



อิทธิพลของสัดส่วนการผสมของยางธรรมชาติ ยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน และสารเติมแต่งระดับ
นาโนต่อการเกิดโฟมยางบิวทาไดอีน



โดย
นายชินวินท์ แก้วนะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

อิทธิพลของสัดส่วนการผสมของยางธรรมชาติ ยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน และ
สารเติมแต่งระดับนาโนต่อการเกิดโฟมยางบิวทาไดอีน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

EFFECT OF NR, NBR COMPOSITION AND NANOFILLER ON BR FOAMING.



By

MR. Chinnawin KAEWNA

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2017

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	อิทธิพลของสัดส่วนการผสมของยางธรรมชาติ ยางอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน และสารเติมแต่งระดับนาโนต่อการเกิดโฟมยางบิวทาไดอีน
โดย	ชินวินท์ แก้วนะ
สาขาวิชา	วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทร์ฉาย ทองปิ่น

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันทร์ฉาย ทองปิ่น)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ พิชรพันธ์)

57402201 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : ยางธรรมชาติ, ยางบิวทาไดอีน, ยางอะครีโลไนไตรบิวทาไดอีน, โฟมยางผสม, ออร์กาโนเคลย์

นาย ชินวินท์ แก้วนะ: อิทธิพลของสัดส่วนการผสมของยางธรรมชาติ ยางอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน และสารเติมแต่งระดับนาโนต่อการเกิดโฟมยางบิวทาไดอีน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จันท์ฉาย ทองปิ่น

ยางผสม NR กับ BR มีสมบัติด้านความยืดหยุ่นที่ดี และมีความทนทานต่อการขัดถูสูง อย่างไรก็ตามยางผสม BR/NR ยังมีสมบัติบางประการที่ต้องปรับปรุง เช่น ความทนทานต่อตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้ง ซึ่งยาง NBR เป็นยางที่มีขี้ผึ้ง จึงถูกเลือกมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของยางผสม BR/NR โดยโฟมยางเป็นยางที่มีน้ำหนักเบา ทำให้ใช้งานได้หลากหลาย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาสมบัติของยาง BR/NR โดยมีการผสม NBR เพื่อปรับปรุงเรื่องความมีขี้ผึ้ง และนำมาผลิตเป็นโฟมยาง รวมทั้งศึกษาการเติมสารเสริมแรงในโฟมยางผสม ซึ่งอัตราส่วนยางผสม BR/NR/NBR คือ 80/0/20 60/20/20 40/40/20 20/60/20 และ 0/80/20 โดยผสมยางแต่ละชนิดใน kneader mixer และเติมสารเคมี คือ ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur : 5/2/1.5/2 phr ซึ่งในการเตรียมโฟมยางมีสาร Blowing agent คือ CTP/Silica/EW : 0.5/30/10 phr โดยผสมยางกับสารเคมีด้วย Two-roll mill แล้วนำไปตรวจสอบสมบัติการวัลคาไนซ์ด้วย MDR และขึ้นรูปเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติเชิงกล ความทนทานต่อตัวทำละลายไม่มีขี้ผึ้งและอุณหภูมิ โดยใช้ Cloisite 30B เป็นสารเสริมแรง ซึ่งผลการศึกษา SEM ของยางผสมพบว่า NBR เป็นวัฏภาคกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคต่อเนื่อง BR กับ NR สำหรับ Tensile strength, %Elongation at break และ Tear strength ของ NR มากกว่า NBR และ BR ซึ่งยางผสมมีสมบัติดังกล่าวเพิ่มขึ้นเมื่อ NR เพิ่มขึ้น ในขณะที่ Secant modulus และ Hardness ของ NBR มากกว่า BR และ NR ซึ่งยางผสมมีสมบัติดังกล่าวลดลงเมื่อ NR เพิ่มขึ้น โดย %Tension set ของยางทุกอัตราส่วนมีค่าไม่เกิน 5% และการทดสอบความทนทานต่ออุณหภูมิที่ 70 °C พบว่าค่า Secant modulus เพิ่มขึ้นสูงสุดวันที่ 5 ของการทดสอบ โดยผลการศึกษาโฟมยางพบว่าโฟม NR มีขนาดเซลล์โฟมเล็กสุด ทำให้โฟมยางผสมมีขนาดเซลล์เล็กลงเมื่อ NR เพิ่มขึ้น โดยสมบัติเชิงกลของโฟมยางผสมลดลงเมื่อ NR เพิ่มขึ้น อีกทั้งพบว่าการเติม Cloisite 30B ในโฟมยางผสมทำให้ขนาดของเซลล์ และสมบัติเชิงกลของโฟมยางผสมเพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วน

57402201 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Natural rubber (NR), Butadiene rubber (BR), Acrylonitrile butadiene rubber (NBR), Foam rubber blend, organoclay

MR. CHINNAWIN KAEWNA : EFFECT OF NR, NBR COMPOSITION AND NANOFILLER ON BR FOAMING. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR CHANCHAI THONGPIN, Ph.D.

Blend of NR and BR is high flexibility and abrasion resistance. Nevertheless, NR/BR blend has some drawbacks such as poor non-polar solvent resistance. NBR compound has an excellent resistance to non-polar oils. Foam materials have been interested due to its lightweight. The aim of this research was to study the properties of ternary rubber blend and foam based on BR/NR/NBR, including effect of Cloisite 30B (C30B) on rubber foam. The ratios of BR/NR/NBR rubber blend were 80/0/20, 60/20/20, 40/40/20, 20/60/20 and 0/80/20. The rubber blend was mixed in kneader mixer and then cure agents were added in two-roll mill. The curing agents of rubber blends were 5/2/1.5/2 phr of ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur. For rubber foam, blowing agents (CTP/Silica/EW: 0.5/30/10 phr) and 3 phr C30B were added. From the results, it was found that morphology of rubber blend showed the continuous phase of NR and BR, which NBR droplet was disperse phase. Tensile strength, %elongation at break and tear strength of NR were higher than those of NBR and BR even rubber blend were increased with NR content. Secant modulus and hardness of NR were higher than those NBR and BR even rubber blend were increased with NR content. Tension set of rubber blend was less than 5%. The results of thermal aging at 70 °C indicated maximum secant modulus at 5th days of testing. For rubber foam, the cell size and cell wall of rubber foam having NR as major phase was smaller than that of the foam that has BR as a major phase. Mechanical properties were increased with BR content. The rubber foam incorporated with C30B showed better mechanical properties than the rubber foam without C30B.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำ และความอนุเคราะห์จากหลาย ๆ ฝ่าย ที่มีส่วนช่วยสนับสนุน และให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน ซึ่งต้องขอขอบพระคุณดังต่อไปนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ผู้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ กำลังใจ และแรงคิดที่ดีเกี่ยวกับการทำงานวิจัย และการใช้ชีวิต จนสามารถทำงานวิจัยได้สำเร็จ ลุล่วง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ พัทธพันธ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ และให้ความรู้ในการศึกษาเล่าเรียน และคำแนะนำในการทำงานวิจัย

คุณพินิจ เจียรระลิก นักวิทยาศาสตร์ของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการใช้เครื่องมือ การเบิก และการสั่งซื้อสารเคมี และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภรวิช วิศวกรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ ผู้ที่คอยให้ความช่วยเหลือซ่อมแซมบำรุงเครื่องมือ คุณลูกกวาง อุ่นศิริ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่เปิดโอกาสให้ผู้วิจัยได้ใช้สถานที่ และเครื่องมือในการทำงานในครั้งนี้

เพื่อนๆ พี่ ๆ ปริญญาโท และปริญญาเอกทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ คำปรึกษา และความช่วยเหลือในด้านการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์การทดสอบ ตลอดการทำงานวิจัย อีกทั้งบริษัทอินโนเวชั่นเทคโนโลยี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานเครื่องนวดยาง บริษัทยูบีอี กรุ๊ป (ประเทศไทย) ที่ให้ความอนุเคราะห์ยางบิวทาไดอิน และบริษัทเอเอฟซูเปอร์เซลล์ที่ให้ความอนุเคราะห์สารพองฟู

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และน้องชายที่คอยสนับสนุนทั้งในด้านทุนทรัพย์ และให้กำลังใจกระผมตลอดการศึกษาจนกระทั่งดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ชินวินท์ แก้วนะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) [1].....	5
2.1.1 โครงสร้างองค์ประกอบและการสังเคราะห์.....	6
2.1.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์.....	8
2.2 ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber) [2].....	9
2.2.1 ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) [4].....	10
2.2.2 ยางอะคลิโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน (Acrylonitrile-butadiene rubber, NBR)	12
2.3 สารเคมีสำหรับยาง (Additives for Rubber) [8].....	14
2.3.1 สารทำให้ยางคงรูป หรือ สารวัลคาไนซิ่ง (Vulcanizing Agent) [8, 9].....	15

2.3.2 สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Accelerator) [12]	19
2.3.3 สารกระตุ้น (Activator) [8].....	24
2.3.4 สารตัวเติม (Filler) [8].....	25
2.3.5 สารทำให้เกิดฟอง (Chemical foaming agents) [17].....	28
2.3.6 สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders) [11]	32
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	50
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	50
3.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินงานวิจัย	51
3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	54
3.4 การทดสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์.....	58
3.4.1 การศึกษาลักษณะการคงรูปของยาง	58
3.4.2 การวัดความหนาแน่น (Density).....	59
3.4.3 การทดสอบความทนทานต่อการบวมตัว (%Swelling).....	59
3.4.4 การทดสอบความหนืดของยางผสม (Mooney viscosity).....	60
3.4.5 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการดึงยึด (Secant modulus, Tensile strength, Elongation at break).....	60
3.4.6 การทดสอบสมบัติการยืดอยู่ตัว (Tension set)	60
3.4.7 การทดสอบยุบอยู่ตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set)	60
3.4.8 การทดสอบความแข็ง (Hardness).....	61
3.4.9 การทดสอบความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength).....	61
3.4.10 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology).....	61
3.4.10 วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)	62
3.4.11 การศึกษาความทนทานต่ออุณหภูมิ (Thermal aging property).....	62

3.4.12 การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลเชิงสถิติ	62
3.5 สัญลักษณ์และตัวย่อที่ใช้ในงานวิจัย	63
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	66
ลักษณะการผสมของยางที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ vulcanization	66
4.1 ตอนที่ 1 การศึกษายาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR.....	69
4.1.1 Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ BR NR NBR และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR	69
4.1.2 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ ผ่านการ Vulcanized	72
4.1.3 ศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงดึงของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่าน การ Vulcanized.....	74
4.1.4 ศึกษาสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized	78
4.1.5 ศึกษาสมบัติความแข็งที่ผิวของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized.....	79
4.1.6 ศึกษาสมบัติการคืนตัวของยางหลังจากถูกยืดตัวถาวรของยาง BR NR NBR และยาง ผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized.....	80
4.1.7 ศึกษาสมบัติความทนทานต่ออุณหภูมิของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized.....	81
4.1.8 ศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อตัวทำละลายไม่มีขั้วของยาง BR NR NBR และ ยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized.....	82
4.1.9 ศึกษาความหนาแน่นของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized.....	83
4.2 ตอนที่ 2 การศึกษาโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR.....	84
4.2.1 Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ BR NR NBR และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Silica และ Retarder	85

4.2.2	ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลียาไม BR NR NBR และโพลียาไมผสม BR/NR/NBR	87
4.2.3	ศึกษาความหนาแน่นของโพลียาไม BR NR NBR และโพลียาไมผสม BR/NR/NBR.....	92
4.2.4	ศึกษาการขยายตัว (%Expansion) และการหดตัว (%Shrinkage) ของโพลียาไม BR NR NBR และ โพลียาไมผสม BR/NR/NBR.....	93
4.2.5	ศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงดึงของโพลียาไม BR NR NBR และโพลียาไมผสม BR/NR/NBR	96
4.2.6	ศึกษาสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของโพลียาไม BR NR NBR และ โพลียาไมผสม BR/NR/NBR	101
4.2.7	ศึกษาความแข็งแรงที่ผิวของโพลียาไม BR NR NBR และโพลียาไมผสม BR/NR/NBR.....	102
4.2.8	ศึกษาความสามารถในการคืนตัวกลับหลังได้รับแรงกดอัดของโพลียาไม BR NR NBR และโพลียาไมผสม BR/NR/NBR.....	104
4.2.9	การศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อตัวทำละลายไม่มีขี้ของโพลียาไม BR NR NBR และโพลียาไมผสม BR/NR/NBR.....	106
4.3	ตอนที่ 3 ศึกษาโพลียาไมผสมสามส่วน BR/NR/NBR ที่มีการเติมสารเติมแต่ง.....	108
4.3.1	ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลียาไมผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง ...	108
4.3.2	ศึกษาความหนาแน่นของโพลียาไมผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง.....	111
4.3.3	ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ของโพลียาไมผสมสามส่วนที่มีการ เติมสารเติมแต่ง.....	112
4.3.4	ศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงดึงของโพลียาไมผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง	113
4.3.5	ศึกษาความทนทานต่อการฉีกขาดของโพลียาไมผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง	118
4.3.6	ศึกษาความแข็งแรงที่ผิวของโพลียาไมผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง	119
4.3.7	ศึกษาความสามารถในการคืนตัวกลับหลังได้รับแรงกดอัดของโพลียาไมผสมสามส่วนที่มี การเติมสารเติมแต่ง.....	120
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย.....	122
	รายการอ้างอิง	127

ภาคผนวก..... 131

ประวัติผู้เขียน..... 140



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงสารเคมีที่ใช้.....	2
ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของยาง NR BR และ NBR [7].....	13
ตารางที่ 2.2 แสดงประเภทของสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน [11].....	19
ตารางที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันทั่วไป [11].....	20
ตารางที่ 2.4 แสดงข้อจำกัดของปริมาณกำมะถัน และสารเร่งปฏิกิริยาของระบบวัลคาไนซ์ต่าง ๆ [11]	23
ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติของ CFAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [17].....	30
ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติของสาร CFAs (Supercell-EW).....	31
ตารางที่ 2.7 แสดงสารหน่วงปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันทั่วไป	32
ตารางที่ 2.8 แสดงสมบัติต่าง ๆ ของ Retarder CTP [18].....	33
ตารางที่ 2.9 แสดงสมบัติ tensile stress, tensile strain ของยางผสม NR/BR [19].....	34
ตารางที่ 2.10 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ [19]	35
ตารางที่ 2.11 แสดง adhesive force interaction ของยางผสม NR/NBR [22]	39
ตารางที่ 2.12 แสดงการศึกษาการ curing ของยางผสม NBR/BR ที่เติมสารเติมแต่ง [24]	42
ตารางที่ 2.13 แสดงสมบัติเชิงกลของยางผสม NBR/BR ที่เติมสารเติมแต่ง [24].....	43
ตารางที่ 2.14 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างของ NR foam [25].....	45
ตารางที่ 2.15 Crosslinking density ของ BR/NR/SBR foam ที่ปริมาณการ precure ต่างกัน [26]	47
ตารางที่ 2.16 ผลการศึกษา DSC ของ BR/NR/SBR foam ที่ปริมาณ precure ต่างกัน [26]	47
ตารางที่ 2.17 แสดงสมบัติเชิงกลของ BR/NR/SBR foam ที่ปริมาณ precure ต่างกัน [26].....	48
ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนของยางผสม และปริมาณสาร Curing agent.....	54
ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนของโฟมยางผสม และปริมาณสารเติมแต่งที่ใช้.....	56

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณสารเติมแต่งที่ใช้ รวมทั้งสัญลักษณ์แทนสูตรการผสม..... 57

ตารางที่ 4.1 Cure characteristics ของยางคอมปาวด์ BR NR NBR และคอมปาวด์ของ ยางผสม BR/NR/NBR..... 69

ตารางที่ 4.2 Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ BR NR NBR และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Silica และ Retarder..... 85

ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดเซลล์โฟม (Cell size) และ ขนาดผนังเซลล์โฟม (Cell wall) ของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR..... 87

ตารางที่ 4.4 ขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟมของโฟมยางผสมที่เติมและไม่เติม Cloisite 30B 108



สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตยางแท่ง	6
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ	7
ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตยางสังเคราะห์ [3].....	10
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของยางบิวทาไดอิน (a) vinyl-1,2 (b) tran-1,4 (c) cis-1,4 [5]	11
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของยางอะคลิโลไนไตรล์ บิวทาไดอิน [6].....	12
ภาพที่ 2.6 การเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วย sulphur [11].....	16
ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันของ polyisoprene โดย sulphur [9].....	19
ภาพที่ 2.8 แสดงพฤติกรรมที่เกิดปฏิกิริยาของสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน [11].....	22
ภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนท์ [14].....	26
ภาพที่ 2.10 การปรับปรุงพื้นผิวของเคลย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ [15].....	27
ภาพที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่นิยมใช้ในออร์กาโนเคลย์ โดย (A) สายลดแรงตึงผิวที่ประกอบด้วยสารโซ่ตรง 1 สายโซ่และหมู่เมทิล (B) สารลดแรงตึงผิวที่ประกอบด้วยสายโซ่ตรง 1 สายโซ่ และหมู่ไฮดรอกซิล และ (C) สารลดแรงตึงผิวที่ประกอบด้วยสารโซ่ตรง 2 สายโซ่ [15]	27
ภาพที่ 2.12 แสดงสารลดแรงตึงผิวที่ได้จากไขมันทางธรรมชาติ เพื่อใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างของนาโนเคลย์ชนิดต่างๆ [16]	28
ภาพที่ 2.13 แสดงภาพของสาร CFAs (Supercell-EW).....	31
ภาพที่ 2.14 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารหน่วงปฏิกิริยา [11].....	32
ภาพที่ 2.15 แสดง tear strength ของยางผสม NR/BR [19].....	34
ภาพที่ 2. 16 a) การทดสอบ compression set ที่อุณหภูมิ 70 °C เทียบกับปริมาณ NR และ b) การทดสอบ compression stiffness เทียบกับปริมาณ NR [19].....	35
ภาพที่ 2.17 สมบัติเชิงกลของยางผสม NR/BR หลังทำ aging ที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 30 วัน [19].	36
ภาพที่ 2.18 ผลการทดสอบ (A) ความแข็ง (B) ความสามารถในการรับแรงเมื่อถูกดึงยืดได้ 300 % (C) ความสามารถในการรับแรงเมื่อถูกดึงยืดจนขาดของยางผสม NR/BR [20]	37

ภาพที่ 2.19 (a) อัตราการ cut and chip (b) สมบัติการกระด้างกลับของยางผสม NR/BR [20].....	37
ภาพที่ 2.20 แสดงสมบัติเชิงกลของยางผสม SBR/NBR [21].....	38
ภาพที่ 2.21 การเกิด Phase shift ของยางผสม NR/NBR (a) 1/3 และ (b) 1/1 โดยน้ำหนัก [22].	39
ภาพที่ 2.22 ภาพ SEM ของชิ้นงานหลังถูกดึงยืด (a) NR (b) NR/organoclay (c) NR/silica (d) NR/CB [23].....	40
ภาพที่ 2.23 แสดงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ [23].....	41
ภาพที่ 2.24 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันของยางผสม NBR/BR ที่เติมสารเติมแต่ง [24].....	42
ภาพที่ 2.25 แสดงการศึกษา DMTA ของ (A) $\tan \delta$ และ (B) storage modulus เทียบกับอุณหภูมิของยางผสม NBR/BR ที่มีการเติมสารเติมแต่งที่ 3 และ 10 phr [24].....	42
ภาพที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ของ sound absorption coefficient กับความถี่ [25].....	44
ภาพที่ 2.27 แสดง Morphology และ cell-size distribution ของ NR foam (A) NR 140, (B) NR 150, และ (C) NR 160 [25].....	45
ภาพที่ 2.28 ภาพถ่าย SEM ของโฟม BR/SBR/NR ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการ precure: (a) 0%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40%, (e) 50%, (f) 60% และ (g) 70%. [26]	46
ภาพที่ 2.29 TGA และ DTG thermograms ของ BR/SBR/NR foam ที่ปริมาณ precure ต่างกัน [26].....	48
ภาพที่ 2.30 (a) แสดง stress-strain curve (b) แสดงค่า tensile modulus กับปริมาณ blowing agent และ (c) แสดง จำนวน cell และ cell size ของโฟมยาง NR/BR ที่ผสมสารเสริมแรงปริมาณต่างๆ [27].....	49
ภาพที่ 3.1 แสดงการศึกษายางผสม BR/NR/NBR	55
ภาพที่ 3.2 แสดงการศึกษาโฟมยางผสม BR/NR/NBR.....	56
ภาพที่ 3.3 แสดงการศึกษาโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติมสารเติมแต่งระดับนาโน.....	57
ภาพที่ 3.4 เครื่อง Moving die rheometer (MDR) บริษัท Gotec รุ่น M2000 ประเทศไต้หวัน ...	58
ภาพที่ 3.5 แสดงการทดสอบการยุบตัวถาวรของโฟมยางผสม	61
ภาพที่ 3.6 แสดงการทดสอบสมบัติ Thermal aging property ของยางผสม	62

ภาพที่ 4.1 กราฟ torque-time โดย A เป็นยาง BR NR NBR ที่ยังไม่ผ่านการ vulcanized และ B เป็นยางผสม BR/NR/NBR ที่ยังไม่ผ่านการ vulcanized	67
ภาพที่ 4.2 Mooney viscosity ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ยังไม่ผ่านการ vulcanized.....	68
ภาพที่ 4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized แล้ว.....	72
ภาพที่ 4.4 Stress-strain curve โดย A คือ ยาง BR NR NBR และ B คือ ยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized	74
ภาพที่ 4.5 Secant modulus ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized.....	75
ภาพที่ 4.6 Tensile strength ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized.....	76
ภาพที่ 4.7 %Elongation at break ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized.....	78
ภาพที่ 4.8 Tear strength ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized.....	79
ภาพที่ 4.9 Hardness ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized ..	79
ภาพที่ 4.10 Tension set ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized	80
ภาพที่ 4.11 Thermal aging ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านค่า Modulus at 100 %strain ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized.....	81
ภาพที่ 4.12 การบวมตัวของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized A แสดง %Swelling ตั้งแต่เริ่มจนถึง equilibrium และ B แสดง %Swelling ช่วง 12 ชั่วโมงแรก....	82
ภาพที่ 4.13 ความหนาแน่นของยาง BR NR NBR และยางผสมที่ผ่านการ Vulcanized	83
ภาพที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่กำลังขยาย x200 และ x500 โดย A,a). F-BR, B,b). F-NR, C,c). F-NBR, D,d). F-80/0/20, E,e). F-60/20/20, G,g). F-40/40/20, H,h). F-20/60/20 และ I,i). F-0/80/20.....	88

ภาพที่ 4.15 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR โดย A). F-BR, B). F-NR, C). F-NBR, D). F-80/0/20, E). F-60/20/20, G). F-40/40/20, H). F-20/60/20 และ I). F-0/80/20.....	90
ภาพที่ 4.16 จำลองภาพการแตกตัวของ BA ในขณะที่ยางเกิดปฏิกิริยา Vulcanized ในกระบวนการขึ้นรูปโพลียเมอร์.....	92
ภาพที่ 4.17 ความหนาแน่นของโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR.....	92
ภาพที่ 4.18 การขยายตัวของโพลียเมอร์หลังจากออกจากโมลด์ โดยเทียบกับขนาดของโมลด์	94
ภาพที่ 4.19 A) ทิศทางแนวแกน X และ Y ของชิ้นงาน และ B) ขนาดของโมลด์.....	94
ภาพที่ 4.20 การหดคืบตัวของโพลียเมอร์เมื่อเทียบกับตอนขยายตัวเต็มที่ หลังจากพักไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง.....	95
ภาพที่ 4.21 Stress-strain curve โดย A คือ โพลียเมอร์ BR NR NBR และ B คือ โพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR.....	96
ภาพที่ 4.22 Secant modulus ของโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NR.....	97
ภาพที่ 4.23 Specific secant modulus ของโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR	98
ภาพที่ 4.24 Tensile strength ของโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR	99
ภาพที่ 4.25 Specific tensile strength ของโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR	100
ภาพที่ 4.26 %Elongation at break ของโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR.	100
ภาพที่ 4.27 Tear strength ของโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR.....	101
ภาพที่ 4.28 Specific tear strength ของโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR.	102
ภาพที่ 4.29 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR	103
ภาพที่ 4.30 Hardness ของโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR.....	104
ภาพที่ 4.31 Compression set ของโพลียเมอร์ BR NR NBR และโพลียเมอร์ผสม BR/NR/NBR	104

ภาพที่ 4.32 Specific compression set ของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR	106
ภาพที่ 4.33 การบวมตัวของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR โดย A แสดง %Swelling ตั้งแต่เริ่มจนถึง equilibrium และ B แสดง %Swelling ช่วง 21 ชั่วโมงแรก	107
ภาพที่ 4.34 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมยางผสม BR/NR/NB ที่มีการเติม Cloisite30B	109
ภาพที่ 4.35 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยางผสมที่เติมและไม่เติม Cloisite 30B โดย A-C เป็นโฟมยางผสมที่เติม Cloisite 30B และ a-c เป็นโฟมยางผสมที่มีการเติม Cloisite 30B	110
ภาพที่ 4.36 เปรียบเทียบความหนาแน่นของโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B	112
ภาพที่ 4.37 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ของ Cloisite 30B และ โฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Cloisite 30B	113
ภาพที่ 4.38 Stress-strain curve ของโฟมยางผสม ที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B.....	114
ภาพที่ 4.39 Secant modulus at 100 %strain ของโฟมยางผสมที่มีการเติม และไม่เติม Cloisite 30B.....	114
ภาพที่ 4.40 Specific secant modulus ที่ 100 %strain ของโฟมยางผสมที่มีการเติม และไม่เติม Cloisite 30B	115
ภาพที่ 4.41 Tensile strength ของโฟมยางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B.....	116
ภาพที่ 4.42 Specific tensile strength ของโฟมยางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B ..	116
ภาพที่ 4.43 %Elongation at break ของโฟมยางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30	117
ภาพที่ 4.44 Tear strength ของโฟมยางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B.....	118
ภาพที่ 4.45 Specific tear strength ของโฟมยางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B	119
ภาพที่ 4.46 Hardness ของโฟมยางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B	119
ภาพที่ 4.47 Compression set ของโฟมยางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B.....	120
ภาพที่ 4.48 Specific compression set ของโฟมยางผสมที่มีการเติม และไม่เติม Cloisite 30B	121

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) หรือยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย สายพันธุ์ยางธรรมชาติที่พบมากในประเทศไทยคือ *Hevea Brasiliensis* ซึ่งมีสมบัติเชิงกลที่โดดเด่น เช่น สมบัติด้านความยืดหยุ่น การกระดอนและการทนทานต่อการฉีกขาด แต่อย่างไรก็ตามยางธรรมชาติยังมีสมบัติบางประการที่ยังต้องปรับปรุง เช่น การเสื่อมสภาพได้ง่ายเมื่อถูกแสงแดดและความร้อนหรือการบวมตัวเมื่อสัมผัสกับตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงได้คิดค้นยางสังเคราะห์เพื่อนำมาใช้ทดแทนยางธรรมชาติ โดยยางสังเคราะห์ผลิตได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและยางสังเคราะห์มีอยู่หลายชนิด เช่น ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) ยางสไตรีนบิวทาไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR) ยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน (Acrylonitrile-butadiene rubber, NBR) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ยางแต่ละชนิดก็มีสมบัติที่ดี และสมบัติที่ไม่ดีที่แตกต่างกันไป จึงมีแนวคิดในการนำยางแต่ละชนิดมาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้นตามลักษณะการใช้งาน

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ยางทั่วไปมักผลิตจากการใช้ยางผสม ซึ่งหมายถึงการใช้ยางมากกว่าหนึ่งชนิด เพื่อเป็นการส่งเสริมให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติตามที่ต้องการให้มากที่สุด ทำให้สะดวกในการแปรรูปผลิตภัณฑ์ หรือเป็นการลดต้นทุนการผลิตไปด้วย โดยส่วนใหญ่มีการผสมกันสองชนิดหรือสามชนิด เป็นต้น ความเข้ากันได้ของยางที่นำมาผสมถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อสมบัติของยางผสมที่ได้ เนื่องจากยางแต่ละชนิดมักผสมเข้ากันได้ยาก ก่อให้เกิดปัญหาการเกิดการคงรูป และการกระจายของสารเคมี และตัวเติมในยางแต่ละชนิด

โดยในปัจจุบันมีความสนใจในวัสดุประเภทโฟมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความหลากหลายในการใช้งาน และช่วยลดต้นทุนการผลิต ซึ่งโฟมยาง หรือยางฟองน้ำมีลักษณะเป็นรูพรุน ใช้ทำผลิตภัณฑ์จำพวก เบาะนั่ง ที่นอน หมอน เสื้อการนอน ตุ๊กตาและของชำร่วยต่างๆ หลักการสำคัญของการผลิตโฟมยางคือ การทำให้ยางเกิดฟองของอากาศหรือของแก๊สต่างๆขึ้นภายในแล้วทำให้ฟองยางคงรูป โดยใช้สารเคมีและความร้อนเป็นตัวช่วย แต่การทำผลิตภัณฑ์โฟมจากยางนั้นยังประสบปัญหาเรื่องกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนยังไม่ดีพอทำให้ได้เนื้อโฟมไม่สม่ำเสมอ

งานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการทำการศึกษาสภาวะในการขึ้นรูปโพลีเมอร์ผสมของ ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ยางบิวทาไดเอิน (Butadiene rubber, BR) และยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดเอิน (Acrylonitrile-butadiene rubber, NBR) และศึกษาสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สมบัติการไหล รวมทั้งลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยยางผสมของยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดเอิน จะทำให้ได้ยางที่มีสมบัติที่ดี แต่เนื่องจากทั้งยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดเอิน เป็นยางที่ไม่มีขั้ว ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานในสภาวะที่ต้องการความเป็นขั้ว เช่น ในอุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์ หรือพองน้ำดูดซับน้ำมัน เป็นต้น จึงมีแนวคิดในการนำยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดเอิน มาผสมกับยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดเอิน ซึ่งโครงสร้างของยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดเอินส่วนหนึ่งเป็นส่วนของบิวทาไดเอินจึงน่าจะสามารถเข้ากันได้กับยางผสมของยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดเอิน โดยยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดเอินเป็นยางที่มีหมู่ไนไตรล์อยู่ในโครงสร้างซึ่งทำให้มีความเป็นขั้วสูงกว่าทั้งยางธรรมชาติและยางบิวทาไดเอิน และในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาการผสมสารเติมแต่งลงในโพลีเมอร์ผสมของยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดเอิน และยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดเอิน โดยสารเติมแต่งที่ใช้คือ ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสมบัติของยางผสมระหว่างยางบิวทาไดเอิน ยางธรรมชาติ และยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดเอิน
2. เพื่อศึกษาสมบัติของโพลีเมอร์ผสมระหว่างยางบิวทาไดเอิน ยางธรรมชาติ และยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดเอิน
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการผสมสารเติมแต่งระดับนาโนที่มีต่อโพลีเมอร์ผสมระหว่างยางบิวทาไดเอิน ยางธรรมชาติ และยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดเอิน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

วัสดุและสารเคมีที่ใช้

ตารางที่ 1.1 แสดงสารเคมีที่ใช้

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	หน้าที่	ปริมาณ(phr)
1	ยางบิวทาไดเอิน, BR	วัฏภาคหลัก	-
2	ยางธรรมชาติ, NR	วัฏภาคหลัก	-
3	ยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดเอิน, NBR	วัฏภาคหลัก	-

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	หน้าที่	ปริมาณ(phr)
4	2 - 2 ' - Dithiobis (benzothiazole) , MBTS	สารตัวเร่งให้ยางคงรูป	1.5
5	ซิงค์ออกไซด์, ZnO	สารตัวกระตุ้นสารตัวเร่ง	5
6	กรดสเตียริก, Stearic acid	สารตัวกระตุ้นสารตัวเร่ง	2
7	กำมะถัน, S ₈	สารทำให้ยางคงรูป	2
8	Retarder CTP	สารหน่วงปฏิกิริยา	0.5
9	ซิลิกา, Precipitate silica	สารก่อให้เกิดการพองฟู	30
10	Supercell-EW	สารพองฟู	10
11	ออร์กาโนเคลย์, cloisite 30B	สารเติมแต่ง	3

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย

ออกแบบวิธีการทดลองและวางแผนการทดลอง

- ออกแบบและวางแผนการทดลอง
- จัดซื้อสารเคมีและอุปกรณ์ต่าง ๆ

ดำเนินงานวิจัย

- แบ่งเป็น 3 ส่วนได้แก่

ส่วนที่ 1 ศึกษาอย่างผสมของยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) และยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน (Acrylonitrile-butadiene rubber, NBR) ด้วยระบบ CV system โดยทำการผสมยาง BR/NR/NBR ใน Internal mixer จากนั้นนำยางไปผสมกับสารขึ้นรูปอื่นๆ ด้วยเครื่อง Two-roll mill แล้วนำยางผสมไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบ

ส่วนที่ 2 ศึกษาการทำโฟมยางผสม BR/NR/NBR โดยทำการเลือกอัตราส่วนการผสมจากส่วนที่ 1 เพื่อศึกษาสภาวะการ cure และการ foaming ของโฟมยางผสม ซึ่งใช้ Supercell-EW เป็น Blowing agent โดยใช้วิธีการทำ compound rubber เช่นเดียวกับกับส่วนที่ 1 แต่ในขั้นตอนการผสมสารขึ้นรูปยางด้วยเครื่อง two-roll mill ต้องใส่สารก่อให้เกิดการพองฟู และ สารพองฟูก่อน

Sulphur แล้วนำไปหาเวลาในการเริ่ม curing (ts_2) แล้วหาสูตร curing ที่ดี จากนั้นนำสภาวะที่ได้มาทดลองใช้กับทุกอัตราส่วนการผสม แล้วทำการขึ้นรูปเพื่อทดสอบ

ส่วนที่ 3 ทำการศึกษาโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติมสารเติมแต่งระดับนาโน (Nanofiller) คือ ออร์กาโนเคลย์ (Cloisite 30B) โดยผสมกับโฟมยางผสมสามส่วน (Ternary rubber foam) โดยใช้วิธีการทำ foam rubber blend เช่นเดียวกับกับส่วนที่ 2 แต่ในขั้นตอนการผสมสารขึ้นรูปยางด้วย two-roll mill ต้องทำการผสม Nanofiller แล้วนำไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงสมบัติต่าง ๆ ของยางผสมระหว่างยางบิวทาไดอีน ยางธรรมชาติ และยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน
2. ทำให้ทราบถึงสมบัติต่าง ๆ ของโฟมยางผสมระหว่างยางบิวทาไดอีน ยางธรรมชาติ และยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน
3. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลในการผสมสารเติมแต่งระดับนาโนที่มีต่อโฟมยางผสมระหว่างยางบิวทาไดอีน ยางธรรมชาติ และยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน



บทที่ 2

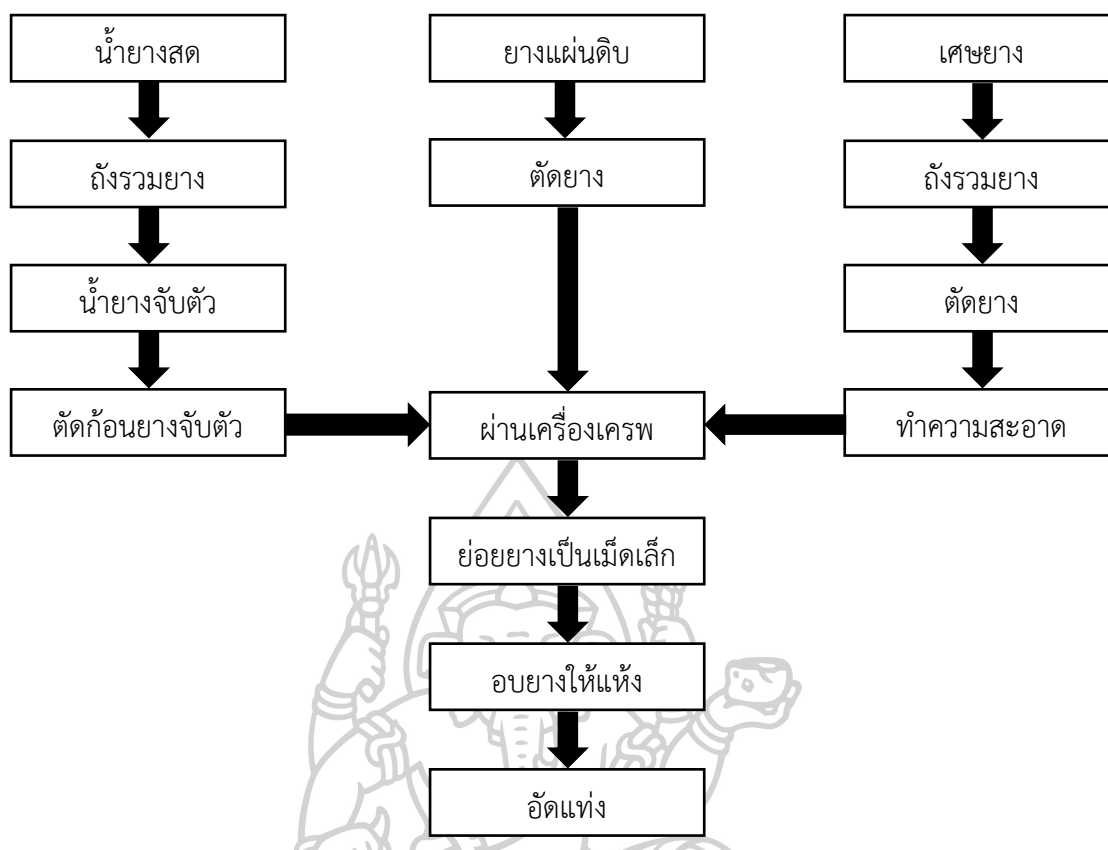
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยาง เป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งมีสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ ในด้านความยืดหยุ่น (elasticity) คือ เมื่อมีการให้แรงดึงหรือกดยาง ยางมีพฤติกรรมยืดหรือยุบได้ และสามารถกลับสู่สภาพเดิมได้เมื่อปล่อยให้ยางเป็นอิสระ นักอุตสาหกรรมยางจึงเรียกยางว่า อีลาสโตเมอร์ (elastomer) ซึ่งยางถือเป็นวัสดุที่มีมีการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย เช่น ยางรถยนต์ ยางปูพื้น ยางกันกระแทก ท่อยางดูดน้ำ สายพานลำเลียง เบาะโฟมยาง เป็นต้น โดยยางที่นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ นั้น สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทตามแหล่งที่มา คือ ยางที่ได้จากต้นพืช เรียกว่า ยางธรรมชาติ (natural rubber) และยางที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี เรียกว่า ยางสังเคราะห์ (synthetic rubber)

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) [1]

ยางธรรมชาติหรือยางพารา ส่วนมากได้จากการกรีดจากต้นยางพาราสายพันธุ์ *Hevea Brasiliensis* ลักษณะของน้ำยางที่ได้เป็นสีขาวขุ่น มีเนื้อยางแห้งประมาณ 30% โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง ให้ได้เนื้อยางแห้ง 60% โดยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่าน้ำยางข้น และมีการเติมแอมโมเนีย และสารเคมีอื่น ๆ เพื่อช่วยรักษาสภาพของน้ำยางข้น หลังจากนั้นทำการส่งออกสู่ตลาดเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง ลูกหุ้มนม เป็นต้น ส่วนยางแห้ง ได้จากการนำน้ำยางสดมาเติมกรด (กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือกรดซัลฟูริก) ทำให้เกิดการจับตัวของน้ำยางเป็นก้อนแข็ง และแยกตัวออกจากน้ำ นำไปรีดด้วยลูกกลิ้ง อบรมควัน เป็นเวลา 2-3 วัน ยางที่ได้จากกระบวนการนี้ คือ ยางแผ่นรมควัน นอกจากนี้ยังมียางเครฟ ซึ่งได้จากการนำเศษยาง (ขี้ยาง) ไปรีดในเครื่องเครฟ และนำสิ่งสกปรกต่าง ๆ ออก ยางชนิดนี้มีสีเข้มจำเป็นต้องใส่สารฟอกสี เพื่อให้ยางมีสีขาวขุ่น เพื่อนำมาทำเป็นยางแท่ง ซึ่งใช้ยางแผ่นรมควัน และยางเครฟมาผสมกัน โดยสามารถแบ่งเกรดยางแท่งได้จากปริมาณกำมะถัน ความอ่อนตัวตามมาตรฐานยางแท่ง

ปัจจุบันอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เริ่มเปลี่ยนมาใช้ยางแท่งหรือยางก้อนเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากยางแท่งเป็นยางมีคุณภาพที่สม่ำเสมอกว่ายางแผ่นรมควัน ผ่านการทดสอบและจัดชั้นเพื่อรับรองคุณภาพตามหลักวิชาการ วัตถุดิบของการผลิตยางแท่ง ได้แก่ น้ำยางหรือยางแผ่นขึ้นอยู่กับเกรดของยางแท่งที่ต้องการผลิต

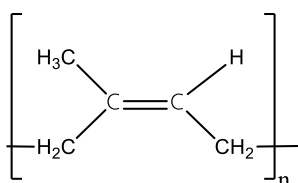


ที่มา : เว็บไซต์สถาบันวิจัยยาง “ข้อมูลวิชาการยางพารา ปี 2550”

ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตยางแท่ง

2.1.1 โครงสร้างองค์ประกอบและการสังเคราะห์

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมี คือ cis-1,4-polyisoprene แสดงดังภาพที่ 2.2 กล่าวคือ มี isoprene (C_5H_8)_n โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 5,000 -20,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็น ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางธรรมชาติจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำ หรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) ทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็อ่อนนุ่มลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี นั่นคือยางมีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความทนทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

โครงสร้างหลักที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของยางธรรมชาติ คือ

- การที่โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ทำใหยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนน้ำมัน แต่เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- เนื่องจากในโครงสร้างมีพันธะคู่ซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ด้วยกำมะถันได้ดี แต่มีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุในการเสื่อมสภาพของยางธรรมชาติ
- มีสายโซ่โมเลกุลที่เคลื่อนไหวไปมาและยืดหยุ่นได้ง่าย ทำใหยางธรรมชาติคงสภาพความยืดหยุ่น (Elastic) ได้ดี
- มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำใหยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง ต้องนำยางไปบดเพื่อให้โมเลกุลเล็กกลงก่อนนำไปใช้

ลักษณะเด่นของธรรมชาติคือ ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากกระทำกับมันหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม หรือมีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงของเดิมอย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติที่ดีมากในด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ยางดิบเพียงอย่างเดียวมีข้อจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพไม่เสถียร โดยคุณสมบัติของยางขึ้นอยู่กับกระบวนการเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิ กล่าวคือยางมีความอ่อนนุ่มและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อนมาก ๆ แต่มีสมบัติแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำมาก ๆ ด้วยเหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่าง ๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่าง ๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (rubber compound) ที่ได้ถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่า วัลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้ เราเรียกว่า "ยางคงรูป" (vulcanizate) ซึ่ง

สมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้มีความเสถียร คือ ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดี ขึ้น

2.1.2 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติวัลคาไนซ์

- ความแข็ง (Hardness)

ยางธรรมชาติสามารถวัลคาไนซ์ให้มีความแข็งแรงต่าง ๆ กันได้ ตั้งแต่นุ่มมาก (30-50 IRHD) ไปจนถึงความแข็งของยางอีโบนซ์ (มากกว่า 98 IRHD) การปรับความแข็งของยางทำได้โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณสารตัวเติมหรือการเปลี่ยนกำมะถัน เช่น ช่วงของการใช้กำมะถันปริมาณ 10-20 phr ส่งผลให้ยางที่มีความแข็งมาก ใช้สำหรับยางปูพื้นหรือยางลูกกลิ้ง

- ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength)

เนื่องจากยางธรรมชาติมีโครงสร้างโมเลกุลที่สม่ำเสมอ เมื่อได้รับแรงดึงสายโซ่สามารถจัดเรียงตัวกันได้แน่นมาก ทำให้ยางธรรมชาติมีความต้านทานต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ซึ่งสมบัตินี้ทำให้ยางธรรมชาติมีความเหมาะสมที่ในการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่มีความบาง นุ่ม และแข็งแรงได้ เช่น ถุงมือผ่าตัด ลูกโป่ง ถุงยางอนามัย และยางรัด เป็นต้น

จากการที่ยางธรรมชาติมีความแข็งแรงสูง จึงทำให้สามารถใช้สารตัวเติมที่ราคาไม่สูง เช่น เคลย์หรือแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ไม่จำเป็นต้องใช้ความแข็งแรงเป็นสมบัติหลัก เช่น ยางรองพื้นรถ ยางปูพื้น เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ทำให้ยางธรรมชาติได้เปรียบกว่ายางชนิดอื่น ๆ ในด้านต้นทุนการผลิต

- ความสามารถในการดึงยืดจนขาด (Elongation at break)

ยางธรรมชาติที่ไม่ผสมสารตัวเติมสามารถยืดได้สูงประมาณ 1000 เปอร์เซ็นต์ ความสามารถในการยืดของยางธรรมชาติลดลงตามการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม และตามระดับของพันธะวัลคาไนซ์ การมีสมบัติด้านการดึงยืดสูงทำให้สามารถใช้ยางธรรมชาติในการทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น เส้นยางยืด ยางรัดของ และลูกโป่ง เป็นต้น

- ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

ยางธรรมชาติมีความสามารถในการตกผลึกขณะถูกดึง ทำให้มีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายางสังเคราะห์อื่น ๆ และความต้านทานการฉีกขาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้สารตัวเติมที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพ

- การใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature flexibility)

คุณสมบัติเด่นอีกอย่างหนึ่งของยางธรรมชาติ คือ การที่มีความสามารถในการยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ โดยมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) อยู่ที่ประมาณ $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นทำให้ยังคงมีความเป็น viscoelastic อยู่แม้ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ โดยหากผสมน้ำมันลงในยางธรรมชาติ ส่งผลให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าเดิมได้

- ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ (Aging resistance)

เนื่องจากการมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทำให้สามารถเกิดการวัลคาไนซ์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อใช้กำมะถันเป็นสารวัลคาไนซ์ แต่ในขณะเดียวกันพันธะคู่ก็อาจทำให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือโอโซน ทำให้เกิดการขาดออกของโมเลกุลได้ง่าย ส่งผลเสียต่อสมบัติต่าง ๆ ดังนั้นยางธรรมชาติจึงไม่เหมาะกับการใช้งานหลายชนิดที่ต้องการความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ จึงมักมีการเติมสารต้านการเกิดออกซิเดชันในการทำวัลคาไนซ์

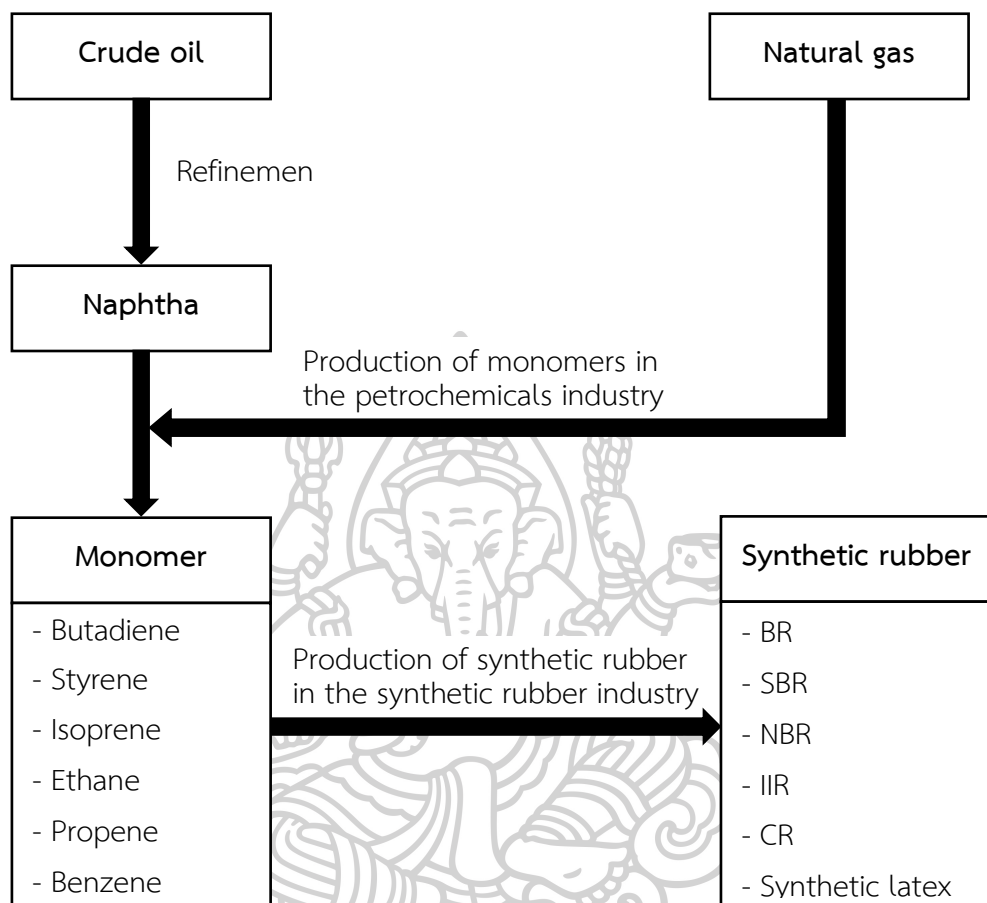
- ความทนทานต่อความร้อน (Heat resistance)

การใช้งานยางธรรมชาติค่อนข้างจำกัดสภาวะการใช้งานที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของยาง โดยยางธรรมชาตินั้นไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลานาน โดยการควบคุมความทนทานของยางธรรมชาติต่อความร้อนสามารถทำได้โดยการควบคุม ระบบและวิธีวัลคาไนซ์ ระบบสารเติมแต่ง และระบบสารต้านออกซิเดชัน โดยระบบ EV system ทำให้ยางมีความทนทานต่อความร้อนที่ดีขึ้น

2.2 ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber) [2]

ยางสังเคราะห์ได้มีการผลิตมานานแล้ว ตั้งแต่ ค.ศ. 1940 ซึ่งสาเหตุที่ทำให้มีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้นในอดีต เนื่องจากการขาดแคลนยางธรรมชาติที่ใช้ในการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์และปัญหาในการขนส่งจากแหล่งผลิตในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 จนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาการผลิตยางสังเคราะห์เพื่อให้ได้ยางที่มีคุณสมบัติตามต้องการในการใช้งานที่สภาวะต่าง ๆ เช่น ที่สภาวะทนต่อน้ำมัน ทนความร้อน ทนความเย็น เป็นต้น การผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตมอนอเมอร์ และขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน แสดงดังภาพที่ 2.3 โดยยางสังเคราะห์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันที่ชนิดของมอนอเมอร์ สามารถแบ่งได้เป็นยางสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียว เช่น ยางพอลิบิวทาไดอิน (Polybutadiene, BR) หรือยางพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene, IIR) เป็นต้น และยางสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์

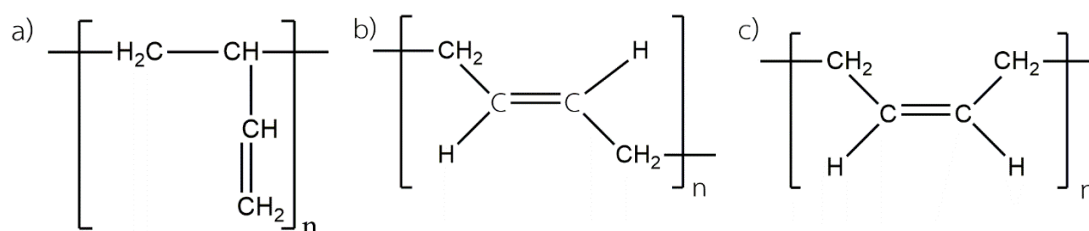
มากกว่า 1 ชนิด เช่น ยางสไตรีน บิวทาไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR) หรือยางอะครีโลไนไตร์บิวทาไดอีน (Acrlonitril-butadiene rubber, NBR) เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตยางสังเคราะห์ [3]

2.2.1 ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) [4]

ยางบิวทาไดอีน (BR) เป็นโพลิเมอร์ของบิวทาไดอีนที่มีรูปแบบของโครงสร้างโมเลกุลที่หลากหลาย แสดงดังภาพที่ 2.4 คือ แบบ tran-1,4 แบบ cis-1,4 หรือแบบ vinyl-1,2 ขึ้นอยู่กับชนิดของ Initiator ที่ใช้ในปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน โดยปกติยางบิวทาไดอีนส่วนใหญ่ไม่ถูกใช้เดี่ยว ๆ ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากการบดผสมยางเป็นไปได้อย่างยากโดยเฉพาะเมื่อทำการบดผสมโดยใช้ลูกกลิ้ง (two-roll mill) เพราะยางไม่สามารถฟอร์มรอบลูกกลิ้งได้ (poor mill banding) ยางชนิดนี้จึงมักใช้การบดผสม (blend) กับยางไม่มีขั้วชนิดอื่น ๆ เช่น ยางธรรมชาติ และยาง SBR

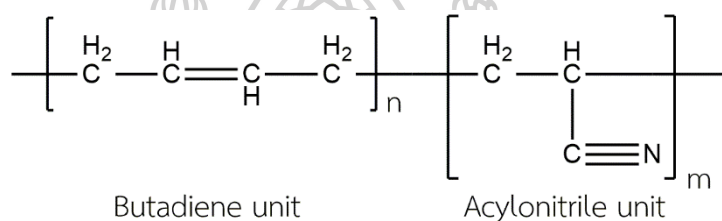


ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของยางบิวทาไดอิน (a) vinyl-1,2 (b) tran-1,4 (c) cis-1,4 [5]

