7.05	48.78
ENR50/10_commgyp50/3	0.87	7.09	3.29	5.21	6.89	52.08
Average	0.87	7.06	3.23	5.18	7.00	51.17
SD	0.01	0.03	0.06	0.06	0.09	2.08

ตาราง ก - 6 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/อีปซีมทางการค้า (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR50/15_commgyp10/1	0.64	5.29	3.57	5.51	6.65	51.55
ENR50/15_commgyp10/2	0.65	5.29	3.50	5.48	6.64	50.51
ENR50/15_commgyp10/3	0.64	5.30	3.48	5.48	6.70	50.00
Average	0.64	5.29	3.52	5.49	6.66	50.68
SD	0.01	0.01	0.05	0.02	0.03	0.79
ENR50/15_commgyp20/1	0.68	5.56	3.43	5.46	6.68	49.26
ENR50/15_commgyp20/2	0.68	5.56	3.48	5.43	6.67	51.28
ENR50/15_commgyp20/3	0.68	5.56	3.40	5.40	6.28	50.00
Average	0.68	5.56	3.44	5.43	6.54	50.18
SD	0.00	0.00	0.04	0.03	0.23	1.02
ENR50/15_commgyp30/1	0.76	6.10	3.30	5.30	6.79	50.00
ENR50/15_commgyp30/2	0.75	6.16	3.38	5.33	6.81	51.28
ENR50/15_commgyp30/3	0.77	6.09	3.35	5.30	6.81	51.28
Average	0.76	6.12	3.34	5.31	6.80	50.85
SD	0.01	0.04	0.04	0.02	0.01	0.74
ENR50/15_commgyp40/1	0.85	6.67	3.30	5.30	6.83	50.00
ENR50/15_commgyp40/2	0.84	6.60	3.25	5.27	6.93	49.50
ENR50/15_commgyp40/3	0.81	6.73	3.27	5.31	6.90	49.02
Average	0.83	6.67	3.27	5.29	6.89	49.51
SD	0.02	0.07	0.03	0.02	0.05	0.49
ENR50/15_commgyp50/1	0.87	7.03	3.21	5.22	7.05	49.75
ENR50/15_commgyp50/2	0.86	7.07	3.23	5.22	7.05	50.25
ENR50/15_commgyp50/3	0.87	7.09	3.27	5.25	6.89	50.51
Average	0.87	7.06	3.24	5.23	7.00	50.17
SD	0.01	0.03	0.03	0.02	0.09	0.38

ตาราง ก - 7 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/ยิปซัมเหลือทิ้ง

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR25/5_wastegyp10/1	0.55	5.12	2.40	3.86	5.54	68.49
ENR25/5_wastegyp10/2	0.53	5.11	2.43	3.89	4.87	68.49
ENR25/5_wastegyp10/3	0.46	5.11	2.40	3.84	4.64	69.44
Average	0.51	5.11	2.41	3.86	5.02	68.81
SD	0.05	0.01	0.02	0.03	0.47	0.55
ENR25/5_wastegyp20/1	0.60	5.62	2.09	3.57	4.71	67.57
ENR25/5_wastegyp20/2	0.60	5.60	2.11	3.60	4.16	67.11
ENR25/5_wastegyp20/3	0.60	5.61	2.10	3.50	4.03	71.43
Average	0.60	5.61	2.10	3.56	4.30	68.70
SD	0.00	0.01	0.01	0.05	0.36	2.37
ENR25/5_wastegyp30/1	0.58	5.91	2.10	3.47	4.74	72.99
ENR25/5_wastegyp30/2	0.56	5.93	2.05	3.51	4.56	68.49
ENR25/5_wastegyp30/3	0.57	5.98	2.05	3.54	5.10	67.11
Average	0.57	5.94	2.07	3.51	4.80	69.53
SD	0.01	0.04	0.03	0.04	0.27	3.07
ENR25/5_wastegyp40/1	0.67	6.48	1.99	3.45	4.55	68.49
ENR25/5_wastegyp40/2	0.64	6.44	2.01	3.40	4.49	71.94
ENR25/5_wastegyp40/3	0.66	6.48	2.01	3.48	4.88	68.03
Average	0.66	6.47	2.00	3.44	4.64	69.49
SD	0.02	0.02	0.01	0.04	0.21	2.14
ENR25/5_wastegyp50/1	0.63	6.92	1.96	3.41	4.43	68.97
ENR25/5_wastegyp50/2	0.64	6.91	1.91	3.38	4.63	68.03
ENR25/5_wastegyp50/3	0.61	6.87	1.99	3.43	4.44	69.44
Average	0.63	6.90	1.95	3.41	4.50	68.81
SD	0.02	0.03	0.04	0.03	0.11	0.72

ตาราง ก - 7 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR25/10_wastegyp10/1	0.67	5.12	2.39	3.86	5.54	68.03
ENR25/10_wastegyp10/2	0.63	5.18	2.41	3.88	4.87	68.03
ENR25/10_wastegyp10/3	0.63	5.18	2.38	3.81	4.64	69.93
Average	0.64	5.16	2.39	3.85	5.02	68.66
SD	0.02	0.03	0.02	0.04	0.47	1.10
ENR25/10_wastegyp20/1	0.54	5.34	2.10	3.53	4.71	69.93
ENR25/10_wastegyp20/2	0.55	5.32	2.11	3.54	4.16	69.93
ENR25/10_wastegyp20/3	0.55	5.35	2.10	3.64	4.03	64.94
Average	0.55	5.34	2.10	3.57	4.30	68.27
SD	0.01	0.02	0.01	0.06	0.36	2.88
ENR25/10_wastegyp30/1	0.61	5.76	2.07	3.47	4.74	71.43
ENR25/10_wastegyp30/2	0.61	5.75	2.07	3.56	4.56	67.11
ENR25/10_wastegyp30/3	0.62	5.78	2.08	3.50	5.10	70.42
Average	0.61	5.76	2.07	3.51	4.80	69.66
SD	0.01	0.02	0.01	0.05	0.27	2.26
ENR25/10_wastegyp40/1	0.64	5.93	2.03	3.41	4.55	72.46
ENR25/10_wastegyp40/2	0.64	5.96	2.03	3.43	4.49	71.43
ENR25/10_wastegyp40/3	0.65	6.00	2.04	3.48	4.88	69.44
Average	0.64	5.96	2.03	3.44	4.64	71.11
SD	0.01	0.04	0.01	0.04	0.21	1.53
ENR25/10_wastegyp50/1	0.61	6.10	1.97	3.43	4.43	68.49
ENR25/10_wastegyp50/2	0.63	6.14	1.98	3.38	4.63	71.43
ENR25/10_wastegyp50/3	0.63	6.18	1.99	3.43	4.44	69.44
Average	0.62	6.14	1.98	3.41	4.50	69.79
SD	0.01	0.04	0.01	0.03	0.11	1.50

ตาราง ก - 7 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR25/15_wastegyp10/1	0.67	4.92	2.30	3.82	5.54	65.79
ENR25/15_wastegyp10/2	0.63	5.00	2.43	3.95	4.87	65.79
ENR25/15_commgyp10/3	0.59	5.05	2.43	3.90	4.64	68.03
Average	0.63	4.99	2.39	3.89	5.02	66.54
SD	0.04	0.07	0.08	0.07	0.47	1.29
ENR25/15_wastegyp20/1	0.63	5.24	2.17	3.65	4.71	67.57
ENR25/15_wastegyp20/2	0.62	5.27	2.11	3.60	4.16	67.11
ENR25/15_wastegyp20/3	0.61	5.28	2.12	3.61	4.03	67.11
Average	0.62	5.26	2.13	3.62	4.30	67.27
SD	0.01	0.02	0.03	0.03	0.36	0.26
ENR25/15_wastegyp30/1	0.64	5.60	2.07	3.53	4.74	68.49
ENR25/15_wastegyp30/2	0.63	5.52	2.10	3.52	4.56	70.42
ENR25/15_wastegyp30/3	0.63	5.54	2.05	3.64	5.10	62.89
Average	0.63	5.55	2.07	3.56	4.80	67.27
SD	0.01	0.04	0.03	0.07	0.27	3.91
ENR25/15_wastegyp40/1	0.61	5.76	2.06	3.48	4.55	70.42
ENR25/15_wastegyp40/2	0.59	5.74	1.99	3.50	4.49	66.23
ENR25/15_wastegyp40/3	0.60	5.76	2.00	3.49	4.88	67.11
Average	0.60	5.75	2.02	3.49	4.64	67.92
SD	0.01	0.01	0.04	0.01	0.21	2.21
ENR25/15_wastegyp50/1	0.63	6.07	1.95	3.41	4.43	68.49
ENR25/15_wastegyp50/2	0.61	6.17	1.89	3.38	4.63	67.11
ENR25/15_wastegyp50/3	0.62	6.12	1.93	3.43	4.44	66.67
Average	0.62	6.12	1.92	3.41	4.50	67.42
SD	0.01	0.05	0.03	0.03	0.11	0.95

ตาราง ก - 7 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR50/5_wastegyp10/1	0.65	5.37	2.39	3.82	4.30	69.93
ENR50/5_wastegyp10/2	0.67	5.37	2.43	3.85	4.42	70.42
ENR50/5_wastegyp10/3	0.67	5.36	2.38	3.90	3.92	65.79
Average	0.66	5.37	2.40	3.86	4.21	68.71
SD	0.01	0.01	0.03	0.04	0.26	2.54
ENR50/5_wastegyp20/1	0.62	5.68	2.21	3.55	4.09	74.63
ENR50/5_wastegyp20/2	0.63	5.65	2.11	3.60	3.75	67.11
ENR50/5_wastegyp20/3	0.63	5.47	2.05	3.61	4.55	64.10
Average	0.63	5.60	2.12	3.59	4.13	68.61
SD	0.01	0.11	0.08	0.03	0.40	5.42
ENR50/5_wastegyp30/1	0.68	6.04	2.05	3.53	4.80	67.57
ENR50/5_wastegyp30/2	0.67	6.05	2.09	3.52	5.18	69.93
ENR50/5_wastegyp30/3	0.69	6.13	2.08	3.54	5.09	68.49
Average	0.68	6.07	2.07	3.53	5.02	68.66
SD	0.01	0.05	0.02	0.01	0.20	1.19
ENR50/5_wastegyp40/1	0.67	6.49	2.03	3.48	4.46	68.97
ENR50/5_wastegyp40/2	0.67	6.50	2.03	3.44	4.44	70.92
ENR50/5_wastegyp40/3	0.67	6.49	2.04	3.49	4.29	68.97
Average	0.67	6.49	2.03	3.47	4.40	69.62
SD	0.00	0.01	0.01	0.03	0.09	1.13
ENR50/5_wastegyp50/1	0.55	6.93	1.96	3.41	3.36	68.97
ENR50/5_wastegyp50/2	0.56	7.05	1.89	3.38	3.92	67.11
ENR50/5_wastegyp50/3	0.55	6.95	1.99	3.33	3.59	74.63
Average	0.55	6.98	1.95	3.37	3.62	70.24
SD	0.01	0.06	0.05	0.04	0.28	3.91

ตาราง ก - 7 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR50/10_wastegyp10/1	0.59	5.16	2.30	3.80	3.69	66.67
ENR50/10_wastegyp10/2	0.57	5.17	2.43	3.91	3.92	67.57
ENR50/10_wastegyp10/3	0.58	5.11	2.43	3.90	4.26	68.03
Average	0.58	5.15	2.39	3.87	3.96	67.42
SD	0.01	0.03	0.08	0.06	0.29	0.69
ENR50/10_wastegyp20/1	0.57	5.43	2.17	3.62	3.90	68.97
ENR50/10_wastegyp20/2	0.59	5.47	2.11	3.60	3.94	67.11
ENR50/10_wastegyp20/3	0.58	5.45	2.12	3.66	3.61	64.94
Average	0.58	5.45	2.13	3.63	3.82	67.00
SD	0.01	0.02	0.03	0.03	0.18	2.02
ENR50/10_wastegyp30/1	0.64	5.77	2.07	3.54	4.38	68.03
ENR50/10_wastegyp30/2	0.65	5.88	2.10	3.52	4.50	70.42
ENR50/10_wastegyp30/3	0.65	5.82	2.05	3.58	4.47	65.36
Average	0.65	5.82	2.07	3.55	4.45	67.94
SD	0.01	0.06	0.03	0.03	0.06	2.53
ENR50/10_wastegyp40/1	0.64	6.17	2.06	3.45	3.89	71.94
ENR50/10_wastegyp40/2	0.66	6.19	1.99	3.50	3.96	66.23
ENR50/10_wastegyp40/3	0.65	6.16	2.00	3.47	3.96	68.03
Average	0.65	6.17	2.02	3.47	3.94	68.73
SD	0.01	0.02	0.04	0.03	0.04	2.92
ENR50/10_wastegyp50/1	0.63	6.54	1.95	3.43	4.12	67.57
ENR50/10_wastegyp50/2	0.62	6.58	1.89	3.38	4.12	67.11
ENR50/10_wastegyp50/3	0.63	6.60	1.93	3.36	3.96	69.93
Average	0.63	6.57	1.92	3.39	4.07	68.20
SD	0.01	0.03	0.03	0.04	0.09	1.51

ตาราง ก - 7 คุณลักษณะของยางคงรูปของยางธรรมชาติ/ENR/อีปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID.	ML	MH	Ts2	Tc90	Tc100	CRI
ENR50/15_wastegyp10/1	0.63	6.54	2.40	3.87	4.12	68.03
ENR50/15_wastegyp10/2	0.62	6.58	2.43	3.99	4.12	64.10
ENR50/15_wastegyp10/3	0.63	6.60	2.40	3.91	3.96	66.23
Average	0.63	6.57	2.41	3.92	4.07	66.12
SD	0.01	0.03	0.02	0.06	0.09	1.96
ENR50/15_wastegyp20/1	0.61	5.24	2.31	3.71	4.10	71.43
ENR50/15_wastegyp20/2	0.62	5.24	2.11	3.65	4.09	64.94
ENR50/15_wastegyp20/3	0.61	5.25	2.10	3.67	4.15	63.69
Average	0.61	5.24	2.17	3.68	4.11	66.69
SD	0.01	0.01	0.12	0.03	0.03	4.15
ENR50/15_wastegyp30/1	0.64	5.83	2.10	3.56	4.46	68.49
ENR50/15_wastegyp30/2	0.63	5.89	2.09	3.55	4.48	68.49
ENR50/15_wastegyp30/3	0.65	5.82	2.08	3.58	4.48	66.67
Average	0.64	5.85	2.09	3.56	4.47	67.88
SD	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	1.05
ENR50/15_wastegyp40/1	0.67	6.23	2.03	3.44	3.89	70.92
ENR50/15_wastegyp40/2	0.66	6.16	2.03	3.52	3.99	67.11
ENR50/15_wastegyp40/3	0.63	6.29	2.01	3.49	3.96	67.57
Average	0.65	6.23	2.02	3.48	3.95	68.53
SD	0.02	0.07	0.01	0.04	0.05	2.08
ENR50/15_wastegyp50/1	0.63	6.54	1.96	3.39	4.12	69.93
ENR50/15_wastegyp50/2	0.62	6.58	1.91	3.38	4.12	68.03
ENR50/15_wastegyp50/3	0.63	6.60	1.99	3.41	3.96	70.42
Average	0.63	6.57	1.95	3.39	4.07	69.46
SD	0.01	0.03	0.04	0.02	0.09	1.26

ภาคผนวก ข
ขนาดอนุภาคของสารตัวเดิมชนิดต่างๆ



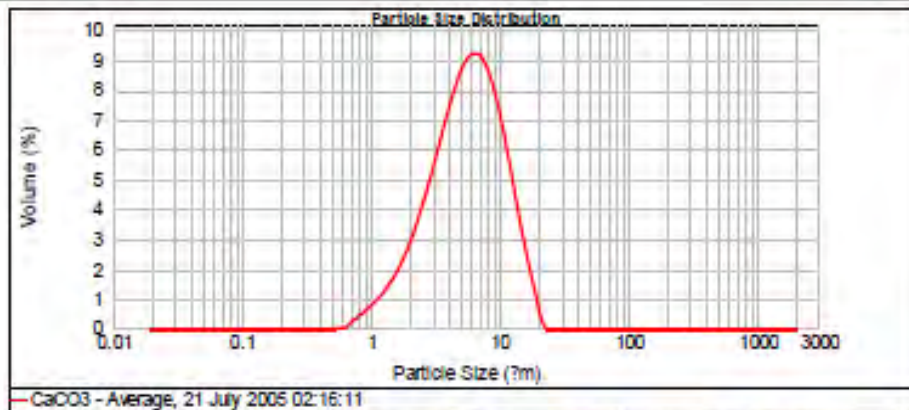
Result Analysis Report

Sample Name: CaCO3 - Average
 Sample Source & type:
 Sample bulk lot ref:
 SOP Name:
 Measured by: User
 Result Source: Averaged
 Measured: 21 July 2005 02:16:11
 Analysed: 21 July 2005 02:16:12

Particle Name: 1.7.0.01
 Particle RI: 1.700
 Dispersant Name: Water
 Accessory Name: Hydro 2000SM (A)
 Absorption: 0.01
 Dispersant RI: 1.330
 Analysis model: General purpose
 Size range: 0.020 to 2000.000 um
 Weighted Residual: 0.883 %
 Sensitivity: Normal
 Obscuration: 5.35 %
 Result Emulation: Off

Concentration: 0.0027 %Vol
 Specific Surface Area: 1.44 m²/g
 Span: 1.742
 Surface Weighted Mean D[3,2]: 4.169 um
 Uniformity: 0.537
 Vol. Weighted Mean D[4,3]: 6.433 um
 Result units: Volume

