

ผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอีนที่มีต่อสมบัติของยางผสมคงรูป
ระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีน

EFFECTS OF MOLECULAR STRUCTURES OF BUTADIENE RUBBER
ON PROPERTIES OF NATURAL RUBBER/BUTADIENE RUBBER
VULCANIZATES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-057

ผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอินที่มีต่อสมบัติของยางผสมคกรูป
ระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน

EFFECTS OF MOLECULAR STRUCTURES OF BUTADIENE RUBBER
ON PROPERTIES OF NATURAL RUBBER/BUTADIENE RUBBER
VULCANIZATES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-014-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECTS OF MOLECULAR STRUCTURES OF BUTADIENE RUBBER
ON PROPERTIES OF NATURAL RUBBER/BUTADIENE RUBBER
VULCANIZATES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

KMITL-2019-SC-M-014-057

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอินที่มีต่อสมบัติของ
	ยางผสมครุประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศวดี บัณชิตย์
รหัสประจำตัว	60605059
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด

บทคัดย่อ

โครงสร้างโมเลกุลของยางมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติและการใช้งาน ปัจจุบันมีเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถสังเคราะห์ยางบิวทาไดอิน (Butadiene rubber, BR) ให้มีโครงสร้างแตกต่างกัน เช่น ปริมาณ 1,2 และ 1,4 โครงสร้างสายโซ่ตรงและกึ่ง การกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal และ Bimodal งานวิจัยนี้สนใจศึกษาผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอินที่มีต่อสมบัติของยางผสมครุประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน (70/30 และ 60/40) เพื่อใช้สมบัติเด่นโดยเฉพาะสมบัติเชิงกลและพลวัตในการประยุกต์ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ยางถนนขนส่งสัตว์ปีก งานวิจัยนี้ทำการผสมยางด้วยเครื่องผสมระบบปิด และขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณ 1,2 BR (0.0-17.0 %wt) โครงสร้างสายโซ่โมเลกุล (สายโซ่ตรงและกึ่ง) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (แบบ Unimodal และ Bimodal) และศึกษาผลของสารตัวเติม (เขม่าดำ N330 ซิลิกา Hisil[®]255 และ Sidistar[®]) จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน ให้ค่าสมบัติเชิงกลแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณ 1,2 BR ส่งผลให้ค่าความเหนียวนี้ มอดูลัสที่ระยะยืด 100 % , 300 % ความแข็งกต และเวลาในการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ 1,2 BR ในปริมาณ 3.8 %wt ให้ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา (Ross flex resistance) และความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศา (De Mattia flex cracking resistance) มากที่สุด สำหรับ BR ที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน ให้ค่าความเหนียวนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ การใช้ BR ที่มีโครงสร้างสายโซ่ตรงให้ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา มากกว่า BR ที่มีโครงสร้างสายโซ่กึ่ง การใช้ BR ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันให้ค่าความเหนียวนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ BR ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal ให้ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา มากกว่า BR ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Unimodal ในการศึกษาการใช้อัตราส่วนอย่างผสมคงรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน ให้ค่าความหนืดมูนี ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลและพลวัตมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้การใช้เขม่าดำ N330 ร่วมกับซิลิกา Sidistar[®] ให้ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศาสูงกว่า เมื่อเทียบกับการใช้เขม่าดำ N330 และเขม่าดำ N330 ร่วมกับซิลิกา Hisil[®]255 อย่างไรก็ตาม การใช้เขม่าดำ N330 ร่วมกับซิลิกา Hisil[®]255 ให้สมบัติเชิงกลดีกว่า เมื่อเทียบกับการใช้เขม่าดำ N330 และเขม่าดำ N330 ร่วมกับซิลิกา Sidistar[®]

คำสำคัญ : โครงสร้างโมเลกุล พอลิเมอร์ผสม ยางถนอมชนสัตว์ปีก ยางธรรมชาติ ยางบิวทาไดอิน สมบัติเชิงพลวัต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Effects of Molecular Structures of Butadiene Rubber on Properties of Natural Rubber/Butadiene Rubber Vulcanizates
Student Name	Miss Yodsawadee Bundit
Student ID	60605059
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Ittipol Jangchud

Abstract

Rubber properties and applications are essentially affected by rubber molecular structures. Nowadays, new technologies can be used to synthesize different butadiene rubber (BR) structures, such as 1,2 and 1,4 contents, linear and branching structures, unimodal and bimodal molecular weight distributions, etc. In this research, effects of BR structures in NR/BR blends (70/30 and 60/40) were studied. The objective was to seek for outstanding properties, especially mechanical and dynamic properties in order to use as “rubber plucking fingers”. Rubber compounds were mixed by using an internal mixer and shaped into sheet samples by a compression molding machine. Factors affecting rubber properties were studied, e.g., contents of 1,2 BR (0.0-17.0 %wt), linear and branching structures, molecular weight distributions (MWD) (unimodal and bimodal distributions) and types of fillers (carbon black N330, silica Hisil[®]255 and Sidistar[®]). It was found that mechanical properties were insignificantly different when different contents of 1,2 BR were used. However, Mooney viscosity, modulus at 100%, 300%, hardness and cure time were increased with increasing 1,2 BR. Ross flex and De Mattia flex cracking resistances were improved dramatically when 3.8 %wt of 1,2 BR was used. Mooney viscosity, cure characteristics and mechanical properties were negligibly different when different polymer structures of BR were used. Although, Linear BR enhanced Ross flex and De Mattia flex cracking resistances compared to those of branching BR.

Mooney viscosity, cure characteristics and mechanical properties were insignificantly different when different MWDs of BR were used. Nevertheless, Ross flex and De Mattia flex cracking resistances of bimodal BR increased as compared to those of unimodal one. Mooney viscosity, cure characteristics, mechanical and dynamic properties were unchanged when different ratios of NR/BR were used. Moreover, using rubbers with carbon black N330 and silica Sidistar[®] enhanced Ross flex and De Mattia flex cracking resistances as compared to those of rubbers with carbon black N330, carbon black N330 and silica Hisil[®]255. However, mechanical properties of rubbers with carbon black N330 and silica Hisil[®]255 were enhanced as compared to those of rubbers with carbon black N330, carbon black N330 and silica Sidistar[®].

Keywords : Butadiene rubber, Dynamic properties, Molecular structures, Natural rubber, Polymer blends, Rubber plucking fingers

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จลุล่วงมาได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งแก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อธิธิพล แจ่มชัด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความช่วยเหลือทั้งด้านทฤษฎีและการปฏิบัติงาน ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในการทำวิจัย ซึ่งเป็นผลให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมบัติ ณะวันต์ และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท อุเบะ เทคโนโลยี เซ็นเตอร์ (เอเชีย) จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณธวัช จันทร์สอน คุณรัชนิกร ธเนศกัณท์บวร คุณเติมพงศ์ ภูวนารถวัฒนา คุณรติพร ทองถนอม คุณธีรเศรษฐ์ อริยะธนากุล คุณณัฐพร อินทร์รักษา คุณเกียรติศักดิ์ อ่อนแสงจันทร์ คุณพิมพ์ญา ชุนภักดิ์ และคุณวันเฉลิม ตรีภักกิจ ตลอดจนบุคลากรในบริษัททุกท่านที่ให้การดูแล และความอนุเคราะห์ เรื่องเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในด้านปฏิบัติการทดลองงานวิจัย รวมถึงให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ บริษัท เอส.เค.โพลีเมอร์ จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณเดชาธร ฉันทรักษ์ ตลอดจนบุคลากรในบริษัททุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ เรื่องการทดสอบ และสารเคมีต่าง ๆ ที่ใช้ในด้านปฏิบัติการทดลองงานวิจัย รวมถึงให้คำแนะนำตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาเคมี และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาเคมีคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำต่าง ๆ ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับทุนอุดหนุนในการทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวยศวดี บัณฑิตย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฐ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ยาง (Rubbers).....	7
2.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR).....	7
2.1.2 ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR).....	9
2.2 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends).....	12
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์.....	13
2.3.1 การจัดเรียงตัวแบบ cis-1,4 แบบ trans-1,4 และแบบ vinyl-1,2 ของ ยางบิวทาไดอีน.....	13
2.3.2 โครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์ (Structures of polymer chains).....	15
2.3.3 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Molecular weight distribution of polymer, MWD).....	16
2.4 การแตกหักเนื่องจากความล้า (Fatigue failure).....	18
2.5 การผสมยาง (Rubber compounding).....	19
2.6 สารตัวเติม (Fillers).....	23
2.6.1 เขม่าดำ (Carbon black).....	23
2.6.2 ซิลิกา (Silica).....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 ยางถอนขนสัตว์ปีก (Rubber plucking fingers).....	31
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	49
3.1 แผนการดำเนินการ	49
3.2 วัตถุประสงค์ และสารเคมี.....	50
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้	51
3.4 วิธีการทดลอง.....	53
3.5 การทดสอบสมบัติของยางคอมพาวนด์	59
3.5.1 การหาค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity).....	59
3.5.2 การหาลักษณะการคงรูป (Cure characteristics).....	59
3.6 การทดสอบสมบัติของยางคงรูป	60
3.6.1 การทดสอบสมบัติแรงดึง (Testing of tensile properties)	60
3.6.2 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)	61
3.6.3 การทดสอบสมบัติความแข็งกด (Hardness)	62
3.6.4 การทดสอบสมบัติการเสียรูปถาวรหลังการกด (Compression set).....	62
3.6.5 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance).....	63
3.6.6 การทดสอบสมบัติความกระด้างกระดอน (Rebound resilience).....	63
3.6.7 การทดสอบความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยาง (Crosslinking density of rubber) ด้วยเทคนิคการบวมตัวในสารละลาย	63
3.6.8 การทดสอบความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ (Flexing resistance).....	64
3.6.9 การทดสอบความร้อนสะสม (Heat build up)	64
3.6.10 การวิเคราะห์สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic analysis).....	65
3.6.11 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Scanning electron microscopy)	65
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	66
4.1 ผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน.....	67
4.1.1 ผลของปริมาณ 1,2 butadiene rubber	68
4.1.2 ผลของโครงสร้างสายโซ่ตรงและกิ่ง.....	77
4.1.3 ผลของการกระจายน้ำหนักโมเลกุล	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลของอัตราส่วนยางผสมคงรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน ที่แตกต่างกัน.....	91
4.3 ผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	105
4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางถอนขนสัตว์ปีก	116
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	117
5.1 สรุปผลการวิจัย	117
5.2 ข้อเสนอแนะ	118
เอกสารอ้างอิง	119
ภาคผนวก.....	125
ภาคผนวก ก.....	126
ภาคผนวก ข.....	129
ภาคผนวก ค.....	132
ภาคผนวก ง.....	134
ภาคผนวก จ.....	136
ประวัติผู้เขียน.....	139

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แนวทางการเลือกใช้ยางบิวทาไดอิน เกรด UBEPOL BR®	10
2.2 แนวทางการเลือกใช้ยางบิวทาไดอิน เกรด UBEPOL VCR®	11
2.3 ปริมาณ cis-1,4/trans-1,4/vinyl-1,2 เมื่อใช้ชนิดของตัวริเริ่ม (Initiator) ในการเกิด ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่แตกต่างกัน	14
2.4 ผลของการจัดเรียงตัวของยางบิวทาไดอินต่อค่า T_g และ T_m	15
2.5 สมบัติของสารตัวเติม (เขม่าดำ N330 ซิลิกา Hisil®255 และ Sidistar®).....	30
2.6 คุณลักษณะของยางถนอมขนสัตว์ปีก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่อง ยางถนอมขนไก่ (มอก.2666-2558)	34
2.7 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคังรูปที่มีอัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทา- ไดอิน และเกรดยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันของงานวิจัยของอิทธิพล แฉ่งชัด และคณะ....	35
2.8 สมบัติของยางผสมคังรูปที่มีอัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน และ เกรดยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันของงานวิจัยของอิทธิพล แฉ่งชัด และคณะ	36
2.9 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมแตกต่างกันของงานวิจัยของ อิทธิพล แฉ่งชัด และคณะ	37
2.10 สมบัติของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมแตกต่างกันของงานวิจัยของอิทธิพล แฉ่งชัด และคณะ	38
2.11 สมบัติของยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL BR®	40
2.12 ความหนืดมุนนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลและพลวัตของยางบิวทาไดอิน เกรด UBEPOL BR®	41
2.13 สมบัติของยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL VCR®	42
2.14 ความหนืดมุนนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลและพลวัตของยางบิวทาไดอิน เกรด UBEPOL VCR®	43
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.2 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ).....	51
3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)	52
3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณ 1,2 resin (0.0-17.0%) ที่แตกต่างกันของ ยางบิวทาไดอิน (หน่วย phr)	54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.6 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกัน (โครงสร้างสายโซ่ตรงและกิ่ง) ของยางบิวทาไดอิน (หน่วย phr)	55
3.7 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน (แบบ Unimodal และ Bimodal) ของยางบิวทาไดอิน (หน่วย phr)	56
3.8 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราส่วนยางผสมคกรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน (อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก) (หน่วย phr)	57
3.9 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษา ผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน (เขม่าดำ N330 และซิลิกา Hisil®255 และ Sidistar®) (หน่วย phr).....	58
4.1 รายละเอียดยางบิวทาไดอินแต่ละเกรดที่ใช้.....	67
4.2 ความหนืดมูนี้ และลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน.....	69
4.3 สมบัติของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน	72
4.4 ความหนืดมูนี้ และลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน	78
4.5 สมบัติเชิงกลของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน	78
4.6 ความหนืดมูนี้ และลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน	84
4.7 สมบัติเชิงกลของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน	85
4.8 ความหนืดมูนี้ และลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคกรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	92
4.9 ความหนืดมูนี้ และลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน ..	106
4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต.....	116
ข.1 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน	129
ข.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน.....	129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน	130
ข.4 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 70/30 โดยน้ำหนัก.....	130
ข.5 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 60/40 โดยน้ำหนัก.....	131
ข.6 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	131
ค.1 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน	132
ค.2 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน.....	132
ค.3 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน	132
ค.4 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 70/30 โดยน้ำหนัก.....	133
ค.5 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 60/40 โดยน้ำหนัก.....	133
ค.6 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	133
ง.1 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน	134
ง.2 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน.....	134
ง.3 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน.....	134
ง.4 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 70/30 โดยน้ำหนัก.....	135
ง.5 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 60/40 โดยน้ำหนัก.....	135
ง.6 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
จ.1 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพังกอ 180 องศาของยางผสมคังรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน	136
จ.2 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพังกอ 180 องศาของยางผสมคังรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล แตกต่างกัน.....	136
จ.3 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพังกอ 180 องศาของยางผสมคังรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุล แตกต่างกัน.....	137
จ.4 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพังกอ 180 องศา ของยางผสมคังรูปที่ใช้ อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 70/30 โดยน้ำหนัก.....	137
จ.5 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพังกอ 180 องศา ของยางผสมคังรูปที่ใช้ อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 60/40 โดยน้ำหนัก.....	137
จ.6 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพังกอ 180 องศา ของยางผสมคังรูปที่ใช้ สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	138

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) ผลิตภัณฑ์ยางถอนขนสัตว์ปีก (ข) กลไกการหมุนของยางถอนขนสัตว์ปีก และ (ค) เครื่องถอนขนสัตว์ปีก	2
1.2 ตัวอย่างการเสียสภาพของยางถอนขนสัตว์ปีกที่หักจากการพับงอ.....	4
1.3 ภาพวาด Finite element แสดงกลไกการถอนขนสัตว์ปีกด้วยยางถอนขนสัตว์ปีก	4
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ.....	8
2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยางบิวทาไดอีน.....	9
2.3 การจัดเรียงตัว (ก) แบบ cis-1,4 (ข) แบบ trans-1,4 และ (ค) แบบ vinyl-1,2 ของยางบิวทาไดอีน.....	14
2.4 โครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์.....	15
2.5 กราฟแสดงการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลกับสัดส่วนโดยน้ำหนัก	17
2.6 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal และ Bimodal.....	18
2.7 ตัวอย่างโครงสร้างกลุ่มซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides)	20
2.8 ตัวอย่างโครงสร้างกลุ่มไทอะโซล (Thiazoles)	21
2.9 ตัวอย่างโครงสร้างกลุ่มกัวนิดีน (Guanidines)	21
2.10 อนุภาคของเขม่าดำ	23
2.11 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำ	24
2.12 ภาพวาดแสดงโครงสร้างของเขม่าดำ Bound rubber และ Occluded rubber รวมเป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcing entity).....	26
2.13 โครงสร้างของซิลิกา.....	27
2.14 องค์ประกอบของซิลิกา.....	28
2.15 ภาพซิลิกา Sidistar® จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM).....	30
2.16 เครื่องถอนขนสัตว์ปีก (ก) แบบถักกลม และ (ข) แบบติดตั้งกับตู้ถอนขนสัตว์ปีก.....	31
2.17 ยางถอนขนสัตว์ปีก (ก) ชนิดสีดำ และ (ข) ชนิดมีสี	32
2.18 ยางถอนขนสัตว์ปีกแท่งกลมแบบเป็นร่อง	32
2.19 ยางถอนขนสัตว์ปีกแท่งกลมแบบปุ่มนูน	33
2.20 ยางถอนขนสัตว์ปีกแท่งแบนแบบเป็นร่อง.....	33
2.21 ยางถอนขนสัตว์ปีกแบบเป็นวงดาว.....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ตัวอย่างกราฟความหนืดมูนนี้.....	59
3.2 ตัวอย่างเส้นกราฟเชื่อมโยงของยางผสมสูตร แสดงเวลาการเชื่อมโยง ($t_{c(90)}$) และเวลาก่อน การเชื่อมโยง (t_{c1})	60
3.3 ขึ้นทดสอบรูปดัมเบลล์สำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด รวมทั้งค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100% และ 300%.....	61
3.4 ขึ้นทดสอบแบบมุ่มสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด.....	62
4.1 มอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน	69
4.2 มอดุลัสที่ระยะยืด 300 % ของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน	70
4.3 ความแข็งกดของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน.....	70
4.4 โครงสร้าง 1,2 butadiene rubber (โครงสร้างเป็นเส้นใยระดับไมโครเมตร) ที่กระจาย อยู่ในเมทริกซ์ 1,4 butadiene rubber.....	71
4.5 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน	72
4.6 สมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน	73
4.7 ความร้อนสะสมในยางของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน.....	74
4.8 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน.....	74
4.9 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศาของยางผสมคงรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน	75
4.10 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคงรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน.....	76
4.11 ภาพจำลองการขยายตัวของรอยแตก (ก) ยางบิวทาไดอินทั่วไป และ (ข) ยางบิวทาไดอินที่มี 1,2 butadiene rubber อยู่ในองค์ประกอบทำหน้าที่ ขัดขวางการเกิดและการขยายของรอยแตก	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 หมู่ปลายสายโซ่โมเลกุลของ (ก) โมเดลโครงสร้างสายโซ่ตรง และ (ข) โมเดลโครงสร้างสายโซ่กึ่ง.....	77
4.13 สมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน	79
4.14 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน	80
4.15 ความร้อนสะสมของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน	81
4.16 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน	81
4.17 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศาของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน	82
4.18 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน	82
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและสมบัติเชิงกล.....	86
4.20 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน.....	86
4.21 สมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันของสูตรยาง (ก) 3.8 %wt และ (ข) 5.3 %wt	87
4.22 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศาของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน.....	88
4.23 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน.....	88
4.24 มอดูลัสสูญเสียของยางผสมคักรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันของสูตรยาง (ก) 3.8 %wt และ (ข) 5.3 %wt	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 ความกระด้างกระตอนของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนักรึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักรีมเลกุลแตกต่างกัน	90
4.26 ความแข็งแรงดึงของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	93
4.27 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	94
4.28 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	94
4.29 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศาของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	95
4.30 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	95
4.31 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	96
4.32 มอดูลัสที่ระยะยืด 300% ของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	96
4.33 ความแข็งกดของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	97
4.34 ความต้านทานต่อการขัดถูของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	98
4.35 ความร้อนสะสมในยางของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	98
4.36 ความกระด้างกระตอนของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	99
4.37 สมบัติเชิงพลวัตของยางผสมสูตรที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันของสูตรยาง (ก) NR/BR-150 (ข) NR/BR-150L (ค) NR/BR-150B (ง) NR/VCR617 และ (จ) NR/VCR450	102
4.38 การเสีรูปถาวรหลังการกดของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคังธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางผสมคังรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน.....	103
4.40 ความแข็งแรงดึงของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	106
4.41 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	107
4.42 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	107
4.43 ความต้านทานต่อการขีดข่วนของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	108
4.44 มอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	108
4.45 มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	109
4.46 ความแข็งกดของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	109
4.47 การเสียรูปถาวรหลังการกดของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	110
4.48 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน.....	110
4.49 สมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	111
4.50 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศาของยางผสมคังรูปที่ใช้ สารตัวเติมที่แตกต่างกัน.....	112
4.51 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคังรูปที่ใช้ สารตัวเติมที่แตกต่างกัน.....	112
4.52 โมเดลแสดงบริเวณยึดเกาะของสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน (ก) ขนาดอนุภาคเล็ก และ (ข) ขนาดอนุภาคใหญ่.....	113
4.53 ความร้อนสะสมของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	113
4.54 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน	113
4.55 ภาพถ่ายแสดงความยาวของรอยตำหนิ (แสดงดังแถบสีแดง) ขึ้นงานหลังจากการทดสอบ ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา (แสดงดังลูกศร) ของยางผสม คังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน (ก) เขม่าดำ N330 (ข) เขม่าดำ N330/ซิลิกา Hisil [®] 255 และ (ค) เขม่าดำ N330/ซิลิกา Sidistar [®]	114
4.56 โมเดลแสดงรัศมีความโค้ง (Radius of curvature) ที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน (ก) ขนาดอนุภาคเล็ก และ (ข) ขนาดอนุภาคใหญ่.....	114
4.57 ภาพ SEM แสดงยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกันของ (ก) เขม่าดำ N330 (ข) เขม่าดำ N330/ซิลิกา Hisil [®] 255 และ (ค) เขม่าดำ N330/ซิลิกา Sidistar [®] (กำลังขยาย 5,000 เท่า)	115

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 ภาพ SEM แสดงเขม่าดำ N330 (กำลังขยาย 500 เท่า).....	126
ก.2 ภาพ SEM แสดงซิลิกา Hisil®255 (กำลังขยาย 500 เท่า)	126
ก.3 ภาพ SEM แสดงซิลิกา Sidistar® (กำลังขยาย 500 เท่า).....	127
ก.4 ภาพ SEM แสดงยางผสมคกรูปหลังจากการดิ่งทดสอบที่ใช้เขม่าดำ N330 (กำลังขยาย 5,000 เท่า).....	127
ก.5 ภาพ SEM แสดงยางผสมคกรูปหลังจากการดิ่งทดสอบที่ใช้เขม่าดำ N330/ซิลิกา Hisil®255 (กำลังขยาย 5,000 เท่า).....	128
ก.6 ภาพ SEM แสดงยางผสมคกรูปหลังจากการดิ่งทดสอบที่ใช้เขม่าดำ N330/ซิลิกา Sidistar® (กำลังขยาย 5,000 เท่า).....	128

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
BR	ยางบิวทาไดอิน (Butadiene rubber)
CRI	อัตราเร็วในการเชื่อมโยง (Cure rate index)
M_L	ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)
M_{HF}	ค่าแรงบิดสูงสุด (Plateau torque)
MWD	การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution)
M100	มอดูลัสที่ระยะยืด 100%
M300	มอดูลัสที่ระยะยืด 300%
NR	ยางธรรมชาติ (Natural rubber)
t_{s1}	เวลาเริ่มเชื่อมโยง (Scorch time)
$t_{c(90)}$	เวลาเชื่อมโยง (Cure time)
UBEPOL BR [®] 150	ยางบิวทาไดอินที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล Medium branching polymer และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal
UBEPOL BR [®] 150L	ยางบิวทาไดอินที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล Linear polymer และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal
UBEPOL BR [®] 150B	ยางบิวทาไดอินที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล Branching polymer และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal
UBEPOL VCR [®] 450	ยางบิวทาไดอินที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล Medium branching polymer มีปริมาณ 1,2 butadiene rubber 3.8 %wt และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal
UBEPOL VCR [®] 800	ยางบิวทาไดอินที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล Medium branching polymer มีปริมาณ 1,2 butadiene rubber 5.3 %wt และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal
UBEPOL VCR [®] 412	ยางบิวทาไดอินที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล Medium branching polymer มีปริมาณ 1,2 butadiene rubber 12.0 %wt และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal
UBEPOL VCR [®] 617	ยางบิวทาไดอินที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล Medium branching polymer มีปริมาณ 1,2 butadiene rubber 17.0 %wt และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

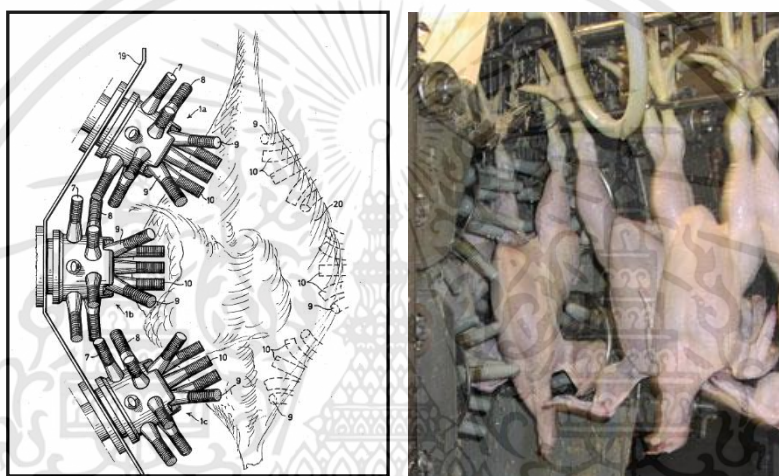
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) อันดับหนึ่งของโลก มีปริมาณการผลิตถึง 4.9 ล้านตันต่อปี (ปริมาณการผลิตในปี พ.ศ. 2561) [1] คิดเป็นสัดส่วน 36% ของผลผลิตโลก [2] ยางธรรมชาติส่วนใหญ่ประมาณ 90% ถูกส่งออกนอกประเทศในรูปวัตถุดิบที่มีราคาถูก และที่เหลือถูกส่งออกในรูปของผลิตภัณฑ์ยางแปรรูป [3] จะเห็นได้ว่าประเทศไทยเป็นเพียงผู้นำด้านการผลิตเท่านั้น การแปรรูปยางธรรมชาติให้เป็นผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ จึงเป็นสิ่งที่ควรพึงกระทำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อเพิ่มมูลค่าของยางให้ตรงกับความต้องการในการใช้งานทั้งภายในและภายนอกประเทศที่สำคัญสอดคล้องกับแผนยุทธศาสตร์เกษตรและสหกรณ์ระยะ 20 ปี (พ.ศ. 2560 ถึง พ.ศ. 2579) ของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ในหัวข้อยุทธศาสตร์ที่ 3 การเพิ่มความสามารถในการแข่งขันภาคการเกษตรด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรมที่มุ่งพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมเพื่อการขับเคลื่อนเกษตร 4.0 ภายใต้ไทยแลนด์ 4.0 รวมทั้งพัฒนางานวิจัยและสารสนเทศให้ไปสู่เชิงพาณิชย์และเชื่อมโยงเครือข่ายข้อมูลในระดับโลก [4]