ยางบิวทาไดอินมีสมบัติพิเศษคือมีความทนทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูงมาก แต่มีความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามการผสมยางชนิดนี้กับยางธรรมชาติหรือยาง SBR ซึ่งทำให้ได้ยางคงรูปที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ในทำนองเดียวกันสมบัติบางประการของยางธรรมชาติและยาง SBR ถูกปรับให้ดีขึ้น ซึ่งได้แก่ ความทนต่อการขัดถูดีขึ้น ยางมีความยืดหยุ่นมากขึ้นและยางยังคงสมบัติความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ (good low temperature flexibility) ทำให้กว่า 90 % ของยางบิวทาไดอินจึงถูกใช้ร่วมกับยางธรรมชาติและยาง SBR เช่น ในการผลิตดอกยาง (tread) ของยางรถยนต์ เพราะนอกจากมีผลทำให้ดอกยางมีความทนทานต่อการขัดถูสูงขึ้นแล้ว ความร้อนสะสม (heat buildup) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานก็ต่ำลง ยางมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูงขึ้น นอกจากนี้ยางผสมที่ได้จากการเติมยางบิวทาไดอินมีความทนต่อการเสื่อมสภาพเมื่อทำให้คงรูปเกินจุดสูงสุด (reversion resistance on overcure) ในระหว่างกระบวนการผลิต และที่สำคัญยางชนิดนี้ยังช่วยให้ยางล้อรถมีสมบัติการต้านการหมุน (rolling resistance) ลดลง ทำให้ลดการสิ้นเปลืองน้ำมันขณะขับเคลื่อนรถ อย่างไรก็ตามการเติมยางบิวทาไดอินลงไปปริมาณมากเกินไปก็ส่งผลต่อการเกาะถนนของล้อเสียไป โดยเฉพาะในถนนที่เปียก ด้วยเหตุนี้จึงต้องผสมยางบิวทาไดอินในการผลิตโครงยาง (carcass) แก้มยาง (sidewall) และยางบริเวณโครงลวด (bead compound) นอกจากนี้ยางบิวทาไดอินยังถูกใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความทนต่อการสึกหรอหรือทนต่อการขัดถูที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า ยางสายพานลำเลียง และยังใช้ในการผลิตยางกันกระแทก สายพานส่งกำลัง (transmission belt) ยางกันสะเทือน (shock absorber pads) เป็นต้น

2.2.2 ยางอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน (Acrylonitrile-butadiene rubber, NBR) [1]

ยางอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน (NBR) เป็นโคพอลิเมอร์ของ อะครีโลไนไตรล์ และบิวทาไดอีน แสดงโครงสร้างดังภาพที่ 2.5 ยางชนิดนี้มีความเป็นขั้วสูง ยางชนิดนี้จึงมีสมบัติเด่นคือทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม และตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี เนื่องจากยางชนิดนี้ประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนที่เป็นบิวทาไดอีน ซึ่งมีสมบัติด้านความยืดหยุ่น และส่วนที่เป็นอะครีโลไนไตรล์ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้สมบัติของยาง NBR เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ หากยิ่งเพิ่มปริมาณ อะครีโลไนไตรล์ ทำให้มีความทนต่อน้ำมันและตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนสูงขึ้น การกระด้างกระดอนต่ำลง compression set น้อยลง อัตราการซึมผ่านก๊าซลดลง สมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำลดลง ความทนทานต่อความร้อนและโอโซนสูงขึ้น ความต้านทานการขีดถูสูงขึ้น ความแข็งและความทนทานต่อแรงดึงสูงขึ้น ความหนาแน่นสูงขึ้น



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของยางอะครีโลไนไตรล์ บิวทาไดอีน [6]

สมบัติทั่วไปของยาง NBR คือมีความยืดหยุ่น ความทนต่อแรงดึง และความเป็นฉนวนไฟฟ้าค่อนข้างต่ำ จำเป็นต้องเติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติดังกล่าว แต่ยาง NBR ก็มีสมบัติเด่นหลายข้อ เช่น ความต้านทานต่อการขีดถู ความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ ความทนทานต่อน้ำมันและสารเคมี นอกจากนี้ NBR ยังมีการซึมผ่านของก๊าซต่ำมาก อุณหภูมิการใช้งานอยู่ในช่วงประมาณ -40 ถึง 100 องศาเซลเซียส

การใช้งานส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้กับงานที่ต้องสัมผัสน้ำมัน ทนทานต่อความร้อน และต้านทานต่อการขีดถู ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ประเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมข้อต่อ สายพานลำเลียง ท่อดูดหรือส่งน้ำมัน ท่อยางเสริมแรง ยางบุภาชนะ ยางเคลือบลูกกลิ้ง รองเท้าบูท พื้นและสันรองเท้า เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าทั้งยางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์แต่ละชนิดมีข้อดี และข้อด้อยที่แตกต่างกัน จึงได้มีแนวคิดในการผสมยางแต่ละชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามการใช้งาน โดยได้เปรียบเทียบสมบัติที่สำคัญของยางแต่ละชนิดไว้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของยาง NR BR และ NBR [7]

	NR	BR	NBR
Glass transition temp. °C	-70	-105	-24
Service temp. range, °C			
lower limit	-55	-70	-20
max. continuous	+70	+70	+100
max. intermittent	+100	+100	+125
Hardness range, IRHD	30-100	45-90	40-100
Typical tensile strength (MPa)			
gum	24	3	4
reinforced	28	17	21
Tear resistance	E	F	P-F
Abrasion resistance	E	E	F
Compression set	G	G	G
Creep/stress relaxation	E	G	F
Resilience	E	E	P-F
Gas permeation	F	F	G
Electrical/resistivity	E	E	F
Oxidation resistance	F	F	G
Ozone resistance	P	P	P
Flame resistance	P	P	P
Water resistance	G	G	F-G
Acid resistance	F-G	F-G	F-G
Alkali resistance	G	G	F-G
Solvent resistance			
Aliphatic hydrocarbons	P	P	E
Aromatic hydrocarbons	P	P	F-G
Halogenate solvents	P	P	P
Oxygenated solvents	F-G	F-G	P-F
Oil resistance	P	P	G-E

* E = Excellent (ดีมาก), G = Good (ดี), F = Fair (พอใช้), P = Poor (ไม่ดี)

2.3 สารเคมีสำหรับยาง (Additives for Rubber) [8]

สารเคมีสำหรับยาง หมายถึง สารเคมีต่าง ๆ ที่ผสมลงไปนยาง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติที่ดี โดยสารเคมีเหล่านี้ต้องทำปฏิกิริยากับยางก่อน ซึ่งการให้สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางสามารถเร่งได้ด้วยการให้ความร้อน ยางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับสารเคมี เรียกว่า ยางไม่คงรูป (Green compound หรือ Uncured compound) ส่วน ยางที่สารเคมีเข้าทำปฏิกิริยากับยางแล้ว เรียกว่า ยางคงรูป (Vulcanized rubber หรือ Cured rubber)

สารที่ใช้ผสมยางเพื่อการผลิตวัตถุดิบสำเร็จรูปยาง

สารต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการผลิตวัตถุดิบสำเร็จรูปยางหรือผลิตภัณฑ์ยาง จำแนกเป็นพวก ๆ ได้ดังนี้

1. สารทำให้ยางคงรูป หรือสารวัลคาไนซิง (Vulcanizing agent) ได้แก่ สารกำมะถัน สารที่คล้าย ๆ กำมะถัน สารพวกที่มีส่วนของกำมะถัน สารเพอรอกไซด์
2. สารเร่ง (Accelerator) ได้แก่ สารเร่งการเกิดปฏิกิริยา ให้เกิดช้า ปานกลาง หรือเร็ว
3. สารกระตุ้น (Activator) ได้แก่ กรดสเตียริก และซิงค์ออกไซด์
4. สารตัวเติม (Filler) ได้แก่ เคลย์ ไวท์ดิง ซิลิกา แคลเซียมคาร์บอเนต เขม่าดำ
5. สารช่วยในการแปรรูปยาง หรือสารพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ได้แก่ สารทำให้ยางนิ่มโดยทางเคมี และสารทำให้ยางนิ่มโดยทางกายภาพ
6. สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Protective agent) ได้แก่ สารต้านทานปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Antioxidant) สารต้านทานปฏิกิริยาโอโซน (Antiozonant) เป็นต้น
7. สารพิเศษอื่น ๆ (Miscellaneous ingredient) ได้แก่ สารที่ทำให้เกิดสี (Coloring material) สารทำให้เกิดฟอง (Blowing agent) สารหน่วง (Retarder) เป็นต้น

2.3.1 สารทำให้ยางคงรูป หรือ สารวัลคาไนซิง (Vulcanizing Agent) [8, 9]

กระบวนการวัลคาไนซิงถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1839 โดย Charles Goodyear ในสหรัฐอเมริกา และ Thomas Hancock ในอังกฤษ ทั้งสองค้นพบการวัลคาไนซิงโดยใช้ Sulphur และ White Lead ซึ่งเป็นระบบการวัลคาไนซิงของยางธรรมชาติ การค้นพบครั้งนี้เป็นความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่สำคัญสำหรับเศรษฐกิจโลก

สารทำให้ยางคงรูป หรือ สารวัลคาไนซิง แบ่งได้เป็น 3 พวก คือ

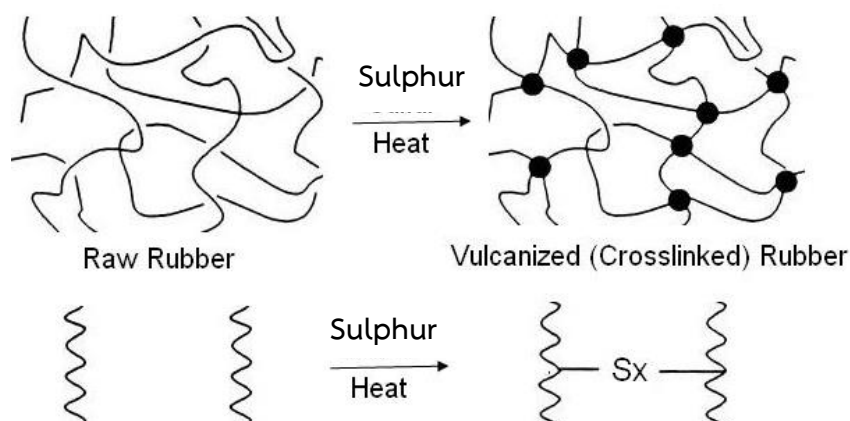
- กำมะถัน (Sulphur, S) และธาตุที่คล้ายกำมะถัน
- สารที่ให้กำมะถัน (Sulphur donor)
- สารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน

1. กำมะถัน (Sulphur, S₈) และธาตุที่คล้ายกำมะถัน

กำมะถัน เป็นสารทำให้ยางคงรูป หรือ สารวัลคาไนซิงที่นิยมใช้มากที่สุด ประมาณ 90% และนิยมใช้กับยางที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated rubber) ได้แก่ ยางธรรมชาติ ยาง SBR ยาง BR ยาง IR ยาง EPDM ยาง NBR เป็นต้น

เมื่อนำกำมะถันใส่เข้าไปในยาง แล้วให้ความร้อน จะเกิดการคงรูป หรือการวัลคาไนซิงขึ้น โดยกำมะถันเป็นตัวไปเชื่อมระหว่างโมเลกุลของยาง เรียกว่า เกิด crosslink และถ้าเพิ่มปริมาณของกำมะถัน ส่งผลให้การ crosslink เพิ่มขึ้น

การวัลคาไนซิงด้วยกำมะถัน [10] เป็นกระบวนการเชื่อมโมเลกุลยางแต่ละโมเลกุลผ่านพันธะโคเวเลนต์ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายแสดงดังภาพที่ 2.6 การวัลคาไนซิงเกิดโดยการทำปฏิกิริยากับกำมะถันในปริมาณที่พอเหมาะที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของกำมะถัน โดยกำมะถันที่นำมาทำปฏิกิริยาดังนี้มีการสร้างพันธะโคเวเลนต์เชื่อมระหว่างโซ่พอลิเมอร์ให้เป็นโมเลกุลเดียวกันทำให้ยางมีสมบัติคงตัวในเมื่อนำมาใช้งาน มีความยืดหยุ่นได้ดีมากขึ้น ทนความร้อนและแสงแดด ละลายในตัวทำละลายได้ยากขึ้น



ภาพที่ 2.6 การเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วย sulphur [11]

กำมะถันที่ใช้ในยางต้องเป็นกำมะถันที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ซึ่งขนาดอนุภาคยิ่งเล็ก ทำให้กำมะถันกระจายในยางได้ทั่วถึงดีขึ้น ทำให้ยางเกิดการคงรูปได้ทั่วถึง และยางที่คงรูปแล้วมีสมบัติสูง ด้วยการใส่กำมะถันลงในยาง ซึ่งต้องใส่หลังสุดในจำนวนสารเคมีทั้งหมด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคงรูปก่อนกำหนด แต่ยางบางอย่าง เช่น ยาง NBR ซึ่งกำมะถันกระจายในยางได้ไม่ดี ต้องใส่กำมะถันเข้าไปตั้งแต่เริ่มต้น เพื่อช่วยให้เวลาในการกระจายเพิ่มขึ้น

การผสมกำมะถันเข้าไปในยาง หากวางทิ้งไว้เป็นเวลานาน กำมะถันที่เป็นส่วนเกินเกิดการตกผลึกออกมาที่ผิวยาง เรียกว่า เกิดการบลูม (blooming) การแก้ปัญหาของการที่กำมะถันเกิดการแยกตัวมาอยู่ที่ผิวยางสามารถทำได้โดยผสมกำมะถันเข้าไปในยางที่อุณหภูมิต่ำที่สุด ในขบวนการแปรรูปยาง จึงจำเป็นต้องให้อุณหภูมิของยางวัลคาไนซ์ต่ำเพื่อป้องกันการบลูม

ข้อดีและข้อเสียของกำมะถัน

- ข้อดี
1. กำมะถันมีราคาค่อนข้างถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ
 2. กระจายตัวง่ายในยาง
 3. ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ
 4. มีผลโดยตรงต่อสารเร่ง จึงเป็นตัวควบคุมอัตราการเกิดวัลคาไนซ์
- ข้อเสีย
1. มีแนวโน้มทำให้เกิดการแยกตัวมาอยู่ที่ผิวยาง
 2. มีการติดสีของซัลไฟต์
 3. เมื่อนำยางที่ผสมกำมะถันไปอบ ยางมีความต้านทานต่อความร้อนลดลง
 4. มีขีดจำกัดในการใช้ คือ ใช้ได้กับยางที่ไม่อิ่มตัว

นอกจากกำมะถันแล้ว ยังมีธาตุอื่น ๆ ที่คล้ายกำมะถัน ทำหน้าที่เป็นสารทำให้ยางคงรูป หรือ สารวัลคาไนซ์ ได้แก่ ซีลีเนียม (Selenium) และ เทลลูเรียม (Tellurium) ใช้แทนกำมะถัน เมื่อต้องการสมบัติความต้านทานต่อความร้อน แต่ปฏิกิริยามีสาร 2 ตัวนี้ทำกับยาง ไม่ดีเท่ากับกำมะถัน และยังเป็นพิษ โดยทั่วไปนิยมใช้เป็นสารทำให้ยางคงรูปเสริมร่วมกับกำมะถัน ซึ่งทำให้ใช้ปริมาณกำมะถันลดลง และทำให้ได้ยางที่มีความต้านทานต่อความร้อนและไอน้ำ และมีโมดูลัสสูงขึ้นด้วย

สารที่ให้กำมะถัน (Sulphur donor)

สารที่ให้กำมะถัน (Sulphur donor) หมายถึง สารที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ และสลายให้กำมะถันที่อุณหภูมิของการคงรูป ได้แก่ ทีเอ็มทีดี TMTD (Tetramethyl thiuram disulphide) ดีทีดี เอ็ม DTDM (Dimorpholine disulphide หรือ Dithiodimorpholine) ดีพีทีดี DPTT (Dipentamethylene thiuram tetrasulphide)

การใช้สารที่ให้กำมะถัน ใช้ร่วมกับกำมะถันปริมาณเล็กน้อย คือ ใช้กำมะถันต่ำกว่า 1 phr ร่วมกับสารที่ให้กำมะถัน 3 – 4 phr หรือบางกรณีอาจไม่ใช้กำมะถันเลยก็ได้ โครงสร้างของการเชื่อมโยงโมเลกุลที่เกิดขึ้น มีประสิทธิภาพแข็งแรงดีกว่าการเชื่อมโยงโมเลกุลยางโดยระบบที่ใช้กำมะถันตามปกติ ไม่เกิดการบวมที่ผิวยาง ช่วยให้เกิดความปลอดภัยในขบวนการผลิต คือ ไม่เกิดการคงรูปก่อนกำหนด และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูงดีกว่า และให้โมดูลัสสูงกว่าการใช้กำมะถันล้วน ๆ ในปริมาณเท่ากัน แต่การใช้สารที่ให้กำมะถันมีราคาแพงกว่าการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว เพราะสารนี้มีราคาแพงกว่ากำมะถันธรรมดา และต้องใช้ในปริมาณมาก

สารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่กำมะถัน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

- โลหะออกไซด์ (Metallic oxides)

ซึ่งได้แก่ พวงซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) ตะกั่วออกไซด์ (Lead oxide, PbO) ใช้ในการวัลคาไนซ์ยางบางชนิด เช่น ซิงค์ออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ใช้วัลคาไนซ์ยาง Neoprene (CR) แมกนีเซียมออกไซด์ ใช้วัลคาไนซ์ยาง Fluoroelastomer (FPM) ตะกั่วออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ใช้วัลคาไนซ์ยางไฮพาลอน (CSM)

- สารพวกที่มีหมู่ที่ไวต่อปฏิกิริยา

สารพวกนี้มีการฟอร์มกันของสายโซ่เชื่อมโยงในโมเลกุลยาง โดยทำปฏิกิริยากับแขนงของสายโมเลกุล เช่น การใช้ epoxy resin วัลคาไนซ์ยาง NBR การใช้ quinone dioxime วัลคาไนซ์ยาง IIR เป็นต้น

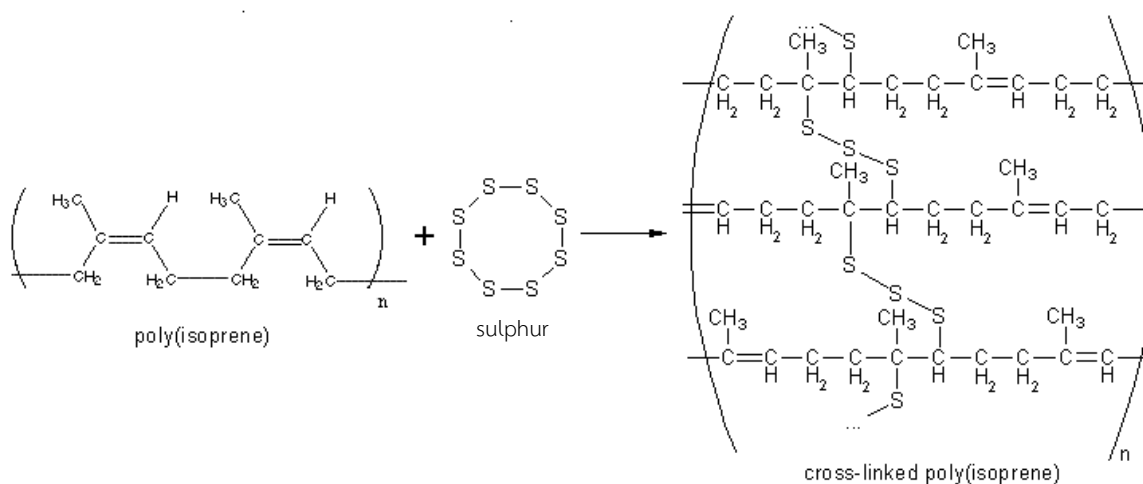
- สารเปอร์ออกไซด์ (Peroxide)

ใช้สารเปอร์ออกไซด์เพื่อการคงรูปยางได้ทั้งพวกที่มีความอึดตัว เช่น ยางซิลิโคน และพวกที่ไม่อึดตัว หรือพวกที่ไม่มีหมู่ที่ไวต่อปฏิกิริยาการคงรูป สารเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้กับยาง ควรเป็นสารที่มีความเสถียรที่ซึ่งทำให้เก็บรักษาไว้ได้นาน มีความว่องไวพอสมควรในการทำปฏิกิริยากับยางที่อุณหภูมิของการคงรูป และปลอดภัยในการใช้ ได้แก่ Dicumyl peroxide, Benzoyl peroxide

ข้อดีและข้อเสียของสารเปอร์ออกไซด์

- ข้อดี
1. ยางทุก ๆ ส่วนเกิดการคงรูปในเวลาใกล้เคียงกัน
 2. สมบัติด้าน compression set ดีมาก
 3. มีความต้านทานต่อความร้อนดีมาก
 4. ไม่เกิดปัญหาการ bloom
 5. ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีสวย
 6. สมบัติทางไฟฟ้าดีมาก
- ข้อเสีย
1. ราคาแพงกว่าการใช้กำมะถัน
 2. มีความต้านทานต่อแรงดึงต่ำกว่ายางที่ทำให้คงรูปโดยใช้กำมะถัน
 3. ค่อนข้างมีกลิ่น
 4. Induction period สั้นมาก
 5. สมบัติส่วนใหญ่ต่ำกว่ายางที่ใช้กำมะถัน

แต่อย่างไรก็ตามการวัลคาไนซ์ยางด้วยกำมะถันเพียงอย่างเดียวนั้นมีการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้ล่าช้ามาก ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง Sulphur และยางไฮโดรคาร์บอนเกิดขึ้นที่ $C = C$ (แสดงดังภาพที่ 2.7) โดยในการเชื่อมโยง Sulphur 40 ถึง 55 อะตอม (ในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา) ต้องใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการใช้เวลานานเกินไปในการผลิตผลิตภัณฑ์ใด ๆ และระหว่างกระบวนการ vulcanization อีกทั้งอาจเกิด oxidative degradation ซึ่งทำให้ยางวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลที่ไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานในทางปฏิบัติ จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาข้อจำกัดเหล่านี้เรื่อยมา โดยมีการศึกษาและพัฒนาการใช้สารเคมีอื่น ๆ เพื่อเร่งความเร็ว และประสิทธิภาพของกระบวนการวัลคาไนซ์



ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยวัลคาไนเซชันของ polyisoprene โดย sulphur [9]

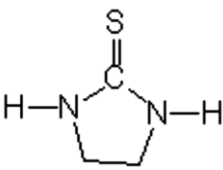
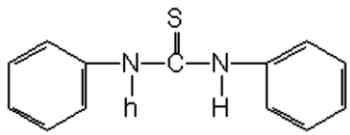
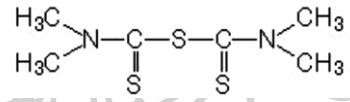
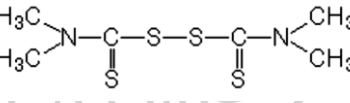
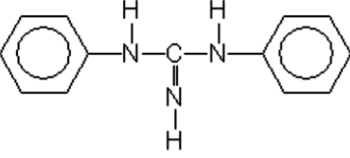
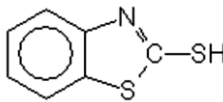
2.3.2 สารเร่งปฏิกิริยวัลคาไนเซชัน (Accelerator) [12]

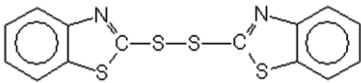
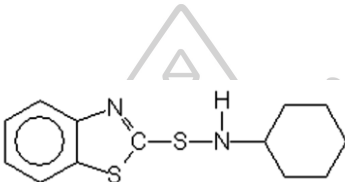
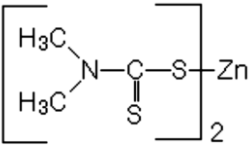
ในการวัลคาไนส์เช่นนั้น ถ้าใช้สารทำให้ยางคงรูปเพียงอย่างเดียว เช่น กำมะถัน มีการเกิดการวัลคาไนส์ช้ามาก ต้องใช้กำมะถันปริมาณมาก และใช้อุณหภูมิสูง แต่ถ้าใช้สารเร่งเป็นการช่วยลดเวลา และอุณหภูมิในการวัลคาไนส์ อีกทั้งยังเป็นการช่วยปรับปรุงสมบัติให้กับผลิตภัณฑ์อีกด้วย การลดเวลาวัลคาไนส์เช่นนั้น ปกติจะขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารที่ใช้ ซึ่งสารเร่งปฏิกิริยวัลคาไนเซชันแต่ละประเภทมีผลทำให้สมบัติของยางวัลคาไนส์ที่แตกต่างกันไป โดยประเภทของสารเร่งปฏิกิริยวัลคาไนเซชันซึ่งแบ่งตาม chemical group แสดงดังตารางที่ 2.2 และแสดงโครงสร้างทางเคมีของสารเร่งปฏิกิริยวัลคาไนเซชันดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 แสดงประเภทของสารเร่งปฏิกิริยวัลคาไนเซชัน [11]

Chemical Group	Accelerators	Vulcanization Speed
Aldehyde Amine	BA, HMT	Slow
Guanidine	DPG, DOTG	Slow
Thiazole	MBT, MBTS, ZMBT	Semi Ultra-fast
Thiophosphate	ZBDP	Ultra-fast
Sulfenamides	CBS, TBBS, MBS, DCBS	Fast-Delayed action
Thiourea	ETU, DPTU, DBTU	Ultra-fast
Thiuram	TMTM, TMTD, DPTT, TBzTD	Ultra-fast
Dithiocarbamate	ZDMC, ZDEC, ZDBC, ZBEC	Ultra-fast
Xanthates	ZIX	Ultra-fast

ตารางที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของสารเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันทั่วไป [11]

Accelerator	Chemical Structure	Remarks
Ethylene Thiourea (ETU)		Group: Thioureas. Speed: Ultra-fast. Use: As a Primary/ Secondary accelerator.
Dipentamethylene Thiourea (DPTU)		Group: Thioureas. Speed: Ultra-fast. Use: As a Primary/ Secondary accelerator.
Tetramethylthiuram Monosulfide (TMTM)		Group: Thiurams. Speed: Ultra-fast. Use: As a Primary/ Secondary accelerator.
Tetramethylthiuram Disulfide (TMTD)		Group: Thiurams. Speed: Ultra-fast. Use: As a Primary/ Secondary accelerator, Sulphur donor
Diphenyl Guanidine (DPG)		Group: Guanidines. Speed: Slow cure rate. Use: As a Primary & Secondary accelerator.
2-Mercapto benzothiazole (MBT)		Group: Thiazoles. Speed: Scorch Ultra-fast. Use: As a Primary accelerator.

Accelerator	Chemical Structure	Remarks
2-2'-Dithiobis (benzothiazole) (MBTS)		Group: Thiazoles. Speed: Less scorch than MBT. Ultra-fast. Use: As a Primary accelerator.
N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfenamide (CBS)		Group: Sulfenamides. Speed: Delayed Action. Ultra-fast. Use: As a Primary accelerator.
Zinc dimethyldithio carbamate (ZDMC)		Group: Dithiocarbamates. Speed: Ultra-fast. Use: As a Primary / Secondary accelerator.

การใช้สารเร่ง สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ คือ

- ระบบการใช้สารเร่งเพียงชนิดเดียวหรือเรียกว่า primary accelerator ก็ทำให้พอเพียงให้เกิดการวัลคาไนซ์อย่างตามเวลาที่ต้องการ
- ระบบการใช้สารเร่งตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งประกอบด้วยชนิดหนึ่งใช้ในปริมาณมากเป็น primary accelerator และอีกชนิดหนึ่งใช้ในปริมาณน้อยเป็น secondary accelerator (10 – 20 % ของปริมาณสารเร่งทั้งหมด) เพื่อช่วยเสริมและปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ การใช้ระบบวัลคาไนซ์ที่มีสารเร่งตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีกว่าการใช้ระบบสารใดสารหนึ่งเพียงอย่างเดียว

- ระบบการใช้สารเร่งที่มีปฏิกิริยาช้า (Delayed action accelerator) สารประเภทนี้จะไม่เกิดปฏิกิริยาขณะกรรมวิธีก่อนการวัลคาไนซ์ ซึ่งเป็นการป้องกันปัญหาอาจเกิดการวัลคาไนซ์ก่อนเวลา

สารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ชั้นแต่ละชนิดมี Scorch time, Cure rate และ Cross link density ที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 2.8

Scorch safety	→ Longer
↓	ZDMC < ZDEC < ZDBC < ZBEC TMTD < TETD < TMTM < TBzTD MBT < MBTS < ZMBT CBS < TBBS < MBS < DCBS
Longer	
Cure Rate	→ Faster
↓	ZMBT < MBTS < MBT DCBS << MBS < CBS < TBBS TMTM = TETD = TMTD ZBEC << ZDBC = ZDBC = ZDMC
Faster	
Cross link density	→ Higher
↓	ZMBT < MBT < MBTS DCBS << MBS < CBS < TBBS ZBEC << ZDBC < ZDEC < ZDMC TMTM = TETD = TMTD
Higher	

ภาพที่ 2.8 แสดงพฤติกรรมของการเกิดปฏิกิริยาของสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ชั้น [11]

สมบัติของยาง vulcanized ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (Crosslink density) โดยคุณสมบัติต่างๆของยาง เช่น โมดูลัส ความแข็ง ความทนทานต่อการฉีกขาดและแรงดึงเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นของการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณและรูปแบบของการเชื่อมขวางเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการวัลคาไนซ์ที่ต้องการ ซึ่งปริมาณและชนิดของการเชื่อมขวางขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- ปริมาณสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Sulphur dosage)
- ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ชั้น (Accelerator type)
- อัตราส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ชั้นต่อสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Accelerator / Sulphur ratio)
- ระยะเวลาในการเกิดการเชื่อมขวาง (Cure time)

โดยทั่วไประยะเวลาในการเกิดการเชื่อมขวางและอัตราส่วนของ Accelerator/Sulphur ที่สูง มีผลทำให้จำนวนการเกิดการเชื่อมโยงขวางในรูปแบบ monosulfide เกิดขึ้นมากกว่าแบบ polysulfide vulcanizates ซึ่งส่งผลให้ยางมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น มีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้น เนื่องจากความเสถียรของพันธะ C-S มีความแข็งแรงกว่าเมื่อเทียบกับพันธะของ S-S

ในระบบวัลคาไนซ์ยางโดยกำมะถันนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ชั้นต่อสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางของยาง คือ

- ระบบวัลคาไนซ์แบบปกติ (Conventional Vulcanized System, C.V.)
- ระบบวัลคาไนซ์แบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-Efficiently Vulcanized System, Semi-E.V.)
- ระบบวัลคาไนซ์แบบมีประสิทธิภาพ (Efficiently Vulcanized System, E.V.)

โดยระบบการวัลคาไนซ์ในระบบปกติ (C.V.) ใช้ปริมาณของกำมะถันสูงกว่า 1.5 phr และใช้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ชั้นน้อย (0.5 ถึง 1.0 phr) จึงทำให้จำนวนอะตอมของกำมะถันในพันธะเชื่อมโยงเป็นแบบมากกว่าหนึ่งอะตอมต่อหนึ่งพันธะ (polysulphidic crosslink) ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงให้มีความแข็งแรงพันธะที่ดีขึ้น เป็นแบบการใช้กำมะถันหนึ่งอะตอมต่อหนึ่งพันธะเชื่อมโยง (monosulphidic crosslink) โดยการเพิ่มสัดส่วนของสารตัวเร่งในกลุ่มไฮยูเรมไดซัลไฟด์กับซัลฟิโนไมด์ ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่มีสมบัติเป็นสารให้กำมะถัน (sulphur donor) เรียกว่าระบบวัลคาไนซ์แบบมีประสิทธิภาพ (E.V.) ซึ่งมีการเริ่มใช้วิธีนี้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950 โดยในระบบนี้มีการใช้ปริมาณกำมะถันที่ต่ำมาก (ต่ำกว่า 0.4-0.5 phr) และใช้สารเร่งปฏิกิริยาที่สูงขึ้น (2.5 ถึง 5.0 phr) ซึ่งทำให้สมบัติทนต่อความร้อนที่ดีขึ้นในยางธรรมชาติ และให้ความต้านทานต่อความล้าที่ดีขึ้น โดยได้แสดงข้อจำกัดของปริมาณกำมะถัน และสารเร่งปฏิกิริยาไว้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงข้อจำกัดของปริมาณกำมะถัน และสารเร่งปฏิกิริยาของระบบวัลคาไนซ์ต่าง ๆ [11]

Vulcanization System	Conventional (CV)	Efficient (EV)	Semi Efficient (Semi EV)
Sulphur Dosage, phr	2.0-3.5	0.4-0.8	1.0-1.7
Accelerator Dosage, phr	0.4-1.2	2.0-5.0	1.2-2.4
Accelerator/Sulphur Ratio	0.1-0.6	2.5-12.0	0.7-2.5

2.3.3 สารกระตุ้น (Activator) [8]

สารกระตุ้น หรือ สารเสริมตัวเร่ง (Activator) เป็นสารที่ช่วยเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น โดยการทำให้สารเร่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเป็นการเร่งอัตราการวัลคาไนซ์ยางให้เร็วขึ้น และปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น โดยทำให้ยางมีโมดูลัสสูงขึ้นโดยสารกระตุ้น สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ สารอนินทรีย์ และสารอินทรีย์

1. สารอนินทรีย์

ส่วนใหญ่เป็นพวกโลหะออกไซด์ ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium oxide, CdO) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, Ca(OH)₂) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) โดยในบรรดาสารต่างเหล่านี้ซิงค์ออกไซด์เป็นสารที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) เป็นสารที่จำเป็นในการทำให้ยางคงรูปได้สมบูรณ์ เป็นสารที่มีราคาค่อนข้างแพง เนื่องจากมีความถ่วงจำเพาะสูง คือ 5.57 ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่มากเกินไป โดยทั่วไปแล้วปริมาณการใช้ซิงค์ออกไซด์นิยมใช้ในปริมาณ 3 – 5 phr แต่ถ้าซิงค์ออกไซด์มีขนาดอนุภาคเล็กสามารถลดปริมาณการใช้เหลือเพียง 1 phr ได้ ซึ่งทำให้ได้ยางที่มีโมดูลัสสูงขึ้น

2. สารอินทรีย์

สารกระตุ้นพวกอินทรีย์ที่สำคัญ คือ กรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก (Stearic acid) กรดลอริก (Lauric acid) กรดปาล์มมิติก (Palmitic acid) เป็นต้น กรดไขมันเป็นสารที่จำเป็นในการใช้ สารกระตุ้นสำหรับสารเร่งบางตัว โดยเฉพาะพวกไรโอไซล

กรดไขมันที่นิยมใช้เป็นสารกระตุ้นมากที่สุด คือ กรดสเตียริก (Stearic acid) ปริมาณที่ใช้ในยางขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ถ้ายางมีกรดไขมันอยู่แล้ว ไม่จำเป็นต้องใส่หรือใส่ในปริมาณน้อย โดยทั่วไปในการผสมสารเคมีกับยางธรรมชาตินั้นมีการผสมกรดสเตียริกประมาณ 1 – 3 phr เพื่อลดอัตราการ cure ที่แตกต่างกันลง และเป็นการป้องกันการขาดกรดไขมันที่อยู่ในยาง เพราะการขาดนี้อาจทำให้สมบัติทางกายภาพแตกต่างกันไป

2.3.4 สารตัวเติม (Filler) [8]

สารตัวเติม (Filler) หมายถึง สารอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือเพื่อปรับปรุงสมบัติของยางให้ดีขึ้น เช่น เคลย์ พวกเขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา เป็นต้น

สารตัวเติมที่ใส่ลงไปในยาง ใส่เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ดังนี้

1. เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง
2. เพื่อช่วยในขบวนการผลิตที่ง่ายขึ้น
3. เพื่อเพิ่มสมบัติการนำทางไฟฟ้า
4. เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างเมทริกซ์
5. ลดการพองตัวของยางในน้ำมัน
6. เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง
7. เพื่อลดต้นทุนการผลิต

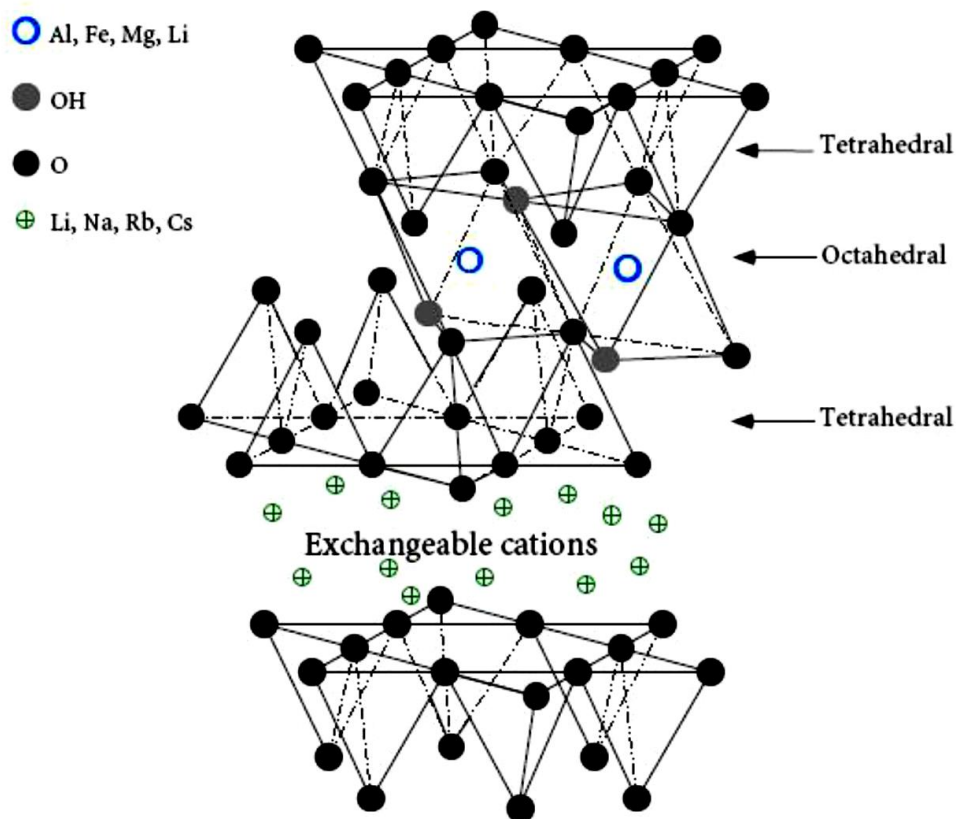
การแบ่งชนิดของสารตัวเติมตามลักษณะ แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด (Particulated filler) ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต เขม่าดำ ออกาโนเคลย์ ซิลิกา เป็นต้น
2. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเส้นใย (Fibrous filler) เช่น แอสเบสตอส ผงเยื่อไม้ เป็นต้น
3. สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเรซิน (Resinous filler) เช่น high styrene resin และ phenolic resin

โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นเม็ด ซึ่งสามารถเพิ่มความเข้ากันได้ของยางที่นำมาผสมกัน คือ ออกาโนเคลย์

นาโนเคลย์ (Nanoclay) [13]

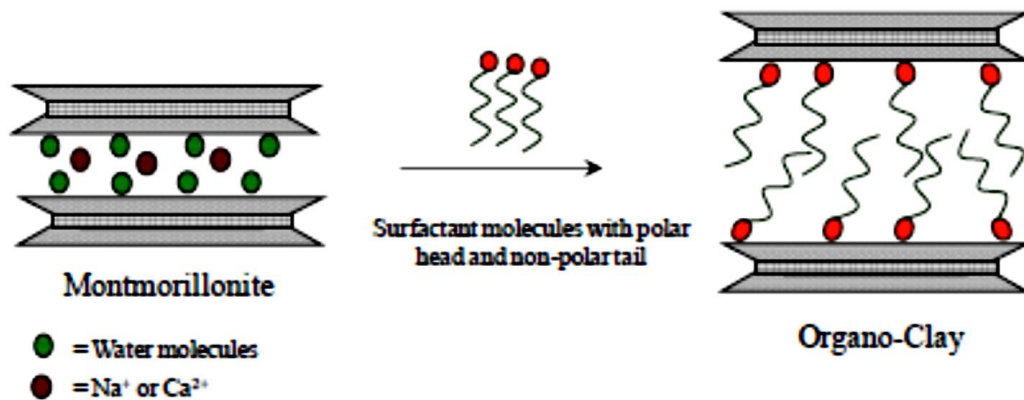
นาโนเคลย์เป็นวัสดุนาโนชนิดหนึ่งซึ่งอยู่ในกลุ่มของแร่มอนต์มอริลโลไนท์ (montmorillonite) ซึ่งมีหลายชนิด ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนท์ (montmorillonite) เบนโทไนท์ (bentonite) ลักษณะโดยทั่วไปของโครงสร้างของนาโนเคลย์ประกอบด้วยชั้นๆ มีลักษณะเป็นแผ่นวางเรียงในลักษณะ 2:1 โดย แผ่นแต่ละแผ่นมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตร ในขณะที่มีขนาดของพื้นผิวประมาณ 300-600 นาโนเมตร ลักษณะทางเคมีของนาโนเคลย์เป็นสารในกลุ่มชอบน้ำ hydrophilic และสามารถนำมาปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นสาร organophilic ได้ซึ่งทำให้มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับการเป็นสารพอลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymers) นาโนเคลย์ที่นิยมใช้งานกันมากคือ เบนโทไนท์ เนื่องจากราคาถูกและหาได้ง่ายกว่ามอนต์มอริลโลไนท์



ภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนท์ [14]

ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) [15]

ออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) คือ นาโนเคลย์ที่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างด้วยสารลดแรงตึงผิว ซึ่งโดยส่วนใหญ่ทำการปรับปรุงด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) กับสารลดแรงตึงที่มีไอออนบวกของแอมโมเนียม (ammonium cation) และมีส่วนประกอบเป็นสายโซ่ของอัลคิลซึ่งอาจเป็น primary, secondary, tertiary และ quaternary alkylammonium หรือ alkylphosphonium cation ซึ่งประจุบวกไปแทนที่ประจุบวกของโลหะ (metal cation) ที่อยู่ระหว่างชั้นซิลิเกตส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์นั้นมากขึ้นและมีขั้วที่ลดลง



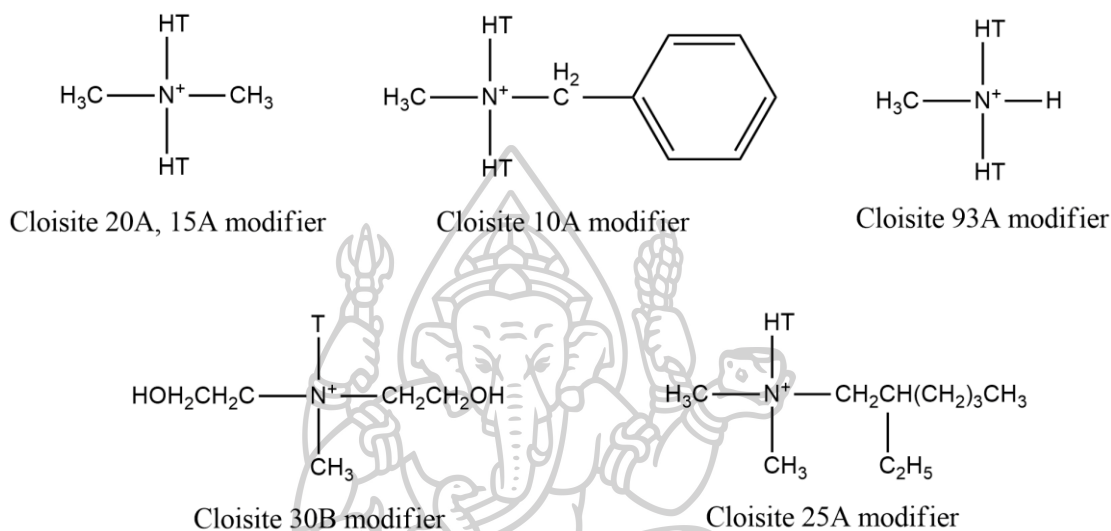
ภาพที่ 2.10 การปรับปรุงพื้นผิวของเคลย์ด้วยสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ [15]

สารลดแรงตึงผิวประเภทแอมโมเนียมไอออนที่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงเคลย์ที่ใช้ในทางการค้าถูกแสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่งแอมโมเนียมไอออน (N⁺) อาจประกอบไปด้วยพอลิเมอร์สายโซ่ตรง (aliphatic) หนึ่งสายโซ่ดังภาพที่ 2.11 (A) และ (B) หรืออาจประกอบไปด้วยสายโซ่ตรง 2 สายโซ่ ดังภาพที่ 2.11 (C) นอกจากนี้ในตำแหน่งอื่น ๆ สามารถเปลี่ยนเป็นหมู่เมทิล (methyl group) หรือหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ดังภาพที่ 2.11 (A) และ ภาพที่ 2.11(B) ตามลำดับ ซึ่งจากการมีหมู่ทั้งสองนี้อยู่ในโครงสร้าง ส่งผลให้สารลดแรงตึงผิวนั้นมีความเป็นขั้วที่หรือความชอบน้ำที่สูงขึ้น



ภาพที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่นิยมใช้ในออร์กาโนเคลย์ โดย (A) สายลดแรงตึงผิวที่ประกอบด้วยสารโซ่ตรง 1 สายโซ่และหมู่เมทิล (B) สารลดแรงตึงผิวที่ประกอบด้วยสายโซ่ตรง 1 สายโซ่ และหมู่ไฮดรอกซิล และ (C) สารลดแรงตึงผิวที่ประกอบด้วยสารโซ่ตรง 2 สายโซ่ [15]

นอกจากนี้โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวยังสามารถประกอบไปด้วยส่วนที่ได้จากไขมันทางธรรมชาติ เช่น ทาโลว (Tallow, T) หรือ ไฮโดรจีเนท ทาโลว (Hydrogenated tallow, HT) ซึ่งในโมเลกุลประกอบไปด้วยสายโซ่ที่มีคาร์บอน 18 อะตอม (C-18) 16 อะตอม (C-16) และ 14 อะตอม (C-14) ในอัตราส่วน 65:30:5 โดยได้แสดงสารลดแรงตึงผิวที่ได้จากไขมันทางธรรมชาติเพื่อใช้ปรับปรุงโครงสร้างนาโนเคลย์ชนิดต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงสารลดแรงตึงผิวที่ได้จากไขมันทางธรรมชาติ เพื่อใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างของนาโนเคลย์ชนิดต่างๆ [16]

ในปัจจุบันนี้มีออร์กาโนเคลย์ทางการค้ามีมากมายหลายชนิด ซึ่งความแตกต่างของออร์กาโนเคลย์เหล่านั้น ขึ้นอยู่กับชนิดหรือลักษณะโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวอินทรีย์ที่ใช้ในการดัดแปร รวมทั้งปริมาณที่ใช้ ลักษณะทางโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการดัดแปรเคลย์ให้เป็นออร์กาโนเคลย์นั้น ส่งผลสำคัญต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เคลย์เป็นส่วนผสม ทำให้ความยาวสายโซ่ของสารลดแรงตึงผิวมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากยังมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนจำนวนมาก ทำให้ชั้นของเคลย์มีระยะห่างกันมากยิ่งขึ้น และความแข็งแรงของพันธะระหว่างชั้นของเคลย์มีค่าลดลง ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถแทรกตัวเข้าไปในชั้นเคลย์ได้ง่าย [16]

2.3.5 สารทำให้เกิดฟอง (Chemical foaming agents) [17]

Chemical foaming agents (CFAs) หรือ สารที่ทำให้เกิดฟอง คือ สารประกอบที่เกิดปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนแล้วปลดปล่อยแก๊สออกมา ทั้งนี้การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน อาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยากับ CFAs ด้วยกันเองหรืออาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยากับส่วนประกอบอื่น ๆ

CFAs ที่ใช้กันอยู่ส่วนมากอยู่ในรูปของแข็ง โดยจะแบ่ง CFAs เป็น 2 ประเภทคือ

- Exothermic chemical foaming agents เป็น CFAs ที่คายความร้อนระหว่าง การเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยแก๊สที่ได้จากปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่เป็นแก๊สไนโตรเจน
- Endothermic chemical foaming agents เป็น CFAs ที่ดูดความร้อนระหว่าง การเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยแก๊สที่ได้จากปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่เป็นแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์

โดย CFAs ทั้ง 2 แบบที่ใช้กันมาก สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

1. สารประกอบที่ปล่อยแก๊สออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว ทางความร้อนที่ผันกลับได้ CFAs ที่จัดอยู่ในชนิดนี้ ได้แก่ สารประกอบจำพวก Ammonium salt ของ Inorganic และ Organic acids และ สารประกอบของ Bicarbonates และ Carbonates ของ Alkaline และ Alkaline earth metals



จากสมการที่ 1 G คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน จาก สมการปฏิกิริยาผันกลับได้ทำให้ปริมาณแก๊สในระบบลดลงซึ่งอาจส่งผลให้แรงดันภายในเซลล์ของโฟ มลดลงทำให้โฟมเกิดการหดตัว

2. สารประกอบที่ปล่อยแก๊สออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว ทางความร้อนที่ผันกลับไม่ได้ CFAs ที่จัดอยู่ในชนิดนี้ ได้แก่ สารประกอบจำพวก Aromatic, Aliphatic-aromatic, Aliphatic-azo, Diazo-amides และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ เกิดการ สลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังสมการที่ 2



ส่วนมากแก๊สที่ได้จะเป็น N_2 , CO_2 และ NH_3 โดยปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนตามสมการ ที่ 2 นั้นมักเป็นปฏิกิริยาแบบ First-order แบบผันกลับไม่ได้

3. CFAs ที่อยู่ในรูปของของผสมที่ปลดปล่อยแก๊สออกมาเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ระหว่างแต่ละองค์ประกอบ โดยปฏิกิริยาการปลดปล่อยแก๊สของของผสมแสดงไว้ดังสมการที่ 3



ตัวอย่างของ CFAs ชนิดนี้คือปฏิกิริยาระหว่าง Sodium nitrile กับ Ammonium chloride และปฏิกิริยาระหว่าง Acid ทั้งที่เป็น Organic เช่น Stearic และ Oleic เป็นต้นและ Inorganic เช่น

Hydrochloric sulphuric และ Orth phosphoric เป็นต้น กับ Carbonates หรือกับโลหะหมู่ 2 และ 3 ในตารางธาตุ โดยสมบัติของ CFAs ที่นิยมใช้กันทั่วไปได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติของ CFAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [17]

Chemical foaming agents	Decomposition range in air (°C)	Gas Yield (cm ³ g ⁻¹)	Used mainly with
Azodicarbonamide	205-215	220	PVC,PE,PP,PS,ABS,PA
Modified azodicarbonamide	155-220	150-220	PVC,PE,PP,EVA,PS,ABS,PA
4,4'-Oxybis-(benzenesulfonyl hydrazide)	150-160	125	PVC,PE,EVA
Diphenylsulfone 3,3'disulfohydrazide	155	110	PVC,PE,EVA
Diphenylene oxide 4,4'disulfohydrazide	175-180	120	PVC,PE,EVA
Trihydrazinotriazine	275	225	PE,PP,ABS,PA
p-Toluenesulfonyl semicarbazide	228-235	140	PE,PP,PS,ABS,PA
5-Phenyltrazole	240-250	190	ABS,PPO,PC,PA,PBTP
Isatoic anhydride	210-225	115	PS,ABS,PA,PPO,PBTP,PC

โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ CFAs เป็น Supercell-EW ซึ่งเป็นการนำ 4,4'-Oxybis-(benzenesulfonyl hydrazide) หรือ OBSH มาทำการดัดแปลงโครงสร้างทางเคมี โดยบริษัท A.F. SUPERCELL ซึ่งจาก data sheet ของ Supercell-EW ระบุว่า Supercell-EW มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่เป็นพิษ และไม่มึนกลื่น เมื่อทำปฏิกิริยามีการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจน (N₂) เหมาะสำหรับการทำ Synthetic sponge rubber และ Expanded plastics เช่น EPDM, Chloroprene, EVA copolymer และ LDPE โดยมีสมบัติต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติของสาร CFAs (Supercell-EW)

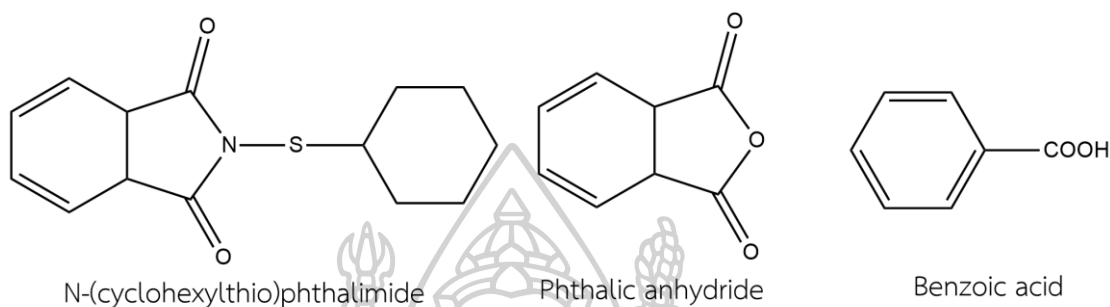
Specification	
Appearance	Fine, white powder
Specific gravity	1.6
Decomposition temperature	157 ± 3 °C
Gas volume	128 ± 5 ml/g @STP
Moisture	0.3% Max.
pH	7-7.5



ภาพที่ 2.13 แสดงภาพของสาร CFAs (Supercell-EW)

2.3.6 สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders) [11]

สารหน่วงปฏิกิริยา (Retarders) มีหน้าที่เพื่อเพิ่ม Scorch time (ts_2) หรือ ระยะเวลาก่อนที่จะเกิดการ vulcanization เพื่อลดปัญหาการตายของยางคอมพาวด์ และสามารถเก็บยางคอมพาวด์ไว้ได้นานขึ้น โดยมักใช้สารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นกรด เช่น Phthalic anhydride และ Benzoic acid เป็นต้น โดยสารหน่วงปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันทั่วไปสามารถได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.7



ภาพที่ 2.14 แสดงโครงสร้างทางเคมีของสารหน่วงปฏิกิริยา [11]

ตารางที่ 2.7 แสดงสารหน่วงปฏิกิริยาที่นิยมใช้กันทั่วไป

Retarder	Chemical type	Use and comment
Retarder BA and BAX	benzoic acid	Weak acid, improves shelf aging, activates cure, and reduces compound viscosity.
Retarder SAX	salicylic acid	Moderate acid, moderate retarding of thiazoles, promotes reversion resistance, activates cure.
Retarder PX	phthalic acid	Best retarding acid with thiazoles, minimal effect on state-of-cure.
Retarder AK	modified phthalic acid	Phthalic acid with activation added. Less than PX but cures faster.
Retarder SAFE	sulfonamide	Good retarder in most systems, strong cure activation, reduces reversion. High cost.
Retarder CTP	N-(cyclohexylthio) phthalimide	Outstanding retarder with most phthalimide systems, very effective with sulfenamides. Low dosages are typical.