d(0.1): 2.136 um d(0.6): 6.828 um d(0.8): 11.842 um



Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)
0.040	0.00	0.105	0.00	1.096	0.06	11.402	0.64	120.226	0.00
0.050	0.00	0.120	0.00	1.255	0.06	13.103	0.36	136.208	0.00
0.063	0.00	0.138	0.00	1.442	0.06	15.100	0.17	151.469	0.00
0.078	0.00	0.158	0.00	1.660	0.06	17.333	0.09	167.070	0.00
0.095	0.00	0.182	0.00	1.905	0.12	19.853	0.15	183.930	0.00
0.115	0.00	0.209	0.00	2.180	0.17	22.605	0.17	202.065	0.00
0.138	0.00	0.240	0.00	2.491	0.30	25.503	0.00	221.425	0.00
0.165	0.00	0.275	0.00	2.839	0.48	28.550	0.00	242.026	0.00
0.195	0.00	0.316	0.00	3.219	0.81	31.854	0.00	263.876	0.00
0.228	0.00	0.363	0.00	3.633	1.37	35.411	0.00	286.989	0.00
0.265	0.00	0.417	0.00	4.085	2.32	39.228	0.00	311.372	0.00
0.305	0.00	0.479	0.00	4.579	3.91	43.304	0.00	337.034	0.00
0.348	0.00	0.549	0.00	5.119	6.40	47.639	0.00	363.984	0.00
0.395	0.00	0.628	0.00	5.710	10.00	52.231	0.00	392.224	0.00
0.445	0.00	0.717	0.01	6.357	14.90	57.075	0.00	421.754	0.00
0.498	0.00	0.817	0.04	7.066	21.20	62.171	0.00	452.574	0.00
0.555	0.00	0.929	0.12	7.843	29.10	67.519	0.00	484.694	0.00
0.615	0.00	1.054	0.34	8.694	39.80	73.120	0.00	518.124	0.00
0.678	0.00	1.194	0.82	9.625	53.60	78.974	0.00	552.864	0.00
0.745	0.00	1.349	1.75	10.643	71.90	85.081	0.00	588.914	0.00
0.815	0.00	1.521	3.50	11.854	95.20	91.441	0.00	626.274	0.00
0.888	0.00	1.711	6.50	13.265	123.60	98.064	0.00	664.944	0.00
0.965	0.00	1.920	11.40	14.884	157.60	104.951	0.00	704.924	0.00
1.045	0.00	2.158	20.00	16.619	197.60	112.104	0.00	746.214	0.00
1.128	0.00	2.427	33.00	18.479	243.20	119.534	0.00	788.814	0.00
1.215	0.00	2.728	51.00	20.473	295.00	127.241	0.00	832.724	0.00
1.305	0.00	3.063	75.00	22.611	352.60	135.224	0.00	877.944	0.00
1.400	0.00	3.434	106.00	24.903	416.60	143.484	0.00	924.464	0.00
1.500	0.00	3.844	146.00	27.360	487.60	152.024	0.00	972.284	0.00
1.605	0.00	4.295	206.00	29.993	566.20	160.844	0.00	1021.404	0.00
1.715	0.00	4.799	286.00	32.821	653.20	170.044	0.00	1071.824	0.00
1.830	0.00	5.358	396.00	35.864	749.40	179.624	0.00	1123.544	0.00
1.950	0.00	5.975	536.00	39.141	865.60	189.584	0.00	1176.564	0.00
2.075	0.00	6.653	726.00	42.673	992.60	199.924	0.00	1230.884	0.00
2.205	0.00	7.396	986.00	46.480	1131.20	210.644	0.00	1286.404	0.00
2.340	0.00	8.207	1336.00	50.573	1282.40	221.744	0.00	1343.124	0.00
2.480	0.00	9.089	1796.00	54.960	1447.20	233.224	0.00	1401.044	0.00
2.625	0.00	1.000	2386.00	59.651	1626.60	245.084	0.00	1460.164	0.00
2.775	0.00	1.115	3136.00	64.664	1821.60	257.324	0.00	1520.484	0.00
2.930	0.00	1.245	4086.00	70.019	2033.20	270.944	0.00	1582.004	0.00
3.090	0.00	1.390	5386.00	75.736	2262.40	285.944	0.00	1644.724	0.00
3.255	0.00	1.551	7186.00	81.936	2510.20	302.324	0.00	1709.644	0.00
3.425	0.00	1.729	9646.00	88.640	2777.60	319.984	0.00	1776.764	0.00
3.600	0.00	1.925	12946.00	95.871	3065.60	338.924	0.00	1846.084	0.00
3.780	0.00	2.140	17346.00	103.651	3375.20	359.144	0.00	1917.604	0.00
3.965	0.00	2.375	23046.00	112.000	3707.40	380.644	0.00	1991.324	0.00
4.155	0.00	2.632	30346.00	120.940	4063.20	403.424	0.00	2067.244	0.00
4.350	0.00	2.913	39546.00	130.490	4543.60	427.484	0.00	2145.364	0.00
4.550	0.00	3.219	51046.00	140.680	5158.60	452.824	0.00	2226.684	0.00
4.755	0.00	3.552	65346.00	151.540	5918.20	479.444	0.00	2311.204	0.00
4.965	0.00	3.913	83046.00	163.100	6832.40	507.344	0.00	2400.024	0.00
5.180	0.00	4.304	104846.00	175.390	7912.20	536.524	0.00	2493.144	0.00
5.400	0.00	4.727	131446.00	188.440	9167.60	566.984	0.00	2590.564	0.00
5.625	0.00	5.184	163446.00	202.280	10608.60	598.724	0.00	2692.284	0.00
5.855	0.00	5.677	201446.00	216.950	12245.20	631.744	0.00	2798.404	0.00
6.090	0.00	6.208	246046.00	232.480	14087.40	666.044	0.00	2908.924	0.00
6.330	0.00	6.779	298046.00	248.900	16145.20	701.624	0.00	3022.844	0.00
6.575	0.00	7.394	368046.00	266.250	18429.60	739.484	0.00	3140.164	0.00
6.825	0.00	8.056	456046.00	284.580	20951.60	779.624	0.00	3260.884	0.00
7.080	0.00	8.768	564046.00	303.940	23722.20	821.944	0.00	3385.004	0.00
7.340	0.00	9.524	694046.00	324.380	26752.40	866.444	0.00	3512.524	0.00
7.605	0.00	1.032	848046.00	345.940	30052.20	913.124	0.00	3643.444	0.00
7.875	0.00	1.145	1028046.00	368.660	34632.60	961.984	0.00	3777.764	0.00
8.150	0.00	1.274	1238046.00	393.580	40502.60	1013.024	0.00	3915.484	0.00
8.430	0.00	1.419	1482046.00	420.740	47672.20	1066.244	0.00	4056.604	0.00
8.715	0.00	1.581	1764046.00	450.180	56152.40	1121.644	0.00	4201.124	0.00
9.005	0.00	1.761	2090046.00	481.940	66052.60	1179.224	0.00	4349.044	0.00
9.300	0.00	1.960	2566046.00	516.060	77482.20	1238.984	0.00	4500.364	0.00
9.600	0.00	2.179	3198046.00	553.580	90552.40	1299.924	0.00	4655.084	0.00
9.905	0.00	2.419	3994046.00	594.540	105382.60	1362.044	0.00	4813.204	0.00
10.215	0.00	2.682	4970046.00	639.980	121992.20	1425.344	0.00	4974.724	0.00
10.530	0.00	2.969	6152046.00	689.940	140492.40	1490.824	0.00	5139.644	0.00
10.850	0.00	3.282	7566046.00	744.460	160902.60	1558.484	0.00	5307.964	0.00
11.175	0.00	3.623	9238046.00	803.600	184342.20	1628.324	0.00	5479.684	0.00
11.505	0.00	3.994	11206046.00	867.420	210932.40	1700.344	0.00	5654.804	0.00
11.840	0.00	4.397	13526046.00	936.980	240782.60	1774.544	0.00	5833.324	0.00
12.180	0.00	4.834	16256046.00	1012.340	284022.20	1850.924	0.00	6015.244	0.00
12.525	0.00	5.307	19456046.00	1094.540	340882.40	1929.484	0.00	6200.564	0.00
12.875	0.00	5.818	23186046.00	1183.640	411582.60	2010.224	0.00	6389.284	0.00
13.230	0.00	6.369	27506046.00	1280.680	496342.20	2093.144	0.00	6581.404	0.00
13.590	0.00	6.962	33486046.00	1386.720	596382.40	2178.244	0.00	6776.924	0.00
13.955	0.00	7.600	41106046.00	1501.820	722942.60	2265.524	0.00	6975.844	0.00
14.325	0.00	8.284	50446046.00	1626.040	877262.20	2354.984	0.00	7178.164	0.00
14.700	0.00	9.017	61706046.00	1760.440	1060782.40	2446.624	0.00	7383.884	0.00
15.080	0.00	9.802	75086046.00	1905.060	1275942.60	2540.444	0.00	7592.904	0.00
15.465	0.00	1.064	90786046.00	2060.860	1524102.20	2636.444	0.00	7805.224	0.00
15.855	0.00	1.181	109106046.00	2228.880	1806822.40	2734.624	0.00	8020.844	0.00
16.250	0.00	1.314	130546046.00	2409.180	2126642.60	2834.984	0.00	8239.764	0.00
16.650	0.00	1.463	155546046.00	2602.820	2486102.20	2937.524	0.00	8461.884	0.00
17.055	0.00	1.629	184546046.00	2810.860	2889842.40	3042.244	0.00	8687.204	0.00
17.465	0.00	1.814	21806046.00	3034.260	3442422.60	3149.144	0.00	8915.724	0.00
17.880	0.00	1.999	26666046.00	3284.060	4159422.20	3258.224	0.00	9147.444	0.00
18.300	0.00	2.205	33206046.00	3561.320	5056422.40	3369.484	0.00	9382.364	0.00
18.725	0.00	2.434	41606046.00	3867.000	6149822.60	3482.924	0.00	9620.484	0.00
19.155	0.00	2.687	52046046.00	4202.160	7456822.20	3598.544	0.00	9861.804	0.00
19.590	0.00	2.966	64706046.00	4567.760	9003822.40	3716.344	0.00	10106.324	0.00
20.030	0.00	3.273	79786046.00	5064.860	10816422.60	3836.324	0.00	10354.044	0.00
20.475	0.00	3.610	97486046.00	5604.520	12920222.20	3958.484	0.00	10604.964	0.00
20.925	0.00	3.979	11806046.00	6197.700	15350422.40	4082.824	0.00	10859.084	0.00
21.380	0.00	4.383	14206046.00	6855.360	18143822.60				



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Commercial Gypsum - Average

Sample Source & type:

Sample bulk lot ref:

SOP Name:

Measured by:
User

Result Source:
Averaged

Measured:
21 July 2005 02:43:14

Analyzed:
21 July 2005 02:43:15

Particle Name:
Gypsum

Particle Rt:
1.520

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:
Hydro 2000SM (A)

Absorption:
0.01

Dispersant Rt:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Weighted Residual:
0.815 %

Sensitivity:
Normal

Obscuration:
2.24 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0044 %Vol

Span :
2.141

Uniformity:
0.653

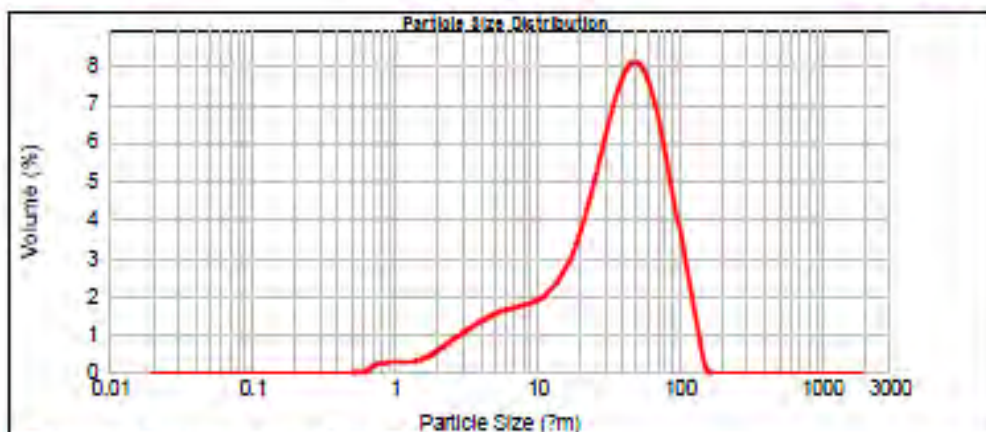
Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.194 m²/g

Surface Weighted Mean D[3,2]:
13.427 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
41.964 um

d(0.1): 5.843 um d(0.5): 37.084 um d(0.9): 85.078 um



Commercial Gypsum - Average, 21 July 2005 02:43:14

Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)
0.010	0.00	0.100	0.00	1.000	0.25	11.400	1.90	100.000	1.36	1000.000	0.00
0.011	0.00	0.110	0.00	1.100	0.27	12.600	2.14	110.000	0.28	1100.000	0.00
0.013	0.00	0.130	0.00	1.300	0.27	14.000	3.49	120.000	0.00	1200.000	0.00
0.015	0.00	0.150	0.00	1.500	0.41	15.600	3.90	130.000	0.00	1300.000	0.00
0.017	0.00	0.170	0.00	1.700	0.53	17.400	3.61	140.000	0.00	1400.000	0.00
0.020	0.00	0.200	0.00	2.000	0.68	19.400	4.35	150.000	0.00	1500.000	0.00
0.023	0.00	0.230	0.00	2.300	0.88	21.600	5.15	160.000	0.00	1600.000	0.00
0.026	0.00	0.260	0.00	2.600	1.07	24.000	5.95	170.000	0.00	1700.000	0.00
0.030	0.00	0.300	0.00	3.000	1.34	26.600	6.64	180.000	0.00	1800.000	0.00
0.035	0.00	0.350	0.00	3.500	1.61	29.400	7.12	190.000	0.00	1900.000	0.00
0.040	0.00	0.400	0.00	4.000	1.89	32.400	7.51	200.000	0.00	2000.000	0.00
0.046	0.00	0.460	0.00	4.600	2.18	35.600	7.81	210.000	0.00	2100.000	0.00
0.052	0.00	0.520	0.00	5.200	2.48	39.000	8.03	220.000	0.00	2200.000	0.00
0.060	0.00	0.600	0.01	6.000	2.79	42.600	8.18	230.000	0.00	2300.000	0.00
0.069	0.00	0.690	0.11	6.900	3.11	46.400	8.25	240.000	0.00	2400.000	0.00
0.079	0.00	0.790	0.22	7.900	3.44	50.400	8.25	250.000	0.00	2500.000	0.00
0.091	0.00	0.910	0.34	9.100	3.78	54.600	8.18	260.000	0.00	2600.000	0.00
0.105	0.00	1.050	0.46	10.000	4.13	59.000	8.03	270.000	0.00	2700.000	0.00
		1.200	0.58	11.400	4.49	63.600	7.81	280.000	0.00	2800.000	0.00

Operator notes:



MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Waste Gypsum - Average

Sample Source & type:

Sample bulk lot ref:

SOP Name:

Measured by:
User

Result Source:
Averaged

Measured:
21 July 2005 03:29:03

Analyzed:
21 July 2005 03:29:04

Particle Name:
Gypsum

Particle RI:
1.520

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:
Hydro 2000SM (A)

Absorption:
0.01

Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 μm

Weighted Residual:
0.688 %

Sensitivity:
Normal

Obscuration:
3.41 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0072 %Vol

Span :
2.099

Uniformity:
0.629

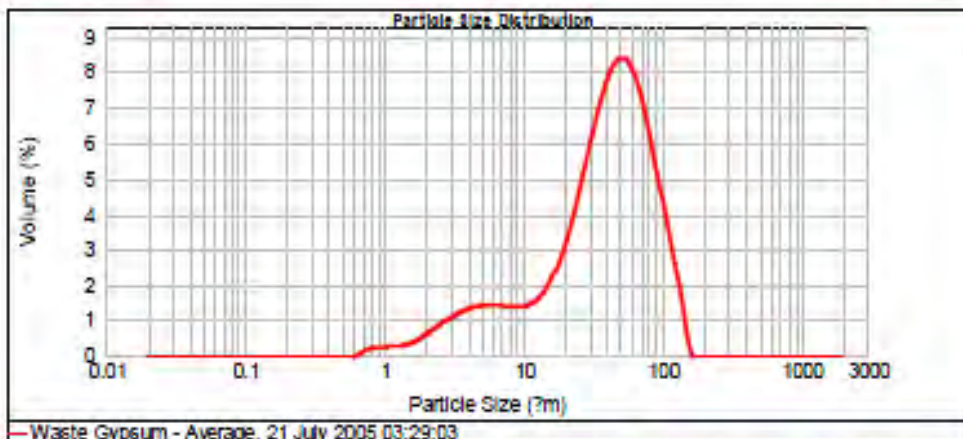
Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.187 m^2/g

Surface Weighted Mean D[3,2]:
13.933 μm

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
45.141 μm

d(0.1): 5.688 μm d(0.6): 40.372 μm d(0.9): 60.518 μm



Waste Gypsum - Average, 21 July 2005 03:29:03

Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)	Size (µm)	Volume (%)
0.040	0.00	0.100	0.00	0.250	0.00	0.630	0.00	1.600	0.00
0.050	0.00	0.125	0.00	0.315	0.00	0.800	0.00	2.000	0.00
0.063	0.00	0.156	0.00	0.398	0.00	1.000	0.00	2.500	0.00
0.078	0.00	0.195	0.00	0.500	0.00	1.250	0.00	3.150	0.00
0.094	0.00	0.243	0.00	0.630	0.00	1.562	0.00	3.980	0.00
0.112	0.00	0.300	0.00	0.791	0.00	1.979	0.00	5.000	0.00
0.132	0.00	0.375	0.00	1.000	0.00	2.500	0.00	6.300	0.00
0.154	0.00	0.470	0.00	1.250	0.00	3.150	0.00	7.910	0.00
0.178	0.00	0.590	0.00	1.562	0.00	3.980	0.00	10.000	0.00
0.204	0.00	0.743	0.00	1.979	0.00	5.000	0.00	12.500	0.00
0.232	0.00	0.938	0.00	2.500	0.00	6.300	0.00	15.625	0.00
0.262	0.00	1.183	0.00	3.150	0.00	7.910	0.00	19.750	0.00
0.294	0.00	1.483	0.00	3.980	0.00	10.000	0.00	25.000	0.00
0.328	0.00	1.850	0.00	5.000	0.00	12.500	0.00	31.500	0.00
0.364	0.00	2.300	0.00	6.300	0.00	15.625	0.00	39.800	0.00
0.402	0.00	2.938	0.00	7.910	0.00	19.750	0.00	50.000	0.00
0.442	0.00	3.750	0.00	10.000	0.00	25.000	0.00	63.000	0.00
0.484	0.00	4.763	0.00	12.500	0.00	31.500	0.00	79.100	0.00
0.528	0.00	6.063	0.00	15.625	0.00	39.800	0.00	100.000	0.00
0.574	0.00	7.763	0.00	19.750	0.00	50.000	0.00	125.000	0.00
0.622	0.00	9.938	0.00	25.000	0.00	63.000	0.00	156.250	0.00
0.672	0.00	12.700	0.00	31.500	0.00	79.100	0.00	197.500	0.00
0.724	0.00	16.250	0.00	39.800	0.00	100.000	0.00	250.000	0.00
0.778	0.00	20.750	0.00	50.000	0.00	125.000	0.00	315.000	0.00
0.834	0.00	26.438	0.00	63.000	0.00	156.250	0.00	398.000	0.00
0.892	0.00	33.500	0.00	79.100	0.00	197.500	0.00	500.000	0.00
0.952	0.00	43.125	0.00	100.000	0.00	250.000	0.00	630.000	0.00
1.014	0.00	55.750	0.00	125.000	0.00	315.000	0.00	791.000	0.00
1.078	0.00	72.000	0.00	156.250	0.00	398.000	0.00	1000.000	0.00
1.144	0.00	92.500	0.00	197.500	0.00	500.000	0.00	1250.000	0.00
1.212	0.00	118.750	0.00	250.000	0.00	630.000	0.00	1562.500	0.00
1.282	0.00	153.750	0.00	315.000	0.00	791.000	0.00	1975.000	0.00
1.354	0.00	199.375	0.00	398.000	0.00	1000.000	0.00	2500.000	0.00
1.428	0.00	259.375	0.00	500.000	0.00	1250.000	0.00	3150.000	0.00
1.504	0.00	338.750	0.00	630.000	0.00	1562.500	0.00	3980.000	0.00
1.582	0.00	443.750	0.00	791.000	0.00	1975.000	0.00	5000.000	0.00
1.662	0.00	581.250	0.00	1000.000	0.00	2500.000	0.00	6300.000	0.00
1.744	0.00	757.500	0.00	1250.000	0.00	3150.000	0.00	7910.000	0.00
1.828	0.00	1000.000	0.00	1562.500	0.00	3980.000	0.00	10000.000	0.00
1.914	0.00	1325.000	0.00	1975.000	0.00	5000.000	0.00	12500.000	0.00
2.002	0.00	1750.000	0.00	2500.000	0.00	6300.000	0.00	15625.000	0.00
2.092	0.00	2293.750	0.00	3150.000	0.00	7910.000	0.00	19750.000	0.00
2.184	0.00	3000.000	0.00	3980.000	0.00	10000.000	0.00	25000.000	0.00
2.278	0.00	3912.500	0.00	5000.000	0.00	12500.000	0.00	31500.000	0.00
2.374	0.00	5093.750	0.00	6300.000	0.00	15625.000	0.00	39800.000	0.00
2.472	0.00	6700.000	0.00	7910.000	0.00	19750.000	0.00	50000.000	0.00
2.572	0.00	8800.000	0.00	10000.000	0.00	25000.000	0.00	63000.000	0.00
2.674	0.00	11562.500	0.00	12500.000	0.00	31500.000	0.00	79100.000	0.00
2.778	0.00	15187.500	0.00	15625.000	0.00	39800.000	0.00	100000.000	0.00
2.884	0.00	19875.000	0.00	19750.000	0.00	50000.000	0.00	125000.000	0.00
2.992	0.00	26000.000	0.00	25000.000	0.00	63000.000	0.00	156250.000	0.00
3.102	0.00	33937.500	0.00	31500.000	0.00	79100.000	0.00	197500.000	0.00
3.214	0.00	44125.000	0.00	39800.000	0.00	100000.000	0.00	250000.000	0.00
3.328	0.00	57937.500	0.00	50000.000	0.00	125000.000	0.00	315000.000	0.00
3.444	0.00	76000.000	0.00	63000.000	0.00	156250.000	0.00	398000.000	0.00
3.562	0.00	99375.000	0.00	79100.000	0.00	197500.000	0.00	500000.000	0.00
3.682	0.00	13000.000	0.00	100000.000	0.00	250000.000	0.00	630000.000	0.00
3.804	0.00	17000.000	0.00	125000.000	0.00	315000.000	0.00	791000.000	0.00
3.928	0.00	22200.000	0.00	156250.000	0.00	398000.000	0.00	1000000.000	0.00
4.054	0.00	29000.000	0.00	197500.000	0.00	500000.000	0.00	1250000.000	0.00
4.182	0.00	37800.000	0.00	250000.000	0.00	630000.000	0.00	1562500.000	0.00
4.312	0.00	49500.000	0.00	315000.000	0.00	791000.000	0.00	1975000.000	0.00
4.444	0.00	64800.000	0.00	398000.000	0.00	1000000.000	0.00	2500000.000	0.00
4.578	0.00	85500.000	0.00	500000.000	0.00	1250000.000	0.00	3150000.000	0.00
4.714	0.00	112500.000	0.00	630000.000	0.00	1562500.000	0.00	3980000.000	0.00
4.852	0.00	147000.000	0.00	791000.000	0.00	1975000.000	0.00	5000000.000	0.00
4.992	0.00	190000.000	0.00	1000000.000	0.00	2500000.000	0.00	6300000.000	0.00
5.134	0.00	253000.000	0.00	1250000.000	0.00	3150000.000	0.00	7910000.000	0.00
5.278	0.00	338000.000	0.00	1562500.000	0.00	3980000.000	0.00	10000000.000	0.00
5.424	0.00	448000.000	0.00	1975000.000	0.00	5000000.000	0.00	12500000.000	0.00
5.572	0.00	595000.000	0.00	2500000.000	0.00	6300000.000	0.00	15625000.000	0.00
5.722	0.00	790000.000	0.00	3150000.000	0.00	7910000.000	0.00	19750000.000	0.00
5.874	0.00	1040000.000	0.00	3980000.000	0.00	10000000.000	0.00	25000000.000	0.00
6.028	0.00	1370000.000	0.00	5000000.000	0.00	12500000.000	0.00	31500000.000	0.00
6.184	0.00	1800000.000	0.00	6300000.000	0.00	15625000.000	0.00	39800000.000	0.00
6.342	0.00	2360000.000	0.00	7910000.000	0.00	19750000.000	0.00	50000000.000	0.00
6.502	0.00	3080000.000	0.00	10000000.000	0.00	25000000.000	0.00	63000000.000	0.00
6.664	0.00	4050000.000	0.00	12500000.000	0.00	31500000.000	0.00	79100000.000	0.00
6.828	0.00	5350000.000	0.00	15625000.000	0.00	39800000.000	0.00	100000000.000	0.00
7.0	0.00	7050000.000	0.00	19750000.000	0.00	50000000.000	0.00	125000000.000	0.00
7.172	0.00	9250000.000	0.00	25000000.000	0.00	63000000.000	0.00	156250000.000	0.00
7.346	0.00	12150000.000	0.00	31500000.000	0.00	79100000.000	0.00	197500000.000	0.00
7.522	0.00	16000000.000	0.00	39800000.000	0.00	100000000.000	0.00	250000000.000	0.00
7.7	0.00	21000000.000	0.00	50000000.000	0.00	125000000.000	0.00	315000000.000	0.00
7.88	0.00	27500000.000	0.00	63000000.000	0.00	156250000.000	0.00	398000000.000	0.00
8.072	0.00	36000000.000	0.00	79100000.000	0.00	197500000.000	0.00	500000000.000	0.00
8.268	0.00	47500000.000	0.00	100000000.000	0.00	250000000.000	0.00	630000000.000	0.00
8.466	0.00	62500000.000	0.00	125000000.000	0.00	315000000.000	0.00	791000000.000	0.00
8.666	0.00	82500000.000	0.00	156250000.000	0.00	398000000.000	0.00	1000000000.000	0.00
8.868	0.00	108500000.000	0.00	197500000.000	0.00	500000000.000	0.00	1250000000.000	0.00
9.072	0.00	142500000.000	0.00	250000000.000	0.00	630000000.000	0.00	1562500000.000	0.00
9.278	0.00	187000000.000	0.00	315000000.000	0.00	791000000.000	0.00	1975000000.000	0.00
9.486	0.00	245000000.000							