ยางถอนขนสัตว์ปีก (Rubber plucking fingers) เป็นผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ถอนขนสัตว์ปีก เช่น ไก่ เป็ด ห่าน ฯลฯ ซึ่งในอุตสาหกรรมแปรรูปสัตว์ปีก ผู้ประกอบการใช้เครื่องถอนขนอัตโนมัติ (Plucking machine) ในสายการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) โดยในตัวเครื่องจักรมีการใช้กลไกการหมุนของยางถอนขนสัตว์ปีกด้วยความเร็วสูงคู่กับตัวสัตว์ ทำให้ขนของสัตว์ปีกหลุดออก ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งในปัจจุบันยางถอนขนสัตว์ปีกที่มีประสิทธิภาพสูงส่วนใหญ่จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เนื่องจากยางถอนขนสัตว์ปีกในประเทศยังไม่มีประสิทธิภาพดีเพียงพอกับความต้องการของอุตสาหกรรม เช่น หักง่าย อายุการใช้งานสั้น ไม่ทนต่อการเสียดสีขัดถู มีสีของยางถอนขนสัตว์ปีกติดกับผิวหนังสัตว์ปีกที่ถอนขน ฯลฯ ทำให้ผู้ประกอบการต้องเสียค่าใช้จ่ายในการนำเข้ายางถอนขนสัตว์ปีกเป็นจำนวนมากต่อปี (ประมาณ 600,000,000 บาทต่อปี [5]) ด้วยเหตุผลดังกล่าวหากมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางถอนขนสัตว์ปีกให้มีคุณภาพตามมาตรฐานภายในประเทศ ช่วยให้ผู้ประกอบการลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้ายางถอนขนสัตว์ปีกได้ถึง 80% และยังสามารถส่งออกจำหน่ายในตลาดการแปรรูปสัตว์ปีกในต่างประเทศ ซึ่งสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศไทยได้อีกด้วย



(ก)



(ข)



(ค)

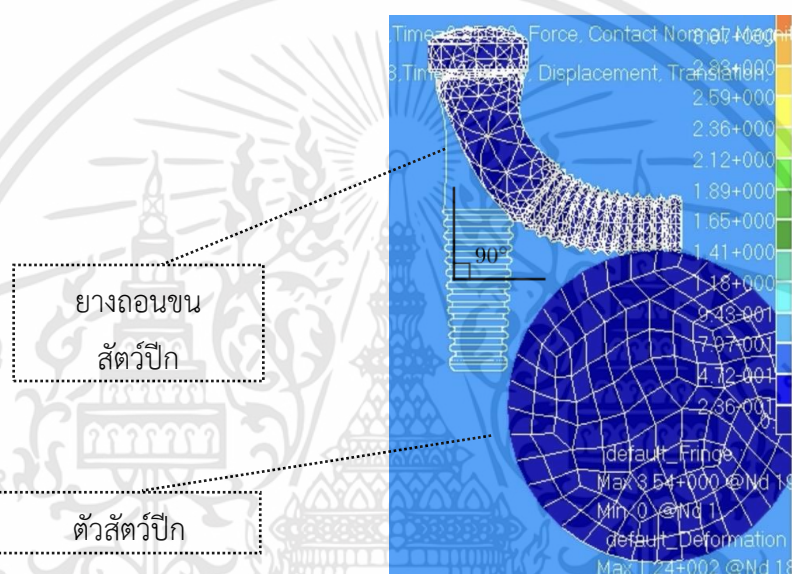
รูปที่ 1.1 (ก) ผลิตภัณฑ์ยางถอนขนสัตว์ปีก (ข) กลไกการหมุนของยางถอนขนสัตว์ปีก และ (ค) เครื่องถอนขนสัตว์ปีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางถอนขนสัตว์ปีกขณะใช้งาน แท่งยางถูกเคลื่อนที่หมุนให้สัมผัสกับตัวสัตว์ปีก ทำให้ยางถอนจากพื้นงอไปมา เกิดแรงเสียดทานกับผิวสัตว์ปีกเป็นระยะเวลานาน ซึ่งปัจจุบันโรงงานการแปรรูปสัตว์ปีกดำเนินสายการผลิตต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ดังนั้นผู้ประกอบการจึงมีความต้องการยางถอนขนสัตว์ปีกที่มีความทนทาน ทักยาก เนื่องจากถ้ายางถอนขนสัตว์ปีกหักง่าย ต้องหยุดสายการผลิตเพื่อเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ดังกล่าวก่อนเวลาอันควร ส่งผลให้อัตราการผลิตช้าลง ทำให้ผู้ประกอบการต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก โดยในปัจจุบันต้องเปลี่ยนยางถอนขนสัตว์ปีกที่ติดตั้งในเครื่องถอนขนสัตว์ปีกอัตโนมัติประมาณทุก ๆ 7 วัน บริษัท เอส.เค.โพลีเมอร์ จำกัด บริษัทผู้นำด้านการผลิตผลิตภัณฑ์ยางถอนขนไก่ จึงมีความต้องการเพิ่มการเปลี่ยนยางถอนขนไก่เป็นทุก ๆ 10-12 วัน เพื่อลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งการเสียดทานของยางถอนขนสัตว์ปีกส่วนใหญ่่นั้น เกิดจากรอยแตกจากการใช้งานที่หักจากการพับงอเป็นหลัก ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 1.2 ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาสมบัติความต้านทานต่อการพับงอของยางถอนขนสัตว์ปีกให้ดียิ่งขึ้น เมื่อสังเกตจากการใช้งานการพับงอดังกล่าวข้างต้นนั้น เป็นการพับงอ 90 องศา ดังรูปที่ 1.3 เปรียบเทียบได้กับการทดสอบความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา (Ross flex resistance) ดังนั้นยางถอนขนสัตว์ปีกที่ดีควรมีความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา (Ross flex resistance) สูง รวมทั้งสมบัติอื่น ๆ ที่ดี เช่น ความร้อนสะสม (Heat build up) ในยางต่ำ อัตราการขยายตัวของรอยแตก (Crack growth) ต่ำ สมบัติการล้าตัว (Dynamic fatigue) ต่ำ สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ดี ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูง ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) สูง และการเสีรูปร่างหลังการกด (Compression set) ต่ำ ส่งผลให้นักวิจัยได้นำยางสังเคราะห์ เช่น ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) เข้ามาช่วยในการปรับปรุงสูตรยางผสมที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางดังกล่าว ซึ่งสมบัติของยางผสมนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ เห็นได้จากงานวิจัยของอิทธิพล แจ้งชัด และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เกรดยางสังเคราะห์ ชนิดและปริมาณเขม่าดำและซิลิกา รวมทั้งการใช้สารเติมแต่งที่มีผลต่อสมบัติของยางถอนขนไก่ ในขณะที่จุฑาทิพย์ ตรีทศรัตน์ และคณะ [7] ศึกษาผลของชนิดและปริมาณเส้นใยอะรามิด (Kevlar) และเส้นใยใบสับปะรด (Pineapple Leaf Fiber, PALF) รวมทั้งชนิดและปริมาณสารช่วยกระจายตัว (Struktol®WB222 และ Ultralube®250) และปริมาณของฟีนอลิกเรซินในยางถอนขนไก่



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างการเสียหายของยางถอนขนสั้วปีกที่หักจากการพับงอ (แสดงดังลูกศร)



รูปที่ 1.3 ภาพวาด Finite element แสดงกลไกการถอนขนสั้วปีกด้วยยางถอนขนสั้วปีก [6]

จากที่กล่าวข้างต้น สมบัติของยางถอนขนสั้วปีกที่ต้องการนั้น สอดคล้องกับสมบัติเด่นของยางบิวทาไดอีนที่มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ความต้านทานต่อการขีดถู (Abrasion resistance) ความสามารถในการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ (Low-temperature flexibility) ความร้อนสะสมในยาง (Heat build up) ต่ำ และสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ดี ซึ่งในปัจจุบัน บริษัท ยางสังเคราะห์ไทย จำกัด บริษัทในเครือของบริษัท อุเบะ เทคนิคอล เซ็นเตอร์ (เอเชีย) จำกัด บริษัท ผู้นำด้านการผลิตยางบิวทาไดอีน ได้ทำการสังเคราะห์ยางบิวทาไดอีนอยู่หลายเกรด จำแนกตามความแตกต่างของโครงสร้างของยางบิวทาไดอีน เช่น ปริมาณการจัดเรียงตัวแบบ cis-1,4 แบบ trans-1,4 และแบบ vinyl-1,2 ของยางบิวทาไดอีนที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ยาง UBEPOL VCR® ยางบิวทาไดอีนเกรดใหม่เชิงการค้าที่ทางบริษัท อุเบะ เทคนิคอล เซ็นเตอร์ (เอเชีย) จำกัด สังเคราะห์โครงสร้าง vinyl-1,2 ลักษณะเป็นเส้นใย ขนาดไมโครเมตร (Micro fibers) กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของยางบิวทาไดอีน ซึ่งจากการมีโครงสร้างดังกล่าวนี้ ข้อมูลผลิตภัณฑ์ (Data sheet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบุว่า ให้สมบัติพลวัตที่ดีแก่ผลิตภัณฑ์ยาง นอกจากนี้ยังมียางบิวทาไดอินที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันอีกด้วย

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาแนวเปรียบเทียบผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอินที่มีต่อสมบัติของยางผสมครูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน ศึกษาผลของอัตราส่วนยางผสมครูปยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน และศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน ในการพัฒนาสูตรยางเป็นผลิตภัณฑ์ยางถนนชนิดรถจักรยานยนต์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโมเลกุลของยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันต่อสมบัติและการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการพัฒนาสูตรยางเป็นผลิตภัณฑ์ยางถนนชนิดรถจักรยานยนต์ เช่น ปริมาณ 1,2 และ 1,4 ที่แตกต่างกัน โครงสร้างสายโซ่ตรงและกิ่ง การกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal และ Bimodal นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอัตราส่วนยางผสมครูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน รวมทั้งผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอินที่มีต่อสมบัติของยางผสมครูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันได้แก่ ผลของปริมาณ 1,2 butadiene rubber (0.0-17.0 %wt) โครงสร้างสายโซ่โมเลกุล (โครงสร้างสายโซ่ตรงและกิ่ง) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (แบบ Unimodal และ Bimodal) ของยางบิวทาไดอิน

2. ศึกษาผลของอัตราส่วนยางผสมครูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน (อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก)

3. ศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน (เขม่าดำ N330 ซิลิกา Hisil®255 และ Sidistar®)

4. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของยางตัวอย่าง ได้แก่

- o ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)
- o ลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristics)
- o สมบัติเชิงกล (Mechanical properties)
 - ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)
 - ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)
 - โมดูลัสยาง (Rubber modulus, M100, M300)
 - ความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)
 - ความแข็งกด (Hardness)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance)
- การเสียรูปถาวรหลังการกด (Compression set)
- ความกระด้างกระดอน (Rebound resilience)
- o สมบัติทางกายภาพ (Physical properties)
 - ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยาง (Crosslinking density of rubber) ด้วยเทคนิคการบวมตัวในสารละลาย
- o สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties)
 - การวิเคราะห์สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic analysis)
 - ความร้อนสะสม (Heat build up) ในยาง
 - ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา (Ross flex resistance)
 - ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศา (De Mattia flex cracking resistance)
- o สัณฐานวิทยา (Scanning electron microscopy, SEM)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างโมเลกุลของยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันต่อสมบัติและการใช้งานมากยิ่งขึ้น เช่น ผลของปริมาณ 1,2 butadiene rubber ที่แตกต่างกัน โครงสร้างสายโซ่ตรงและกิ่ง การกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal และ Bimodal ฯลฯ นอกจากนี้ยังเข้าใจผลของอัตราส่วนยางผสมคงรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน รวมทั้งผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน
2. สามารถนำความรู้ความเข้าใจที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมยาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ยางถนนชนิดรถจักรยานยนต์
3. เกิดการบูรณาการความร่วมมือในการทำวิจัยระหว่างภาครัฐและเอกชน และยกระดับอุตสาหกรรมการแปรรูปยางภายในประเทศไทย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

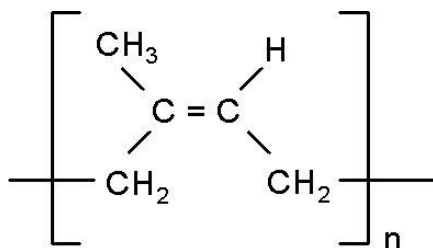
2.1 ยาง (Rubbers)

ยางเป็นพอลิเมอร์ประเภทหนึ่ง มีองค์ประกอบหลักเป็นสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) เหมือนกับพอลิเมอร์อื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ยางมีสมบัติแตกต่างจากพอลิเมอร์อื่น ๆ คือสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือขนาดได้หลายเท่าจากความยาวเดิม มีความยืดหยุ่นสูง สามารถยืดและหดกลับได้ใกล้เคียงขนาดและรูปร่างเดิมอย่างรวดเร็ว เมื่อปล่อยแรง

การที่ยางสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดได้อย่างมาก เนื่องจากยางมีน้ำหนักโมเลกุลมาก โมเลกุลจึงเกิดการพันกันของสายโซ่ (Chain entanglement) เป็นผลทำให้สายโซ่โมเลกุลยางมีความแข็งแรง สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างมากโดยไม่ขาดออกจากกัน นอกจากนี้ยางยังมีความยืดหยุ่นสูง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลสามารถเปลี่ยนโครงสร้าง (Conformation) ได้ง่าย โดยการหมุนของสายโซ่ (Chain rotation) ที่ไม่จำเป็น ต้องใช้พลังงานมากในการเปลี่ยนมุมระหว่างพันธะ (Bond angles) สำหรับการที่ยางสามารถกลับคืนสู่รูปร่าง และขนาดเดิมได้อย่างสมบูรณ์เมื่อปล่อยแรง เนื่องจากก่อนการนำยางมาใช้ประโยชน์ ต้องนำยางมาผ่านการเชื่อมโยงหรือเชื่อมขวาง (Crosslinking, Vulcanizing) หรืออาจเรียกว่า การทำให้ยางสุก (Curing) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรง (Linear chains) หรือเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ (3-Dimensional network) หรือเทอร์โมเซต (Thermosets)

2.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) [8-10]

ยางธรรมชาติ หรือยางพารา (Para rubbers) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ซึ่งในเชิงพาณิชย์มากกว่า 90% ได้จากต้นยางพาราที่มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ ฮีเวีย-บราซิลเลียนซิส (Hevea brasiliensis) ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (Cis-1,4 polyisoprene) เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงยาวที่มีหน่วยซ้ำ ๆ กันคือไอโซพรีน (C_5H_8) โครงสร้างโมเลกุลแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปยางดังกล่าวนี้ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก และมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ประมาณ $-72\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ [11]

2.1.1.1 สมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ

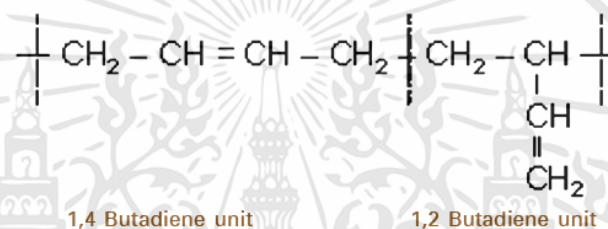
ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่น (Elasticity) สูง เหนียวติดกัน (Tack) มีความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) สูง เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้ยางธรรมชาติตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด (Strain-induced crystallization) ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้น จะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีความร้อนสะสม (Heat build up) ต่ำในระหว่างการใช้งาน สมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ดี มีความต้านทานต่อการล้าตัว (Fatigue resistance) สูงมาก มีความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) สูง แต่ยังคงน้อยกว่ายางสังเคราะห์ชนิดอื่นเล็กน้อย อีกทั้งยังมีการเสีรูปร่างหลังการกด (Compression set) ค่อนข้างต่ำ ทั้งที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงปานกลาง มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulation) และทนทานต่อของเหลวและสารเคมี (Liquid and chemical resistance) อย่างไรก็ตาม ยางดังกล่าวนี้ เสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน โอโซน และแสงแดด (Aging properties) เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีจำนวนพันธะคู่อยู่มาก ส่งผลให้ไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซน จึงเกิดการเสื่อมสภาพ ตามลำดับ

2.1.1.2 การผสมยางธรรมชาติกับยางชนิดอื่น ๆ

ยางธรรมชาติเป็นยางไม่มีขี้ผึ้ง จึงสามารถผสมให้เข้ากันกับยางที่ไม่มีขี้ผึ้งชนิดต่าง ๆ ได้ดี เช่น ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber, BR) ยางสังเคราะห์บิวทาไดอีน (Styrene-butadiene rubber, SBR) และยางพอลิไอโซพรีน (Cis-1,4 polyisoprene, IR) การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์เป็นการรวมเอาสมบัติที่ดีของทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ไว้ด้วยกัน สมบัติที่ดีของยางธรรมชาติที่ถูกส่งผ่านไปให้ยางสังเคราะห์ ได้แก่ ความสามารถในการขึ้นรูปที่ดี ความเหนียวติดกัน สมบัติเชิงพลวัต รวมทั้งความร้อนสะสมต่ำในระหว่างการใช้งาน ในทำนองเดียวกัน สมบัติที่ดีของยางสังเคราะห์บางประการถูกถ่ายเทให้แก่ยางธรรมชาติ เช่น ความต้านทานต่อการขัดถู (เมื่อผสมกับ BR) ความต้านทานต่อความร้อน (เมื่อผสมกับ NBR หรือยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (Ethylene-propylene diene monomer, EPDM)) ความต้านทานต่อน้ำมัน (เมื่อผสมกับ NBR) ความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องจากโอโซน (เมื่อผสมกับ EPDM)

2.1.2 ยางบิวทาไดอิน (Butadiene rubber, BR) [12-17]

ยางบิวทาไดอิน เป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรงยาวที่มีหน่วยซ้ำ ๆ กันคือบิวทาไดอิน (C_4H_6) โดยทั่วไปมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยอยู่ในช่วง 250,000 ถึง 300,000 ซึ่งยางบิวทาไดอินมีการจัดเรียงตัวหลายแบบ เช่น แบบ cis-1,4 แบบ trans-1,4 และแบบ vinyl-1,2 ดังรูปที่ 2.2 ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวริเริ่ม (Initiator) ที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ยางบิวทาไดอินที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ผลิตจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบสารละลาย (Solution polymerization) ซึ่งปัจจุบันยางบิวทาไดอินมีเกรดทางการค้ามากมายที่เป็นทางเลือกให้กับอุตสาหกรรมยางเลือกใช้มาเป็นส่วนผสม ด้วยความแตกต่างของการจัดเรียงตัว โครงสร้างสายโซ่โมเลกุล และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล เป็นต้น แสดงดังตารางที่ 2.1-2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างโมเลกุลของยางบิวทาไดอิน [18]

2.1.2.1 สมบัติทั่วไปของยางบิวทาไดอิน

ยางบิวทาไดอินมีความยืดหยุ่น มีสมบัติความกระด้างกระตอนสูงมาก ความแข็งแรงดิ่งต่ำกว่า ยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทาไดอิน สมบัติพิเศษคือมีความต้านทานต่อการขีดถูสูงมาก มีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำ สมบัติเชิงพลวัตที่ดี ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมขณะใช้งานต่ำ และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง อย่างไรก็ตาม ยางบิวทาไดอินมีพันธะคู่จำนวนมาก ดังนั้นจึงเสื่อมสภาพเร็วในสภาวะที่มีออกซิเจน โอโซน หรือแสงแดดเช่นเดียวกับยางไม่อิ่มตัวชนิดอื่น ๆ

2.1.2.2 การผสมยางบิวทาไดอินกับยางชนิดอื่น ๆ

โดยปกติยางบิวทาไดอินไม่ถูกใช้เพียงชนิดเดียวในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง เนื่องจากการผสมทำได้ยาก โดยเฉพาะเมื่อทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เนื่องจากยางพันรอบลูกกลิ้งได้ยาก (Poor mill banding) ด้วยเหตุนี้ยางชนิดนี้ จึงมักใช้ผสม (Blend) กับยางไม่มีขั้วชนิดอื่น ๆ เช่น ยางธรรมชาติหรือยางสไตรีนบิวทาไดอิน

ตารางที่ 2.1 แนวทางการเลือกใช้อย่างยววิทาไดอิน เกรต UBEPOL BR® [12]

เกรตยวง	ปริมาณ cis/trans/vinyl (wt%)	ความหนืด มุนนี้ (ML ₁₊₄ , 100°C)	ลักษณะเฉพาะ
UBEPOL BR® 150	98/1/1	43	- เป็นยวงเกรตพื้นฐาน - มีความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติ เชิงกลดี
UBEPOL BR® 150L	98/1/1	43	- เป็นชนิดที่มีพอลิเมอร์โครงสร้าง สายโซ่ตรงจำนวนมาก - สมบัติเชิงกลดี ความต้านทานต่อการ ขัดถูดี ความกระดั่งกระดอนสูง และ ความร้อนสะสมต่ำ
UBEPOL BR® 150B	97/2/1	40	- เป็นชนิดที่มีพอลิเมอร์โครงสร้าง สายโซ่กึ่งจำนวนมาก - ง่ายต่อการผสม - ผสมบนเครื่องผสมสองลูกกลิ้งได้ง่าย แม้ในกรณีที่ใช้สารตัวเติมจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แนวทางการเลือกใช้ยางบิวทาไดอีน เกรด UBEPOL VCR® [12]

เกรดยาง	ปริมาณ cis/trans/vinyl (wt%)	ปริมาณ 1,2 resin (wt%)	MWD	ความหนืด มูนี้ (ML ₁₊₄ , 100 °C)	ลักษณะเฉพาะ
UBEPOL VCR® 450	98/1/1	3.8	Bimodal distribution	39	- มีความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลดี
UBEPOL VCR® 800	98/1/1	5.3	Bimodal distribution	40	- มีความสามารถในการขึ้นรูป เช่น การขึ้นรูปแบบอัดรีด (Extrusion) ดีขึ้น เมื่อเทียบกับ UBEPOL VCR® 450
UBEPOL VCR® 412	98/1/1	12.0	Unimodal distribution	45	- เป็นยางเกรดพื้นฐานของ UBEPOL VCR® - มีความสามารถในการขึ้นรูป เช่น การขึ้นรูปแบบอัดรีด (Extrusion) - มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูง อีกทั้งยังมีสมบัติความต้านทานต่อการขยายตัวของรอยแตกดี
UBEPOL VCR® 617	98/1/1	17.0	Unimodal distribution	67	- เป็นยางเกรดพิเศษของ UBEPOL VCR® - มีความสามารถในการขึ้นรูป - มีความแข็งแรงและมอดุลัสสูงกว่า เมื่อเทียบกับ UBEPOL VCR® 412

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 พอลิเมอร์ผสม (Polymer blends) [19-20]

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ อาทิเช่น ความแข็งแรงต่อการกระแทก ความแข็งแรงดึง โมดูลัส และอุณหภูมิเบี่ยงเบนความร้อน (Heat deflection temperature) ฯลฯ โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ เป็นสารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน อย่างไรก็ตาม การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติเป็นไปได้ยาก ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้ จึงไม่ละลายเข้ากันอย่างแท้จริง และเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง พอลิเมอร์ชนิดหนึ่งกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (Continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องมีขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอ มิฉะนั้นส่งผลทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (Defects) ของผลิตภัณฑ์ และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ผสม ดังนั้นในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม จึงต้องพิจารณาถึงสภาพความเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน ซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้ เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่แตกต่างกัน จึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระและเกิดการแยกชั้น

ความเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ (Miscibility of polymers) พิจารณาจากสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic) สำหรับพอลิเมอร์ที่สามารถผสมเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวนั้น จะต้องมียุทธศาสตร์ค่า Gibbs free energy ของการผสม (ΔG_{mix}) เป็นลบ ซึ่งค่า ΔG_{mix} นั้นหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T\Delta S_{mix} \quad (2.1)$$

อย่างไรก็ตาม ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงนั้น มีค่าเอนโทรปี (Entropy, ΔS_{mix}) น้อยมาก ดังนั้น ถ้าค่า ΔG_{mix} มีค่าเป็นลบได้ สามารถเกิดได้กรณีเดียวคือ ต้องมีค่าเอนทัลปี (Enthalpy, ΔH_{mix}) ของการผสมเป็นลบ นั้นแสดงว่ากระบวนการผสมต้องเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic process) ซึ่งการผสมจะต้องเกิดอันตรกิริยาของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน

ชนิดของพอลิเมอร์ผสม (Types of polymer blends) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ

1. ผสมเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ (Completely miscible blend) พอลิเมอร์ที่ผสมกันได้อย่างสมบูรณ์นั้น จะมีค่า $\Delta H_{mix} < 0$ เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาที่จำเพาะขึ้น
2. ผสมเข้ากันได้บางส่วน (Partially miscible blend) โดยพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันนั้น มีส่วนหนึ่งที่สามารถละลายกับพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งได้ ส่งผลทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีสัญญาณวิทยาที่มีความละเอียดและมีสมบัติที่ยอมรับได้ มักเรียกพอลิเมอร์ผสมชนิดนี้ว่า “Compatible polymer blend” ซึ่งพอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition

temperature, T_g) ของพอลิเมอร์แต่ละตัวปรากฏอยู่ T_g นั้น จะเกิดการเลื่อน (Shift) จากค่า T_g ของ Pure polymer แต่ละตัวเข้ามาหากัน

3. ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Fully immiscible blend) พอลิเมอร์ผสมชนิดนี้ มีสัณฐานวิทยาที่หยาบ มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคไม่ดี ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้แย้ และไม่สามารถใช้งานได้ อย่างไรก็ตาม สามารถเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับพอลิเมอร์ผสมชนิดนี้ได้ด้วยการใช้สารช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ (Compatibilizer)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์