โดยในงานวิจัยนี้ได้สนใจใช้สารหน่วงปฏิกิริยาเป็น Retarder CTP เป็นสารเคมีประเภท N-(cyclohexylthio) phthalimide ซึ่งเป็นสารยับยั้งการเกิดวัลคาไนเซชันที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมักใช้กับยาง NR, SBR, BR, IIR, CR, EPM, EPDM และ NBR โดยใช้กับระบบการ cure ที่ใช้ซัลเฟอร์ และ มักใช้กับระบบที่มี Sulphenamide เป็น Accelerator โดยใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อย สามารถช่วยเพิ่มระยะเวลา Scorch time ให้กับยางอย่างมาก อีกทั้งยังสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติความคงทนต่อการเก็บรักษาของวัสดุยางและป้องกันไม่ให้เกิดการวัลคาไนซ์ตามธรรมชาติในระหว่างการเก็บรักษาได้ โดยมีสมบัติต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงสมบัติต่าง ๆ ของ Retarder CTP [18]

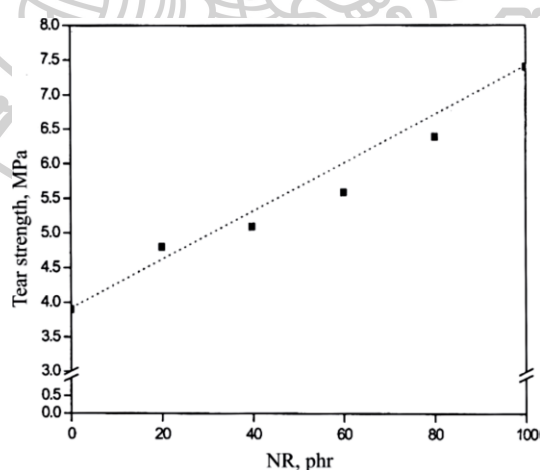
Specification	
Molecular Formula	C ₁₄ H ₁₅ NO ₂ S
Physical Description	Dry powder
Density	1.33 g/mL at 25 °C
Molecular Weight	261.339 g/mol
Boiling point (decomposes)	196 °C at 760 mm Hg
Melting point	92.6 °C
Solubility	In water, 18 mg/L at 23 °C
Ash content	≥0.10%
Topological polar surface area	6.27 nm ²

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ได้มีการศึกษาอย่างผสมระหว่าง BR/NR มาแล้วอย่างกว้างขวางโดยมีการศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติการซึมผ่าน ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความทนทานต่ออนุมูลอิสระ รวมถึงลักษณะทางสัณฐานวิทยา ดังงานวิจัยต่างๆ เหล่านี้

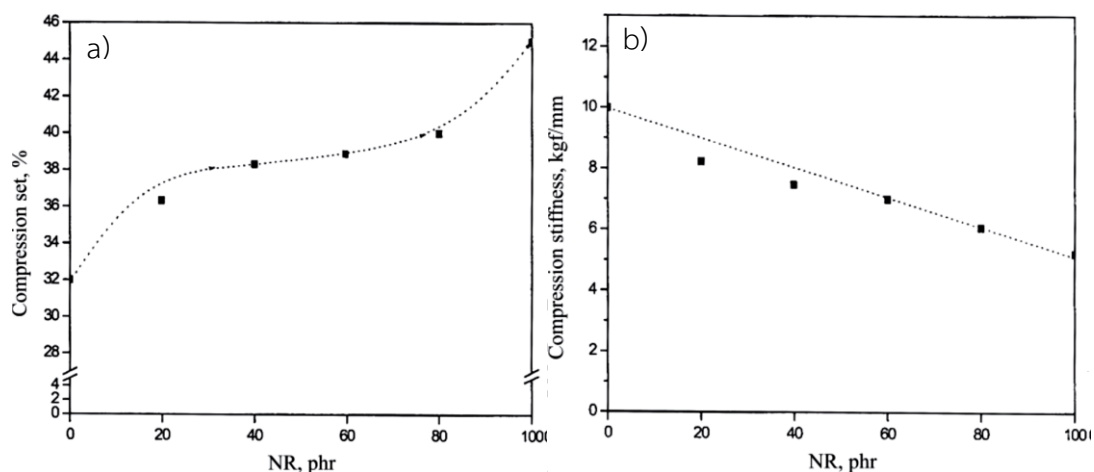
C. Hsien-Tang และคณะ [19] ได้ศึกษาความต้านทานการเสื่อมสภาพต่อความร้อนและสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) และยางสังเคราะห์บิวทาไดอีน (BR) ซึ่งเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนอัตราส่วนการผสม โดยในการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า tensile stress, tensile strain, and tear strength ของยางธรรมชาติ (NR) มีค่าสูงกว่ายางบิวทาไดอีน (BR) โดยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ NR ในการผสมทำให้ยางผสมมีค่า tensile stress และ tensile strain เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ NR ที่เพิ่มขึ้น แสดงดังตารางที่ 2.9 และแสดงการเพิ่มขึ้นของค่า tear strength เมื่อมีปริมาณ NR เพิ่มมากขึ้น ดังภาพที่ 2.15 ตารางที่ 2.9 แสดงสมบัติ tensile stress, tensile strain ของยางผสม NR/BR [19]

Properties	NR/BR ratio					
	0/100	20/80	40/60	60/40	80/20	100/0
Tensile stress, MPa	13.4	14.0	15.9	18.2	19.8	22.3
Tensile strain, %	1350	1358	1360	1380	1410	1550



ภาพที่ 2.15 แสดง tear strength ของยางผสม NR/BR [19]

จากภาพที่ 2.16 เป็นผลการทดสอบ compression set พบว่า NR มีค่าสูงกว่า BR และค่า compression set ของยางผสม NR/BR มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ NR ที่เพิ่มขึ้น และ compression stiffness ของ NR มีค่าต่ำกว่า BR นั่นคือ NR สามารถเสียรูปได้ง่ายกว่า BR



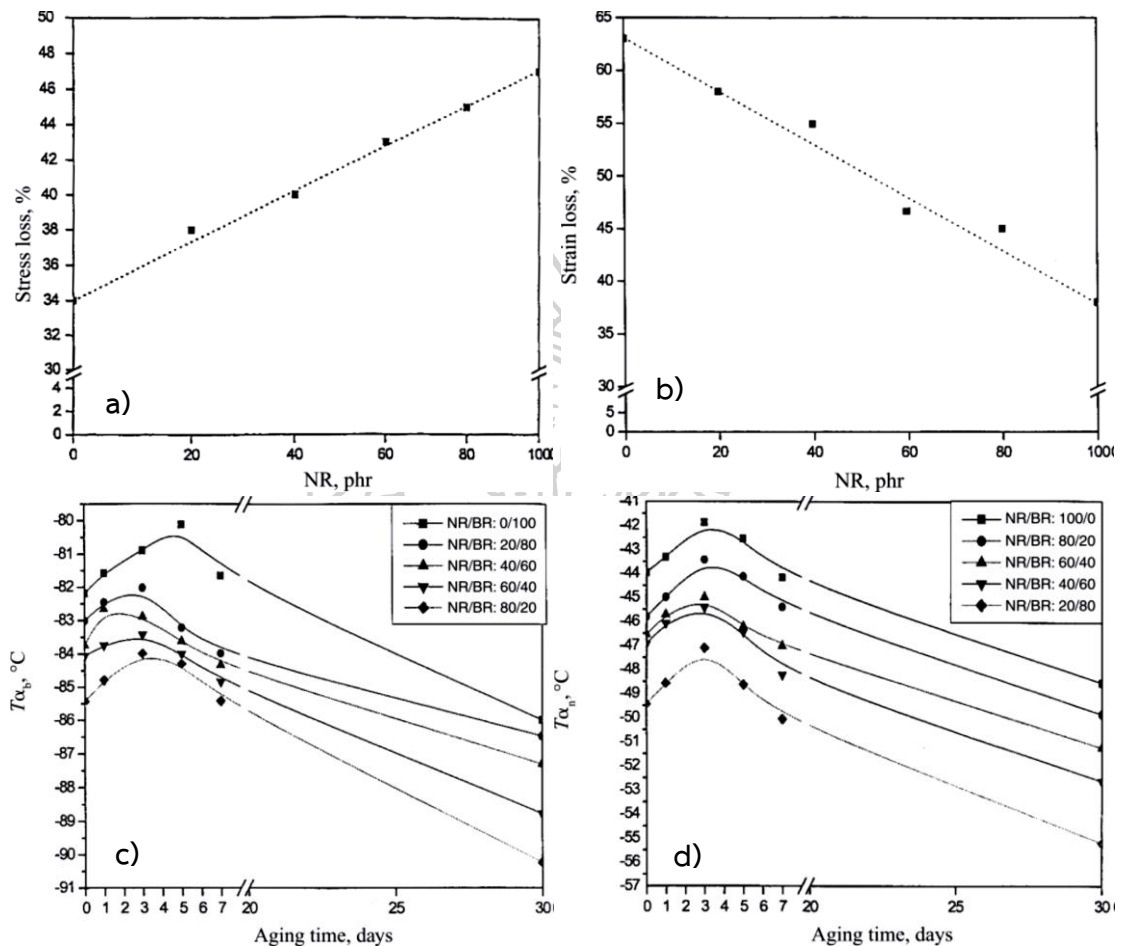
ภาพที่ 2.16 a) การทดสอบ compression set ที่อุณหภูมิ 70 °C เทียบกับปริมาณ NR และ
b) การทดสอบ compression stiffness เทียบกับปริมาณ NR [19]

จากการทดสอบสมบัติการซึมผ่านของอากาศพบว่า NR มีการซึมผ่านของอากาศต่ำกว่า BR และสำหรับยางผสม NR/BR มีการซึมผ่านของอากาศน้อยมาก และมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ NR เพิ่มขึ้น แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ความสามารถในการซึมผ่านของอากาศ [19]

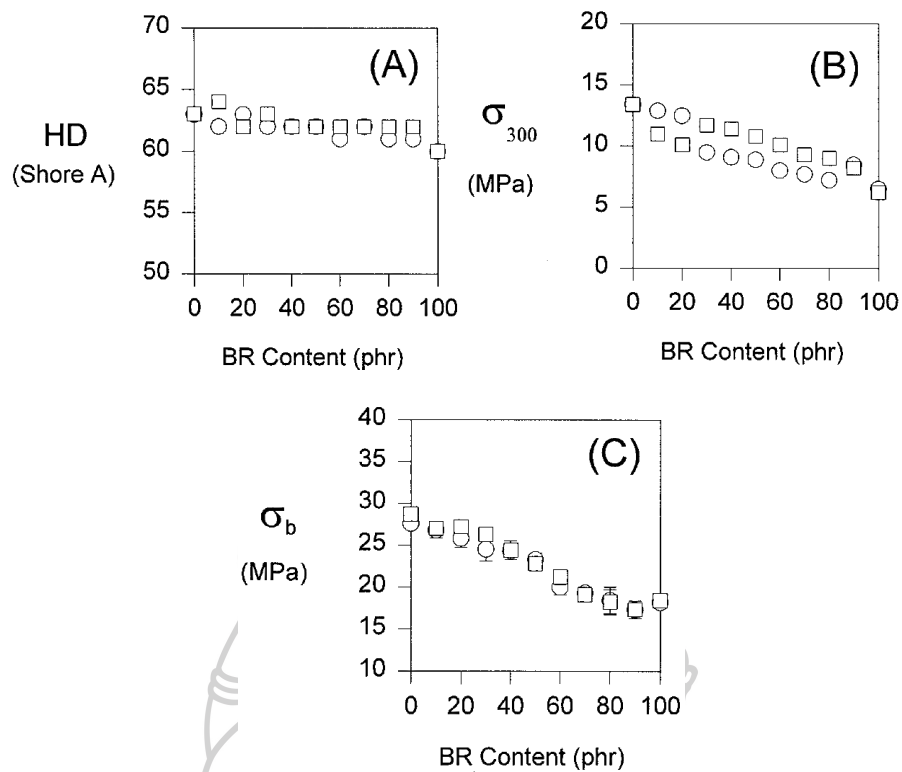
Testing item	NR/BR ratio					
	0/100	20/80	40/60	60/40	80/20	100/0
Measured value, cm ³ 24 h atm	414.46	383.77	370.44	358.03	343.70	271.60
Unit thickness permeability, cm ³ mm/m ² 24 h atm	825.11	785.33	717.01	598.04	590.74	450.85
Gas permeability coeff. , cm ³ cm/cm ² s cm hg	1.25 × 10 ⁻⁹	1.19 × 10 ⁻⁹	1.09 × 10 ⁻⁹	9.09 × 10 ⁻¹⁰	8.98 × 10 ⁻¹⁰	6.85 × 10 ⁻¹⁰

และจากการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังการทำ aging ที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 30 วันแสดงดังตารางที่ 2.17 พบว่าหลังการทำ aging ของยางผสม NR/BR tensile stress และ strain มีค่าลดลง และพบว่า stress loss ของ BR มีค่าต่ำกว่า NR กล่าวคือ ความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพต่ออุณหภูมิของ BR สูงกว่า NR



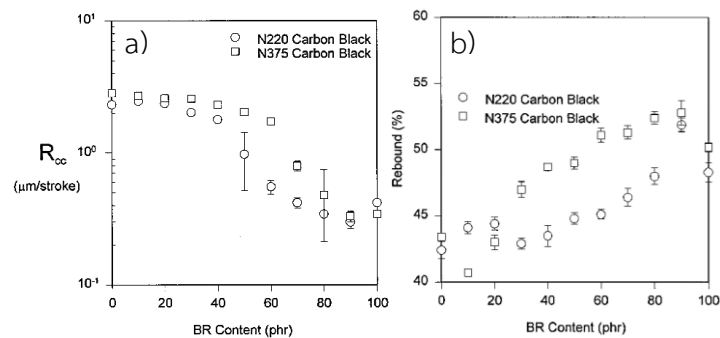
ภาพที่ 2.17 สมบัติเชิงกลของยางผสม NR/BR หลังทำ aging ที่อุณหภูมิ 70 °C เวลา 30 วัน [19]

N. Changwoon และคณะ [20] ได้ศึกษาความต้านทานต่อการ cut และ chip ของยางผสม NR/BR โดยได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลศึกษาความแข็ง (Hardness, HD) ความสามารถในการรับแรงเมื่อถูกดึงยืดได้ 300 % (stress 300 at % elongation, σ_{300}) และความสามารถในการรับแรงเมื่อถูกดึงยืดจนขาด (stress at elongation at break, σ_b) พบว่า ทั้งค่า HD, σ_{300} และ σ_b ของ NR สูงกว่าของ BR และในยางผสม NR/BR เมื่อปริมาณ BR เพิ่มขึ้นทำให้ HD, σ_{300} และ σ_b ของยางผสม NR/BR มีค่าลดลงแสดงผลการทดลองดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ผลการทดสอบ (A) ความแข็ง (B) ความสามารถในการรับแรงเมื่อถูกดึงยืดได้ 300 % (C) ความสามารถในการรับแรงเมื่อถูกดึงยืดจนขาดของยางผสม NR/BR [20]

ภาพที่ 2.19(a) แสดงความสัมพันธ์อัตราการ cut and chip (R_{cc}) กับปริมาณ BR ซึ่งพบว่าในยางผสม NR/BR เมื่อปริมาณ BR เพิ่มขึ้น ค่า R_{cc} มีค่าลดลง โดยหากค่า R_{cc} มากแสดงว่าวัสดุมีความต้านทานต่อการ cut and chip น้อย นั่นคือ BR มีความต้านทานต่อการ cut and chip ที่ดีกว่า NR และ ผลจากการทดสอบความสามารถในการกระด้างกลับแสดง ดังภาพที่ 2.19(b) พบว่าในยางผสม NR/BR เมื่อปริมาณ BR เพิ่มขึ้นความสามารถในการกระด้างกลับของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น

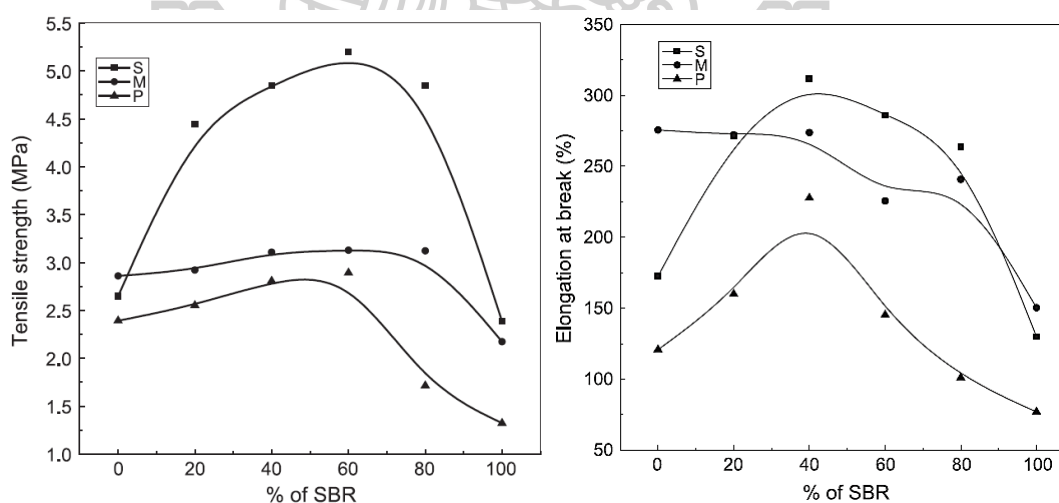


ภาพที่ 2.19 (a) อัตราการ cut and chip (b) สมบัติการกระด้างกลับของยางผสม NR/BR [20]

โดยจากผลการศึกษาของทั้ง 2 งานวิจัยดังกล่าวมานี้เป็นการทดสอบสมบัติของยางผสมระหว่าง BR/NR โดยพบว่ายางผสม BR/NR มีสมบัติการดึงยึด ความทนทานต่อการกัดฉีก และสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของอากาศ ของยางผสม BR/NR เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ NR ในระบบเพิ่มขึ้น โดย BR มีความต้านทานต่อการเสีรูปด้วยแรงกด และความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากอุณหภูมิที่ดีกว่า NR อีกทั้งยาง BR มีสมบัติการ cut and chip (ความทนทานต่อการขูดถู) ที่ดีกว่ายาง NR

อีกทั้งได้มีการศึกษาสมบัติของยางผสมที่ทำการผสมกับยาง NBR ไว้มากมาย โดยยาง NBR ได้รับความสนใจในการนำมาศึกษาอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นยางที่มีขั้วทำให้สามารถนำไปใช้งานกับงานที่ต้องมีการสัมผัสน้ำมันได้ โดยมีงานวิจัยที่น่าสนใจดังนี้

Habeeb Rahiman K [21] และคณะ ได้ศึกษาอิทธิพลของระบบการ curing และสมบัติเชิงกลของยางผสมระหว่างยางสไตรีนบิวทาไดอีน (SBR) และยางอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอีน (NBR) โดยใช้ระบบการ cure 3 ระบบ คือ sulphur pure (S), DCP (P) และระบบผสมระหว่าง Sulphur และ DCP (M) พบว่า cure time และ scorch time เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ SBR เพิ่มขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบระบบ vulcanizing ระหว่าง ระบบที่ใช้ Sulphur และ ใช้ DCP พบว่าระบบที่ใช้ sulphur เป็นสารวัลคาไนซ์มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าระบบอื่น และ tensile strength สูงสุดที่ SBR 60 %wt และค่า elongation at break มีค่ามากที่สุดที่ SBR 40 %wt แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 2.20



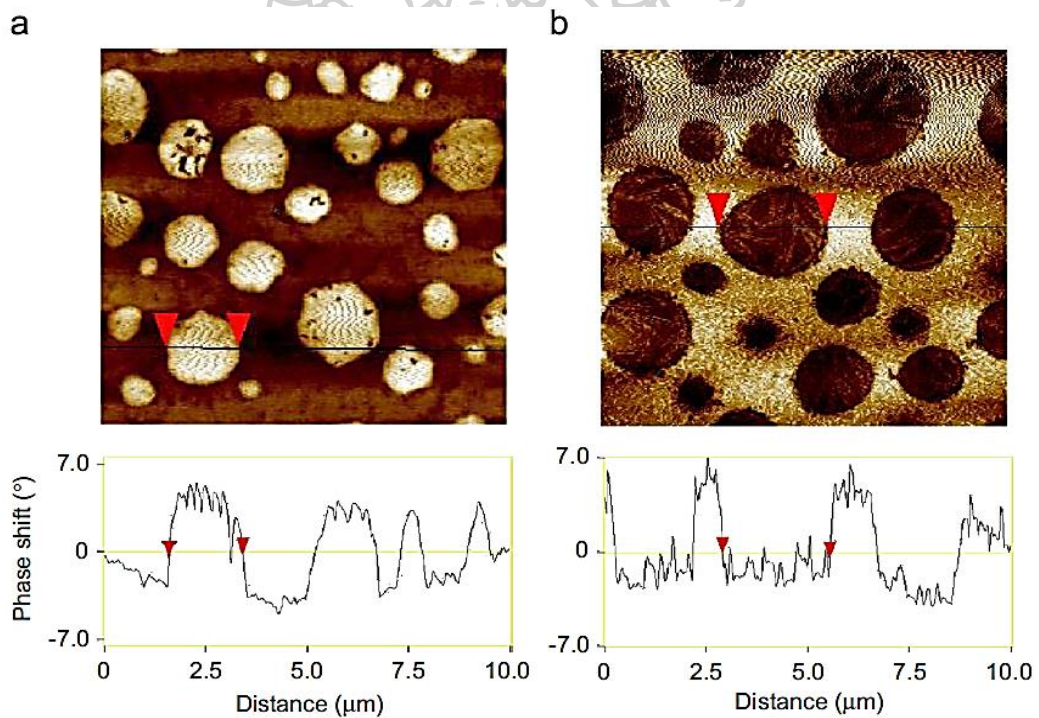
ภาพที่ 2.20 แสดงสมบัติเชิงกลของยางผสม SBR/NR [21]

S. Thanawan และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาของการเกิด phase shift ด้วยเทคนิค atomic force microscopic (AFM) ของฟิล์มยางผสม NR/NBR โดยใช้เทคนิคการ

ผสมเป็นสารละลาย (ใช้ benzene เป็นตัวทำละลาย) และเปลี่ยนอัตราส่วนการผสม คือ NR/NBR เป็น 1/3 1/1 และ 3/1 โดยน้ำหนัก ซึ่งจากการศึกษาด้วยเทคนิค AFM จากภาพที่ 2.21 พบว่า phase ของยางแยกออกอย่างชัดเจน ซึ่งการเกิด phase shift ของ NR เกิดมากกว่าของ NBR ในทุกอัตราส่วนการผสม ยิ่งไปกว่านั้นจากผลการทดสอบ Force-distance curve (FDC) ซึ่งสามารถใช้บอก adhesive force interaction ของยางผสมได้ โดยพบว่า adhesive force ของ NR สูงกว่า NBR แสดงดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 แสดง adhesive force interaction ของยางผสม NR/NBR [22]

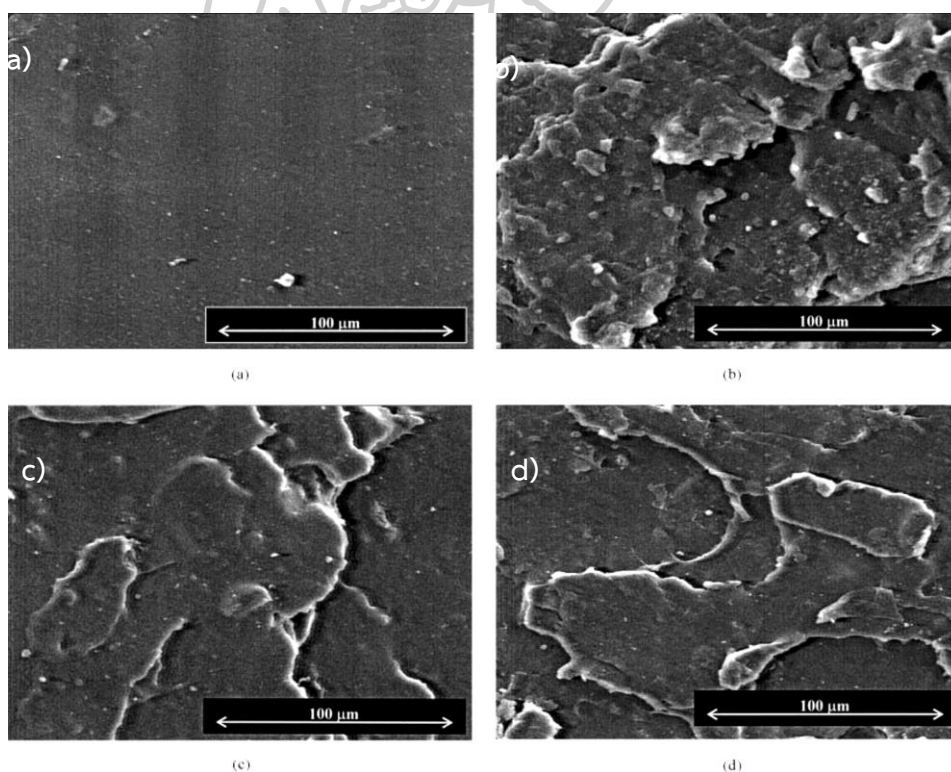
Surface	Relative surface stiffness	Adhesive force (nN)
Si wafer	1.00	3
NBR	0.76	66
NR	0.60	154



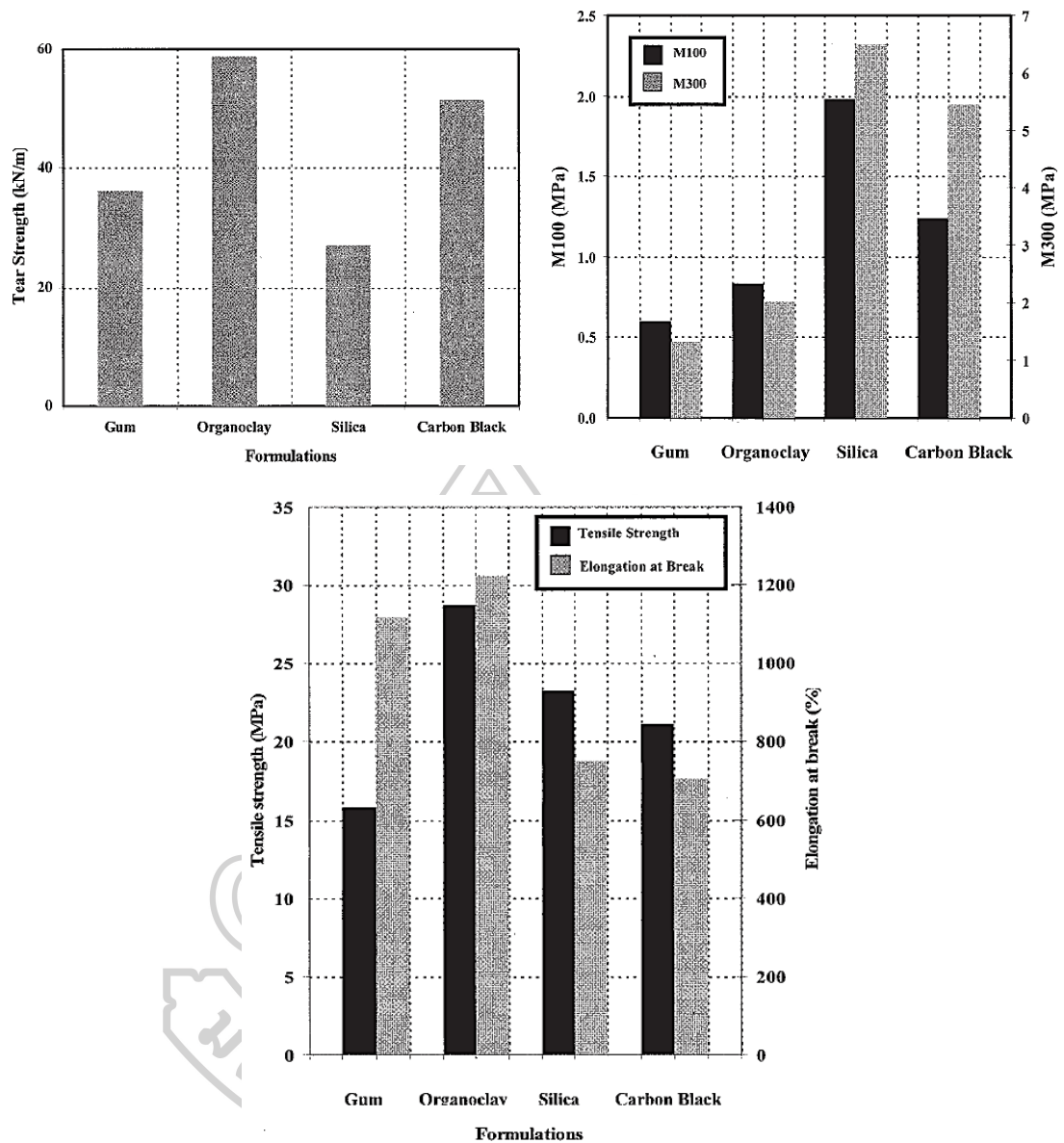
ภาพที่ 2.21 การเกิด Phase shift ของยางผสม NR/NBR (a) 1/3 และ (b) 1/1 โดยน้ำหนัก [22]

เนื่องจากการศึกษาอย่างผสมสิ่งที่ต้องคำนึงถึงมากที่สุดคือ ความเข้ากันได้ของยางผสม ซึ่งมีปัจจัยที่ส่งผลต่อความเข้ากันได้อยู่มากมาย เช่น ความเป็นขี้ ความหนืด เป็นต้น โดยมีงานวิจัยมากมายที่จัดการเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ของยางให้เพิ่มขึ้น โดยทางเลือกหนึ่งที่ยินยอมใช้กันมากคือ การผสม Organoclay ลงในยางผสม เพื่อให้เกิดการแทรกสอดของยางเข้าไประหว่างชั้นของเคลย์ ซึ่งช่วยลดความแตกต่างระหว่าง Phase ลงได้ โดยมีงานวิจัยที่น่าสนใจดังนี้

P. L. Teh และคณะ [23] ได้ศึกษาการใช้ Epoxidized natural rubber (ENR) เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ระหว่างยางธรรมชาติและสารเติมแต่งชนิดต่างๆ โดยใช้สารเติมแต่ง 3 ชนิดคือ Organo-clay, Carbon Black และ Silica โดยให้ยางธรรมชาติเป็น matrix หลัก เติม ENR 10 phr และผสมสารเติมแต่ง 3 สูตร คือ Organo-clay 2 phr, Carbon Black 50 phr และ Silica 50 phr โดยจากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานที่ผ่านการดึงยืด จากภาพที่ 2.22 พบว่า สารเติมแต่งกระจายตัวได้ดีในเนื้อยางธรรมชาติ แสดงให้เห็นถึงการมี filler-rubber matrix interaction ที่ดีในทุกการผสม และจากการศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่า NR ที่ผสม organoclay มีค่า tensile strength และ tear strength ของยางมากที่สุด แสดงดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.22 ภาพ SEM ของชิ้นงานหลังถูกดึงยืด (a) NR (b) NR/organo clay
(c) NR/silica (d) NR/CB [23]

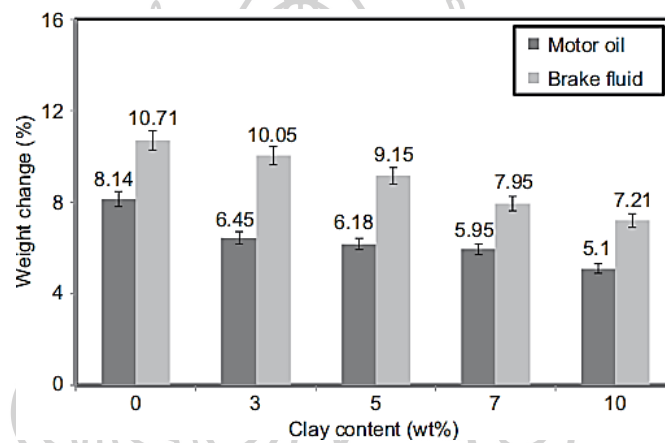


ภาพที่ 2.23 แสดงสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่ผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ [23]

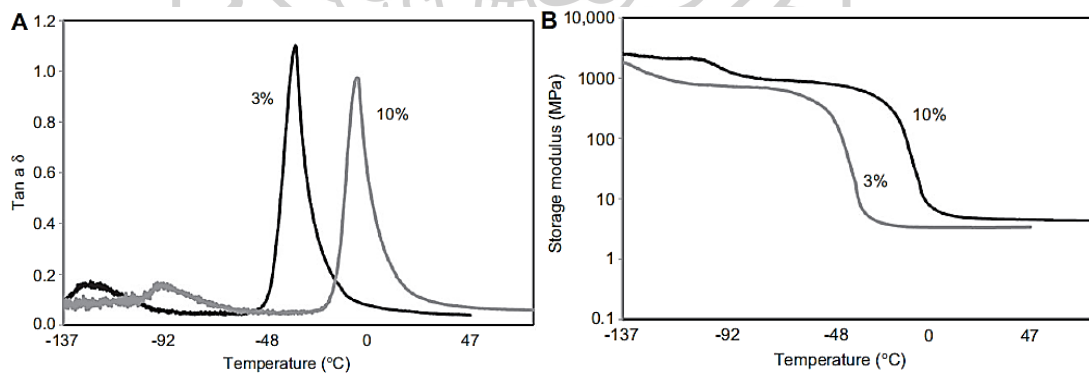
S. Tolooei และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกล และสัณฐานวิทยาของยางผสม NBR/BR ที่ผสมสารเติมแต่ง nanoclay โดยใช้ NBR/BR เป็น 50/50 และใช้ nanoclay 2 ชนิดคือ cloisite 15A และ cloisite 30B โดยผสม Nanoclay ทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกันด้วยอัตราส่วน 50/50 และผสมในยางผสมที่อัตราส่วน 0 3 5 7 และ 10 phr ซึ่งได้ผลการศึกษาการ cure ดังตารางที่ 2.12 พบว่าเมื่อเติม clay ลงในยางผสม NBR/BR ค่า scorch time และ cure time ลดลง และจากการทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำมันแสดงดังภาพที่ 2.24 พบว่าความสามารถในการดูดซับน้ำมันลดลงเมื่อปริมาณ clay ในยางผสมเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.12 แสดงการศึกษาการ curing ของยางผสม NBR/BR ที่เติมสารเติมแต่ง [24]

Sample Code	t_s	t_{90}	$M_H - M_L$	Gel content (%)
	min : sec	min : sec	N.m @ 160°C	
NB50	12:31	4:25	5.6±0.3	83.3
NB50C3	11:42	3:58	6.6±0.1	86.2
NB50C5	10:11	3:10	7.1±0.1	89.8
NB50C7	10:56	3:43	7.8±0.2	88.1
NB50C10	11:17	3:55	7.2±0.1	88.6



ภาพที่ 2.24 ความสามารถในการดูดซับน้ำมันของยางผสม NBR/BR ที่เติมสารเติมแต่ง [24]



ภาพที่ 2.25 แสดงการศึกษา DMTA ของ (A) $\tan \delta$ และ (B) storage modulus เทียบกับอุณหภูมิของยางผสม NBR/BR ที่มีการเติมสารเติมแต่งที่ 3 และ 10 phr [24]

ตารางที่ 2.13 แสดงสมบัติเชิงกลของยางผสม NBR/BR ที่เติมสารเติมแต่ง [24]

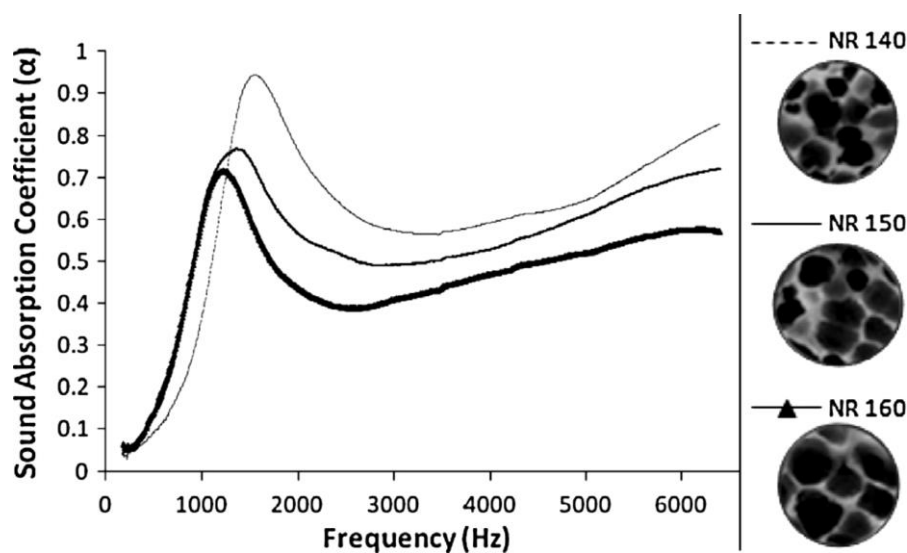
Property	NB50	NB50C3	NB50C5	NB50C7	NB50C10
Tensile strength, MPa	2.28 ± 0.06	4.05 ± 0.08	4.82 ± 0.08	6.10 ± 0.07	5.78 ± 0.06
Modulus 100%, MPa	1.14 ± 0.02	1.24 ± 0.01	1.48 ± 0.01	1.51 ± 0.01	1.74 ± 0.02
Elongation at break,%	315 ± 4	291 ± 4	303 ± 4	352 ± 5	355 ± 5
Hardness	52.31 ± 1.04	53.42 ± 0.78	54.55 ± 1.14	56.35 ± 1.64	57.11 ± 1.52
Abrasion, %wt	16.23 ± 0.66	9.75 ± 0.92	9.10 ± 1.01	8.50 ± 1.32	7.44 ± 1.05
Compression set, %	57.59 ± 0.13	55.62 ± 0.10	52.09 ± 0.08	51.76 ± 0.06	48.41 ± 0.08
Compression strength, MPa	1.05 ± 0.03	1.15 ± 0.02	1.21 ± 0.01	1.28 ± 0.02	1.84 ± 0.02

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลแสดงดังตารางที่ 2.13 พบว่าเมื่อ clay มากกว่า 7 phr ส่งผลให้ค่า tensile strength และ elongation at break ของยางผสมเพิ่มขึ้น และเมื่อ clay เพิ่มขึ้นส่งผลให้ยางผสมมี abrasion resistance ที่ดีขึ้น และจากผลการทดสอบ DMTA แสดงดังภาพที่ 2.25 พบว่าเมื่อเติม clay ลงในยางผสม ทำให้อุณหภูมิ glass transition (T_g) ของยางผสมเพิ่มขึ้น และค่า storage modulus มีค่าเพิ่มขึ้น

ในปัจจุบันมีความสนใจในวัสดุที่มีรูพรุนเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ โฟมยาง ซึ่งมีสมบัติเหมาะกับการใช้งานมากมาย เนื่องจากโฟมยางยังคงมีความสามารถในการยืดหยุ่นของยาง อีกทั้งเมื่อนำมาทำโฟม ทำให้ความหนาแน่นลดลงอย่างมาก ซึ่งทำให้มีน้ำหนักเบา และมีต้นทุนในการผลิตลดลง โดยมีงานวิจัยที่น่าสนใจดังนี้

N.N. Najib และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับเสียง (acoustic absorption) ศึกษาสมบัติเชิงกลพลวัต (dynamic mechanical) ของ NR foams เพื่อนำมาใช้เป็นวัสดุ superior sound-absorbing และวัสดุ sound-insulation ซึ่งสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับ average cell size, relative density, crosslink density และ number of cells per unit volume ของ

NR foam โดยทำการผสมในระบบ EV system และมีการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการ curing และ foaming ใน air-circulating oven 3 อุณหภูมิ ได้แก่ 140 150 และ 160 °C



ภาพที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ของ sound absorption coefficient กับความถี่ [25]

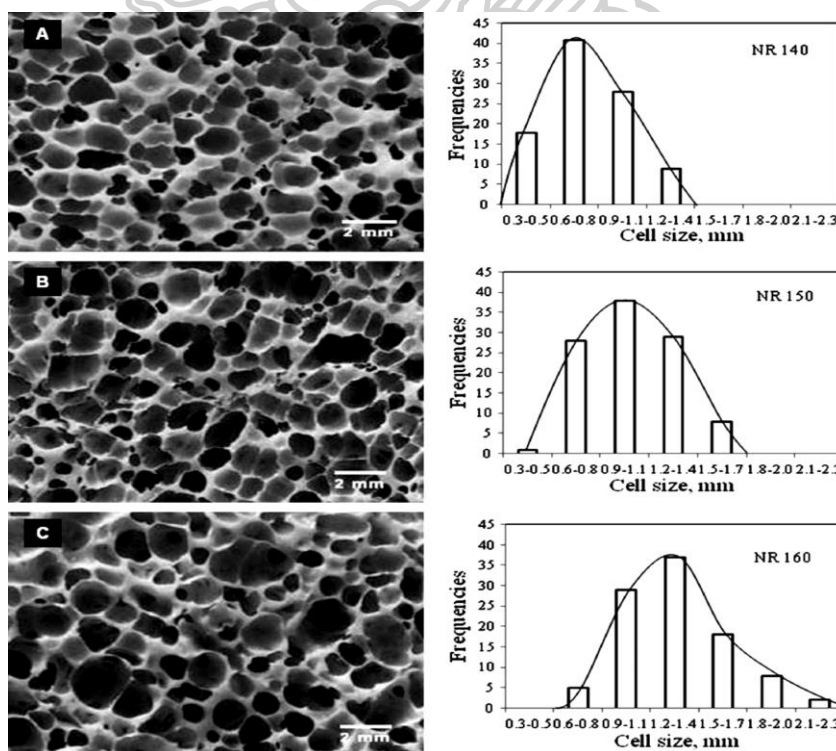
จากการทดสอบความสามารถในการดูดซับเสียงของ NR foam แสดงดังภาพที่ 2.26 พบว่า NR Foam ที่ผ่านการ curing และ foaming ที่อุณหภูมิ 140 °C พบว่ามี peak ของ sound absorption ที่สูงที่สุด และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพบการ peak shift ไปทางที่ความถี่ต่ำลงและมีค่า sound absorption coefficient ลดลง ซึ่งช่วงของความถี่ที่พบสามารถบอกได้ว่าวัสดุนี้เป็นวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุ sound-absorbing ได้

ยิ่งไปกว่านั้น NR foam ยังแสดงความเป็น superior absorption capabilities ที่ความถี่ต่ำ (1,000-2,000 Hz) และที่ความถี่สูงมี absorption capabilities ที่สูงสุดประมาณ 83 % (5,500-6,400 Hz) ซึ่ง structural properties ของ NR foam ต่างกันเมื่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่างกัน โดย structural properties เป็นตัวควบคุม cell size, relative density และ crosslink density ซึ่งการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงกว่าทำให้เกิดความดันจากก๊าซ carbon dioxide สูงกว่าส่งผลให้ผนังเซลล์เกิดการขยายตัวมากกว่า จึงได้ cell size ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้ foam มี relative density น้อยกว่า คือมี solid phase ลดลง และมี crosslinking น้อย โดยได้แสดงสมบัติต่างๆ ดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างของ NR foam [25]

	NR 140	NR 150	NR 160
Relative density	0.3635	0.2738	0.2614
Crosslink density ($\times 10^{-5}$, mol cm $^{-3}$)	7.35	6.69	5.92
Average cell size (mm)	0.81 ± 0.212	1.06 ± 0.281	1.34 ± 0.366
Number of cell per unit volume ($\times 10^3$, cm $^{-3}$)	3.27	2.86	1.60
Expansion ratio	2.751	3.652	3.825

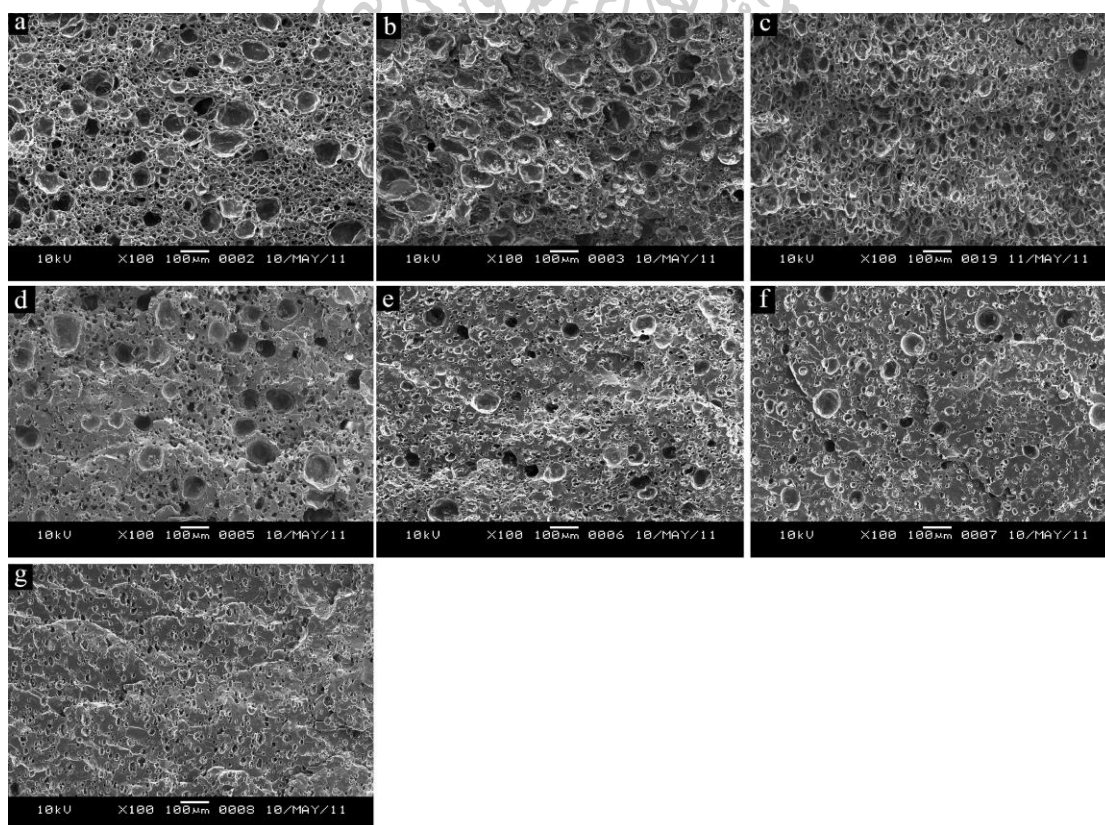
ในภาพที่ 2.27 แสดงการเปลี่ยนแปลง morphology และ cell-size distributions พบว่า กราฟซึ่งแสดง cell-size distribution เป็นไปทางที่มี cell size ขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ ในการขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น ทำให้การกระจายตัวของ cell-size distributions เป็นช่วงกว้าง และจาก ลักษณะความโค้งมนหรือความแหลมของกราฟ แสดงให้เห็นว่า NR 140 มีความเป็น cell-size homogeneity ที่ดีกว่า NR 150 และ NR 160



ภาพที่ 2.27 แสดง Morphology และ cell-size distribution ของ NR foam

(A) NR 140, (B) NR 150, และ (C) NR 160 [25]

X. Wang และคณะ [26] ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณการ precure ที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาสมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลของโฟม NR/SBR/BR ในงานวิจัยนี้ให้ BR เป็นเฟสหลัก (BR/NR/SBR : 70/15/15) และใช้ Oxybis (benzene sulfonyl) hydrazide (OBSH) เป็น chemical blowing agents โดยใช้ปริมาณในการ precure คือ 0 20 30 40 50 60 70 % โดยการ precure นั้นทำให้โครงสร้างต่างๆ ของโฟม NR/SBR/BR ดีขึ้น (cell size, cell size distribution, cell wall thickness, cell density, crosslinking density) รวมทั้งสมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกลด้วย จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟม NR/SBR/BR โดยภาพ SEM แสดงดังภาพที่ 2.28 พบว่าที่ปริมาณ precure 30% มีจำนวนของเซลล์ (number of cell) ที่หนาแน่นกว่าการ precure ที่ปริมาณอื่นๆ ซึ่งปริมาณการ precure ที่มากขึ้นทำให้ขนาดของ cell เฉลี่ย (average cell size) ลดลง และความหนาของผนังเซลล์ (cell wall thickness) จะบางลง รวมทั้งการกระจายตัวของเซลล์ (cell distribution) กว้างขึ้น



ภาพที่ 2.28 ภาพถ่าย SEM ของโฟม BR/SBR/NR ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการ precure: (a) 0%, (b) 20%, (c) 30%, (d) 40%, (e) 50%, (f) 60% และ (g) 70%. [26]

จากการศึกษา crosslink density ด้วยเทคนิค equilibrium swelling พบว่า crosslinking density ของ BR/NR/SBR foam เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการ precure เพิ่มขึ้น แสดงดัง ตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 Crosslinking density ของ BR/NR/SBR foam ที่ปริมาณการ precure ต่างกัน [26]

Sample	XLDS					Swelling
	A(M _c) (%)	M _c (g/mol)	A(T ₂) (%)	T ₂ (ms)	XLD ₁ (x 10 ⁻⁴) mol/g	XLD ₂ (x 10 ⁻⁴) mol/g
I	33.58	8410	62.27	3.76	0.999	0.964
II	37.55	8240	58.42	3.64	1.099	1.069
III	38.95	8110	57.09	3.59	1.185	1.130
IV	39.85	7900	55.92	3.42	1.215	1.185
V	40.12	7480	54.70	3.31	1.283	1.277
VI	40.92	7150	54.32	3.32	1.301	1.290
VII	42.84	6960	52.67	3.29	1.336	1.334

* [sample I, II, III, ..., VII : ปริมาณ precure 0, 20, 40, ..., 70]

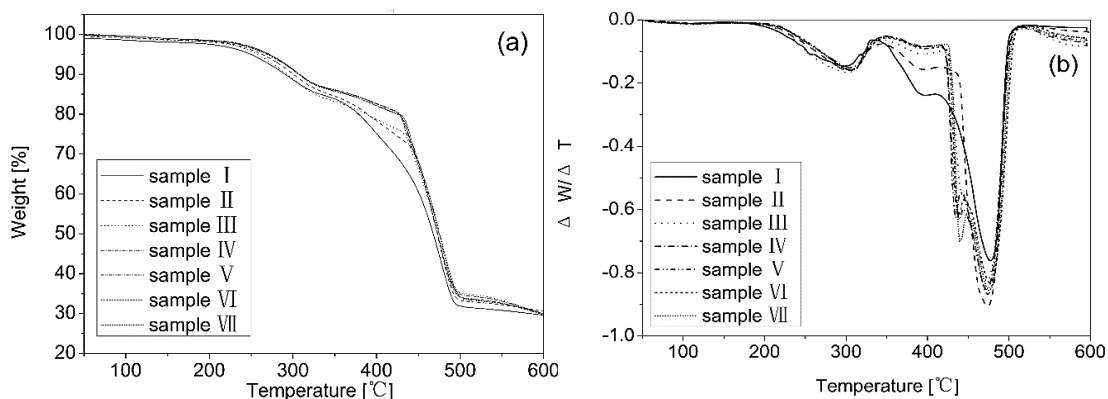
* motion of inter crosslink chain : A(M_c), motion of dangling chain ends and free chain : A(T₂), average molecular weight between two crosslinking : M_c, relaxation time of crosslinking network : T₂, total crosslinking density : XLD

การศึกษา DSC แสดงให้เห็น peak ของ heat capacity 2 ชั้น โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการ precure ทำให้ T_g ทั้งสองช่วง shift ไปที่อุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ crosslinking density แสดงค่า T_g ดังตารางที่ 2.16

ตารางที่ 2.16 ผลการศึกษา DSC ของ BR/NR/SBR foam ที่ปริมาณการ precure ต่างกัน [26]

Samples	T _g (°C)	T _{g2} (°C)	Melting enthalpy (J/g)
I	-103.9	-66.0	3.4
II	-103.3	-65.8	2.6
III	-103.3	-65.8	2.4
IV	-102.9	-65.6	2.3
V	-102.7	-64.9	2.3
VI	-102.6	-64.6	2.1
VII	-102.5	-63.6	2.1

ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน (TGA) แสดงดังภาพที่ 2.29พบว่า BR/NR/SBR foam ที่ผ่านการ precure ปริมาณต่างกัน มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าโฟมที่ไม่ผ่านการ precure และสมบัติเชิงกล (tensile strength, tensile modulus, elongation at break, hardness และ tear strength) ของ BR/NR/SBR foam มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการ precure เพิ่มขึ้นแสดงดังตารางที่ 2.17



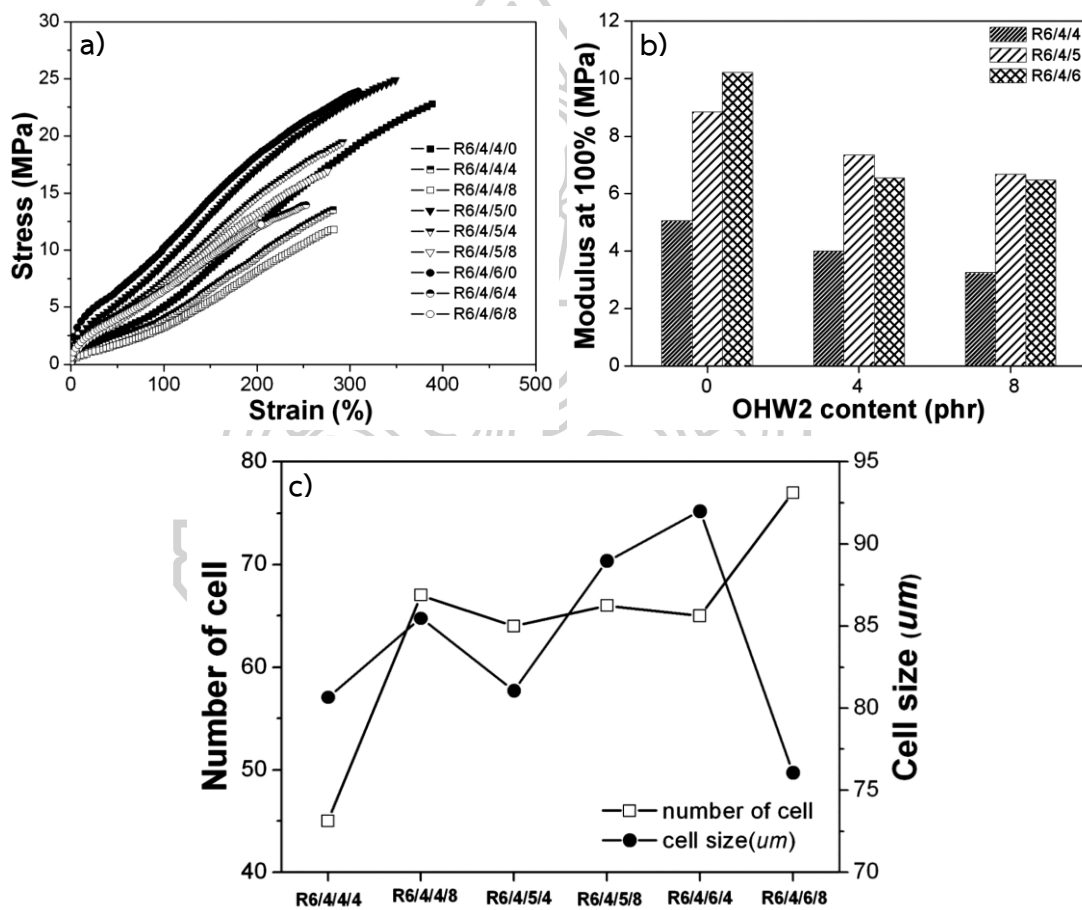
ภาพที่ 2.29 TGA และ DTG thermograms ของ BR/SBR/NR foam ที่ปริมาณ precure ต่างกัน [26]