ภาคผนวก ค

ความแข็ง (hardness) ของยางธรรมชาติ/สารตัวเติม

ตาราง ค – 1 ความแข็ง (hardness) ของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม

Test ID.	1	2	3	4	5	Average	SD
NR (STR 5 L)	46	47	47	47	47	46.8	0.45
NR/ENR25_5phr	46	46	46	46	46	46	0.00
NR/ENR25_10phr	45	46	45	46	46	45.6	0.55
NR/ENR25_15phr	46	46	45	45	45	45.4	0.55
NR/ENR50_5phr	46	46	46	46	46	46	0.00
NR/ENR50_10phr	46	45	46	46	45	45.6	0.55
NR/ENR50_15phr	45	45	46	46	46	45.6	0.55
NR/CaCO3_10phr	51	50	50	50	50	50.2	0.45
NR/CaCO3_20phr	52	52	52	52	52	52	0.00
NR/CaCO3_30phr	53	54	54	54	54	53.8	0.45
NR/CaCO3_40phr	55	56	56	56	55	55.6	0.55
NR/CaCO3_50phr	55	56	56	56	56	55.8	0.45
NR/CommGyp_10phr	51	50	51	51	52	51	0.71
NR/CommGyp_20phr	52	53	52	53	53	52.6	0.55
NR/CommGyp_30phr	54	55	53	54	53	53.8	0.84
NR/CommGyp_40phr	54	54	54	55	55	54.4	0.55
NR/CommGyp_50phr	58	58	57	57	55	57	1.22
NR/WasteGyp_10phr	51	51	51	52	52	51.4	0.55
NR/WasteGyp_20phr	53	53	53	52	53	52.8	0.45
NR/WasteGyp_30phr	54	55	54	54	54	54.2	0.45
NR/WasteGyp_40phr	55	54	54	55	55	54.6	0.55
NR/WasteGyp_50phr	58	58	57	57	57	57.4	0.55

ตาราง ค – 1 ความแข็ง (hardness) ของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	4	5	Average	SD
NR/ENR25_5phr/CaCO3_10phr	41	43	43	40	40	41.4	1.52
NR/ENR25_5phr/CaCO3_20phr	44	44	44	45	44	44.2	0.45
NR/ENR25_5phr/CaCO3_30phr	45	46	45	46	45	45.4	0.55
NR/ENR25_5phr/CaCO3_40phr	49	49	49	49	49	49	0.00
NR/ENR25_5phr/CaCO3_50phr	49	50	50	50	50	49.8	0.45
NR/ENR25_10phr/CaCO3_10phr	43	43	43	43	42	42.8	0.45
NR/ENR25_10phr/CaCO3_20phr	45	46	45	45	44	45	0.71
NR/ENR25_10phr/CaCO3_30phr	46	46	45	44	45	45.2	0.84
NR/ENR25_10phr/CaCO3_40phr	45	46	45	45	46	45.4	0.55
NR/ENR25_10phr/CaCO3_50phr	50	50	50	50	50	50	0.00
NR/ENR25_15phr/CaCO3_10phr	41	40	40	39	39	39.8	0.84
NR/ENR25_15phr/CaCO3_20phr	44	44	44	45	45	44.4	0.55
NR/ENR25_15phr/CaCO3_30phr	44	45	45	47	46	45.4	1.14
NR/ENR25_15phr/CaCO3_40phr	47	47	47	45	47	46.6	0.89
NR/ENR25_15phr/CaCO3_50phr	46	48	46	47	48	47	1.00
NR/ENR50_5phr/CaCO3_10phr	42	42	42	43	42	42.2	0.45
NR/ENR50_5phr/CaCO3_20phr	44	44	44	44	44	44	0.00
NR/ENR50_5phr/CaCO3_30phr	44	44	44	45	45	44.4	0.55
NR/ENR50_5phr/CaCO3_40phr	49	49	49	49	49	49	0.00
NR/ENR50_5phr/CaCO3_50phr	49	49	49	49	50	49.2	0.45

ตาราง ค – 1 ความแข็ง (hardness) ของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	4	5	Average	SD
NR/ENR25_15phr/CommGyp_10phr	41	40	40	39	39	39.8	0.84
NR/ENR25_15phr/CommGyp_20phr	44	44	44	45	45	44.4	0.55
NR/ENR25_15phr/CommGyp_30phr	44	45	45	46	46	45.2	0.84
NR/ENR25_15phr/CommGyp_40phr	47	47	47	46	47	46.8	0.45
NR/ENR25_15phr/CommGyp_50phr	47	48	47	47	48	47.4	0.55
NR/ENR50_5phr/CommGyp_10phr	42	42	42	42	42	42	0.00
NR/ENR50_5phr/CommGyp_20phr	43	44	43	44	43	43.4	0.55
NR/ENR50_5phr/CommGyp_30phr	47	46	47	47	46	46.6	0.55
NR/ENR50_5phr/CommGyp_40phr	49	48	49	48	49	48.6	0.55
NR/ENR50_5phr/CommGyp_50phr	50	50	49	49	50	49.6	0.55
NR/ENR50_10phr/CommGyp_10phr	41	42	42	42	42	41.8	0.45
NR/ENR50_10phr/CommGyp_20phr	44	44	44	44	45	44.2	0.45
NR/ENR50_10phr/CommGyp_30phr	47	47	47	47	47	47	0.00
NR/ENR50_10phr/CommGyp_40phr	48	47	47	48	48	47.6	0.55
NR/ENR50_10phr/CommGyp_50phr	49	49	49	48	48	48.6	0.55
NR/ENR50_15phr/CommGyp_10phr	41	44	44	43	43	43	1.22
NR/ENR50_15phr/CommGyp_20phr	44	44	43	44	44	43.8	0.45
NR/ENR50_15phr/CommGyp_30phr	44	45	45	46	45	45	0.71
NR/ENR50_15phr/CommGyp_40phr	47	47	46	47	46	46.6	0.55
NR/ENR50_15phr/CommGyp_50phr	49	49	50	49	49	49.2	0.45

ตาราง ค – 1 ความแข็ง (hardness) ของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	4	5	Average	SD
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_10phr	41	41	41	40	40	40.6	0.55
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_20phr	44	44	44	45	44	44.2	0.45
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_30phr	45	46	45	46	45	45.4	0.55
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_40phr	49	49	49	49	49	49	0.00
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_50phr	49	50	50	50	50	49.8	0.45
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_10phr	43	43	43	43	42	42.8	0.45
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_20phr	45	46	45	44	45	45	0.71
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_30phr	46	46	45	45	45	45.4	0.55
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_40phr	46	46	45	45	46	45.6	0.55
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_50phr	50	50	50	50	50	50	0.00
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_10phr	41	40	40	39	39	39.8	0.84
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_20phr	44	44	44	45	45	44.4	0.55
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_30phr	44	45	45	46	46	45.2	0.84
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_40phr	47	47	47	46	47	46.8	0.45
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_50phr	47	48	47	47	48	47.4	0.55
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_10phr	42	42	42	42	42	42	0.00
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_20phr	43	44	43	44	44	43.6	0.55
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_30phr	44	44	44	44	45	44.2	0.45
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_40phr	48	48	49	49	49	48.6	0.55
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_50phr	49	49	49	50	50	49.4	0.55

ตาราง ค – 1 ความแข็ง (hardness) ของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	4	5	Average	SD
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_10phr	42	43	42	42	43	42.4	0.55
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_20phr	44	45	44	45	44	44.4	0.55
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_30phr	48	47	47	48	47	47.4	0.55
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_40phr	48	48	48	48	48	48	0.00
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_50phr	49	49	49	49	49	49	0.00
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_10phr	43	44	44	43	43	43.4	0.55
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_20phr	44	44	45	45	45	44.6	0.55
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_30phr	46	45	45	46	46	45.6	0.55
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_40phr	47	47	47	47	48	47.2	0.45
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_50phr	49	50	50	49	49	49.4	0.55

ภาคผนวก ง

ความทนแรงดึง (tensile properties) ของยางธรรมชาติ/สารตัวเติม

ตาราง ง – 1 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ

Test ID	L	L_0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR STR 5 L	24.00	2.50	860.00	17.75	0.66	1.11	2.05
	23.50	2.50	840.00	16.34	0.62	1.24	1.98
	25.00	2.50	900.00	17.13	0.62	1.21	2.10
	24.50	2.50	880.00	17.91	0.63	1.15	2.00
	24.00	2.50	860.00	17.22	0.64	1.20	1.81
Average	24.20		868.00	17.27	0.64	1.18	1.99
SD	0.57		22.80	0.62	0.02	0.05	0.11

ตาราง ง – 2 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต

Test ID	L	LO	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
CaCO3 10 phr	19.00	2.50	660.00	18.05	0.77	1.31	1.91
	18.50	2.50	640.00	18.35	0.76	1.51	2.05
	18.50	2.50	640.00	17.62	0.78	1.38	2.11
	19.00	2.50	660.00	14.97	0.76	1.36	2.10
	19.00	2.50	660.00	17.17	0.75	1.31	2.12
Average	18.80		652.00	17.23	0.76	1.37	2.06
SD	0.27		10.95	1.34	0.01	0.08	0.09
CaCO3 20 phr	19.00	2.50	660.00	19.70	0.92	1.56	2.25
	19.00	2.50	660.00	18.50	0.90	1.52	2.22
	19.00	2.50	660.00	16.85	0.95	1.51	2.26
	18.50	2.50	640.00	18.36	0.88	1.50	2.34
	18.50	2.50	640.00	15.55	0.86	1.49	2.17
Average	18.80		652.00	17.79	0.90	1.52	2.25
SD	0.27		10.95	1.61	0.04	0.03	0.06
CaCO3 30 phr	19.50	2.50	680.00	21.79	1.01	1.62	2.18
	19.50	2.50	680.00	19.88	0.98	1.71	2.39
	19.50	2.50	680.00	19.26	1.01	1.60	2.25
	19.50	2.50	680.00	21.91	1.06	1.66	2.31
	19.00	2.50	660.00	17.79	1.02	1.50	2.13
Average	19.40		676.00	20.13	1.02	1.62	2.25
SD	0.22		8.94	1.75	0.03	0.08	0.10

ตาราง ง – 2 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
CaCO3 40 phr	19.50	2.50	680.00	22.53	1.05	1.79	2.36
	19.00	2.50	660.00	19.36	1.13	1.79	2.49
	19.50	2.50	680.00	21.05	1.03	1.67	2.34
	20.00	2.50	700.00	21.82	1.15	1.72	2.31
	20.50	2.50	720.00	22.56	1.02	1.74	2.34
Average	19.70		688.00	21.46	1.07	1.74	2.37
SD	0.57		22.80	1.33	0.06	0.05	0.07
CaCO3 50 phr	20.00	2.50	700.00	17.28	1.13	1.65	2.31
	20.50	2.50	720.00	23.09	1.14	1.75	2.27
	20.50	2.50	720.00	22.52	1.21	1.78	2.23
	19.50	2.50	680.00	22.34	1.02	1.68	2.25
	19.00	2.50	660.00	19.35	1.27	1.76	2.53
Average	19.90		696.00	20.92	1.15	1.72	2.32
SD	0.65		26.08	2.50	0.10	0.05	0.12

ตาราง ง – 3 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า

Test ID	L	LO	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
CommGypsum 10 phr	19.50	2.50	680.00	18.79	0.92	1.43	2.21
	19.00	2.50	660.00	19.13	0.89	1.44	1.94
	19.50	2.50	680.00	18.95	0.90	1.39	2.02
	19.50	2.50	680.00	19.37	0.93	1.50	2.11
	19.00	2.50	660.00	20.07	0.90	1.50	2.19
Average	19.30		672.00	19.26	0.91	1.45	2.09
SD	0.27		10.95	0.50	0.02	0.05	0.11
CommGypsum 20 phr	20.00	2.50	700.00	22.04	0.98	1.58	2.20
	19.00	2.50	660.00	18.64	0.91	1.49	2.30
	19.00	2.50	660.00	18.66	0.96	1.49	2.24
	20.50	2.50	720.00	24.91	0.96	1.56	2.25
	20.00	2.50	700.00	20.68	0.88	1.44	2.11
Average	19.70		688.00	20.99	0.94	1.51	2.22
SD	0.67		26.83	2.62	0.04	0.06	0.07
CommGypsum 30 phr	20.00	2.50	700.00	21.65	1.02	1.61	2.35
	20.00	2.50	700.00	22.11	1.03	1.73	2.60
	19.50	2.50	680.00	23.07	1.06	1.75	2.22
	20.00	2.50	700.00	19.95	0.92	1.60	2.34
	20.00	2.50	700.00	20.90	0.92	1.69	2.30
Average	19.90		696.00	21.54	0.99	1.68	2.36
SD	0.22		8.94	1.18	0.07	0.07	0.14

ตาราง ง – 3 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้า (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
CommGypsum 40 phr	20.00	2.50	700.00	24.29	1.14	1.85	2.74
	19.50	2.50	680.00	23.45	1.11	1.81	2.75
	20.00	2.50	700.00	25.84	1.14	1.91	2.71
	19.50	2.50	680.00	24.48	1.14	1.91	2.92
	20.50	2.50	720.00	25.74	1.18	1.94	2.75
Average	19.90		696.00	24.76	1.14	1.88	2.77
SD	0.42		16.73	1.02	0.02	0.05	0.08
CommGypsum 50 phr	20.00	2.50	700.00	24.53	1.25	2.18	2.89
	19.50	2.50	680.00	21.62	1.11	2.02	2.83
	19.00	2.50	660.00	18.06	1.26	1.97	2.78
	19.50	2.50	680.00	22.19	1.20	1.94	2.73
	20.00	2.50	700.00	22.14	1.11	1.90	2.76
Average	19.60		684.00	21.71	1.18	2.00	2.80
SD	0.42		16.73	2.33	0.07	0.11	0.06

ตาราง ง – 4 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง

Test ID	L	LO	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
WasteGypsum 10 phr	19.00	2.50	660.00	19.51	0.89	1.43	2.10
	19.00	2.50	660.00	18.23	0.89	1.44	1.94
	19.00	2.50	660.00	18.79	0.90	1.39	2.02
	19.50	2.50	680.00	19.33	0.93	1.50	2.11
	19.00	2.50	660.00	19.06	0.89	1.40	2.19
Average	19.10		664.00	18.98	0.90	1.43	2.07
SD	0.22		8.94	0.50	0.02	0.04	0.10
WasteGypsum 20 phr	19.50	2.50	680.00	20.84	0.95	1.50	2.20
	19.00	2.50	660.00	19.51	0.91	1.49	2.20
	19.00	2.50	660.00	20.13	0.96	1.49	2.24
	20.00	2.50	700.00	19.07	0.96	1.56	2.25
	20.00	2.50	700.00	19.59	0.88	1.44	2.11
Average	19.50		680.00	19.83	0.93	1.50	2.20
SD	0.50		20.00	0.68	0.03	0.04	0.06
WasteGypsum 30 phr	20.00	2.50	700.00	22.14	0.99	1.61	2.35
	20.00	2.50	700.00	22.01	1.03	1.73	2.50
	19.50	2.50	680.00	19.75	1.06	1.75	2.22
	19.50	2.50	680.00	19.06	0.92	1.66	2.34
	19.50	2.50	680.00	19.92	0.92	1.70	2.30
Average	19.70		688.00	20.58	0.98	1.69	2.34
SD	0.27		10.95	1.41	0.06	0.06	0.10

ตาราง ง – 4 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID	L	LO	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
WasteGypsum 40 phr	20.00	2.50	700.00	23.54	1.14	1.85	2.74
	19.50	2.50	680.00	23.46	1.11	1.81	2.75
	19.50	2.50	680.00	24.78	1.14	1.91	2.80
	19.50	2.50	680.00	22.13	1.15	2.00	2.92
	20.50	2.50	720.00	24.56	1.18	1.94	2.75
Average	19.80		692.00	23.69	1.15	1.90	2.79
SD	0.45		17.89	1.06	0.02	0.08	0.07
WasteGypsum 50 phr	20.00	2.50	700.00	21.11	1.25	2.02	2.89
	20.00	2.50	700.00	22.59	1.02	2.02	2.83
	20.00	2.50	700.00	21.78	1.26	1.97	2.80
	19.50	2.50	680.00	22.64	1.20	1.94	2.73
	20.50	2.50	720.00	20.25	1.20	1.90	2.77
Average	20.00		700.00	21.67	1.19	1.97	2.80
SD	0.35		14.14	1.02	0.10	0.05	0.06

ตาราง ง – 5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_5phr/ CaCO3_10phr	22.00	2.50	780.00	21.33	0.75	1.26	1.73
	21.00	2.50	740.00	20.61	0.79	1.27	1.86
	21.00	2.50	740.00	17.57	0.83	1.35	1.89
	22.00	2.50	780.00	19.16	0.90	1.37	1.87
	21.00	2.50	740.00	17.35	0.96	1.49	1.94
Average	21.40		756.00	19.20	0.84	1.35	1.86
SD	0.55		21.91	1.78	0.09	0.09	0.08
NR/ENR25_5phr/ CaCO3_20phr	21.00	2.50	740.00	20.09	0.87	1.46	2.00
	22.00	2.50	780.00	22.55	0.97	1.46	2.09
	21.00	2.50	740.00	22.76	1.11	1.70	2.19
	22.00	2.50	780.00	23.73	1.03	1.56	2.10
	22.00	2.50	780.00	20.62	1.13	1.59	2.06
Average	21.60		764.00	21.95	1.02	1.55	2.09
SD	0.55		21.91	1.53	0.11	0.10	0.07
NR/ENR25_5phr/ CaCO3_30phr	21.50	2.50	760.00	23.07	1.02	1.65	2.19
	21.50	2.50	760.00	23.49	1.03	1.81	2.47
	22.00	2.50	780.00	20.30	1.07	1.58	2.10
	21.00	2.50	740.00	22.38	1.12	1.77	2.35
	21.00	2.50	740.00	23.16	1.11	1.75	2.41
Average	21.40		756.00	22.48	1.07	1.71	2.31
SD	0.42		16.73	1.28	0.04	0.09	0.15

ตาราง ง – 5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต

(ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_5phr/ CaCO3_40phr	20.50	2.50	720.00	22.94	1.36	1.89	2.50
	20.00	2.50	700.00	21.03	1.21	1.85	2.53
	21.00	2.50	740.00	24.29	1.32	1.92	2.44
	20.00	2.50	700.00	21.26	1.18	1.84	2.60
	21.50	2.50	760.00	24.32	1.24	1.85	2.45
Average	20.60		724.00	22.77	1.26	1.87	2.51
SD	0.65		26.08	1.59	0.07	0.03	0.06
NR/ENR25_5phr/ CaCO3_50phr	20.50	2.50	720.00	22.01	1.22	1.94	2.71
	21.00	2.50	740.00	22.55	1.20	1.99	2.75
	21.50	2.50	760.00	23.24	1.48	1.96	2.51
	21.50	2.50	760.00	23.99	1.23	1.91	2.74
	21.00	2.50	740.00	22.31	1.43	1.93	2.67
Average	21.10		744.00	22.82	1.31	1.95	2.67
SD	0.42		16.73	0.80	0.13	0.03	0.10
NR/ENR25_10phr/ CaCO3_10phr	21.00	2.50	740.00	20.64	0.83	1.31	1.80
	21.20	2.50	748.00	19.71	0.98	1.33	1.90
	21.50	2.50	760.00	21.39	0.88	1.23	1.76
	20.00	2.50	700.00	19.55	0.98	1.38	1.87
	21.50	2.50	760.00	21.49	0.83	1.24	1.90
Average	21.04		741.60	20.56	0.90	1.30	1.85
SD	0.62		24.75	0.91	0.08	0.06	0.06