สมบัติของพอลิเมอร์ขึ้นกับ องค์ประกอบทางเคมีของสายโซ่พอลิเมอร์ (Chemical composition) รูปร่างโมเลกุลและความแข็งของสายโซ่ (Shape and chain stiffness) (ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) และอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Melting temperature, T_m) น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight, MW) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution, MWD) และการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ (Alignment of polymer chains) ซึ่งในงานวิจัยมีประเด็นศึกษาดังต่อไปนี้

2.3.1 การจัดเรียงตัวแบบ cis-1,4 แบบ trans-1,4 และแบบ vinyl-1,2 ของยางบิวทาไดอิน [16-17]

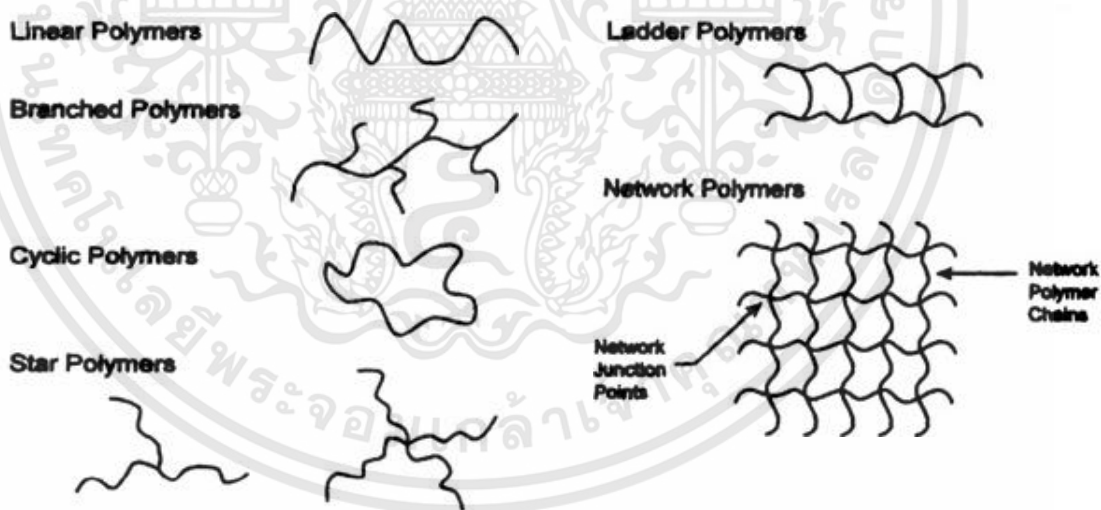
ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์ยางบิวทาไดอิน สามารถเกิดปฏิกิริยาจากบิวทาไดอินมอนอเมอร์ผ่านกลไก 1,4-addition และ 1,2-addition ได้เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างต่างกัน ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งโครงสร้างที่เกิดผ่านกลไก 1,4-addition นั้น ได้เป็นโครงสร้าง 1,4 butadiene rubber ที่สายโซ่หลักประกอบด้วยพันธะคู่ ซึ่งแบ่งการจัดเรียงตัวออกเป็นแบบ cis-1,4 ดังรูปที่ 2.3 (ก) และแบบ trans-1,4 ดังรูปที่ 2.3 (ข) ส่วนโครงสร้างที่เกิดผ่านกลไก 1,2-addition ได้เป็นโครงสร้าง 1,2 butadiene rubber ที่มีการจัดเรียงตัวแบบ vinyl-1,2 ดังรูปที่ 2.3 (ค) โดยสายโซ่หลักประกอบด้วยพันธะเดี่ยวที่มีหมู่ห้อย ซึ่งปริมาณของโครงสร้างดังกล่าวที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดตัวริเริ่ม (Initiator) ในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน แสดงปริมาณ cis-1,4/trans-1,4/vinyl-1,2 เมื่อใช้ชนิดของตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.4 ผลของการจัดเรียงตัวของยางบิวทาไดอีนต่อค่า T_g และ T_m [16]

โครงสร้าง	T_g (°C)	T_m (°C)
cis-1,4	-106	2
trans-1,4	-107	97/125
syndiotactic-1,2	-28	200
isotactic 1,2	-15	126
atactic 1,2	-4	none

2.3.2 โครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์ (Structures of polymer chains) [22]

สายโซ่พอลิเมอร์เป็นสายโซ่ยาวที่เกิดหน่วยซ้ำ ๆ (Repeating units) ซึ่งเป็นกลุ่มของอะตอมหลาย ๆ หน่วยมาต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds) เนื่องจากพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลมาก สายโซ่โมเลกุลมีความยาว และมีจำนวนมาก การที่สายโซ่ของพอลิเมอร์มีโครงสร้างแตกต่างกัน ย่อมส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางแสง สมบัติทางความร้อน เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวนี้มีหลายลักษณะ แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างสายโซ่พอลิเมอร์ [23]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของโครงสร้างสายโซ่ตรงและกึ่งของยางบิวทาไดอีน ซึ่งตามทฤษฎีนั้น โครงสร้างสายโซ่กึ่ง เป็นโครงสร้างที่มีจำนวนปลายสายโซ่ (Chain ends) มากกว่า เมื่อเทียบกับโครงสร้างสายโซ่ตรง ซึ่งบริเวณปลายสายโซ่เป็นบริเวณที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่หรือองศาอิสระ (Degrees of freedom) สูง ดังนั้นโครงสร้างที่มีจำนวนปลายสายโซ่โมเลกุลมาก สายโซ่

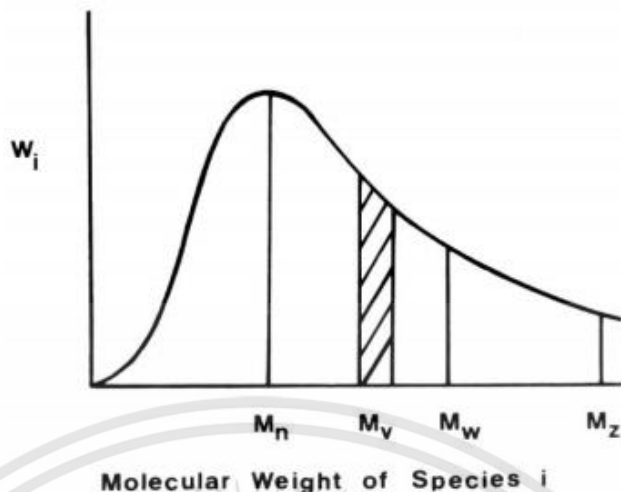
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลมีโอกาสเสียดสีขัดถูกันมาก จึงทำให้เกิดความร้อนสะสมในยางสูง และสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ไม่ดี ตามลำดับ นอกจากนี้โครงสร้างสายโซ่ตรงเป็นโครงสร้างที่มีความเป็นระเบียบ โครงสร้างเกิดการจัดเรียงตัวอัดแน่นกว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างสายโซ่กึ่ง อาจส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูงกว่าโครงสร้างสายโซ่กึ่ง ตามลำดับ และโครงสร้างสายโซ่กึ่งของยางบิวทาไดอีน เป็นลักษณะเส้นตรงที่ไม่มีความเกาะ (Stearic effect) จึงส่งผลให้โครงสร้างมีความยืดหยุ่น อาจทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าโครงสร้างสายโซ่ตรง ตามลำดับ

2.3.3 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Molecular weight distribution of polymer, MWD) [22, 24-28]

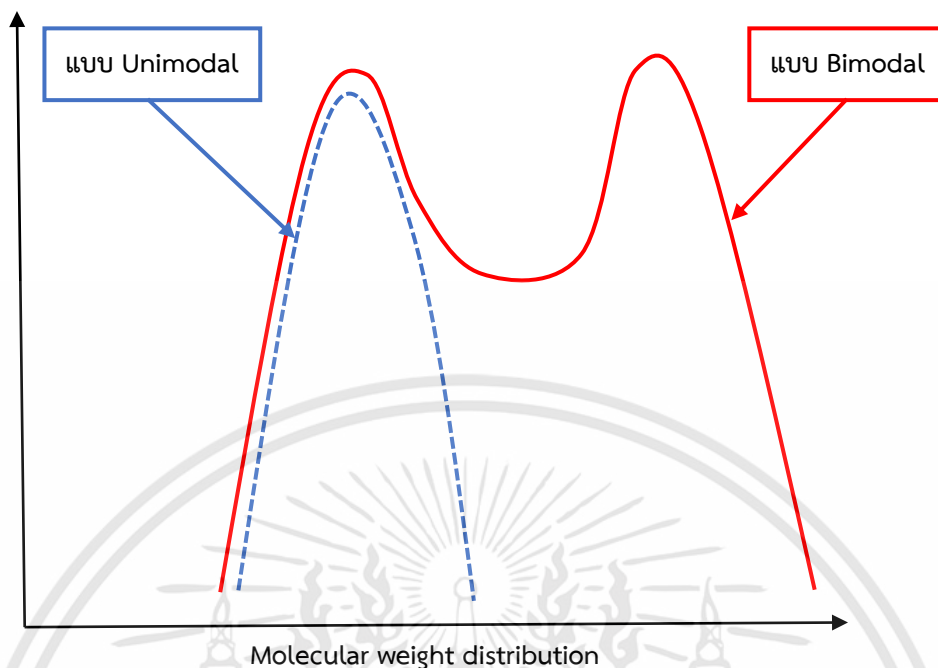
ในปัจจุบันพอลิเมอร์สามารถถูกทำการสังเคราะห์ให้มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลได้หลายแบบ ซึ่งแบ่งได้หลายประเภท เช่น แบ่งตามค่า Molecular weight distribution (MWD) หรือค่า Polydispersity index (PDI) โดยค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (M_w) และน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (M_n) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความกว้างของกราฟในรูปที่ 2.5 กล่าวคือถ้า M_w มีค่าห่างจาก M_n มาก และ MWD มีค่าสูง กราฟที่ได้จะมีความกว้าง ในทางตรงกันข้าม M_w มีค่าใกล้เคียง M_n มาก และค่า MWD มีค่าต่ำ กราฟที่ได้มีลักษณะแคบ

การที่ MWD มีค่าสูง กราฟที่ได้จะมีความกว้างมาก ซึ่งประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและต่ำ โดยพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีข้อดีคือมีสมบัติต่าง ๆ ดี เช่น มีสมบัติเชิงกลสูง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลยาว เกี่ยวพันกันมาก จึงสามารถรับแรงได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ข้อจำกัดคือมีความหนืดขณะหลอมเหลว (Melt viscosity) สูง ต้องใช้เวลาและพลังงานในการขึ้นรูปสูง ส่งผลต่อต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับบางกระบวนการขึ้นรูปที่ต้องการสมบัติการไหลที่ดี ตัวอย่างเช่นการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ส่วนพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำนั้น จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่คล้ายสารหล่อลื่นในระบบ ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้ง่ายขึ้น อย่างไรก็ตาม น้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำมากเกินไป อาจเกิดการไหม้ เนื่องจากท่อนอุณหภูมิในการผสมและการขึ้นรูปไม่ดี ซึ่งอาจเกิดเป็นรอยตำหนิ (Defects) และส่งผลเสียต่อสมบัติของพอลิเมอร์ สำหรับการที่ MWD มีค่าต่ำ กราฟที่ได้มีลักษณะแคบ หมายความว่าพอลิเมอร์นั้นมีสายโซ่โมเลกุลที่น้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันมาก ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวที่อัดแน่น และให้สมบัติที่ดี ตามลำดับ ซึ่งสมบัติดังกล่าวนี้ ขึ้นกับค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยว่าน้อยมากเพียงใด



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลกับสัดส่วนโดยน้ำหนัก [24]

นอกจากนี้การกระจายน้ำหนักโมเลกุลยังสามารถแบ่งตามลักษณะของกราฟ ซึ่งขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้น ๆ ที่แตกต่างกัน แบ่งออกเป็นการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal และ Bimodal ดังรูปที่ 2.6 กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีลักษณะการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal นั้น ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยใกล้เคียงกัน มักให้สมบัติเชิงกลที่ดี เนื่องจากการที่พอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวกันที่อัดแน่น ทั้งนี้ขึ้นกับค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยด้วย สำหรับพอลิเมอร์ที่มีลักษณะการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal นั้น ประกอบด้วยน้ำหนักโมเลกุลต่ำและสูง ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลต่ำเป็นส่วนที่มีผลดีต่อการผสม และการขึ้นรูปด้วยการทำหน้าที่เสมือนสารหล่อลื่น อย่างไรก็ตาม ถ้าพอลิเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยเกินไป อาจมีสมบัติด้อยจนอาจไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ที่สำคัญอาจเกิดการไหม้ และเกิดเป็นรอยตำหนิ ส่งผลเสียต่อสมบัติได้อีกด้วย ส่วนน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นส่วนที่มีผลดีต่อสมบัติเชิงกล เนื่องจากรับแรงได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ข้อจำกัดคือการใช้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก มีความหนืดขณะหลอมเหลวสูง ต้องใช้เวลาและพลังงานในการขึ้นรูปสูง ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ผู้ผลิตต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2.6 การกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal และ Bimodal

2.4 การแตกหักเนื่องจากความล้า (Fatigue failure) [22, 29-30]

การแตกหัก (Fracture) ของพอลิเมอร์ สามารถนิยามได้เหมือนกับการสร้างพื้นผิวชิ้นใหม่ (New surface area) ภายในชิ้นงานของพอลิเมอร์ โดยการให้แรงจากภายนอก ซึ่งการแตกหักนั้นเป็นการเสียสภาพที่รุนแรงที่ทำให้อายุการใช้งานของพอลิเมอร์สั้นลง

การแตกหักเนื่องจากความล้า (Fatigue failure) หมายถึงการแตกหักของชิ้นงานที่เกิดจากความเค้นที่ได้รับแรงสั่น หรือ “Cyclic loading” ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์มีพฤติกรรมการล้าขึ้นกับความถี่ของแรงอย่างมาก กล่าวคือความถี่สูงทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการเสียสภาพ เนื่องจากการนิ่มตัวจากความร้อน (Thermal softening) อุณหภูมิที่สูงขึ้นเกิดจากการถ่ายเทพลังงานของวัสดุวิสโคอีลาสติก แต่เนื่องจากพอลิเมอร์มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อน (Thermal conductivity) ต่ำ ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมในพอลิเมอร์มาก ไม่ถ่ายเทไปบริเวณอื่น จึงส่งผลให้เกิดการเสียสภาพขึ้น

การเสียสภาพเนื่องจากความล้ามักเกิดผ่านการเริ่มและการขยายของรอยแตก (Crack initiation and propagation) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท

1. การแตกหักจากความล้าแบบเปราะ (Brittle fracture) เกิดเนื่องจากการขยายรอยแตกภายใต้แรงความถี่สูง ซึ่งนำไปสู่การแตกหักแบบเปราะอย่างทันทีทันใด

2. การแตกหักจากความล้าแบบเหนียว (Ductile yielding failure) ภายใต้การสั่นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการเคลื่อนที่และความร้อนสะสม (Heat build up) ในพอลิเมอร์ ซึ่งมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนต่ำ เป็นผลให้แรงที่กระทำมากกว่า Yield stress ของพอลิเมอร์นั้น จึงก่อให้เกิดรอยแตกหักขึ้น

กลไกการแตกหักแบบล้า (Fatigue fracture mechanics) สามารถอธิบายได้โดยใช้ “กฎของปารีส” (Paris law) ซึ่งอาศัยความสัมพันธ์ของอัตราการขยายของรอยแตกที่เกิดจากความล้า (Rate of fatigue crack growth) หรือการเพิ่มขึ้นของความยาวรอยแตกต่อรอบของการให้แรง (Defect length per loading cycle, da/dn) กับ “Stress intensity factor” (ΔK) ที่กล่าวว่า

$$da/dn = A(\Delta K)^m$$

A และ m คือ Power law coefficients ซึ่งมีค่าคงที่สำหรับวัสดุหนึ่ง ๆ ภายใต้สภาวะที่ระบุสำหรับค่า ΔK นิยามเท่ากับ

$$\Delta K = K_1 - K_2 = (\sigma_1 - \sigma_2) Y (a)^{1/2}$$

ค่า σ_1 และ σ_2 คือความเค้นสูงที่สุดและความเค้นต่ำที่สุด ตามลำดับ

2.5 การผสมยาง (Rubber compounding) [31-32]

การผสมยาง (Rubber compounding) คือขั้นตอนการผสมยางดิบที่ยังไม่ผ่านขบวนการเชื่อมโยงกับสารเติมแต่ง (Additives) ต่าง ๆ ของยาง โดยสารเติมแต่งของยางมีหลายชนิด แต่ละชนิดนั้น มีหน้าที่หรือสมบัติที่แตกต่างกัน องค์ประกอบสำคัญของยางคอมพาวนด์ ได้แก่

1. ยาง (Rubbers, Elastomers) เป็นองค์ประกอบหลัก สามารถเลือกใช้ได้หลายรูป เช่น ยางดิบ ยางผสมน้ำมัน (Oil extended rubbers) ยางผสมเขม่าดำ (Rubber-carbon black) ยางรีเคลม (Reclaimed rubbers) ยางเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic elastomers, TPEs) ยางมาสเตอร์แบตช์ (Masterbatches)

2. สารเชื่อมโยง (Vulcanizing agents, Curing agents) หรืออาจเรียกว่าสารเชื่อมขวาง (Crosslinking agents) ภาษาโรงงานเรียกว่า “ยางสุก” มีหลายชนิดเช่น กำมะถัน (Sulfur, S) เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) ออกไซด์ของโลหะ (Metal oxides) เป็นต้น สารเชื่อมโยงทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างของยางจากสายโซ่ตรงให้เป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โดยทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุลยาง (ยกเว้นโครงสร้างของยางเทอร์โมพลาสติกที่มีโครงสร้างคล้ายการเชื่อมโยงอยู่แล้ว) การเลือกชนิดและปริมาณสารเชื่อมโยงขึ้นกับชนิดและสมบัติของยางเชื่อมโยงที่ต้องการ

3. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators) อาจเรียกสั้น ๆ ว่าสารเร่ง ทำหน้าที่ช่วยสารเชื่อมโยงให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้มีอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Rate of vulcanization) เร็วและมีสิทธิภาพขึ้น ลดเวลาเชื่อมโยง (Cure time, Vulcanization time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และใช้สารเชื่อมโยงน้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้สมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงดีขึ้นด้วย การเลือกชนิดและปริมาณสารเชื่อมโยงจะขึ้นกับเวลาเชื่อมโยง (Scorch time) และสมบัติของยางเชื่อมโยงที่ต้องการ

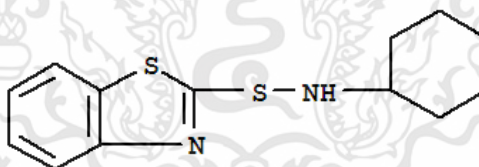
3.1 ชนิดของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง

การใช้งานสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงในอุตสาหกรรมยาง อาจใช้สารเร่งมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกัน สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือ “สารเร่งปฐมภูมิ” (Primary accelerators) ส่วนสารเร่งที่ใช้ปริมาณน้อยกว่าจะเรียกว่าเป็น “สารเร่งทุติยภูมิ” (Secondary accelerators) หรือคิกเกอร์ (Kickers) โดยสารเร่งทั้งสองอาจเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า “ปรากฏการณ์ซินเนียจิสติก” (Synergistic effects) ที่ทำให้ได้อัตราการเชื่อมโยงมากกว่าสารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน สารเร่งปฏิกิริยาแบ่งได้หลายชนิด เช่น

3.1.1 สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides)

สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ เป็นสารเร่งชนิด Delay-action accelerators หรือเริ่มเกิดการเชื่อมโยง (Scorch) ช้า เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ทำให้มีเวลาเพียงพอในการเชื่อมโยง นิยมใช้กับยางที่ต้องใช้เวลาคงหรือขึ้นรูปนาน เนื่องจากหมู่อัลคิล (R) ในโครงสร้างเป็นหมู่ใหญ่ (Bulky) ให้โปรตอน (H^+) ช่วยหนุนให้จุดเริ่มการเชื่อมโยงช้า เวลาเริ่มเชื่อมโยงหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time) นาน ซัลเฟนาไมด์ชนิดที่นิยม ได้แก่

- CBS (N-cyclohexyl benzothiazole-2-sulfenamide)
- TBBS (N-tert-butyl-2-benzothiazolesulfenamide)



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโครงสร้างกลุ่มซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides) [33]

3.1.2 สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มไทเอโซล (Thiazoles)

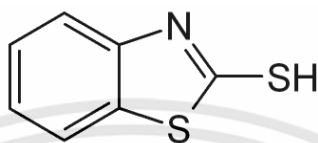
สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ เป็นสารเร่งที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม เนื่องจากราคาไม่แพง และทำให้ยางเกิดการเชื่อมโยงเร็วอีกด้วย ไทเอโซลที่นิยมใช้ ได้แก่

- MBT (2-Mercaptobenzothiazole)
- MBTS (Mercaptobenzothiazole disulfide)

สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ใช้ได้กับยางแทบทุกประเภท ทำให้ยางมีอัตราเร็วในการเชื่อมโยงปานกลาง และยางเชื่อมโยงที่ได้มีสมบัติเชิงกล และมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพสูง โดย MBT ทำให้ยางเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้เร็วกว่า MBTS เนื่องจาก MBTS ต้องแตกตัวด้วยความร้อนเป็น MBT ก่อน จึงสามารถเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้ ดังนั้น MBTS จึงทำให้ยางมีความปลอดภัยในการขึ้นรูปสูงกว่า MBT อย่างไรก็ตาม MBT ทำให้ยางมีอัตราการเชื่อมโยงที่สูงกว่า MBTS ซึ่งทั้ง MBT และ MBTS เป็นสารเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม การใช้สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้เพียงอย่างเดียวอาจให้ยางเชื่อมโยงมีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงต่ำ



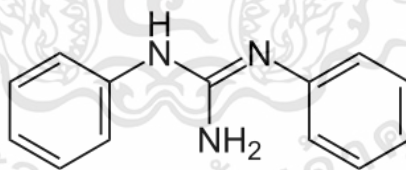
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโครงสร้างกลุ่มไทอะโซล (Thiazoles) [34]

3.1.3 สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มกัวนิติน (Guanidines)

สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ ปัจจุบันไม่นิยมใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงช้า นิยมใช้เป็นสารเร่งทุติยภูมิ โดยใช้ร่วมกับสารเร่งชนิดอื่น กัวนิตินที่นิยมใช้ได้แก่

- DPG (Diphenylguanidine)
- DOTG (Di-*o*-tolylguanidine)

หรืออาจใช้สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้เพียงอย่างเดียวในกรณีที่เชื่อมโยงผลิตภัณฑ์ยางขนาดใหญ่ หรือหนาที่อุณหภูมิไม่สูงเป็นเวลานาน เพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งผลิตภัณฑ์ ปกติ นิยมใช้สารเร่งปฏิกิริยากลุ่มกัวนิตินกับสารเร่งปฏิกิริยากลุ่มซัลเฟนาไมด์และไทเอโซล



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโครงสร้างกลุ่มกัวนิติน (Guanidines) [35]

4. สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators) อาจเรียกสั้น ๆ ว่าสารกระตุ้น ที่นิยมที่สุดคือ ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO) ร่วมกับกรดสเตียริก (Stearic acid) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง โดยการเกิดเป็นซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) หรือเกลือของซิงค์ (Zn^{2+} ions) ที่ละลายในยางเกิดเป็นสารเชิงซ้อน (Complexes) กับสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง ทำให้สารเร่งมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น มีอัตราเร็วของการเชื่อมโยงสูงขึ้น เวลาเชื่อมโยงลดลง และยังช่วยให้สมบัติของยางที่ผ่านการเชื่อมโยงดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่กระตุ้นหรือเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงอีกทีหนึ่ง ดังนั้นอาจเรียกสารนี้ว่าสารกระตุ้นสารเร่ง (Accelerator activators) นอกจากใช้ซิงค์ออกไซด์เป็นตัวกระตุ้นแล้ว อาจใช้ออกไซด์ของลิเทียม (Lithium oxide, Li_2O) ออกไซด์ของแมกนีเซียม (Magnesium oxide, MgO) และสารจำพวกเอมีน (Amines) ตัวกระตุ้นอีกหนึ่งของ ZnO คือกรดไขมัน (Fatty acid) ที่มีจำนวนคาร์บอน 12-18 อะตอม เช่น กรดสเตียริก (เกิดเป็นซิงค์สเตียเรต) กรดลอริก (เกิดเป็นซิงค์ลอรีเอต) นอกจากกรดสเตียริก ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยงแล้ว ยังทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น (Lubricants) ในการผสมยาง ทำให้ความหนืดของยางลดลง และเกิดการผสมยางดีขึ้น

5. สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) เป็นสารที่มีราคาถูกกว่ายางหลัก ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อและลดต้นทุนให้กับผลิตภัณฑ์ยาง สารตัวเติมบางชนิดนอกจากใช้ลดต้นทุนแล้วยังเพิ่มความแข็งแรงหรือเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยาง และทำให้ยางขึ้นรูปง่าย เช่น เขม่าดำ (Carbon black, CB) ซิลิกา (Silica) เป็นต้น แต่บางชนิดใช้เพื่อเพิ่มเนื้อ ลดต้นทุนเพียงอย่างเดียว เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) เคลย์ (Clay) เป็นต้น ประสิทธิภาพการเสริมแรงขึ้นกับชนิดและเกรดที่เลือกใช้

6. สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (Antidegradants) ได้แก่ สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidants) สารป้องกันโอโซน (Antiozonants) รวมทั้งสารอื่น ๆ ที่ช่วยลดการเสื่อมสภาพของยางจากสิ่งแวดล้อม เช่น แสงแดด ความร้อน รังสียูวี เป็นต้น

7. สารช่วยกระบวนการผลิต (Processing aids) เป็นสารเคมีที่ใส่เพื่อช่วยปรับปรุงให้สามารถผสมหรือขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ง่ายขึ้น

8. สารหล่อลื่น (Lubricants) เป็นสารช่วยหล่อลื่นหรือลดแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ หรือหล่อลื่นระหว่างเครื่องผสมกับวัสดุ ช่วยกระบวนการผลิตทำให้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้ง่ายขึ้น เช่น น้ำมัน แวกซ์ เป็นต้น

9. พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) หรือสารเพิ่มความนิ่ม (Softeners) เป็นสารที่ใส่เพื่อเพิ่มความนิ่มหรือความยืดหยุ่นของยางบางชนิดที่มีความแข็งสูงเกินไป เช่น CR, NBR, CSM