ตารางที่ 2.17 แสดงสมบัติเชิงกลของ BR/NR/SBR foam ที่ปริมาณ precure ต่างกัน [26]

Procured Degree (%)	Tensile Strength (MPa)	Modulus at 100% (MPa)	Modulus at 300% (MPa)	Elongation at break (%)	Tear Strength (N/mm)	Hardness (shore C)
I	3.4 ± 0.3	0.8 ± 0.1	2.7 ± 0.2	346 ± 15	12.1 ± 0.6	42 ± 1
II	4.1 ± 0.1	1.0 ± 0.1	3.5 ± 0.2	352 ± 11	22.9 ± 0.9	51 ± 1
III	5.6 ± 0.4	1.1 ± 0.1	3.6 ± 0.3	432 ± 11	23.3 ± 1.0	55 ± 1
IV	6.3 ± 0.2	1.2 ± 0.1	4.0 ± 0.2	433 ± 10	30.6 ± 2.2	51 ± 1
V	7.2 ± 0.2	1.3 ± 0.1	4.3 ± 0.3	464 ± 21	34.0 ± 2.7	47 ± 0
VI	10.3 ± 0.5	1.6 ± 0.2	5.4 ± 0.6	525 ± 32	35.0 ± 0.3	40 ± 1
VII	11.1 ± 0.3	2.1 ± 0.1	6.6 ± 0.3	538 ± 18	36.3 ± 0.5	40 ± 0

U. Basuli และคณะ [27] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการ foaming โครงสร้าง และสมบัติต่าง ๆ ของ โฟมยางผสม ที่ใช้สารเสริมแรง zinc methacrylate (ZMA) โดยยางที่ใช้ คือ natural rubber (NR)/butadiene-rubber (BR) เบลนด์ และใช้ p-oxybis-benzene-sulfonylhydrazide (OBSH,

OHW2) เป็น blowing agent โดยใช้ NR/BR เป็น 60/40 และใช้ ZMA 40, 50, 60 ใช้ OHW2 0, 4, 8 (Formulation : R NR/BR/ZMA/OHW2 เช่น 60NR 40BR 40ZMA 4OHW2 ใช้ R6/4/4/4 เป็นต้น) จากการทดสอบสมบัติเชิงกลดังภาพที่ 2.30 พบว่า tensile strength (ภาพที่ 2.30a) ของโฟมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารเติมแต่งเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการเสริมแรง (reinforcing effect) ของสารเติมแต่ง ในขณะที่ค่า elongation at break (ภาพที่ 2.30a) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ foaming agent และ ZMA เพิ่มขึ้น และ tensile modulus (ภาพที่ 2.30b) ของโฟมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ ZMA เพิ่มขึ้น แต่มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ foaming agent เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติม ZMA ส่งผลต่อโครงสร้างของโฟม เช่น cell size หรือ จำนวน cell ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 2.30c



ภาพที่ 2.30 (a) แสดง stress-strain curve (b) แสดงค่า tensile modulus กับปริมาณ blowing agent และ (c) แสดง จำนวน cell และ cell size ของโฟมยาง NR/BR ที่ผสมสารเสริมแรงปริมาณต่างๆ [27]

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber) เกรด STR 5L จากบริษัท P J Rubber Co., Ltd. ประเทศไทย โดยมีค่า Mooney viscosity ML_{1+4} 100 °C ~ 85

3.1.2 ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber) เกรด 130B จากบริษัท UBE Industries Ltd. ประเทศไทย โดยมีค่า Mooney viscosity ML_{1+4} 100 °C ~ 29 ซึ่งมีไอโซเมอร์ cis-1,4 butadiene ปริมาณ 96 %wt

3.1.3 ยางอะครีโลไนไตรบิวทาไดอีน (Acrylonitrile butadiene rubber) เกรด NBR 6240 จากบริษัท LG Chem Ltd. ประเทศเกาหลี โดยมีค่า Mooney viscosity ML_{1+4} 100 °C ~ 47 ซึ่งมีปริมาณหมู่ครีโลไนไตร 34%

3.1.4 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จากบริษัท Ajax Finechem Pty Ltd. จากประเทศออสเตรเลีย ใช้ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (Activator)

3.1.5 สเตียริก แอซิด (Stearic acid) จากบริษัท AppliChem GmbH จากประเทศเยอรมัน ใช้ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (Activator)

3.1.6 2-2'-Dithiobis (benzothiazole) (MBTS) จากบริษัท ชันนี่เวลด์ เคมีเคิล จำกัด ประเทศไทย ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา (Accelerator)

3.1.7 กำมะถัน (S_8) ใช้เป็นสารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent)

3.1.8 Retarder CTP จากบริษัท Innovation Technology Co, Ltd. ประเทศไทย ใช้เป็นสารหน่วงปฏิกิริยา (Retarder)

3.1.9 ซิลิกา (Precipitate silica) ใช้เป็นสารก่อให้เกิดการพองฟู (Nucleating blowing agent)

3.1.10 Supercell-EW จากบริษัท A.F. Supercell ประเทศไทย ใช้เป็นสารพองฟู (Blowing agent)

3.1.11 ออร์กาโนเคลย์ (Cloisite 30B) ใช้เป็นสารเติมแต่ง (Filler)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ดำเนินงานวิจัย

3.2.1 เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) บริษัท Barbender Plasticorder รุ่น Lab-Station W50EHT ประเทศเยอรมนี

3.2.2 เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัทหงษ์ยาวไทย รุ่น XK06 ประเทศไทย

3.2.3 เครื่องนวดยาง (Kneader mixer) บริษัท Innovation Technology Co, Ltd. ประเทศไทย

3.2.4 เครื่องขึ้นรูปกดอัดด้วยความดัน (Compression molding) บริษัท Chareon Tut รุ่น PR1D-W300L350 ประเทศไทย

3.2.5 เครื่องกดยางด้วยความดัน (Hydraulic pressure)

3.2.6 เครื่องศึกษาลักษณะการคงรูปของยาง (Moving die rheometer, MDR) บริษัท Gotec รุ่น M2000 ประเทศไต้หวัน

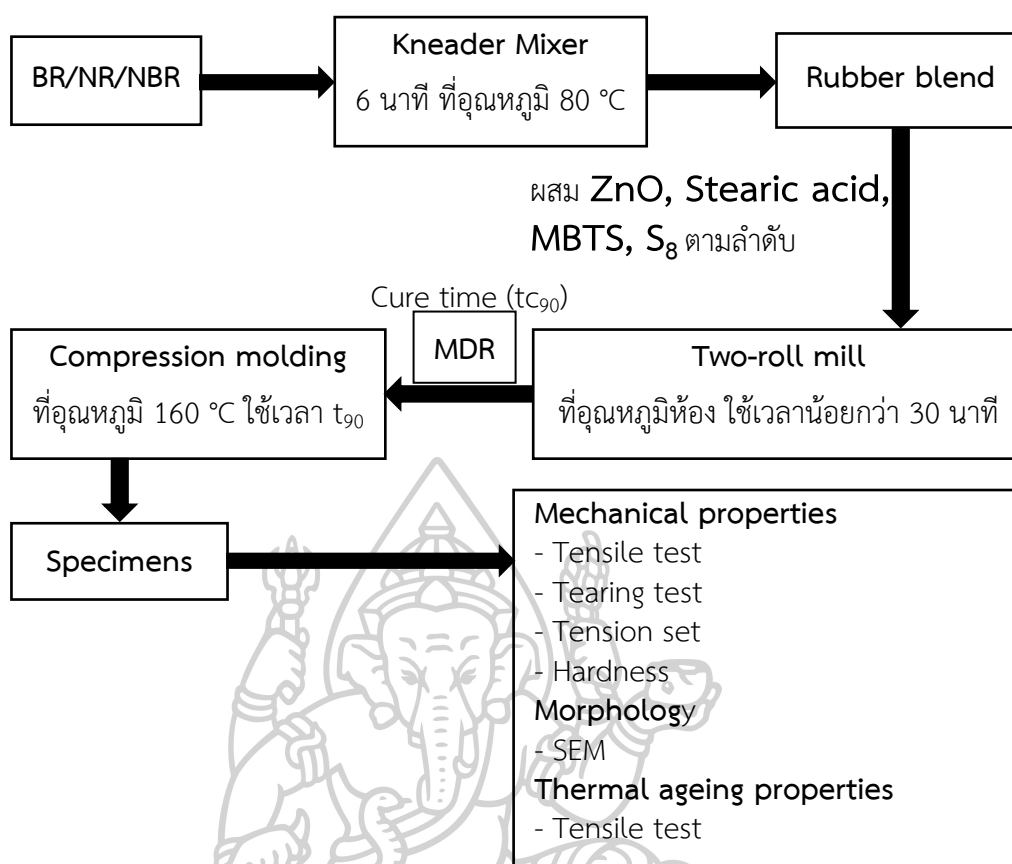
3.2.7 เครื่องทดสอบความหนืด (Mooney viscometer) บริษัท GÖTTFERT ประเทศเยอรมนี

3.2.8 เครื่องทดสอบสมบัติวัสดุทั่วไป (Universal testing machine) บริษัท Instron engineering corporation รุ่น Instron 5969 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.9 เครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness durometer) บริษัท PTC instruments รุ่น 473 ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.10 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) บริษัท Hitachi high-technologies รุ่น TM3030 ประเทศญี่ปุ่น

3.2.11 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) บริษัท SHIMADZU รุ่น XRD-6100

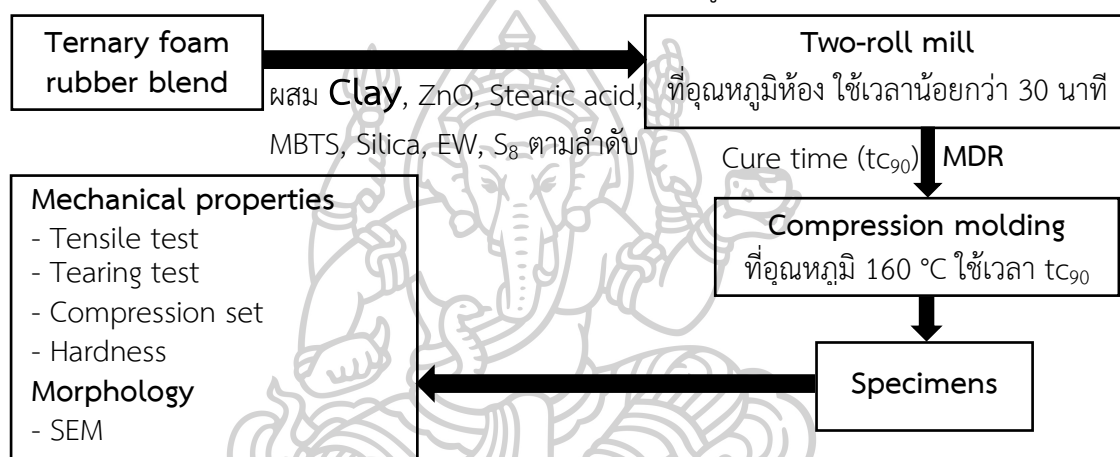


ภาพที่ 3.1 แสดงการศึกษาอย่างผสม BR/NR/NBR

ตอนที่ 2 ศึกษาการทำโคมยางผสม BR/NR/NBR โดยใช้ Supercell-EW ปริมาณ 10 phr เป็น Blowing agent โดยใช้วิธีการทำ compound rubber เช่นเดียวกับกับตอนที่ 1 แต่ในขั้นตอนการ masticate อย่างด้วย two-roll mill ต้องผสม Blowing agent 10 phr ก่อน Sulphur แล้วนำไปหาเวลาในการ curing (t_{c90}) ด้วยเครื่อง MDR และนำไปกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันที่อุณหภูมิ 160 °C ตามเวลาในการ cure จากนั้นนำสภาวะที่ได้มาทดลองใช้กับทุกอัตราส่วนการผสม โดยได้แสดงขั้นตอนการศึกษาโคมยางผสม BR/NR/NBR ดังภาพที่ 3.2 ได้แสดงอัตราส่วนของยางผสม และปริมาณสารเติมแต่งรวมทั้งสัญลักษณ์แทนสูตรการผสมไว้ดังตารางที่ 3.2

ในกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันที่อุณหภูมิ 160 °C ใช้ความดันประมาณ 1,500 psi โดยนำชิ้นงานใส่ในแม่พิมพ์ (Mold, โมลด์) แล้วทำการอัดด้วยแรงดันจนถึงเวลาที่ยางเริ่มเกิดการ Crosslink (Scorch time, t_{s2}) จากนั้นจะทำการเปิดโมลด์เล็กน้อย เพื่อให้ยางสามารถขยายตัวได้ โดยจะนำชิ้นงานออกจากโมลด์เมื่อถึงระยะเวลาในการขึ้นรูป (Cure time, t_{c90})

ตอนที่ 3 ทำการศึกษาโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติมสารเติมแต่งระดับนาโน (Nanofiller) คือ ออร์กาโนเคลย์ (Cloisite 30B) โดยเติมในปริมาณ 3 phr ซึ่งเลือกผสมเฉพาะกับโฟมยางผสมสามส่วน และใช้วิธีการทำ Foam rubber blend เช่นเดียวกันกับตอนที่ 2 แต่ในขั้นตอนการ masticate อยางด้วย two-roll mill นั้นต้องทำการใส่ Nanofiller ก่อนทำการเติมสารเติมแต่งใดๆ แล้วนำยาง Compound ไปหาเวลาในการ curing (t_{c90}) ด้วยเครื่อง MDR และนำไปขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปด้วยแรงดันที่อุณหภูมิ 160 °C ตามเวลาในการ cure นำชิ้นงานที่ได้ไปทำการทดสอบ โดยได้แสดงขั้นตอนการศึกษาโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Nanofiller ดังภาพที่ 3.3 และแสดงปริมาณสารเติมแต่งรวมทั้งสัญลักษณ์แทนสูตรการผสมไว้ดังตารางที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แสดงการศึกษาโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติมสารเติมแต่งระดับนาโน

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณสารเติมแต่งที่ใช้ รวมทั้งสัญลักษณ์แทนสูตรการผสม

สูตร สาร (phr)	F-60/20/20+30B	F-40/40/20+30B	F-20/60/20+30B
Cloisite 30B	3	3	3
Zinc oxide	5	5	5
Stearic acid	2	2	2
MBTS	1.5	1.5	1.5
CTP	0.5	0.5	0.5
Silica	30	30	30
Supercell-EW	10	10	10
Sulphur	2	2	2

3.4 การทดสอบและพิสูจน์เอกลักษณ์

3.4.1 การศึกษาลักษณะการคงรูปของยาง

ลักษณะการคงรูปของยาง ทำการศึกษาด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) จากบริษัท Gotec รุ่น M2000 ประเทศไต้หวัน ดังภาพที่ 3.4 โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D5289 ในการทดสอบใช้ชิ้นงานประมาณ 6 กรัมต่อหนึ่งการทดสอบ ซึ่งรายงานผลการทดสอบเป็นค่า Scorch time (ts_2), Cure time (tc_{90}), Δ Torque และ Cure rate index (CRI) ซึ่งค่าของ CRI คำนวณโดยใช้สมการที่ 3.1

$$CRI = \frac{100}{tc_{90} - ts_2} \quad (3.1)$$

เมื่อ Cure rate index (CRI) คือ อัตราเร็วในการเกิดกระบวนการ Vulcanized
 Scorch time (ts_2) คือ เวลาที่ย่างเริ่มเกิดการ Vulcanized มีหน่วยเป็น นาที (min.)
 Cure time (tc_{90}) คือ เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป มีหน่วยเป็น นาที (min.)



ภาพที่ 3.4 เครื่อง Moving die rheometer (MDR) บริษัท Gotec รุ่น M2000 ประเทศไต้หวัน

3.4.2 การวัดความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของยางผสม และโพลียเอทิลีนศึกษาโดยใช้ชิ้นงานที่มีลักษณะวงกลม โดยใช้เครื่องกดยางด้วยความดันในการตัดชิ้นงาน ซึ่งได้ชิ้นงานเป็นวงกลมที่มีรัศมีประมาณ 16.80 ± 0.09 mm. จากนั้นวัดความหนาของชิ้นงาน เพื่อนำไปหาปริมาตร (Volume, cm^3) และนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง จากนั้นนำมาคำนวณหา ความหนาแน่นตามสมการที่ 3.2 และนำมาเฉลี่ย

$$\text{Density} = \frac{\text{Weight (g)}}{\text{Volume (cm}^3\text{)}} \quad (3.2)$$

เมื่อ Density (D) คือ ความหนาแน่น

Weight (W) คือ น้ำหนักของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น กรัม (g.)

Volume (V) คือ ปริมาตรของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3 .)

3.4.3 การทดสอบความทนทานต่อการบวมตัว (%Swelling)

ในการศึกษาความหนาแน่นของโครงสร้างเชื่อมโยงของยางผสม และโพลียเอทิลีนที่ผ่านการคงรูป ซึ่งศึกษาผ่านการทดสอบการบวมตัวโดยตัดชิ้นงานเป็นวงกลมที่มีรัศมีประมาณ 16 ± 0.09 mm. จากนั้นชั่งน้ำหนักของชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ และไปแช่ในโทลูอีน และชั่งน้ำหนักชิ้นงานทุก ๆ 15 นาที จำนวน 12 ครั้ง, ทุก ๆ 30 นาที จำนวน 4 ครั้ง, ทุก ๆ 1 ชั่วโมง จำนวน 4 ครั้ง, ทุก ๆ 3 ชั่วโมง จำนวน 4 ครั้ง, ทุก ๆ 6 ชั่วโมง จำนวน 4 ครั้ง, ทุก ๆ 12 ชั่วโมง จำนวน 4 ครั้ง, ทุก ๆ 24 ชั่วโมง จำนวน 3 ครั้ง และทุก ๆ 48 ชั่วโมง จำนวน 2 ครั้ง จากนั้นคำนวณค่า %Swelling ตามสมการที่ 3.3 โดยแต่ละอัตราส่วนผสมมีการทำซ้ำ 3 ตัวอย่าง และนำค่า %Swelling มาเฉลี่ย

$$\% \text{Swelling} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ %Swelling คือ ร้อยละการบวมตัวของชิ้นงานเทียบกับก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น %

W_0 คือ น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการแช่ในสารละลาย มีหน่วยเป็น กรัม (g.)

W_t คือ น้ำหนักของชิ้นงานหลังการแช่ในสารละลายที่เวลาใด ๆ มีหน่วยเป็น กรัม (g.)

3.4.4 การทดสอบความหนืดของยางผสม (Mooney viscosity)

การทดสอบความหนืดของยางผสมทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) โดยใช้ในการทดสอบความหนืดของยางผสมที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ vulcanized

3.4.5 การทดสอบสมบัติความทนทานต่อการดึงยึด (Secant modulus, Tensile strength, Elongation at break)

การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการดึงยึด ทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile testing machine จากบริษัท Instron engineering corporation รุ่น instron 5969 ประเทศสหรัฐอเมริกา ตามมาตรฐาน ASTM D412 ใช้น้ำหนักในการดึง 50 kN และความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยแสดงผลเป็น Stress-strain curve, Tensile strength, %Elongation at break และ Secant modulus

3.4.6 การทดสอบสมบัติการยืดอยู่ตัว (Tension set)

การทดสอบสมบัติการยืดอยู่ตัว ทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D412 ใช้น้ำหนักในการดึง 50 kN และความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อ นาที โดยทำวัดความยาวและทำเครื่องหมายที่ gauge length ก่อนทำการดึงไว้ 35 mm. และดึงยางไว้ที่ 100 %strain เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำชิ้นงานออกและพักไว้ 10 นาทีเพื่อรออย่างคืนตัวและวัดความยาวระหว่างเครื่องหมายที่ทำไว้จากนั้นนำมาคำนวณตามสมการที่ 3.4

$$\%Tension\ set = \frac{L_i - L_0}{L_n - L_0} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ %Tension set คือ การยืดอยู่ตัว มีหน่วยเป็น %

L_0 คือ ความยาวของชิ้นงานก่อนดึง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

L_i คือ ความยาวของชิ้นงานหลังหลังดึง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

L_n คือ ความยาวของชิ้นงานขณะทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

3.4.7 การทดสอบยุบอยู่ตัวเนื่องจากแรงอัด (Compression set)

การทดสอบสมบัติการยุบอยู่ตัวเนื่องจากแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM D1056 โดยใช้เครื่อง กดด้วยแรงดันตัดชิ้นงานให้มีขนาดกว้าง x ยาว เป็น 30 x 30 mm. จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปกดให้ ความหนาของชิ้นงานลดลง 50 % และเก็บไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 3.5 จากนั้นนำมาคำนวณตามสมการที่ 3.5

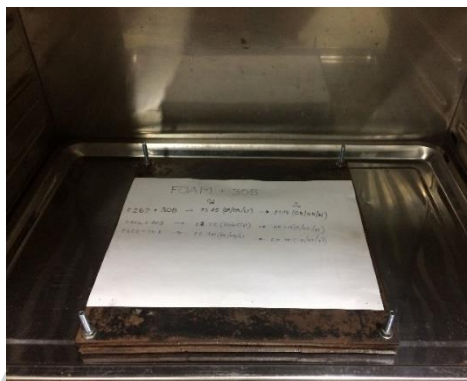
$$\%Compression\ set = \frac{T_0 - T_i}{T_0 - T_n} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ %Compression set คือ การยุบอยู่ตัว มีหน่วยเป็น %

T_0 คือ ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

T_i คือ ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

T_n คือ ความหนาของชิ้นงานขณะทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)



ภาพที่ 3.5 แสดงการทดสอบการยุบตัวถาวรของโพลิเมอร์ผสม

3.4.8 การทดสอบความแข็ง (Hardness)

การทดสอบความแข็งของยาง ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็ง (Hardness tester, Durometer) จากบริษัท PTC instruments รุ่น 473 ประเทศสหรัฐอเมริกา ตาม ASTM D2240 โดยใช้หัวทดสอบแบบ Shore A

3.4.9 การทดสอบความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear strength)

การทดสอบความทนทานต่อการฉีกขาด ซึ่งทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile testing machine ตามมาตรฐาน ASTM D624 ใช้น้ำหนักในการดึง 50 kN และความเร็วในการดึง 500 มิลลิเมตรต่อนาที โดยแสดงผลเป็นค่าของ Tear strength

3.4.10 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology)

การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) จากบริษัท Hitachi high-technologies รุ่น TM3030 ประเทศญี่ปุ่น โดยนำชิ้นงานไปแช่ในไนโตรเจนเหลว และทุบให้แตก จากนั้นนำไปเคลือบด้วยแพลเลเดียมผสมทอง (Pd/Au) แล้วนำชิ้นงานเข้ากล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อถ่ายภาพ โดยสำหรับยางผสม (Rubber blend) ใช้ศึกษาลักษณะความเข้ากันได้ และสำหรับโพลิเมอร์ผสมทั้งที่ผสมและไม่ผสม Cloisite 30B ใช้ศึกษาขนาดของเซลล์โพลิเมอร์ (Cell size) รวมถึงขนาดของผนังเซลล์ (Cell wall) และศึกษาการกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลิเมอร์ โดยใช้ร่วมกับโปรแกรม ImageJ

3.4.10 วิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

การทดสอบ XRD ใช้ทดสอบยางที่มีการเติม Cloisite 30B ซึ่งใช้ชิ้นงานจากการกดอัดด้วยความร้อนให้เป็นแผ่นบาง ๆ (~ 0.2 mm) โดยทำการทดสอบที่ความต่างศักย์ 40 kV. ใช้กระแสไฟฟ้า 40 mA. โดยศึกษาในช่วง 2 theta ตั้งแต่ 2-9 degree ใช้อัตราเร็วในการสแกนที่ 0.5 degree/minute

$$D = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (3.6)$$

เมื่อ D (d-spacing) คือ ระยะห่างของชั้นซิลิเกตของ Cloisite 30B มีหน่วยเป็น nm.
 λ คือ ความยาวคลื่นทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.154 nm.
 θ คือ มุมสะท้อนจากชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น องศา

3.4.11 การศึกษาความทนทานต่ออุณหภูมิ (Thermal aging property)

การทดสอบความทนทานต่ออุณหภูมิ ทำการทดสอบโดยใช้ tensile test โดยนำชิ้นงานไปใส่ไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0 1 3 5 7 และ 30 วัน จากนั้นนำชิ้นงานมาทดสอบความทนทานต่อแรงดึงยืด ซึ่งได้รายงานผลเป็นค่า Secant modulus ต่อระยะเวลาในการทดสอบ โดยได้แสดงภาพการทดสอบไว้ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 แสดงการทดสอบสมบัติ Thermal aging property ของยางผสม

3.4.12 การวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลเชิงสถิติ

เป็นการนำข้อมูลผลการทดสอบต่าง ๆ ที่ได้มาวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้สถิติ One way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ในการเปรียบเทียบ Tukey's pairwise โดยการแสดงผลทางสถิติ โดยใช้การแทนด้วยสัญลักษณ์ภาษาอังกฤษ ซึ่งตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงว่ามีค่าเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยได้แสดงสัญลักษณ์ไว้บนกราฟแท่งของสมบัติต่าง ๆ

3.5 สัญลักษณ์และตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์	ความหมาย
B-BR	ยาง BR ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur เป็น 5/2/1.5/2 phr
B-NR	ยาง NR ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur เป็น 5/2/1.5/2 phr
B-NBR	ยาง NBR ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur เป็น 5/2/1.5/2 phr
B-80/0/20	ยางผสมระหว่าง BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 80/0/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur เป็น 5/2/1.5/2 phr
B-60/20/20	ยางผสมระหว่าง BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 60/20/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur เป็น 5/2/1.5/2 phr
B-40/40/20	ยางผสมระหว่าง BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 40/40/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur เป็น 5/2/1.5/2 phr
B-20/60/20	ยางผสมระหว่าง BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 20/60/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur เป็น 5/2/1.5/2 phr
B-0/80/20	ยางผสมระหว่าง BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 0/80/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/Sulphur เป็น 5/2/1.5/2 phr

สัญลักษณ์	ความหมาย
F-BR	โฟมยาง BR ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีการเติม Blowing agent, Silica และ CTP เพิ่มเข้าไปในยางผสมเพื่อให้ได้เป็นโฟมยาง โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/Sulphur เป็น 5/2/1.5/ 0.5/30/10/2 phr
F-NR	โฟมยาง NR ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีการเติม Blowing agent, Silica และ CTP เพิ่มเข้าไปในยางผสมเพื่อให้ได้เป็นโฟมยาง โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/Sulphur เป็น 5/2/1.5/ 0.5/30/10/2 phr
F-NBR	โฟมยาง NBR ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีการเติม Blowing agent, Silica และ CTP เพิ่มเข้าไปในยางผสมเพื่อให้ได้เป็นโฟมยาง โดยมีอัตราส่วนการผสมสารเติมแต่ง ZnO/ Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/Sulphur เป็น 5/2/1.5/ 0.5/30/10/2 phr
F-80/0/20	โฟมยางผสม BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 80/0/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีการเติม Blowing agent, Silica และ CTP เพิ่มเข้าไปในยางผสมเพื่อให้ได้เป็นโฟมยาง อัตราส่วนสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/ EW/Sulphur เป็น 5/2/1.5/0.5/30/10/2 phr
F-60/20/20	โฟมยางผสม BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 60/20/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีการเติม Blowing agent, Silica และ CTP เพิ่มเข้าไปในยางผสมเพื่อให้ได้เป็นโฟมยาง อัตราส่วนสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/Sulphur เป็น 5/2/1.5/0.5/30/10/2 phr
F-40/40/20	โฟมยางผสม BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 40/40/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีการเติม Blowing agent, Silica และ CTP เพิ่มเข้าไปในยางผสมเพื่อให้ได้เป็นโฟมยาง อัตราส่วนสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/Sulphur เป็น 5/2/1.5/0.5/30/10/2 phr
F-20/60/20	โฟมยางผสม BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 20/60/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีการเติม Blowing agent, Silica และ CTP เพิ่มเข้าไปในยางผสมเพื่อให้ได้เป็นโฟมยาง อัตราส่วนสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/Sulphur เป็น 5/2/1.5/0.5/30/10/2 phr

สัญลักษณ์	ความหมาย
F-0/80/20	โพลียางผสม BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 0/80/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีการเติม Blowing agent, Silica และ CTP เพิ่มเข้าไปในยางผสมเพื่อให้ได้เป็นโพลียาง อัตราส่วนสารเติมแต่ง ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/ Silica/EW/Sulphur เป็น 5/2/1.5/0.5/30/10/2 phr
F-60/20/20+30B	โพลียางผสม BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 60/20/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยเพิ่มในส่วนของการเติม Cloisite 30B (C30B) อัตราส่วนสารเติมแต่ง : C30B/ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/Sulphur เป็น 3/5/2/1.5/0.5/30/10/2 phr
F-40/40/20+30B	โพลียาง BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 40/40/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยเพิ่มในส่วนของการเติม Cloisite 30B (C30B) อัตราส่วนสารเติมแต่ง : C30B/ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/Sulphur เป็น 3/5/2/1.5/0.5/30/10/2 phr
F-20/60/20+30B	โพลียางผสม BR/NR/NBR ในอัตราส่วน 20/60/20 ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชัน โดยเพิ่มในส่วนการเติม Cloisite 30B (C30B) อัตราส่วนการผสมเติมแต่ง : C30B ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/Sulphur เป็น 3/5/2/1.5/0.5/30/10/2 phr

บทที่ 4

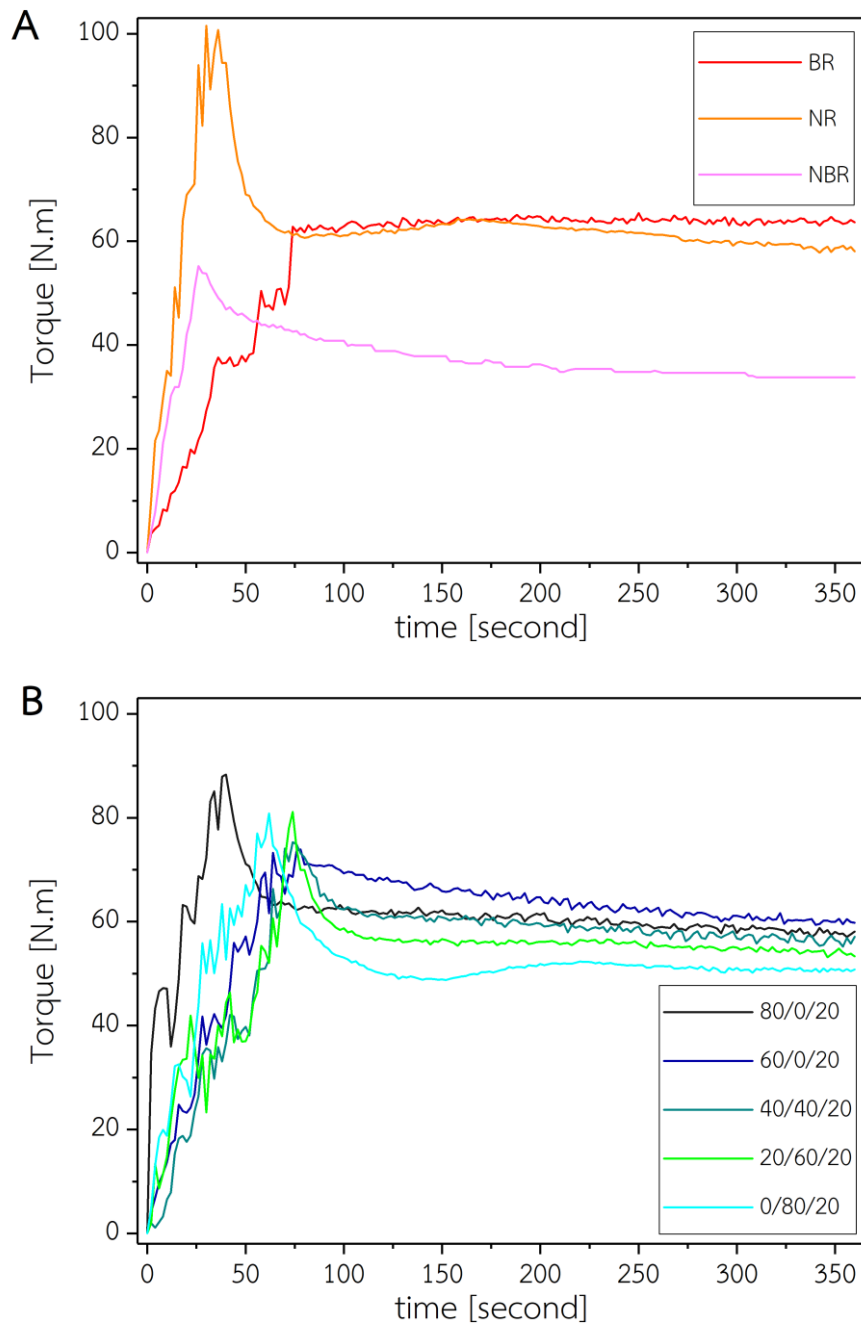
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) มีสมบัติเชิงกลที่โดดเด่น เช่น สมบัติด้านความยืดหยุ่น การกระดอนและความทนทานต่อการฉีกขาด แต่ถึงอย่างไรยางธรรมชาติดังกล่าวยังคงมีสมบัติบางประการที่ต้องปรับปรุง เช่น การเสื่อมสภาพเมื่อได้รับความร้อน หรือการบวมตัวเมื่อสัมผัสกับตัวทำละลายอินทรีย์ ที่ผ่านมาจึงได้มีแนวคิดมากมายในการนำยางแต่ละชนิดมาผสมกันเพื่อให้ได้สมบัติที่ดีขึ้นตามลักษณะการใช้งาน โดยยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) เป็นยางสังเคราะห์ที่มีสมบัติที่โดดเด่นคือ ความทนทานต่อการขูดถู และยางอะคริโลไนไตรบิวทาไดอีน (Acrylonitrile-butadiene rubber, NBR) เป็นยางสังเคราะห์ที่มีขั้วซึ่งทำให้มีความทนทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดเพื่อต้องการศึกษาสมบัติของยางผสมสามส่วน ซึ่งประกอบด้วยยางธรรมชาติ (มีสมบัติด้านความยืดหยุ่นที่ดี) ยางบิวทาไดอีน (มีความทนทานต่อการขูดถู) และยางอะคริโลไนไตรบิวทาไดอีน (ทนทานต่อตัวทำละลายที่มีขั้ว) จะเห็นว่าในงานวิจัยนี้มีการใช้ยางที่มีสภาพความเป็นขั้วที่ค่อนข้างต่างกันมาก โดยปัจจัยที่สำคัญของการผสมยาง คือ ความเข้ากันได้ของยางผสม ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อสมบัติต่าง ๆ ของยางผสม โดยทำการศึกษาสมบัติของยางก่อนทำการ vulcanized ไว้ดังนี้

ลักษณะการผสมของยางที่ยังไม่ผ่านกระบวนการ vulcanization

ในการศึกษาของผสมนั้น โดยทั่วไปมีวิธีการผสมยางและสารเคมีให้เข้ากันโดยการผสมยางและสาร Curing agents ต่าง ๆ ด้วยเครื่องผสม Two-roll mill อย่างไรก็ตามการผสมยางให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม Two-roll mill ไม่สามารถทำให้ยางแต่ละชนิดผสมกันจนมีความเข้ากันได้ที่ดีพอ อีกทั้งยาง BR และ NBR ไม่สามารถเกาะลูกกลิ้งของเครื่องผสม Two-roll mill ได้ (Form banding ยาก) ซึ่งทำให้การเติมสารเติมแต่งต่าง ๆ ไม่สามารถกระจายได้ทั่วถึงทุกส่วนของยาง ในงานวิจัยนี้จึงทำการผสมยาง BR/NR/NBR ให้เข้ากันก่อน โดยใช้เครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer)

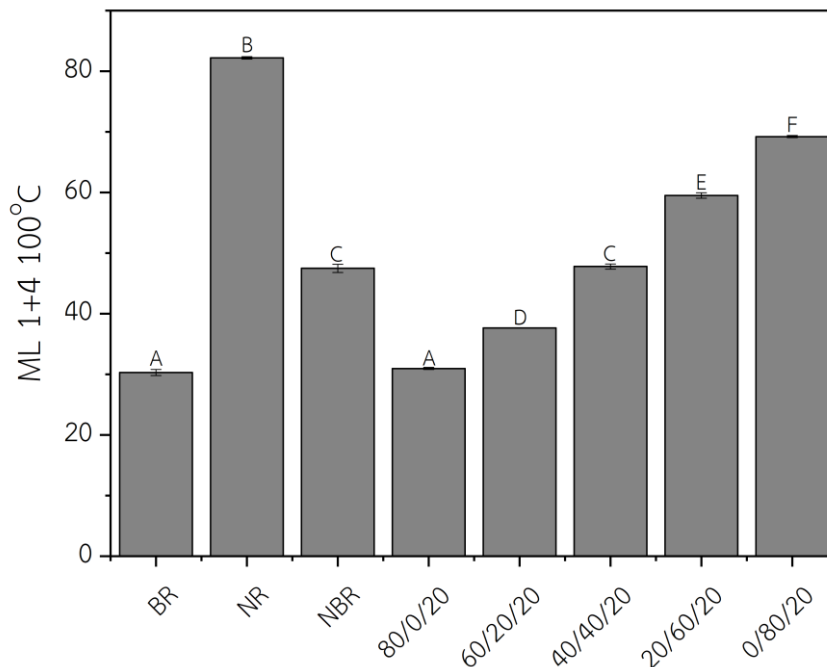
จากผลการผสมยางด้วย Internal mixer ทำให้ได้ผลการทดสอบเป็นกราฟ torque-time ของยางผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยทำการผสมที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 6 นาที ด้วยความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 4.1 พบว่ายางทุกอัตราส่วนมีค่า torque ที่ค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 4 นาที (240 วินาที) ซึ่งสามารถคาดการณ์ได้ว่ายาง BR NR และ NBR เกิดการผสมเข้ากันได้ในระดับหนึ่ง โดยเมื่อนำยางผสมออกจากเครื่องผสม และสังเกตลักษณะทางกายภาพของยางผสม พบว่ายางผสม BR/NR/NBR มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ในทุก ๆ อัตราส่วนการผสม



ภาพที่ 4.1 กราฟ torque-time โดย A เป็นยาง BR NR NBR ที่ยังไม่ผ่านการ vulcanized และ B เป็นยางผสม BR/NR/NBR ที่ยังไม่ผ่านการ vulcanized

อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องผสมแบบปิด มีประสิทธิภาพในการผสมยางให้เข้ากันได้ครั้งละ ปริมาณไม่มาก (45 g/batch) ซึ่งในการผสมด้วย Two-roll mil หนึ่งครั้งจำเป็นต้องใช้ยางอย่างน้อย ประมาณ 300 g/batch เพื่อให้สารเติมแต่งต่าง ๆ กระจายได้ทั่วถึง ทำให้ในงานวิจัยนี้ได้เปลี่ยนไปใช้ เครื่องนวดผสม (Kneader mixer) ในการผสมยาง ซึ่งมีความสามารถในการผสมที่ใกล้เคียงกับเครื่อง

ผสมแบบปิด โดยใช้อุณหภูมิในการผสมที่ 80 ± 5 °C เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นนำยางที่ผ่านการนวดด้วย Kneader mixer มาหาความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)



ภาพที่ 4.2 Mooney viscosity ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ยังไม่ผ่านการ vulcanized

*พารามิเตอร์บนแท่งกราฟ คือ One way anova ซึ่งแสดงความแตกต่างทางสถิติ โดยตัวอักษรที่เหมือนกันแสดงความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ และตัวอักษรที่ต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากภาพที่ 4.2 ซึ่งแสดงสมบัติความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยาง และยางผสมจากเครื่อง Kneader mixer ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยเมื่อพิจารณาที่ยาง BR NR และ NBR พบว่าค่า Mooney viscosity ของยาง NR มีค่ามากที่สุดที่ประมาณ 82 รองมาคือยาง NBR และ BR ที่ 47 และ 30 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าหลังจากผ่านการนวดด้วยเครื่อง Kneader mixer แล้ว ยาง NR ยังคงมีความหนืดที่สูงมากเมื่อเทียบกับยาง BR และ NBR โดยความแตกต่างของค่า Mooney viscosity เป็นผลมาจากโครงสร้างโมเลกุลของยางแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน อีกทั้งค่า Mooney viscosity ยังสะท้อนให้เห็นถึงความยาวของสายโซ่โมเลกุลของยางแต่ละชนิดด้วย กล่าวคือยางที่มีค่า Mooney viscosity มากจะมีสายโซ่โมเลกุลที่ยาวกว่ายางที่มีค่า Mooney viscosity น้อย ทำให้ยางที่มี Mooney viscosity น้อยสามารถไหลได้ดี ส่งผลให้การกระจายตัวของสาร Curing agents ต่าง ๆ สามารถกระจายตัวได้ดีตามไปด้วย โดยเมื่อพิจารณาที่ยางผสมพบว่าค่า Mooney viscosity มีค่าสูงขึ้น เมื่อในระบบผสมมีปริมาณยาง NR เพิ่มขึ้น

จากนั้นนำยางที่ผสมเข้ากันแล้วไปเติมสาร Curing agents โดยใช้เครื่องผสม Two-roll mill ตามกระบวนการที่ได้กล่าวมาดังภาพที่ 3.1 เพื่อนำไปขึ้นรูปและทดสอบสมบัติต่าง ๆ

4.1 ตอนที่ 1 การศึกษาของ BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR

ในงานวิจัยนี้ใช้ Sulphur เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Vulcanizing agent) โดยใช้ระบบการ Vulcanized แบบปกติ (Conventional Vulcanized System, C.V.) โดยเลือกใช้ MBTS เป็นสารเร่งปฏิกิริยา (Accelerator) และมีอัตราส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาต่อสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Accelerator/Sulphur ratio) เป็น 0.75 ซึ่งทำให้ได้พันธะเชื่อมโยงเป็นแบบมากกว่าหนึ่งอะตอมต่อหนึ่งพันธะ (polysulphidic crosslink) [10] โดยได้แสดงสมบัติต่าง ๆ ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized ไว้ดังต่อไปนี้

4.1.1 Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ BR NR NBR และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR

ในการขึ้นรูปยางนั้นจำเป็นต้องทราบถึงระยะเวลาในการเกิดกระบวนการเชื่อมขวางของยาง ทำให้ต้องมีการศึกษาเวลาการขึ้นรูปผ่านการทดสอบด้วยเครื่อง Moving die rheometer (MDR) โดยระยะเวลาในการเกิดกระบวนการเชื่อมขวางนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถของการละลายของสาร Curing agents ต่าง ๆ ในยางแต่ละชนิด ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ยางแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างทางสภาพข้อวักกันอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อระยะเวลาในการเกิดกระบวนการเชื่อมขวาง (Scorch time, Cure time และ Cure rate index) และปริมาณการเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink density)

ตารางที่ 4.1 Cure characteristics ของยางคอมปาวด์ BR NR NBR และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR

	สูตรยางคอมปาวด์ และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR							
	BR	NR	NBR	80/0/20	60/20/20	40/40/20	20/60/20	0/80/20
ts ₂ [min : sec]	12:06 ± 0:15	3:35 ± 0:02	5:44 ±0:04	10:20 ± 0:07	3:23 ± 0:01	2:28 ± 0:01	2:08 ± 0:01	1:58 ± 0:01
tc ₉₀ [min : sec]	18:31 ± 0:01	5:02 ± 0:02	7:23 ±0:10	14:05 ± 0:19	5:24 ± 0:01	3:57 ± 0:05	3:30 ± 0:03	3:13 ± 0:02
CRI	16.0	59.9	55.9	26.0	49.8	77.5	82.0	64.5
Δtorque [dNm]	1.47 ± 0.05	0.87 ± 0.04	0.76 ±0.03	0.93 ± 0.05	1.61 ± 0.03	1.66 ± 0.08	1.76 ± 0.06	1.69 ± 0.03

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาที่ค่า Scorch time (t_{s2}) และค่า Cure time (t_{c90}) โดยสำหรับยาง BR NR และ NBR พบว่าค่า Scorch time และค่า Cure time ของยาง NR มีค่าน้อยที่สุด รองลงมาคือ NBR และ BR ตามลำดับ โดยสำหรับยางผสมพบว่าค่า Scorch time และค่า Cure time มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

จากนั้นเมื่อพิจารณาที่ความเร็วในการเกิดกระบวนการ Vulcanized (Cure rate index, CRI) โดยสำหรับยาง BR NR และ NBR พบว่าค่า CRI ของยาง NR มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือยาง NBR และ BR ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ายาง BR เกิดกระบวนการ Vulcanized ช้ามากเมื่อเทียบกับยางอื่น ๆ เนื่องจากยาง BR มีสายโซ่โมเลกุลที่สั้นกว่ายาง NR และ NBR ทำให้ยาง BR มีปริมาณหมู่ปลาย (end group) อยู่มากทำให้มี free volume ในเนื้อยางอยู่มาก ส่งผลให้โอกาสที่ Sulphur สามารถไป active กับยางเกิดได้ยากขึ้น โดยสำหรับยางผสมพบว่ายางผสมที่มีปริมาณ NR ในระบบผสมมาก สามารถเกิดกระบวนการ Vulcanized ได้เร็วกว่ายางผสมที่มีปริมาณ NR ในระบบผสมน้อย

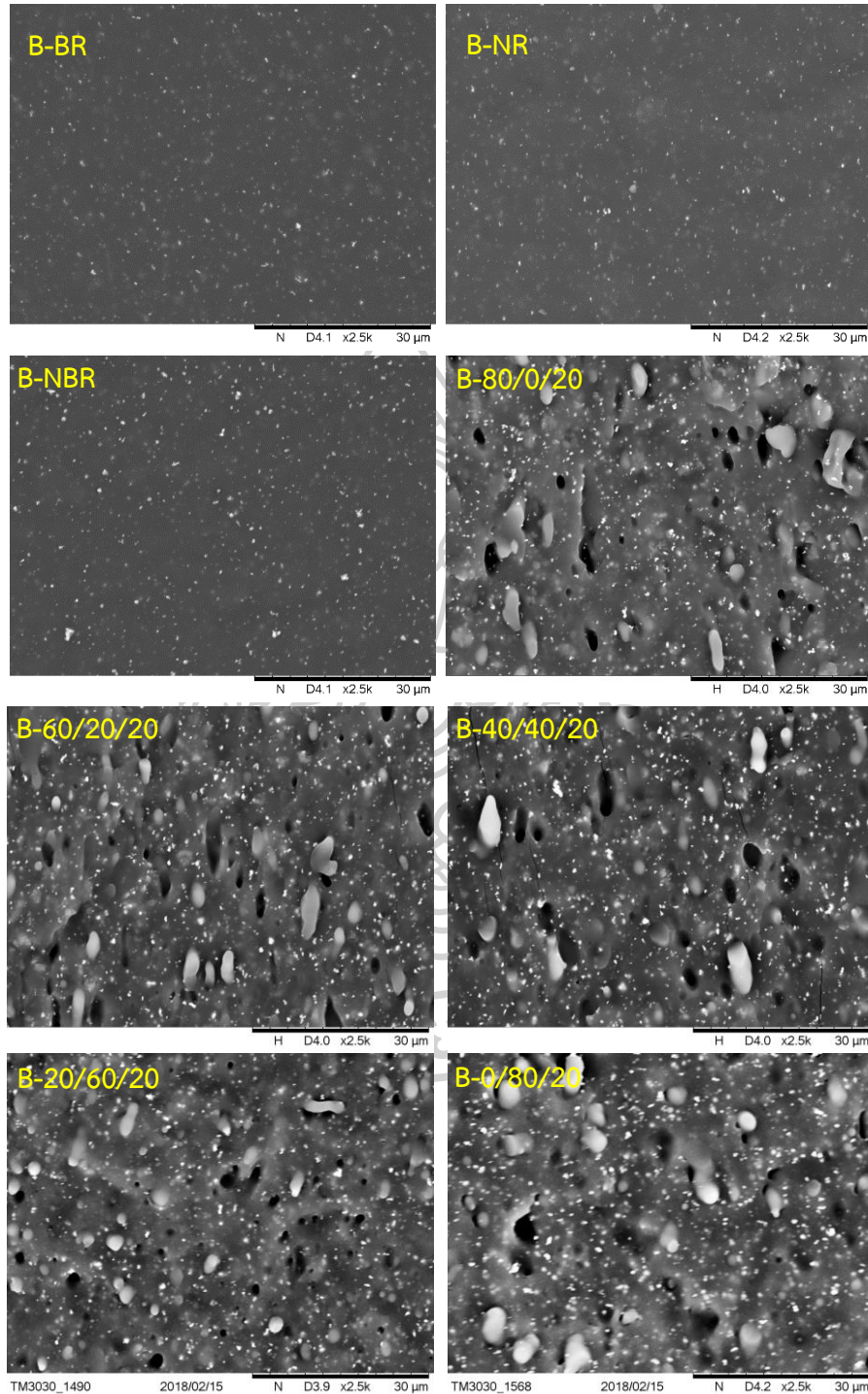
ทั้งนี้จากผลการทดสอบค่า Scorch time ค่า Cure time และค่า CRI แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติมยาง NBR ลงในยาง BR และ NR จะส่งผลอย่างยิ่งต่อความเร็วในการเกิดกระบวนการ Vulcanized โดยเมื่อพิจารณาที่ยางผสม BR/NR/NBR : 0/80/20 ซึ่งเป็นยาง NR ที่มีการผสมยาง NBR ไป 20 %wt จะเห็นว่าค่า Scorch time และค่า Cure time มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับยาง NR และ NBR ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดกระบวนการ Vulcanized นั้น สาร Activator จะเกิดปฏิกิริยากันได้เป็น Zn^{2+} และไป form complex กับ Accelerator ซึ่ง complex ที่ได้สามารถเกิดปฏิกิริยากับ Sulphur ได้ง่าย จากนั้นจะไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่ active บริเวณ double bond (หมู่ Vinyl) ของยางทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลยาง โดย Accelerator และ Activator ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ MBTS ZnO และ stearic acid ซึ่งล้วนเป็นสารที่มีขั้ว ทำให้สามารถละลายได้ดีในส่วนของยาง NBR มากกว่ายาง NR และ BR ส่งผลให้ยางผสมจะมี Sulphur กระจายอยู่มากในส่วน ของยาง BR และ NR แต่ Accelerator จะกระจายอยู่มากในส่วนของยาง NBR และด้วยการที่ยางผสมมีส่วนของเนื้อยาง BR และ NR ที่มีปริมาณลดลง (เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักที่เท่ากันของยาง BR NR กับ ยางผสม) ทำให้การเกิดกระบวนการ Vulcanized ของยางผสม (ซึ่งมีการผสมยาง NBR 20 %wt ทุกอัตราส่วนผสม) สามารถเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อมีการผสมยาง NBR ลงในยาง NR และ BR [28] ส่งผลทำให้ค่า Scorch time และค่า Cure time มีค่าลดลง และทำให้ค่า CRI มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย อีกทั้ง Sulphur บางส่วนอาจไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่ Acrylonitrile ของยาง NBR ทำให้การ Crosslink เกิดได้เร็วยิ่งขึ้นอีกด้วย [29]

จากนั้นเมื่อพิจารณาที่ค่า Δ torque ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลต่างของค่า torque ที่มากที่สุด (Maximum torque, MH) กับค่า torque ที่น้อยที่สุด (Minimum torque, ML) โดยค่า Δ torque นั้นมีความสอดคล้องกับปริมาณโครงสร้างเชื่อมขวางในยาง (Crosslink density) กล่าวคือยางที่มี Δ torque มากเป็นยางที่มี Crosslink density มากกว่ายางที่มี Δ torque น้อย โดยจากผลการทดสอบซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาที่ยาง BR NR และ NBR พบว่าค่า Δ torque ของยาง BR มีค่ามากที่สุด รองมาคือยาง NR และ NBR ตามลำดับ โดยสำหรับยางผสมพบว่าค่า Δ torque ของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ในระบบผสม BR/NR/NBR ยางแต่ละชนิดมีสภาพขั้วที่ค่อนข้างแตกต่างกัน ทำให้ความสามารถในการละลายของสาร Curing agents ในยางแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยยาง NR เป็นยางที่ได้จากยางธรรมชาติ ทำให้ยังคงมีส่วนของไขมัน หรือโปรตีนเหลืออยู่ จึงทำให้ยาง NR มีความเป็นขั้วที่มากกว่ายาง BR ซึ่งเป็นยางที่ได้จากการสังเคราะห์ และด้วยสภาพความเป็นขั้วของยาง NR ที่มากกว่ายาง BR ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของสาร Curing agents สามารถละลายในยาง NR ได้ดีกว่ายาง BR ทำให้ในยางผสมเมื่อมีปริมาณยาง NR เพิ่มมากขึ้น ยางผสมจะมี Crosslink density เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเห็นว่าค่า Δ torque มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบ Cure characteristic แสดงให้เห็นว่าภูมิภาคหลักของยางผสม และชนิดของสาร Curing agents ที่ใช้จะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ และปริมาณ Crosslink density ของยางผสมแต่ละอัตราส่วน ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลอย่างยิ่งต่อสมบัติเชิงกลของยาง BR NR NBR และ ยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized แล้ว

อย่างไรก็ตามเพื่อให้เกิดความเข้าใจในการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลต่าง ๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR เพื่อให้ทราบถึงลักษณะทางกายของเนื้อยางแต่ละอัตราส่วน โดยได้แสดงผลการศึกษาไว้ดังนี้

4.1.2 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR
ที่ผ่านการ Vulcanized