ตาราง ง – 5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต

(ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_10phr/ CaCO3_20phr	22.00	2.50	780.00	21.31	0.80	1.37	1.89
	20.50	2.50	720.00	20.70	0.86	1.38	1.95
	21.00	2.50	740.00	20.78	0.87	1.32	0.19
	21.00	2.50	740.00	20.78	0.91	1.46	2.04
	20.00	2.50	700.00	21.49	0.98	1.53	2.15
Average	20.90		736.00	21.01	0.89	1.41	1.64
SD	0.74		29.66	0.36	0.07	0.08	0.82
NR/ENR25_10phr/ CaCO3_30phr	21.30	2.50	752.00	22.63	1.03	1.61	2.18
	21.90	2.50	776.00	23.16	1.01	1.54	2.16
	21.00	2.50	740.00	21.44	1.05	1.57	2.21
	20.50	2.50	720.00	22.86	1.29	1.70	2.23
	20.50	2.50	720.00	22.91	1.02	1.59	2.16
Average	21.04		741.60	22.60	1.08	1.60	2.19
SD	0.59		23.60	0.68	0.12	0.06	0.03
NR/ENR25_10phr/ CaCO3_40phr	21.00	2.50	740.00	23.81	1.10	1.73	2.33
	21.00	2.50	740.00	25.21	1.16	1.77	2.37
	21.00	2.50	740.00	23.87	1.31	1.72	2.30
	21.50	2.50	760.00	24.51	1.06	1.52	2.19
	20.50	2.50	720.00	24.85	1.20	1.73	2.40
Average	21.00		740.00	24.45	1.17	1.70	2.32
SD	0.35		14.14	0.61	0.10	0.10	0.08

ตาราง ง – 5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต

(ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_10phr/ CaCO3_50phr	20.50	2.50	720.00	22.01	1.14	1.79	2.34
	20.50	2.50	720.00	22.37	1.05	1.64	2.28
	21.00	2.50	740.00	22.62	1.08	1.72	2.33
	21.00	2.50	740.00	22.64	1.09	1.60	2.22
	21.00	2.50	740.00	21.36	1.34	1.82	2.43
Average	20.80		732.00	22.20	1.14	1.71	2.32
SD	0.27		10.95	0.53	0.12	0.09	0.08
NR/ENR25_15phr/ CaCO3_10phr	20.00	2.50	700.00	21.63	0.96	1.33	1.79
	21.50	2.50	760.00	22.16	0.89	1.33	1.84
	21.10	2.50	744.00	18.44	0.86	1.30	1.86
	21.60	2.50	764.00	19.86	0.94	1.32	1.86
	21.00	2.50	740.00	19.91	0.94	1.46	1.99
Average	21.04		741.60	20.40	0.92	1.35	1.87
SD	0.63		25.39	1.50	0.04	0.07	0.07
NR/ENR25_15phr/ CaCO3_20phr	21.00	2.50	740.00	20.64	0.92	1.47	2.07
	20.50	2.50	720.00	19.71	1.02	1.50	2.13
	21.00	2.50	740.00	21.39	0.95	1.48	2.07
	22.00	2.50	780.00	19.55	1.01	1.44	2.05
	21.00	2.50	740.00	21.49	0.97	1.54	2.04
Average	21.10		744.00	20.56	0.97	1.49	2.07
SD	0.55		21.91	0.91	0.04	0.04	0.03

ตาราง ง – 5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต

(ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_15phr/ CaCO3_30phr	20.80	2.50	732.00	21.87	0.99	1.55	2.19
	20.00	2.50	700.00	22.29	1.15	1.61	2.27
	20.40	2.50	716.00	19.10	1.04	1.47	2.15
	21.00	2.50	740.00	21.18	1.04	1.65	2.23
	21.00	2.50	740.00	21.96	0.99	1.59	2.16
Average	20.64		725.60	21.28	1.04	1.57	2.20
SD	0.43		17.34	1.28	0.06	0.07	0.05
NR/ENR25_15phr/ CaCO3_40phr	21.00	2.50	740.00	24.93	1.04	1.71	2.54
	21.50	2.50	760.00	24.17	1.14	1.75	2.29
	19.50	2.50	680.00	23.32	1.70	1.73	2.41
	20.00	2.50	700.00	23.79	1.01	1.72	2.32
	21.50	2.50	760.00	25.46	1.09	1.68	2.30
Average	20.70		728.00	24.33	1.20	1.72	2.37
SD	0.91		36.33	0.86	0.29	0.03	0.11
NR/ENR25_15phr/ CaCO3_50phr	22.00	2.50	780.00	24.53	1.16	1.88	2.55
	21.00	2.50	740.00	22.87	1.31	1.99	2.52
	21.50	2.50	760.00	21.93	1.33	1.93	2.61
	21.00	2.50	740.00	22.86	1.28	1.89	2.47
	21.50	2.50	760.00	22.50	1.22	1.89	2.66
Average	21.40		756.00	22.94	1.26	1.91	2.56
SD	0.42		16.73	0.97	0.07	0.05	0.07

ตาราง ง – 5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต

(ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_5phr/ CaCO ₃ _10phr	21.00	2.50	740.00	21.92	0.84	1.35	2.00
	20.50	2.50	720.00	20.14	0.90	1.47	2.00
	21.50	2.50	760.00	23.70	0.89	1.45	2.06
	21.00	2.50	740.00	19.26	0.94	1.44	2.05
	20.00	2.50	700.00	20.62	0.86	1.34	1.96
Average	20.80		732.00	21.13	0.89	1.41	2.02
SD	0.57		22.80	1.73	0.04	0.06	0.04
NR/ENR50_5phr/ CaCO ₃ _20phr	21.00	2.50	740.00	21.89	0.93	1.39	1.98
	20.50	2.50	720.00	18.96	0.94	1.41	2.01
	21.50	2.50	760.00	21.84	0.84	1.42	2.00
	21.50	2.50	760.00	23.63	0.82	1.42	2.06
	21.00	2.50	740.00	20.42	0.88	1.47	1.98
Average	21.10		744.00	21.35	0.88	1.42	2.00
SD	0.42		16.73	1.75	0.05	0.03	0.03
NR/ENR50_5phr/ CaCO ₃ _30phr	21.00	2.50	740.00	22.72	0.96	1.70	2.58
	21.00	2.50	740.00	22.02	0.90	1.66	2.36
	21.00	2.50	740.00	22.71	0.94	1.66	2.28
	21.50	2.50	760.00	24.39	0.92	1.72	2.28
	20.50	2.50	720.00	24.25	0.96	1.72	2.28
Average	21.00		740.00	23.22	0.94	1.69	2.35
SD	0.35		14.14	1.05	0.03	0.03	0.13

ตาราง ง – 5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต

(ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_5phr/ CaCO ₃ _40phr	21.00	2.50	740.00	24.37	0.99	1.83	2.39
	21.00	2.50	740.00	23.90	1.14	1.88	2.47
	20.00	2.50	700.00	22.90	1.21	1.73	2.28
	21.00	2.50	740.00	24.60	1.04	1.81	2.47
	21.00	2.50	740.00	24.74	1.15	1.82	2.49
Average	20.80		732.00	24.10	1.11	1.81	2.42
SD	0.45		17.89	0.74	0.09	0.06	0.09
NR/ENR50_5phr/ CaCO ₃ _50phr	20.00	2.50	700.00	22.31	1.10	1.73	2.21
	22.00	2.50	780.00	21.70	1.17	1.69	2.26
	21.50	2.50	760.00	21.78	1.04	1.72	2.19
	21.00	2.50	740.00	21.78	1.18	1.77	2.34
	21.00	2.50	740.00	22.49	1.03	1.61	2.05
Average	21.10		744.00	22.01	1.10	1.70	2.21
SD	0.74		29.66	0.36	0.07	0.06	0.11
NR/ENR50_10phr/ CaCO ₃ _10phr	20.00	2.50	700.00	20.29	0.83	1.23	1.88
	19.50	2.50	680.00	19.62	0.79	1.31	1.79
	21.00	2.50	740.00	19.55	0.78	1.25	1.82
	21.00	2.50	740.00	20.08	0.80	1.34	1.89
	20.50	2.50	720.00	20.87	0.80	1.32	1.88
Average	20.40		716.00	20.08	0.80	1.29	1.85
SD	0.65		26.08	0.54	0.02	0.05	0.04

ตาราง ง – 5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต

(ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_10phr/ CaCO ₃ _20phr	20.00	2.50	700.00	20.57	0.99	1.44	2.02
	21.10	2.50	744.00	23.27	0.87	1.51	2.02
	22.00	2.50	780.00	23.39	0.91	1.57	2.17
	21.30	2.50	752.00	22.66	0.93	1.59	2.20
	21.50	2.50	760.00	22.30	1.10	1.56	2.15
Average	21.18		747.20	22.44	0.96	1.53	2.11
SD	0.74		29.58	1.14	0.09	0.06	0.09
NR/ENR50_10phr/ CaCO ₃ _30phr	22.50	2.50	800.00	24.70	0.99	1.59	2.11
	21.00	2.50	740.00	22.43	0.92	1.61	2.15
	21.00	2.50	740.00	24.25	0.95	1.53	2.12
	21.50	2.50	760.00	22.26	0.97	1.44	2.29
	18.50	2.50	640.00	22.63	1.02	1.68	2.22
Average	20.90		736.00	23.25	0.97	1.57	2.18
SD	1.47		58.99	1.13	0.04	0.09	0.08
NR/ENR50_10phr/ CaCO ₃ _40phr	21.50	2.50	760.00	24.22	1.08	1.79	2.35
	21.50	2.50	760.00	23.23	1.00	1.73	2.42
	20.50	2.50	720.00	22.67	1.09	1.79	2.36
	21.00	2.50	740.00	21.92	1.10	1.68	2.37
	21.00	2.50	740.00	23.98	1.17	1.85	2.42
Average	21.10		744.00	23.20	1.09	1.77	2.39
SD	0.42		16.73	0.94	0.06	0.07	0.03

ตาราง ง – 5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต

(ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_10phr/ CaCO ₃ _50phr	21.50	2.50	760.00	22.68	1.38	1.79	2.20
	20.50	2.50	720.00	22.35	0.95	1.69	2.37
	21.00	2.50	740.00	22.63	1.09	1.90	2.50
	20.50	2.50	720.00	20.32	1.05	1.78	2.40
	20.50	2.50	720.00	20.50	1.11	1.72	2.39
Average	20.80		732.00	21.70	1.12	1.77	2.37
SD	0.45		17.89	1.18	0.16	0.08	0.11
NR/ENR50_15phr/ CaCO ₃ _10phr	21.50	2.50	760.00	20.36	0.78	1.40	1.97
	20.00	2.50	700.00	17.49	0.76	1.35	1.85
	20.50	2.50	720.00	20.32	0.78	1.24	1.71
	22.00	2.50	780.00	24.37	0.80	1.34	1.95
	21.50	2.50	760.00	20.88	0.83	1.37	1.92
Average	21.10		744.00	20.68	0.79	1.34	1.88
SD	0.82		32.86	2.45	0.03	0.06	0.11
NR/ENR50_15phr/ CaCO ₃ _20phr	21.50	2.50	760.00	20.88	0.90	1.42	1.98
	22.00	2.50	780.00	22.69	0.90	1.48	2.07
	21.00	2.50	740.00	19.76	0.80	1.33	2.03
	22.00	2.50	780.00	21.55	0.91	1.48	2.10
	20.00	2.50	700.00	19.30	0.97	1.47	2.03
Average	21.30		752.00	20.84	0.90	1.44	2.04
SD	0.84		33.47	1.37	0.06	0.07	0.05

ตาราง ง – 5 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/แคลเซียมคาร์บอเนต

(ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_15phr/ CaCO ₃ _30phr	22.00	2.50	780.00	22.32	0.95	1.57	2.08
	21.50	2.50	760.00	19.06	0.91	1.52	2.18
	20.00	2.50	700.00	24.73	0.91	1.50	2.07
	21.00	2.50	740.00	24.68	0.91	1.57	2.17
	22.00	2.50	780.00	23.27	0.90	1.56	2.14
Average	21.30		752.00	22.81	0.91	1.55	2.13
SD	0.84		33.47	2.33	0.02	0.03	0.05
NR/ENR50_15phr/ CaCO ₃ _40phr	21.50	2.50	760.00	23.60	0.88	1.59	2.29
	20.50	2.50	720.00	21.06	0.92	1.67	2.39
	21.50	2.50	760.00	25.49	0.94	1.61	2.31
	20.80	2.50	732.00	24.15	0.99	1.77	2.42
	21.50	2.50	760.00	23.46	1.01	1.74	2.38
Average	21.16		746.40	23.55	0.95	1.68	2.36
SD	0.48		19.10	1.61	0.05	0.08	0.06
NR/ENR50_15phr/ CaCO ₃ _50phr	22.00	2.50	780.00	23.70	1.10	1.69	2.43
	20.10	2.50	704.00	21.36	1.12	1.74	2.27
	21.50	2.50	760.00	22.17	1.21	1.75	2.37
	20.70	2.50	728.00	21.79	1.34	1.81	2.35
	21.50	2.50	760.00	21.11	1.07	1.70	2.28
Average	21.16		746.40	22.03	1.17	1.74	2.34
SD	0.75		30.15	1.02	0.11	0.05	0.07

ตาราง ง – 6 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมการค้า

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_5phr/ commgyp_10phr	20.50	2.50	720.00	23.36	0.80	1.26	1.73
	21.00	2.50	740.00	22.64	0.79	1.27	1.86
	21.00	2.50	740.00	20.60	0.83	1.35	1.89
	22.00	2.50	780.00	22.19	0.88	1.37	1.87
	21.00	2.50	740.00	20.38	0.96	1.49	1.94
Average	21.10		744.00	21.83	0.85	1.35	1.86
SD	0.55		21.91	1.30	0.07	0.09	0.08
NR/ENR25_5phr/ commgyp_20phr	21.00	2.50	740.00	22.12	0.87	1.46	2.00
	20.40	2.50	716.00	24.58	0.97	1.46	2.09
	21.00	2.50	740.00	24.79	1.11	1.70	2.19
	21.20	2.50	748.00	25.76	1.03	1.56	2.10
	20.00	2.50	700.00	22.65	1.13	1.59	2.06
Average	20.72		728.80	23.98	1.02	1.55	2.09
SD	0.50		20.08	1.53	0.11	0.10	0.07
NR/ENR25_5phr/ commgyp_30phr	21.10	2.50	744.00	24.10	1.02	1.65	2.19
	21.50	2.50	760.00	24.52	1.03	1.81	2.47
	20.20	2.50	708.00	21.33	1.07	1.58	2.10
	21.00	2.50	740.00	23.41	1.12	1.77	2.35
	21.00	2.50	740.00	24.19	1.11	1.75	2.41
Average	20.96		738.40	23.51	1.07	1.71	2.31
SD	0.47		18.89	1.28	0.04	0.09	0.15

ตาราง ง – 6 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมการค้า (ต่อ)

Test ID	L	LO	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_5phr/ commgyp_40phr	21.50	2.50	760.00	25.43	1.36	1.89	2.50
	20.00	2.50	700.00	24.52	1.21	1.85	2.53
	21.00	2.50	740.00	25.78	1.32	1.92	2.44
	20.00	2.50	700.00	24.75	1.18	1.84	2.60
	21.50	2.50	760.00	25.81	1.24	1.85	2.45
Average	20.80		732.00	25.26	1.26	1.87	2.51
SD	0.76		30.33	0.59	0.07	0.03	0.06
NR/ENR25_5phr/ commgyp_50phr	20.50	2.50	720.00	21.61	1.22	1.94	2.71
	21.00	2.50	740.00	22.15	1.20	1.99	2.75
	20.60	2.50	724.00	21.84	1.48	1.96	2.51
	21.50	2.50	760.00	21.59	1.23	1.91	2.74
	21.00	2.50	740.00	20.91	1.43	1.93	2.67
Average	20.92		736.80	21.62	1.31	1.95	2.67
SD	0.40		15.85	0.46	0.13	0.03	0.10
NR/ENR25_10phr/ commgyp_10phr	21.00	2.50	740.00	21.24	0.83	1.31	1.80
	21.20	2.50	748.00	20.31	0.98	1.33	1.90
	20.80	2.50	732.00	21.99	0.88	1.23	1.76
	20.00	2.50	700.00	20.15	0.98	1.38	1.87
	21.50	2.50	760.00	22.09	0.83	1.24	1.90
Average	20.90		736.00	21.16	0.90	1.30	1.85
SD	0.57		22.63	0.91	0.08	0.06	0.06

ตาราง ง – 6 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมการค้า (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_10phr/ commgyp_20phr	20.30	2.50	712.00	21.91	0.80	1.37	1.89
	20.50	2.50	720.00	22.30	0.86	1.38	1.95
	21.50	2.50	760.00	22.38	0.87	1.32	0.19
	21.20	2.50	748.00	22.38	0.91	1.46	2.04
	20.40	2.50	716.00	23.09	0.98	1.53	2.15
Average	20.78		731.20	22.41	0.89	1.41	1.64
SD	0.54		21.43	0.43	0.07	0.08	0.82
NR/ENR25_10phr/ commgyp_30phr	21.00	2.50	740.00	24.23	1.03	1.61	2.18
	20.20	2.50	708.00	24.76	1.01	1.54	2.16
	21.00	2.50	740.00	23.04	1.05	1.57	2.21
	20.50	2.50	720.00	22.46	1.29	1.70	2.23
	20.50	2.50	720.00	23.51	1.02	1.59	2.16
Average	20.64		725.60	23.60	1.08	1.60	2.19
SD	0.35		14.03	0.92	0.12	0.06	0.03
NR/ENR25_10phr/ commgyp_40phr	21.00	2.50	740.00	25.41	1.10	1.73	2.33
	20.00	2.50	700.00	24.81	1.16	1.77	2.37
	20.00	2.50	700.00	25.47	1.31	1.72	2.30
	21.30	2.50	752.00	25.11	1.06	1.52	2.19
	20.50	2.50	720.00	24.45	1.20	1.73	2.40
Average	20.56		722.40	25.05	1.17	1.70	2.32
SD	0.59		23.43	0.43	0.10	0.10	0.08

ตาราง ง – 6 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมการค้า (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_10phr/ commgyp_50phr	20.50	2.50	720.00	21.61	1.14	1.79	2.34
	20.50	2.50	720.00	21.97	1.05	1.64	2.28
	20.90	2.50	736.00	21.22	1.08	1.72	2.33
	21.00	2.50	740.00	21.24	1.09	1.60	2.22
	21.00	2.50	740.00	20.96	1.34	1.82	2.43
Average	20.78		731.20	21.40	1.14	1.71	2.32
SD	0.26		10.35	0.39	0.12	0.09	0.08
NR/ENR25_15phr/ commgyp_10phr	20.00	2.50	700.00	22.23	0.96	1.33	1.79
	21.00	2.50	740.00	22.76	0.89	1.33	1.84
	21.00	2.50	740.00	19.04	0.86	1.30	1.86
	20.20	2.50	708.00	20.46	0.94	1.32	1.86
	20.50	2.50	720.00	20.51	0.94	1.46	1.99
Average	20.54		721.60	21.00	0.92	1.35	1.87
SD	0.46		18.24	1.50	0.04	0.07	0.07
NR/ENR25_15phr/ commgyp_20phr	21.00	2.50	740.00	22.66	0.92	1.47	2.07
	21.00	2.50	740.00	21.73	1.02	1.50	2.13
	21.70	2.50	768.00	23.41	0.95	1.48	2.07
	20.00	2.50	700.00	21.57	1.01	1.44	2.05
	20.00	2.50	700.00	23.51	0.97	1.54	2.04
Average	20.74		729.60	22.58	0.97	1.49	2.07
SD	0.73		29.34	0.91	0.04	0.04	0.03

ตาราง ง – 6 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมการค้ำ (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_15phr/ commgyp_30phr	21.00	2.50	740.00	24.89	0.99	1.55	2.19
	20.00	2.50	700.00	25.31	1.15	1.61	2.27
	21.00	2.50	740.00	22.12	1.04	1.47	2.15
	19.50	2.50	680.00	24.20	1.04	1.65	2.23
	19.90	2.50	696.00	24.98	0.99	1.59	2.16
Average	20.28		711.20	24.30	1.04	1.57	2.20
SD	0.68		27.33	1.28	0.06	0.07	0.05
NR/ENR25_15phr/ commgyp_40phr	21.00	2.50	740.00	24.95	1.04	1.71	2.54
	21.50	2.50	760.00	25.19	1.14	1.75	2.29
	19.50	2.50	680.00	26.34	1.70	1.73	2.41
	20.00	2.50	700.00	25.81	1.01	1.72	2.32
	21.50	2.50	760.00	25.48	1.09	1.68	2.30
Average	20.70		728.00	25.55	1.20	1.72	2.37
SD	0.91		36.33	0.54	0.29	0.03	0.11
NR/ENR25_15phr/ commgyp_50phr	20.50	2.50	720.00	22.48	1.16	1.88	2.55
	20.90	2.50	736.00	21.82	1.31	1.99	2.52
	20.00	2.50	700.00	20.88	1.33	1.93	2.61
	20.30	2.50	712.00	21.81	1.28	1.89	2.47
	21.00	2.50	740.00	21.45	1.22	1.89	2.66
Average	20.54		721.60	21.69	1.26	1.91	2.56
SD	0.42		16.64	0.59	0.07	0.05	0.07