10. สารหน่วง (Retarders) เป็นสารที่เพิ่มความสามารถในการเก็บยางคอมพาวนด์ได้นานขึ้น โดยไม่เกิดการเชื่อมโยงก่อนเวลา (Scorch) หรือยางตาย ไหลไม่ได้หรือขึ้นรูปไม่ได้ อาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงช้าลง มีเวลานานเพียงพอในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

11. เปปไทเซอร์ (Peptizers) เป็นสารช่วยเร่งเกิดการตัดสายโซ่เร็วขึ้น ช่วยลดเวลาการบดย่อย (Mastication) นิยมใช้กับยางดิบที่แข็ง มีน้ำหนักโมเลกุลมาก เช่น NR

12. สารให้สี (Colorants) เป็นสารที่เปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ยางให้มีสีสันสวยงามตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. สารให้ฟอง (Blowing agents) เป็นสารที่ใช้เฉพาะการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูพรุนหรือ โฟมยาง มีโครงสร้างแบบเซลล์ูลาร์ (Cellular structure) เช่น ฟองน้ำยาง โฟมยาง

14. สารให้กลิ่น (Odorants) เป็นสารที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีกลิ่นหอม หรือระงับกลิ่นของ ยางที่ไม่พึงปรารถนา

15. สารเพิ่มการยึดติด (Tackifiers) เป็นสารช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติด (Tackiness) ที่ผิวหน้ายางให้เหนียวและยึดติดกับวัสดุอื่นหรือยางด้วยกันเองได้ดีขึ้น นิยมใช้กับยางที่ยึดติดไม่ดี หรือต้องมีการประกอบยางแต่ละส่วนเข้าด้วยกันขณะขึ้นรูป

2.6 สารตัวเติม (Fillers) [31, 36-38]

สารตัวเติมหรือสารเพิ่มเนื้อ (Fillers) เป็นหนึ่งในสารเติมแต่งที่สำคัญที่สุดของยาง เนื่องจาก สารตัวเติมมีราคาถูกเทียบกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ สามารถใช้ผสมในยางเพื่อ เพิ่มปริมาณของยางคอมพาวนด์หรือผลิตภัณฑ์ยาง นั่นคือเป็นการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้สาร ตัวเติมบางชนิดยังสามารถเสริมแรง (Reinforcement) ให้กับยาง คือทำให้พอลิเมอร์ผสมสารตัวเติม มีความแข็งแรงสูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น

2.6.1 เขม่าดำ (Carbon black)

เขม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่ใช้กันมากที่สุดในอุตสาหกรรมยาง องค์ประกอบหลักของ เขม่าดำคือธาตุคาร์บอน อนุภาคของเขม่าดำมีโครงสร้างกิ่งแกรไฟต์ดังแสดงในรูปที่ 2.10 นั่นคือ อะตอมของคาร์บอนจัดเรียงตัวอย่างเป็นชั้น ๆ ขนานกัน เขม่าดำที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง ส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-100 นาโนเมตร



รูปที่ 2.10 อนุภาคของเขม่าดำ [39]

2.6.1.1 ขนาดอนุภาคและพื้นที่ผิวจำเพาะของเขม่าดำ

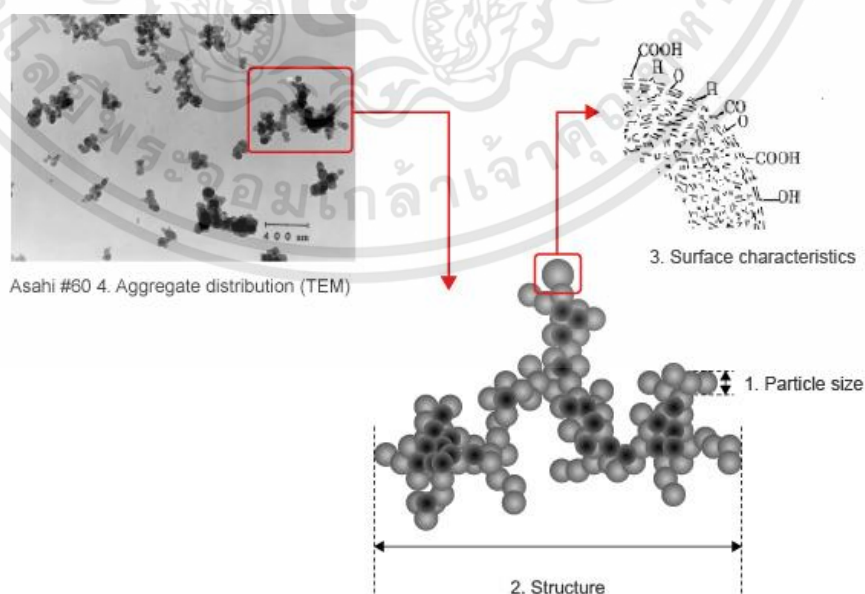
อนุภาคปฐมภูมิของเขม่าดำมีรูปร่างเป็นทรงกลมและอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า แอกรีเกต ในทางทฤษฎีเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิล็ก มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง จัดเป็นเขม่าดำที่เสริมแรงให้แก่ง่ายได้ดี ตามลำดับ

2.6.1.2 โครงสร้างของเขม่าดำ

โครงสร้างของเขม่าดำบ่งบอกถึงลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคเขม่าดำ นอกจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคปฐมภูมิเกิดเป็นแอกรีเกต (Aggregates) ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิแล้ว แอกรีเกตแต่ละกลุ่มยังสามารถเกาะกลุ่มกันได้อย่างหลวม ๆ ด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อนหรือเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิที่เรียกว่า แอ็กโกลเมอเรต (Agglomerates)

2.6.1.3 ความว่องไวพื้นผิวของเขม่าดำ

เขม่าดำประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอนประมาณ 90-95% ส่วนองค์ประกอบอื่น ๆ ได้แก่ ออกซิเจน และไฮโดรเจน แสดงดังรูปที่ 2.11 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำค่อนข้างแตกต่างกันมาก เนื่องจากพื้นผิวของเขม่าดำประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย และการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้บนพื้นผิวก็แตกต่างกันด้วย หมู่ฟังก์ชันเคมีบนพื้นผิวเหล่านี้มีผลต่อความว่องไวทางปฏิกิริยา (Surface activity) และยังมีผลต่ออัตราเร็วของการคงรูปยางอีกด้วย การเพิ่มขึ้นของปริมาณออกซิเจนในเขม่าดำ ทำให้ยางมีค่าระยะเวลาเริ่มเชื่อมโยงยาวขึ้น มีอัตราเร็วในการคงรูป และค่ามอดูลัสยางต่ำลง



รูปที่ 2.11 ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำ [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.4 อันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำและยาง (Black – rubber interactions)

อันตรกิริยา (Interactions) ระหว่างเขม่าดำและยางมีความสำคัญ เนื่องจากมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการเสริมแรง (Reinforcement) ของเขม่าดำในยาง คือถ้าเขม่าดำมีอันตรกิริยากับยางมาก ทำให้ยางผสมเขม่าดำมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ยางผสมเขม่าดำที่มีอันตรกิริยาระหว่างกันน้อย อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเขม่าดำและยางเกิดในหลายลักษณะ ได้แก่

1. การยึดเกาะทางกายภาพ (Physical adsorption) เนื่องจากเขม่าดำโดยเฉพาะชนิดที่มีโครงสร้างสูงมีความซับซ้อนเป็นกึ่งก้านและมีช่องว่างระหว่างอนุภาคเขม่าดำ ทำให้สายโซ่โมเลกุลยางสามารถแทรกตัวระหว่างโครงสร้างและเกิดการยึดติดที่ดีกับเขม่าดำ เช่น เกิดการล็อกคิตเชิงกล (Mechanical interlocking)

2. การยึดเกาะด้วยพันธะเคมี (Chemical bonding) ที่บริเวณพื้นผิวของเขม่าดำมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น ที่บริเวณริมแผ่นแกรไฟต์ (Graphite basal planes) โดยเฉพาะในเขม่าดำบางชนิด เช่น เขม่าดำชนิดเฟอร์เนซ (Furnace blacks) และชันแนล (Channel blacks) มีหมู่ฟังก์ชันที่มีอะตอมของออกซิเจน เช่น หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl) ฟีนอล (Phenol) ควิโนน (Quinone) และแลคโตน (Lactone) หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อกิ่ง (Grafting) ทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมต่อระหว่างเขม่าดำกับสายโซ่โมเลกุลของยาง อาจเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการผสม (Compounding) การขึ้นรูป (Processing) หรือระหว่างการเชื่อมโยง (Vulcanization) เนื่องจากในการผสมที่เกิดแรงเฉือนสูง (High shear stress) อาจเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลของยาง เกิดเป็นอนุมูลอิสระ และเกิดปฏิกิริยาต่อกิ่ง ทำให้เกิดพันธะเคมีเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่โมเลกุลของยางกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวเขม่าดำ

2.6.1.5 การเปลี่ยนแปลงของเขม่าดำเมื่อผสมกับยาง

เมื่อผสมเขม่าดำกับยางด้วยเครื่องผสม เริ่มแรกของการผสมจะเกิดการแทรก (Penetration) ของสายโซ่โมเลกุลยางในช่องว่างระหว่างอนุภาคโครงสร้างกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือแอกโกลเมอเรตของเขม่าดำ ในขั้นนี้ถ้ายางมีอันตรกิริยามากกับเขม่าดำ หรือเกิดเป็นยางบาวด์ (Bound rubber) ปริมาณมาก ทำให้เขม่าดำเกิดการกระจายตัว (Dispersion) ในยางได้ยาก เนื่องจากยางบาวด์ยึดแอกกรีเกตของเขม่าดำเข้าไว้ด้วยกัน ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นสาเหตุให้เขม่าดำที่มีโครงสร้างต่ำอัดตัวกันแน่นหรือเขม่าดำขนาดเล็กที่มีพื้นที่ผิวมากเกิดการผสมยาก กระจายตัวในยางได้ยาก การผสมที่ดีทำให้เกิดการแตกออกของกลุ่มก้อนเขม่าดำ ในขณะที่การผสมยางกับเขม่าดำด้วยแรงเฉือนสูง กลายเป็นเขม่าดำแอกกรีเกตที่เป็นโครงสร้างแบบปฐมภูมิกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในยาง ความยากง่ายหรือปริมาณในการทำให้กลุ่มก้อนเขม่าดำแตกออกจากกันและกระจายในยางจะขึ้นกับหลายปัจจัยเช่น

- ยางมีความหนืด (Viscosity) สูง มากพอที่จะทำให้เกิดแรงเฉือนสูง
- แรงยึดเหนี่ยวในกลุ่มก้อนแอกโกลเมอเรตต่ำ
- เครื่องผสมทำให้เกิดแรงเฉือนขณะผสมสูง

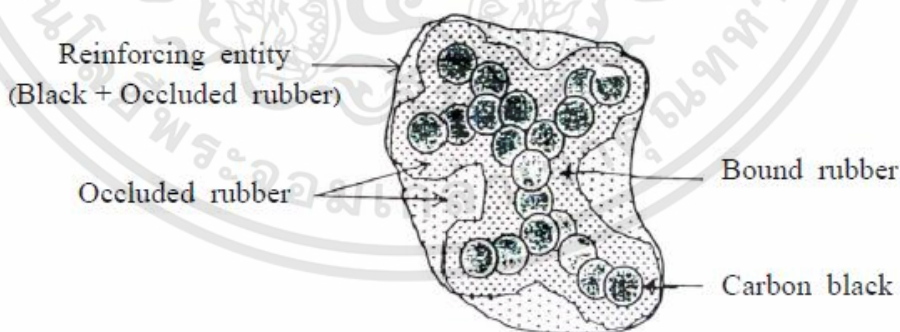
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.6 ยางบาวด์ (Bound rubber)

ยางบาวด์คือยางส่วนที่ติดอยู่กับโครงสร้างของเขม่าดำ ซึ่งยึดติดกับโครงสร้างเขม่าดำอย่างแข็งแรงมาก ไม่หลุดออกแม้ว่าทำการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ดี (Good solvent) การเกิดยางบาวด์เป็นหลักฐานที่เด่นชัดว่า ยางเกิดอันตรกิริยากับเขม่าดำ เช่น เกิดการยึดเกาะทางกายภาพ (Physical adsorption) เกิดพันธะเคมี (Chemical bonding) เกิดการยึดเกาะทางเคมีหรือเคมีซอร์พชัน (Chemisorption) ฯลฯ ทำให้ยางเกิดการยึดเกาะที่ติดบนพื้นผิวหรือภายในช่องว่างของโครงสร้างเขม่าดำ ปริมาณยางบาวด์ในยางผสมเขม่าดำสัมพันธ์กับลักษณะของเขม่าดำ คือเขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงและมีขนาดเล็กหรือพื้นที่ผิวสูง (Large surface area) จะเกิดยางบาวด์ปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดการเสริมแรงของเขม่าดำมากขึ้น ดังรูปที่ 2.12

2.6.1.7 ยางออกคลู๊ด (Occluded rubber)

ยางออกคลู๊ดคือยางส่วนที่แทรกตัวอยู่ในช่องว่าง (Voids) ในโครงสร้างแอกกรีเกตของเขม่าดำ ดังรูปที่ 2.12 จะเห็นได้ว่ายางออกคลู๊ดมีความหมายกว้างและครอบคลุมส่วนของยางบาวด์ (Bound rubber) กล่าวคือ ยางออกคลู๊ดมีความหมายรวมยางที่อยู่ภายในช่องว่างของเขม่าดำที่ไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ รวมกับยางที่เกิดอันตรกิริยาเช่นพันธะเคมี การยึดเกาะเชิงกล ฯลฯ ข้อดีของยางออกคลู๊ดคือยางออกคลู๊ดที่แทรกอยู่ในช่องว่างของเขม่าดำ ทำให้ปริมาตรของส่วนเสริมแรง (Reinforcing entity) เพิ่มขึ้น คล้ายกับทำการเติมเขม่าดำในยางมากขึ้นหรือเพิ่มอัตราส่วนโดยปริมาตรของเขม่าดำในยาง (Effective volume fraction of carbon black) ทำให้ยางผสมเขม่าดำมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ปริมาณยางออกคลู๊ดจะสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาตรช่องว่างในเขม่าดำ ดังนั้นเขม่าดำที่มีโครงสร้างสูงจะเกิดยางออกคลู๊ดมาก



รูปที่ 2.12 ภาพวาดแสดงโครงสร้างของเขม่าดำ Bound rubber และ Occluded rubber รวมเป็นส่วนเสริมแรง (Reinforcing entity) [31]

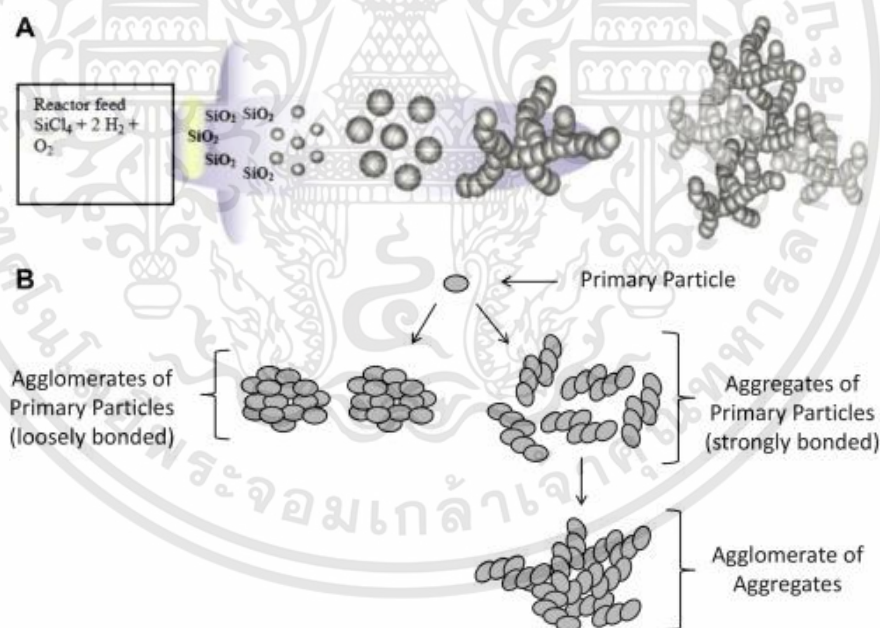
2.6.2. ซิลิกา (Silica)

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่สามารถเสริมแรงที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับสารตัวเติมสีไม่ดำอื่น ๆ โดยเฉพาะซิลิกาที่มีขนาดเล็ก ซิลิกามีสูตรโครงสร้างเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ข้อดีของซิลิกาคือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่นเพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาด ลดความร้อนสะสมในยาง เพิ่มความต้านทานต่อการขีดถู และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในยาง เป็นต้น ในการใช้งานซิลิกานิยมใช้สารคู่ควบ (Coupling agents) เช่นสารประกอบซิลเลน (Silane coupling agent) เคลือบผิวอนุภาคซิลิกาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างวัสดุภาค ทำให้สมบัติของยางดีขึ้น

2.6.2.1 โครงสร้างของซิลิกา

ซิลิกาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมยางมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิอยู่ในช่วง 10-40 นาโนเมตร อย่างไรก็ตาม ซิลิกาไม่อยู่ในรูปอนุภาคปฐมภูมิแต่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าแอกกรีเกต เกิดเป็นโครงสร้างปฐมภูมิ ซึ่งโครงสร้างปฐมภูมินี้ ไม่สามารถถูกทำลายได้ในระหว่างกระบวนการผสม เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดทางเคมีที่แข็งแรง (พันธะโควาเลนต์) นอกจากนี้แอกกรีเกตของซิลิกายังชอบอยู่รวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่เกิดเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ และเรียกกลุ่มก้อนขนาดใหญ่นี้ว่า แอ็กโกลเมอเรต เมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำ โครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกามีความแข็งแรงสูงกว่า เนื่องจากการเกาะกลุ่มกันของซิลิกาเกิดจากแรงดึงดูดของพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ที่พบในกรณีของเขม่าดำ ดังรูปที่ 2.13



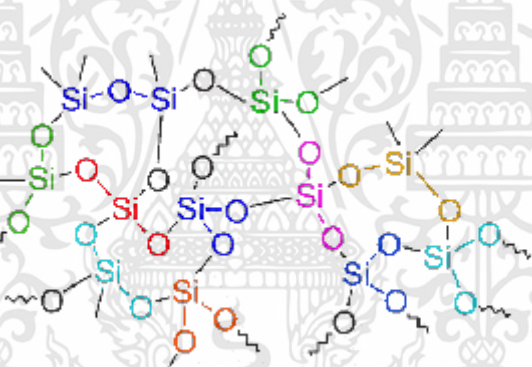
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของซิลิกา [41]

2.6.2.2 พื้นผิวจำเพาะของซิลิกา

พื้นผิวจำเพาะเป็นปัจจัยสำคัญในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเสริมแรงในยาง ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคปฐมภูมิเล็ก มีพื้นผิวจำเพาะสูง และให้การเสริมแรงที่ดี

2.6.2.3 การดูดซับสารเคมีของซิลิกา

พื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ในปริมาณมาก ดังรูปที่ 2.14 พื้นผิวของซิลิกาจึงมีความเป็นขี้และมีควมว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ สูง ดังนั้นซิลิกาจึงมีแนวโน้มที่จะดูดซับสารเคมีต่าง ๆ มาเกาะบนพื้นผิวได้ดี ความชื้นในซิลิกาส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของยาง ในระหว่างกระบวนการผลิตและกระบวนการขึ้นรูป ดังนั้นผู้ผลิตซิลิกาจึงจำเป็นต้องทำการควบคุมสภาวะการผลิต เพื่อให้ได้ซิลิกาที่มีปริมาณความชื้นคงที่ ถ้าปริมาณความชื้นในซิลิกาสูงขึ้น ซิลิกาจะแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ยากขึ้นเล็กน้อย เวลาที่ใช้ในการคงรูปยางที่คงรูปด้วยระบบกำมะถัน โดยใช้สารเร่งปฏิกิริยาที่ไม่เป็นต่างก็จะยาวขึ้น เนื่องจากซิลิกาที่อิมตัวด้วยน้ำจะหน่วงปฏิกิริยาคงรูป ทำให้ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากน้ำแล้ว หมู่ไฮดรอกซิลยังทำให้ซิลิกาชอบดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นต่าง เช่น DPG หรือ DOTG จึงทำให้สารเร่งปฏิกิริยาในยางมีปริมาณลดลง ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้เพื่อชดเชยให้กับปริมาณที่ถูกดูดซับได้ ตกว่าสารอื่น ๆ ดังนั้น ถ้าซิลิกาดูดซับน้ำไว้มากในระหว่างการเก็บรักษาจะทำให้ปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่เป็นต่างถูกดูดซับน้อยลง กรณีนี้จะส่งผลให้ปฏิกิริยาคงรูปเกิดได้เร็วมากขึ้น



รูปที่ 2.14 องค์ประกอบของซิลิกา [42]

2.6.2.4 การเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา

ซิลิกาเป็นสารตัวเติมที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ทำให้ซิลิกามีความเป็นขี้สูง ซิลิกาจึงเข้ากับยางที่ไม่ขี้ได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) ลงไปเพื่อเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกา โดยทั่วไปสารคู่ควบไซเลนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่คือหมู่อัลคอกซี (Alkoxy) และหมู่ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organo functional groups)

เมื่อเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปในระบบ หมู่อัลคอกซีเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนพื้นผิวของซิลิกาในระหว่างกระบวนการผสมเกิดเป็นพันธะซิลอกเซนที่เสถียรและปลดปล่อยแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาออกมา ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้บนพื้นผิวของซิลิกามีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลลดลง ด้วยเหตุนี้การเติมสารคู่ควบไซเลนจึงทำให้อันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของซิลิกาตกลง ซิลิกาจึงแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ง่ายขึ้น ส่วนหมู่ที่เป็นสารประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบก็จะเข้าไปมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาของรูป (เฉพาะในระบบที่มีการคงรูปด้วยกำมะถันเท่านั้น) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกับยางด้วยพันธะเคมี ด้วยเหตุนี้สารคู่ควบไซเลนจึงทำหน้าที่เหมือนสะพานเชื่อมระหว่างยางกับซิลิกา ทำให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับซิลิกามีค่าสูงขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลต่าง ๆ ดีขึ้น โดยเฉพาะค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสยาง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขูดถู เป็นต้น ตัวอย่างสารคู่ควบไซเลนที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไทเรทอกซีไซลิลโพรพิลเททระซัลไฟด์ (Bis-triethoxysilylpropyl)-tetrasulfide, Si-69) เมอร์แคปโตโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (Mercaptopropyl-trimethoxysilane, A-189) ไทโอไซยานาโตโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (3-Thiocyanato-propyl-triethoxysilane, Si-264) เป็นต้น

2.6.2.5 ผลการเสริมแรงของซิลิกา

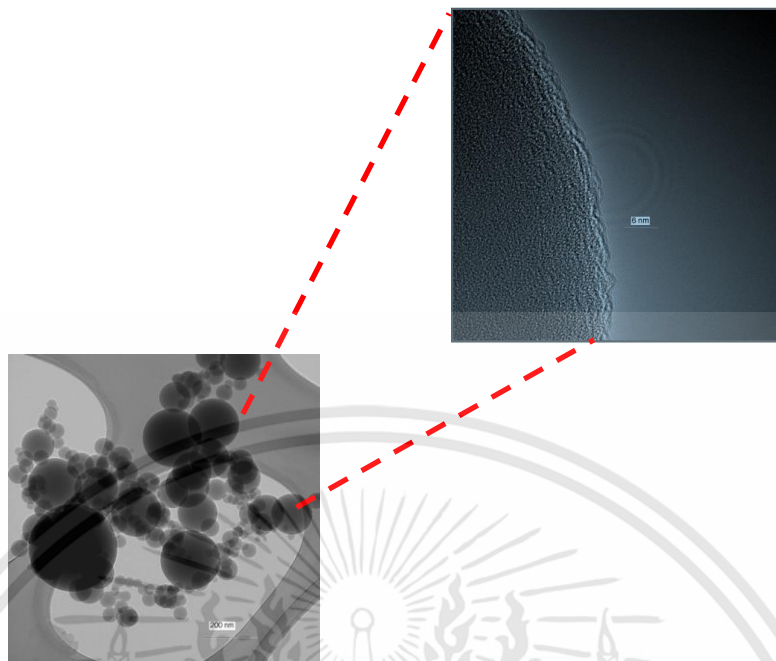
ซิลิกาสามารถเสริมแรงในยางได้ดี เนื่องจากมีขนาดของอนุภาคปฐมภูมิเล็กและพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เมื่อเติมลงไปในยางจะทำให้ยางคงรูปและมีค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสยาง ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขูดถูสูงขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเขม่าดำที่มีพื้นที่ผิวเท่ากัน ซิลิกาให้ยางคงรูปที่มีสมบัติเชิงกลดีกว่าเขม่าดำโดยเฉพาะค่ามอดูลัสยางและความต้านทานต่อการขูดถู เนื่องจากซิลิกามีอันตรกิริยากับยางต่ำกว่าเขม่าดำ การเติมสารคู่ควบไซเลนลงไปนั้น ช่วยให้ง่ายคงรูปที่ได้มีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น

2.6.2.6 การใช้งานของซิลิกา

ซิลิกาใช้งานกันมากในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มีสีหรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งแสง และมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ยางพื้นรองเท้า เป็นต้น นอกจากนี้ในบางกรณียังใช้ซิลิการ่วมกับเขม่าดำเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาดและเพิ่มความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างยางกับสิ่งทอ

2.6.3 ซิลิกา Sidistar® [44]

ซิลิกา Sidistar® เป็นซิลิกาเกรดใหม่เชิงการค้าที่มีข้อมูลผลิตภัณฑ์ (Data sheet) แนะนำว่าเป็นสารตัวเติมที่ช่วยพัฒนาความสามารถในการไหล (Rheology) ความล้าอันเกิดจากแรงสั่น (Dynamic fatigue) และความสามารถในการหน่วงไฟ (Flame retardancy) ภาพซิลิกา Sidistar® จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) แสดงดังรูปที่ 2.15 และสมบัติของซิลิกา Sidistar® แสดงดังตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.15 ภาพซิลิกา Sidistar® จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) [43]

ตารางที่ 2.5 สมบัติของสารตัวเติม (เขม่าดำ N330 ซิลิกา Hisil®255 และ Sidistar®) [36-38, 43]

ชนิดของสารตัวเติม	เขม่าดำ N330	ซิลิกา Hisil®255	ซิลิกา Sidistar®
Particle size (nm)	26-30	5-20	150
Average surface area (m ² /g)	70-100	110-150	20
Specific gravity (g/cm ³)	1.7-1.9	2.2	2.2-2.3
Density (g/cm ³)	1.8-2.1	2.2-2.6	2.2
pH-value	4	5.5-7.5	6.5-8.5
Thermal Conductivity (W/m.K)	23.8	1.3-1.5	1.3-1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ยางถอนขนสัตว์ปีก (Rubber plucking fingers) [6, 44]