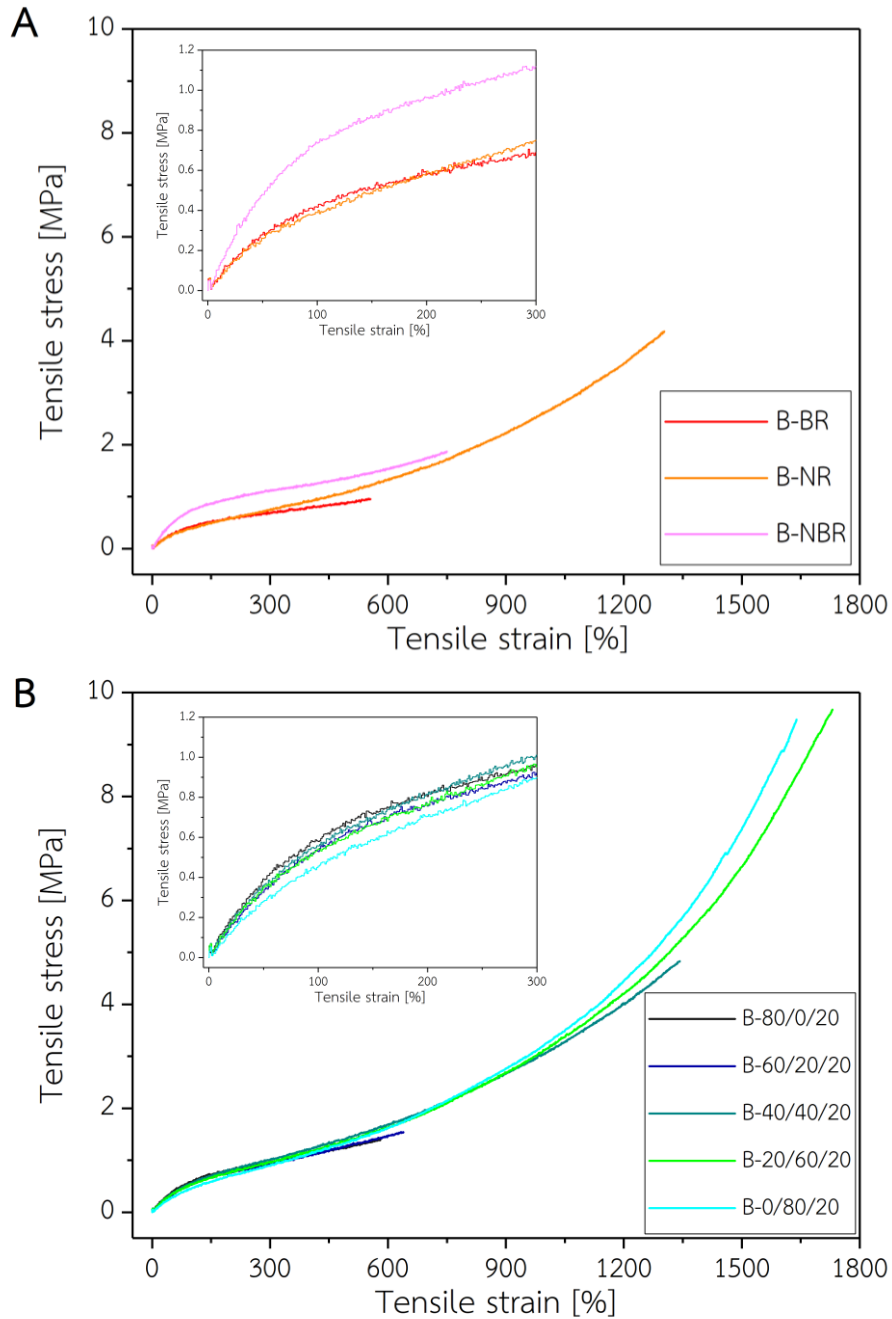
ภาพที่ 4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR
ที่ผ่านการ Vulcanized แล้ว

จากภาพที่ 4.3 ซึ่งแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของยางผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยพบว่า ยาง BR NR และ NBR มีลักษณะเป็นผิวราบเรียบ และเมื่อพิจารณาที่ยางผสมพบว่ายางผสมแสดงการแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการที่ยาง NBR มีสภาพขั้วที่แตกต่างกับยาง BR และ NR โดยจะเห็นว่าเกิดการแบ่งเป็นสองวัฏภาคที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน คือ ส่วนที่ราบเรียบ (Continuous phase) และส่วนที่เป็นก้อนอนุภาค (Droplets phase) ซึ่งกระจายตัวอยู่ทั่วบริเวณ ส่วนที่ราบเรียบ โดยเมื่อพิจารณาที่ยางผสม (BR/NR/NBR) B-80/0/20 และ B-0/80/20 (ยาง BR และ NR ที่มีการผสมยาง NBR 20 %wt) มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นแบบที่กล่าวมาข้างต้นทั้งสองอัตราส่วน นั้นแสดงให้เห็นว่าส่วนที่เป็น Continuous phase คือส่วนของยาง BR และ NR และส่วนที่เป็น Droplets phase เป็นส่วนของยาง NBR โดยสำหรับยางผสมสามส่วน (B-60/20/20, B-40/40/20 และ B-20/60/20) มีส่วนที่เป็น Continuous phase คือส่วนของยางผสม BR/NR ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ยาง BR กับ NR นั้นสามารถเข้ากันได้ดีกว่ายาง BR กับ NBR หรือยาง NR กับ NBR ซึ่งสามารถยืนยันข้อสรุปนี้ได้ด้วยค่า Solubility parameter ของยางแต่ละชนิด โดยค่า Solubility parameter เป็นค่าที่บ่งบอกความสามารถในการละลาย โดยสารที่มีค่า Solubility parameter ใกล้เคียงกัน สามารถผสมเข้ากันได้ดีกว่าสารที่มีค่า Solubility parameter ที่แตกต่างกัน โดยยาง BR มีค่า Solubility parameter $\sim (16.7 \text{ J/cm}^3)^{1/2}$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับยาง NR คือ $\sim (16.9 \text{ J/cm}^3)^{1/2}$ ในขณะที่ยาง NBR มีค่า Solubility parameter $\sim (20.2 \text{ J/cm}^3)^{1/2}$. [30, 31]

อีกทั้งเมื่อพิจารณาที่ยางผสม B-80/0/20 โดยเมื่อมีการเพิ่มปริมาณยาง NR ในระบบผสมไป 20 %wt หรือที่ยางผสม B-60/20/20 พบว่าขนาดอนุภาคของยาง NBR ที่กระจายอยู่มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นผลจากค่าความหนืดของยาง NR ที่มีค่าสูง ทำให้เกิดแรงเฉือนขณะผสมที่สูงขึ้น ส่งผลให้ขนาดอนุภาคของ NBR มีขนาดที่เล็กลง และเมื่อเพิ่มปริมาณยาง NR ในระบบผสมสูงขึ้น ส่งผลให้ขณะผสมเกิดแรงเฉือนที่สูงขึ้น ทำให้ขนาดอนุภาคของ NBR ยิ่งมีขนาดลดลง

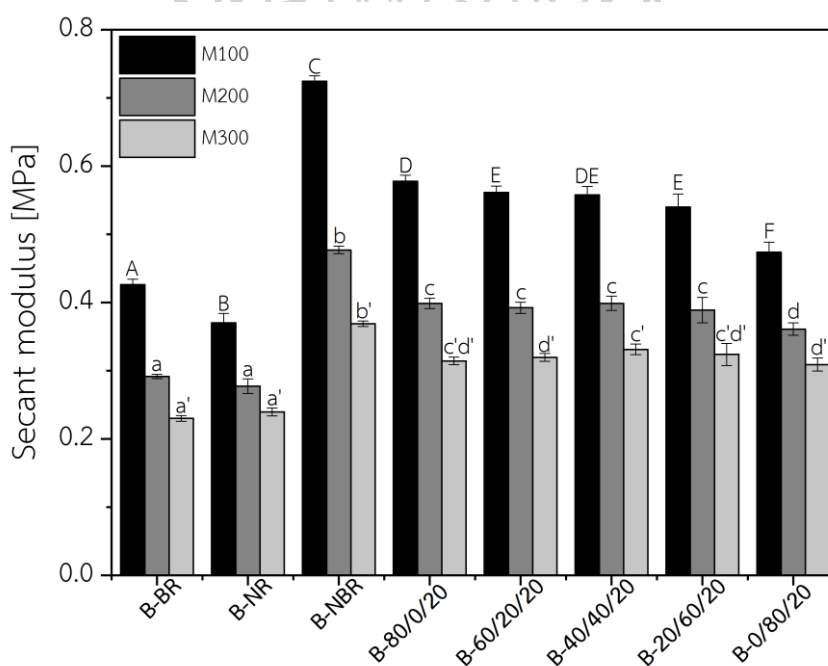
จากนั้นเป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลของยางผสม โดยจะทำการทดสอบความทนทานต่อแรงดึงยืด ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็ง ความสามารถในการยืดตัวถาวร และความทนทานต่ออุณหภูมิ โดยเริ่มจากพฤติกรรมภายใต้แรงดึงโดยได้แสดงผลการทดลองดังภาพที่ 4.4

4.1.3 ศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงดึงของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized



ภาพที่ 4.4 Stress-strain curve โดย A คือ ยาง BR NR NBR และ B คือ ยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

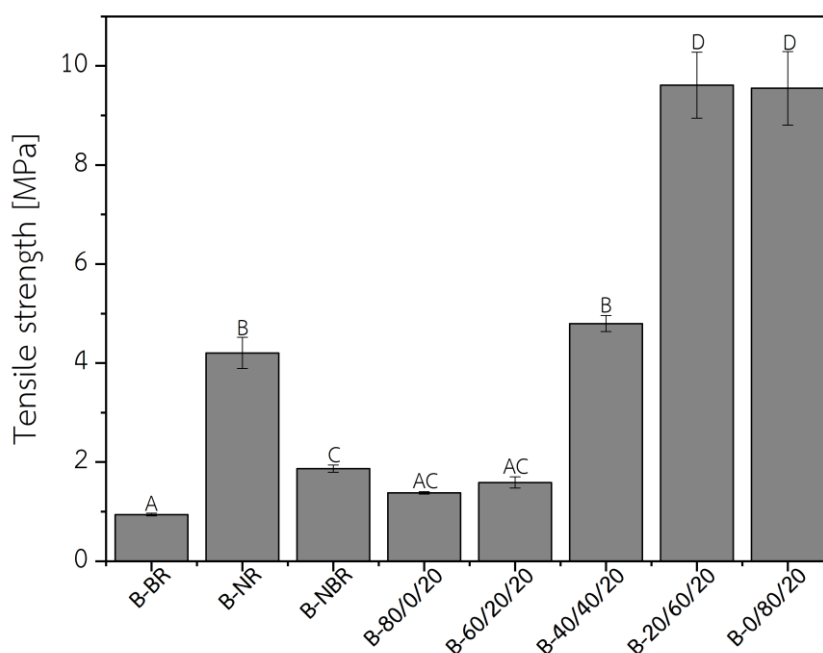
เมื่อสายโซ่โมเลกุลของยางถูกดึงยืด และเกิดการจัดเรียงตัวตามแนวแรง ส่งผลให้ยางมีค่า Tensile strength ที่สูงขึ้นอย่างมาก เรียกพฤติกรรมนี้ว่า Strain induced crystallization ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของกราฟ Stress-strain curve [19] จากภาพที่ 4.4 ซึ่งแสดง Stress-strain curve ของยางแต่ละอัตราส่วน โดยเมื่อพิจารณาที่ภาพที่ 4.4A ซึ่งแสดง Stress-strain curve ของยาง BR NR และ NBR พบว่ายาง BR และ NBR ไม่ปรากฏพฤติกรรม Strain induced crystallization เนื่องจากยางทั้งสองเป็น Butadiene base ในขณะที่ยาง NR สามารถเกิด Strain induced crystallization ได้ เนื่องจากเป็น Isoprene base ส่งผลทำให้ยางผสมที่มีปริมาณยาง NR ผสมอยู่มาก แสดงความสามารถในการยืดได้สูง และจากภาพที่ 4.4B ซึ่งแสดง Stress-strain curve ของยางผสม สังเกตเห็นว่ายางผสมอัตราส่วน (BR/NR/NBR) B-20/60/20 และ B-0/80/20 มีพฤติกรรมการเกิด Strain induced crystallization อย่างชัดเจน ทำให้ยางผสมทั้งสองอัตราส่วนมี Tensile stress และ Tensile strain ที่สูงมาก



ภาพที่ 4.5 Secant modulus ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

*Oneway anova (พารามิเตอร์บนแท่งกราฟ): A-F แสดงความแตกต่างของ Modulus at 100 %strain, a-d แสดงความแตกต่างของ Modulus at 200 %strain, a'-d' แสดงความแตกต่างของ Modulus at 300 %strain

ค่า Secant modulus เป็นอัตราส่วนระหว่าง Tensile stress ต่อ Tensile strain โดยจากภาพที่ 4.5 ซึ่งแสดงค่า Secant modulus ที่ 100 200 และ 300 %strain โดยค่า Secant modulus เป็นค่าที่ใช้บอกความแข็งของเนื้อยาง ซึ่งยางที่ค่า Secant modulus สูง จะมีเนื้อยางแข็งกว่ายางที่มีค่า Modulus ต่ำ จากผลการทดสอบพบว่ายางทุกอัตราส่วนมีค่า Secant modulus ลดลงเมื่อ %strain เพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาค่า Secant modulus ของยาง BR NR และ NBR พบว่ายาง NBR มีค่า Secant modulus ที่สูงที่สุด เนื่องจากยาง NBR เป็นยางที่มีขั้วสูง จากการที่มีหมู่ Acrylonitrile ในโครงสร้าง ทำให้มีความแข็งที่สูงกว่ายาง BR และ NR ส่งผลให้ในยางผสมซึ่งมีการเติมยาง NBR 20 %wt ในทุกอัตราส่วนผสม มีค่า Secant modulus ที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับยาง BR และ NR ในขณะที่ค่า Secant modulus ของยาง BR สูงกว่ายาง NR ทำให้ค่า Secant modulus ของยางผสมจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.6 Tensile strength ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

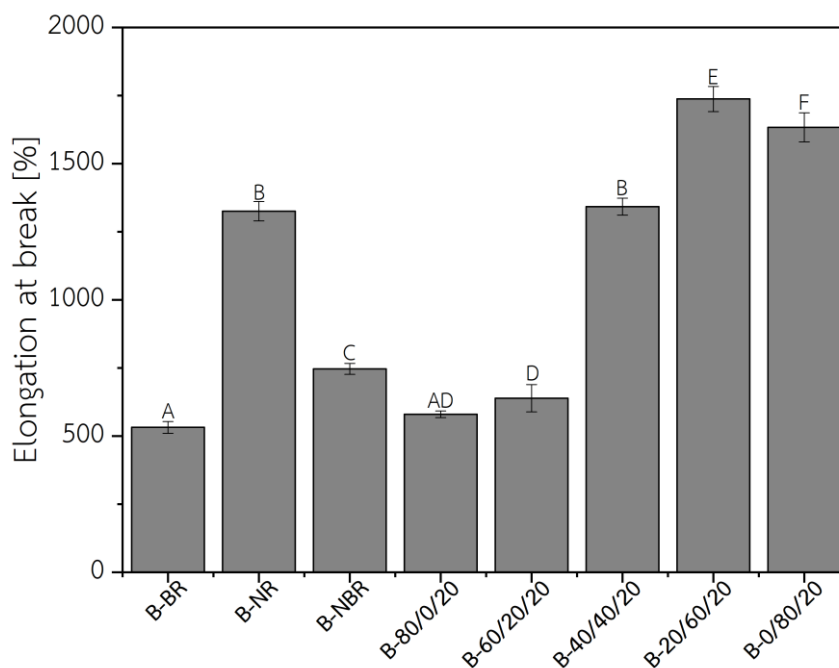
ค่า Tensile strength ของยางที่ผ่านการ Vulcanized แสดงดังภาพที่ 4.6 โดยค่า Tensile strength ขึ้นอยู่กับ Crosslink density และการเกิด Strain induce crystalline โดยพบว่ายาง BR และ NBR มี Tensile strength ต่ำกว่ายาง NR เนื่องจากยาง NR เป็นยางที่มีโครงสร้างเป็น Isoprene base ทำให้สามารถเกิดปรากฏการณ์ Strain induce crystalline ได้มากกว่ายาง BR และ NBR ซึ่งมีโครงสร้างเป็น Butadiene base ในขณะที่ยาง NBR ซึ่งมีหมู่ Acrylonitrile อยู่ในโครงสร้าง

ส่งผลให้ยาง NBR มีค่า Tensile strength ที่สูงกว่ายาง BR ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ยางผสมพบว่ายางผสมที่มียาง BR เป็นวัฏภาคหลัก (B-80/0/20 และ B-60/20/20) มีค่า Tensile strength ที่อยู่ในช่วงของยาง BR และ NBR (ดูจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงสถิติ) โดยเมื่อระบบผสมมีปริมาณ NR เพิ่มขึ้น พบว่าค่า Tensile strength ของยางผสมยังมีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะกับยางผสม B-20/60/20 และ B-0/80/20 เนื่องจากสามารถยืดตัวได้มากขึ้น (จากภาพที่ 4.4) ซึ่งเป็นผลจากการเกิด Strain induce crystalline ของยางผสม

อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ายางผสมอัตราส่วน B-20/60/20 และ B-0/80/20 มีค่า Tensile strength ที่สูงกว่ายาง BR NR และ NBR เนื่องจากยางผสมทั้งสองอัตราส่วนมียาง NR เป็นวัฏภาคหลักจึงสามารถเกิด Strain induce crystalline ได้ อีกทั้งยางผสมทั้งสองอัตราส่วนมี Crosslink density ที่สูงกว่ายาง BR NR และ NBR (ค่า Δ torque, ตารางที่ 4.1) ซึ่งค่า Tensile strength ของยาง Vulcanized จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ Crosslink density ของยางเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง แล้วจะมีค่าลดลงเมื่อ Crosslink density ของยางมีค่าสูงเกินไป [32] ทั้งนี้ยางที่ยังไม่ทำการ Vulcanized สามารถรับแรงดึงยึดได้เพียงเล็กน้อย และเมื่อทำการ Vulcanized ทำให้มี Crosslink density ที่เพิ่มขึ้น เมื่อได้รับแรงจะเกิดการส่งผ่านแรงไปยังจุดที่เกิดการ Crosslink ทำให้สามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้น จนถึงจุด optimum ซึ่งเมื่อมี Crosslink density ที่เพิ่มสูงมาก ๆ เมื่อได้รับแรงดึงสายโซ่โมเลกุลจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ยาก (Stiffness มาก) ส่งผลให้สามารถรับแรงดึงได้ลดลง โดยหากพิจารณา Crosslink density จากค่า Δ torque ในงานวิจัยนี้พบว่าค่า Δ torque ของยาง BR NR NBR และยางผสมอยู่ในช่วง 0.7-1.7 Nm เท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วยาง NR BR NBR หรือยางผสม BR/NR, NR/NBR และ BR/NBR ที่ใช้ Sulphur ในการ Vulcanized มีค่า Δ torque อยู่ที่ประมาณ 3-80 Nm [33-35] แสดงให้เห็นว่าค่า Δ torque ในงานวิจัยนี้มีปริมาณน้อย (Crosslink density น้อยมาก) อีกทั้งยังสามารถยืนยันได้ด้วยค่า Secant modulus คือยางผสมมี Secant modulus ลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า ยางผสมมีความแข็ง (Stiffness) ลดลงเมื่อค่า Δ torque (Crosslink density) เพิ่มขึ้น จึงสามารถบอกได้ว่าค่า Tensile strength มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Crosslink density เพิ่มขึ้น

%Elongation at break เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการดึงยึดของวัสดุ โดยจากภาพที่ 4.7 ซึ่งแสดง %Elongation at break ของยางแต่ละอัตราส่วน เมื่อพิจารณาที่ยาง BR NR และ NBR พบว่ายาง NR สามารถดึงยึดได้มากกว่า NBR และ BR ตามลำดับ โดยมีค่าประมาณ 1,300 750 และ 500 % ตามลำดับ จากนั้นเมื่อพิจารณาที่ยางผสมพบว่าความสามารถในการดึงยึดของยาง

ผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่า %Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากกับยางผสม B-20/60/20 และ B-0/80/20 ซึ่งมีค่าเกิน 1,500 % เนื่องจากเป็นยางผสมที่มีการเกิด Strain induced crystallization ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

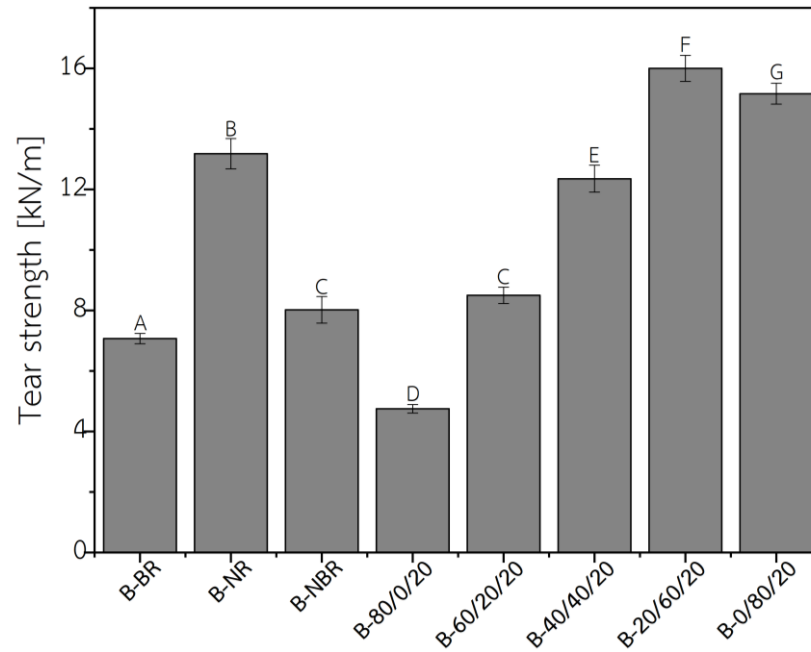


ภาพที่ 4.7 %Elongation at break ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

4.1.4 ศึกษาสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

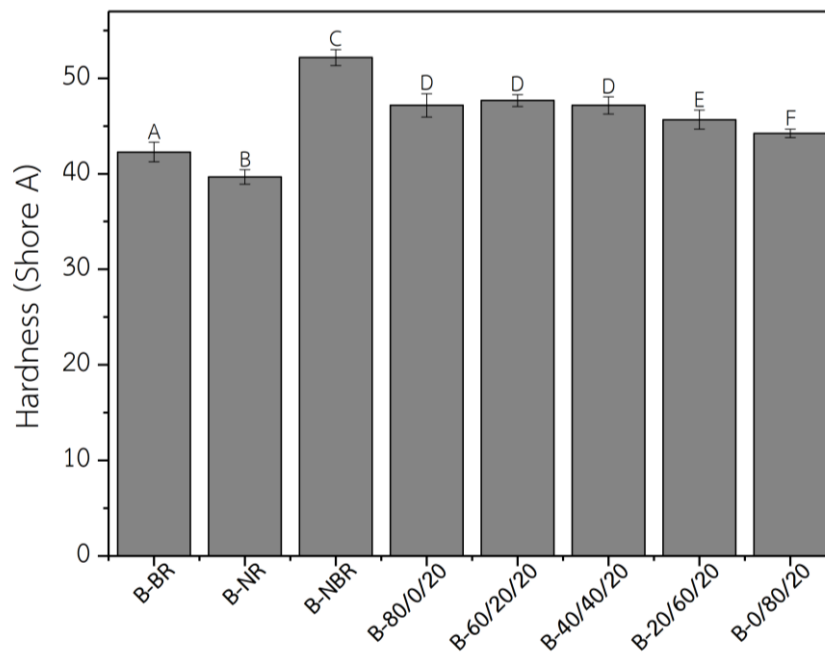
ค่า Tear strength เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการทนทานต่อแรงฉีกขาด โดยจากภาพที่ 4.8 เมื่อพิจารณาที่ยาง BR NR และ NBR พบว่าค่า Tear strength ของยาง NR มีค่ามากที่สุด นั่นคือยาง NR มีความสามารถในการทนทานต่อการฉีกขาดสูงกว่ายาง NBR และ BR ตามลำดับ เนื่องจากการที่ยาง NR เป็นยางที่มีความสามารถในการต้านทานการเกิด Crack, การต้านทานขยายตัวของ Crack (Crack growth resistance) และมีความเหนียวสูง (มีค่า Tensile strength และ %Elongation at break สูง) โดยเมื่อพิจารณาที่ยางผสมพบว่าความสามารถในการทนทานต่อแรงฉีกขาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อในระบบผสมมีปริมาณยาง NR เพิ่มขึ้น อีกทั้งยังมีความสัมพันธ์กันระหว่าง Tear energy (แปรผันตรงกับค่า Tear strength) กับการเกิด Strain induced crystallization [36] โดยจะเห็นว่าค่า Tear strength ของยาง NR และยางผสม B-20/60/20 และ B-0/80/20 มีค่าสูง

คือมีค่าเกิน 12 kN/m ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันกับการเกิด Strain induced crystallization ที่ได้จากผลการทดสอบการดึงยืด



ภาพที่ 4.8 Tear strength ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

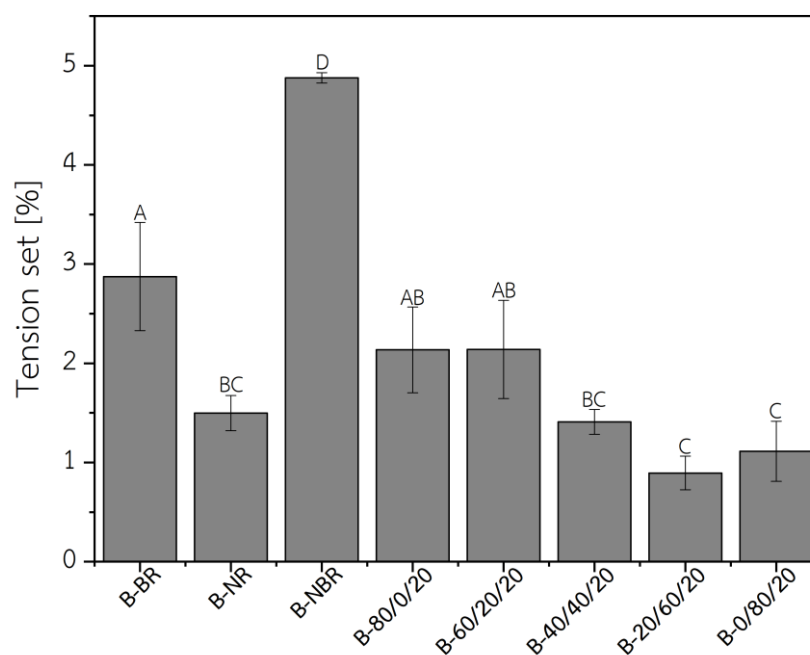
4.1.5 ศึกษาสมบัติความแข็งที่ผิวของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized



ภาพที่ 4.9 Hardness ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

ค่า Hardness เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งบริเวณผิวของวัสดุ โดยจากภาพที่ 4.9 เมื่อพิจารณาที่ยาง BR NR และ NBR พบว่ายาง NBR มีความแข็งมากกว่ายาง BR และ NR เนื่องจากยาง NBR มีหมู่ Acrylonitrile อยู่ในโครงสร้าง ทำให้ยาง NBR มีความแข็งมากที่สุด โดยมีค่าประมาณ 52, 42 และ 39 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อพิจารณาที่ยางผสมพบว่าการผสมยาง NBR เพียง 20 %wt จะทำให้ยางผสมมีความแข็งที่ผิวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับยาง BR และ NR โดยยางผสมมีค่าความแข็งที่ผิวที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน คือประมาณ 47 แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังพบความสัมพันธ์ของค่า Hardness กับค่า Secant modulus (ภาพที่ 4.5) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแข็งที่ผิว (Hardness) และความแข็งภายในเนื้อชิ้นงาน (Secant modulus) ของยางผสมมีลักษณะแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

4.1.6 ศึกษาสมบัติการคืนตัวของยางหลังจากถูกยืดตัวถาวรของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

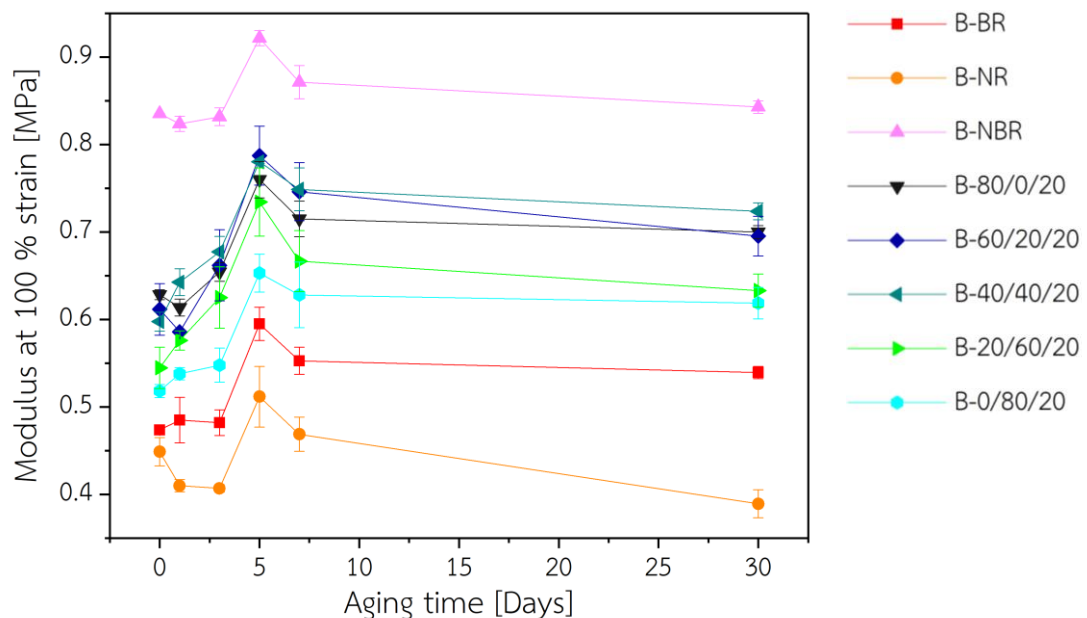


ภาพที่ 4.10 Tension set ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

ค่า Tension set เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการคืนตัวของวัสดุหลังจากถูกดึงยืด ซึ่งวัสดุที่มีค่า Tension set น้อย คือ วัสดุที่สามารถคืนตัวได้มากหลังถูกดึงยืด ซึ่งถือว่าเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน โดยหากวัสดุสามารถคืนตัวกลับได้น้อยแสดงให้เห็นถึงการเกิด Permanent deformation ภายในเนื้อวัสดุเนื่องจากการดึงยืด จากภาพที่ 4.10 เมื่อเปรียบเทียบยางทุกอัตราส่วนแล้วพบว่ายาง NBR มีค่า %Tension set ที่มากที่สุด โดยมีค่าประมาณ 4.8 % นั้นแสดงให้เห็นว่ายาง

NBR มีความสามารถในการคืนตัวหลังจากถูกดึงยืดได้น้อยที่สุด หรืออาจกล่าวได้ว่ายาง NBR เกิด Permanent deformation มากที่สุดเมื่อถูกดึงยืด และพบว่ายาง NR สามารถคืนรูปได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับยาง BR และ NBR โดยสำหรับยางผสมพบว่าความสามารถในการคืนตัวหลังถูกดึงยืดของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อในระบบผสมมีปริมาณยาง NR เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า %Tension set ของยางผสมในงานวิจัยนี้มีค่าไม่เกิน 5% เท่านั้น นั่นแสดงให้เห็นว่ายางทุกอัตราส่วนผสมเกิด Permanent deformation หลังถูกดึงยืดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งถือว่าเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานกับวัสดุที่ต้องการสมบัติในการคืนตัวหลังถูกดึงยืดถาวร [37]

4.1.7 ศึกษาสมบัติความทนทานต่ออุณหภูมิของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

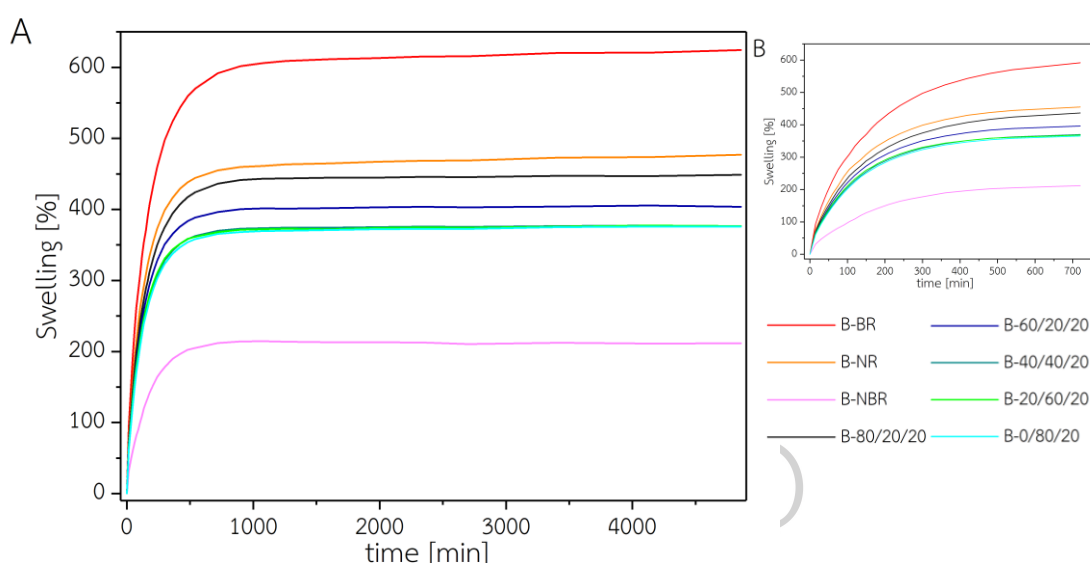


ภาพที่ 4.11 Thermal aging ที่อุณหภูมิ 70 °C ผ่านค่า Modulus at 100 %strain ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized

จากภาพที่ 4.11 พบว่าหลังผ่านการทดสอบ Thermal aging ไประยะหนึ่ง ยางผสมทุกอัตราส่วนมีค่า Secant modulus ที่เพิ่มสูงขึ้น โดยค่า Secant modulus เพิ่มสูงมากที่สุดเมื่อยางได้รับความร้อนที่ 70 °C เป็นเวลา 5 วัน ซึ่งเป็นผลมาจากที่ Curing agents ซึ่งเหลืออยู่ในยางเกิดปฏิกิริยาต่อเมื่อได้รับความร้อน ทำให้อย่างมีปริมาณการ Crosslink ที่สูงขึ้น ค่า Secant modulus จึงสูงขึ้น และพบว่าหลังจากผ่านการทดสอบ Thermal aging เป็นเวลา 5 วัน ค่า Secant modulus มีค่าลดลง เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีรูปแบบการ Crosslink ของ Sulphur เป็นแบบ polysulphide

bone (ใช้ระบบผสมสาร Curing agents แบบ CV. System) ซึ่งมีความทนทานต่ออุณหภูมิได้เพียงเล็กน้อย ทำให้ Crosslink ที่เกิดขึ้นขาดออกได้ง่าย ค่า Secant modulus จึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง [19] อย่างไรก็ตามยางผสมที่ผ่านการ Thermal aging นั้นยังคงมีแนวโน้มของค่า Secant modulus เป็นไปตามเดิม คือ ยาง NBR ยังคงมีค่า Secant modulus ที่สูงที่สุด และยาง BR มีค่า Secant modulus ที่สูงกว่ายาง NR

4.1.8 ศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อตัวทำละลายไม่มีขี้ของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized



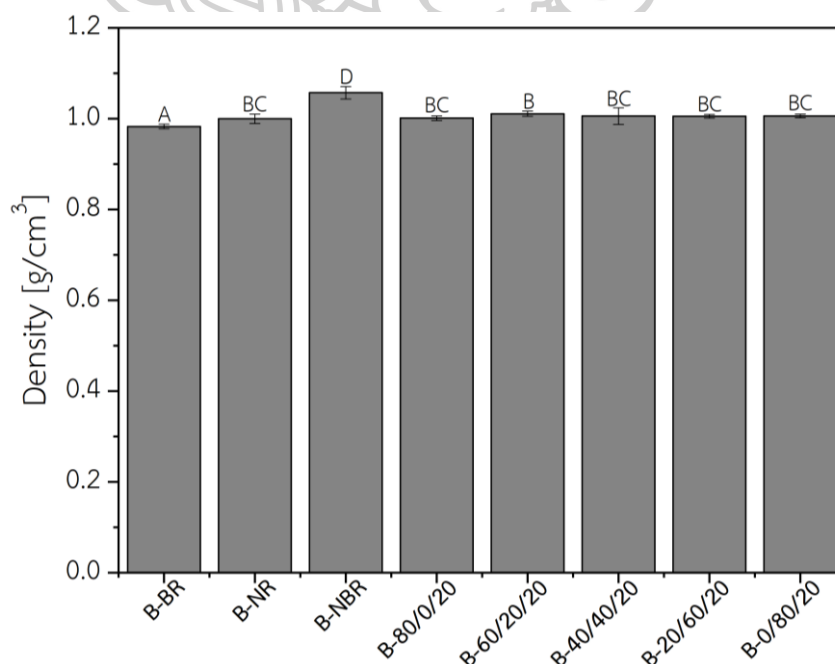
ภาพที่ 4.12 การบวมตัวของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized A แสดง %Swelling ตั้งแต่เริ่มจนถึง equilibrium และ B แสดง %Swelling ช่วง 12 ชั่วโมงแรก

จากผลการศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อตัวทำละลายไม่มีขี้ (%Swelling) แสดงดังภาพที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่ายางทุกอัตราส่วนเริ่มมี %Swelling คงที่ (เข้าสู่ equilibrium) เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 16 ชั่วโมง (ประมาณ 1,000 นาที) โดยในช่วงแรก (ภาพที่ 4.12B) แสดงให้เห็นถึงอัตราการดูดซับตัวทำละลายของยาง ซึ่งยาง BR สามารถดูดซับตัวทำละลายได้เร็วและมากที่สุด เนื่องจากยาง BR เป็นยางสังเคราะห์ที่ไม่มีขี้ขุยอยู่เลย ส่วนยาง NBR มีอัตราการบวมตัว และ %Swelling ที่น้อยมาก เนื่องจากเป็นสังเคราะห์ยางที่มีขี้สูง ทำให้สามารถดูดซับตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ได้ยากมาก และในกรณีของยาง NR นั้นจะมีความเป็นขี้ขุยอยู่บ้างเล็กน้อย เนื่องจากยาง NR เป็นยางที่ได้จากธรรมชาติซึ่งอาจมีส่วนของโปรตีน และไขมันอยู่บ้างเล็กน้อย ทำให้มีอัตราการบวมตัว และ %Swelling น้อยกว่ายาง BR อย่างไรก็ตามหากพิจารณาเฉพาะยาง BR และ NR (เป็นยางที่มี

สภาพขั้วที่ใกล้เคียงกัน) สามารถใช้ค่า %Swelling ในการอธิบายปริมาณการเชื่อมขวางของยางได้จากการบวมตัว โดย %Swelling มีค่าแปรผกผันกับ Crosslink density กล่าวคือ ยางที่มี %Swelling สูง จะมี Crosslink density น้อยกว่ายางที่มี %Swelling น้อย เนื่องจากการเกิดการบวมตัวของยางเกิดขึ้นจากความสามารถของตัวทำละลายที่เกิดการแทรกสอดเข้าไปอยู่ภายในยาง สำหรับยางผสมพบว่ายางผสม B-80/0/20 มีอัตราการบวมตัวและ %Swelling มากที่สุด โดยจะลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าผลการทดลองมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่า Δ torque

จากผลการศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อตัวทำละลายไม่มีขั้ว (%Swelling) และค่า Δ torque (ตารางที่ 4.1 และภาพที่ 4.12 ตามลำดับ) สังเกตเห็นว่าผลการศึกษาทั้งสองนั้นมีความสอดคล้องกับปริมาณการเกิดการเชื่อมขวางของยางผสม โดยพบว่าปริมาณการเชื่อมขวางยิ่งมากขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มสูงขึ้น โดยการที่ยาง NR มีปริมาณการเชื่อมขวางมากกว่ายาง BR นั้นอาจเกิดจากสภาพความเป็นขั้วของยาง NR ที่มากกว่ายาง BR ทำให้ความสามารถในการละลายของสาร Curing agents สามารถละลายในยาง NR ได้ดีกว่ายาง BR ทำให้ยาง NR เกิดการเชื่อมขวางมากกว่ายาง BR

4.1.9 ศึกษาความหนาแน่นของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ที่ผ่านการ Vulcanized



ภาพที่ 4.13 ความหนาแน่นของยาง BR NR NBR และยางผสมที่ผ่านการ Vulcanized

จากภาพที่ 4.13 พบว่ายางทุกอัตราส่วนมีความหนาแน่นที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยยาง NBR มีความหนาแน่นมากที่สุดคือประมาณ 1.06 g/cm^3 ตามด้วยยาง NR และ BR คือ 1.00 และ 0.98 g/cm^3 ตามลำดับ โดยสำหรับยางผสมพบว่ามีความหนาแน่นที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยมีความหนาแน่นอยู่ที่ประมาณ 1.00 g/cm^3

จากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางผสมที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าสมบัติของยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR ขึ้นอยู่กับปริมาณการเกิดการเชื่อมขวาง (Crosslink density) โดยมีปัจจัยมากมายที่ส่งผลต่อ Crosslink density ของยางผสม เช่น อัตราส่วนการผสม หรือชนิดของสาร Curing agents ที่ใช้ ซึ่งด้วยสภาพข้อที่ค่อนข้างแตกต่างกันของยางแต่ละชนิดที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ทำให้ยางผสมแต่ละอัตราส่วนมีสมบัติที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตามในส่วนต่อไปเป็นการนำยางผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นโฟม โดยใช้สารพองฟู (Blowing agents) เป็นสารทำให้เกิดฟองก๊าซภายใน

4.2 ตอนที่ 2 การศึกษาโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR

ในปัจจุบันมีความสนใจในวัสดุประเภทโฟมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา มีความหลากหลายในการใช้งาน และช่วยลดต้นทุนการผลิต ซึ่งโฟมยาง หรือยางพองน้ำมีลักษณะเป็นรูพรุน ใช้ทำผลิตภัณฑ์จำพวก พื้นรองเท้า เบาะรองนั่ง ที่นอน หมอน เสื้อการนอน ตุ๊กตาและของชำร่วยต่าง ๆ หลักการสำคัญของการผลิตโฟมยางคือ การทำให้ยางเกิดฟองของอากาศหรือแก๊สต่าง ๆ ขึ้นภายในแล้วทำให้พองยางคงรูป โดยใช้สารเคมีและความร้อนเป็นตัวช่วย แต่การทำผลิตภัณฑ์โฟมจากยางนั้นยังประสบปัญหาเรื่องกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนยังไม่ดีพอทำให้ได้เนื้อโฟมไม่สม่ำเสมอ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR

สมบัติเชิงกลของโฟมยางนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่นำมาใช้ และความหนาแน่นของโฟมยาง [38] โดยยางแต่ละชนิดมีสมบัติเฉพาะตัวที่ต่างกันไป เช่น ยาง NR มีความสามารถในการดึงยืดที่ดี หรือยาง BR มีความสามารถในการต้านทานการขูดถูที่ดี ซึ่งโดยส่วนใหญ่สมบัติของโฟมยางยังคงเป็นไปตามชนิดของยางที่นำมาใช้ในการทำโฟม ในขณะที่ความหนาแน่นของโฟมยางจะขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟม รวมทั้งการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม ซึ่งมีปัจจัยมากมายที่ส่งผลต่อสมบัติเหล่านี้ของโฟม เช่น ชนิดและปริมาณของ Blowing agent (BA), ชนิดและปริมาณของสาร Vulcanized และยังรวมไปถึง Condition ที่ใช้ในการผสม และเทคนิคการขึ้นรูป เช่น อุณหภูมิของเครื่องผสม หรือความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป เป็นต้น โดยได้แสดงการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR ไว้ดังต่อไปนี้

4.2.1 Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ BR NR NBR และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Silica และ Retarder

ในขณะการเตรียมโฟมยางนั้น มี 2 กระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมกัน คือ กระบวนการแตกตัวของสารฟู (BA) ทำให้เกิดฟองก๊าซส่งผลให้ยางเกิดการขยายตัว และกระบวนการเกิด Crosslink ของโมเลกุลยางขณะทำการ Vulcanized ดังนั้น ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของลักษณะการ cure หรือ การหาระยะเวลาในการขึ้นรูปของยาง ซึ่งต้องศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า torque กับเวลา (MDR) จะเกิดปัญหา คือ เมื่อยางได้รับความร้อน ยางจะเริ่มไหลและเริ่มเกิดปฏิกิริยาเคมี ในขณะเดียวกัน สารฟองฟูจะเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซ และความดันที่เกิดจากการแตกตัวของสารฟองฟู จะทำให้ยางที่กำลังเกิดการเชื่อมขวางไหลออกจาก disk ของเครื่องทดสอบ ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบหาระยะเวลาในการขึ้นรูปของยางโดยการเติมสารเคมีทุกตัว (ตามตารางที่ 3.2) ยกเว้นสารฟองฟู (BA) เพื่อใช้หาระยะเวลาในการขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุดของยางแต่ละอัตราส่วน ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 Cure characteristic ของยางคอมปาวด์ BR NR NBR และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Silica และ Retarder

	สูตรยางคอมปาวด์ และคอมปาวด์ของยางผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Silica และ Retarder							
	BR	NR	NBR	80/0/20	60/20/20	40/40/20	20/60/20	0/80/20
ts_2 [min : sec]	10:57 ± 0:30	6:41 ± 0:16	9:11 ± 0:16	10:22 ± 0:17	8:46 ± 0:15	6:49 ± 0:10	5:35 ± 0:03	4:19 ± 0:04
tc_{90} [min : sec]	53:07 ± 0:29	8:20 ± 0:34	14:56 ± 0:39	24:15 ± 0:40	17:56 ± 0:31	13:16 ± 0:09	10:45 ± 0:05	8:04 ± 0:14
CRI	1.4	55.9	18.4	7.2	11.0	15.0	19.6	26.0
Δ torque [dNm]	1.32 ± 0.06	0.43 ± 0.10	1.68 ± 0.03	1.44 ± 0.05	1.44 ± 0.04	1.63 ± 0.03	1.77 ± 0.08	1.61 ± 0.12

จากตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาที่ค่า Scorch time (ts_2) และค่า Cure time (tc_{90}) สำหรับโฟมยาง BR NR และ NBR พบว่าค่า Scorch time และค่า Cure time ของโฟมยาง NR มีค่าน้อยที่สุดตามมาด้วยโฟมยาง NBR และ BR ตามลำดับ ซึ่งพบว่าโฟมยาง BR มีค่า Cure time ที่นานมากเนื่องจากการทดสอบ MDR ของโฟมยาง BR เกิดการ Marching (หลังจากผ่านจุด Scorch time แล้ว

ยางเกิดการ Cure ไปเรื่อย ๆ) ซึ่งทำให้ไม่ทราบระยะเวลาที่แน่ชัดในการขึ้นรูป จึงทำการทดสอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำมาเวลาที่ได้มาใช้ในการขึ้นรูปโพลียูรีเทน BR อย่างไรก็ตามได้ทดลองใช้เวลาในการทดสอบ MDR ของโพลียูรีเทน BR เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าค่า torque เริ่มคงที่ ในการขึ้นรูปหลังจากนำชิ้นงานออกจากเครื่องกดอัดด้วยแรงดันไป จะนำชิ้นงานที่ได้อบที่อุณหภูมิ 160 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการ Cure ได้มากที่สุด โดยสำหรับโพลียูรีเทนผสมพบว่าค่า Scorch time และค่า Cure time ของโพลียูรีเทนผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า Scorch time และ Cure time จากผลการทดสอบนี้เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับผลการทดสอบ Cure characteristics จากผลการทดสอบยางผสม (จากตารางที่ 4.1) กล่าวคือสภาพผิวของยางแต่ละชนิดจะทำให้สาร Curing agents รวมทั้ง Silica และ Retarder CTP กระจายตัวในเนื้อยางแต่ละชนิดแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อค่า Scorch time และ Cure time ดังที่กล่าวมาแล้ว

จากนั้นเมื่อพิจารณาที่ความเร็วในการเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ (Cure rate index, CRI) ของโพลียูรีเทน NR มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือโพลียูรีเทน NBR และ BR ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า CRI ของโพลียูรีเทน NBR และ BR นั้น น้อยมาก เมื่อเทียบกับโพลียูรีเทน NR โดยเมื่อพิจารณาที่โพลียูรีเทนผสมพบว่าโพลียูรีเทนผสม F-80/0/20 จะมีค่า CRI ที่น้อยที่สุด และค่า CRI มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ NR เพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกับค่า Scorch time และ Cure time

ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาค่า Scorch time ค่า Cure time และค่า CRI ของโพลียูรีเทนกับยางผสม (เปรียบเทียบระหว่างตารางที่ 4.1 กับตารางที่ 4.2) ซึ่งเป็นการแสดงความแตกต่างของการเติม Silica และ Retarder ลงในยาง BR NR NBR และยางผสม BR/NR/NBR จะเห็นว่าค่า Scorch time และค่า Cure time มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม Silica และ Retarder ซึ่งเป็นผลจากการแสดงตัวเป็นสารหน่วงปฏิกิริยาของสาร Retarder ทำให้ปฏิกิริยาการ Vulcanized เกิดได้ช้าขึ้น อีกทั้ง Silica ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสารละลายที่มีขี้ผึ้งได้ดี ทำให้ในระหว่างกระบวนการทดสอบอาจไปดูดซับสาร Activator และ Accelerator ส่งผลให้ปฏิกิริยา Vulcanized เกิดได้ช้าขึ้น และทำให้ค่า Scorch time และค่า Cure time มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า CRI มีค่าลดลงเมื่อเติม Silica และ Retarder

จากนั้นเมื่อพิจารณาที่ค่า Δ torque ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณ Crosslink density ของโพลียูรีเทน จากตารางที่ 4.2 สำหรับโพลียูรีเทน BR NR และ NBR พบว่าค่า Δ torque ของโพลียูรีเทน NBR มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือโพลียูรีเทน BR และ NR ตามลำดับ โดยสำหรับโพลียูรีเทนผสมพบว่าค่า Δ torque มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากยาง NR เป็นยางที่มีความหนืดสูงมาก ทำให้ Silica และ Retarder ที่เติมเข้าไปจะกระจายตัวได้ยากขึ้น ทำให้กระบวนการ

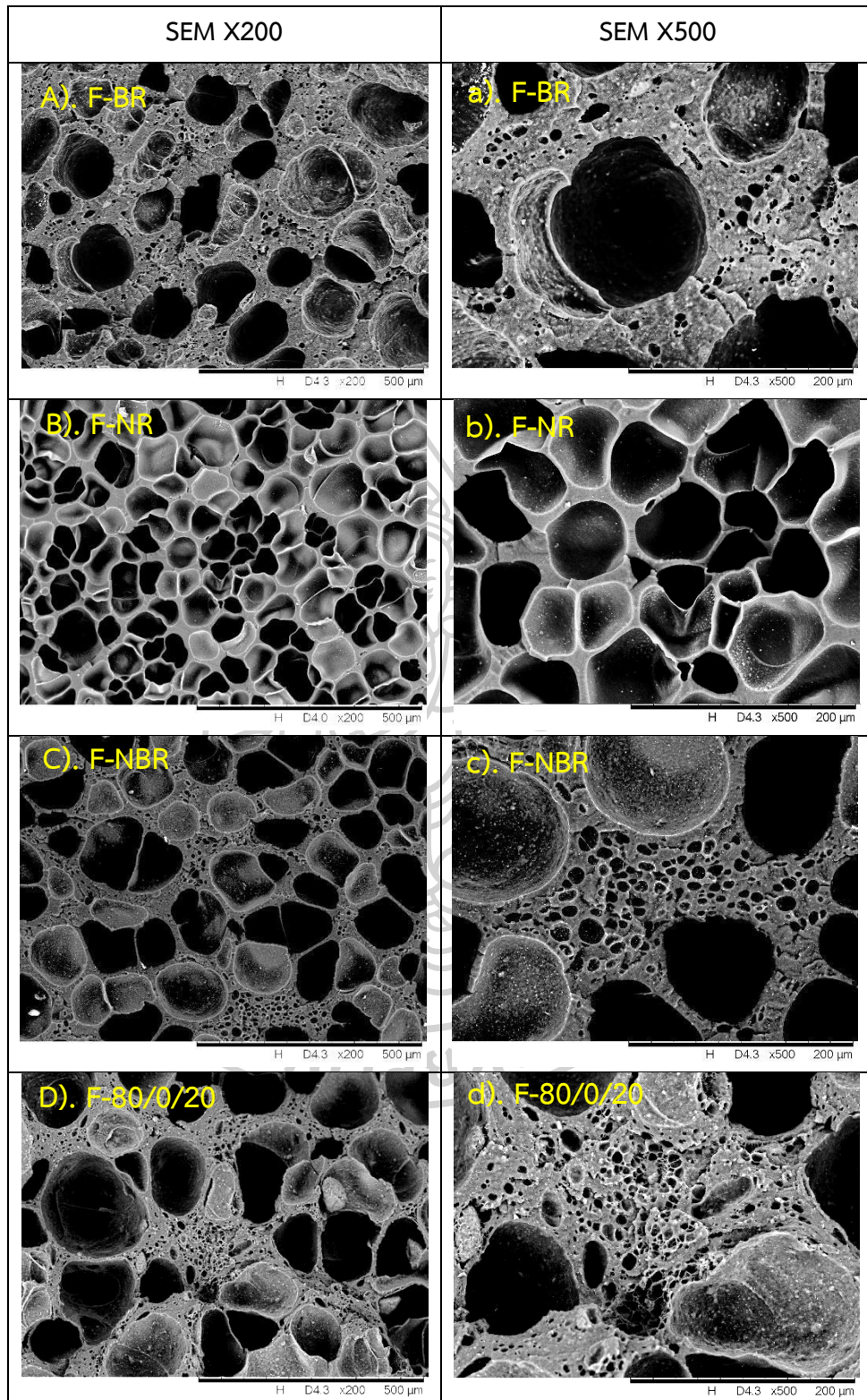
Vulcanized เกิดได้ยากขึ้นเมื่อปริมาณ NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบค่า Δ torque ของโพลียางกับยางผสมในส่วนก่อนหน้า (เปรียบเทียบค่า Δ torque ระหว่างตารางที่ 4.1 กับตารางที่ 4.2) จะเห็นว่าค่า Δ torque ของโพลียางทุกอัตราส่วนยกเว้นโพลียาง NBR มีค่าลดลงเมื่อเติม Silica และ Retarder ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสภาพความเป็นขี้ของ Silica ที่สามารถกระจายตัวได้ดีในยางที่มีขี้ (ยาง NBR) ซึ่ง Silica มีความสามารถในการดูดซับสารละลายที่มีขี้ได้ดี ทำให้ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป Silica อาจจะถูกดูดซับสาร Accelerator หรือ Activator เข้าไป ซึ่งหาก Silica กระจายตัวไม่ดี Silica จะจับกันเป็นก้อน ส่งผลให้กระบวนการ Vulcanized เกิดได้ยากขึ้น อีกทั้งการเติม Retarder ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการ Vulcanized ทำให้พันธะ Crosslink ที่เกิดก่อนอาจขาดออกได้เมื่อได้รับความร้อนเป็นเวลานาน เนื่องจากโครงสร้างของพันธะ Crosslink ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ polysulphidic ซึ่งง่ายต่อการขาดเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน [39] ทำให้เมื่อเติม Silica และ Retarder ค่า Δ torque ของโพลียางจึงมีค่าลดลงจากเดิม