ตาราง ง – 6 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมการค้า (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_5phr/ commgyp_10phr	21.00	2.50	740.00	20.87	0.84	1.35	2.00
	20.50	2.50	720.00	24.09	0.90	1.47	2.00
	21.50	2.50	760.00	20.65	0.89	1.45	2.06
	21.00	2.50	740.00	23.21	0.94	1.44	2.05
	20.00	2.50	700.00	20.57	0.86	1.34	1.96
Average	20.80		732.00	21.88	0.89	1.41	2.02
SD	0.57		22.80	1.65	0.04	0.06	0.04
NR/ENR50_5phr/ commgyp_20phr	21.00	2.50	740.00	23.84	0.93	1.39	1.98
	20.50	2.50	720.00	20.91	0.94	1.41	2.01
	20.60	2.50	724.00	23.79	0.84	1.42	2.00
	21.50	2.50	760.00	25.58	0.82	1.42	2.06
	21.00	2.50	740.00	22.37	0.88	1.47	1.98
Average	20.92		736.80	23.30	0.88	1.42	2.00
SD	0.40		15.85	1.75	0.05	0.03	0.03
NR/ENR50_5phr/ commgyp_30phr	21.00	2.50	740.00	23.67	0.96	1.70	2.58
	21.00	2.50	740.00	22.97	0.90	1.66	2.36
	21.00	2.50	740.00	23.66	0.94	1.66	2.28
	21.50	2.50	760.00	24.34	0.92	1.72	2.28
	20.50	2.50	720.00	25.20	0.96	1.72	2.28
Average	21.00		740.00	23.97	0.94	1.69	2.35
SD	0.35		14.14	0.84	0.03	0.03	0.13

ตาราง ง – 6 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมการค้า (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_5phr/ commgyp_40phr	21.00	2.50	740.00	25.32	0.99	1.83	2.39
	21.00	2.50	740.00	24.85	1.14	1.88	2.47
	20.00	2.50	700.00	23.85	1.21	1.73	2.28
	21.00	2.50	740.00	25.55	1.04	1.81	2.47
	21.00	2.50	740.00	25.69	1.15	1.82	2.49
Average	20.80		732.00	25.05	1.11	1.81	2.42
SD	0.45		17.89	0.74	0.09	0.06	0.09
NR/ENR50_5phr/ commgyp_50phr	20.00	2.50	700.00	21.26	1.10	1.73	2.21
	21.30	2.50	752.00	20.65	1.17	1.69	2.26
	20.60	2.50	724.00	20.73	1.04	1.72	2.19
	21.00	2.50	740.00	20.73	1.18	1.77	2.34
	21.00	2.50	740.00	21.44	1.03	1.61	2.05
Average	20.78		731.20	20.96	1.10	1.70	2.21
SD	0.50		20.08	0.36	0.07	0.06	0.11
NR/ENR50_10phr/ commgyp_10phr	20.00	2.50	700.00	20.24	0.83	1.23	1.88
	19.50	2.50	680.00	20.57	0.79	1.31	1.79
	21.00	2.50	740.00	21.50	0.78	1.25	1.82
	21.00	2.50	740.00	20.03	0.80	1.34	1.89
	20.50	2.50	720.00	19.82	0.80	1.32	1.88
Average	20.40		716.00	20.43	0.80	1.29	1.85
SD	0.65		26.08	0.66	0.02	0.05	0.04

ตาราง ง – 6 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมการค้า (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_10phr/ commgyp_20phr	20.10	2.50	704.00	20.52	0.99	1.44	2.02
	21.30	2.50	752.00	21.22	0.87	1.51	2.02
	20.80	2.50	732.00	22.34	0.91	1.57	2.17
	20.20	2.50	708.00	21.61	0.93	1.59	2.20
	21.00	2.50	740.00	21.25	1.10	1.56	2.15
Average	20.68		727.20	21.39	0.96	1.53	2.11
SD	0.52		20.67	0.66	0.09	0.06	0.09
NR/ENR50_10phr/ commgyp_30phr	21.00	2.50	740.00	23.65	0.99	1.59	2.11
	21.00	2.50	740.00	22.38	0.92	1.61	2.15
	20.70	2.50	728.00	24.20	0.95	1.53	2.12
	21.40	2.50	756.00	22.21	0.97	1.44	2.29
	19.50	2.50	680.00	22.00	1.02	1.68	2.22
Average	20.72		728.80	22.89	0.97	1.57	2.18
SD	0.73		29.04	0.98	0.04	0.09	0.08
NR/ENR50_10phr/ commgyp_40phr	20.40	2.50	716.00	24.17	1.08	1.79	2.35
	20.70	2.50	728.00	23.18	1.00	1.73	2.42
	20.50	2.50	720.00	23.62	1.09	1.79	2.36
	21.00	2.50	740.00	23.87	1.10	1.68	2.37
	20.60	2.50	724.00	24.93	1.17	1.85	2.42
Average	20.64		725.60	23.95	1.09	1.77	2.39
SD	0.23		9.21	0.66	0.06	0.07	0.03

ตาราง ง – 6 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีได้ซ์/ยิปซัมการค้า (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_10phr/ commgyp_50phr	21.50	2.50	760.00	22.63	1.38	1.79	2.20
	20.50	2.50	720.00	23.30	0.95	1.69	2.37
	21.00	2.50	740.00	23.58	1.09	1.90	2.50
	20.50	2.50	720.00	21.27	1.05	1.78	2.40
	20.50	2.50	720.00	21.45	1.11	1.72	2.39
Average	20.80		732.00	22.45	1.12	1.77	2.37
SD	0.45		17.89	1.05	0.16	0.08	0.11
NR/ENR50_15phr/ commgyp_10phr	21.40	2.50	756.00	20.31	0.78	1.40	1.97
	20.00	2.50	700.00	19.99	0.76	1.35	1.85
	20.50	2.50	720.00	20.27	0.78	1.24	1.71
	20.30	2.50	712.00	24.32	0.80	1.34	1.95
	21.50	2.50	760.00	20.83	0.83	1.37	1.92
Average	20.74		729.60	21.14	0.79	1.34	1.88
SD	0.67		26.92	1.80	0.03	0.06	0.11
NR/ENR50_15phr/ commgyp_20phr	21.50	2.50	760.00	21.83	0.90	1.42	1.98
	20.60	2.50	724.00	23.64	0.90	1.48	2.07
	21.00	2.50	740.00	20.71	0.80	1.33	2.03
	21.30	2.50	752.00	22.50	0.91	1.48	2.10
	20.00	2.50	700.00	20.25	0.97	1.47	2.03
Average	20.88		735.20	21.79	0.90	1.44	2.04
SD	0.60		23.90	1.37	0.06	0.07	0.05

ตาราง ง – 6 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมการค้า (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_15phr/ commgyp_30phr	21.20	2.50	748.00	23.83	0.95	1.57	2.08
	21.50	2.50	760.00	25.64	0.91	1.52	2.18
	20.10	2.50	704.00	22.71	0.91	1.50	2.07
	20.50	2.50	720.00	24.50	0.91	1.57	2.17
	22.00	2.50	780.00	22.25	0.90	1.56	2.14
Average	21.06		742.40	23.79	0.91	1.55	2.13
SD	0.76		30.54	1.37	0.02	0.03	0.05
NR/ENR50_15phr/ commgyp_40phr	21.50	2.50	760.00	25.55	0.88	1.59	2.29
	20.50	2.50	720.00	23.01	0.92	1.67	2.39
	21.50	2.50	760.00	23.44	0.94	1.61	2.31
	22.50	2.50	800.00	24.10	0.99	1.77	2.42
	21.50	2.50	760.00	25.41	1.01	1.74	2.38
Average	21.50		760.00	24.30	0.95	1.68	2.36
SD	0.71		28.28	1.14	0.05	0.08	0.06
NR/ENR50_15phr/ commgyp_50phr	20.30	2.50	712.00	23.65	1.10	1.69	2.43
	20.80	2.50	732.00	21.31	1.12	1.74	2.27
	20.00	2.50	700.00	22.12	1.21	1.75	2.37
	22.00	2.50	780.00	21.74	1.34	1.81	2.35
	21.50	2.50	760.00	21.06	1.07	1.70	2.28
Average	20.92		736.80	21.98	1.17	1.74	2.34
SD	0.83		33.15	1.02	0.11	0.05	0.07

ตาราง ง – 7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีได้ซ์/ยิปซัมเหลือทิ้ง

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_5phr/ WasteGypsum_10phr	22.00	2.50	780.00	23.71	0.75	1.26	1.73
	21.00	2.50	740.00	22.99	0.79	1.27	1.86
	22.00	2.50	780.00	20.95	0.83	1.35	1.89
	22.00	2.50	780.00	22.54	0.90	1.37	1.87
	21.00	2.50	740.00	20.73	0.96	1.49	1.94
Average	21.60		764.00	22.18	0.84	1.35	1.86
SD	0.55		21.91	1.30	0.09	0.09	0.08
NR/ENR25_5phr/ WasteGypsum_20phr	21.50	2.50	760.00	20.47	0.87	1.46	2.00
	21.80	2.50	772.00	22.93	0.97	1.46	2.09
	21.00	2.50	740.00	23.14	1.11	1.70	2.19
	20.70	2.50	728.00	24.11	1.03	1.56	2.10
	22.00	2.50	780.00	21.00	1.13	1.59	2.06
Average	21.40		756.00	22.33	1.02	1.55	2.09
SD	0.54		21.73	1.53	0.11	0.10	0.07
NR/ENR25_5phr/ WasteGypsum_30phr	21.50	2.50	760.00	23.45	1.02	1.65	2.19
	21.20	2.50	748.00	23.87	1.03	1.81	2.47
	21.40	2.50	756.00	20.68	1.07	1.58	2.10
	21.00	2.50	740.00	22.76	1.12	1.77	2.35
	21.00	2.50	740.00	23.54	1.11	1.75	2.41
Average	21.22		748.80	22.86	1.07	1.71	2.31
SD	0.23		9.12	1.28	0.04	0.09	0.15

ตาราง ง – 7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_5phr/ WasteGypsum_40phr	21.00	2.50	740.00	23.32	1.36	1.89	2.50
	22.00	2.50	780.00	22.41	1.21	1.85	2.53
	21.60	2.50	764.00	23.67	1.32	1.92	2.44
	21.00	2.50	740.00	22.64	1.18	1.84	2.60
	21.50	2.50	760.00	23.70	1.24	1.85	2.45
Average	21.42		756.80	23.15	1.26	1.87	2.51
SD	0.43		17.06	0.59	0.07	0.03	0.06
NR/ENR25_5phr/ WasteGypsum_50phr	20.50	2.50	720.00	22.59	1.22	1.94	2.71
	20.10	2.50	704.00	23.13	1.20	1.99	2.75
	21.50	2.50	760.00	22.82	1.48	1.96	2.51
	21.00	2.50	740.00	22.57	1.23	1.91	2.74
	21.00	2.50	740.00	21.89	1.43	1.93	2.67
Average	20.82		732.80	22.60	1.31	1.95	2.67
SD	0.54		21.43	0.46	0.13	0.03	0.10
NR/ENR25_10phr/ WasteGypsum_10phr	20.70	2.50	728.00	22.22	0.83	1.31	1.89
	21.20	2.50	748.00	21.29	0.98	1.33	1.95
	21.50	2.50	760.00	22.97	0.88	1.23	0.19
	21.20	2.50	748.00	21.13	0.98	1.38	2.04
	21.50	2.50	760.00	23.07	0.83	1.24	2.15
Average	21.22		748.80	22.14	0.90	1.30	1.64
SD	0.33		13.08	0.91	0.08	0.06	0.82

ตาราง ง – 7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีได้ซ์/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_10phr/ WasteGypsum_20phr	21.00	2.50	740.00	21.89	0.80	1.37	1.80
	21.30	2.50	752.00	22.28	0.86	1.38	1.90
	22.00	2.50	780.00	22.36	0.87	1.32	1.76
	20.00	2.50	700.00	22.36	0.91	1.46	1.87
	21.00	2.50	740.00	23.07	0.98	1.53	1.90
Average	21.06		742.40	22.39	0.89	1.41	1.85
SD	0.72		28.79	0.43	0.07	0.08	0.06
NR/ENR25_10phr/ WasteGypsum_30phr	21.10	2.50	744.00	23.21	1.03	1.61	2.18
	21.50	2.50	760.00	23.74	1.01	1.54	2.16
	21.00	2.50	740.00	22.02	1.05	1.57	2.21
	21.50	2.50	760.00	21.44	1.29	1.70	2.23
	20.50	2.50	720.00	22.49	1.02	1.59	2.16
Average	21.12		744.80	22.58	1.08	1.60	2.19
SD	0.41		16.59	0.92	0.12	0.06	0.03
NR/ENR25_10phr/ WasteGypsum_40phr	21.00	2.50	740.00	23.39	1.10	1.73	2.33
	22.00	2.50	780.00	22.79	1.16	1.77	2.37
	20.50	2.50	720.00	23.45	1.31	1.72	2.30
	20.50	2.50	720.00	23.09	1.06	1.52	2.19
	20.50	2.50	720.00	22.43	1.20	1.73	2.40
Average	20.90		736.00	23.03	1.17	1.70	2.32
SD	0.65		26.08	0.43	0.10	0.10	0.08

ตาราง ง – 7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_10phr/ WasteGypsum_50phr	21.50	2.50	760.00	22.59	1.14	1.79	2.34
	20.50	2.50	720.00	22.95	1.05	1.64	2.28
	20.80	2.50	732.00	22.20	1.08	1.72	2.33
	20.50	2.50	720.00	22.22	1.09	1.60	2.22
	21.00	2.50	740.00	21.94	1.34	1.82	2.43
Average	20.86		734.40	22.38	1.14	1.71	2.32
SD	0.42		16.64	0.39	0.12	0.09	0.08
NR/ENR25_15phr/ WasteGypsum_10phr	21.20	2.50	748.00	23.21	0.96	1.33	1.79
	21.00	2.50	740.00	23.74	0.89	1.33	1.84
	22.00	2.50	780.00	20.02	0.86	1.30	1.86
	21.00	2.50	740.00	21.44	0.94	1.32	1.86
	21.00	2.50	740.00	21.49	0.94	1.46	1.99
Average	21.24		749.60	21.98	0.92	1.35	1.87
SD	0.43		17.34	1.50	0.04	0.07	0.07
NR/ENR25_15phr/ WasteGypsum_20phr	20.50	2.50	720.00	22.22	0.92	1.47	2.07
	20.60	2.50	724.00	21.29	1.02	1.50	2.13
	21.40	2.50	756.00	22.97	0.95	1.48	2.07
	21.50	2.50	760.00	21.13	1.01	1.44	2.05
	21.50	2.50	760.00	23.07	0.97	1.54	2.04
Average	21.10		744.00	22.14	0.97	1.49	2.07
SD	0.50		20.20	0.91	0.04	0.04	0.03

ตาราง ง – 7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR25_15phr/ WasteGypsum_30phr	21.00	2.50	740.00	23.45	0.99	1.55	2.19
	20.00	2.50	700.00	23.87	1.15	1.61	2.27
	21.00	2.50	740.00	20.68	1.04	1.47	2.15
	19.50	2.50	680.00	22.76	1.04	1.65	2.23
	21.50	2.50	760.00	23.54	0.99	1.59	2.16
Average	20.60		724.00	22.86	1.04	1.57	2.20
SD	0.82		32.86	1.28	0.06	0.07	0.05
NR/ENR25_15phr/ WasteGypsum_40phr	21.00	2.50	740.00	22.51	1.04	1.71	2.54
	21.50	2.50	760.00	22.75	1.14	1.75	2.29
	20.30	2.50	712.00	23.90	1.70	1.73	2.41
	20.00	2.50	700.00	23.37	1.01	1.72	2.32
	21.50	2.50	760.00	23.04	1.09	1.68	2.30
Average	20.86		734.40	23.11	1.20	1.72	2.37
SD	0.69		27.51	0.54	0.29	0.03	0.11
NR/ENR25_15phr/ WasteGypsum_50phr	21.50	2.50	760.00	21.11	1.16	1.88	2.55
	21.00	2.50	740.00	20.45	1.31	1.99	2.52
	21.50	2.50	760.00	19.51	1.33	1.93	2.61
	21.10	2.50	744.00	20.44	1.28	1.89	2.47
	21.50	2.50	760.00	20.08	1.22	1.89	2.66
Average	21.32		752.80	20.32	1.26	1.91	2.56
SD	0.25		9.96	0.59	0.07	0.05	0.07

ตาราง ง – 7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_5phr/ WasteGypsum_10phr	21.00	2.50	740.00	20.50	0.84	1.35	2.00
	21.70	2.50	768.00	23.72	0.90	1.47	2.00
	21.50	2.50	760.00	20.28	0.89	1.45	2.06
	21.20	2.50	748.00	22.84	0.94	1.44	2.05
	20.00	2.50	700.00	20.20	0.86	1.34	1.96
Average	21.08		743.20	21.51	0.89	1.41	2.02
SD	0.66		26.44	1.65	0.04	0.06	0.04
NR/ENR50_5phr/ WasteGypsum_20phr	21.00	2.50	740.00	22.47	0.93	1.39	1.98
	20.50	2.50	720.00	19.54	0.94	1.41	2.01
	21.50	2.50	760.00	22.42	0.84	1.42	2.00
	21.50	2.50	760.00	24.21	0.82	1.42	2.06
	21.00	2.50	740.00	21.00	0.88	1.47	1.98
Average	21.10		744.00	21.93	0.88	1.42	2.00
SD	0.42		16.73	1.75	0.05	0.03	0.03
NR/ENR50_5phr/ WasteGypsum_30phr	21.00	2.50	740.00	23.30	0.96	1.70	2.58
	20.60	2.50	724.00	22.60	0.90	1.66	2.36
	21.50	2.50	760.00	23.29	0.94	1.66	2.28
	21.50	2.50	760.00	23.97	0.92	1.72	2.28
	20.50	2.50	720.00	24.83	0.96	1.72	2.28
Average	21.02		740.80	23.60	0.94	1.69	2.35
SD	0.48		19.06	0.84	0.03	0.03	0.13

ตาราง ง – 7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีไดซ์/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_5phr/ WasteGypsum_40phr	21.00	2.50	740.00	23.95	0.99	1.73	2.39
	20.50	2.50	720.00	23.48	1.14	1.78	2.47
	20.00	2.50	700.00	22.48	1.21	1.73	2.28
	21.90	2.50	776.00	24.18	1.04	1.71	2.47
	21.00	2.50	740.00	24.32	1.15	1.72	2.49
Average	20.88		735.20	23.68	1.11	1.73	2.42
SD	0.70		28.20	0.74	0.09	0.03	0.09
NR/ENR50_5phr/ WasteGypsum_50phr	20.40	2.50	716.00	21.89	1.10	1.83	2.21
	22.00	2.50	780.00	21.28	1.17	1.79	2.26
	22.00	2.50	780.00	21.36	1.04	1.72	2.19
	20.60	2.50	724.00	21.36	1.18	1.77	2.34
	21.00	2.50	740.00	22.07	1.03	1.61	2.05
Average	21.20		748.00	21.59	1.10	1.74	2.21
SD	0.76		30.46	0.36	0.07	0.09	0.11
NR/ENR50_10phr/ WasteGypsum_10phr	20.00	2.50	700.00	20.87	0.83	1.23	1.88
	20.50	2.50	720.00	21.20	0.79	1.31	1.79
	21.00	2.50	740.00	22.13	0.78	1.25	1.82
	21.00	2.50	740.00	20.66	0.80	1.34	1.89
	20.50	2.50	720.00	20.45	0.80	1.32	1.88
Average	20.60		724.00	21.06	0.80	1.29	1.85
SD	0.42		16.73	0.66	0.02	0.05	0.04

ตาราง ง – 7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID	L	LO	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_10phr/ WasteGypsum_20phr	22.00	2.50	780.00	18.15	0.99	1.44	2.02
	22.50	2.50	800.00	22.85	0.87	1.51	2.02
	22.00	2.50	780.00	24.97	0.91	1.57	2.17
	21.50	2.50	760.00	24.24	0.93	1.59	2.20
	21.10	2.50	744.00	23.88	1.10	1.56	2.15
Average	21.82		772.80	22.82	0.96	1.53	2.11
SD	0.54		21.43	2.72	0.09	0.06	0.09
NR/ENR50_10phr/ WasteGypsum_30phr	22.50	2.50	800.00	26.28	0.99	1.59	2.11
	21.00	2.50	740.00	24.01	0.92	1.61	2.15
	21.00	2.50	740.00	25.83	0.95	1.53	2.12
	21.50	2.50	760.00	23.84	0.97	1.44	2.29
	18.50	2.50	640.00	14.63	1.02	1.68	2.22
Average	20.90		736.00	22.92	0.97	1.57	2.18
SD	1.47		58.99	4.76	0.04	0.09	0.08
NR/ENR50_10phr/ WasteGypsum_40phr	21.50	2.50	760.00	24.80	1.08	1.79	2.35
	21.00	2.50	740.00	23.81	1.00	1.73	2.42
	20.50	2.50	720.00	22.25	1.09	1.79	2.36
	21.00	2.50	740.00	22.50	1.10	1.68	2.37
	21.00	2.50	740.00	23.56	1.17	1.85	2.42
Average	21.00		740.00	23.38	1.09	1.77	2.39
SD	0.35		14.14	1.04	0.06	0.07	0.03