ในอดีตผู้ประกอบการโรงงานแปรรูปสัตว์ปีกขนาดเล็กทำการแปรรูปโดยใช้แรงงานคน ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาในการแปรรูป ส่งผลให้อัตราการผลิตนั้นค่อนข้างต่ำ ต่อมาเมื่อความต้องการของผู้บริโภคเพิ่มสูงขึ้น ผู้ประกอบการจึงมีความจำเป็นต้องขยายขนาดธุรกิจ เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตให้สอดคล้องกับความต้องการ จึงมีการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้เพื่อลดเวลาในการแปรรูป ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าว คือเครื่องถอนขนที่ใช้ยางถอนขนสัตว์ปีก โดยทั่วไปเครื่องถอนขนมีหลายชนิดที่นิยมใช้ได้แก่

1. เครื่องถอนขนสัตว์ปีกแบบถังกลม เครื่องถอนขนสัตว์ปีกแบบถังกลมมีการติดตั้งยางถอนขนสัตว์ปีกไว้ภายใน กระบวนการถอนขนเริ่มจากการนำสัตว์ปีกที่ผ่านการลวกใส่ลงในเครื่องถอนขนสัตว์ปีกในขณะที่เครื่องกำลังทำงาน ตัวเครื่องจะหมุนด้วยความเร็ว และต้องทำการฉีดน้ำล้างตัวสัตว์ปีกเพื่อไล่ขนที่ติดตามตัวเครื่อง และตัวสัตว์ปีกออกให้หมด จากนั้นนำสัตว์ปีกออกจากเครื่องแล้วนำสัตว์ปีกไปยังกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป

2. เครื่องถอนขนสัตว์ปีกแบบที่เป็นตู้ที่ติดตั้งยางถอนขนสัตว์ปีกไว้ที่ผนังตู้ กระบวนการถอนขนของเครื่องถอนขนสัตว์ปีกแบบที่เป็นตู้ที่ติดตั้งยางถอนขนสัตว์ปีกไว้ที่ผนังตู้ เริ่มจากลำเลียงสัตว์ปีกที่ผ่านการลวกแล้วมายังห้องถอนขนสัตว์ปีกที่มีการติดตั้งแผ่นจานยางถอนขนสัตว์ปีกตามผนังตู้ในตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อสัตว์ปีกถูกลำเลียงผ่านแผ่นจานยางถอนขนสัตว์ปีกที่ติดตั้งอยู่ แผ่นจานยางถอนขนสัตว์ปีกก็จะหมุนด้วยความเร็วเพื่อถอนขนสัตว์ปีก หลังจากนั้นสัตว์ปีกที่ผ่านกระบวนการถอนขนจะถูกลำเลียงไปยังห้องล้างสัตว์ปีกเพื่อล้างขนที่ติดตามตัวสัตว์ปีกออกก่อนลำเลียงไปยังกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.16 เครื่องถอนขนสัตว์ปีก (ก) แบบถังกลม และ (ข) แบบติดตั้งกับตู้ถอนขนสัตว์ปีก [44]

จากการตรวจสอบยางถอนขนสัตว์ปีกที่มีจำหน่ายทั้งในและต่างประเทศ พบว่าสามารถจำแนกได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1. ยางถอนขนสัตว์ปีกชนิดสีดำ (Black plucking fingers) เป็นยางถอนขนที่มีสีดำ โดยใช้สารตัวเติมเป็นเขม่าดำ มีข้อดีคือมีสมบัติเชิงกลดีและราคาถูก ข้อเสียคืออาจมีสีดำติดที่ตัวสัตว์ปีก โดยเฉพาะช่วงแรกของการผลิตเมื่อเปลี่ยนยางถอนขนใหม่

2. ยางถอนขนสัตว์ปีกชนิดมีสี (Color plucking fingers) เป็นยางถอนขนสัตว์ปีกที่มีหลายสีขึ้นกับผู้ผลิต โดยใช้สารตัวเติมสีไม่ดำ เช่น ซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก มีข้อดีคือไม่เกิดการเปื้อนสีดำที่ตัวสัตว์ปีก ข้อเสียคือมีสมบัติเชิงกลต่ำและราคาแพงกว่ายางถอนขนสัตว์ปีกชนิดสีดำ



(ก)

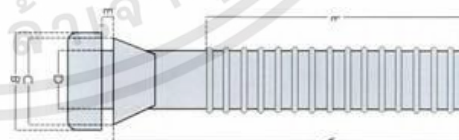


(ข)

รูปที่ 2.17 ยางถอนขนสัตว์ปีก (ก) ชนิดสีดำ และ (ข) ชนิดมีสี [44-45]

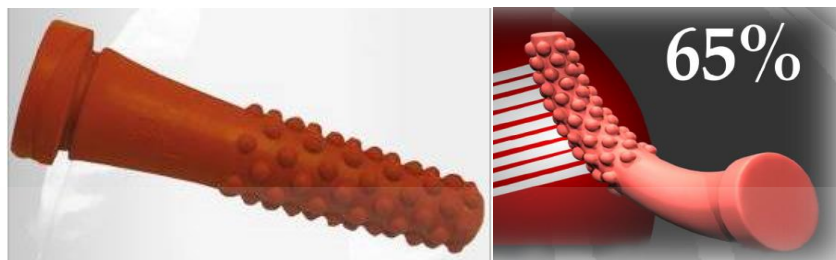
นอกจากนี้ ยางถอนขนสัตว์ปีกยังมีจำหน่ายในหลายความแข็ง (Hardness) Shore A ตั้งแต่ 40 ถึง 75 และหลายรูปร่างลักษณะ ขึ้นกับเครื่องถอนขนที่ใช้และลักษณะขนที่ต้องการถอน ได้แก่

1. ยางถอนขนสัตว์ปีกแท่งกลมแบบเป็นร่อง เป็นยางถอนขนสัตว์ปีกที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับงานถอนขนทั่วไป มีหลายขนาดและความแข็ง นอกจากนี้ยังมีชนิดตันและชนิดกลวง



รูปที่ 2.18 ยางถอนขนสัตว์ปีกแท่งกลมแบบเป็นร่อง [6]

2. ยางถอนขนสัตว์ปีกแทงกลมแบบปุ่มนูน เป็นยางถอนขนสัตว์ปีกที่นิยมใช้ถอนขนลูกเป็ดและลูกสัตว์ปีก เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบร่อง



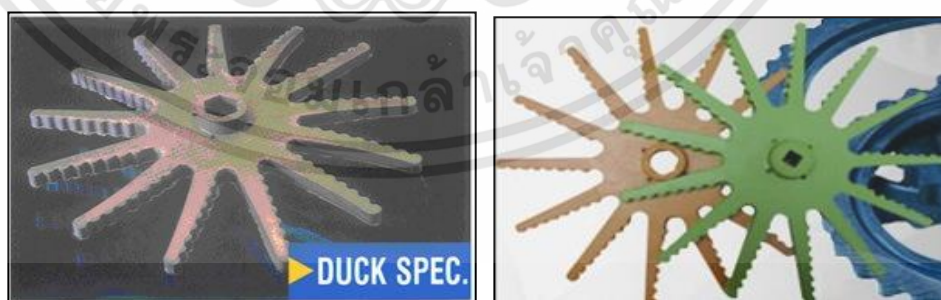
รูปที่ 2.19 ยางถอนขนสัตว์ปีกแทงกลมแบบปุ่มนูน [6]

3. ยางถอนขนสัตว์ปีกแทงแบนแบบเป็นร่อง เป็นยางถอนขนสัตว์ปีกที่สามารถโค้งงอได้อย่างมาก นิยมใช้กับสัตว์ปีกขนาดเล็กโดยเฉพาะนก และใช้กับเครื่องถอนขนชนิดหมุนวน



รูปที่ 2.20 ยางถอนขนสัตว์ปีกแทงแบนแบบเป็นร่อง [6]

4. ยางถอนขนสัตว์ปีกแบบเป็นวงดาว เป็นยางถอนขนสัตว์ปีกที่ใช้กับเครื่องถอนขนสัตว์ปีกบางชนิด นิยมใช้กับการถอนขนเป็ด



รูปที่ 2.21 ยางถอนขนสัตว์ปีกแบบเป็นวงดาว [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 คุณลักษณะของยางถนนสัตรีวีปิก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่อง ยางถนนไนท์ (มอก.2666-2558) [44]

ที่	คุณลักษณะทางฟิสิกส์	หน่วย	เกณฑ์กำหนด			วิธีทดสอบตาม
			ความแข็ง ระบุ 50	ความแข็ง ระบุ 60	ความแข็ง ระบุ 70	
1	ความแข็งระบุ	Shore A	50±5	60±5	70±5	ISO 7619-1
2	- ความต้านแรงดึง ไม่น้อยกว่า - ความยืดเมื่อขาด ไม่น้อยกว่า	MPa %	12 500	15 400	17 350	ISO 37
3	หลังเร่งการเสื่อมอายุ - ความต้านทาน แรงดึง เปลี่ยนแปลง ไม่เกิน ของค่าก่อนเร่ง การเสื่อมอายุ - ความยืดเมื่อขาด เปลี่ยนแปลงไม่เกิน ของค่าก่อนเร่งการ เสื่อมอายุ	% %	20 30	20 30	20 30	ISO 188
4	ความต้านทานต่อการ ฉีกขาด ไม่น้อยกว่า	N/mm	100	100	100	ISO 34-1
5	ความกระด้างกระดอน ไม่น้อยกว่า	%	60	55	50	ISO 4662
6	ความทนต่อการขัดสี ปริมาตรสูญเสียน้อย ไม่เกิน	mm ³	200	180	150	ISO 4649
7	การขยายตัวของ รอยแตก ไม่น้อยกว่า	cycle	200,000	200,000	200,000	ASTM D1052

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อิทธิพล แฉ่งชัด และคณะ [6] ศึกษาผลของอัตราส่วนของยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ (100/0, 90/10, 80/20, 70/30) ผลของเกรดยางสังเคราะห์ (BR-01, BR-150L, S-SBR) ผลของชนิดและปริมาณสารตัวเติมเขม่าดำและซิลิกาที่มีผลต่อสมบัติของยางถนนไนท์ จากการศึกษาพบว่าการใช้ยางสังเคราะห์บางชนิดผสมกับยางธรรมชาติ ทำให้สมบัติของยางคอมพาวด์ดีขึ้น โดยเฉพาะสูตรยาง NR/BR-150L ที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก ทำให้ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) และความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา (Ross flex resistance) ดีขึ้น การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเขม่าดำ N330 และซิลิกา 255G ในช่วง 30-50 phr ทำให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะความสามารถในการทนการฉีกขาด (Tear strength) แต่การใช้สารตัวเติมปริมาณมาก ทำให้สมบัติบางประการลดลง แสดงดังตารางที่ 2.7-2.10

ตารางที่ 2.7 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมครูปที่มีอัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน และเกรดยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันของงานวิจัยของอิทธิพล แฉ่งชัด และคณะ [6]

สมบัติ	BR150L /10	BR-150L /20	BR-150L /30	BR-150 /10	BR-150 /20	BR-150 /30
M _L (lb-in)	3.2	3.7	2.1	4.2	4.2	4.8
M _{HF} (lb-in)	15.4	16.3	14.4	18.7	18.5	19.9
Scorch time (t _{s2} , min)	1.53	1.47	1.28	1.25	1.37	1.27
Cure time (t _{c90} , min)	2.55	2.42	2.34	2.34	2.46	2.38

ตารางที่ 2.8 สมบัติของยางผสมคังรูปที่มีอัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน และเกรดยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันของงานวิจัยของอิทธิพล แฉ่งซัด และคณะ [6]

สมบัติ	BR-150L/10	BR-150L/20	BR-150L/30	BR-150/10	BR-150/20	BR-150/30
ความแข็งแรงดึง (MPa)	20.8	20.1	20.9	20.0	17.7	17.3
ร้อยละ จุดขาด (%)	600	600	650	550	550	500
มอดุลัสที่ระยะยืด 300 % (MPa)	8.07	7.78	5.84	8.72	7.94	8.73
ความต้านทานต่อการฉีกขาด (kN/m)	76.8	67.4	50.2	45.9	46.5	46.4
การเสีयरูปถาวรหลังการกด (mm ³)	4.0	3.0	3.0	4.0	3.0	3.0
ความต้านทานต่อการขีดถู (mm ³)	192	156	135	143	126	131
ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา (Cycle)	377,042	321,550	340,955	243,123	125,647	148,626
ความร้อนสะสม (°C)	17.7	17.0	17.0	13.3	14.7	14.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 ลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคกรูปที่ใช้สารตัวเติมแตกต่างกันของงานวิจัยของ อธิธิพล แจ่มชัด และคณะ [6]

สมบัติ	NR 70/BR-150L 30						
	CB-30	CB-40	CB-50	SILICA-30	SILICA-40	SILICA-50	CB/SILICA 20/20
M_L (lb-in)	2.7	2.5	2.6	3.3	3.5	4.1	3.2
M_{HF} (lb-in)	16.6	16.7	15.6	17.3	17.9	19.5	17.4
t_{s2} (min)	1.50	2.11	2.02	1.59	2.36	2.25	2.10
t_{c90} (min)	3.05	3.16	3.12	2.59	3.44	3.57	3.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 สมบัติของยางคงรูปที่ใช้สารตัวเติมแตกต่างกันของงานวิจัยของอิทธิพล แฉ่งขีด และ
คณะ [6]

สมบัติ	NR 70/BR-150L 30						
	CB-30	CB-40	CB-50	SILICA- 30	SILICA- 40	SILICA- 50	CB/SILICA 20/20
ความแข็ง แรงดึง (MPa)	19.1	20.4	19.9	21.7	22.8	22.4	20.9
ร้อยละ ณ จุดขาด (%)	500	550	500	600	650	700	600
มอดูลัสที่ระยะ ยืด 300 % (MPa)	7.8	8.6	8.8	5.4	5.5	4.9	6.6
ความต้านทาน ต่อการฉีกขาด (kN/m)	47.9	51.7	49.0	52.4	57.0	79.5	48.3
การเสียรูป ถาวรหลัง การกด (mm ³)	1.0	2.0	2.0	1.0	3.0	4.0	2.0
ความต้านทาน ต่อการขีดถู (mm ³)	148	148	223	159	165	189	134
ความต้านทาน การขยายรอย แตกจากการ พับงอ 90 องศา (Cycle)	250,000	250,000	250,000	250,000	250,000	250,000	250,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุฑาทิพย์ ตรีทศรัตน์ และคณะ [7] ศึกษาผลของชนิดเส้นใย (เส้นใยอะรามิด (Kevlar) และเส้นใยใบสับปะรด (Pineapple Leaf Fiber, PALF)) ปริมาณเส้นใย (0-10 phr) ชนิดสารช่วยกระจายตัว (Struktol®WB222 และ Ultralube®250) ปริมาณสารช่วยกระจายตัว (0, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเส้นใย) และปริมาณของฟีนอลิกเรซิน (0 1.5 และ 10 phr) ในยางถอนขนไก่ โดยใช้เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง จากการศึกษาพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยเคพลาร์และเส้นใยใบสับปะรดทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น การเชื่อมโยงยางเกิดซ้างเล็กน้อย ค่าความแข็งกด และมอดุลัสที่ระยะยืด 10 % และ 100 % มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานต่อการขีดถู ความแข็งแรงดึงและร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม ความต้านทานการหักงอไม่มีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อใส่เส้นใย สำหรับการศึกษาผลของการใส่สารช่วยกระจายตัวและฟีนอลิกเรซินที่ปริมาณต่าง ๆ พบว่าสมบัติเชิงกลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

UBE group [12] ได้ทำการปรับปรุงสมบัติของยางบิวทาไดอีนเกรดทางการค้า โดยใช้ %Syndiotactic 1,2-polybutadiene (1,2 butadiene rubber) เป็นวัสดุภาคเสริมแรง และ High cis BR เป็นวัสดุภาคต่อเนื่อง ซึ่งสังเคราะห์ยางบิวทาไดอีนหลายเกรดได้แก่ ยาง UBEPOL BR® 150 ซึ่งมีโครงสร้างแบบ Medium branching ยาง UBEPOL BR® 150L มีโครงสร้างแบบ Linear polymer และ ยาง UBEPOL BR® 150B มีโครงสร้างแบบ Branching polymer และใช้ยางบิวทาไดอีนเกรด UBEPOL VCR® 450, UBEPOL VCR® 800, UBEPOL VCR® 412 และ UBEPOL VCR® 617 ซึ่งมีโครงสร้างแบบ Medium branching polymer โดยมีปริมาณของ 1,2 butadiene rubber เป็นองค์ประกอบอยู่ที่ 3.8 %wt, 5.3 %wt, 12.0 %wt และ 17.0 %wt ตามลำดับ และแต่ละเกรดมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน โดยยาง UBEPOL VCR® 412 และ UBEPOL VCR® 617 มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal distribution ส่วนยาง UBEPOL VCR® 450 และ UBEPOL VCR® 800 มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal distribution ซึ่งผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 2.11-2.14

ตารางที่ 2.11 สมบัติของยางบิวทาไดอีนเกรด UBEPOL BR® [12]

สมบัติ		UBEPOL BR® 150	UBEPOL BR® 150L	UBEPOL BR® 150B
ความหนืดมูนีของยาง BR (ML1+4, 100 °C)		43	43	40
Micro structure	cis (%wt)	98	98	97
	trans (%wt)	1	1	2
	vinyl (%wt)	1	1	1
Molecular weight and distribution	$M_w (10^4)$	53	52	50
	$M_n (10^4)$	19	21	15
	MWD	2.8	2.5	3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.12 ความเหนียวนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลและพลวัตของยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL BR® [12]

สมบัติ		UBEPOL BR® 150	UBEPOL BR® 150L	UBEPOL BR® 150B
ความเหนียวนี้ Com B (ML1+4, 100 °C)		62	71	59
Cure rate	M _L (dN.m)	2.0	2.1	1.9
	M _{HF} (dN.m)	10.1	10.9	9.0
	t _{s1} (min)	3.0	2.8	3.4
	t _{c(90)} (min)	11.7	11.4	12.1
ความแข็งกด (Shore A)		64	65	62
มอดูลัสที่ระยะยืด 100% (MPa)		2.4	2.5	2.4
มอดูลัสที่ระยะยืด 300% (MPa)		12.5	13.1	11.4
ความแข็งแรงดึง (MPa)		16.0	17.1	15.7
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)		380	390	370
ความต้านทานต่อการฉีกขาด (kN/m)		56	61	51
ความกระด้างกระดอน (%)		57	60	54
การเสีรูปลถาวรหลังการกด (%)		22	20	25
ความร้อนสะสม (°C)		27	22	36
ความต้านทานต่อการขัดถู (Index)		209	235	183
การขยายของรอยแตก (Cycle)		4,700	4,100	5,100

ตารางที่ 2.13 สมบัติของยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL VCR® [12]

สมบัติ		UBEPOL VCR® 412	UBEPOL VCR® 617	UBEPOL VCR® 450	UBEPOL VCR® 800
ความหนืดมูนีของยาง VCR (ML1+4, 100 °C)		45	62	39	40
1,2 butadiene rubber		12.0	17.0	3.8	5.3
Micro structure	cis (%wt)	98	98	98	98
	trans (%wt)	1	1	1	1
	vinyl (%wt)	1	1	1	1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.14 ความเหนียวนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกลและพลวัตของยางบิวทาไดอีนเกรด UBEPOL VCR® [12]

สมบัติ		UBEPOL VCR® 412	UBEPOL VCR® 617	UBEPOL VCR® 450	UBEPOL VCR® 800
ความเหนียวนี้ Com B (ML1+4, 100 °C)		71	98	60	61
Cure rate	M _L (dN.m)	2.8	3.9	2.0	2.1
	M _{HF} (dN.m)	13.8	15.7	10.1	10.1
	t _{s1} (min)	1.9	1.6	3.0	3.0
	t _{c(90)} (min)	12.2	10.8	12.4	12.6
ความแข็งกด (Shore A)		75	81	66	66
มอดูลัสที่ระยะยืด 100% (MPa)		4.6	6.3	2.8	2.9
มอดูลัสที่ระยะยืด 300% (MPa)		-	-	12.9	13.1
ความแข็งแรงดึง (MPa)		16.4	16.2	17.0	16.7
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)		290	250	390	380
ความต้านทานต่อการฉีกขาด (kN/m)		62	65	59	61
ความกระด้างกระดอน (%)		50	46	52	49
การเสียรูปถาวรหลังการกด (%)		25	24	24	25
ความร้อนสะสม (°C)		33	36	29	30
ความต้านทานต่อการขีดถู (Index)		249	260	238	230
การขยายของรอยแตก (Cycle)		28,000	37,000	12,800	14,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bhagawan, S.-S. และ Tripathy, D.-K. [46] ศึกษาผลของสัดส่วนพอลิবিทาไดอินที่มีการจัดเรียงตัวแบบ vinyl-1,2 ที่อัตราส่วนยางธรรมชาติและ vinyl-1,2 เป็น 100/0, 70/30, 50/50, 30/70 และ 100/0 ซึ่งทำการผสมโดยใช้เครื่อง Internal mixer จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้สัดส่วน vinyl-1,2 เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) ความแข็งแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็งกด และความต้านทานต่อการขีดถูเพิ่มขึ้น เนื่องจากสมบัติที่ดีของ vinyl-1,2 นอกจากนี้จากข้อมูลทางสัณฐานวิทยาพบว่า การเสถียรภาพทั้งจากการดึง และการขีดถูขึ้นกับสัดส่วน vinyl-1,2 เมื่อใช้สัดส่วน vinyl-1,2 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเสถียรภาพเกิดมากขึ้น เนื่องจากค่ามอดูลัสยางที่แตกต่างกันของ vinyl-1,2 กับยางธรรมชาติ

Pan, W. และคณะ [47] ศึกษาผลของพอลิবিทาไดอินการจัดเรียงตัวแบบ vinyl-1,2 ที่มีความเป็นผลึกแตกต่างกัน (4.4% และ 51.9%) ทำหน้าที่เสริมแรงในพอลิবিทาไดอินการจัดเรียงตัวแบบ cis-1,4 จากการศึกษาพบว่าที่ความเป็นผลึก 51.9% เป็นความเป็นผลึกมากเกินไปที่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงขึ้นเป็น 1 และ 2 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้การเสริมแรงโดยใช้พอลิবিทาไดอินการจัดเรียงตัวแบบ vinyl-1,2 ยังส่งผลให้ค่ามอดูลัสยาง และแทนเดิลต่ำถูกพัฒนามากกว่าการใช้เขม่าดำในการเสริมแรง เนื่องจากผลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างภูมิภาคต่อเนื่องและภูมิภาคเสริมแรงของการใช้พอลิবিทาไดอินการจัดเรียงตัวแบบ vinyl-1,2 ในการเสริมแรงมีประสิทธิภาพมากกว่าเขม่าดำ

Chengwu, Z. และคณะ [48] ศึกษาสัณฐานวิทยา พฤติกรรมการเกิดผลึก และความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และพอลิবিทาไดอินการจัดเรียงตัวแบบ vinyl-1,2 ที่สัดส่วน 95/5, 90/10, 80/20, 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการผสมโดยเครื่อง Co-rotating twin screw extruder และขึ้นรูปด้วยเครื่อง Injection molding machine จากการศึกษาพบว่า vinyl-1,2 กระจายใน PP และแยกกันอยู่อย่างชัดเจน และเมื่อเพิ่มสัดส่วน vinyl-1,2 ส่งผลให้อุณหภูมิในการตกผลึก (Crystallization temperature, T_c) ของ PP ในพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวเพิ่มขึ้น เนื่องจาก vinyl-1,2 ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) นอกจากนี้เมื่อเพิ่มสัดส่วน vinyl-1,2 ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากค่าความแข็งของ vinyl-1,2 ที่มีค่าน้อยกว่า PP

Sakamoto, Y และคณะ [49] ศึกษาพฤติกรรมการเกิดผลึก และสมบัติทางกายภาพของ Linear 2-arm poly(L-lactide)s ที่มีโครงสร้างสายโซ่ตรงและ Branched 4-arm poly(L-lactide)s ที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่ง ซึ่งทำการสังเคราะห์ผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง (Bulk ring-opening polymerization) ของ L-lactide โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ tin(II)-ethylhexanoate ซึ่งกำหนดให้พอลิเมอร์ที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยตามจำนวน (Number-average molecular weight (M_n) values) เท่ากับ 5.0×10^3 ถึง 6.00×10^4 g/mol จากการศึกษาพบว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน (โครงสร้างสายโซ่ตรงและกิ่ง) นั้น มีการเคลื่อนที่สายโซ่ อุณหภูมิ

เปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิในการหลอมผลึก ความหนาของก้อนผลึก รวมทั้งกลไกในการก่อผลึกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิในการหลอมผลึกดังกล่าวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการเคลื่อนที่สายโซ่โมเลกุลลดลง

Pradipkanti, L. และ Satapathy, D. [50] ศึกษาผลของการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) ที่แตกต่างกัน (แบบ Unimodal และ Bimodal) ต่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) พบว่าค่า T_g ของ PS ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal และ Bimodal มีค่าเท่ากับ 100°C และ 61°C ตามลำดับ (แบบ Bimodal มีค่า T_g น้อยกว่าแบบ Unimodal เท่ากับ 39°C) เนื่องจากองค์ประกอบน้ำหนักโมเลกุลต่ำในการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal ส่งผลให้มีค่า T_g น้อยกว่าแบบ Unimodal

Li, G. และคณะ [51] ศึกษาสมบัติของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคพอลิบิวทาไดอินในอะครีโลไนไตรล์บิวทาไดอินสไตรีน (Acrylonitrile butadiene styrene, ABS) แบบ Bimodal เปรียบเทียบกับแบบ Unimodal ซึ่งทำการผสมโดยใช้เครื่อง Single-screw extruder จากการศึกษาพบว่าการกระจายตัวแบบ Bimodal มีความสามารถในการรับแรงกระแทกมากกว่าแบบ Unimodal เนื่องจากปรากฏการณ์เสริมกัน (Synergistic effect) ของสองขนาดอนุภาค คือผลของขนาดอนุภาคใหญ่ที่ทำหน้าที่ดูดซับพลังงาน และขนาดอนุภาคเล็กที่ทำหน้าที่กระจายและส่งถ่ายพลังงานให้กับสิ่งแวดล้อม