4.2.2 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม

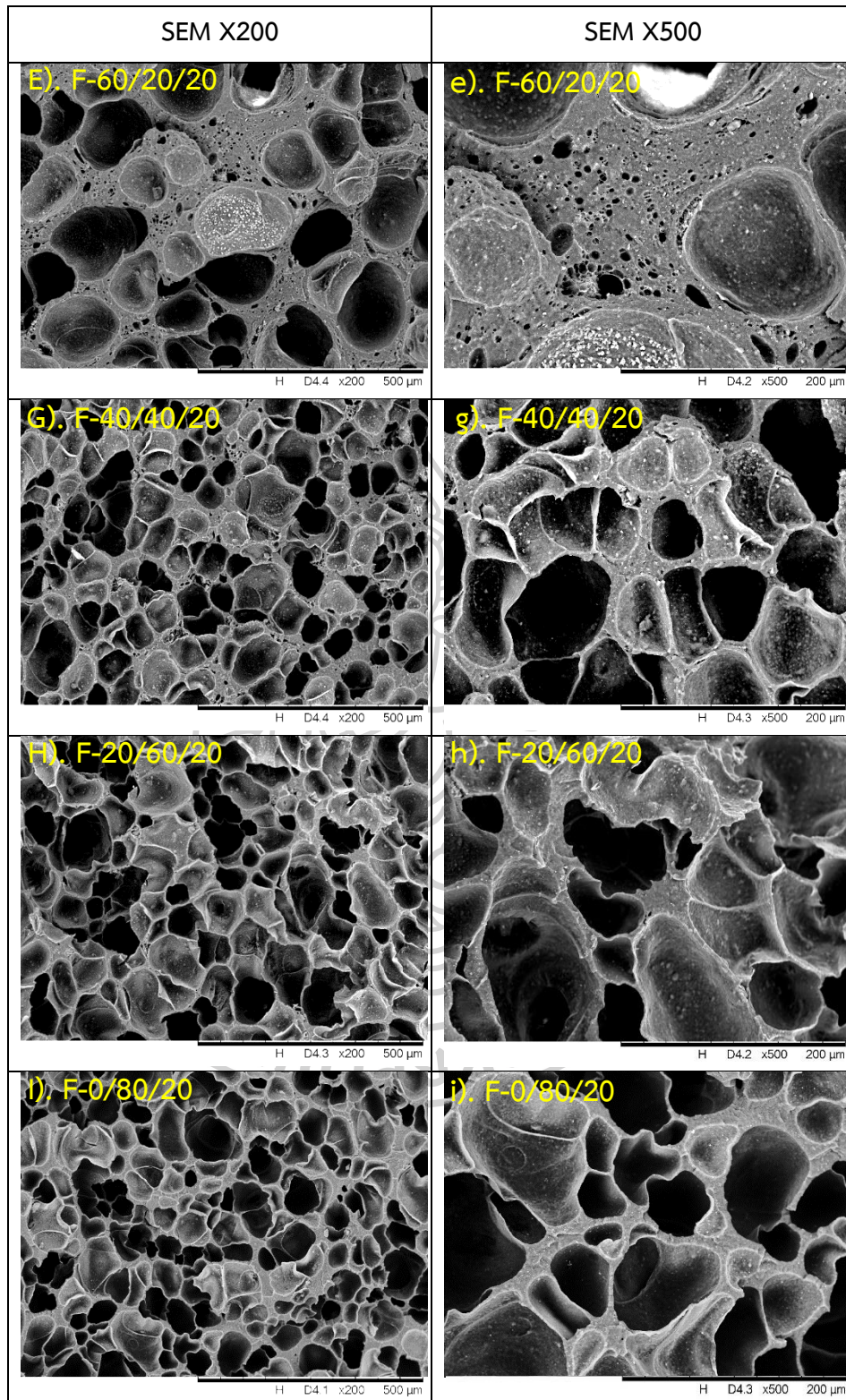
BR/NR/NBR

ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดเซลล์โพลี (Cell size) และ ขนาดผนังเซลล์โพลี (Cell wall) ของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR

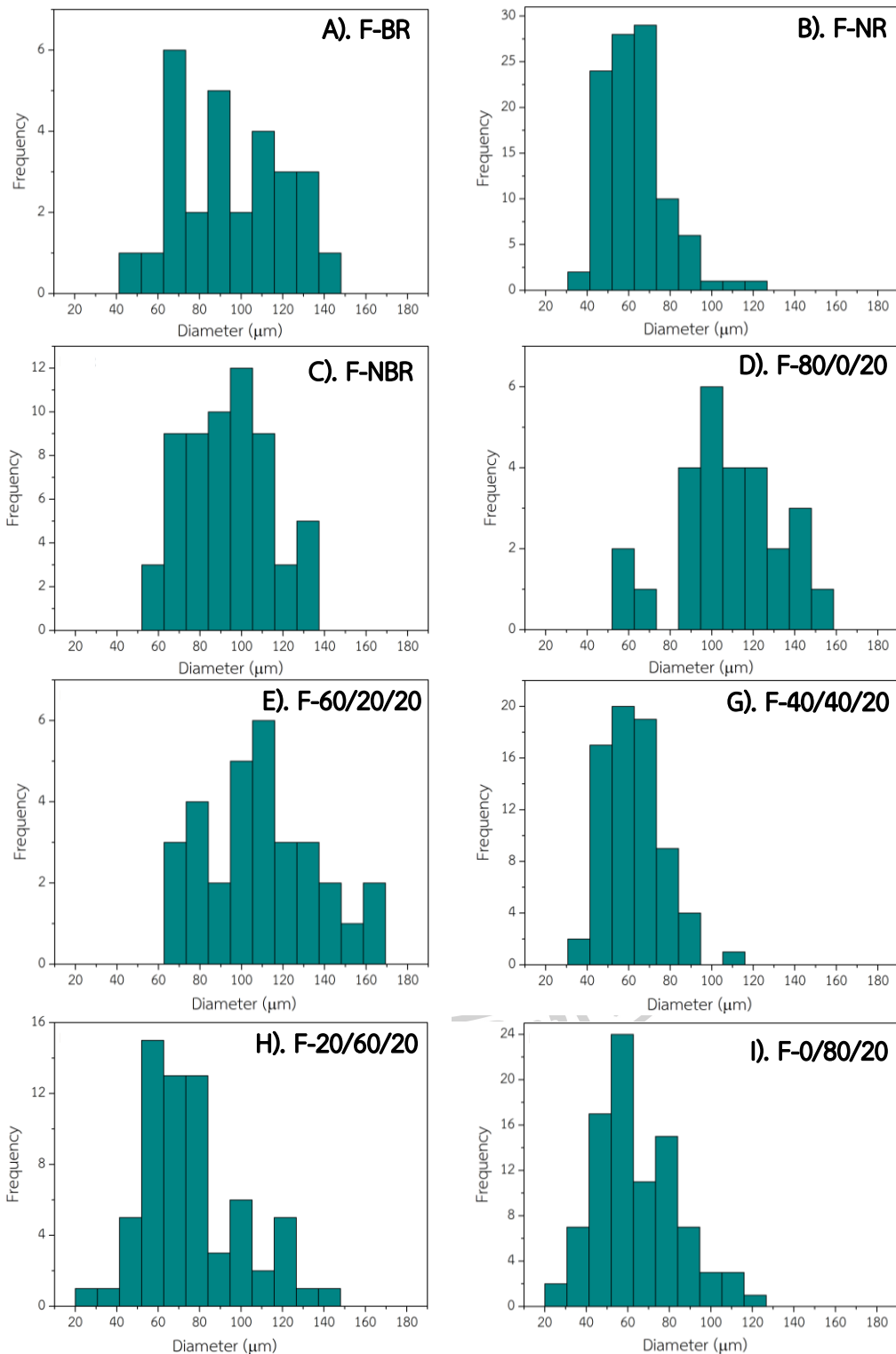
	Cell size, μm		Cell wall, μm	
	Average	SD	Average	SD
F-BR	99.89	29.86	92.01	40.80
F-NR	62.88	14.97	10.83	4.47
F-NBR	93.38	20.90	58.74	24.80
F-80/0/20	114.47	31.80	60.89	38.24
F-60/20/20	111.60	28.13	39.79	18.87
F-40/40/20	61.78	13.93	18.42	8.03
F-20/60/20	76.35	24.68	13.33	7.39
F-0/80/20	64.42	19.65	14.77	5.42



ภาพที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่กำลังขยาย x200 และ x500 โดย A,a). F-BR, B,b). F-NR, C,c). F-NBR, D,d). F-80/0/20, E,e). F-60/20/20, G,g). F-40/40/20, H,h). F-20/60/20 และ I,i). F-0/80/20



ภาพที่ 4.14 (ต่อ) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR ที่กำลังขยาย x200 และ x500 โดย A,a). F-BR, B,b). F-NR, C,c). F-NBR, D,d). F-80/0/20, E,e). F-60/20/20, G,g). F-40/40/20, H,h). F-20/60/20 และ I,i). F-0/80/20



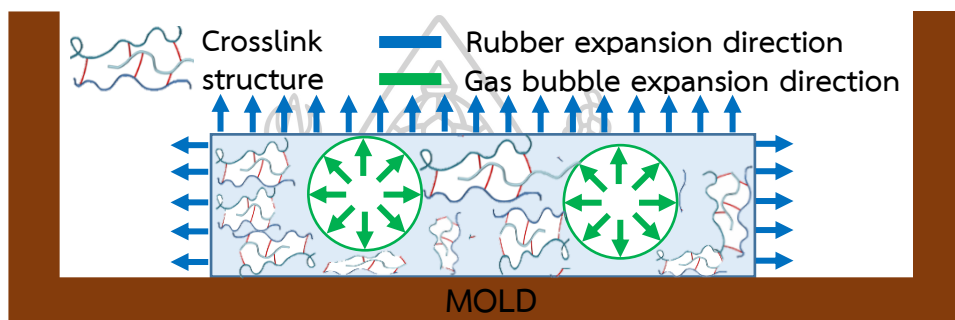
ภาพที่ 4.15 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR โดย A). F-BR, B). F-NR, C). F-NBR, D). F-80/0/20, E). F-60/20/20, G). F-40/40/20, H). F-20/60/20 และ I). F-0/80/20

จากภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.15 ซึ่งแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมอย่างผสม และการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม แสดงให้เห็นว่าเซลล์ของโฟมภายในทุกอัตราส่วนแสดงลักษณะเซลล์โฟมเป็นรูปแบบของเซลล์ปิด (Closed-cell structure) โดยเมื่อดูจากกราฟการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟม (Cell size distribution, ภาพที่ 4.15) แสดงให้เห็นถึงขนาดของเซลล์โฟมแต่ละอัตราส่วนซึ่งพบว่าขนาดเซลล์โฟมมีขนาดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันในแต่ละอัตราส่วนการผสม ทั้งนี้เนื่องมาจากการผสม Silica ซึ่งประพฤติตัวเป็น Nucleating blowing agent โดยในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปนั้น เมื่อยางได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 160 °C ซึ่งทำให้ BA เกิดการแตกตัว ในขณะที่ Silica ที่กระจายตัวอยู่ในทุกส่วนของยางผสม ยังคงอยู่ในสถานะของแข็ง โดย Silica นั้นมีความสามารถในการดูดซับสารละลายได้ดี [40] จะทำการดูดซับสาร BA ที่กำลังละลายอยู่ในเนื้อยาง ทำให้ BA สามารถกระจายได้ทั่วถึงทุกส่วนของยาง ส่งผลให้ขนาดของเซลล์โฟมที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน

จากนั้นเมื่อพิจารณาที่ขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟม (ตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.14) พบว่าโฟมอย่างแต่ละอัตราส่วนมีขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟมที่แตกต่างกัน โดยโฟมยาง NR มีจำนวนเซลล์โฟมมากที่สุด กล่าวคือมีขนาดเซลล์โฟมกับผนังเซลล์โฟมที่เล็กที่สุด รองลงมาคือโฟมยาง NBR และ BR ตามลำดับ โดยสำหรับโฟมยางผสมนั้นขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟมมีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มสูงขึ้น

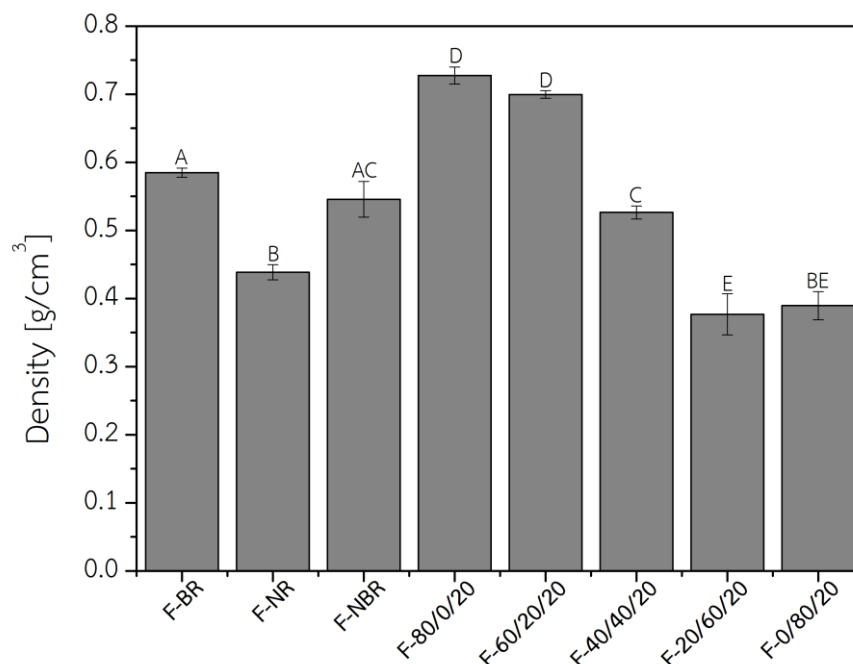
ทั้งนี้ขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์ถูกควบคุมด้วยความหนืด และสภาพผิวของยางแต่ละอัตราส่วน โดยปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อระยะเวลาในการเกิด Crosslink (t_{s2} t_{c90} และ CRI จากตารางที่ 4.2) กล่าวคือในขณะกระบวนการขึ้นรูปโฟมยางที่อุณหภูมิ 160 °C มีกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมกัน 2 กระบวนการ แสดงดังภาพที่ 4.16 คือ กระบวนการแตกตัวของสาร BA ซึ่งสาร BA เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดแตกตัวอย่างรวดเร็ว (อุณหภูมิการแตกตัวของ BA อยู่ที่ประมาณ 157 °C, ตารางที่ 2.6) และปลดปล่อยก๊าซ N_2 โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นพร้อม ๆ กันกับการเกิดกระบวนการเกิด Crosslink ของโฟมยาง ทำให้ยางที่ได้รับความร้อนและกำลังไหลอยู่เกิดฟองก๊าซขึ้นภายในพร้อมกับเกิดการเชื่อมขวางที่ละน้อย ส่งผลให้ยางที่มีระยะเวลาในการขึ้นรูปนาน (t_{s2} และ t_{c90} นาน) สามารถเกิดการรวมตัวกันของฟองก๊าซในปริมาณมาก ทำให้ได้ฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่ อีกทั้งฟองก๊าซที่ขยายใหญ่ขึ้นจะดันให้เนื้อยางไหลมารวมตัวกัน และเมื่อยางคงรูป จะได้โฟมยางที่มีขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟมที่มีขนาดใหญ่ ในทางกลับกันโฟมยางที่มีระยะเวลาในการขึ้นรูปน้อย ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นสามารถรวมกลุ่มกันได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ขนาดเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟมที่มี

ขนาดเล็ก อีกทั้งจากค่า Mooney Viscosity (จากภาพที่ 4.2) แสดงให้เห็นว่ายาง NR มีความหนืดมากที่สุด รองมาคือยาง NBR และ BR ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกันกับขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟม เช่นเดียวกันกับยางผสม โดยโฟมยางที่มีความหนืดสูงกว่าจะมีขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟมที่เล็กกว่าโฟมยางที่มีความหนืดต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากในขณะกระบวนการขึ้นรูปเมื่อ BA เกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส และเกิดการรวมกลุ่มกัน (ฟองแก๊สขยายตัว) ซึ่งความสามารถในการขยายตัวของแก๊สในยางที่มีความหนืดสูง จะขยายตัวได้ยากกว่ายางที่มีความหนืดต่ำ ทำให้ยางที่มีความหนืดสูงจะมีขนาดของเซลล์โฟมที่เล็กกว่ายางที่มีความหนืดต่ำ



ภาพที่ 4.16 จำลองภาพการแตกตัวของ BA ในขณะที่ยางเกิดปฏิกิริยา Vulcanized ในกระบวนการขึ้นรูปโฟมยาง

4.2.3 ศึกษาความหนาแน่นของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR



ภาพที่ 4.17 ความหนาแน่นของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR

ขนาดของเซลล์โฟม และขนาดของผนังเซลล์โฟม เป็นตัวกำหนดสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของโฟมยาง ซึ่งทำให้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของโฟมยางเป็นไปได้ยาก ความหนาแน่นของโฟมยางผสมจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของโฟมยาง จากภาพที่ 4.17 แสดงความหนาแน่นของโฟมยางที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าโฟมยางผสมทุกอัตราส่วนมีค่าความหนาแน่นที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับยางผสมในส่วนก่อนหน้า (จากภาพที่ 4.13) เนื่องจากภายในเป็นเซลล์โฟมปิดจำนวนมาก ทำให้น้ำหนักของชิ้นงานมีค่าค่อนข้างน้อย ในขณะที่ปริมาตรของชิ้นงานยังคงเท่ากับยางผสม ความหนาแน่นของโฟมยางผสมจึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับยางผสม โดยเมื่อพิจารณาที่โฟมยาง BR NR และ NBR พบว่าโฟมยาง NR มีความหนาแน่นน้อยที่สุด ที่ประมาณ 0.44 g/cm^3 รองมาเป็นโฟมยาง NBR และ BR ที่ประมาณ 0.55 และ 0.59 g/cm^3 ตามลำดับ จากนั้นเมื่อพิจารณาที่โฟมยางผสม พบว่าโฟมยางผสมมีความหนาแน่นลดลง เมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

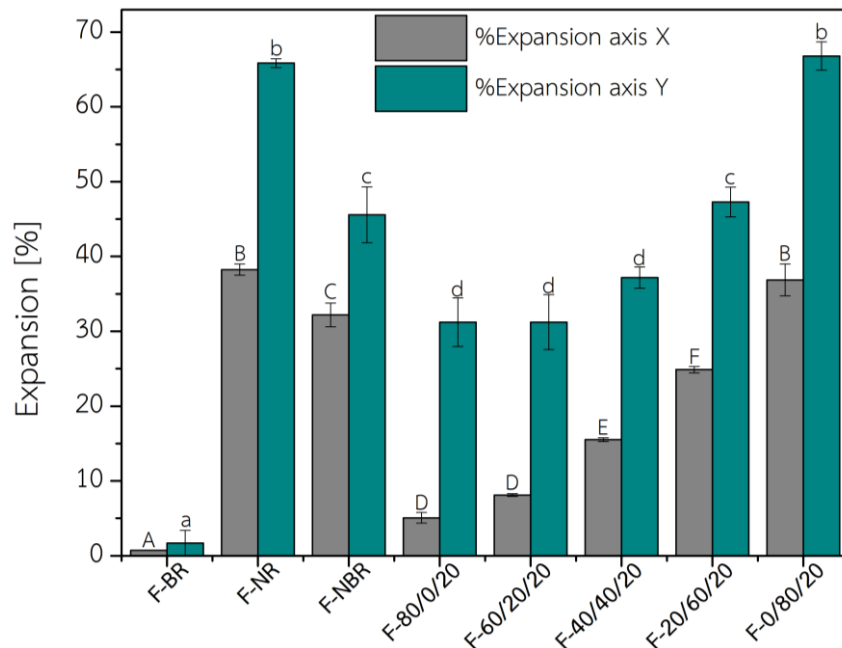
จากผลการศึกษาความหนาแน่นของโฟมยาง แสดงให้เห็นว่าโฟมยางที่มีขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟมที่มีขนาดเล็ก (F-NR, F-20/60/20, F-40/40/20 และ F-0/80/20) ล้วนแล้วแต่เป็นโฟมยางที่มีความหนาแน่นน้อยทั้งสิ้น (ไม่เกิน 0.5 g/cm^3) ในขณะที่โฟมยางที่มีขนาดของเซลล์โฟม และผนังเซลล์โฟมที่มีขนาดใหญ่ (F-BR, F-NBR, F-80/0/20, F-60/20/20) เป็นโฟมยางที่มีความหนาแน่นมากกว่า แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของโฟมยางนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์โฟม และขนาดของผนังเซลล์โฟม

4.2.4 ศึกษาการขยายตัว (%Expansion) และการหดตัว (%Shrinkage) ของโฟมยาง BR NR NBR และ โฟมยางผสม BR/NR/NBR

จากภาพที่ 4.18 ซึ่งแสดงการขยายตัวของโฟมยางหลังออกจากโมลด์ เมื่อเทียบกับขนาดของโมลด์ โดยพบว่าโฟมยางเกิดการขยายตัวสองทิศทางคือ แนวแกน X (การเปลี่ยนแปลง diameter ของชิ้นงาน) และแนวแกน Y (การเปลี่ยนแปลงความสูงของชิ้นงาน) ซึ่งแสดงทิศทางดังภาพที่ 4.19 A โดยโฟมยางผสมทุกอัตราส่วนมีขนาดเพิ่มขึ้นทั้งสองแนวแกน แสดงให้เห็นว่าโฟมยางมีการพuffขึ้นทุกทิศทาง โดยโฟมยางทุกอัตราส่วนมีการขยายตัวขึ้นในแนวแกน Y มากกว่าในแนวแกน X เนื่องจากในการขึ้นรูปนั้น เมื่อให้ความดันและความร้อน ยางจะไหลจนเต็มโมลด์ในแนวแกน X ก่อน จากนั้นจะพuffขึ้นในแนวแกน Y ทำให้เกิดการขยายตัวในแนวแกน Y มากกว่าแกน X โดยเมื่อพิจารณาที่โฟมยาง BR NR และ NBR พบว่าโฟมยาง NR มีการขยายตัวที่มากที่สุด รองลงมาคือโฟมยาง NBR และ BR ตามลำดับ จากนั้นเมื่อพิจารณาที่โฟมยางผสม จะพบว่าการขยายตัวของโฟมยางผสม F-0/80/20 มีการเพิ่มขึ้นที่มากที่สุด และจะมีการขยายตัวลดลงเมื่อปริมาณยาง BR ในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น นั้นแสดง

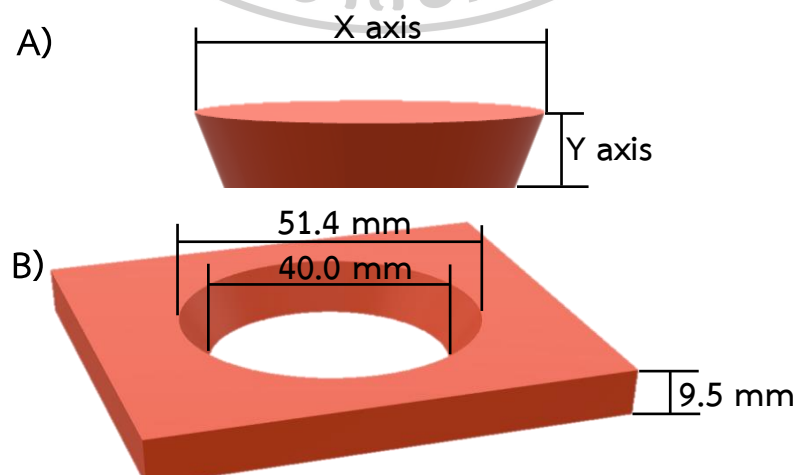
ให้เห็นว่ายาง BR เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นโฟมจะเกิดการขยายตัวได้น้อย แต่ในทางตรงกันข้ามยาง NR เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นโฟมจะขยายตัวได้มาก และสำหรับโฟมยางผสมนั้นวิถุภาคหลักของโฟมยางผสมส่งผลอย่างยิ่งต่อการขยายตัว

อย่างไรก็ตามหลังออกจากโมลด์โฟมยางมีการขยายตัวขึ้นตั้งที่กล่าวมาแล้ว แต่เมื่อพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง โฟมยางจะค่อย ๆ หดตัวลง จึงได้ทำการศึกษาการหดคืนตัวของโฟมยางเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4.20

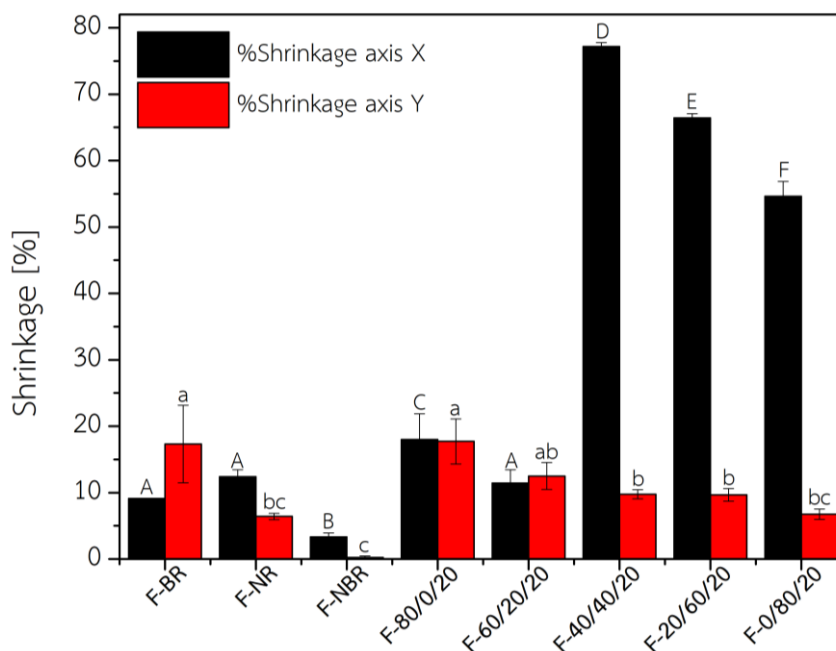


ภาพที่ 4.18 การขยายตัวของโฟมยางหลังออกจากโมลด์ โดยเทียบกับขนาดของโมลด์

*Oneway anova (พารามิเตอร์บนแท่งกราฟ): A-F แสดงความแตกต่างของการขยายตัวในแนวแกน X, a-d แสดงความแตกต่างของการขยายตัวในแนวแกน Y



ภาพที่ 4.19 A) ทิศทางแนวแกน X และ Y ของชิ้นงาน และ B) ขนาดของโมลด์



ภาพที่ 4.20 การหดตัวของโฟมยางเมื่อเทียบกับตอนขยายตัวเต็มที่ หลังจากพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.20 โดยแบ่งเป็นการหดตัวสองทิศทางคือ แนวแกน X (การเปลี่ยนแปลง diameter ของชิ้นงาน) และแนวแกน Y (การเปลี่ยนแปลงความสูงของชิ้นงาน) เมื่อพิจารณาที่โฟมยาง BR NR และ NBR พบว่ามีการหดตัวลงน้อยมาก โดยโฟมยาง BR มีการหดมากที่สุด รองลงมาคือ โฟมยาง NR และ NBR ตามลำดับ โดยสำหรับโฟมยางผสมพบว่าการหดตัวในแนวแกน X ที่เยอะมาก โดยเฉพาะโฟมยางผสม F-40/40/20, F-20/60/20 และ F-0/80/20 ซึ่งมีการหดตัวมากกว่า 50 %

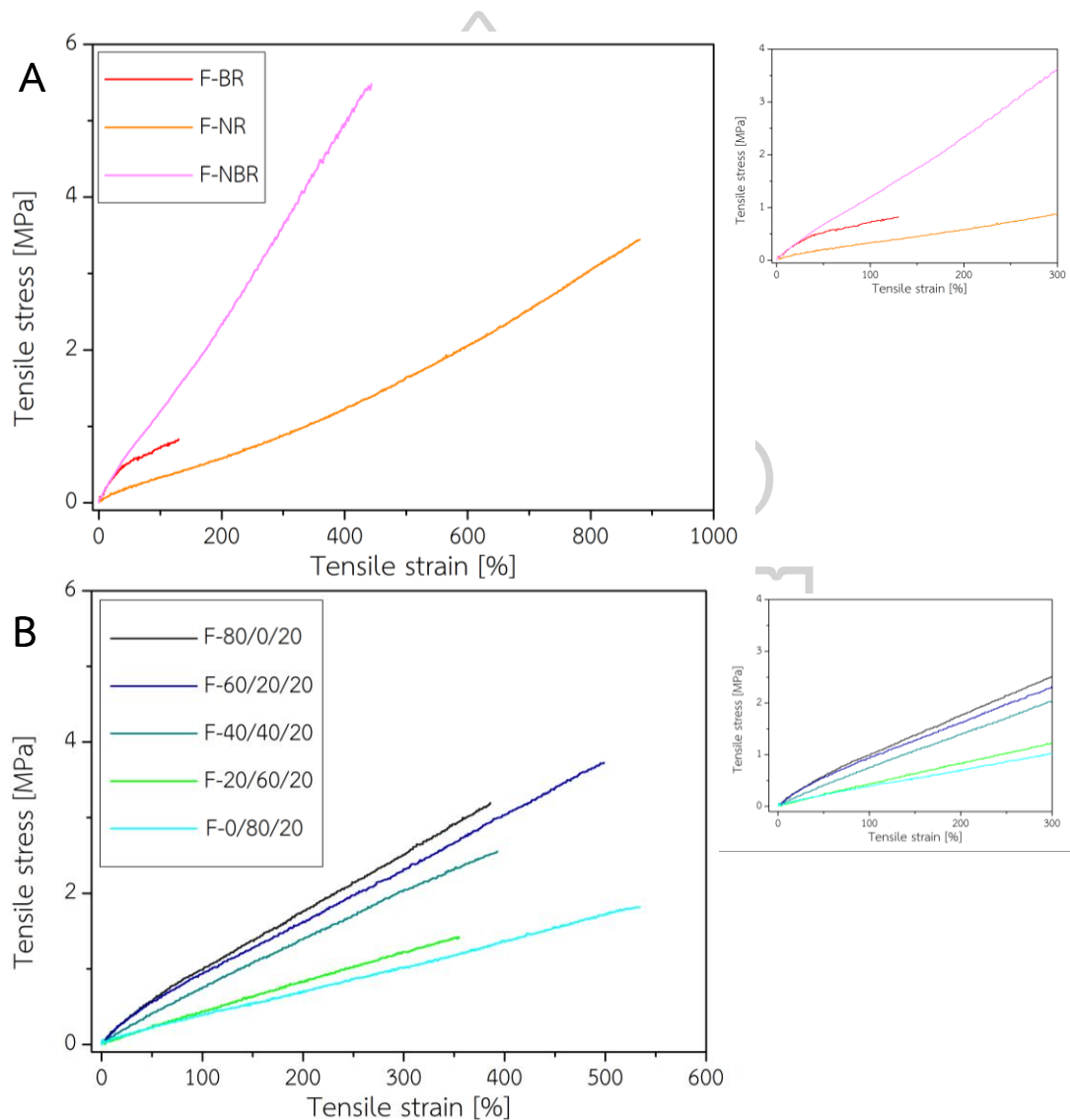
อย่างไรก็ตามจากผลการทดสอบการหดตัว แสดงให้เห็นว่าเมื่อพักโฟมยางไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง โฟมยางทุกอัตราส่วนจะเกิดการหดตัว แสดงให้เห็นว่าหลังจากขึ้นรูปชิ้นงานโฟมยางแล้ว ก่อนนำไปทดสอบนั้นจำเป็นต้องพักโฟมยางไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 72 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าขนาดของชิ้นงานคงที่แล้ว ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ

จากนั้นเป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมยางผสม โดยมีการศึกษาสมบัติการดึงยืด ความทนทานต่อการฉีกขาด ความแข็งที่ผิว และความทนทานต่อการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด อย่างไรก็ตามในการศึกษาสมบัติเชิงกลของโฟมยางนั้น การขึ้นรูปถือเป็นปัจจัยสำคัญในการขยายตัวของเซลล์โฟม ซึ่งเทคนิคที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปในงานวิจัยนี้ คือ การรีดแผ่นยางคอมปาวด์ที่ได้จากการผสมด้วย Two-roll mil เป็นแผ่นบาง ๆ ประมาณ 3-5 มิลลิเมตร จากนั้นนำแผ่นยางคอมปาวด์ทุกอัตรา

ส่วนผสมตัดให้มีขนาดกว้าง x ยาวเท่ากับขนาดของแม่พิมพ์ (mold) และขึ้นรูปด้วยเครื่อง Compression molding ที่อุณหภูมิ 160 °C ด้วยความดันประมาณ 1,500 psi จากนั้นจะทำการเปิด mold เล็กน้อยเมื่อถึงเวลา Scorch time และรอจนครบเวลา Cure time แล้วนำแผ่นโพลียูรีเทนที่ได้พักไว้ 72 ชั่วโมง และตัดเป็นชิ้นงานทดสอบ ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบสมบัติเชิงกลโดยเริ่มจากพฤติกรรมภายใต้แรงดึงไว้ดังนี้

4.2.5 ศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงดึงของโพลียูรีเทน BR NR NBR และโพลียูรีเทนผสม

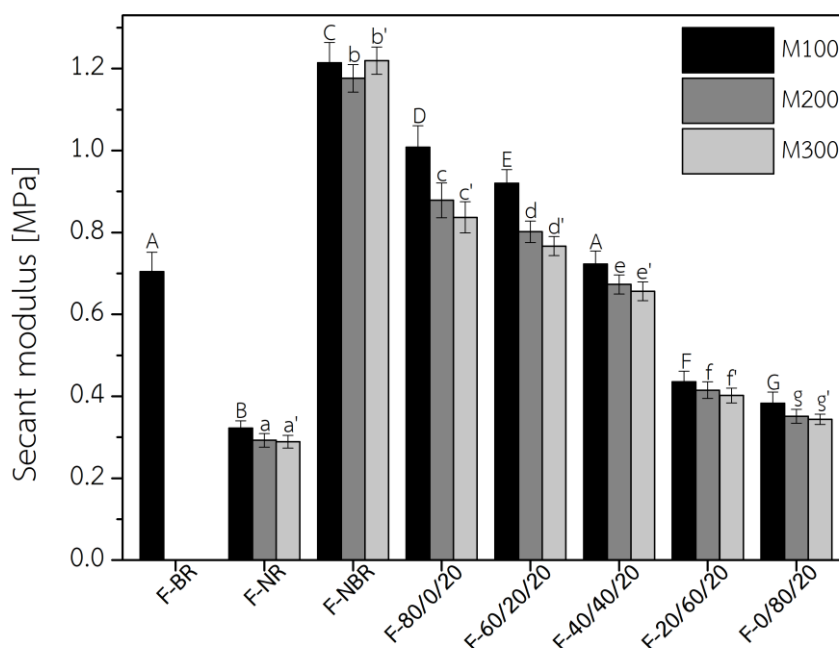
BR/NR/NBR



ภาพที่ 4.21 Stress-strain curve โดย A คือ โพลียูรีเทน BR NR NBR และ

B คือ โพลียูรีเทนผสม BR/NR/NBR

จากภาพที่ 4.21 ซึ่งแสดง Stress-strain curve ของโพลียูรีเทนแต่ละอัตราส่วน พบว่าโพลียูรีเทน NBR มี Tensile stress ที่สูงมาก และโพลียูรีเทน NR สามารถดึงยึดได้มาก แต่มี Tensile stress ในช่วงแรกต่ำกว่าโพลียูรีเทน BR และ NBR อย่างไรก็ตามโพลียูรีเทน BR กลับดึงยึดได้น้อยมาก เนื่องจากโพลียูรีเทน BR ใช้เวลาในการขึ้นรูปที่นานมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว (การทดสอบ MDR ในส่วนของ Scorch time และ Cure time) ทำให้บริเวณผิวของโพลียูรีเทนอาจเกิดการไหม้ ส่งผลให้มีความสามารถในการรับแรงดึงยึดได้น้อยมาก โดยสำหรับโพลียูรีเทนผสมมีสมบัติการดึงยึดที่ขึ้นอยู่กับวิถุภาคหลักของยางนั้น ๆ คือ โพลียูรีเทนผสม F-80/0/20 สามารถดึงยึดได้น้อยกว่าโพลียูรีเทนผสม F-0/80/20 แต่ Tensile stress ของโพลียูรีเทนผสม F-80/0/20 สูงกว่าโพลียูรีเทนผสม F-0/80/20 และสำหรับโพลียูรีเทนผสมสามส่วนนั้น โพลียูรีเทนผสม F-60/20/20 สามารถดึงยึดได้มากที่สุด และมี Tensile stress สูงที่สุด รองมาคือโพลียูรีเทนผสม F-40/40/20 และ F-20/60/20 ตามลำดับ



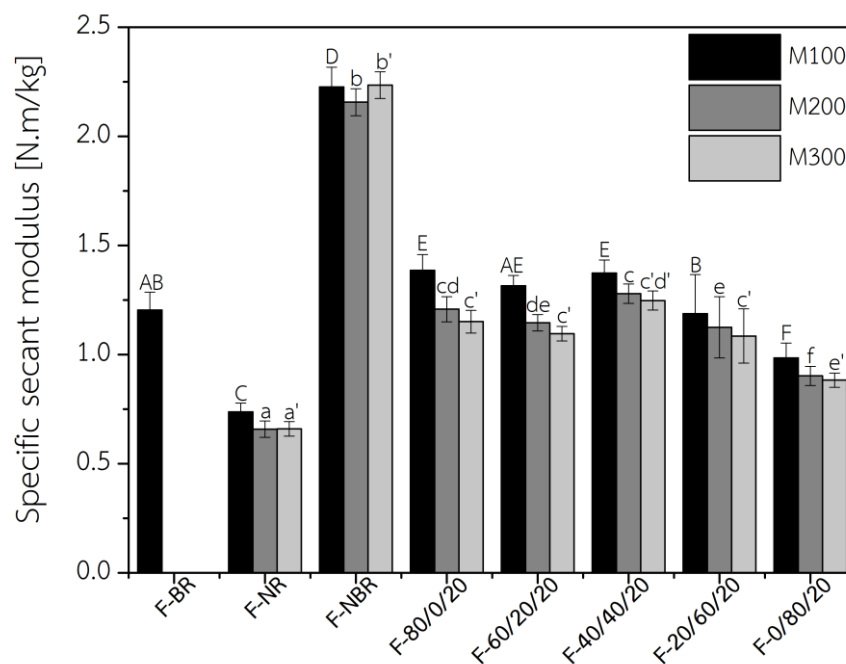
ภาพที่ 4.22 Secant modulus ของโพลียูรีเทน BR NR NBR และโพลียูรีเทนผสม BR/NR/NBR

*Oneway anova (พารามิเตอร์บนแท่งกราฟ): A-G แสดงความแตกต่างของ Modulus at 100 %strain, a-g แสดงความแตกต่างของ Modulus at 200 %strain, a'-g' แสดงความแตกต่างของ Modulus at 300 %strain

จากภาพที่ 4.22 แสดง Secant modulus ของโพลียูรีเทนแต่ละอัตราส่วน พบว่าโพลียูรีเทน BR มีค่า Secant modulus ที่ 100 %strain เท่านั้น เนื่องจากโพลียูรีเทน BR ยึดไม่ถึง 200 %strain ดังนั้นจะพิจารณาค่า Secant modulus ที่ 100 %strain ในทุก ๆ อัตราส่วนยาง โดยเมื่อพิจารณาที่โพล

ยาง BR NR และ NBR พบว่าโฟมยาง NBR มีค่า Secant modulus ที่ 100 %strain ที่สูงที่สุด และโฟมยาง NR มีค่า Secant modulus ที่ 100 %strain ที่น้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาที่โฟมยางผสมพบว่าโฟมยางผสม F-80/0/20 มี Secant modulus ที่ 100 %strain ที่สูงที่สุด และจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของเซลล์โฟม และขนาดของผนังเซลล์โฟม กล่าวคือโฟมยางที่มีขนาดของผนังเซลล์ใหญ่จะมีความแข็งของเนื้อวัสดุที่มากกว่าโฟมยางที่มีขนาดของผนังเซลล์ที่เล็กกว่า

อย่างไรก็ตามเนื่องจากชิ้นงานในการทดสอบสมบัติเชิงกลของโฟมยางมีพองก้ำขอยู่ภายใน ซึ่งมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อการศึกษาศสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ของเนื้อยาง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการ Normalize ผลการทดสอบต่าง ๆ ที่ขนาดของเซลล์โฟมส่งผลต่อสมบัตินั้น ๆ โดยทำการ Normalize ค่าที่ได้จากการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ด้วยการหารด้วย Density ซึ่งจะเป็นการแสดงสมบัติที่เกิดจากเนื้อของวัสดุ โดยการหารค่า Secant modulus ด้วย Density ซึ่งทำการแสดงค่าจากผลการทดสอบที่ได้เป็น Specific secant modulus ดังภาพที่ 4.23

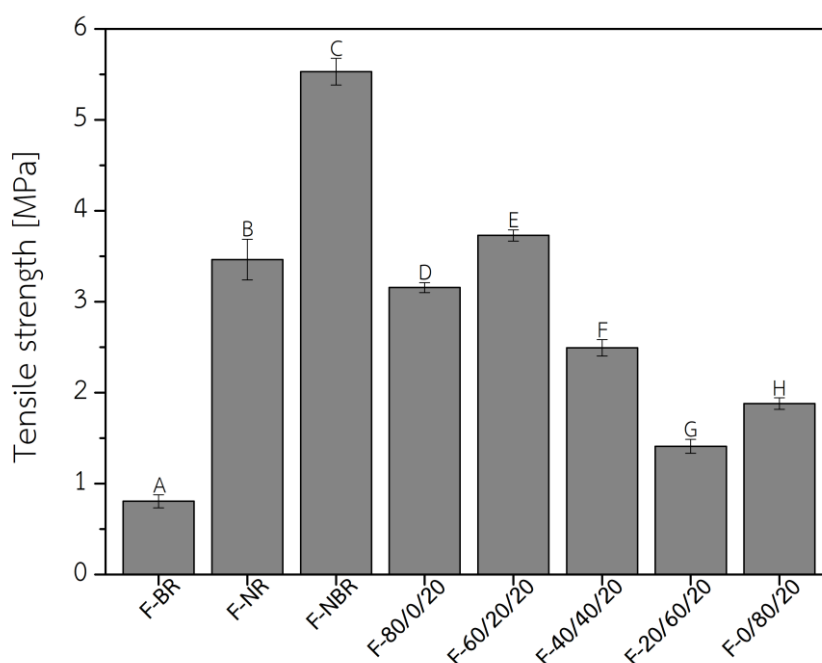


ภาพที่ 4.23 Specific secant modulus ของโฟมยาง BR NR NBR และโฟมยางผสม BR/NR/NBR

จากภาพที่ 4.23 แสดง Specific secant modulus ของโฟมยางแต่ละอัตราส่วน ซึ่งใช้เพื่อบอกสมบัติ Modulus หรือความแข็งของเนื้อยางในการรับแรงดึง โดยทำการพิจารณาค่า Modulus ที่ 100 %strain พบว่าสำหรับโฟมยาง BR NR และ NBR มีค่า Specific secant modulus ที่ 100 %strain ที่สูงกว่าโฟมยางผสมอัตราส่วนอื่น ๆ โดยโฟมยาง BR มีค่า Specific secant modulus ที่

100 %strain สูงกว่าโพลียูรีเทน NR และเมื่อพิจารณาที่โพลียูรีเทนผสม พบว่าโพลียูรีเทนผสม F-80/0/20 มีค่าสูงสุด และโพลียูรีเทนผสมมีค่า Specific secant modulus ที่ 100 %strain ลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มสูงขึ้น

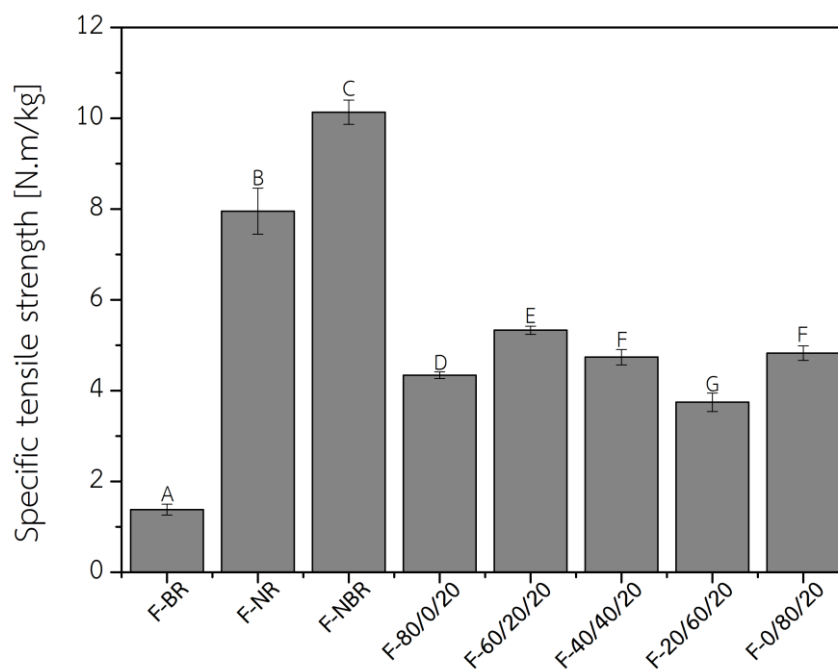
อีกทั้งยังพบว่าผลการทดสอบ Specific secant modulus ของเนื้อโพลียูรีเทนนั้นยังมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบ Secant modulus ของยางผสม (ภาพที่ 4.5) ในส่วนก่อนหน้านี้อีกด้วย



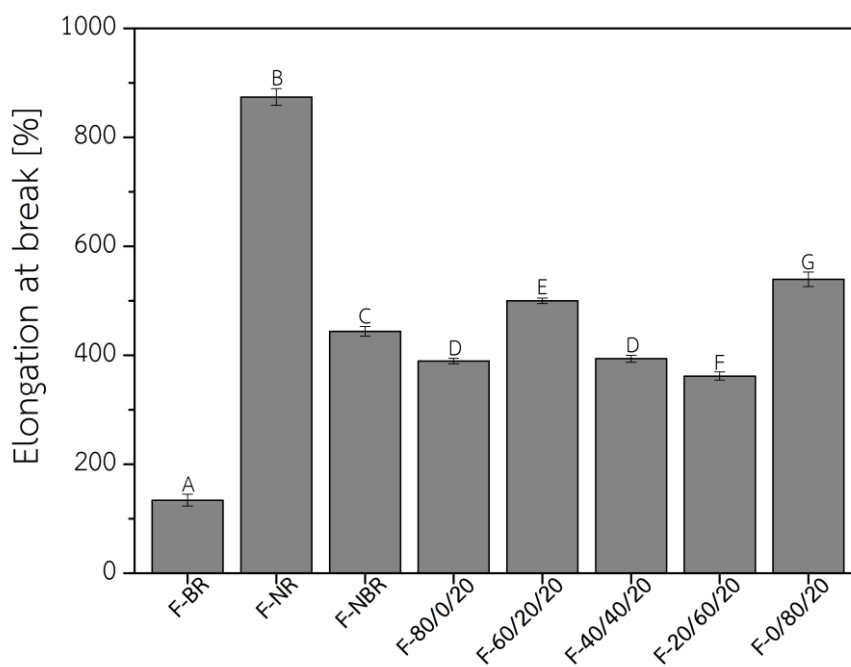
ภาพที่ 4.24 Tensile strength ของโพลียูรีเทน BR NR NBR และโพลียูรีเทนผสม BR/NR/NBR

จากภาพที่ 4.24 เมื่อพิจารณาที่โพลียูรีเทน BR NR และ NBR พบว่า Tensile strength ของโพลียูรีเทน NBR มี Tensile strength ที่สูงที่สุด โดยมีค่าประมาณ 5.53 MPa รองมาคือ โพลียูรีเทน NR และ BR มีค่าประมาณ 3.45 และ 0.81 MPa ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่โพลียูรีเทนผสมสองส่วน (F-80/0/20 และ F-0/80/20) พบว่าโพลียูรีเทนผสม F-80/0/20 มีค่า Tensile strength ที่สูงกว่าโพลียูรีเทนผสม F-0/80/20 เนื่องจากโพลียูรีเทน F-80/0/20 มีขนาดของผนังเซลล์โพลียูรีเทนที่หนากว่า F-0/80/20 มาก ทำให้เมื่อได้รับแรง F-80/0/20 สามารถส่งผ่านแรงได้ง่ายกว่า จึงทำให้มีค่า Tensile strength ที่สูงกว่า F-0/80/20 และเมื่อพิจารณาที่โพลียูรีเทนผสมสามส่วน พบว่าโพลียูรีเทนผสมสามส่วนมีค่า Tensile strength ลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโพลียูรีเทนที่มีขนาดของเซลล์โพลียูรีเทน และผนังเซลล์โพลียูรีเทนที่ใหญ่กว่านั้นสามารถรับแรงและส่งผ่านแรงจากการดึงยึดได้ดีกว่าโพลียูรีเทนที่มีขนาดเซลล์โพลียูรีเทน และผนังเซลล์โพลียูรีเทนที่เล็ก โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบที่เนื้อของวัสดุ โดย

การหาร Tensile strength ด้วย Density ก่อนนำมาเปรียบเทียบ แสดงดังภาพที่ 4.25 ซึ่งเป็นการแสดง Specific tensile strength ของโพลียางผสมแต่ละอัตราส่วน พบว่าผลการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



ภาพที่ 4.25 Specific tensile strength ของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR

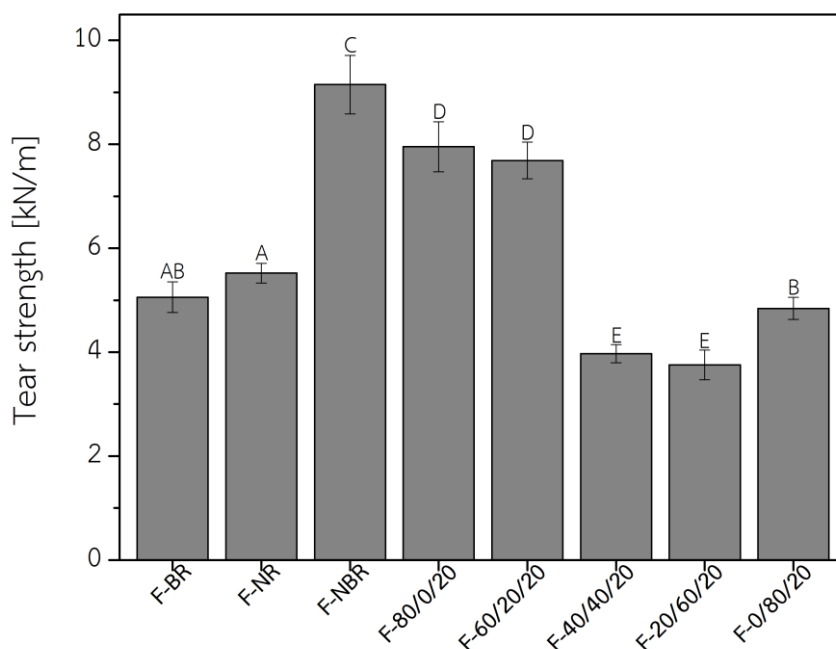


ภาพที่ 4.26 %Elongation at break ของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR

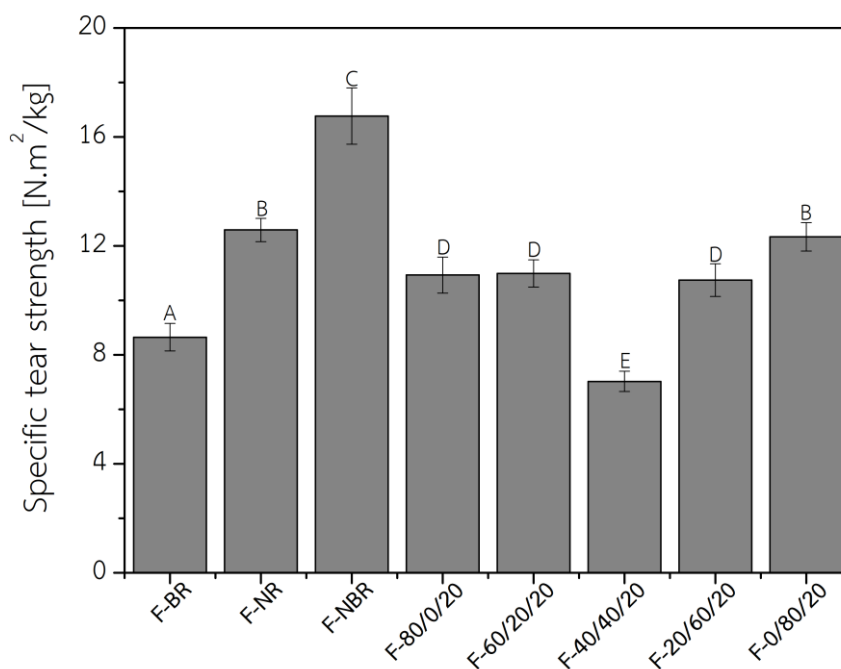
จากภาพที่ 4.26 %Elongation at break ของโพลียูรีเทนแต่ละอัตราส่วน โดยเมื่อพิจารณาที่โพลียูรีเทน BR NR และ NBR พบว่า โพลียูรีเทน NR มีค่า %Elongation at break มากที่สุด นั่นคือ โพลียูรีเทน NR สามารถรับแรงดึงยืดได้มากที่สุด ในขณะที่โพลียูรีเทน BR รับแรงดึงยืดได้น้อยที่สุด (เนื่องจากผิวยางอาจเกิดการไหม้จากการอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง) จากนั้นเมื่อพิจารณาที่โพลียูรีเทนผสม F-80/0/20 และ F-0/80/20 พบว่าโพลียูรีเทนผสม F-0/80/20 มี %Elongation at break ที่สูงกว่าโพลียูรีเทนผสม F-80/0/20 โดยเมื่อพิจารณาที่โพลียูรีเทนผสมสามส่วน พบว่าโพลียูรีเทนผสมมีค่า %Elongation at break ลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