ตาราง ง – 7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีได้ซ์/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_10phr/ WasteGypsum_50phr	21.00	2.50	740.00	23.26	1.38	1.79	2.20
	20.50	2.50	720.00	23.93	0.95	1.69	2.37
	21.00	2.50	740.00	24.21	1.09	1.90	2.50
	20.50	2.50	720.00	21.90	1.05	1.78	2.40
	20.50	2.50	720.00	22.08	1.11	1.72	2.39
Average	20.70		728.00	23.08	1.12	1.77	2.37
SD	0.27		10.95	1.05	0.16	0.08	0.11
NR/ENR50_15phr/ WasteGypsum_10phr	21.50	2.50	760.00	19.94	0.78	1.40	1.97
	20.00	2.50	700.00	17.07	0.76	1.35	1.85
	20.50	2.50	720.00	19.90	0.78	1.24	1.71
	21.00	2.50	740.00	23.95	0.80	1.34	1.95
	21.50	2.50	760.00	20.46	0.83	1.37	1.92
Average	20.90		736.00	20.26	0.79	1.34	1.88
SD	0.65		26.08	2.45	0.03	0.06	0.11
NR/ENR50_15phr/ WasteGypsum_20phr	21.50	2.50	760.00	20.46	0.90	1.42	1.98
	22.00	2.50	780.00	22.27	0.90	1.48	2.07
	21.00	2.50	740.00	19.34	0.80	1.33	2.03
	21.30	2.50	752.00	21.13	0.91	1.48	2.10
	20.00	2.50	700.00	18.88	0.97	1.47	2.03
Average	21.16		746.40	20.42	0.90	1.44	2.04
SD	0.74		29.75	1.37	0.06	0.07	0.05

ตาราง ง – 7 ความทนแรงดึงของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/ยิปซัมเหลือทิ้ง (ต่อ)

Test ID	L	L0	Elongation at break	Tensile strength	M100	M200	M300
NR/ENR50_15phr/ WasteGypsum_30phr	21.30	2.50	752.00	23.18	0.95	1.57	2.08
	21.50	2.50	760.00	20.64	0.91	1.52	2.18
	21.80	2.50	772.00	25.07	0.91	1.50	2.07
	21.10	2.50	744.00	27.73	0.91	1.57	2.17
	22.00	2.50	780.00	23.04	0.90	1.56	2.14
Average	21.54		761.60	23.93	0.91	1.55	2.13
SD	0.36		14.59	2.64	0.02	0.03	0.05
NR/ENR50_15phr/ WasteGypsum_40phr	21.50	2.50	760.00	23.90	0.88	1.59	2.29
	20.50	2.50	720.00	20.64	0.92	1.67	2.39
	21.50	2.50	760.00	26.31	0.94	1.61	2.31
	22.50	2.50	800.00	26.26	0.99	1.77	2.42
	21.50	2.50	760.00	24.85	1.01	1.74	2.38
Average	21.50		760.00	24.39	0.95	1.68	2.36
SD	0.71		28.28	2.33	0.05	0.08	0.06
NR/ENR50_15phr/ WasteGypsum_50phr	22.00	2.50	780.00	25.28	1.10	1.69	2.43
	22.00	2.50	780.00	22.94	1.12	1.74	2.27
	21.50	2.50	760.00	23.75	1.21	1.75	2.37
	22.00	2.50	780.00	23.37	1.34	1.81	2.35
	21.50	2.50	760.00	22.69	1.07	1.70	2.28
Average	21.80		772.00	23.61	1.17	1.74	2.34
SD	0.27		10.95	1.02	0.11	0.05	0.07

ภาคผนวก จ

ความทนแรงฉีกขาด (tear strength) ของยางธรรมชาติ/สารตัวเติม

ตาราง จ-1 ค่าความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม

Test ID.	1	2	3	4	5	Average	SD
NR (STR 5 L)	85.63	85.16	86.28	84.64	85.22	85.39	0.61
NR/ENR25_5phr	86.79	86.89	86.23	86.50	86.33	86.55	0.29
NR/ENR25_10phr	85.35	84.33	85.40	86.34	85.45	85.37	0.71
NR/ENR25_15phr	85.39	85.48	86.95	86.46	85.78	86.01	0.67
NR/ENR50_5phr	86.56	86.38	85.39	86.37	86.76	86.29	0.53
NR/ENR50_10phr	85.48	86.60	86.55	86.90	86.46	86.40	0.54
NR/ENR50_15phr	87.47	84.68	86.57	86.79	85.39	86.18	1.12
NR/CaCO3_10phr	87.78	88.89	90.57	87.57	89.88	88.94	1.30
NR/CaCO3_20phr	80.23	80.97	78.29	76.90	79.39	79.15	1.61
NR/CaCO3_30phr	75.23	72.56	75.91	71.68	74.22	73.92	1.78
NR/CaCO3_40phr	64.37	65.68	65.35	65.23	67.22	65.57	1.04
NR/CaCO3_50phr	69.25	65.26	59.99	67.28	65.48	65.45	3.45
NR/CommGypsum_10phr	90.79	91.01	90.06	90.69	90.69	90.65	0.35
NR/CommGypsum_20phr	76.01	75.49	76.08	75.38	74.98	75.59	0.46
NR/CommGypsum_30phr	70.28	72.78	71.27	71.27	71.96	71.51	0.93
NR/CommGypsum_40phr	66.38	66.36	65.67	65.39	66.38	66.04	0.47
NR/CommGypsum_50phr	58.95	59.28	59.28	59.13	59.18	59.16	0.14
NR/WasteGypsum_10phr	90.78	90.79	91.48	90.77	90.99	90.96	0.30
NR/WasteGypsum_20phr	75.24	76.83	74.98	75.68	75.20	75.59	0.74
NR/WasteGypsum_30phr	71.29	71.27	71.30	71.09	71.59	71.31	0.18
NR/WasteGypsum_40phr	65.39	65.98	65.98	65.39	65.39	65.63	0.32
NR/WasteGypsum_50phr	60.39	59.50	59.49	59.24	59.30	59.58	0.47

ตาราง จ-1 ค่าความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	4	5	Average	SD
NR/ENR25_5phr/CaCO3_10phr	91.79	91.69	91.98	91.59	91.68	91.75	0.15
NR/ENR25_5phr/CaCO3_20phr	75.40	75.40	75.29	75.29	75.99	75.47	0.29
NR/ENR25_5phr/CaCO3_30phr	71.78	71.79	71.38	71.98	71.98	71.78	0.24
NR/ENR25_5phr/CaCO3_40phr	67.39	67.40	68.40	66.93	67.29	67.48	0.55
NR/ENR25_5phr/CaCO3_50phr	60.30	60.29	60.94	60.94	60.94	60.68	0.35
NR/ENR25_10phr/CaCO3_10phr	91.25	90.69	90.99	91.39	91.23	91.11	0.27
NR/ENR25_10phr/CaCO3_20phr	75.98	75.28	75.87	75.29	75.74	75.63	0.33
NR/ENR25_10phr/CaCO3_30phr	71.83	71.98	71.79	71.75	71.28	71.73	0.27
NR/ENR25_10phr/CaCO3_40phr	67.39	67.39	67.98	67.41	67.20	67.47	0.30
NR/ENR25_10phr/CaCO3_50phr	60.78	61.99	60.86	61.50	60.93	61.21	0.52
NR/ENR25_15phr/CaCO3_10phr	91.23	91.05	91.04	91.95	90.28	91.11	0.60
NR/ENR25_15phr/CaCO3_20phr	79.39	79.40	80.98	79.40	79.89	79.81	0.69
NR/ENR25_15phr/CaCO3_30phr	75.38	75.29	75.98	75.28	75.30	75.45	0.30
NR/ENR25_15phr/CaCO3_40phr	70.98	70.49	70.90	70.30	70.98	70.73	0.31
NR/ENR25_15phr/CaCO3_50phr	65.40	65.23	65.87	65.98	65.39	65.57	0.33
NR/ENR50_5phr/CaCO3_10phr	90.48	91.58	90.98	91.98	90.49	91.10	0.67
NR/ENR50_5phr/CaCO3_20phr	79.87	80.39	79.89	80.98	79.98	80.22	0.47
NR/ENR50_5phr/CaCO3_30phr	76.30	75.98	76.39	75.80	76.39	76.17	0.27
NR/ENR50_5phr/CaCO3_40phr	70.94	70.94	70.39	70.60	70.38	70.65	0.28
NR/ENR50_5phr/CaCO3_50phr	66.39	66.19	65.98	65.78	66.00	66.07	0.23
NR/ENR50_10phr/CaCO3_10phr	91.35	92.01	92.31	91.77	90.89	91.67	0.56
NR/ENR50_10phr/CaCO3_20phr	75.29	75.98	74.89	75.11	75.26	75.31	0.41
NR/ENR50_10phr/CaCO3_30phr	70.39	70.30	70.94	69.93	69.98	70.31	0.40
NR/ENR50_10phr/CaCO3_40phr	65.40	65.04	65.39	65.98	65.29	65.42	0.35
NR/ENR50_10phr/CaCO3_50phr	60.39	59.82	60.39	61.39	60.99	60.59	0.60

ตาราง จ-1 ค่าความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	4	5	Average	SD
NR/ENR50_15phr/CaCO3_10phr	91.24	90.28	91.29	92.01	92.19	91.40	0.76
NR/ENR50_15phr/CaCO3_20phr	75.30	75.29	75.90	75.40	75.38	75.45	0.26
NR/ENR50_15phr/CaCO3_30phr	73.29	72.94	72.50	71.29	70.40	72.08	1.21
NR/ENR50_15phr/CaCO3_40phr	65.40	65.98	65.29	67.98	66.49	66.23	1.09
NR/ENR50_15phr/CaCO3_50phr	60.30	60.29	60.40	58.30	59.48	59.75	0.89
NR/ENR25_5phr/CommGyp_10phr	90.88	90.28	90.29	90.28	90.68	90.48	0.28
NR/ENR25_5phr/CommGyp_20phr	76.50	76.30	76.33	75.40	76.39	76.18	0.45
NR/ENR25_5phr/CommGyp_30phr	71.29	71.05	71.83	71.39	71.40	71.39	0.28
NR/ENR25_5phr/CommGyp_40phr	65.40	65.40	65.30	65.30	66.01	65.48	0.30
NR/ENR25_5phr/CommGyp_50phr	60.40	60.30	59.40	60.30	58.40	59.76	0.86
NR/ENR25_10phr/CommGyp_10phr	90.82	90.83	90.88	90.39	90.88	90.76	0.21
NR/ENR25_10phr/CommGyp_20phr	75.40	75.39	75.29	75.92	75.30	75.46	0.26
NR/ENR25_10phr/CommGyp_30phr	70.94	70.49	70.50	70.30	70.78	70.60	0.25
NR/ENR25_10phr/CommGyp_40phr	65.97	65.40	66.00	65.37	64.98	65.54	0.43
NR/ENR25_10phr/CommGyp_50phr	59.38	59.39	59.31	60.03	60.10	59.64	0.39
NR/ENR25_15phr/CommGyp_10phr	91.27	91.10	91.19	91.30	91.68	91.31	0.22
NR/ENR25_15phr/CommGyp_20phr	81.98	81.04	80.98	80.31	81.24	81.11	0.60
NR/ENR25_15phr/CommGyp_30phr	76.09	75.40	75.10	76.31	75.70	75.72	0.50
NR/ENR25_15phr/CommGyp_40phr	70.98	70.39	70.87	69.30	69.40	70.19	0.80
NR/ENR25_15phr/CommGyp_50phr	65.99	65.40	65.09	66.49	65.35	65.66	0.56
NR/ENR50_5phr/CommGyp_10phr	91.30	91.38	91.32	91.38	90.69	91.21	0.30
NR/ENR50_5phr/CommGyp_20phr	79.98	80.94	79.98	80.98	80.98	80.57	0.54
NR/ENR50_5phr/CommGyp_30phr	76.80	76.98	75.34	76.34	74.98	76.09	0.89
NR/ENR50_5phr/CommGyp_40phr	70.49	70.50	71.99	70.39	70.40	70.75	0.69
NR/ENR50_5phr/CommGyp_50phr	67.50	67.40	66.50	67.95	66.50	67.17	0.65

ตาราง จ-1 ค่าความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	4	5	Average	SD
NR/ENR50_10phr/CommGyp_10phr	90.98	91.79	92.00	91.77	91.47	91.60	0.40
NR/ENR50_10phr/CommGyp_20phr	78.50	77.40	76.50	77.40	78.40	77.64	0.83
NR/ENR50_10phr/CommGyp_30phr	72.50	72.98	72.50	72.94	72.98	72.78	0.26
NR/ENR50_10phr/CommGyp_40phr	65.40	65.40	66.50	67.40	67.39	66.42	1.00
NR/ENR50_10phr/CommGyp_50phr	60.40	62.50	62.50	62.40	63.09	62.18	1.03
NR/ENR50_15phr/CommGyp_10phr	91.29	90.99	91.00	92.00	91.66	91.39	0.44
NR/ENR50_15phr/CommGyp_20phr	77.40	77.39	77.98	77.50	78.40	77.73	0.44
NR/ENR50_15phr/CommGyp_30phr	73.87	74.04	73.99	72.40	73.98	73.66	0.71
NR/ENR50_15phr/CommGyp_40phr	67.40	68.40	67.39	68.40	68.93	68.10	0.68
NR/ENR50_15phr/CommGyp_50phr	62.39	63.98	64.39	63.94	63.48	63.64	0.77
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_10phr	90.91	90.91	91.00	91.26	91.28	91.07	0.18
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_20phr	76.50	76.98	76.98	76.98	77.48	76.99	0.35
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_30phr	73.09	73.40	72.94	73.40	72.49	73.06	0.38
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_40phr	68.39	68.50	68.88	68.50	67.60	68.37	0.47
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_50phr	63.98	63.37	63.98	63.49	63.44	63.65	0.30
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_10phr	91.08	92.05	91.47	91.26	91.35	91.44	0.37
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_20phr	77.40	77.50	77.09	77.11	77.98	77.42	0.36
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_30phr	72.40	73.98	74.39	73.40	74.40	73.71	0.84
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_40phr	67.70	67.40	68.10	68.98	68.93	68.22	0.71
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_50phr	62.90	62.83	62.98	62.36	62.18	62.65	0.36
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_10phr	91.94	91.49	91.18	90.39	91.03	91.21	0.57
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_20phr	82.39	81.40	81.04	80.40	82.50	81.54	0.90
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_30phr	76.99	77.40	78.40	77.40	78.93	77.82	0.81
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_40phr	72.98	73.30	72.94	73.98	72.30	73.10	0.61
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_50phr	68.40	68.04	68.93	67.09	68.60	68.21	0.70

ตาราง จ-1 ค่าความทนแรงฉีกขาดของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	4	5	Average	SD
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_10phr	90.39	91.48	91.28	91.29	91.19	91.13	0.43
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_20phr	82.90	82.94	82.39	82.98	82.98	82.84	0.25
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_30phr	77.40	77.31	77.40	77.40	79.00	77.70	0.73
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_40phr	72.40	72.98	73.99	72.40	73.00	72.95	0.65
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_50phr	68.40	68.93	68.30	68.92	68.98	68.71	0.33
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_10phr	91.25	91.68	91.27	91.07	91.57	91.37	0.25
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_20phr	77.39	77.19	77.87	77.40	77.88	77.54	0.31
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_30phr	72.98	72.39	72.98	72.49	72.87	72.74	0.28
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_40phr	68.39	67.39	67.19	67.40	67.40	67.55	0.48
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_50phr	62.94	62.50	62.98	62.98	63.09	62.90	0.23
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_10phr	91.23	92.00	91.80	91.21	92.13	91.68	0.43
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_20phr	77.40	77.50	77.98	77.93	77.50	77.66	0.27
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_30phr	73.98	73.49	73.49	73.89	74.69	73.91	0.49
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_40phr	68.40	69.85	69.39	68.39	69.40	69.08	0.66
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_50phr	63.98	64.09	63.98	64.01	63.09	63.83	0.42

ภาคผนวก จ

การบวมตัวในน้ำมัน (oil swelling) ของยางธรรมชาติ/สารตัวเติม

ตาราง จ – 1 ค่า crosslink density ของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม

Test ID.	1	2	3	Average	SD
NR (STR 5 L)	1.35E-04	1.32E-04	1.32E-04	1.33E-04	1.70E-06
NR/ENR25_5phr	1.41E-04	1.40E-04	1.37E-04	1.39E-04	1.86E-06
NR/ENR25_10phr	1.40E-04	1.41E-04	1.38E-04	1.40E-04	1.60E-06
NR/ENR25_15phr	1.41E-04	1.39E-04	1.40E-04	1.40E-04	8.94E-07
NR/ENR50_5phr	1.39E-04	1.41E-04	1.38E-04	1.39E-04	1.43E-06
NR/ENR50_10phr	1.41E-04	1.41E-04	1.41E-04	1.41E-04	1.26E-07
NR/ENR50_15phr	1.44E-04	1.41E-04	1.41E-04	1.42E-04	1.50E-06
NR/CaCO3_10phr	1.43E-04	1.44E-04	1.45E-04	1.44E-04	1.11E-06
NR/CaCO3_20phr	1.51E-04	1.51E-04	1.58E-04	1.53E-04	4.43E-06
NR/CaCO3_30phr	1.55E-04	1.57E-04	1.62E-04	1.58E-04	3.11E-06
NR/CaCO3_40phr	1.66E-04	1.67E-04	1.72E-04	1.68E-04	3.30E-06
NR/CaCO3_50phr	1.85E-04	1.87E-04	1.86E-04	1.86E-04	8.01E-07
NR/CommGyp_10phr	1.44E-04	1.47E-04	1.43E-04	1.45E-04	1.98E-06
NR/CommGyp_20phr	1.49E-04	1.53E-04	1.50E-04	1.51E-04	1.82E-06
NR/CommGyp_30phr	1.54E-04	1.59E-04	1.56E-04	1.56E-04	2.08E-06
NR/CommGyp_40phr	1.69E-04	1.68E-04	1.63E-04	1.67E-04	2.75E-06
NR/CommGyp_50phr	1.86E-04	1.76E-04	1.81E-04	1.81E-04	4.74E-06
NR/WasteGyp_10phr	1.46E-04	1.42E-04	1.44E-04	1.44E-04	2.04E-06
NR/WasteGyp_20phr	1.50E-04	1.59E-04	1.46E-04	1.52E-04	6.32E-06
NR/WasteGyp_30phr	1.56E-04	1.67E-04	1.54E-04	1.59E-04	6.92E-06
NR/WasteGyp_40phr	1.71E-04	1.77E-04	1.59E-04	1.69E-04	9.14E-06
NR/WasteGyp_50phr	1.84E-04	1.78E-04	1.79E-04	1.81E-04	3.29E-06

ตาราง ข – 1 ค่า crosslink density ของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	Average	SD
NR/ENR25_5phr/CaCO3_10phr	1.47E-04	1.47E-04	1.44E-04	1.46E-04	1.57E-06
NR/ENR25_5phr/CaCO3_20phr	1.62E-04	1.53E-04	1.50E-04	1.55E-04	6.14E-06
NR/ENR25_5phr/CaCO3_30phr	1.67E-04	1.58E-04	1.54E-04	1.60E-04	6.93E-06
NR/ENR25_5phr/CaCO3_40phr	1.79E-04	1.66E-04	1.64E-04	1.70E-04	8.20E-06
NR/ENR25_5phr/CaCO3_50phr	1.84E-04	1.79E-04	1.89E-04	1.84E-04	5.38E-06
NR/ENR25_10phr/CaCO3_10phr	1.49E-04	1.44E-04	1.44E-04	1.46E-04	2.98E-06
NR/ENR25_10phr/CaCO3_20phr	1.51E-04	1.51E-04	1.51E-04	1.51E-04	3.50E-07
NR/ENR25_10phr/CaCO3_30phr	1.51E-04	1.54E-04	1.56E-04	1.54E-04	2.43E-06
NR/ENR25_10phr/CaCO3_40phr	1.77E-04	1.65E-04	1.64E-04	1.69E-04	7.29E-06
NR/ENR25_10phr/CaCO3_50phr	1.89E-04	1.90E-04	1.79E-04	1.86E-04	6.13E-06
NR/ENR25_15phr/CaCO3_10phr	1.46E-04	1.47E-04	1.44E-04	1.46E-04	1.52E-06
NR/ENR25_15phr/CaCO3_20phr	1.61E-04	1.51E-04	1.55E-04	1.56E-04	4.87E-06
NR/ENR25_15phr/CaCO3_30phr	1.70E-04	1.60E-04	1.62E-04	1.64E-04	5.21E-06
NR/ENR25_15phr/CaCO3_40phr	1.85E-04	1.67E-04	1.71E-04	1.75E-04	9.56E-06
NR/ENR25_15phr/CaCO3_50phr	1.88E-04	1.82E-04	1.82E-04	1.84E-04	3.30E-06
NR/ENR50_5phr/CaCO3_10phr	1.46E-04	1.41E-04	1.46E-04	1.45E-04	2.80E-06
NR/ENR50_5phr/CaCO3_20phr	1.60E-04	1.53E-04	1.51E-04	1.55E-04	4.52E-06
NR/ENR50_5phr/CaCO3_30phr	1.68E-04	1.63E-04	1.61E-04	1.64E-04	3.39E-06
NR/ENR50_5phr/CaCO3_40phr	1.84E-04	1.70E-04	1.69E-04	1.75E-04	8.33E-06
NR/ENR50_5phr/CaCO3_50phr	1.86E-04	1.85E-04	1.83E-04	1.85E-04	1.29E-06
NR/ENR50_10phr/CaCO3_10phr	1.48E-04	1.43E-04	1.44E-04	1.45E-04	2.90E-06
NR/ENR50_10phr/CaCO3_20phr	1.52E-04	1.52E-04	1.51E-04	1.52E-04	6.49E-07
NR/ENR50_10phr/CaCO3_30phr	1.59E-04	1.54E-04	1.61E-04	1.58E-04	3.98E-06
NR/ENR50_10phr/CaCO3_40phr	1.70E-04	1.62E-04	1.71E-04	1.68E-04	4.55E-06
NR/ENR50_10phr/CaCO3_50phr	1.84E-04	1.84E-04	1.88E-04	1.85E-04	2.59E-06