Ulfah, I.M. และคณะ [52] ศึกษาอิทธิพลของเขม่าดำและซิลิกาที่มีต่อความสามารถในการไหล และสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ โดยทำการบดยางด้วยเครื่องนวดยาง (Kneader) ที่อุณหภูมิ $80-100^\circ\text{C}$ ความเร็วรอบ 32 rpm เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นทำการผสมสารตัวเติม และสารเคมีอื่น ๆ เป็นเวลา 4 นาที ต่อมาผสมสารเร่งเชื่อมโยงและสารเชื่อมโยง ด้วยเครื่องผสมระบบเปิดที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 4 นาที จากนั้นทำการขึ้นรูปยาง โดยอัตราส่วนเขม่าดำ/ซิลิกาที่ศึกษามีดังนี้ $0/60$, $20/40$, $30/30$, $40/20$ และ $60/0$ จากการศึกษาพบว่าค่าความหนืดมูนนี้ และมอดูลัสที่ร้อยละยืด 300% มีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณเขม่าดำ เนื่องจากเขม่าดำมีอันตรกิริยาระหว่างสารตัวเติมกับสารตัวเติม (Filler-filler interactions) น้อยกว่าซิลิกา จึงง่ายต่อการมีอันตรกิริยากับยางมากกว่าซิลิกา สำหรับเวลาในการเชื่อมโยงนั้น มีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกา เนื่องจากพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก

Wu, Y. และคณะ [53] ศึกษาการพัฒนาสมบัติเชิงกลพลวัตยางธรรมชาติด้วยเขม่าดำที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยรังสีอินฟราเรด โดยเริ่มจากการปรับปรุงผิวของเขม่าดำที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ปริมาณรังสีอินฟราเรดที่แตกต่างกัน ดังนี้ 0 , 100 , 200 , 300 , 400 , 500 , 600 และ 700 kGy จากนั้นทำการผสมยาง เขม่าดำ และสารเคมีอื่น ๆ และขึ้นรูปยางที่อุณหภูมิ 143°C ความดัน 15 MPa จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีอินฟราเรด ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มอดูลัสที่ร้อยละยืด 100% และ 300% ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความ

ต้านทานต่อการขัดถูมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของเขม่าดำที่มีการปรับปรุงพื้นผิว เพิ่มอันตรกิริยาระหว่างเขม่าดำกับยาง นอกจากนี้ค่าแทนเดลต้ามีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีอินฟราเรด เนื่องจากพื้นผิวของเขม่าดำที่มีการปรับปรุงพื้นผิวสามารถเกิดยางบาวด์ได้มากขึ้น ส่งผลให้การเสียดทานในยางและความร้อนที่ถูกปลดปล่อยลดลง ส่งผลให้ค่าแทนเดลต้ามีค่าลดลง ตามลำดับ

ภูซงค์ ทับทอง และคณะ [54] ศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงระหว่างนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกาในยางธรรมชาติ (ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีสารตัวเติม) โดยใช้ปริมาณของสารตัวเติม 0-40 phr สำหรับกรณีที่มีการใช้ซิลิกาพร้อมกับสารตัวเติมได้ทำการเติมสารตัวเติมลงในปริมาณร้อยละ 8 (โดยน้ำหนักของซิลิกา) จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณของสารตัวเติม ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการผสม และความหนืดของยางคอมพาวด์มีแนวโน้มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมดังกล่าว ส่งผลให้ยางมีระยะเวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{51}) และระยะเวลาเชื่อมโยงที่เหมาะสม (t_{c90}) สั้นลงอีกด้วย อย่างไรก็ตาม นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตมีสภาพเป็นด่าง จึงส่งผลให้ยางคงรูปที่ได้มีระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงขึ้น ในขณะที่ซิลิกากลับส่งผลต่อระดับความหนาแน่นของการเชื่อมโยงในทิศทางตรงกันข้าม ทั้งนี้เนื่องจากบนพื้นผิวของซิลิกามีหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถดูดซับสารเร่งปฏิกิริยา สำหรับการเพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกาช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น เนื่องจากซิลิกามีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่านาโนแคลเซียมคาร์บอเนตค่อนข้างมาก นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ซิลิกาพร้อมกับสารตัวเติม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมแรงของซิลิกาให้สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารตัวเติมช่วยลดการดูดซับสารเร่งปฏิกิริยาการคงรูปและทำให้ซิลิกาเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้นแล้ว รวมทั้งช่วยเพิ่มอันตรกิริยาระหว่างยางและซิลิกาให้สูงขึ้นอีกด้วย

ชิตชาติ และคณะ [55] ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้า (Fatigue life) ของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ โดยใช้ยางธรรมชาติร่วมกับเขม่าดำ N330 ที่ปริมาณ 0, 30, 45 และ 60 phr จากการศึกษาพบว่ายางธรรมชาติที่ไม่เติมเขม่าดำมีอายุความล้าที่สูงกว่ายางที่เติมเขม่าดำ เนื่องจากชิ้นงานยางที่ไม่เติมเขม่าดำ สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่ายางที่เติมเขม่าดำ ทำให้ยางสามารถดูดซับและคายพลังงานที่ให้แก่ชิ้นงานได้ดี รวมทั้งการเริ่มเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Micro crack initiation) ภายในยางนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณสัมผัสระหว่างยางและเขม่าดำ ด้วยค่ามอดูลัสยางที่เพิ่มขึ้นจากการเติมเขม่าดำ ทำให้ปลายรอยแตก (Crack tip) มีลักษณะที่แหลมคมกว่า จึงเกิดความเค้นหนาแน่นสูง (Stress concentration) และรอยแตกขยายตัวได้รวดเร็วกว่ายางที่มีค่ามอดูลัสต่ำ

สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- สูตรยาง NR/BR-150L ที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก ทำให้ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance) และความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา (Ross flex resistance) ดีขึ้น การเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเขม่าดำ N330 และซิลิกา 255G ในช่วง 30-50 phr ทำให้ประสิทธิภาพการเสริมแรงเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะความสามารถในการทนการฉีกขาด แต่การใช้สารตัวเติมปริมาณมาก ทำให้สมบัติบางประการลดลง

- การเพิ่มปริมาณเส้นใยเคฟลาร์และเส้นใยโพลีเอสเตอร์ทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น การเชื่อมโยงยางเกิดขั้วลงเล็กน้อย ค่าความแข็งแรงดึง และมอดูลัสที่ระยะยืด 10% และ 100% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานต่อการขัดถู ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม ความต้านทานการหักงอไม่มีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อใส่เส้นใย

- การใช้สัดส่วน vinyl-1,2 เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ความแข็งแรงดึง ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความแข็งแรงดึง ความต้านทานต่อการขัดถู การเสียดสีทั้งจากการดึง และการขัดถูเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเสียดสีเกิดมากขึ้น

- พอลิวิทาไดอินการจัดเรียงตัวแบบ vinyl-1,2 ที่มีความเป็นผลึก 51.9% เป็นความเป็นผลึกที่มากเกินไปที่ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาดสูงขึ้นเป็น 1 และ 2 เท่าตามลำดับ นอกจากนี้ค่ามอดูลัสยาง และแทนเดลต่ำถูกพัฒนามากกว่าการใช้เขม่าดำในการเสริมแรง

- พอลิวิทาไดอินการจัดเรียงตัวแบบ vinyl-1,2 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิในการตกผลึก (Crystallization temperature, T_c) ของ PP ในพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว และความสามารถในการรับแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น

- พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน (โครงสร้างสายโซ่ตรงและกึ่ง) นั้น มีการเคลื่อนที่สายโซ่ อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว อุณหภูมิในการหลอมผลึก ความหนาของก้อนผลึก รวมทั้งกลไกในการก่อผลึกแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวนของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และอุณหภูมิในการหลอมผลึกดังกล่าวเพิ่มขึ้น

- ค่า T_g ของ PS ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal และ Bimodal มีค่าเท่ากับ 100 °C และ 61 °C ตามลำดับ (การกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal มีค่า T_g น้อยกว่าแบบ Unimodal เท่ากับ 39 °C)

- การกระจายตัวของขนาดอนุภาคพอลิวิทาไดอินในอะครีโลไนไตรล์-วิทาไดอินสไตรีนแบบ Bimodal มีความสามารถในการรับแรงกระแทกมากกว่าแบบ Unimodal

- การเพิ่มปริมาณเขม่าดำ ส่งผลให้ค่าความเหนียวนี้ และมอดูลัสที่ระยะยืด 300% มีค่ามากขึ้น สำหรับการเพิ่มปริมาณซิลิกา ส่งผลให้ค่าเวลาในการเชื่อมโยงมีค่ามากขึ้น

- การเพิ่มปริมาณรังสีอินฟราเรดที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวของเขม่าดำ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ความต้านทานต่อการ

ฉีกขาด และความต้านทานต่อการขัดถูมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าแทนเดลต้ามีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีอินฟราเรด

- การเพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกา ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการผสม และความหนืดของยางคอมพาวนด์มีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาเริ่มเชื่อมโยง (t_{s1}) และระยะเวลาเชื่อมโยงที่เหมาะสม (t_{c90}) ลดลง เมื่อเพิ่มสารตัวเติมดังกล่าว นอกจากนี้การเพิ่มนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงสูงขึ้น ในขณะที่ซิลิกาส่งผลต่อความหนาแน่นในการเชื่อมโยงในทิศทางตรงกันข้าม สำหรับการเพิ่มปริมาณนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของยางด้อยลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซิลิกาช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของยางให้ดีขึ้น

- ยางธรรมชาติที่ไม่เติมเขม่าดำมีอายุความล้าที่สูงกว่ายางที่เติมเขม่าดำ รวมทั้งการเริ่มเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Micro crack initiation) ภายในยางนั้นเกิดขึ้นที่บริเวณสัมผัสระหว่างยางและเขม่าดำ



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวเปรียบเทียบผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอินที่มีต่อสมบัติของยางผสมคกรูปร่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน ศึกษาผลของอัตราส่วนยางผสมคกรูปร่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน และศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน เพื่อพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์ยางถนนสัตว์ปีก มีแผนการดำเนินการดังนี้

ตอนที่ 1 ผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันได้แก่ ผลของปริมาณ 1,2 butadiene rubber (0.0-17.0 %wt) โครงสร้างสายโซ่โมเลกุล (โครงสร้างสายโซ่ตรงและกึ่ง) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (แบบ Unimodal และ Bimodal) ของยางบิวทาไดอิน

ตอนที่ 2 ผลของอัตราส่วนยางผสมคกรูปร่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน (อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก)

ตอนที่ 3 ผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน (เขม่าดำ N330 ซิลิกา Hisil[®]255 และ Sidistar[®])

3.2 วัตถุดิบและสารเคมี

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

วัตถุดิบและสารเคมี	เกรด		บริษัทผู้ผลิต
1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber)	STR 5L		-
2. ยางบิวทาไดอีน (Butadiene rubber)	UBEPOL BR [®] 150		บริษัท ยางสังเคราะห์ไทย จำกัด
	UBEPOL BR [®] 150L		
	UBEPOL BR [®] 150B		
	UBEPOL VCR [®] 450		
	UBEPOL VCR [®] 800		
	UBEPOL VCR [®] 412		
3. สารตัวเติม (Fillers)	เขม่าดำ N330	ขนาดอนุภาค: 26-30 nm	บริษัท ไทยคาร์บอนแบล็ค จำกัด (มหาชน)
	ซิลิกา Hisil [®] 255	ขนาดอนุภาค: 5-20 nm	บริษัท โอเอสซี สยามซิลิกา จำกัด
	ซิลิกา Sidistar [®]	ขนาดอนุภาค: 150 nm	บริษัท Behn Meyer Chemical จำกัด
4. สาร Bis-(2-hydroxy-3-tert-butyl-5-methyl phenyl) methane (BKF)			บริษัท LANXESS India Pvt. จำกัด
5. สารช่วยในการผสม (Processing aids)	กลุ่มปิโตรเลียมเรซิน (Petroleum resin)		บริษัท Total Petrochemicals and Refining (USA) จำกัด
	กลุ่มฟีนอลิกเรซิน (Phenolic resin)		บริษัท Hexion Specialty Chemicals Management (Shanghai) จำกัด
	กลุ่มพัตตีแอซิดเอสเทอร์ (Ester fatty acid)		บริษัท Master Additives Sdn Bhd (Malaysia) จำกัด
6. ซิลาน (Silane)			บริษัท Evonik industries Degussa จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

วัตถุดิบและสารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต
7. สารช่วยในการกระจายตัว (Dispersing agent): พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol, PEG 4000)		บริษัท Pan Asia Chemical Corporation จำกัด
8. สารหล่อลื่น (Lubricant): กลุ่มน้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil)		บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)
9. สารกระตุ้นปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Activators)	ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide, ZnO)	บริษัท จักรवालเคมี จำกัด
	กรดสเตียริก (Stearic acid)	บริษัท P.T. Cisadane Raya Chemicals Oleochemicals Industry จำกัด
10. สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerators)	กลุ่มซัลเฟนาไมด์ (Sulfenamides)	บริษัท COSMO Chemical จำกัด
	กลุ่มไทเอโซล (Thiazoles)	บริษัท MONFLEX PTE. จำกัด
	กลุ่มกัวนิดีน (Guanidines)	บริษัท COSMO Chemical จำกัด
11. สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent): กำมะถัน (Sulfur)		บริษัท สหไพศาลอินดัสทรี จำกัด

3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

ตารางที่ 3.3 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือ	บริษัทผู้ผลิต
1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)	บริษัท SENJU จำกัด
2. เครื่องผสมสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill)	บริษัท NISSHIN KAGAKU จำกัด
3. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) รุ่น SMV-300	บริษัท Shimadzu จำกัด
4. เครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) รุ่น MDR-2000	บริษัท Alpha Technologies จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย (ต่อ)

อุปกรณ์และเครื่องมือ	บริษัทผู้ผลิต
5. เครื่องอัดแบบ (Compression molding machine) รุ่น 102-SHF 77	บริษัท Intro Enterprise จำกัด
6. เครื่องตัดตัวอย่างให้เป็นรูปดัมเบลล์	บริษัท Intro Enterprise จำกัด
7. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine) รุ่น TENSOMETER 2000	บริษัท Alpha Technologies จำกัด
8. เครื่องวัดความแข็งกดแบบคูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester)	บริษัท Desic Group จำกัด
9. เครื่องทดสอบความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion tester) รุ่น GT-7012A	บริษัท GOTECH TESTING MACHINES จำกัด
10. ตู้สำหรับทดสอบการเสียรูปหลังการกดถาวร (Compression set tester) รุ่น 102-SHF 77	บริษัท Intro Enterprise จำกัด
11. เครื่องทดสอบสมบัติความกระด้างกระดอน (Rebound resilience tester)	บริษัท สิทธิพรแอสโซซิเอต จำกัด
12. เครื่อง Ross flexing tester รุ่น YASUDA 270	บริษัท YASUDA SEIKI SEISAKUSHO จำกัด
13. เครื่อง De Mattia Flex Cracking Tester รุ่น FT-1503	บริษัท Ueshima Seisakusho จำกัด
14. เครื่อง BF Goodrich Flexometer รุ่น MODEL II	บริษัท Comprehensive Credit Services จำกัด
15. เครื่องทดสอบสมบัติทางความร้อนเชิงกลพลวัต (Dynamic mechanical thermal analyzer, DMTA) รุ่น D-29694	บริษัท GABO QUALIMETER Testanlagen จำกัด
16. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น QUANTA 250	บริษัท Fujikura Engineering Thailand จำกัด
17. อื่น ๆ (เครื่องวัดความหนาของชิ้นงาน เวอร์เนียร์ เครื่องชั่งละเอียดดิจิทัลความละเอียด 0.0001 กรัม เทอร์โมมิเตอร์ ปีกเกอร์ และหลอดทดลอง)	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดลอง

1. ขั้นตอนการเตรียมคอมพาวนด์ A

1.1 ชั่งยางและสารเคมีต่าง ๆ ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 ตามตารางที่ 3.5-3.7

ตอนที่ 2 ตามตารางที่ 3.8

ตอนที่ 3 ตามตารางที่ 3.9

1.2 ผสมยางด้วยเครื่องผสมยางระบบปิด ที่สภาวะอุณหภูมิเริ่มต้น 70 °C และอุณหภูมิสุดท้ายไม่น้อยกว่า 120 °C ที่ความเร็วรอบ 77 rpm โดยการตั้ง Step การผสมดังนี้

Step 1 : ผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีน เป็นเวลา 1 นาที

Step 2 : ผสมสารตัวเติม สารป้องกันการเสื่อมสภาพ สารช่วยในการผสม สารช่วยในการกระจายตัว สารหล่อลื่น และสารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง เป็นเวลา 4 นาที

2. ขั้นตอนการเตรียมคอมพาวนด์ B

นำยางคอมพาวนด์ A ที่ผสมด้วยเครื่องผสมยางแบบปิดมาใส่สารเร่งปฏิกิริยาการเชื่อมโยงและสารเชื่อมโยงยางกัมมะถันด้วยเครื่องผสมสองลูกกลิ้ง โดยค่อย ๆ ใส่สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงระหว่างลูกกลิ้ง ทำการผสมโดยการรีดและพับ (Cut-and-fold) เมื่อสารตัวเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงแทรกเข้าไปในเนื้ออย่างจนหมดแล้ว ทำการใส่กัมมะถัน จากนั้นทำการผสมโดยการรีดและพับจนสารทั้งหมดแทรกเข้าไปในเนื้ออย่างหมด จึงปรับรีดยางบางประมาณ 1-2 mm จำนวน 3 รอบ เพื่อให้สารกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน

3. รีดยางออกเป็นแผ่นหนาประมาณ 4-7 mm

ตารางที่ 3.5 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณ 1,2 butadiene rubber ที่แตกต่างกัน (0.0-17.0 %wt) ของยางบิวทาไดอีน (หน่วย phr)

สารเคมี	ปริมาณ 1,2 butadiene rubber (%wt)				
	0.0	3.8	5.3	12.0	17.0
ยางธรรมชาติ (STR-5L)	70	70	70	70	70
UBEPOL BR [®] 150L (0.0 %wt)	30	-	-	-	-
UBEPOL VCR [®] 450 (3.8 %wt)	-	30	-	-	-
UBEPOL VCR [®] 800 (5.3 %wt)	-	-	30	-	-
UBEPOL VCR [®] 412 (12.0 %wt)	-	-	-	30	-
UBEPOL VCR [®] 617 (17.0 %wt)	-	-	-	-	30
เขม่าดำ N330	40	40	40	40	40
BKF	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Petroleum resin	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Phenolic resin	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Ester fatty acid	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Aromatic oil	15	15	15	15	15
ZnO	4	4	4	4	4
Stearic acid	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Sulfenamides	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Thiazoles	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Guanidines	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfur	3	3	3	3	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่ต่างกัน (โครงสร้างสายโซ่ตรงและกิ่ง) ของยางบิวทาไดอีน (หน่วย phr)

สารเคมี	NR/BR-150	NR/BR-150L	NR/BR-150B
ยางธรรมชาติ (STR-5L)	70	70	70
UBEPOL BR [®] 150 (Medium branching polymer)	30	-	-
UBEPOL BR [®] 150L (Linear polymer)	-	30	-
UBEPOL BR [®] 150B (Branching polymer)	-	-	30
เขม่าดำ N330	40	40	40
BKF	1.5	1.5	1.5
Petroleum resin	1.5	1.5	1.5
Phenolic resin	1.5	1.5	1.5
Ester fatty acid	1.5	1.5	1.5
Aromatic oil	15	15	15
ZnO	4	4	4
Stearic acid	1.5	1.5	1.5
Sulfenamides	0.5	0.5	0.5
Thiazoles	0.5	0.5	0.5
Guanidines	0.5	0.5	0.5
Sulfur	3	3	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน (แบบ Unimodal และ Bimodal) ของยางบิวทาไดอีน (หน่วย phr)

สารเคมี	3.8 %wt Unimodal	3.8 %wt Bimodal	5.3 %wt Unimodal	5.3 %wt Bimodal
ยางธรรมชาติ (STR-5L)	70	70	70	70
UBEPOL VCR® 450 (Unimodal)	30	-	-	-
UBEPOL VCR® 450 (Bimodal)	-	30	-	-
UBEPOL VCR® 800 (Unimodal)	-	-	30	-
UBEPOL VCR® 800 (Bimodal)	-	-	-	30
เซม่าดำ N330	40	40	40	40
BKF	1.5	1.5	1.5	1.5
Petroleum resin	1.5	1.5	1.5	1.5
Phenolic resin	1.5	1.5	1.5	1.5
Ester fatty acid	1.5	1.5	1.5	1.5
Aromatic oil	15	15	15	15
ZnO	4	4	4	4
Stearic acid	1.5	1.5	1.5	1.5
Sulfenamides	0.5	0.5	0.5	0.5
Thiazoles	0.5	0.5	0.5	0.5
Guanidines	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfur	3	3	3	3

หมายเหตุ: ยาง UBEPOL VCR® 450 (Unimodal) และ UBEPOL VCR® 800 (Unimodal) เป็นการปรับสัดส่วนยาง UBEPOL VCR® 412 ให้ได้ 1,2 BR เท่ากับ 3.8 %wt และ 5.3 %wt ตามลำดับ

ตารางที่ 3.8 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของอัตราส่วนยางผสมคงรูประหว่างยางธรรมชาติและยาง
บิวทาไดอินที่แตกต่างกัน (อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก) (phr)

สารเคมี	NR/ BR-150	NR/ BR-150L	NR/ BR-150B	NR/ VCR617	NR/ VCR450
NR/UBEPOL BR® 150	70/30, 60/40	-	-	-	-
NR/UBEPOL BR® 150L	-	70/30, 60/40	-	-	-
NR/UBEPOL BR® 150B	-	-	70/30, 60/40	-	-
NR/UBEPOL VCR® 617	-	-	-	70/30, 60/40	-
NR/UBEPOL VCR® 450	-	-	-	-	70/30, 60/40
เขม่าดำ N330	40	40	40	40	40
BKF	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Petroleum resin	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Phenolic resin	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Ester fatty acid	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Aromatic oil	15	15	15	15	15
ZnO	4	4	4	4	4
Stearic acid	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Sulfenamides	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Thiazoles	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Guanidines	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Sulfur	3	3	3	3	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 สูตรยางที่ใช้ในการศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน (เขม่าดำ N330 ซิลิกา Hisil®255 และ Sidistar®) (หน่วย phr)

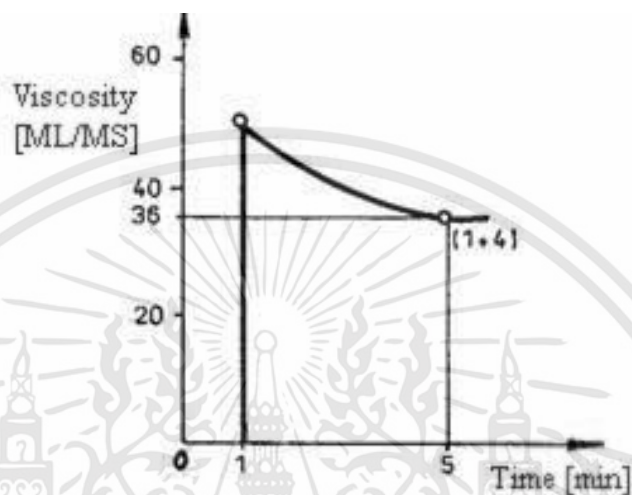
สารเคมี	CB	HISI	SIDI
ยางธรรมชาติ (STR-5L)	70	70	70
UBEPOL VCR® 450 (Bimodal)	30	30	30
เขม่าดำ N330	40	30	30
ซิลิกา Hisil®255	-	10	-
ซิลิกา Sidistar®	-	-	10
BKF	1.5	1.5	1.5
Petroleum resin	1.5	1.5	1.5
Phenolic resin	1.5	1.5	1.5
Ester fatty acid	1.5	1.5	1.5
Silane	-	0.5	0.5
PEG 4000	-	0.5	0.5
Aromatic oil	15	15	15
ZnO	4	4	4
Stearic acid	1.5	1.5	1.5
Sulfenamides	0.5	0.5	0.5
Thiazoles	0.5	0.5	0.5
Guanidines	0.5	0.5	0.5
Sulfur	3	3	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบสมบัติของยางคอมพาวนด์

3.5.1 การหาค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

ตัดแผ่นยางให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4-5 cm จำนวน 2 ชิ้น นำไปทดสอบด้วยเครื่องวัดความหนืดมูนนี่ ที่อุณหภูมิ 100 °C โดยใช้จานหมุนขนาดใหญ่ (L) ตามมาตรฐาน ASTM D1646 [56]



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างกราฟความหนืดมูนนี่ [57]

3.5.2 การหาลักษณะการคงรูป (Cure characteristics)

ตัดแผ่นยางเป็นรูปสี่เหลี่ยมให้มีน้ำหนักประมาณ 10 g แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องวัดการเชื่อมโยงแบบไม่มีจานหมุน (Moving die rheometer, MDR) ที่อุณหภูมิ 160 °C ตามมาตรฐาน ASTM D5289 [58] เพื่อหาเวลาเริ่มเชื่อมโยงยางหรือเวลาสกอร์ช (Scorch time, t_{s1}) เวลาเชื่อมโยงยาง (Cure time, t_{c90}) และอัตราเร็วในการเชื่อมโยง (Cure rate index, CRI) ซึ่งหาได้จากสมการ 3.1

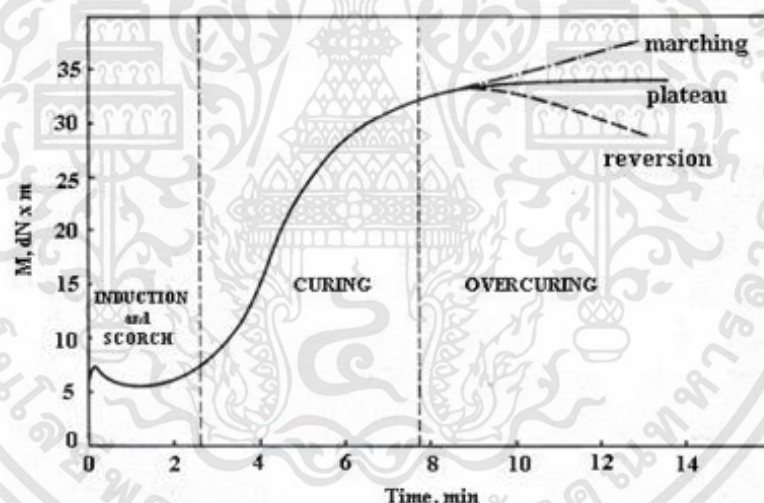
เมื่อ	M_L	คือ	ค่าแรงบิดต่ำสุด (Minimum torque)
	M_{HF}	คือ	ค่าแรงบิดสูงสุด เมื่อเส้นกราฟคงที่ที่จุดสูงสุด (Plateau torque)
	t_{s1}	คือ	เวลาเริ่มเชื่อมโยงยางหรือเวลาสกอร์ช เป็นเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงจนแรงบิดเพิ่ม 1 หน่วยแรงบิด (kgf.cm) เทียบกับค่าแรงบิดต่ำสุด
	t_{c90}	คือ	เวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงยางจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดที่มีการเชื่อมโยง 90% (Optimum cure time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Cure Rate Index, CRI} = \frac{100}{t_c(90) - t_{s1}} \quad (3.1)$$