4.2.6 ศึกษาสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของโพลียูรีเทน BR NR NBR และโพลียูรีเทนผสม BR/NR/NBR

จากภาพที่ 4.27 แสดงสมบัติความทนทานต่อการฉีกขาดของโพลียูรีเทนแต่ละอัตราส่วน ซึ่งเมื่อพิจารณาที่โพลียูรีเทน BR NR และ NBR พบว่าค่า Tear strength ของโพลียูรีเทน NBR มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือโพลียูรีเทน NR และ BR (BR มีค่า Tear strength น้อยซึ่งอาจเกิดจากการไหม้ของผิวยาง) จากนั้นเมื่อพิจารณาที่โพลียูรีเทนผสม พบว่าโพลียูรีเทนผสม F-80/0/20 และ F-60/20/20 มีค่า Tear strength ที่สูงมากเมื่อเทียบกับโพลียูรีเทนผสมที่อัตราส่วนอื่น อย่างไรก็ตามพบว่าค่า Tear strength มีค่าลดลงเมื่อปริมาณ NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.27 Tear strength ของโพลียูรีเทน BR NR NBR และโพลียูรีเทนผสม BR/NR/NBR



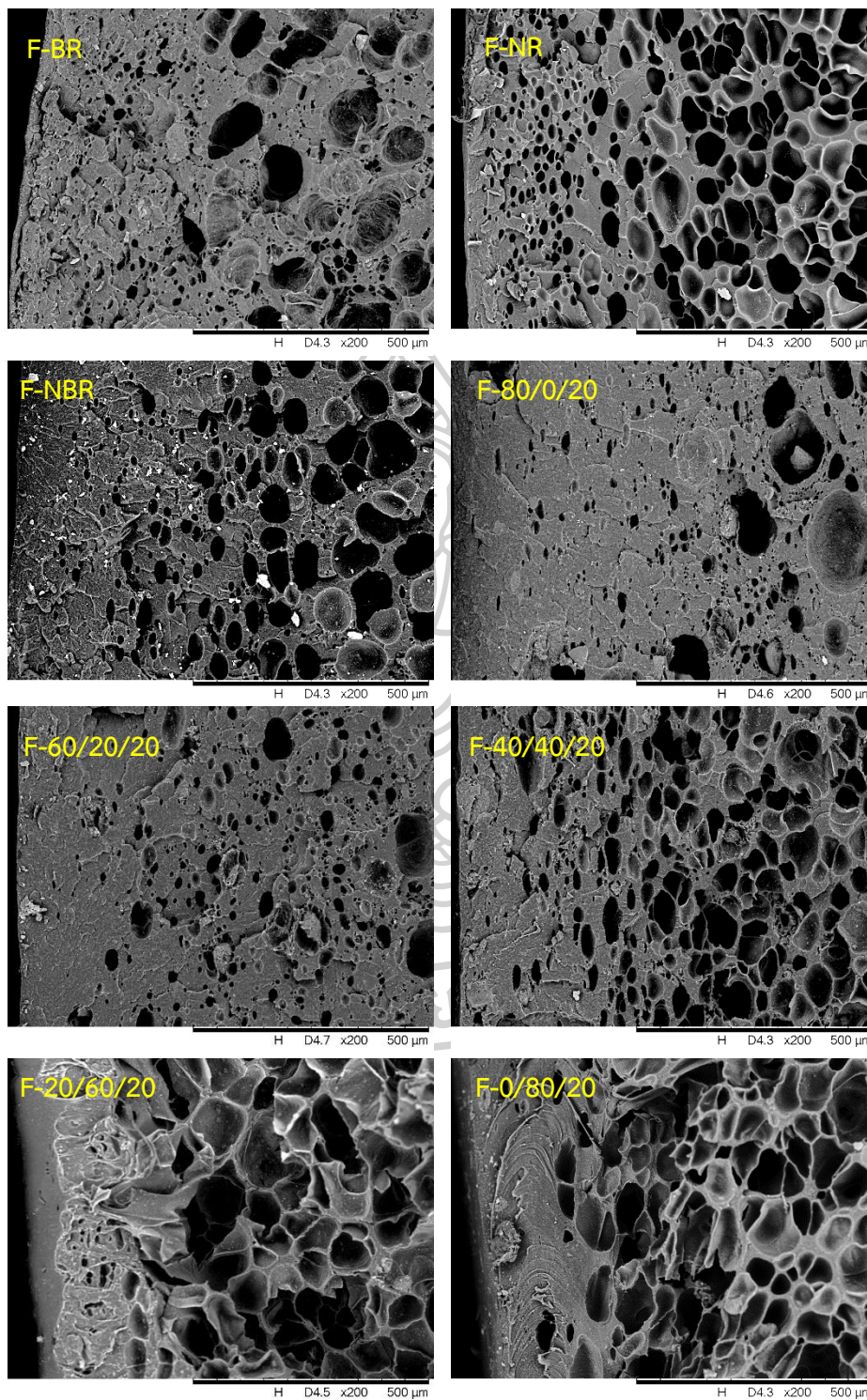
ภาพที่ 4.28 Specific tear strength ของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR

จากภาพที่ 4.28 ซึ่งแสดง Specific tear strength ของโพลียางผสมแต่ละอัตราส่วน โดยเมื่อพิจารณาที่โพลียาง BR NR และ NBR พบว่าโพลียาง NBR มีค่ามากที่สุด และโพลียาง BR มีค่าน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาที่โพลียางผสม พบว่าโพลียางผสมมีค่า Specific tear strength ที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ (ดูจากพารามิเตอร์บนแท่งกราฟ) เว้นแต่โพลียางผสม F-40/40/20 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุด และ F-0/80/20 ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับโพลียางผสมอัตราส่วนอื่น

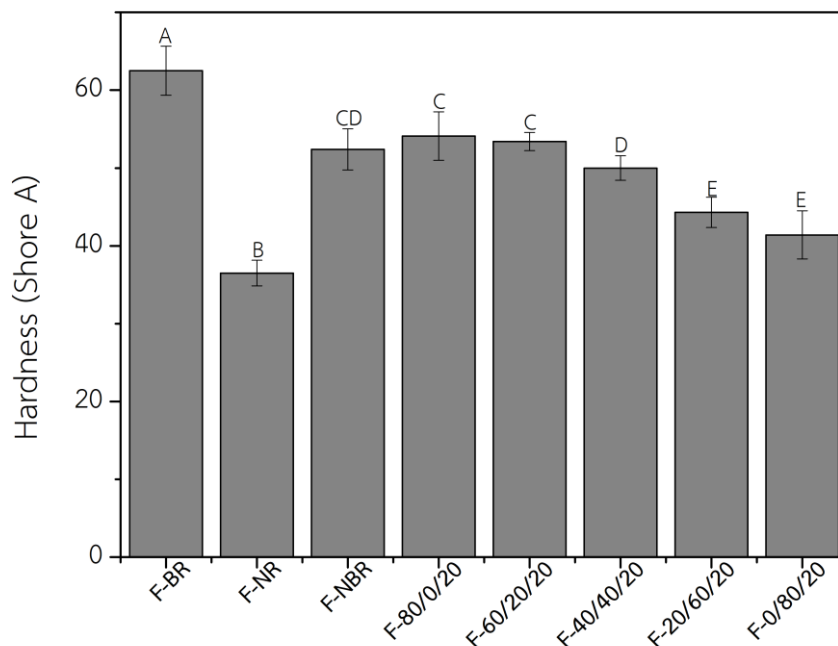
4.2.7 ศึกษาความแข็งที่ผิวของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR

ค่า Hardness เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งที่บริเวณผิวของวัสดุ ซึ่งได้แสดงค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) ไว้ดังภาพที่ 4.30 โดยพบว่าโพลียาง BR มีความแข็งมากที่สุด และโพลียาง NR มีความแข็งที่น้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการขึ้นรูปบริเวณผิวของชิ้นงานเป็นบริเวณที่ได้รับความร้อนก่อน ทำให้บริเวณผิวเกิดการ Vulcanized ก่อน โดยโพลียางที่มีระยะเวลาในการขึ้นรูปที่นาน จะส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีความหนา ซึ่งได้แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวโพลียางไว้ดังภาพที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่ายาง BR มีความหนาของผิวโพลียางมากที่สุด รองมาคือยาง NBR และ NR ตามลำดับ จากนั้นเมื่อพิจารณาที่โพลียางผสมพบว่าความแข็งของโพลียางผสมมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นไปตามระยะเวลาการขึ้นรูปของยางแต่ละอัตราส่วน (จากตารางที่ 4.2)

แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งที่ผิวขึ้นอยู่กับความหนาของผิวชั้นงาน ซึ่งความหนาของผิวชั้นงานจะถูควบคุมด้วยระยะเวลาในการขึ้นรูปชิ้นงาน

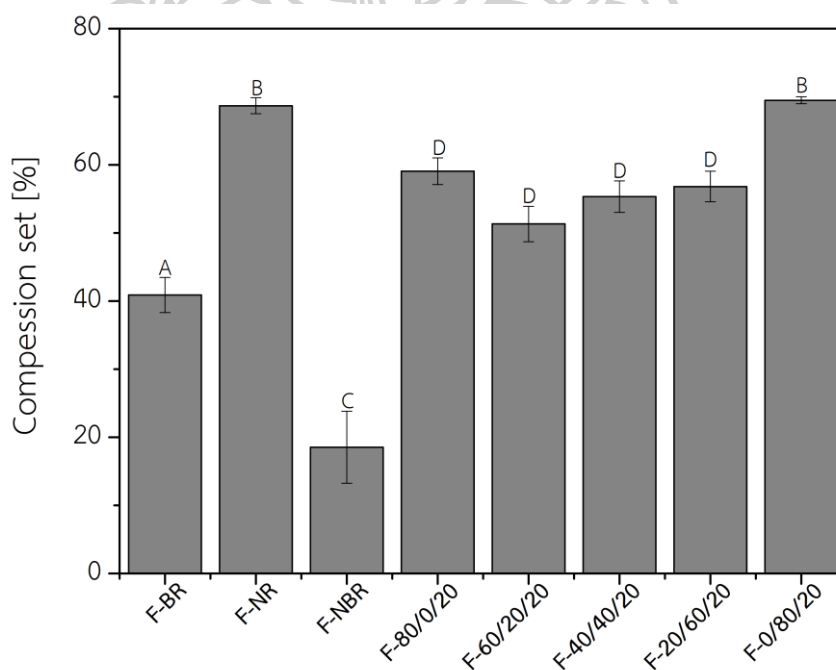


ภาพที่ 4.29 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของผิวโพลีเมอร์ยาง BR NR NBR และโพลีเมอร์ผสม BR/NR/NBR



ภาพที่ 4.30 Hardness ของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR

4.2.8 ศึกษาความสามารถในการคืนตัวกลับหลังได้รับแรงกดอัดของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR



ภาพที่ 4.31 Compression set ของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR

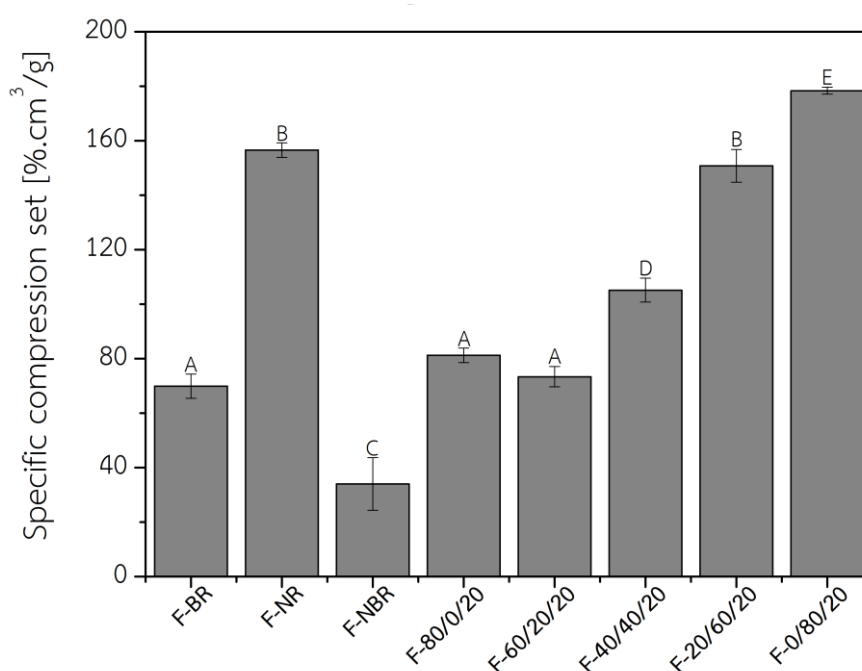
ค่า Compression set เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการคืนตัวกลับหลังได้รับแรงกดอัดภายใต้อุณหภูมิ 70 °C โดยโฟมยางที่มีค่า Compression set มาก แสดงว่ามีการคืนตัวได้น้อย (มีการเปลี่ยนแปลงความหนาจากเดิมมาก) และในทางกลับกันถ้าโฟมยางมีค่า Compression set น้อย แสดงว่าโฟมยางสามารถคืนตัวกลับได้มาก (มีการเปลี่ยนแปลงความหนาจากเดิมน้อย) ซึ่งค่า Compression set เกิดจากการเกิด Permanent deformation (การเสีรูปร่างของวัสดุ) ของโฟมยางหลังจากถูกกดอัดภายใต้อุณหภูมิ จากภาพที่ 4.31 ซึ่งแสดงค่า Compression set ของโฟมยางที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยเมื่อพิจารณาที่โฟมยาง BR NR และ NBR พบว่าค่า Compression set ของโฟมยาง NBR ดีที่สุดนั่นคือสามารถคืนตัวกลับมาหลังจากกดอัดได้มากที่สุด แต่ในทางกลับกันโฟมยาง NR สามารถคืนตัวได้น้อยที่สุด จากนั้นเมื่อพิจารณาที่โฟมยางผสมพบว่าโฟมยางผสมทุกอัตราส่วนมีค่า Compression set ที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ เว้นเพียงโฟมยาง F-0/80/20 ที่มีค่า Compression set ที่สูงมาก (ไม่แตกต่างกับโฟมยาง NR) อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าค่า Compression set ของโฟมยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นที่เล็กน้อยเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

การคืนตัวหลังจากได้รับแรงอัดภายใต้อุณหภูมิของโฟมยางนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อโฟมยางได้รับแรงอัดประกอบไปด้วย ดังนี้

1. ความดันที่ชิ้นงานได้รับประกอบด้วยแรงดันจากสองส่วนคือ ส่วนหนึ่งเป็นแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ และอีกส่วนเป็นแรงดันของก๊าซที่อยู่ภายในเซลล์โฟม โดยเมื่อชิ้นงานทดสอบได้รับแรงดัน ก๊าซภายในเซลล์โฟมจะเกิดการแพร่ออกผ่านผนังของเซลล์โฟม (ปรากฏการณ์นี้เป็นเช่นเดียวกับการที่ยางรถยนต์มีความดันลดลงเมื่อใช้งานเป็นเวลานาน) ทำให้โฟมยางไม่สามารถคืนตัวได้หลังจากการทดสอบ เนื่องจากก๊าซไม่สามารถกลับเข้าไปในเซลล์โฟมปิดได้ [41]
2. เมื่อพิจารณาที่การให้อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากการทดสอบ Compression set ของโฟมยาง ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบความทนทานต่ออุณหภูมิของยางผสม (ภาพที่ 4.11) ซึ่งที่เวลา 22 ชั่วโมงนั้นพบว่ายางผสมทุกอัตราส่วนมีค่า Secant modulus at 100 %strain ลดลง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสมบัติเชิงกลของโฟมยางจะลดลงเช่นกัน เมื่อโฟมยางได้รับความร้อน
3. มีความสัมพันธ์กันของ Secant modulus และ Hardness (ภาพที่ 4.22 และภาพที่ 4.30) กับค่า Compression set โดยพบว่าวัสดุที่แข็งกว่ามีค่า

Compression set ที่ต่ำกว่าวัสดุที่นุ่ม เนื่องจากวัสดุที่แข็งกว่ามีส่วนที่สามารถรองรับแรงดันที่เกิดขึ้นได้มากกว่าวัสดุที่นุ่ม [41] ทำให้ยางที่แข็งกว่าเมื่อได้รับแรงดันสามารถเกิดการเสียรูปได้น้อยกว่ายางที่นุ่ม

จากนั้นเมื่อพิจารณาที่เนื้อวัสดุดังภาพที่ 4.32 พบว่าแนวโน้มของค่า Specific compression set เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบ Compression set คือ สำหรับโพลียาง BR NR และ NBR นั้นโพลียาง NBR มีค่าที่ต่ำสุด และโพลียาง NR มีค่าที่มากที่สุด โดยสำหรับโพลียางผสมค่า Specific compression set มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

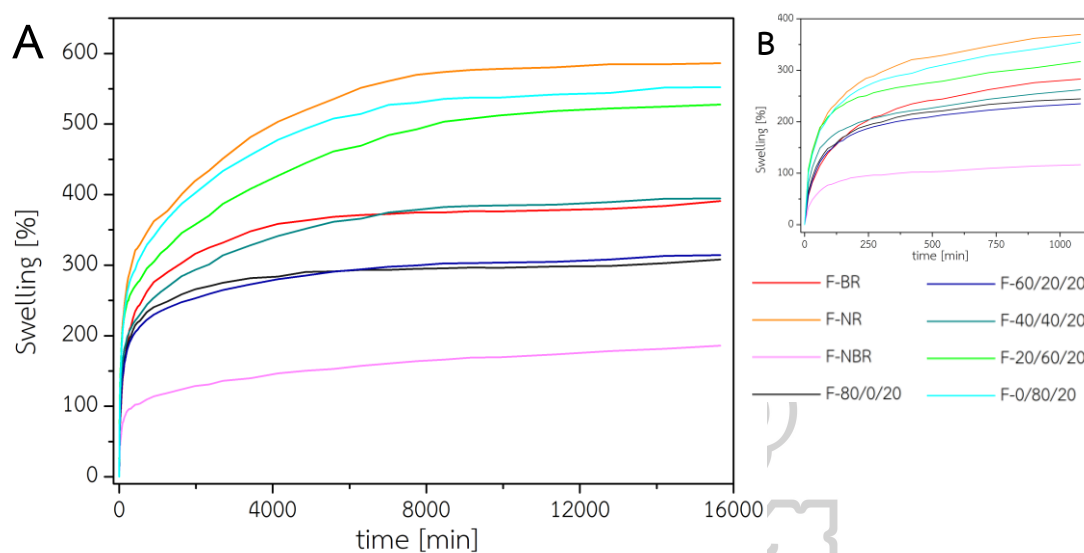


ภาพที่ 4.32 Specific compression set ของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR

4.2.9 การศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อตัวทำละลายไม่มีขั้วของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR

จากผลการศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อตัวทำละลายไม่มีขั้ว (%Swelling) แสดงดังภาพที่ 4.33 พบว่าโพลียางมีค่า %Swelling อยู่ในช่วง 100-600 % ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับยางผสม (จากภาพที่ 4.12) ทำให้สามารถอธิบายได้ว่าการแพร่ของตัวทำละลายนั้น มีการแพร่เข้าโพลียางเพียงแค่ว่าบริเวณของเนื้อยางเท่านั้น โดยตัวทำละลายไม่สามารถแพร่เข้าไปในบริเวณของฟองก๊าซได้ เนื่องจากภายในมีก๊าซ N₂ ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของ BA โดยก๊าซ N₂ ไม่สามารถแพร่ออกจากโพลียางได้ ซึ่งแรงดันที่มากพอที่สามารถต้านทานการแพร่เข้ามาของตัวทำละลาย โดยพบว่าโพลียางมี

%Swelling เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 165 ชั่วโมง (ประมาณนาฬิกาที่ 9,900 นาที) ซึ่งถือว่าเป็นเวลานานมาก เป็นผลจากการที่ตัวทำละลายต้องพยายามเคลื่อนตัวผ่านพองก๊าซภายในโพลียาง ทำให้ตัวทำละลายสามารถแพร่เข้าไปในเนื้อยางทุกส่วนได้ยาก และใช้เวลานานกว่าการแทรกผ่านยางผสมที่ไม่มีพองก๊าซ โดยจะเห็นว่าโพลียางผสม NBR มีการบวมตัวที่น้อยที่สุดคือประมาณ 170 % เนื่องจากเป็นยางที่มีขี้ผึ้ง ทำให้ตัวทำละลายไม่มีขี้ผึ้งแทรกเข้าเนื้อโพลียาง NBR ได้ยาก และโพลียาง BR มี %Swelling มากกว่าโพลียาง NR โดยมีค่าประมาณ 580 และ 360 % ตามลำดับ จากนั้นเมื่อพิจารณาที่โพลียางผสม พบว่าโพลียางผสมมีค่า %Swelling ที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.33 การบวมตัวของโพลียาง BR NR NBR และโพลียางผสม BR/NR/NBR โดย A แสดง %Swelling ตั้งแต่เริ่มจนถึง equilibrium และ B แสดง %Swelling ช่วง 21 ชั่วโมงแรก

จากผลการทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของโพลียางผสม แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนการผสมยาง เป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของโพลียาง ซึ่งอัตราส่วนยางจะเป็นตัวกำหนดความหนืดของยางแต่ละอัตราส่วน ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาในการขึ้นรูปโพลียาง อีกทั้งความเข้ากันได้ของโพลียางแต่ละอัตราส่วนก็เป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาของผสม หรือโพลียางผสมเช่นกัน ในงานวิจัยนี้จึงทำการเติม Cloisite 30B เพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ของยางแต่ละชนิด เพื่อให้ปรับปรุงสมบัติของโพลียางผสมให้ดียิ่งขึ้น โดยได้แสดงผลการศึกษาไว้ดังต่อไปนี้

4.3 ตอนที่ 3 ศึกษาโพลียเอทิลีนคอมพอสิต BR/NR/NBR ที่มีการเติมสารเติมแต่ง

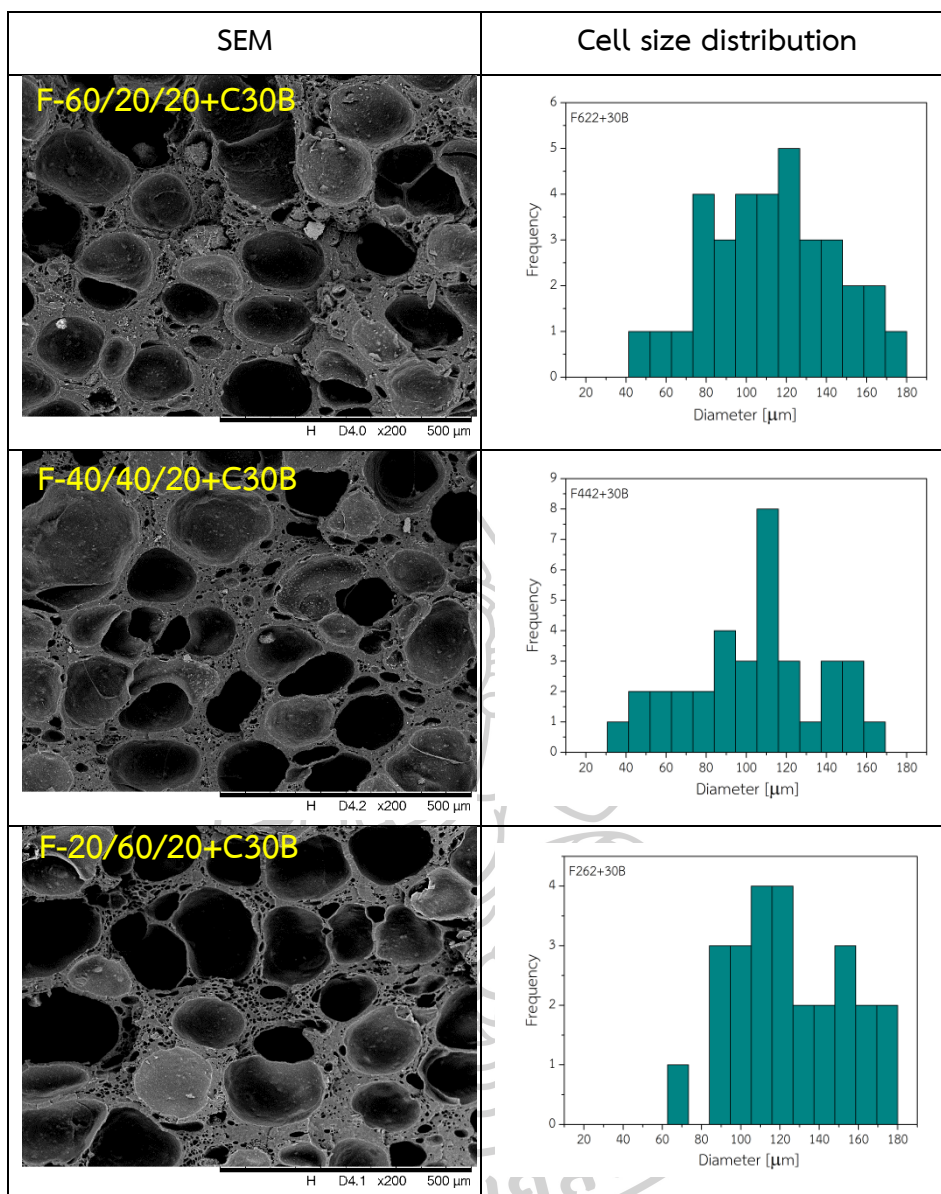
4.3.1 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโพลียเอทิลีนคอมพอสิตที่มีการเติมสารเติมแต่ง

จากภาพที่ 4.34 พบว่าโพลียเอทิลีนคอมพอสิตทุกอัตราส่วนเกิดโพลียเอทิลีนที่มีลักษณะเป็นเซลล์แบบปิด (Closed-cell structure) โดยพบว่าโพลียเอทิลีนทุกอัตราส่วนผสมมีขนาดของเซลล์โพลียเอทิลีน และผนังเซลล์โพลียเอทิลีนที่ค่อนข้างใหญ่ ซึ่งจากกราฟการกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลียเอทิลีน แสดงให้เห็นว่าโพลียเอทิลีนแต่ละอัตราส่วนมีขนาดของเซลล์โพลียเอทิลีนที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยโพลียเอทิลีนผสม F-60/20/20+C30B มีขนาดเซลล์โพลียเอทิลีนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 115 μm โพลียเอทิลีนผสม F-40/40/20+C30B มีขนาดเซลล์โพลียเอทิลีนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 110 μm และโพลียเอทิลีนผสม F-20/60/20+C30B มีขนาดเซลล์โพลียเอทิลีนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 130 μm โดยจากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของเซลล์โพลียเอทิลีน และผนังเซลล์โพลียเอทิลีนของโพลียเอทิลีนคอมพอสิตที่เติมและไม่มีการเติม Cloisite 30B ที่อัตราส่วนเดียวกัน พบว่าโพลียเอทิลีนคอมพอสิตที่เติม Cloisite 30B มีขนาดของเซลล์โพลียเอทิลีน และผนังเซลล์โพลียเอทิลีนที่ใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโพลียเอทิลีนผสม F-40/40/20 และ F-20/60/20 ซึ่งจากเดิมมีขนาดเซลล์โพลียเอทิลีนที่เล็ก และผนังเซลล์โพลียเอทิลีนที่บางมาก แต่เมื่อทำการผสม Cloisite 30B พบว่ามีขนาดเซลล์โพลียเอทิลีน และผนังเซลล์โพลียเอทิลีนใหญ่ขึ้นมาก ประมาณ 1.5 เท่า

ตารางที่ 4.4 ขนาดของเซลล์โพลียเอทิลีน และผนังเซลล์โพลียเอทิลีนของโพลียเอทิลีนคอมพอสิตที่เติมและไม่เติม Cloisite 30B

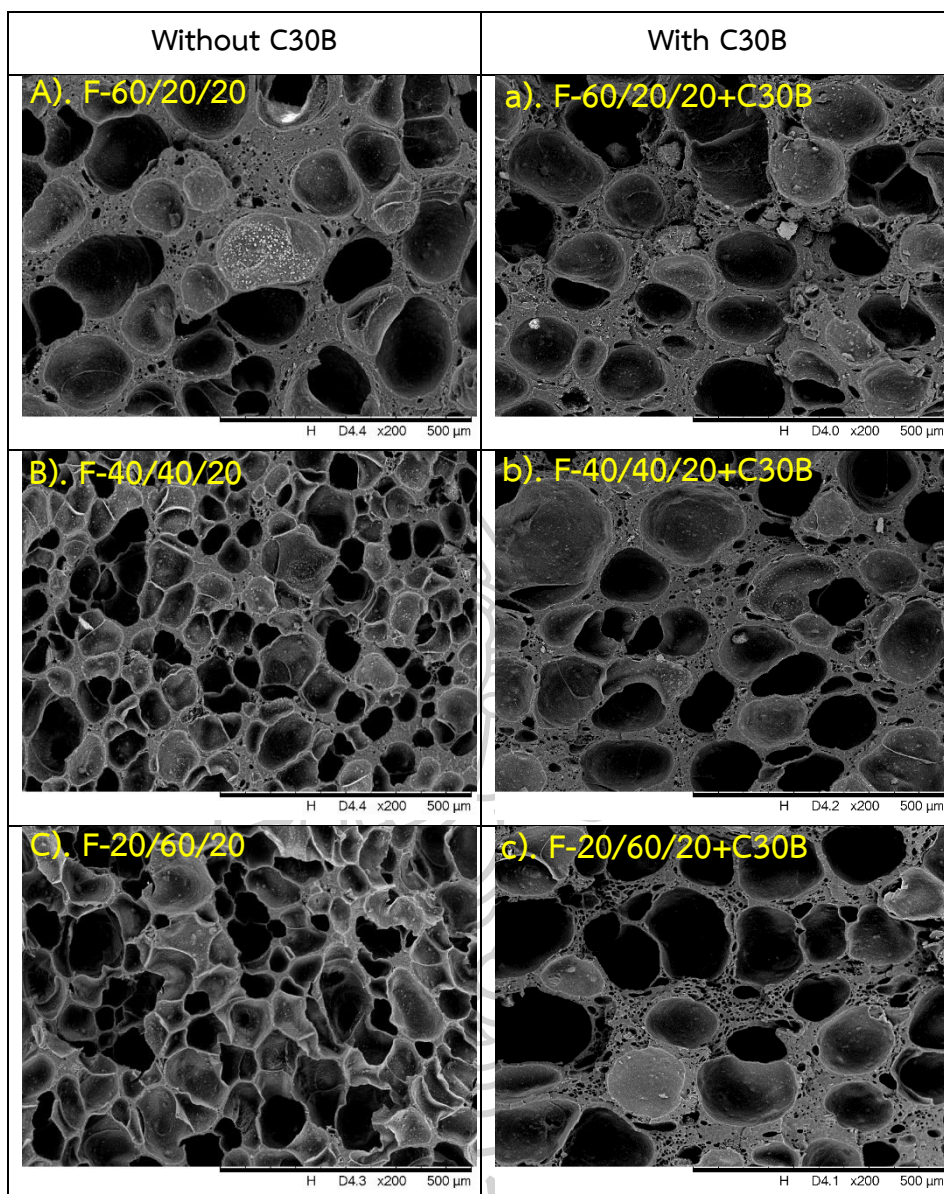
	Cell size [μm]				Cell wall [μm]			
	Without C30B		With C30B		Without C30B		With C30B	
	AV.	SD.	AV.	SD.	AV.	SD.	AV.	SD.
F-60/20/20	111.60	28.13	115.07	33.79	39.79	18.87	33.99	17.94
F-40/40/20	61.78	13.93	110.18	43.94	18.42	8.03	22.01	10.29
F-20/60/20	76.35	24.68	131.02	27.65	13.33	7.39	23.53	11.99

*AV. คือ ค่าเฉลี่ย และ SD. คือ ค่าความคลาดเคลื่อน



ภาพที่ 4.34 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมยางผสม

BR/NR/NB ที่มีการเติม Cloisite30B

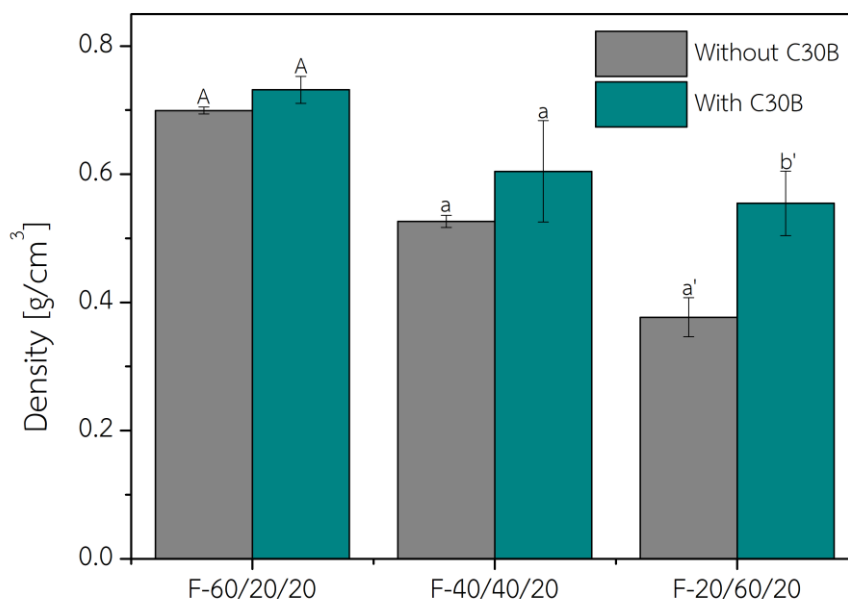


ภาพที่ 4.35 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของโฟมยางผสมที่เติมและไม่เติม Cloisite 30B โดย A-C เป็นโฟมยางผสมที่ไม่เติม Cloisite 30B และ a-c เป็นโฟมยางผสมที่มีการเติม Cloisite 30B

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนก่อนหน้านี (ตอนที่ 2) ถึงขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ และผนังเซลล์โพลีเมอร์ ซึ่งส่งผลอย่างยิ่งต่อสมบัติเชิงกลของโพลีเมอร์ผสม โดยการผสม Cloisite 30B ลงในโพลีเมอร์ผสมนั้น ส่งผลให้โพลีเมอร์ผสมมีความหนืดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Cloisite 30B เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ของยาง ทำให้เมื่อยางได้รับความร้อนหรือแรง Cloisite 30B จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่โพลีเมอร์ ทำให้ยางมีความหนืดที่เพิ่มขึ้น และเมื่อยางมีความหนืดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ในกระบวนการผสมสารเติมแต่งต่าง ๆ สามารถกระจายตัวได้น้อยลง ซึ่งรวมไปทั้ง Silica ซึ่งเป็น Nucleating blowing agent (NBA) และ EW ซึ่งเป็น Blowing agent (BA) สามารถกระจายตัวได้ยาก และอาจเกิดการรวมกลุ่มกันของสาร Silica และ EW ทำให้เมื่อนำมาขึ้นรูปจะได้โพลีเมอร์ผสมที่มีขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ และผนังเซลล์โพลีเมอร์ใหญ่ อีกทั้ง Cloisite 30B อาจแสดงตัวเป็น NBA เช่นเดียวกับ Silica ด้วย เนื่องจาก Cloisite 30B มีความสามารถในการดูดซับสารละลายได้ดีเช่นเดียวกับ Silica อีกทั้งจากภาพถ่าย SEM (ภาพที่ 4.34) ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น โพลีเมอร์ผสมจะมีขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ และผนังเซลล์โพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากยาง NR เป็นยางที่มีความหนืดสูงมากอยู่แล้ว เมื่อทำการผสม Cloisite 30B จึงเป็นการเพิ่มความหนืดให้กับโพลีเมอร์ผสม ทำให้เมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมยิ่งมากขึ้น โพลีเมอร์จะยิ่งมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น ขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ และผนังเซลล์โพลีเมอร์จึงมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นตามไปด้วย

4.3.2 ศึกษาความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง

จากภาพที่ 4.36 ซึ่งแสดงความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมโดยเปรียบเทียบระหว่างความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B พบว่าโพลีเมอร์ผสมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นหลังจากมีการผสม Cloisite 30B แต่ในโพลีเมอร์ผสม F-60/20/20 และ F-40/40/20 นั้นแสดงความแตกต่างของความหนาแน่นอย่างไม่มีนัยสำคัญ โดยโพลีเมอร์ผสม F-60/20/20+C30B มีความหนาแน่นมากที่สุด และโพลีเมอร์ผสม F-20/60/20+C30B มีความหนาแน่นน้อยที่สุด ซึ่งความหนาแน่นของโพลีเมอร์ผสมนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ และความหนาแน่นของผนังเซลล์โพลีเมอร์ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่ 4.34



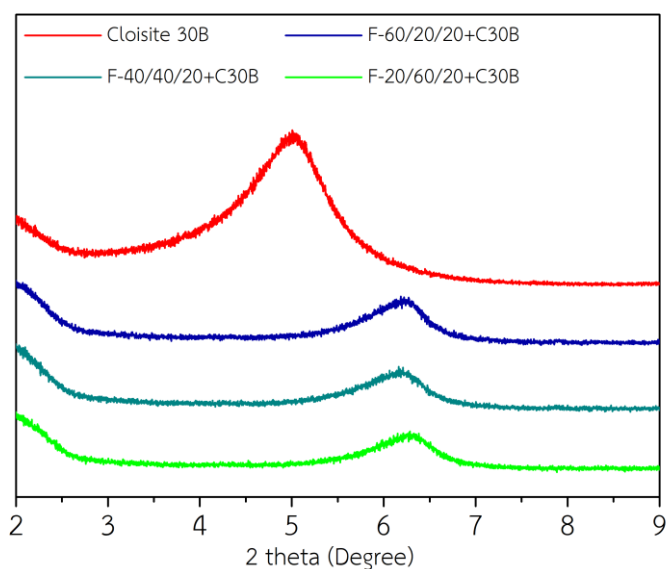
ภาพที่ 4.36 เปรียบเทียบความหนาแน่นของโพลียาผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B

*Oneway anova (พารามิเตอร์บนแท่งกราฟ): A-B คือความแตกต่างของ F-60/20/20 ที่เติมและไม่เติม Cloisite, a-b คือความแตกต่างของ F-40/40/20 ที่เติมและไม่เติม Cloisite, a'-b' คือความแตกต่างของ F-20/60/20 ที่เติมและไม่เติม Cloisite

4.3.3 ศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ของโพลียาผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง

การศึกษา XRD ใช้ในการศึกษาความหนาของชั้น Clay (d) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg's law คือ $d = \lambda / 2\sin\theta$ โดยมีค่า $\lambda = 0.154$ nm. และใช้ค่า θ เพื่อหา d (d-spacing, ระยะห่างของชั้นซิลิเกตของ Cloisite 30B) จากภาพที่ 4.37 ซึ่งแสดงผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ของ Cloisite 30B และโพลียาผสมที่มีการเติม Cloisite 30B พบว่า Cloisite 30B มี peak เกิดขึ้นที่ 2 theta ประมาณ 4.8 องศา ซึ่งจากการคำนวณมีค่า $d = 1.84$ nm. ในขณะที่โพลียาผสมที่มีการเติม Cloisite 30B ได้แสดง peak ที่ตำแหน่งเดียวกันในทุกอัตราส่วนผสมที่ประมาณ 6.4 องศา ซึ่งแสดงให้เห็นว่า peak มีการ shift ขึ้น โดยจากการคำนวณพบว่าโพลียาผสมที่มีการเติม Cloisite 30B มีค่า $d = 1.38$ nm. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชั้น Clay มีค่าลดลง ซึ่งอาจเกิดจากการรวมตัวกันของ Clay (Agglomerate) แสดงให้เห็นว่าการผสม Clay ด้วยเครื่องผสม Two-roll mill นั้น แรงเฉือนจาก Two-roll mill ยังคงน้อยเกินไป ซึ่งไม่

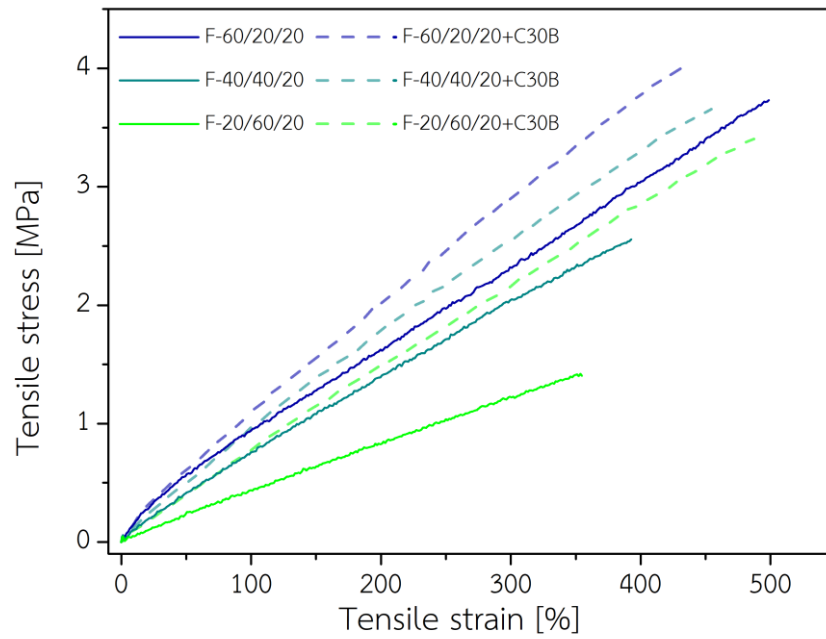
เพียงพอให้ชั้น Clay เกิดการแตกออก ทำให้ Clay เกิดการรวมตัวกัน ซึ่งอาจเป็นผลทำให้ขอบเซลล์ของโพลีเมอร์มีขนาดหนาขึ้นดังภาพ SEM (ภาพที่ 4.34)



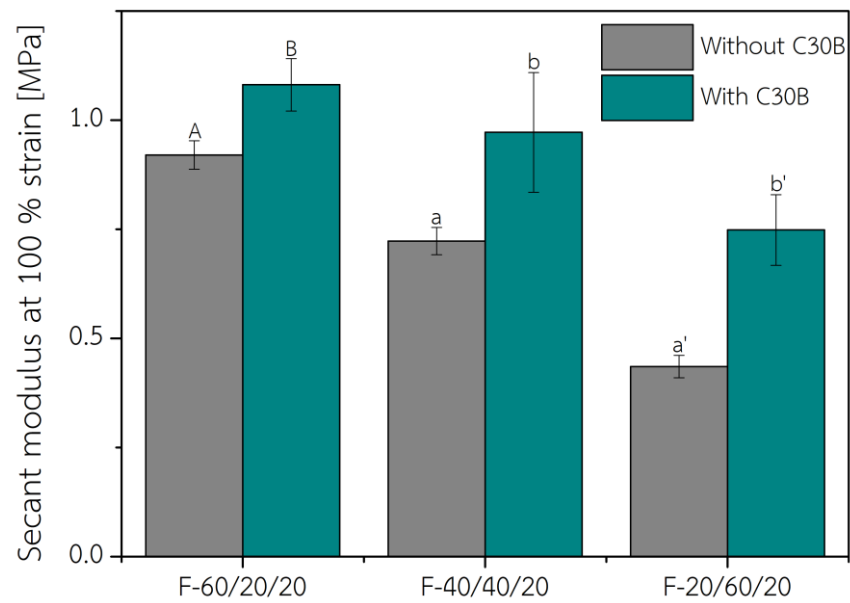
ภาพที่ 4.37 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ของ Cloisite 30B และ โพลีเมอร์ผสม BR/NR/NBR ที่มีการเติม Cloisite 30B

4.3.4 ศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงดึงของโพลีเมอร์ผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง

จากภาพที่ 4.38 ซึ่งแสดง Stress-strain curve ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B เมื่อพิจารณาที่โพลีเมอร์ที่มีการเติม Cloisite 30B พบว่าโพลีเมอร์ผสม F-60/20/20+C30B มี Tensile stress ที่สูงที่สุด แต่มี Tensile strain ที่น้อยที่สุดในทางกลับกันโพลีเมอร์ผสม F-20/60/20+C30B มี Tensile stress ที่น้อยที่สุด แต่กลับมี Tensile strain ที่มากที่สุด และเมื่อทำเปรียบเทียบระหว่างโพลีเมอร์ผสมที่เติมและไม่เติม Cloisite 30B พบว่า Tensile stress และ Tensile strain ของโพลีเมอร์ผสมในทุก ๆ อัตราส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นมากกับโพลีเมอร์ผสม F-40/40/20 และ F-20/60/20 ทั้งนี้เนื่องจากการเติม Cloisite 30B ในโพลีเมอร์ผสม จะทำให้โพลีเมอร์ผสมมีขนาดของเซลล์โพลีเมอร์ และผนังเซลล์โพลีเมอร์เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะโพลีเมอร์ผสม F-40/40/20 และ F-20/60/20 ซึ่งมี Tensile stress และ Tensile strain ที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก

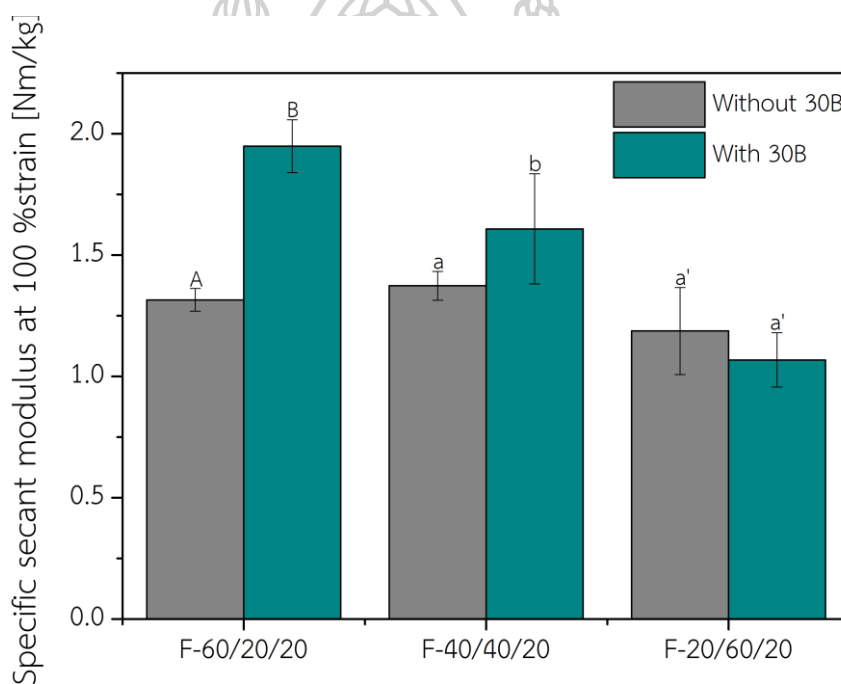


ภาพที่ 4.38 Stress-strain curve ของไฟเบอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B



ภาพที่ 4.39 Secant modulus at 100% strain ของไฟเบอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B

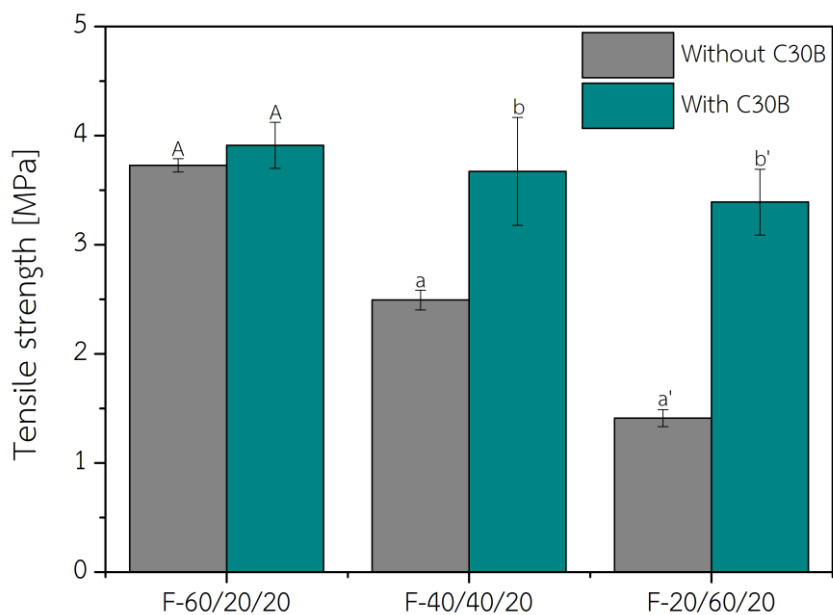
ภาพที่ 4.39 แสดง Secant modulus at 100 %strain ของโพลียเอทิลีนที่มีคาร์บอนแบล็กและไม่มีคาร์บอนแบล็ก Cloisite 30B เมื่อพิจารณาที่โพลียเอทิลีนที่มีคาร์บอนแบล็ก Cloisite 30B พบว่าค่า Secant Modulus ของโพลียเอทิลีน F-60/20/20+C30B มีค่ามาสูงที่สุด รองลงมาคือโพลียเอทิลีน F-40/40/20+C30B และ F-20/60/20+C30B ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าโพลียเอทิลีนที่มีคาร์บอนแบล็ก Cloisite มีค่า Secant Modulus ลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบโพลียเอทิลีนที่มีคาร์บอนแบล็กและไม่มีคาร์บอนแบล็ก Cloisite 30B พบว่าการเติม Cloisite ส่งผลให้ Secant modulus ของโพลียเอทิลีนทุกอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการมี Cloisite 30B อยู่ในเนื้อโพลียเอทิลีน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นการเพิ่มส่วนของ hard segment ให้กับโพลียเอทิลีน จึงทำให้โพลียเอทิลีนที่มีคาร์บอนแบล็ก Cloisite 30B มีความแข็งเพิ่มมากขึ้น



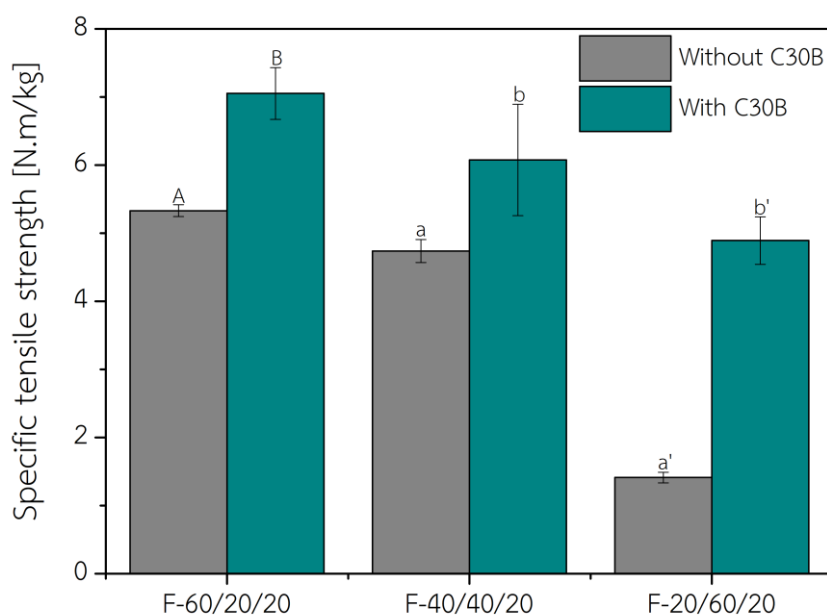
ภาพที่ 4.40 Specific secant modulus ที่ 100 %strain ของโพลียเอทิลีนที่มีคาร์บอนแบล็กและไม่มีคาร์บอนแบล็ก Cloisite 30B

เมื่อทำการพิจารณา Secant modulus ที่เนื้อวัสดุ ซึ่งแสดงภาพที่ 4.40 พบว่าเมื่อพิจารณาที่โพลียเอทิลีนที่มีคาร์บอนแบล็ก Cloisite 30B ค่า Specific secant modulus at 100 %strain ของโพลียเอทิลีนที่มีคาร์บอนแบล็ก Cloisite 30B มีค่าลดลงเมื่อโพลียเอทิลีนมีปริมาณยาง NR เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบความแข็งของเนื้อวัสดุที่มีคาร์บอนแบล็กและไม่มีคาร์บอนแบล็ก Cloisite 30B พบว่าเมื่อมีคาร์บอนแบล็ก Cloisite 30B ลงในระบบผสมโพลียเอทิลีน F-60/20/20 และ F-40/40/20 ค่า Specific secant modulus at 100 %strain เพิ่มขึ้น แต่สำหรับโพลียเอทิลีน F-20/60/20 มีค่าที่แตกต่างอย่างไม่มี

นัยสำคัญ จึงอาจกล่าวได้ว่าการผสม Cloisite 30B ในโพลีเมอร์ผสมนั้น Cloisite 30B จะแสดงพฤติกรรมเป็นสารเสริมแรง (Reinforcing agent) ให้กับโพลีเมอร์ผสม



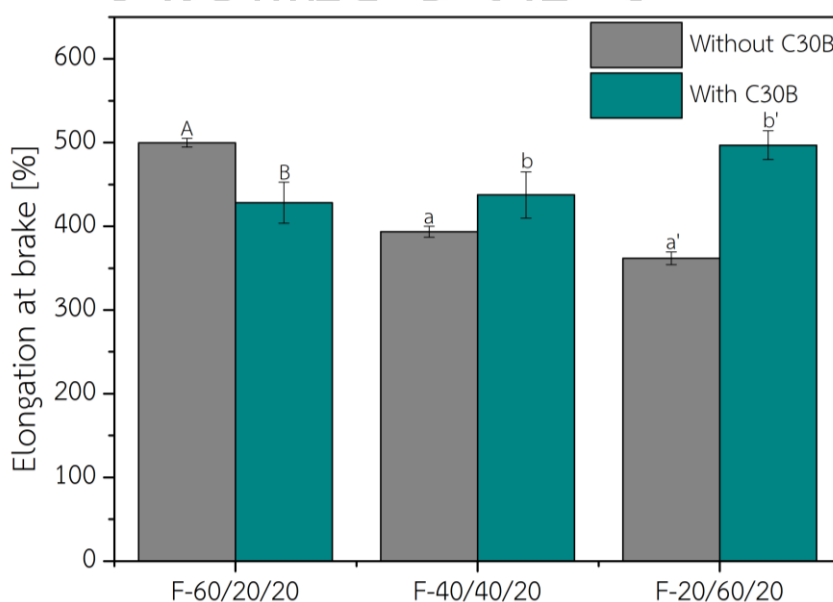
ภาพที่ 4.41 Tensile strength ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B