ตาราง ข – 1 ค่า crosslink density ของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	Average	SD
NR/ENR50_15phr/CaCO3_10phr	1.43E-04	1.44E-04	1.46E-04	1.44E-04	1.51E-06
NR/ENR50_15phr/CaCO3_20phr	1.61E-04	1.50E-04	1.60E-04	1.57E-04	6.24E-06
NR/ENR50_15phr/CaCO3_30phr	1.68E-04	1.53E-04	1.64E-04	1.62E-04	8.14E-06
NR/ENR50_15phr/CaCO3_40phr	1.81E-04	1.70E-04	1.76E-04	1.76E-04	5.22E-06
NR/ENR50_15phr/CaCO3_50phr	1.83E-04	1.88E-04	1.87E-04	1.86E-04	2.57E-06
NR/ENR25_5phr/CommGyp_10phr	1.45E-04	1.43E-04	1.43E-04	1.44E-04	1.29E-06
NR/ENR25_5phr/CommGyp_20phr	1.56E-04	1.51E-04	1.49E-04	1.52E-04	3.84E-06
NR/ENR25_5phr/CommGyp_30phr	1.63E-04	1.56E-04	1.59E-04	1.59E-04	3.60E-06
NR/ENR25_5phr/CommGyp_40phr	1.73E-04	1.66E-04	1.72E-04	1.70E-04	4.14E-06
NR/ENR25_5phr/CommGyp_50phr	1.79E-04	1.80E-04	1.92E-04	1.84E-04	6.84E-06
NR/ENR25_10phr/CommGyp_10phr	1.43E-04	1.43E-04	1.48E-04	1.45E-04	2.76E-06
NR/ENR25_10phr/CommGyp_20phr	1.47E-04	1.47E-04	1.51E-04	1.48E-04	2.45E-06
NR/ENR25_10phr/CommGyp_30phr	1.53E-04	1.53E-04	1.55E-04	1.54E-04	1.27E-06
NR/ENR25_10phr/CommGyp_40phr	1.67E-04	1.70E-04	1.62E-04	1.66E-04	4.05E-06
NR/ENR25_10phr/CommGyp_50phr	1.86E-04	1.87E-04	1.79E-04	1.84E-04	4.34E-06
NR/ENR25_15phr/CommGyp_10phr	1.42E-04	1.43E-04	1.45E-04	1.43E-04	1.61E-06
NR/ENR25_15phr/CommGyp_20phr	1.51E-04	1.63E-04	1.51E-04	1.55E-04	6.60E-06
NR/ENR25_15phr/CommGyp_30phr	1.52E-04	1.70E-04	1.57E-04	1.60E-04	9.23E-06
NR/ENR25_15phr/CommGyp_40phr	1.60E-04	1.78E-04	1.65E-04	1.68E-04	9.43E-06
NR/ENR25_15phr/CommGyp_50phr	1.77E-04	1.80E-04	1.84E-04	1.81E-04	3.64E-06
NR/ENR50_5phr/CommGyp_10phr	1.47E-04	1.45E-04	1.45E-04	1.45E-04	1.03E-06
NR/ENR50_5phr/CommGyp_20phr	1.51E-04	1.49E-04	1.59E-04	1.53E-04	5.25E-06
NR/ENR50_5phr/CommGyp_30phr	1.53E-04	1.52E-04	1.66E-04	1.57E-04	7.41E-06
NR/ENR50_5phr/CommGyp_40phr	1.66E-04	1.70E-04	1.75E-04	1.70E-04	4.73E-06
NR/ENR50_5phr/CommGyp_50phr	1.80E-04	1.85E-04	1.81E-04	1.82E-04	2.74E-06

ตาราง ข – 1 ค่า crosslink density ของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

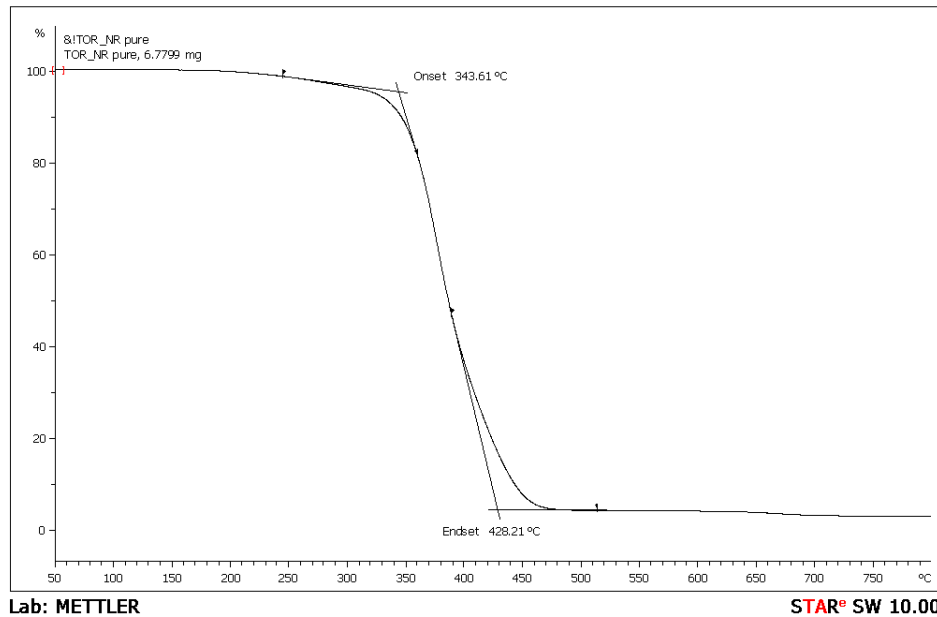
Test ID.	1	2	3	Average	SD
NR/ENR50_10phr/CommGyp_10phr	1.46E-04	1.42E-04	1.45E-04	1.44E-04	2.07E-06
NR/ENR50_10phr/CommGyp_20phr	1.59E-04	1.51E-04	1.48E-04	1.53E-04	6.15E-06
NR/ENR50_10phr/CommGyp_30phr	1.64E-04	1.52E-04	1.60E-04	1.59E-04	6.25E-06
NR/ENR50_10phr/CommGyp_40phr	1.75E-04	1.60E-04	1.63E-04	1.66E-04	7.80E-06
NR/ENR50_10phr/CommGyp_50phr	1.80E-04	1.79E-04	1.77E-04	1.79E-04	1.72E-06
NR/ENR50_15phr/CommGyp_10phr	1.44E-04	1.42E-04	1.46E-04	1.44E-04	1.85E-06
NR/ENR50_15phr/CommGyp_20phr	1.49E-04	1.50E-04	1.50E-04	1.50E-04	6.63E-07
NR/ENR50_15phr/CommGyp_30phr	1.53E-04	1.61E-04	1.57E-04	1.57E-04	4.32E-06
NR/ENR50_15phr/CommGyp_40phr	1.71E-04	1.68E-04	1.65E-04	1.68E-04	3.14E-06
NR/ENR50_15phr/CommGyp_50phr	1.91E-04	1.81E-04	1.78E-04	1.84E-04	6.53E-06
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_10phr	1.40E-04	1.43E-04	1.45E-04	1.43E-04	2.38E-06
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_20phr	1.48E-04	1.52E-04	1.50E-04	1.50E-04	1.79E-06
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_30phr	1.55E-04	1.58E-04	1.54E-04	1.56E-04	1.59E-06
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_40phr	1.62E-04	1.66E-04	1.62E-04	1.63E-04	2.32E-06
NR/ENR25_5phr/WasteGyp_50phr	1.82E-04	1.77E-04	1.76E-04	1.78E-04	3.49E-06
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_10phr	1.44E-04	1.44E-04	1.45E-04	1.44E-04	4.98E-07
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_20phr	1.48E-04	1.48E-04	1.49E-04	1.49E-04	8.19E-07
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_30phr	1.53E-04	1.53E-04	1.59E-04	1.55E-04	3.13E-06
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_40phr	1.70E-04	1.71E-04	1.73E-04	1.71E-04	1.49E-06
NR/ENR25_10phr/WasteGyp_50phr	1.83E-04	1.89E-04	1.89E-04	1.87E-04	3.25E-06
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_10phr	1.40E-04	1.44E-04	1.45E-04	1.43E-04	2.58E-06
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_20phr	1.50E-04	1.52E-04	1.48E-04	1.50E-04	1.96E-06
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_30phr	1.54E-04	1.58E-04	1.55E-04	1.56E-04	2.02E-06
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_40phr	1.70E-04	1.66E-04	1.63E-04	1.66E-04	3.93E-06
NR/ENR25_15phr/WasteGyp_50phr	1.88E-04	1.85E-04	1.85E-04	1.86E-04	1.50E-06

ตาราง ๑ – 1 ค่า crosslink density ของยางธรรมชาติ/ENR/สารตัวเติม (ต่อ)

Test ID.	1	2	3	Average	SD
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_10phr	1.44E-04	1.46E-04	1.43E-04	1.44E-04	1.66E-06
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_20phr	1.48E-04	1.51E-04	1.52E-04	1.50E-04	2.15E-06
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_30phr	1.51E-04	1.56E-04	1.58E-04	1.55E-04	3.42E-06
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_40phr	1.75E-04	1.70E-04	1.67E-04	1.71E-04	4.40E-06
NR/ENR50_5phr/WasteGyp_50phr	1.93E-04	1.84E-04	1.79E-04	1.85E-04	6.98E-06
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_10phr	1.42E-04	1.44E-04	1.46E-04	1.44E-04	1.98E-06
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_20phr	1.46E-04	1.51E-04	1.60E-04	1.52E-04	7.09E-06
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_30phr	1.48E-04	1.56E-04	1.68E-04	1.58E-04	9.82E-06
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_40phr	1.66E-04	1.66E-04	1.78E-04	1.70E-04	7.26E-06
NR/ENR50_10phr/WasteGyp_50phr	1.86E-04	1.86E-04	1.81E-04	1.84E-04	2.90E-06
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_10phr	1.44E-04	1.41E-04	1.43E-04	1.42E-04	1.62E-06
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_20phr	1.52E-04	1.50E-04	1.50E-04	1.51E-04	1.21E-06
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_30phr	1.57E-04	1.55E-04	1.55E-04	1.56E-04	8.65E-07
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_40phr	1.63E-04	1.63E-04	1.70E-04	1.65E-04	4.16E-06
NR/ENR50_15phr/WasteGyp_50phr	1.78E-04	1.82E-04	1.91E-04	1.84E-04	6.84E-06

ภาคผนวก ข

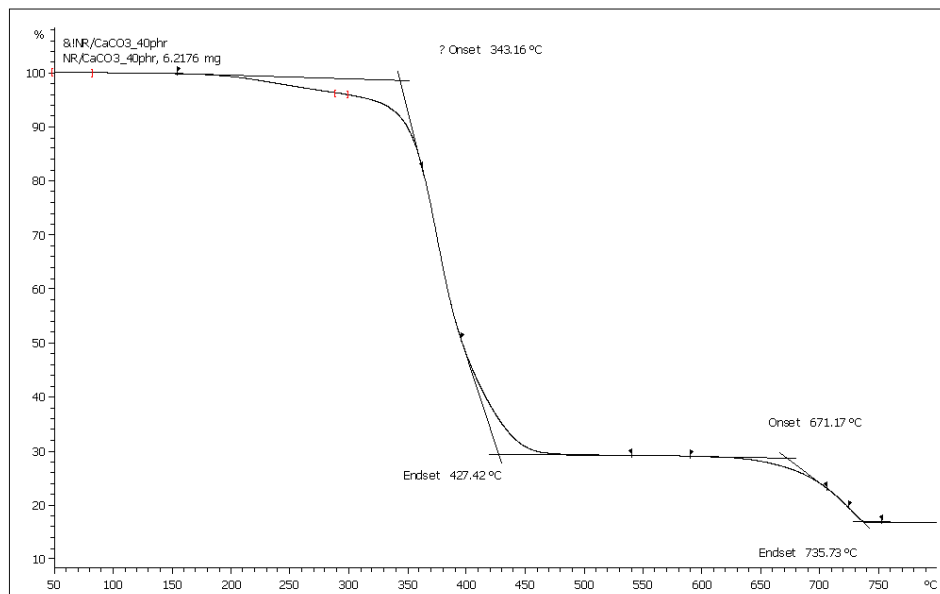
เทอร์โมแกรม TGA แสดงสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักภายใต้ความร้อน (thermal gravimetric analysis, TGA) ของยางธรรมชาติ/
ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/สารตัวเติม



Lab: METTLER

STAR[®] SW 10.00

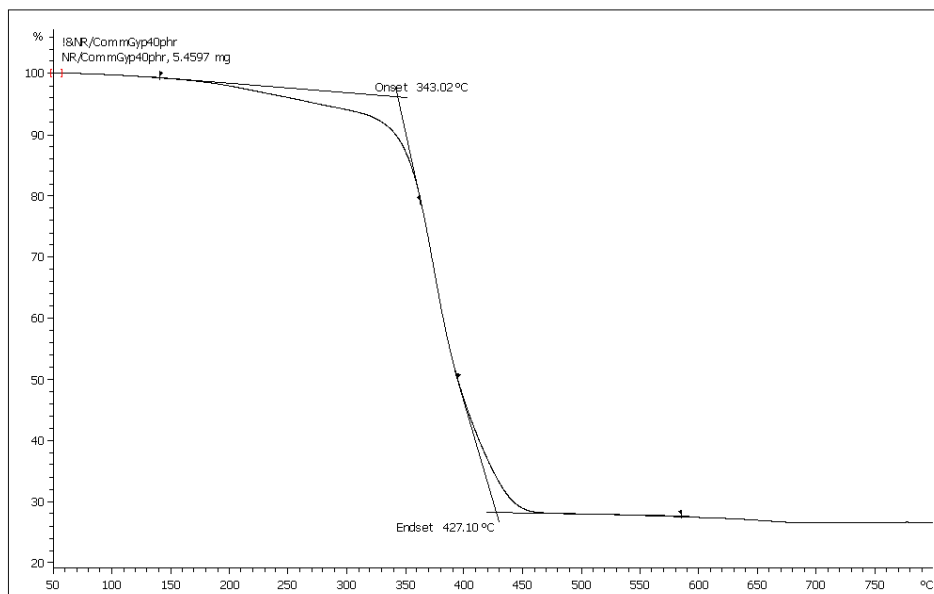
รูป ข – 1 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ



Lab: METTLER

STAR[®] SW 10.00

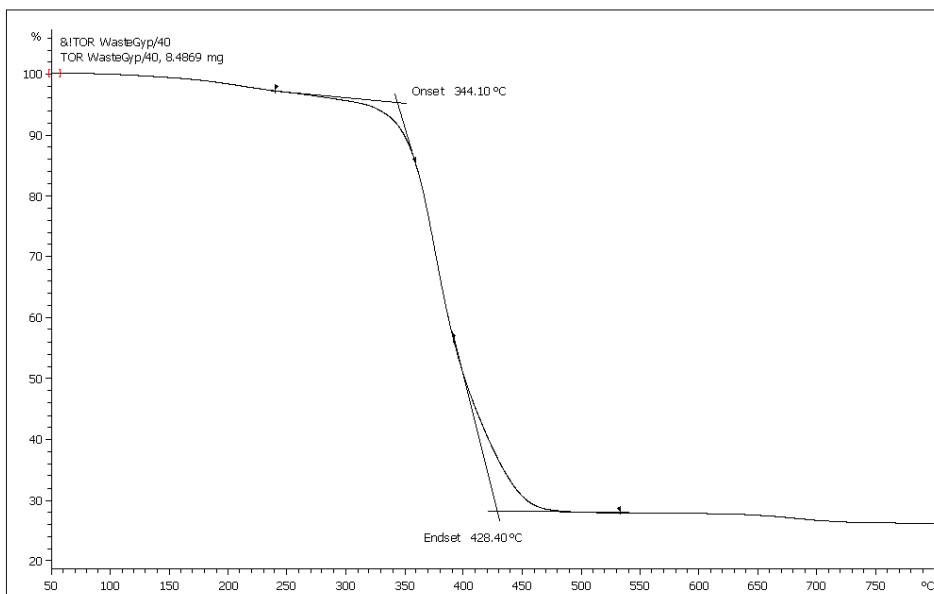
รูป ข – 2 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/แคลเซียมคาร์บอเนต 40 phr



Lab: METTLER

STAR[®] SW 10.00

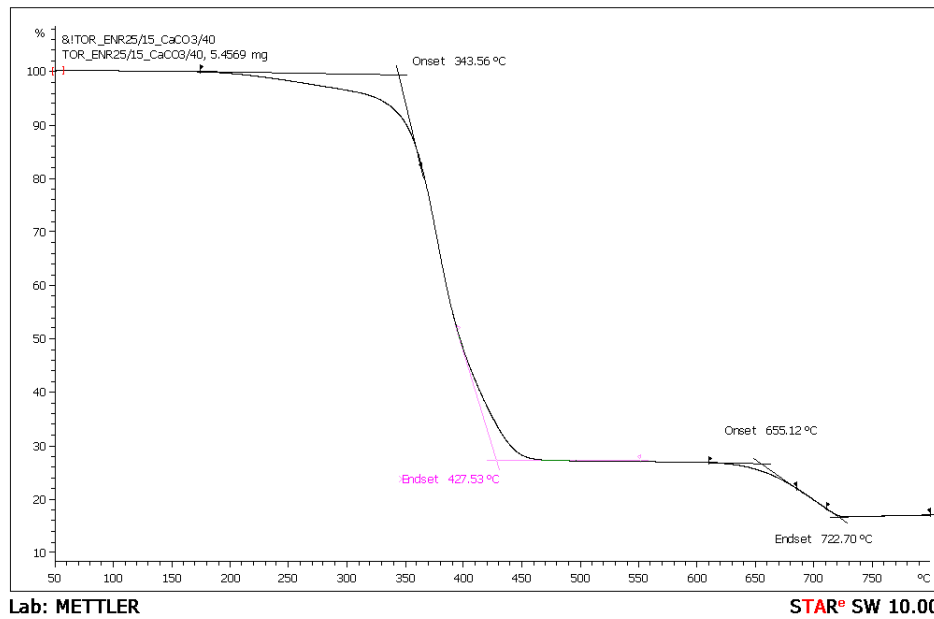
รูป ช - 3 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ยิปซัมการค้ำ 40 phr



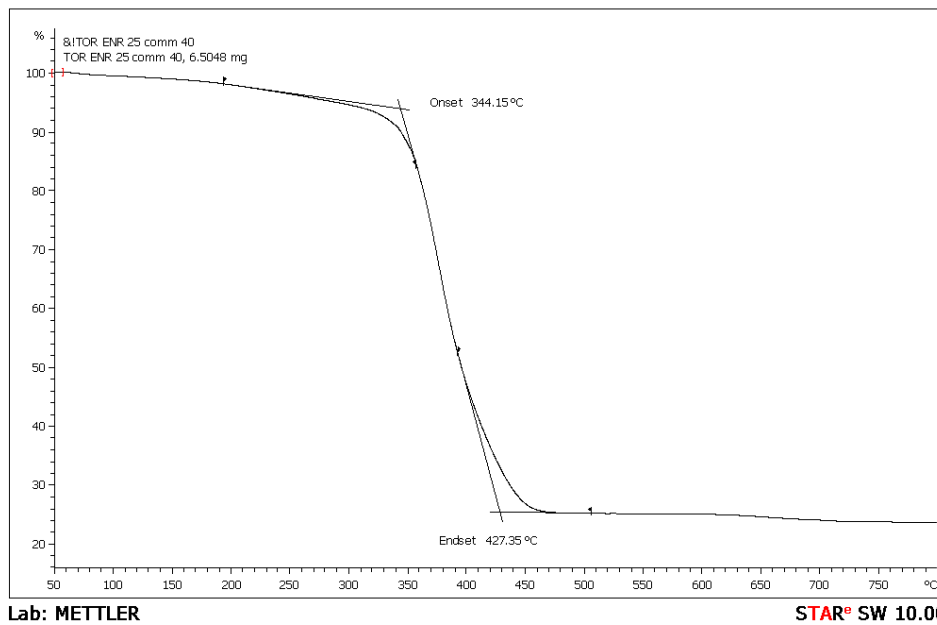
Lab: METTLER

STAR[®] SW 10.00

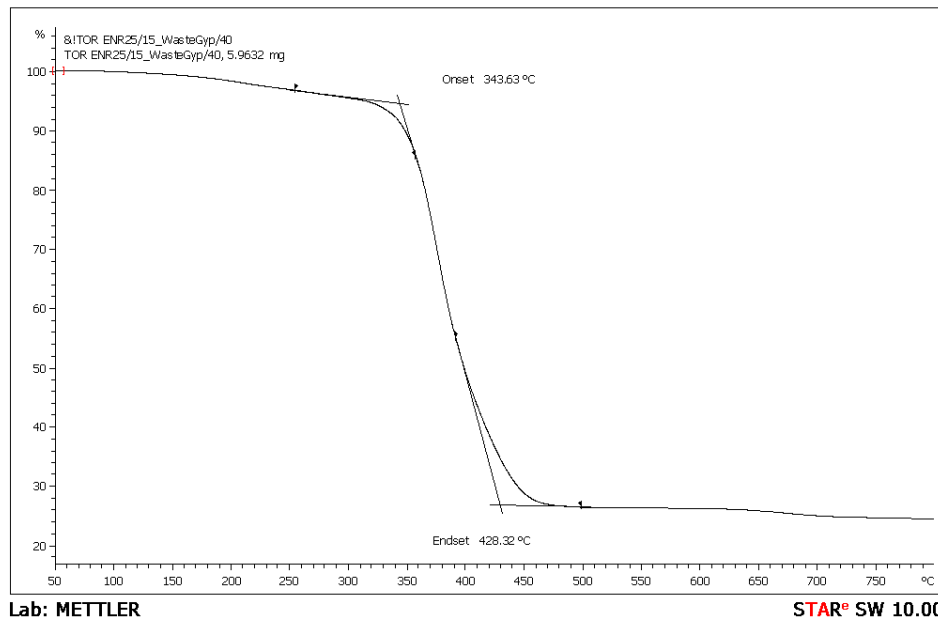
รูป ช - 4 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ยิปซัมเหลือทิ้ง 40 phr