ช่วงเริ่มต้น (Induction) เมื่อตัวอย่างได้รับความร้อน ยางก็จะอ่อนลงทำให้แรงบิดลดลง ในระยะแรก ๆ ของการทดสอบ จนกระทั่งอุณหภูมิของยางเริ่มเข้าสู่สมดุล ความหนืดของยางก็จะมีค่าต่ำสุดและจะมีค่าคงที่อยู่นาน จุดนี้เป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะเริ่มเกิดการคงรูป ค่าความหนืดต่ำสุดนี้เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแกร่งของยางที่ยังไม่คงรูป (ความสามารถในการไหลของยางคอมพาวนด์) และใช้สัญลักษณ์ M_L

ช่วงการคงรูป (Curing) หลังจากที่ยางมีค่าความหนืดต่ำสุด ความหนืดของยางก็จะเริ่มสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนจะทำให้ยางเกิดการคงรูป (แรงบิดจึงเริ่มสูงขึ้นตามเวลา) ระยะเวลาที่ยางเริ่มบิดตายจนถึงระยะเวลาที่ยางเกิดการคงรูปเรียกว่าระยะเวลาสกอร์ช (Scorch time) ระยะเวลาสกอร์ชคือระยะเวลาที่ทำให้ค่าแรงบิดสูงกว่าจุดต่ำสุด 1 เดซินิวตันเมตร และใช้สัญลักษณ์ว่า t_{s1} เนื่องจากระยะเวลาสกอร์ชเป็นตัวบ่งชี้ถึงระยะเวลาที่ยางยังคงสามารถไหลขึ้นรูปได้ ณ อุณหภูมินั้น ๆ ดังนั้นระยะเวลาสกอร์ชจึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในกระบวนการผลิต



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างเส้นกราฟเชื่อมโยงของยางผสมสูตร แสดงเวลาการเชื่อมโยง ($t_{c(90)}$) และเวลาก่อนการเชื่อมโยง (t_{s1}) [59]

3.6 การทดสอบสมบัติของยางคงรูป

3.6.1 การทดสอบสมบัติแรงดึง (Testing of tensile properties)

นำยางคงรูปมาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell shape) ดังรูปที่ 3.3 ตามมาตรฐาน ASTM D412 [60] วัดความหนา และความกว้างของชิ้นตัวอย่าง 3 ตำแหน่งในช่วงระยะ C และหาค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้ แล้วนำไปทดสอบความทนต่อแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Universal testing machine, UTM) โดยใช้ความเร็วในการทดสอบ 500 mm/min บันทึกค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) มอดุลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% ดึงยืด (Rubber modulus, M100 และ M300) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.2, 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$\text{Tensile strength (N/mm}^2\text{)} = F/A \quad (3.2)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบขาด (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)

$$\% \text{Elongation at break (\%)} = 100 \times ((L-L_0) / L_0) \quad (3.3)$$

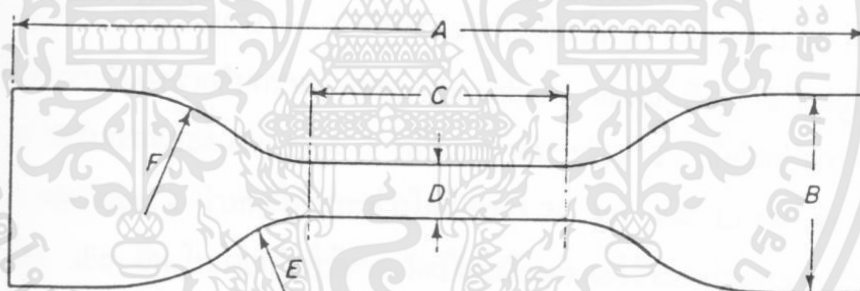
เมื่อ L คือ ระยะที่ชิ้นทดสอบสามารถยืดตัวได้จนขาด (cm)

L_0 คือ ระยะกำหนดก่อนทำการทดสอบ (cm)

$$100\% \text{ หรือ } 300\% \text{ Modulus (N/mm}^2\text{)} = F/A \quad (3.4)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงที่ทำให้ชิ้นทดสอบยืด 100% หรือ 300% (N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบขณะยังไม่ยืด (mm^2)



รูปที่ 3.3 ชิ้นทดสอบรูปดัมเบลล์สำหรับการทดสอบสมบัติแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด รวมทั้งค่ามอดุลัสของยางที่ระยะยืด 100% และ 300% [60]

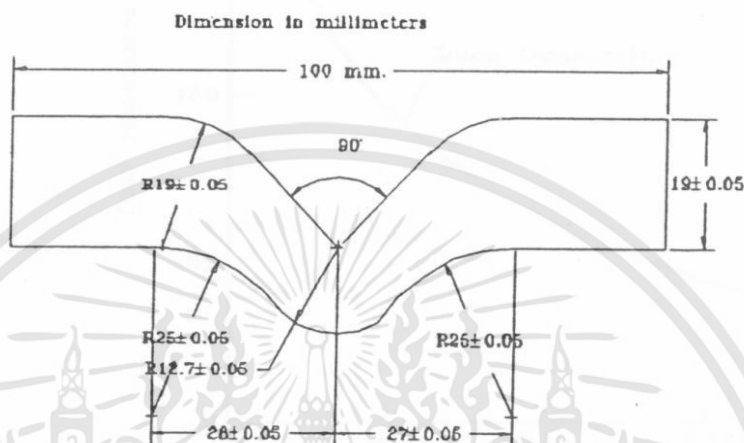
3.6.2 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance)

นำยางคกรูปมาตัดแบบมุม (Right angle) ดังรูปที่ 3.4 ตามมาตรฐาน ASTM D624 [61] วัดความหนาของชิ้นตัวอย่าง 3 ตำแหน่งคือ บริเวณมุม 90° ของชิ้นตัวอย่าง ตามความกว้างของชิ้นตัวอย่าง หาค่าเฉลี่ยของความหนาที่ได้ทดสอบชิ้นตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) โดยใช้ความเร็วในการทดสอบ 500 mm/min ดึงชิ้นตัวอย่างจนฉีกขาด และบันทึกค่าแรงดึงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นตัวอย่างฉีกขาด เพื่อนำมาคำนวณหาความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear resistance) ดังสมการ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Tear resistance (N/mm)} = F/d \quad (3.5)$$

เมื่อ F คือ ค่าแรงสูงสุด (Maximum force) (N)
d คือ ค่าความหนาของชิ้นตัวอย่าง (mm)



รูปที่ 3.4 ชิ้นทดสอบแบบมุมสำหรับการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการฉีกขาด [61]

3.6.3 การทดสอบสมบัติความแข็งกด (Hardness)

นำยางคงรูปมาทดสอบสมบัติความแข็งกด ด้วยเครื่องวัดความแข็งกดแบบดูโรมิเตอร์ (Durometer hardness tester) ตามมาตรฐาน ASTM D2240 [62] โดยทำการวัดความแข็ง 5 จุดบนชิ้นทดสอบและรายงานค่าเฉลี่ยที่วัดได้ โดยออกแรงกดให้มากที่สุดที่จะทำให้ฐานของหัวกดแนบสนิทกับชิ้นทดสอบแล้ว จึงอ่านค่าความแข็งภายใน 1 วินาที

3.6.4 การทดสอบสมบัติการเสียรูปถาวรหลังการกด (Compression set)

นำยางคงรูปมาทดสอบสมบัติการเสียรูปถาวรหลังการกด ตามมาตรฐาน ASTM D395 [63] โดยเตรียมชิ้นงานเป็นแท่งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 29.0 ± 0.5 mm หนา 12.5 ± 0.5 mm อัดให้ผิดรูป 25% ของความหนา อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 22 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว นำยางออกจากแผ่นอัดทันที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นบนพื้นที่ไม่นำความร้อนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงวัดความหนา รายงานผลในรูปของเปอร์เซ็นต์ของความหนาซึ่งคำนวณได้ดังสมการ 3.6

$$\text{Compression set (\%)} = [(t_0 - t_r) / (t_0 - t_s)] \times 100 \quad (3.6)$$

เมื่อ t_0 คือ ความหนาเดิม (mm)
 t_s คือ ความหนาเมื่อถูกอัด (mm)
 t_r คือ ความหนาหลังการคืนรูป (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.5 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance)

นำยางคงรูปมาทดสอบสมบัติความต้านทานต่อการขัดถู ด้วยเครื่อง Akron abrasion tester ตามมาตรฐาน JIS K6264-2 [64] ขึ้นทดสอบจะถูกหมุนด้วยความเร็ว 250 ± 5 รอบต่อนาที และล้อหินขัด (Abrasive wheel) จะถูกดันให้ไปสัมผัสกับขึ้นทดสอบด้วยแรง 44.1 นิวตัน โดยระนาบของขึ้นทดสอบและระนาบของล้อหินขัดต้องทำมุมกัน 45° จากนั้นคำนวณหาปริมาตรของยางที่สูญเสียไปได้จากสมการ 3.7

$$\Delta V_c (\text{cm}^3) = \Delta m / \rho \quad (3.7)$$

เมื่อ ΔV_c คือ ปริมาตรของยางที่สูญเสียไป
 Δm คือ น้ำหนักของขึ้นทดสอบที่สูญเสียไป (g)
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นของยาง (g/cm^3)

3.6.6 การทดสอบสมบัติความกระด้างกระดอน (Rebound resilience)

นำยางคงรูปมาทดสอบความกระด้างกระดอนตามมาตรฐาน BS 903 [65] ด้วยเครื่องวัดการกระดอน Dunlop tripsometer โดยใช้มุม 45° ทำการทดสอบจำนวน 6 ครั้งต่อ 1 ขึ้นทดสอบ และทำการบันทึกค่ามุมของการกระดอนเฉพาะในครั้งที่ 4-6 เท่านั้น จากนั้นนำค่าเฉลี่ยที่ได้จากการบันทึกทั้ง 3 ครั้งมาใช้ในการรายงานผลการทดสอบ โดยคำนวณหา Rebound resilience จากสมการ 3.8

$$\text{Rebound resilience (\%)} = (1 - \cos(\text{มุมของการกระดอน}) \times 342) \quad (3.8)$$

3.6.7 การทดสอบความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยาง (Crosslinking density of rubber) ด้วยเทคนิคการบวมตัวในสารละลาย

นำยางคงรูปมาทดสอบความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยาง ตามมาตรฐาน JIS K6251 [66] โดยนำแผ่นยางคงรูปที่เตรียมมาตัดให้ได้ขนาด $1 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ ซึ่งน้ำหนักของขึ้นทดสอบแต่ละชิ้นก่อนการนำไปแช่ในโทลูอีน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อครบตามระยะเวลาที่กำหนด นำขึ้นทดสอบดังกล่าวซับด้วยกระดาษทิชชู แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนักทั้งในอากาศและในน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณ Crosslinking density ดังสมการ 3.9

$$\text{Crosslinking density} = E/F (\text{mol}/\text{cm}^3) \quad (3.9)$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักหลังจากอบ - น้ำหนักในน้ำ
 $B = A + ((\text{น้ำหนักตอนบวมตัว} - \text{น้ำหนักหลังจากอบ}) / \text{ความหนาแน่นโทลูอีน})$

$$C = \text{น้ำหนักเริ่มต้น} \times ((\text{phr ของสารตัวเติม}/1.8) + (\text{phr ของ ZnO}/5.47)) / \text{phr ของยางคอมพาวนด์}$$

$$D = (A-C)/(B-C)$$

$$E = D + \text{ค่าสัมประสิทธิ์ของยาง} \times D2 + \ln(1-D)$$

$$F = (0.3333D - (D/2)) \times 0.96 \times (-90.1)$$

3.6.8 การทดสอบความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ (Flexing resistance)

3.6.8.1 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา (Ross flex resistance) ใช้เครื่องมือ Ross flexing tester เพื่อดูการขยายตัวของรอยแตกจากการหักงอในการทดสอบที่กระทำซ้ำ ๆ ในแนว 90 องศา มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM D1052 [67] ใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด 25 mm x 150 mm x 6 mm โดยก่อนเริ่มการทดสอบ ที่ผิวของชิ้นงาน จะถูกทำให้มีรอยตำหนิที่มีความยาว 2.5 mm และตั้งฉากกับแนวตามยาวของชิ้นงาน ในขณะที่ทำการทดสอบชิ้นงานซึ่งถูกจับยึดกับอุปกรณ์ในแนวระนาบจะถูกพับงอให้เป็นมุมตั้งฉากกับแนวระนาบ ซึ่งใช้ Bending speed 100 rpm และ Roller stroke 50 mm เมื่อรอยตำหนิของชิ้นงานมีความยาว 5 mm ทำการบันทึกจำนวนรอบ

3.6.8.2 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศา (De Mattia flex cracking resistance) ใช้เครื่องมือ De Mattia flex cracking tester เพื่อดูการขยายตัวของรอยแตกจากการหักงอในการทดสอบที่กระทำซ้ำ ๆ ในแนว 180 องศา มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคือ ASTM D813 [68] ทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบให้มีขนาด 25 mm x 150 mm x 6 mm โดยก่อนเริ่มการทดสอบ ที่ผิวของชิ้นงานจะถูกทำให้มีรอยตำหนิที่มีความยาว 2 mm และตั้งฉากกับแนวตามยาวของชิ้นงาน ในขณะที่ทำการทดสอบชิ้นงานซึ่งถูกจับยึดกับอุปกรณ์ทดสอบในแนวตั้งจะถูกยืดออกอย่างเต็มที่ และพับงอสลับไปมา ซึ่งใช้ Bending speed 300 rpm และ Roller stroke 57 mm เมื่อรอยตำหนิของชิ้นงานมีความยาว 15 mm ทำการบันทึกจำนวนรอบ

3.6.9 การทดสอบความร้อนสะสม (Heat build up)

นำยางครูปมาทดสอบหาค่าความร้อนสะสมตามมาตรฐาน ASTM D623 [69] โดยเตรียมชิ้นงานเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 17.8 ± 0.1 mm สูง 25 ± 0.15 mm ใช้น้ำหนักในการกดชิ้นงาน 245 นิวตัน ที่ความเร็ว 30 ± 0.2 Hz หรือที่ความเร็ว 1800 ± 10 rpm โดยให้อุณหภูมิอยู่ที่ 100 °C เป็นเวลา 25 นาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการบันทึกผลการวัดอุณหภูมิของชิ้นงาน และรายงานความร้อนสะสมหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

3.6.10 การทดสอบสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic analysis)

นำยางคงรูปมาตัดชิ้นตัวอย่างให้มีขนาด 40 mm x 5 mm x 2 mm ทำการทดสอบแบบดึง (Rectangular tension) ใช้ความถี่ 1 Hz เปอร์เซ็นต์การยืด (Strain control) 0.1% และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 2°C/min บันทึกค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, E') , มอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, E'') และแทนเดลต้า ($\tan \delta$) หาได้จากสมการ 3.10

$$\tan \delta = E'' / E' \quad (3.10)$$

3.6.11 การทดสอบสัณฐานวิทยา (Scanning electron microscopy, SEM)

นำยางคงรูปมาทดสอบสมบัติสัณฐานวิทยา โดยเตรียมชิ้นงานให้มีความหนาประมาณ 2 mm มาแช่ในไนโตรเจนเหลว เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นหักชิ้นงานในขณะที่เย็นอยู่ เก็บชิ้นงานที่หักได้ไว้ในเดซิเคเตอร์ จากนั้นนำชิ้นงานพื้นที่ภาคตัดขวางไปเคลือบด้วยทองคำ และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ประเทศไทยเป็นผู้นำด้านการผลิตยางธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ยางธรรมชาติส่วนใหญ่ถูกส่งออกนอกประเทศในรูปวัตถุดิบที่มีราคาถูก การนำยางธรรมชาติมาผสมกับยางสังเคราะห์ อาทิเช่นยางบิวทาไดอีน เป็นวิธีหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติ โดยในงานวิจัยนี้ผลิตภัณฑ์ที่คณะผู้วิจัยสนใจในการพัฒนาสูตร ได้แก่ผลิตภัณฑ์ยางถอนขนสัตว์ปีก อันเนื่องจากในปัจจุบันยางถอนขนสัตว์ปีกที่มีประสิทธิภาพสูงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่งผลให้เสียค่าใช้จ่ายออกนอกประเทศจำนวนมากต่อปี ถ้าสามารถพัฒนาสูตรยางถอนขนสัตว์ปีกให้มีคุณภาพเพียงพอกับความต้องการในการใช้งานภายในประเทศได้ จะช่วยสร้างรายได้ให้กับประเทศไทยได้มากขึ้นมหาศาล ซึ่งกลไกการทำงานของยางถอนขนสัตว์ปีกนั้น แทะยางถูกพองอไปมา เกิดแรงเสียดทานกับผิวสัตว์ปีกเป็นระยะเวลาตลอด 24 ชั่วโมงในสายการผลิต ดังนั้นยางถอนขนสัตว์ปีกที่ดีควรมีความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ความร้อนสะสมในยางต่ำ อัตราการขยายตัวของรอยแตกต่ำ สมบัติการล้าตัวต่ำ สมบัติเชิงพลวัตดี การเสีรูปถาวรหลังการกดต่ำ และความต้านทานต่อการขีดถูสูง ซึ่งสมบัติที่กล่าวมานั้นเป็นสมบัติเด่นของยางบิวทาไดอีน คณะผู้วิจัยจึงได้นำยางบิวทาไดอีนมาช่วยในการปรับปรุงสูตรยางผสมที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางถอนขนสัตว์ปีก ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแนวเปรียบเทียบผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอีนที่มีต่อสมบัติของยางผสมคกรูประหว่งยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีน ศึกษาผลของอัตราส่วนยางผสมคกรูประหว่งยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีน และศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกันพัฒนาสูตรยางเป็นผลิตภัณฑ์ยางถอนขนสัตว์ปีก โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 ผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอีนที่แตกต่างกันได้แก่ ผลของปริมาณ 1,2 butadiene rubber (0.0-17.0 %wt) โครงสร้างสายโซ่โมเลกุล (โครงสร้างสายโซ่ตรงและกึ่ง) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (แบบ Unimodal และ Bimodal) ของยางบิวทาไดอีน

ตอนที่ 2 ผลของอัตราส่วนยางผสมคกรูประหว่งยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนที่แตกต่างกัน (อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก)

ตอนที่ 3 ผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน (เขม่าดำ N330 ซิลิกา Hisil®255 และ Sidistar®)

4.1 ผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

ยางบิวทาไดอินเป็นยางที่มีความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อการขีดถูสูง ความร้อนสะสมในยางต่ำ และสมบัติเชิงพลวัตดี ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของผลิตภัณฑ์ยางถนนชนิดรถจักรยาน ในปัจจุบันยางบิวทาไดอินในเชิงการค้ามีหลายเกรด ซึ่งแต่ละเกรดมีโครงสร้างของยางบิวทาไดอินแตกต่างกัน เช่น ปริมาณการจัดเรียงตัวแบบ cis-1,4 แบบ trans-1,4 และแบบ vinyl-1,2 โครงสร้างสายโซ่โมเลกุล และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน ฯลฯ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้ยางบิวทาไดอินเกรดต่าง ๆ ได้แก่ ยาง UBEPOL BR[®] 150, UBEPOL BR[®] 150L, UBEPOL BR[®] 150B, UBEPOL VCR[®] 450, UBEPOL VCR[®] 800, UBEPOL VCR[®] 412 และ UBEPOL VCR[®] 617 รายละเอียดยางบิวทาไดอินแต่ละเกรดที่ใช้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดยางบิวทาไดอินแต่ละเกรดที่ใช้ [12]

เกรดยางบิวทาไดอิน	โครงสร้างสายโซ่โมเลกุล	ปริมาณ 1,2 butadiene rubber (%wt)	การกระจายน้ำหนักโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก, M_w ($\times 10^4$ g/mol)	ความหนืดมูนนี่ (ML 1+4, 100 °C)
UBEPOL BR [®] 150	Medium branching polymer	0.0	แบบ Unimodal	>50	43
UBEPOL BR [®] 150L	Linear polymer				43
UBEPOL BR [®] 150B	Branching polymer				40
UBEPOL VCR [®] 450	Medium branching polymer	3.8	แบบ Unimodal และ Bimodal	45-65	39
UBEPOL VCR [®] 800		5.3			40
UBEPOL VCR [®] 412		12.0	แบบ Unimodal	>50	45
UBEPOL VCR [®] 617		17.0			62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ผลของปริมาณ 1,2 butadiene rubber

ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์ยางบิวทาไดอีน สามารถเกิดปฏิกิริยาจากบิวทาไดอีนมอนอเมอร์ ผ่านกลไก 1,2-addition และ 1,4-addition ได้เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างต่างกัน ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งโครงสร้าง 1,2 butadiene rubber ประกอบด้วยพันธะเดี่ยวที่มีหมู่ห้อย จึงหนูนยากกว่าโครงสร้าง 1,4 butadiene rubber ที่มีพันธะคู่ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g) สูงกว่า เมื่อเทียบกับโครงสร้าง 1,4 butadiene rubber ที่โครงสร้างประกอบด้วยพันธะคู่ มุมพันธะมาก และปริมาตรอิสระในการหมุนสายโซ่โมเลกุล (Free volume) จึงมาก ตามลำดับ (T_g ของโครงสร้าง 1,2 butadiene rubber และ 1,4 butadiene rubber เท่ากับ -28 และ -106°C ตามลำดับ [16])

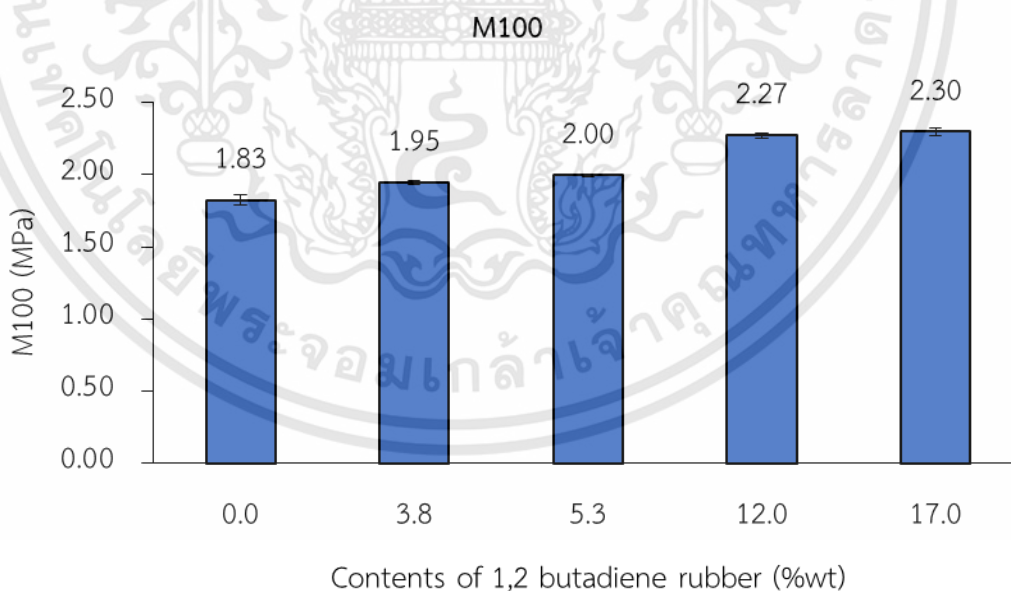
งานวิจัยในตอนนี้ คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาผลของปริมาณ 1,2 butadiene rubber ที่แตกต่างกัน โดยใช้ยางบิวทาไดอีนเกรดทั่วไป ได้แก่ ยาง UBEPOL BR[®] 150L และยางบิวทาไดอีนเกรด UBEPOL VCR[®] 450, UBEPOL VCR[®] 800, UBEPOL VCR[®] 412 และ UBEPOL VCR[®] 617 โดยมีปริมาณของ 1,2 butadiene rubber (1,2 BR) เป็นองค์ประกอบอยู่ที่ 3.8 %wt, 5.3 %wt, 12.0 %wt และ 17.0 %wt ตามลำดับ และใช้อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าความหนืดมูนี และลักษณะการเชื่อมโยง และรูปที่ 4.1-4.3 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100 %, 300 % และความแข็งกดของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ 1,2 butadiene rubber (0.0-17.0 %wt) ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนี มอดูลัสที่ระยะยืด 100 %, 300 % และความแข็งกดเพิ่มขึ้น เนื่องจากโครงสร้าง 1,2 butadiene rubber ประกอบด้วยพันธะเดี่ยวที่มีหมู่ห้อย จึงหนูนยากกว่า 1,4 butadiene rubber ที่มีพันธะคู่ ทำให้มุมพันธะและปริมาตรอิสระในการหมุนสายโซ่โมเลกุลมาก ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของโครงสร้าง 1,2 butadiene rubber สูงกว่าโครงสร้าง 1,4 butadiene rubber ของเมทริกซ์ ตามลำดับ (T_g ของโครงสร้าง 1,2 butadiene rubber และ 1,4 butadiene rubber เท่ากับ -28 และ -106°C ตามลำดับ [16]) ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงพลวัต ดังรูปที่ 4.6 รวมทั้ง 1,2 butadiene rubber ในที่นี้ เป็นยางบิวทาไดอีนเกรดพิเศษที่ถูกสังเคราะห์โดย UBE group ให้เป็นโครงสร้างเส้นใยระดับไมโครเมตร (Micro fiber) แสดงดังรูปที่ 4.4 จึงทำหน้าที่คล้ายสารเสริมแรง (Reinforcing entity) [12] สำหรับเวลาในการเชื่อมโยง (Cure time, $t_{c(90)}$) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณ 1,2 butadiene rubber (0.0-17.0 %wt) ด้วยการที่ 1,2 butadiene rubber มีปริมาณ Allylic hydrogens น้อยกว่าโครงสร้าง 1,4 butadiene rubber จากโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นจึงว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยกัมมะถันลดน้อยลง ซึ่งตามทฤษฎีปฏิกิริยาการเชื่อมโยงด้วยกัมมะถันนั้น เกิดผ่าน Allylic positions ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณ 1,2 butadiene rubber จึงส่งผลให้เวลาในการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น