ภาพที่ 4.42 Specific tensile strength ของโพลีเมอร์ผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B

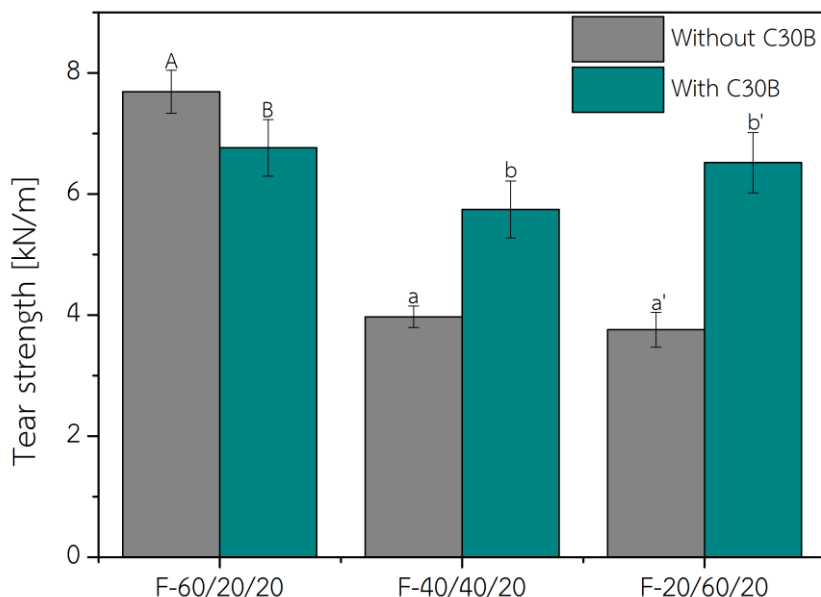
ภาพที่ 4.41 แสดงค่า Tensile strength ของโพลียางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B เมื่อพิจารณาที่โพลียางผสมที่มีการเติม Cloisite พบว่าโพลียางผสมที่มีการเติม Cloisite มีค่า Tensile strength ลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่า Tensile strength ของโพลียางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite พบว่า เมื่อเติม Cloisite ในระบบผสม โพลียางผสมทุกอัตราส่วนมีค่า Tensile strength ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกับโพลียางผสม F-40/40/20 และ F-20/60/20 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเซลล์โพลี และผนังเซลล์โพลีที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเติม Cloisite ในโพลียางผสม อีกทั้งยังเกิดจากการที่ Cloisite แสดงพฤติกรรมเป็นสารเสริมแรง จึงทำให้ Tensile strength มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่เนื้อวัสดุแสดงดังภาพที่ 4.42 ซึ่งแสดง Specific tensile strength ของโพลียางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B พบว่าค่า Specific tensile strength มีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่า Tensile strength

จากภาพที่ 4.43 แสดง %Elongation at break ของโพลียางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30 เมื่อพิจารณาที่โพลียางผสมที่มีการเติม Cloisite พบว่าค่า %Elongation at break มีค่าลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับโพลียางผสมที่ไม่ได้เติม Cloisite 30B พบว่า %Elongation at break ของโพลียางผสมทุกอัตราส่วนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติม Cloisite 30B



ภาพที่ 4.43 %Elongation at break ของโพลียางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30

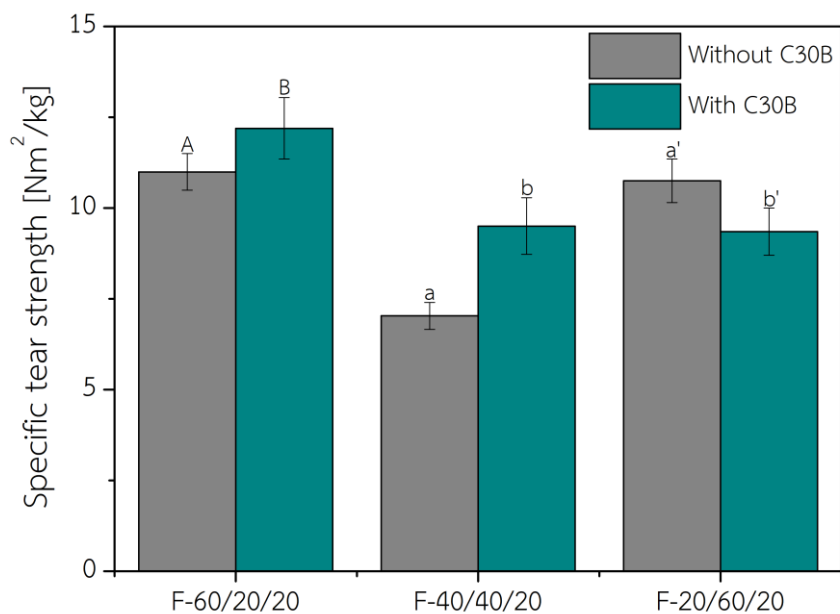
4.3.5 ศึกษาความทนทานต่อการฉีกขาดของโพนีอย่างผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง



ภาพที่ 4.44 Tear strength ของโพนีอย่างผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B

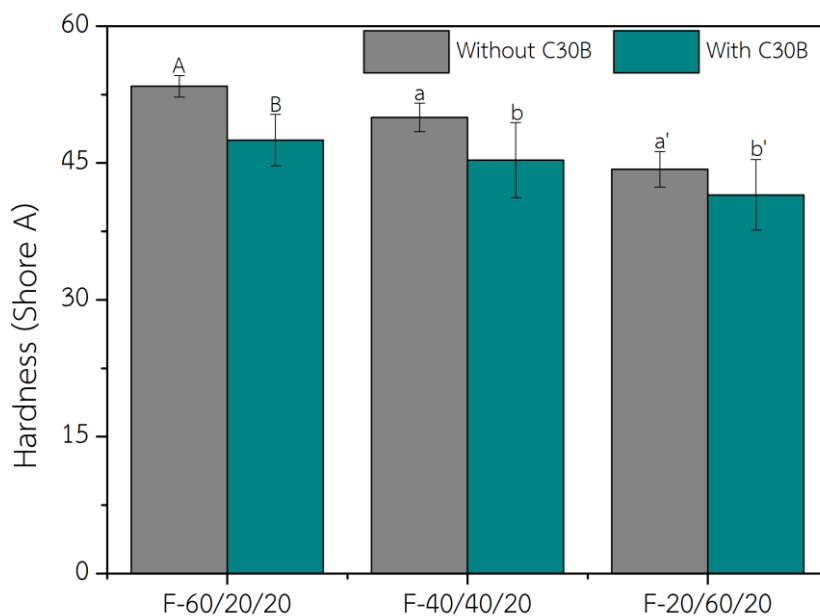
จากภาพที่ 4.44 ซึ่งแสดงค่า Tear strength ของโพนีอย่างผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B เมื่อพิจารณาที่โพนีอย่างผสมที่มีการเติม Cloisite 30B พบว่าโพนีอย่างผสมมีค่า Tear strength ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับโพนีอย่างผสมที่ไม่เติม Cloisite 30B พบว่าโพนีอย่างผสม F-40/40/20 และ F-20/60/20 ที่เติม Cloisite 30B มีค่า Tear strength ที่เพิ่มขึ้น แต่สำหรับโพนีอย่างผสม F-60/20/20 เมื่อเติม Cloisite 30B มีค่า Tear strength ที่ลดลงเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาที่เนื้อวัสดุดังภาพที่ 4.45 ซึ่งแสดงค่า Specific tear strength ของโพนีอย่างผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B เมื่อพิจารณาที่โพนีอย่างผสมที่มีการเติม Cloisite 30B พบว่าโพนีอย่างผสม F-60/20/20 มีค่า Specific tear strength สูงกว่า F-40/40/20 และ F-20/60/20 โดยโพนีอย่างผสม F-40/40/20 และ F-20/60/20 แสดงค่า Specific tear strength ที่มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าโพนีอย่างผสมที่มีการเติม Cloisite 30B จะมี Specific tear strength ที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.45 Specific tear strength ของโพลียางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B

4.3.6 ศึกษาความแข็งที่ผิวของโพลียางผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง

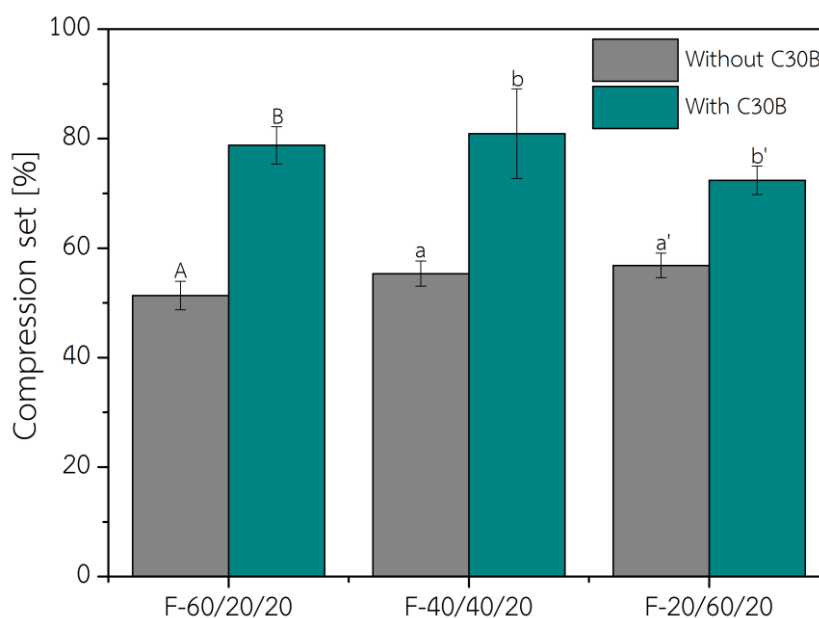


ภาพที่ 4.46 Hardness ของโพลียางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B

จากภาพที่ 4.46 ซึ่งแสดงค่า Hardness ของโพลียางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B พบว่าค่า Hardness ของโพลียางผสมมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสม

เพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า Hardness กับโพลียเอทิลีนที่ไม่มี Cloisite 30B พบว่า การเติม Cloisite 30B ส่งผลให้ค่า Hardness มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเติม Cloisite 30B ลงในยางผสม ส่งผลให้โพลียเอทิลีนมีขนาดเซลล์โพลีเมอร์ และผนังเซลล์โพลีเมอร์ที่ใหญ่ขึ้น โดยในการทดสอบ Hardness แรงที่โพลียเอทิลีนจะได้รับจะกระจายตัวในทุกทิศทางของชิ้นงาน ทำให้เซลล์โพลีเมอร์ที่มีขนาดใหญ่จะกระจายแรงได้ยากกว่าเซลล์โพลีเมอร์ที่ขนาดเล็ก ทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานที่มีเซลล์โพลีเมอร์ใหญ่กว่ามีค่าความแข็งที่น้อยกว่า

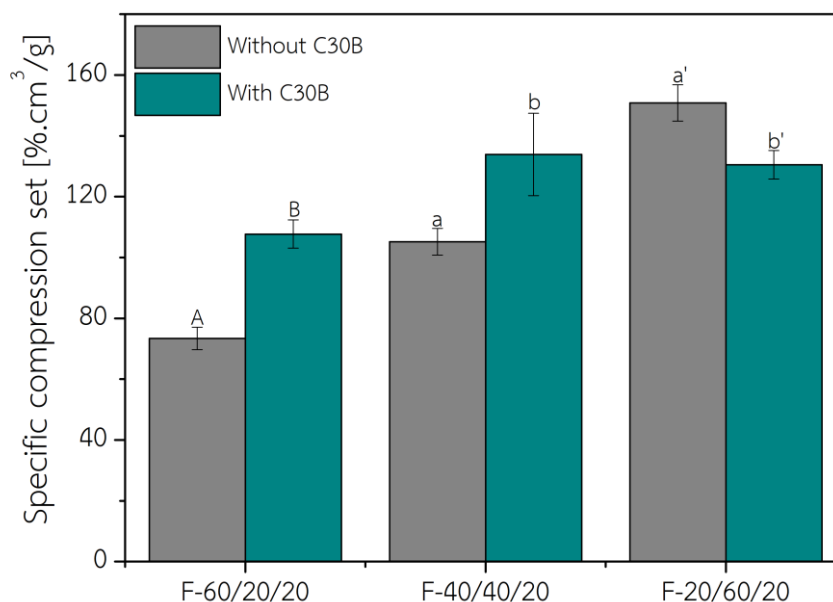
4.3.7 ศึกษาความสามารถในการคืนตัวกลับหลังได้รับแรงกดอัดของโพลียเอทิลีนผสมสามส่วนที่มีการเติมสารเติมแต่ง



ภาพที่ 4.47 Compression set ของโพลียเอทิลีนที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B

จากภาพที่ 4.47 ซึ่งแสดง Compression set ของโพลียเอทิลีนที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B พบว่าค่า Compression set ของโพลียเอทิลีนที่มีการเติม Cloisite 30B มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับโพลียเอทิลีนที่ไม่ได้เติม Cloisite 30B พบว่าโพลียเอทิลีนที่มีการเติม Cloisite 30B มีค่า Compression set ที่สูงกว่าโพลียเอทิลีนที่ไม่ได้เติม Cloisite 30B แสดงให้เห็นว่าการเติม Cloisite 30B ลงในโพลียเอทิลีน ส่งผลให้โพลียเอทิลีนมีความสามารถในการคืนตัวเมื่อได้รับแรงอัดที่ลดลงและจากภาพที่ 4.48 ซึ่งใช้ค่า Specific compression set มาพิจารณาสมบัติ compression set ของเนื้อวัสดุ พบว่าโพลียเอทิลีนที่มีการเติม Cloisite 30B มีค่า Specific compression set ที่สูงมาก โดยที่อัตราส่วนผสม F-60/20/20 และ F-20/60/20 ที่เติม Cloisite

30B มีค่า Specific compression set ที่สูงกว่าโฟมยางผสมที่ไม่เติม Cloisite 30B แต่ที่อัตราส่วนผสม F-60/20/20 จะมีค่าที่ต่ำกว่าเล็กน้อย



ภาพที่ 4.48 Specific compression set ของโฟมยางผสมที่มีการเติมและไม่เติม Cloisite 30B

จากผลการทดสอบที่ผ่านมาแสดงให้เห็นแล้วว่าเมื่อเติม Cloisite 30B ในโฟมยางผสม โฟมยางมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น (Secant modulus, Tensile strength, Elongation at break, Tear strength) ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการที่ Cloisite 30B แสดงตัวเป็นสารเสริมแรงให้กับโฟมยางผสม และด้วยโครงสร้างของ Cloisite 30B ที่มีลักษณะเป็นชั้นซิลิเกตที่เรียงตัวกัน ทำให้ Cloisite 30B สามารถแสดงตัวเป็น physical crosslinking agent ให้กับโฟมยางผสม [42] ซึ่งทำหน้าที่ยึดโมเลกุลยางเข้าด้วยกัน และเมื่อได้รับแรงกดอัด Cloisite 30B จะคลายโมเลกุลยางบางส่วนที่ยึดไว้ ออก (ยังคงยึดอยู่บางส่วน) ทำให้เมื่อเติม Cloisite 30B ในโฟมยางผสม จึงเกิดการเสียรูปได้มากขึ้น เมื่อได้รับแรงกดอัด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษายางผสม และโพลียูรีเทนของยางสามชนิดคือ ยางบิวทาไดอีน ยางธรรมชาติ และยางอะครีโลไนไตรบิวทาไดอีน และมีการศึกษายางผสมที่มีการเติมสารเติมแต่งระดับนาโนด้วย

ตอนที่ 1 จากการศึกษายางผสมนั้นสามารถทำการผสมยางผสมระหว่างยาง BR NR และ NBR ได้ โดยใช้การผสมยางแต่ละชนิดให้เข้ากันก่อนด้วยเครื่อง Kneader mixer ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 6 นาทีจากนั้นนำยางไป masticate และเติมสาร Curing agents ด้วยเครื่อง Two-roll mill โดยสารและปริมาณสาร Curing agents ที่ใช้ประกอบไปด้วย ZnO/Stearic acid/MBTS/S₈ เป็น 5/2/1.5/2 phr ตามลำดับ จากนั้นนำไปขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C และทดสอบสมบัติต่าง ๆ โดยได้สรุปผลการทดสอบไว้ดังนี้

1. Cure characteristics ซึ่งพบว่าความเร็วในการเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ของยาง NR > NBR > BR ตามลำดับ และสำหรับยางผสมพบว่ากระบวนการวัลคาไนซ์สามารถเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้นอีกทั้งการเติมยาง NBR ลงในยาง BR และ NR จะทำให้กระบวนการวัลคาไนซ์เกิดเร็วขึ้น ในขณะที่ค่า Δ torque ของยาง BR มีค่ามากที่สุด รองมาคือยาง NR และ NBR ตามลำดับ และสำหรับยางผสมพบว่าค่า Δ torque ของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

2. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่ายาง BR NR และ NBR มีลักษณะราบเรียบ ยางผสมทุกอัตราส่วนแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาซึ่งแบ่งเป็น 2 ภูมิภาคอย่างชัดเจน โดยส่วนของยาง NR และ BR เป็นส่วนของ Continuous phase และ NBR เป็นส่วนของ Droplet phase เนื่องจากสภาพขี้ของยาง NBR ที่แตกต่างกับยาง NR และ BR

3. สมบัติเชิงกล โดยศึกษาผ่านการทดสอบ Tensile test, Tear test, Hardness และ Tension set โดยได้แสดงผลการศึกษาไว้ดังนี้

ผลการศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงดึง (Tensile test) พบว่ายาง NBR มี Secant Modulus ที่สูงที่สุด รองลงมาเป็นยาง BR และ NR ตามลำดับ ส่งผลให้ในยางผสมซึ่งมีการเติมยาง NBR 20 %wt ในทุกอัตราส่วนผสม มีค่า Secant modulus ที่สูงขึ้น และยางผสมจะมีค่า Secant Modulus ลดลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น โดยพบว่ายาง NR, B-20/60/20 และ B-0/80/20 แสดงพฤติกรรม Strain-induced crystallization ขณะดึงยืดทำให้ยางดังกล่าวมีค่า

Tensile strength และ %Elongation at break ที่สูงมากโดยค่า Tensile strength และ %Elongation at break มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear test) พบว่าค่า Tear strength ของยาง NR มีค่ามากกว่ายาง NBR และ BR ตามลำดับ และยางผสมมีค่า Tear strength เพิ่มขึ้นเมื่อระบบผสมมีปริมาณ NR เพิ่มขึ้น โดย Tear strength จะมีค่าสูงที่สุดกับยางผสม B-20/60/20 และ B-0/80/20 ซึ่งแสดงความสอดคล้องกับการแสดงพฤติกรรม Strain induced crystallization

ผลการทดสอบความแข็งที่ผิว (Hardness) พบว่ายาง NBR มีความแข็งมากกว่ายาง BR และ NR ตามลำดับและยางผสมมีความแข็งของยางที่ใกล้เคียงกัน แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณยาง NR ระบบผสมเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาการคืนตัวของยางหลังจากถูกยึดตัวถาวร (Tension set) พบว่ายาง NBR มี %Tension set ที่มากที่สุด โดยยางผสมมี %Tension set เพิ่มขึ้น เมื่อในระบบผสมมีปริมาณยาง NR เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม %Tension set ของยางทุกอัตราส่วนในงานวิจัยนี้มีค่าไม่เกิน 5% เท่านั้น

4. การทดสอบความทนทานต่ออุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 70 °C ซึ่งทดสอบผ่านค่า Secant modulus พบว่ายางทุกอัตราส่วนมีค่า Secant modulus เพิ่มขึ้นสูงที่สุดในวันที่ 5 ของการทดสอบ จากนั้นค่า Modulus จะค่อย ๆ ลดลง

5. การศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อตัวทำละลายไม่มีขี้ (%Swelling) พบว่า ยางทุกอัตราส่วนเริ่มมี %Swelling คงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 16 ชั่วโมง BR สามารถดูดซับตัวทำละลายได้เร็วและมากกว่ายาง NR สำหรับยางผสมพบว่า %Swelling ลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงความสอดคล้องกับค่า Δ torque

ในขั้นตอนการศึกษายางผสมแสดงให้เห็นว่าทุกอัตราส่วนยางผสมมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาแบ่งเป็น 2 ภูมิภาค แสดงถึงความไม่เข้ากันของยางผสมจากสภาพขี้ ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของยางผสมโดยยางผสมที่มีสมบัติโดดเด่นมากที่สุดคือ ยางผสม B-20/60/20 และ B-0/80/20 เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีมาก ซึ่งเป็นผลจากพฤติกรรม Strain-induced crystallization

ตอนที่ 2 ในการศึกษาโพลียเอทิลีนผสมโดยมีกระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการผสมเช่นเดียวกับยางผสม แต่มีการเติมสารหน่วงปฏิกิริยา (CTP) สารก่อให้เกิดการพองฟู (Silica) และสารทำให้เกิดการพองฟู (Supercell EW) โดยสารและปริมาณ Curing agents และ Blowing agent ที่ใช้ประกอบด้วย ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/S₈ เป็น 5/2/1.5/0.5/30/10/2 phr ตามลำดับ โดยได้ผลการทดลองดังนี้

1. Cure characteristics ความเร็วในการเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ของโพลียูรีเทน NR > NBR > BR ตามลำดับ และความเร็วในการเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ของยางผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Δ torque ของโพลียูรีเทน NBR มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือโพลียูรีเทน BR และ NR ตามลำดับ โดยพบว่าค่า Δ torque ของโพลียูรีเทนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

2. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าเซลล์ของโพลียูรีเทนในทุกอัตราส่วนแสดงเซลล์โพลียูรีเทนแบบปิด (Closed-cell structure) ซึ่งโพลียูรีเทนแต่ละอัตราส่วนมีการกระจายตัวของขนาดเซลล์โพลียูรีเทนที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยโพลียูรีเทน NR มีขนาดเซลล์โพลียูรีเทน และผนังเซลล์โพลียูรีเทนที่เล็กที่สุด รองลงมาคือ NBR และ BR ตามลำดับ ในขณะที่ขนาดเซลล์โพลียูรีเทน และผนังเซลล์ของโพลียูรีเทนผสมมีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณ NR ในระบบเพิ่มขึ้น

3. การศึกษาความหนาแน่นพบว่าโพลียูรีเทน NR มีความหนาแน่นน้อยที่สุด รองลงมาเป็นโพลียูรีเทน NBR และ BR ตามลำดับ โดยยางผสมมีความหนาแน่นลดลงเมื่อปริมาณ NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

4. การศึกษาการขยายตัว (%Expansion) และการหดตัว (%Shrinkage) พบว่าโพลียูรีเทนทุกอัตราส่วนมีการขยายตัวทุกทิศทางเมื่อออกจากแม่พิมพ์ หลังจากนั้นจะหดตัวลงทุกทิศทางจนมีปริมาตรคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 72 ชั่วโมง

5. สมบัติเชิงกลโดยศึกษา Tensile test, Tear test, Hardness และ Compression set ผลการศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงดึง (Tensile test) พบว่าโพลียูรีเทน NBR มีค่า Secant modulus ที่สูงที่สุด รองลงมาคือโพลียูรีเทน NR และ BR ตามลำดับ โดยโพลียูรีเทนผสมมีค่า Secant modulus ลดลง เมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่เนื้อโพลียูรีเทน (Specific secant modulus) พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่า Secant modulus ในขณะที่โพลียูรีเทน NBR มี Tensile strength สูงที่สุด และโพลียูรีเทน NR มี %Elongation at break สูงที่สุดโดยโพลียูรีเทนผสมมีค่า Tensile strength และ %Elongation at break ลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่เนื้อโพลียูรีเทนพบว่าเมื่อปริมาณ NR ในระบบเพิ่มขึ้นโพลียูรีเทนผสมมีค่า Tensile strength ที่ลดลง

ผลการศึกษาความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear test) พบว่าโพลียูรีเทน NBR มีค่า Tear strength สูงที่สุด โดยโพลียูรีเทนผสมมีค่า Tear strength ลดลงเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น โดยเมื่อพิจารณาที่เนื้อโพลียูรีเทนพบว่าโพลียูรีเทนผสมมีค่า Tear strength ที่ใกล้เคียงกัน

ผลการศึกษาค่าความแข็งที่ผิว (Hardness) พบว่าโพลียาง BR มีค่า Hardness มากที่สุด และ NR มีค่าน้อยที่สุด โดยค่า Hardness ของโพลียางผสมจะลดลงตามปริมาณ NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาความสามารถในการคืนตัวกลับหลังได้รับแรงกดอัด (Compression set) พบว่าโพลียาง NBR มีการคืนตัวที่ดีที่สุด โดยโพลียางผสมจะมีการคืนตัวที่ลดลง เมื่อปริมาณยาง NR ในระบบเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่เนื้อยาง (Specific compression set) พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับค่า Compression set

6. การศึกษาความสามารถในการต้านทานต่อตัวทำละลายไม่มีขี้ (%Swelling) พบว่าโพลียางมี %Swelling เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 165 ชั่วโมง โดยโพลียาง NR มี %Swelling มากกว่าโพลียาง BR ส่งผลให้โพลียางผสมมี %Swelling เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณยาง NR ในระบบผสมเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของโพลียางผสม แสดงให้เห็นว่าโพลียางผสมในทุกอัตราส่วน แสดงลักษณะแบบปิด (Closed-cell structure) โดยโพลียางผสมที่มี NR เป็นวัฏภาคหลัก จะมีขนาดเซลล์โพลีที่เล็กกว่าโพลียางผสมที่มี BR เป็นวัฏภาคหลัก โดยโพลียางที่มีขนาดเซลล์โพลีใหญ่จะมีขนาดของผนังเซลล์ที่ใหญ่ด้วย ซึ่งขนาดของเซลล์โพลี และผนังเซลล์จะเป็นตัวกำหนดสมบัติเชิงกลของโพลียางผสมดังที่ได้สรุปมาแล้วข้างต้น

ตอนที่ 3 ต่อมาได้ทำการศึกษาโพลียางผสมที่มีการเติม Cloisite 30B โดยมีกระบวนการเช่นเดียวกันกับการทำโพลียางผสม แต่มีการเติม Cloisite 30B ปริมาณ 3 phr โดยสารเคมีและปริมาณ Curing agents และ Blowing agent ที่ใช้ประกอบด้วย C30B/ZnO/Stearic acid/MBTS/CTP/Silica/EW/S₈ เป็น 3/5/2/1.5/0.5/30/10/2 phr ตามลำดับ โดยได้ผลการทดลองดังนี้

1. ลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่าโพลียางผสมที่เติม Cloisite 30B มีขนาดเซลล์โพลี และผนังเซลล์โพลีที่ใหญ่กว่าโพลียางผสมที่ไม่ได้เติม Cloisite 30B อย่างไรก็ตามขนาดของเซลล์โพลีแต่ละอัตราส่วนผสมยังคงมีขนาดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน

2. การศึกษาความหนาแน่น พบว่าการเติม Cloisite 30B โพลียางผสมมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นหลังจากผสม Cloisite 30B

3. การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) พบว่า Cloisite 30B ไม่เกิดการแตกออกเมื่อทำการผสมกับโพลียางผสม แต่แสดงการรวมตัวกันของ Cloisite 30B

4. ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล โดยทำการศึกษา Tensile test, Tear test, Hardness และ Compression set โดยจากผลการศึกษาพบว่า การเติม Cloisite 30B ในยางผสมทุกอัตราส่วนจะทำให้ค่า Tensile test พบว่า Modulus, Tensile strength, %Elongation at break, Tear strength และ Compression set มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโพลียูรีเทนที่ไม่มีเติม Cloisite 30B แต่จะทำให้ค่า Hardness มีค่าลดลง

จากผลทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของโพลียูรีเทนที่มีเติม Cloisite 30B ซึ่งพบว่า Cloisite 30B ที่เติม ไม่ได้เกิดการแตกตัว เนื่องจากการผสมด้วยเครื่อง Two-roll mill มีแรงเฉือนที่ไม่เพียงพอสำหรับทำให้ชั้นของ Cloisite 30B เกิดการแตกออก ซึ่ง Cloisite 30B จะเกิดการรวมกลุ่มกันอยู่บริเวณของขอบเซลล์โพลียูรีเทน โดยเซลล์ของโพลียูรีเทนที่มีเติม Cloisite 30B จะมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีขนาดของผนังเซลล์โพลียูรีเทนที่หนาขึ้น อย่างไรก็ตามสมบัติเชิงกลโดยส่วนใหญ่ของโพลียูรีเทนจะดีขึ้นเมื่อมีการผสม Cloisite 30B

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสมบัติต่าง ๆ ของโพลียูรีเทนขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์โพลียูรีเทน และความหนาของผนังเซลล์โพลียูรีเทน โดยในการขึ้นรูปโพลียูรีเทนนั้นมีปัจจัยที่ส่งผลต่อขนาดของเซลล์โพลียูรีเทน และความหนาของผนังเซลล์โพลียูรีเทนดังต่อไปนี้

1. อัตราส่วนของยางผสมซึ่งส่งผลต่อความหนืดของยางผสม และความสามารถในการเข้ากันได้ของยางแต่ละชนิด
2. ชนิดและปริมาณของ Curing agents และ Blowing agent ซึ่งส่งผลต่อระยะเวลาในการขึ้นรูปโพลียูรีเทน อัตราเร็วในการเกิดการเชื่อมขวาง และปริมาณการเกิดการเชื่อมขวางของยาง
3. สภาวะในการขึ้นรูปได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป ความดัน รวมไปถึงเทคนิคในการขึ้นรูป

รายการอ้างอิง

- [1] Neoplast. (2010) ยางธรรมชาติ. เข้าถึงเมื่อ 22 ธันวาคม 2016. เข้าถึงได้จาก <http://www.neoplast.biz/index.php?lay=show&ac=article&Id=174420>.
- [2] พงษ์ธร แซ่อู๋. (2004). ยาง : ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. กรุงเทพฯ: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [3] TIS. (2002) **Synthetic rubber**. เข้าถึงเมื่อ 2 September 2016. เข้าถึงได้จาก http://www.tis-gdv.de/tis_e/ware/kautschuk/synthesekautschuk/synthesekautschuk.htm.
- [4] Rubber-mold. (2009) **Rubber compound machine and product**. เข้าถึงเมื่อ 20 พฤษภาคม 2016. เข้าถึงได้จาก <http://rubber-mold.blogspot.com/2009/06/rubber.html>.
- [5] G. Vinícius, M. Pizzol and S. A. Innova. (2008). "Caracterização Morfológicada Poliestireno de Alto Impacto (HIPS)." **Journal of Polímeros: Ciência e tecnologia**, 18, 12-19.
- [6] Usha Chemicals. (1996) **Acrylonitrile butadiene rubber**. เข้าถึงเมื่อ 8 May 2016. เข้าถึงได้จาก <http://www.indiamart.com/ushachemicals/acrylonitrile-butadiene-rubber.html>.
- [7] A. V. Chapman. (2007) "Natural rubber and NR-based polymers: renewable materials with unique properties." 24th International H.F. Mark-Symposium in 'Advances in the Field of Elastomers & Thermoplastic Elastomers', Vienna, Austria, 15-16 November.
- [8] วิภาวี พัฒนกุล. (2554). ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์. นครปฐม: กลุ่มอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [9] Vangal. (2009) **Vulcanization of rubber**. เข้าถึงเมื่อ 18 August 2016. เข้าถึงได้จาก <https://www.classle.net/#!/classle/book/vulcanisation-rubber/>.
- [10] พรพรรณ นิธิอุทัย. (2528). สารเคมีสำหรับยาง. ปัตตานี: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [11] Arvind mafatlal group. (2014) **Vulcanization & Accelerators**. เข้าถึงเมื่อ 12 January 2017. เข้าถึงได้จาก <http://www.nocil.com/detail/technical/technical-notes/64>.
- [12] Chinaplas. (2012) **Products** เข้าถึงเมื่อ 12 July 2016. เข้าถึงได้จาก <http://www.rchchem.com/pages/product.html>.

- [13] สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. (2012) นาโนเคลย์ (Nanoclay). เข้าถึงเมื่อ 21 กันยายน 2016. เข้าถึงได้จาก http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=15&p_id=418.
- [14] อรพรรณ วงศ์กาแก้ว. (2012) งานสำรวจแหล่งวัสดุทางธรณีวิทยาที่ใช้ปรับปรุงพื้นที่ดินเค็มในพื้นที่เลือกสรร. เข้าถึงเมื่อ 2 กันยายน 2560. เข้าถึงได้จาก http://www.eeat.or.th/document/eeat_bentonite%20encyclopedia_on%20web.pdf.
- [15] กษมา จารุกำจร. (2553). ผลของนาโนเคลย์ต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิพรพิลีนและเส้นใยปานศรนารายณ์. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [16] A. Maneshi. (2007) "Polyethylene Clay Nanocomposites: Modeling and Experimental Investigation of Particle Morphology." **Institute for Polymer Research (IPR)**, University of Waterloo, Canada.
- [17] สุภัทร์ชัย แสงวงษ์. (2550). "สมบัติเชิงกลพลวัตและสัณฐานวิทยาของโพลีคอมพอสิตพอลิพรพิลีนและผงไม้ยางพารา." วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- [18] Chemistry database. (2018) **N-(Cyclohexylthio)phthalimide**. เข้าถึงเมื่อ 20 September 2016. เข้าถึงได้จาก https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/N-Cyclohexylthio_phthalimide#section=Top.
- [19] C. Hsien-Tang and T. Peir-An. (2006). "Aging and mechanical properties of NR/BR blends." **Journal of materials engineering and performance** 15, 1: 88-94.
- [20] N. Changwoon and K. Shinyoung. (1998). "Cut and chip resistance of NR-BR blend compounds." **Journal of applied polymer science** 68, 9: 1537-1541.
- [21] R. K. Habeeb, G. Unnikrishnan, A. Sujith and C. K. Radhakrishnan. (2005). "Cure characteristics and mechanical properties of styrene-butadiene rubber/acrylonitrile butadiene rubber." **Materials letters** 59, 6: 633-639.
- [22] S. Thanawan, S. Radabutra, P. Thamasiriant, T. Amornsakchai and K. Suchiva. (2009). "Origin of phase shift in atomic force microscopic investigation of the surface morphology of NR/NBR blend film." **Journal of ultramicroscopy** 109, 2: 189-92.
- [23] P. L. Teh, Z. A. Mohd Ishak, A. S. Hashim, J. Karger-Kocsis and U. S. Ishiaku. (2004). "On the potential of organoclay with respect to conventional fillers (carbon black, silica)

for epoxidized natural rubber compatibilized natural rubber vulcanizates." **Journal of applied polymer science** 94, 6: 2438-2445.

[24] S. Toloeei, G. Naderi, S. Shokoohi and S. Soltani. (2013). "Elastomer nanocomposites based on NBR/BR/nanoclay: morphology and mechanical properties." **Journal of polymer engineering** 33, 2: 133-139.

[25] N. N. Najib, Z. M. Ariff, A. A. Bakar and C. S. Sipaut. (2011). "Correlation between the acoustic and dynamic mechanical properties of natural rubber foam: Effect of foaming temperature." **Journal of materials & design** 32, 2: 505-511.

[26] X. Wang, N. Feng and S. Chang. (2013). "Effect of precured degrees on morphology, thermal, and mechanical properties of BR/SBR/NR foams." **Polymer composites** 34, 6: 849-859.

[27] U. Basuli, G. B. Lee, S. Y. Jang, J. Oh, J. H. Lee, S. C. Kim, N. D. Jeon, Y. I. Huh and C. Nah. (2012). "Foaming behavior, structure, and properties of rubber nanocomposites foams reinforced with zinc methacrylate." **Journal of elastomers and composites** 47, 4: 297-309.

[28] R. Alex and C. Nah. (2006). "Studies on natural rubber/acrylonitrile butadiene rubber/organoclay nanocomposites." **Plastics, rubber and composites** 35, 5: 219-225.

[29] H. Ismail and H. C. Leong. (2001). "Curing characteristics and mechanical properties of natural rubber/chloroprene rubber and epoxidized natural rubber/chloroprene rubber blends." **Polymer testing** 20, 5: 509-516.

[30] J. W. M. Noordermeer, H. Zhang, N. Dattar and A. G. Talma. (2009). "Mixing, curing and reinforcement of NR/BR/EPDM blends for tire sidewall applications." **Rubber chemistry and technology** 82, 3: 379-399.

[31] M. Duryodhan. (2002). "Elastomer blend." **Rubber chemistry and technology** 75, 3: 365-427.

[32] K. L. Mok and A. H. Eng. (2017). "Characterisation of crosslinks in vulcanised rubbers : from simple to advanced techniques." **Malaysian journal of chemistry** 20, 1: 118-127.

[33] B. Jurkowska, B. Jurkowski, K. Nadolny, A. P. Krasnov, Y. N. Studniev, S. S. Pesetskii, V. N. Koval, L. S. Pinchuk and Y. A. Olkhov. (2006). "Influence of fluorine-containing lubricant on properties of NR/BR rubber." **European polymer journal** 42, 1676-1687.

- [34] M. N. Ismail, S. H. El-Sabbagh and A. A. Yehia. (1999). "Fatigue and mechanical properties of NR/SBR and NR/NBR blend vulcanizates." **Journal of elastomers and plastics** 31, 3: 255-270.
- [35] C. Kantala, E. Wimolmala, C. Sirisinha and N. Sombatsompop. (2008). "Reinforcement of compatibilized NR/NBR blends by fly ash particles and precipitated silica." **Polymer for advance technology** 20, 5: 448-458.
- [36] A. B. Samsuri. (1995). "Tearing of unvulcanised black-filled natural rubber." **Journal of natural rubber research** 10, 3: 170-181.
- [37] S. Pichaiyut, C. Nakason, C. Kummerlöwe and N. Vennemann. (2012). "Thermoplastic elastomer based on epoxidized natural rubber/thermoplastic polyurethane blends: influence of blending technique." **Polymer for advance technology** 23, 6: 1011-1019.
- [38] Y. Chen, R. Das and M. Battley. (2015). "Effects of cell size and cell wall thickness variations on the stiffness of closed-cell foams." **International journal of solids and structures** 52: 150-164.
- [39] D. L. Hertz Jr. (1984). Theory and practice of vulcanization. **Elastomerics** 116, 11: 17-21.
- [40] A. Mujkanović, P. Petrovski, L. Vasiljević and G. Ostojić. (2010) "The influence of precipitation temperature on silica morphology." 14th **International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2010**, Mediterranean cruise, 11-18 September.
- [41] Lauren manufacturing. (2018) **Compression tests**. เข้าถึงเมื่อ 2 July 2018. เข้าถึงได้จาก <https://www.lauren.com/education/compression-tests>.
- [42] Y. Lu, J. Zhang, P. Chang, Y. Quan and Q. Chen. (2010). "Effect of filler on the compression set, compression stress-strain behavior, and mechanical properties of polysulfide sealants." **Journal of applied polymer science** 120, 4: 2001-2007.



ภาคผนวก

1. ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาแน่นของยาง

$$Density = \frac{Weight (g)}{Volume (cm^3)} \quad (1)$$

Density (D) = ความหนาแน่น

Weight (W) = น้ำหนักของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น กรัม (g)

Volume (V) = ปริมาตรของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm³)

- คำนวณความหนาแน่นของยาง BR (B-BR) จากสมการที่ 1

$$D_{B-BR} = \frac{0.59 (g)}{0.60 (cm^3)}$$

$$D_{B-BR} = 0.98 (g/cm^3)$$

- คำนวณความหนาแน่นของโฟมยาง NR (F-NR) จากสมการที่ 1

$$D_{F-NR} = \frac{0.35 (g)}{0.77 (cm^3)}$$

$$D_{F-NR} = 0.45 (g/cm^3)$$

- คำนวณความหนาแน่นของโฟมยางผสม 60/20/20 ที่เติม Cloisite 30B (F-60/20/20+C30B) จากสมการที่ 1

$$D_{F-60/20/20+C30B} = \frac{0.45 (g)}{0.60 (cm^3)}$$

$$D_{F-60/20/20+C30B} = 0.75 (g/cm^3)$$

2. ตัวอย่างการคำนวณหาการบวมตัวของยาง

$$\%Swelling = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

%Swelling = ร้อยละการบวมตัวของชิ้นงานเทียบกับก่อนการทดสอบ มีหน่วยเป็น %

W_t = น้ำหนักชิ้นงานหลังทดสอบเมื่อน้ำหนักคงที่ มีหน่วยเป็น กรัม (g)

W₀ = น้ำหนักของชิ้นงานก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น กรัม (g)

- คำนวณการบวมตัวของยาง BR (B-BR) ที่เวลาทดสอบ จากสมการที่ 2

$$\%Swelling_{B-BR} = \frac{4.31 - 0.60}{0.60} \times 100$$

$$\%Swelling_{B-BR} = 618 \%$$

- คำนวณการบวมตัวของโพลียเอทิลีน NR (F-NR) ที่เวลาทดสอบ จากสมการที่ 2

$$\%Swelling_{B-BR} = \frac{3.13 - 0.44}{0.44} \times 100$$

$$\%Swelling_{B-BR} = 611 \%$$

3. ตัวอย่างการคำนวณหาอัตราเร็วในการเกิดกระบวนการ Vulcanized

$$CRI = \frac{100}{tc_{90} - ts_2} \quad (3)$$

Cure rate index (CRI) = อัตราเร็วในการเกิดกระบวนการ Vulcanized

Scorch time (ts_2) = เวลาที่ยางเริ่มเกิดการ Vulcanized มีหน่วยเป็น นาที (min)

Cure time (tc_{90}) = เวลาที่ยางเกิดกระบวนการ Vulcanized แล้ว 90% มีหน่วยเป็น นาที (min)

- คำนวณอัตราเร็วในการเกิดกระบวนการ Vulcanized ของยาง BR (B-BR) ที่เวลาทดสอบ จากสมการที่ 3

$$CRI_{B-BR} = \frac{100}{18.31 - 12.06}$$

$$CRI_{B-BR} = 16.0$$

- คำนวณอัตราเร็วในการเกิดกระบวนการ Vulcanized ของโพลียเอทิลีน NR (F-NR) ที่เวลาทดสอบ จากสมการที่ 3

$$CRI_{F-NR} = \frac{100}{8.20 - 6.41}$$

$$CRI_{F-NR} = 55.9$$

4. ตัวอย่างการคำนวณหาการยืดอยู่ตัวเนื่องจากแรงดึง

$$\%Tension\ set = \frac{L_i - L_0}{L_n - L_0} \times 100 \quad (4)$$

%Tension set = การยืดอยู่ตัว มีหน่วยเป็น %

L_i = ความยาวของชิ้นงานหลังทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

L_0 = ความยาวของชิ้นงานก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

L_n = ความยาวของชิ้นงานขณะทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

- คำนวณอัตราเร็วในการเกิดกระบวนการ Vulcanized ของยาง BR (B-BR) ที่เวลาทดสอบ จากสมการที่ 3

$$\%Tension\ set_{B-BR} = \frac{35.81 - 34.73}{69.46 - 34.73} \times 100$$

$$\%Tension\ set_{B-BR} = 3.11 \%$$

5. ตัวอย่างการคำนวณหาการยุบอยู่ตัวเนื่องจากแรงอัด

$$\%Compression\ set = \frac{T_0 - T_i}{T_0 - T_n} \times 100 \quad (5)$$

%Compression set = การยุบอยู่ตัว มีหน่วยเป็น %

T_i = ความหนาของชิ้นงานหลังทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

T_0 = ความหนาของชิ้นงานก่อนทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

T_n = ความหนาของชิ้นงานขณะทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm.)

- คำนวณการยุบอยู่ตัวเนื่องจากแรงอัดของโพลียูรีเทน (F-NR) ที่เวลาทดสอบ จากสมการที่ 5

$$\%Compression\ set_{F-NR} = \frac{15.81 - 10.45}{15.81 - 7.93} \times 100$$

$$\%Compression\ set_{F-NR} = 68.02 \%$$

- คำนวณการยุบอยู่ตัวเนื่องจากแรงอัดของโพลียูรีเทน (F-60/20/20) ที่เติม Cloisite 30B (F-60/20/20+C30B) จากสมการที่ 5

$$\%Compression\ set_{F-NR} = \frac{13.61 - 8.23}{13.61 - 6.81} \times 100$$

$$\%Compression\ set_{F-NR} = 79.12 \%$$

6. ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาชั้นซิติไลท์ของ Cloisite 30B

$$D = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (6)$$

D (d-spacing) = ระยะห่างของชั้นซิติไลท์ของ Cloisite 30B มีหน่วยเป็น nm

λ = ความยาวคลื่นมีค่าเท่ากับ 0.154 nm

θ = มุมสะท้อนจากชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น องศา

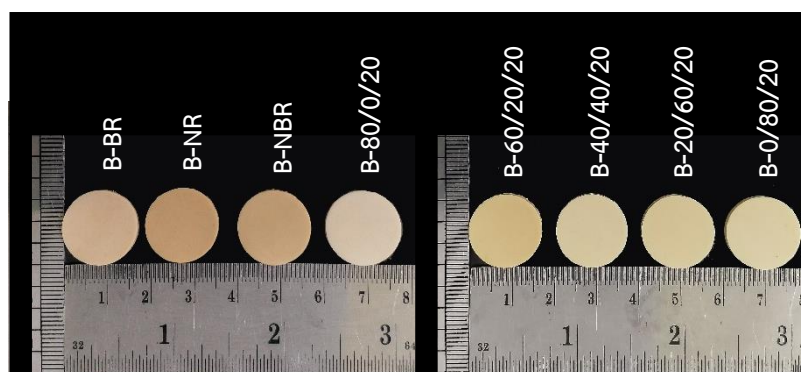
- คำนวณความหนาของชั้นซิลิเกตของ Cloisite 30B จากสมการที่ 6

$$D_{C30B} = \frac{0.154}{2 \sin 2.4}$$

$$D_{C30B} = 1.84 \text{ nm}$$

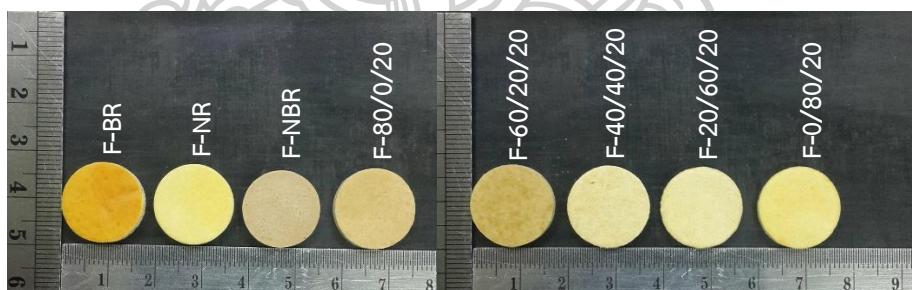
7. สีและลักษณะกายภาพของชิ้นงาน

1. ยางผสม



ภาพที่ ก-1 แสดงภาพของชิ้นงานยางผสมอัตราส่วนต่าง ๆ

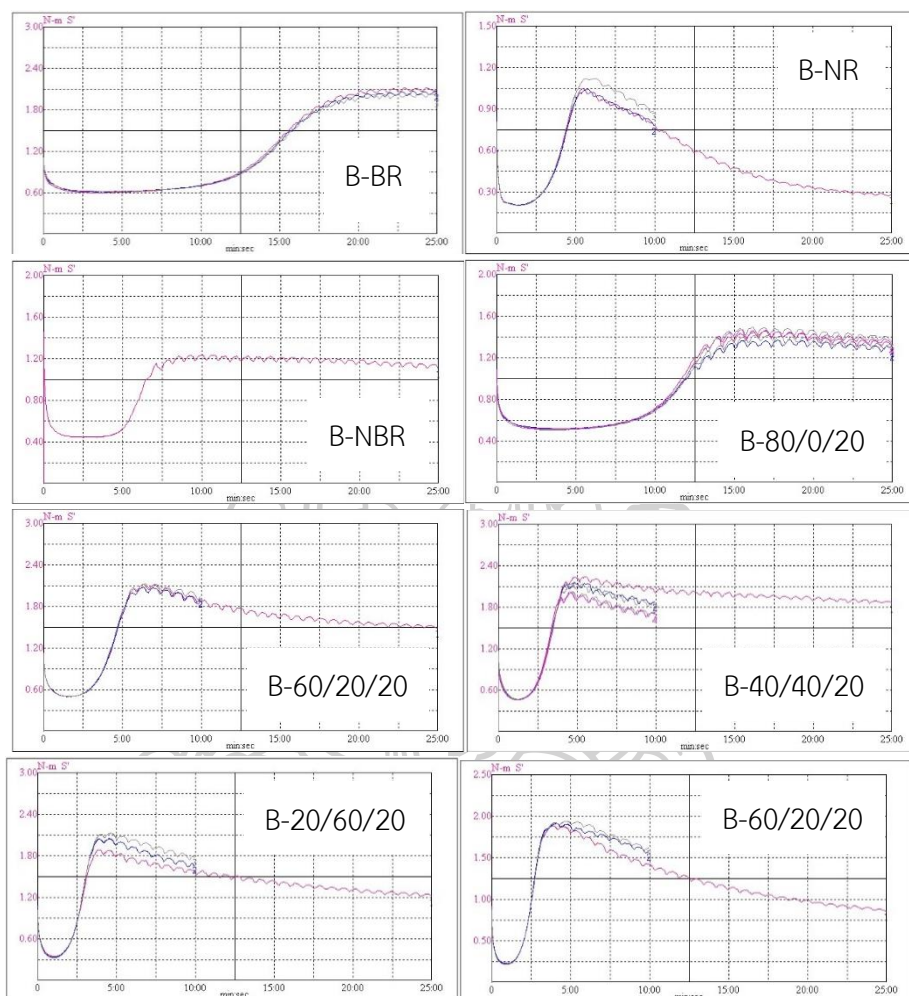
2. โฟมยางผสม



ภาพที่ ก-2 แสดงภาพของชิ้นงานโฟมยางผสม อัตราส่วนต่าง ๆ

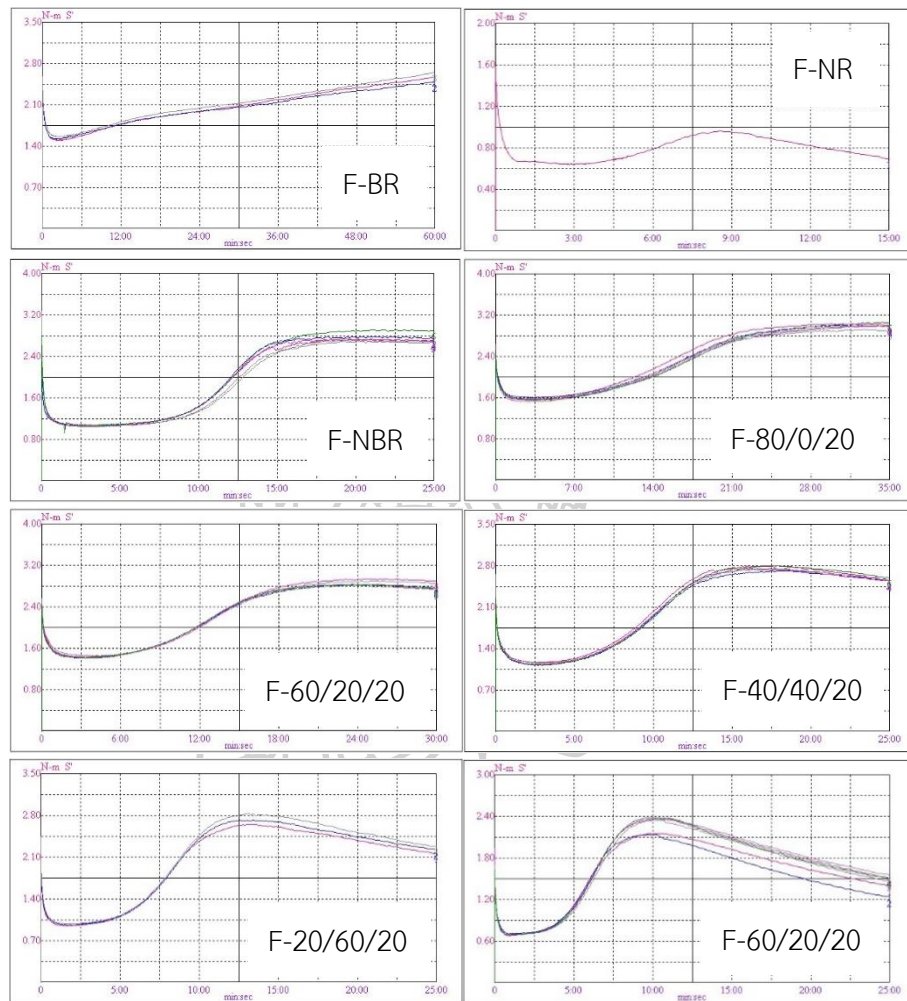
8. กราฟ Torque-time จากการทดสอบ Moving die rheometer

1. ยางผสม












ภาพที่ ก-3 แสดงกราฟ Torque-time จากการทดสอบ MDR ของยางผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ











2. โฟมยางผสม



ภาพที่ ก-4 แสดงกราฟ Torque-time จากการทดสอบ MDR ของโฟมยางผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ

9. ชิ้นงานการขยายตัว-หดตัวของโฟมยางผสม

Formulas	X-axis	Y-axis
F-BR		
F-NR		
F-NBR		
F-80/0/20		
F-60/20/20		
F-40/40/20		

F-20/60/20		
F-0/80/20		
F-60/20/20 +30B		
F-40/40/20 +30B		
F-20/60/20 +30B		

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชินวินท์ แก้วนะ
วัน เดือน ปี เกิด	02 กันยายน 2533
สถานที่เกิด	25 ม.1 ต.ป่าซิง อ.จะนะ จ.สงขลา 90130
วุฒิการศึกษา	มัธยมปลาย - โรงเรียนวรรณาริเฉลิม จังหวัด สงขลา ปริญญาตรี - วิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัด ชลบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	25 หมู่ที่ 1 ตำบล ป่าซิง อำเภอ จะนะ จังหวัด สงขลา รหัสไปรษณีย์ 90130
ผลงานตีพิมพ์	Chinnawin Kaewna and Chanchai Thongpin. “The study of NR/BR/NBR ternary blends: tensile properties and tension set”. The first Materials research society of Thailand international conference (1st MRS Thailand International Conference). The Empress Convention Center, Chiang Mai, Thailand. 31 October – 3 November 2017