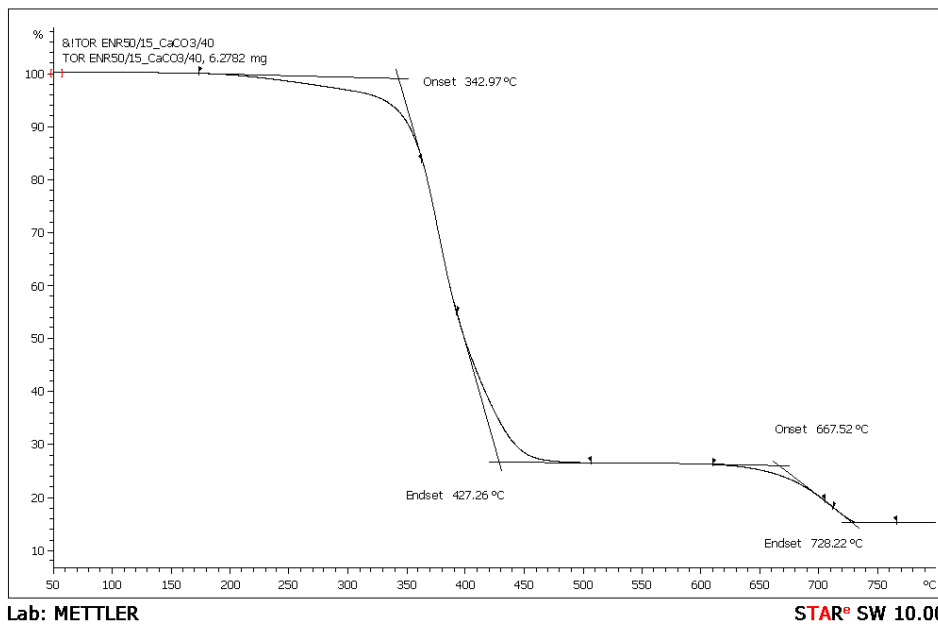
รูป ช – 5 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีได้ซีร้อยละ 25 โดยโมล 15 phr/แคลเซียมคาร์บอเนต 40 phr



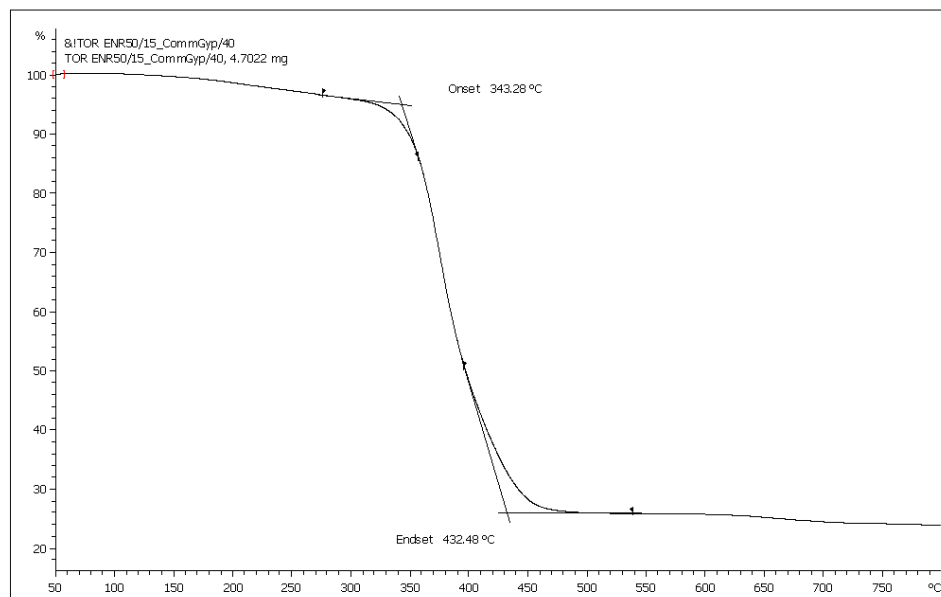
รูป ช – 6 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีได้ซีร้อยละ 25 โดยโมล 15 phr/ยิปซัมการค้า 40 phr



รูป ช – 7 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีได้ร้อยละ 25 โดยโมล 15 phr/ยิปซัมเหลือทิ้ง 40 phr



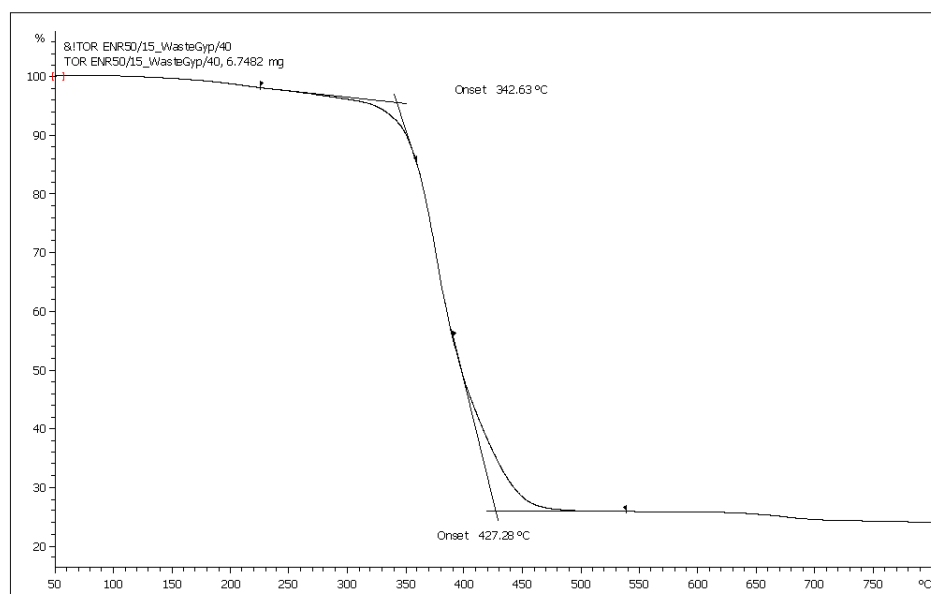
รูป ช – 8 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีได้ร้อยละ 50 โดยโมล 15 phr/แคลเซียมคาร์บอเนต 40 phr



Lab: METTLER

STAR[®] SW 10.00

รูป ช – 9 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีได้ช้ร้อยละ 50 โดยโมล 15 phr/ยิปซัมการค้า 40 phr



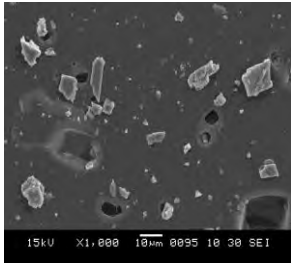
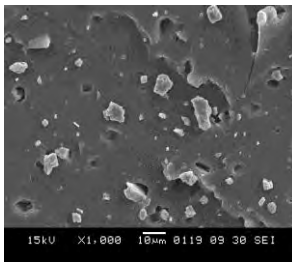
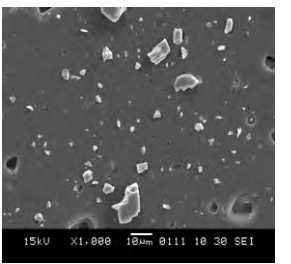
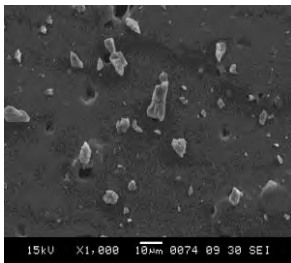
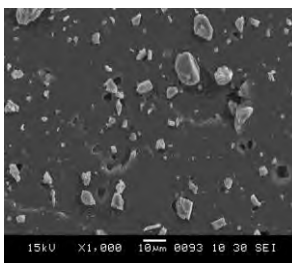
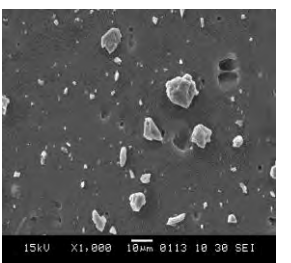
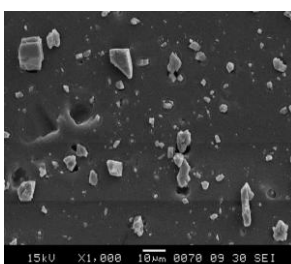
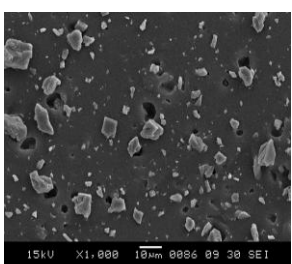
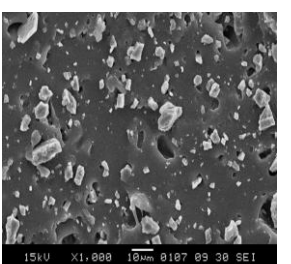
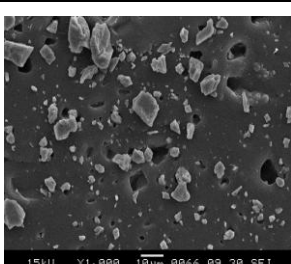
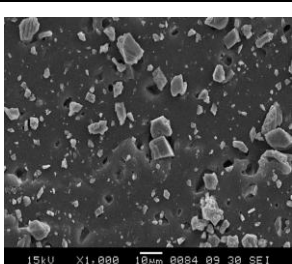
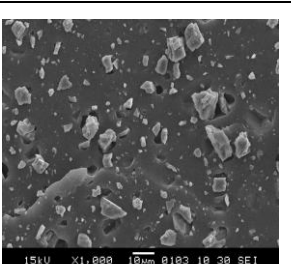
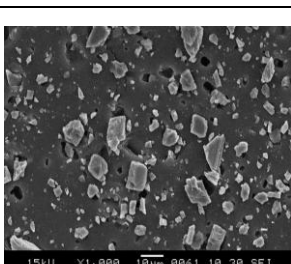
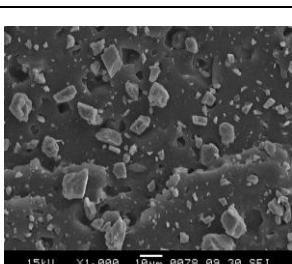
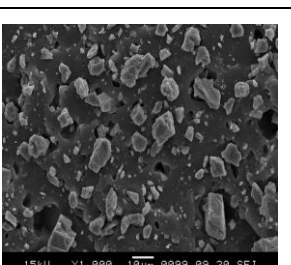
Lab: METTLER

STAR[®] SW 10.00

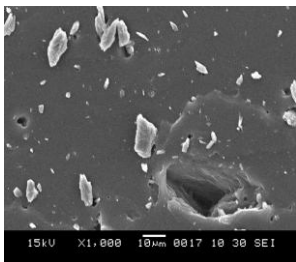
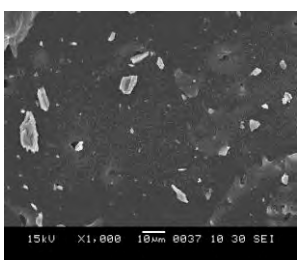
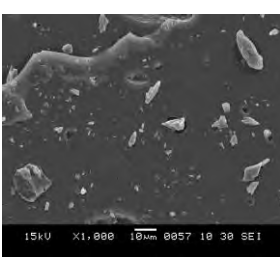
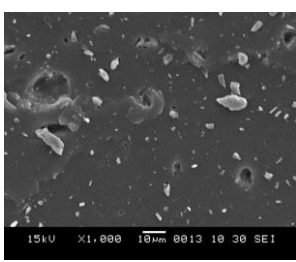
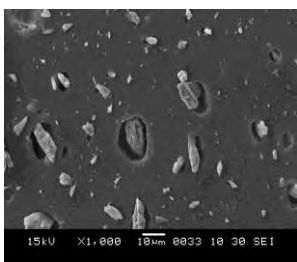
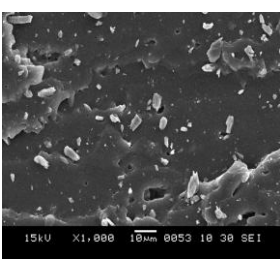
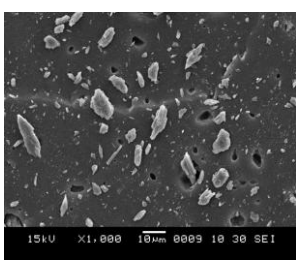
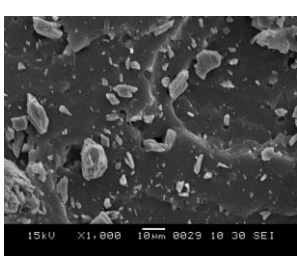
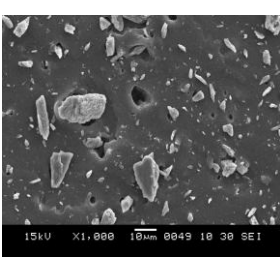
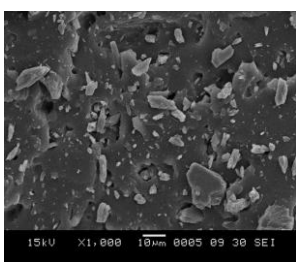
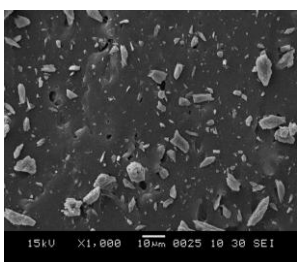
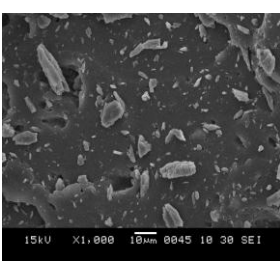
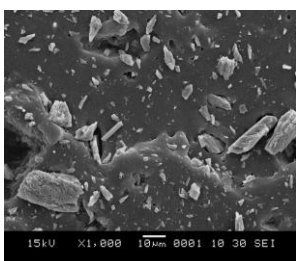
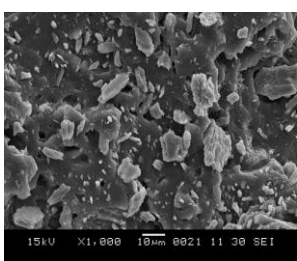
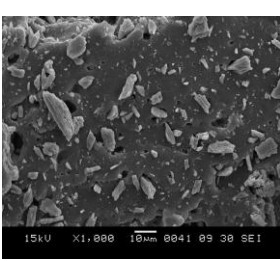
รูป ช – 10 เทอร์โมแกรม TGA ของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอิพอกซีได้ช้ร้อยละ 50 โดยโมล 15 phr/ยิปซัมเหลือทิ้ง 40 phr

ภาคผนวก ซ

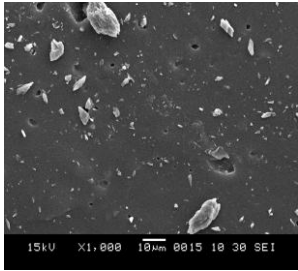
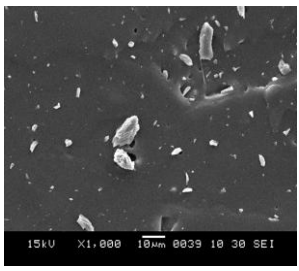
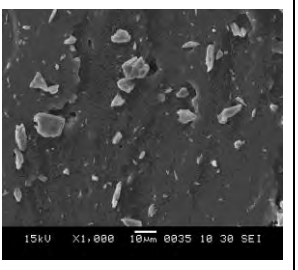
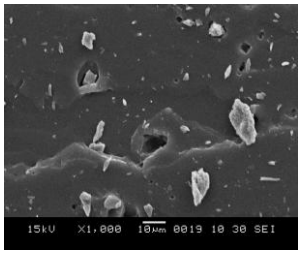
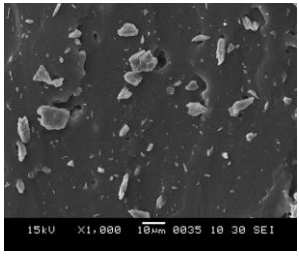
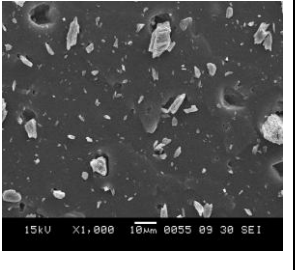
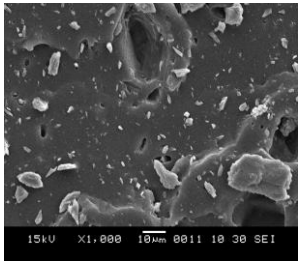
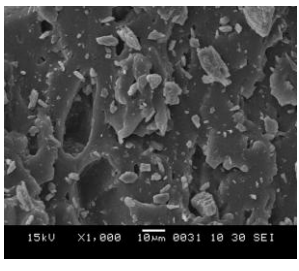
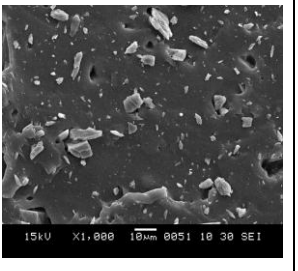
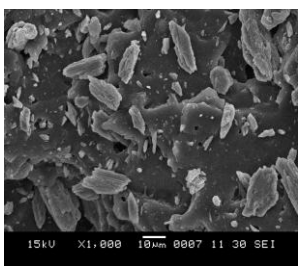
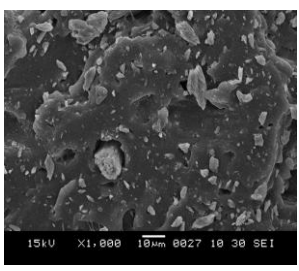
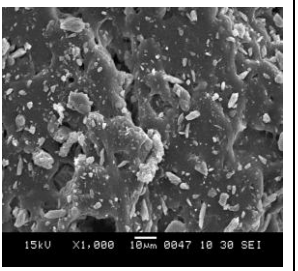
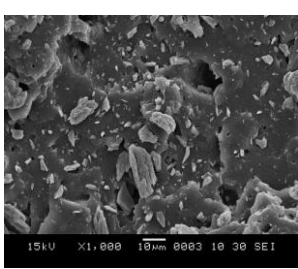
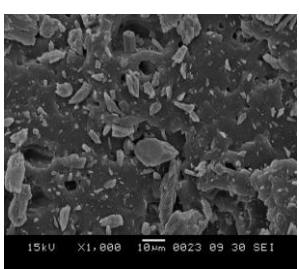
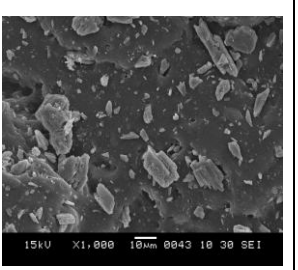
ตารางที่ ซ - 1 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/
แคลเซียมคาร์บอเนต

ปริมาณ ตัวเติม	ยางธรรมชาติ/แคลเซียม คาร์บอเนต	ยางธรรมชาติ/ENR25/ แคลเซียมคาร์บอเนต	ยางธรรมชาติ/ENR50/ แคลเซียมคาร์บอเนต
10 phr			
20 phr			
30 phr			
40 phr			
50 phr			

ตารางที่ ๒ - 2 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซี
ไดซ์/ยิปซัมการค้ำ

ปริมาณ ตัวเติม	ยางธรรมชาติ/ยิปซัม การค้ำ	ยางธรรมชาติ/ENR25/ ยิปซัมการค้ำ	ยางธรรมชาติ/ENR50/ ยิปซัมการค้ำ
10 phr			
20 phr			
30 phr			
40 phr			
50 phr			

ตารางที่ 3 - 3 ภาพ SEM แสดงสัณฐานวิทยาของยางธรรมชาติ/ยางธรรมชาติอีพอกซีไดซ์/
ยิปซัมเหลือทิ้ง

ปริมาณ ตัวเติม	ยางธรรมชาติ/ยิปซัม เหลือทิ้ง	ยางธรรมชาติ/ENR25/ ยิปซัมเหลือทิ้ง	ยางธรรมชาติ/ENR50/ ยิปซัมเหลือทิ้ง
10 phr			
20 phr			
30 phr			
40 phr			
50 phr			

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสิทธิพร งามสุรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคต้นของปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2553