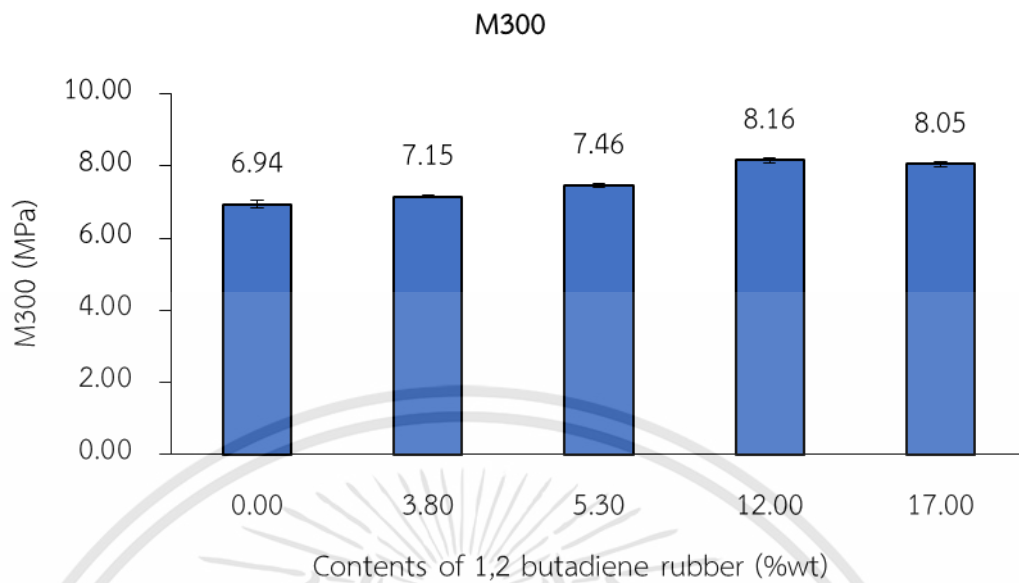
เล็กน้อย [8] แต่ทั้งนี้องค์ประกอบ 1,2 butadiene rubber ไม่มากเกินไป จึงทำให้ลักษณะการเชื่อมโยงโดยรวมแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.2 ความเหนียวและลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน

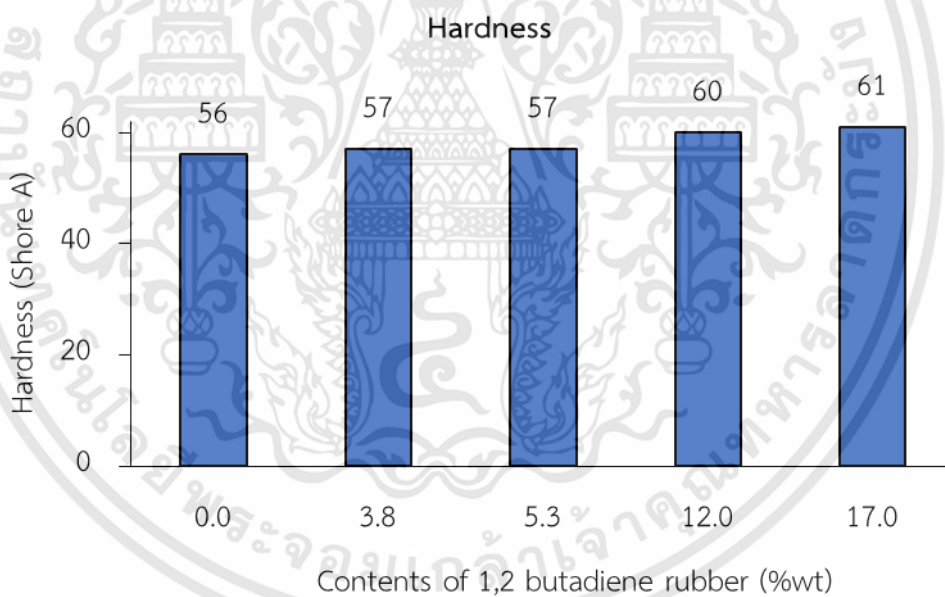
สมบัติ	ปริมาณ 1,2 butadiene rubber (%wt)				
	0.0	3.8	5.3	12.0	17.0
ความเหนียว Com A (ML 1+4, 100 °C)	31	30	30	31	40
ความเหนียว Com B (ML 1+4, 100 °C)	27	26	25	27	33
M_L (dN.m)	1.1	1.0	1.0	1.1	1.3
M_{HF} (dN.m)	14.6	14.6	14.2	15.3	15.6
Scorch time (t_{s1} , min)	1.00	1.10	1.10	1.10	1.10
Cure time ($t_{c(90)}$, min)	3.08	3.12	3.15	3.15	3.17
CRI (min^{-1})	48.1	49.5	48.8	48.8	48.3



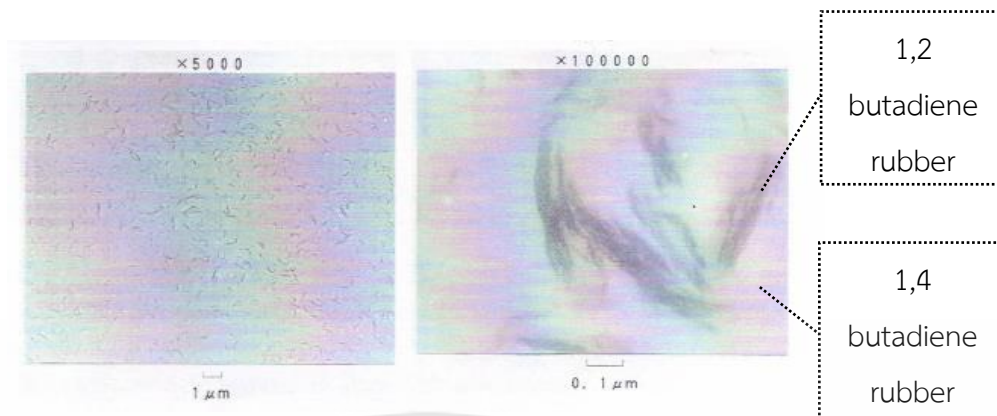
รูปที่ 4.1 มอดุลัสที่ระยะยืด 100 % ของยางผสมรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 มอดุลัสที่ระยะยืด 300 % ของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน



รูปที่ 4.3 ความแข็งกดของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน

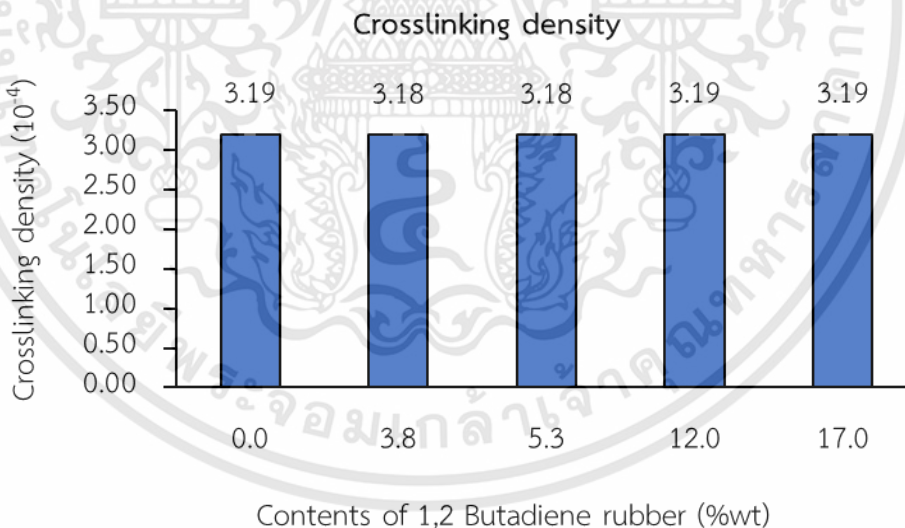


รูปที่ 4.4 โครงสร้าง 1,2 butadiene rubber (โครงสร้างเป็นเส้นใยระดับไมโครเมตร) ที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์ 1,4 butadiene rubber [12]

จากตารางที่ 4.3 แสดงค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขีดถู และการเสียรูปถาวรหลังการกดของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน พบว่าสมบัติดังกล่าวแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ด้วยการที่ทุกสูตรผสมใช้อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก และความแตกต่างของปริมาณ 1,2 butadiene rubber อยู่ที่ปริมาณยางบิวทาไดอินเพียง 30 phr รวมทั้งทุกสูตรผสมใช้สารเคมีเท่ากัน จึงส่งผลให้มีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางใกล้เคียงกัน [17] ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการทดสอบความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยาง แสดงดังรูปที่ 4.5

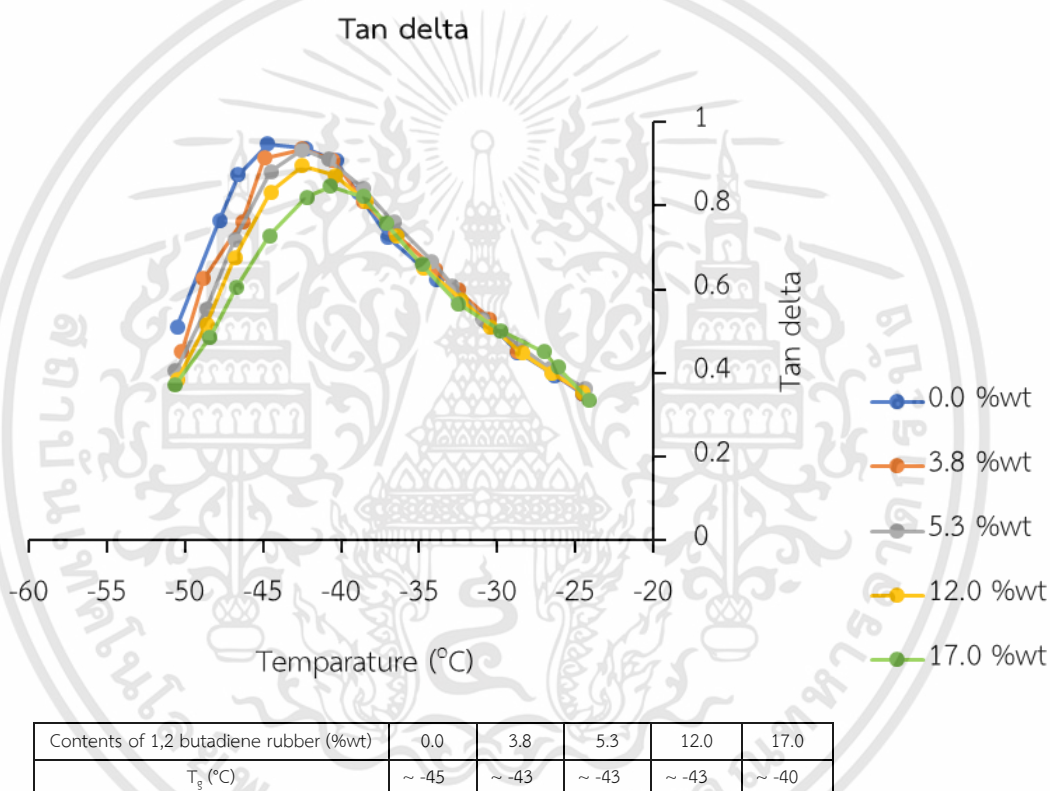
ตารางที่ 4.3 สมบัติของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน

สมบัติ	ปริมาณ 1,2 butadiene rubber (%wt)				
	0.0	3.8	5.3	12.0	17.0
ความแข็งแรงดึง (MPa)	19.3 ± 0.9	19.8 ± 0.4	19.5 ± 0.8	20.3 ± 0.9	19.9 ± 1.1
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	566 ± 11.1	581 ± 10.4	560 ± 11.5	557 ± 11.5	558 ± 11.9
ความต้านทานต่อการฉีกขาด (kN/m)	57.3 ± 0.8	57.0 ± 2.0	57.1 ± 1.5	58.6 ± 0.7	60.3 ± 0.7
ความทนการต่อการขัดถู (cc/3,000 cycles)	0.35 ± 0.02	0.36 ± 0.02	0.38 ± 0.02	0.34 ± 0.02	0.33 ± 0.01
การเสียรูปถาวรหลังการกด (%)	38.12 ± 0.28	36.75 ± 0.48	36.22 ± 0.29	37.91 ± 0.40	38.01 ± 0.14



รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน

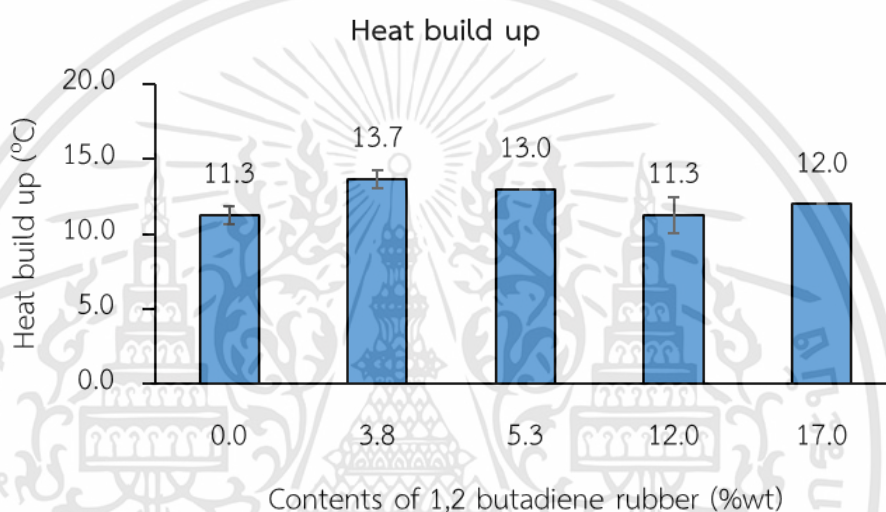
จากรูปที่ 4.6 แสดงสมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ 1,2 butadiene rubber ส่งผลให้แทนเดลต้า (Tan delta) เกิดการเลื่อน (Shift) ไปทางด้านขวา ซึ่งหมายความว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ 1,2 butadiene rubber ทำให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจาก 1,2 butadiene rubber ประกอบด้วยพันธะเดี่ยวที่มีหมู่ห้อย จึงหมุนยากกว่าโครงสร้างที่มีพันธะคู่ของ 1,4 butadiene rubber [22] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhagawan, S.-S. และ Tripathy, D.-K [46] ที่จากการศึกษา พบว่าการใช้สัดส่วน vinyl-1,2 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเพิ่มขึ้น



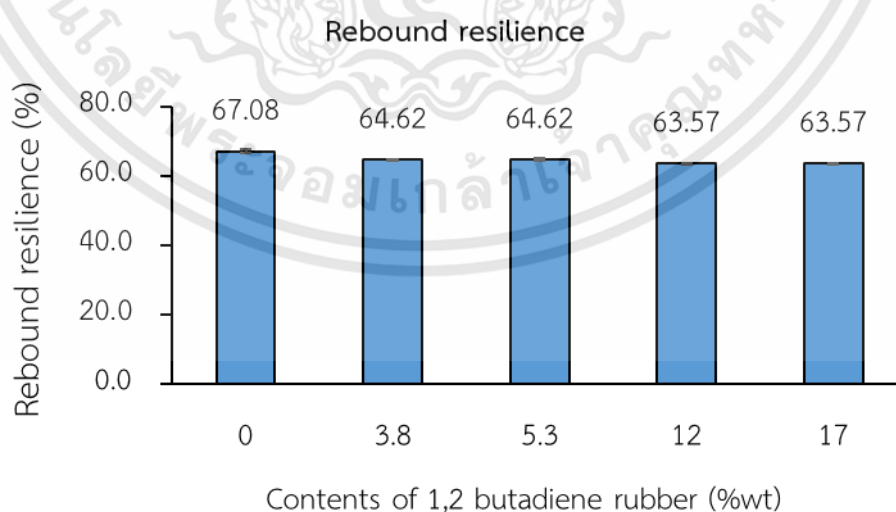
รูปที่ 4.6 สมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.7-4.8 แสดงค่าความร้อนสะสมในยาง และความกระด้างกระดอนของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณ 1,2 butadiene rubber เพิ่มขึ้น ค่าความร้อนสะสมในยาง และความกระด้างกระดอนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งในทางทฤษฎีค่าความร้อนสะสมในยางควรมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ส่วนความกระด้างกระดอนควรมีค่าลดลง เมื่อใช้ 1,2 butadiene rubber เพิ่มขึ้น อันเนื่องจาก 1,2 butadiene rubber ประกอบด้วยพันธะเดี่ยวที่มีหมู่ห้อย จึงหมุนยากกว่าโครงสร้างพันธะคู่ของ 1,4 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

butadiene rubber ดังนั้นการเพิ่ม 1,2 butadiene rubber ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลมีความยืดหยุ่นน้อยลง ความสามารถในการเคลื่อนที่สายโซ่โมเลกุลยากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ 1,4 butadiene rubber เป็นสาเหตุให้ต้องใช้พลังงานที่มากขึ้นในการเคลื่อนที่สายโซ่ จึงทำให้ค่าความร้อนสะสมในยางมากขึ้น และความกระด้างกระดอนลดลง อย่างไรก็ตาม ค่าความร้อนสะสมในยาง และความกระด้างกระดอนจากผลการทดลองแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ คาดว่าเนื่องจากทุกสูตรผสมใช้อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก โดยความแตกต่างของปริมาณ 1,2 butadiene rubber อยู่ที่ปริมาณยางบิวทาไดอิน 30 phr เท่านั้น [22]



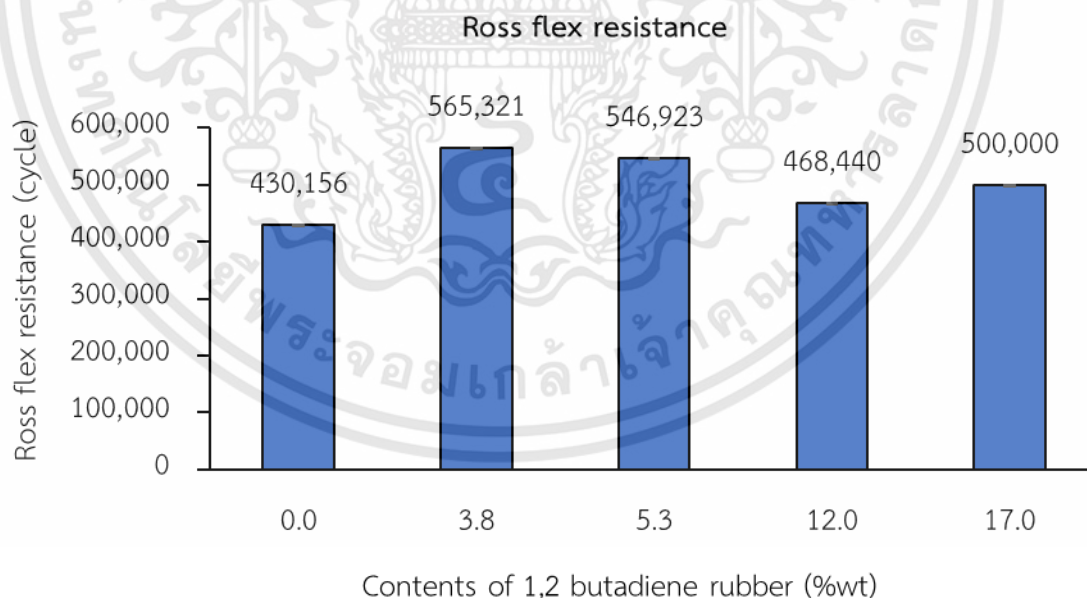
รูปที่ 4.7 ความร้อนสะสมในยางของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน



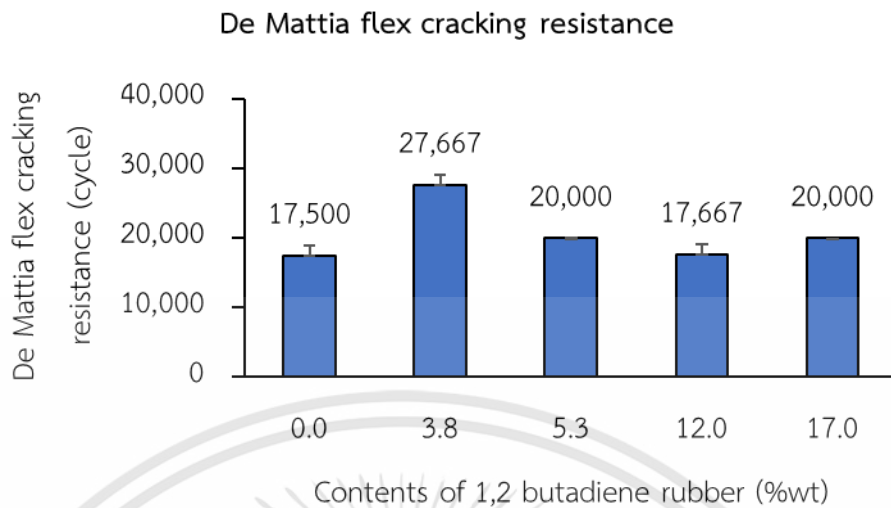
รูปที่ 4.8 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

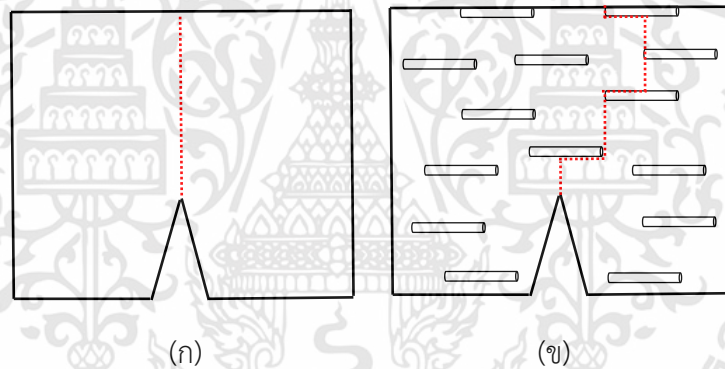
จากรูปที่ 4.9-4.10 แสดงค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา ของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณ 1,2 butadiene rubber 3.8 %wt ส่งผลให้ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา มีค่ามากที่สุด เนื่องจากตามทฤษฎี กลไกการเสียหายของวัสดุ อันเนื่องมาจากแรงสั่น (Dynamic force) ที่ทำให้เกิดความล้า (Fatigue failure) ขึ้นกับการขยายของรอยแตก (Crack growth) และสัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ในการสร้างพื้นที่ใหม่ (New surface area) [22] รวมทั้ง 1,2 butadiene rubber ซึ่งมีสัณฐานวิทยา ลักษณะคล้ายเส้นใยระดับไมโครเมตร (Micro fibers) ทำหน้าที่ขัดขวางรอยแตก [12] แสดงกลไกได้ดังรูปที่ 4.11 จึงทำให้ 1,2 butadiene rubber ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงทิศทางการขยายของรอยแตก ส่งผลให้ต้องสร้างพื้นที่ใหม่เพิ่มมากขึ้น จึงต้องใช้พลังงานในการสร้างพื้นที่ใหม่ดังกล่าวเพิ่มขึ้น ดังนั้นเกิดการขยายของรอยแตกยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fielding, J.H. และคณะ [70] ที่ทำการศึกษาทางธรรมชาติที่มีความเป็นผลึกสูง พบว่ายางดังกล่าวสามารถพัฒนาความต้านทานการขยายรอยแตกได้ เมื่อยางธรรมชาติมีความเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้ปริมาณ 1,2 butadiene rubber 12 %wt และ 17 %wt ทำให้ค่าดังกล่าวลดลง เนื่องจากเป็นการใช้ปริมาณ 1,2 butadiene rubber มากเกินไป อาจส่งผลให้โครงสร้างแข็งของ 1,2 butadiene rubber เป็นจุดเริ่มต้นในการเกิดรอยแตก



รูปที่ 4.9 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศาของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน



รูปที่ 4.10 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคงรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน



รูปที่ 4.11 ภาพจำลองการขยายตัวของรอยแตก (ก) ยางบิวทาไดอินทั่วไป และ (ข) ยางบิวทาไดอิน ที่มี 1,2 butadiene rubber อยู่ในองค์ประกอบทำหน้าที่ขัดขวางการเกิดและการขยายของรอยแตก

4.1.2 ผลของโครงสร้างสายโซ่ตรงและกิ่ง

ในทางทฤษฎีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ กล่าวคือ โครงสร้างสายโซ่กิ่ง มีจำนวนปลายสายโซ่ (Chain ends) มากกว่า เมื่อเทียบกับโครงสร้างสายโซ่ตรง ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งบริเวณปลายสายโซ่เป็นบริเวณที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่หรือองศาอิสระ (Degrees of freedom) สูง ดังนั้นโครงสร้างที่มีจำนวนปลายสายโซ่โมเลกุลมาก สายโซ่โมเลกุลมีโอกาสเสียดสีขัดถูกันมาก จึงทำให้เกิดความร้อนสะสมในยางสูง และสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ไม่ดี ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 หมู่ปลายสายโซ่โมเลกุลของ (ก) โมเดลโครงสร้างสายโซ่ตรง และ (ข) โมเดลโครงสร้างสายโซ่กิ่ง

งานวิจัยในตอนนี้ คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาผลของโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกัน โดยใช้ยางบิวทาไดอีนเกรดทั่วไป ได้แก่ ยาง UBEPOL BR[®] 150 ซึ่งมีโครงสร้างแบบ Medium branching ยาง UBEPOL BR[®] 150L มีโครงสร้างแบบ Linear polymer และยาง UBEPOL BR[®] 150B มีโครงสร้างแบบ Branching polymer ซึ่งยางบิวทาไดอีนแต่ละเกรดมีค่า Linearity index แตกต่างกัน และใช้อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก

จากตารางที่ 4.4-4.5 แสดงค่าความหนืดมูนนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกล และรูปที่ 4.13 แสดงสมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน พบว่าการใช้ยางบิวทาไดอีนที่โครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sakamoto, Y และคณะ [49] ที่ทำการศึกษา Linear 2-arm poly(L-lactide)s ที่มีโครงสร้างสายโซ่ตรงและ Branched 4-arm poly(L-lactide)s ที่มีโครงสร้างสายโซ่กิ่ง พบว่าพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกันนั้น มีการเคลื่อนที่สายโซ่ และอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากยางแต่ละเกรดมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักใกล้เคียงกัน รวมทั้งทุกสูตรผสมใช้อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยาง

บิวทาไดอินที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก และความแตกต่างของโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลอยู่ที่ปริมาณยางบิวทาไดอิน 30 phr นอกจากนี้ทุกสูตรผสมยังใช้สารเคมีในปริมาณที่เท่ากัน จึงส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการทดสอบความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยาง แสดงดังรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.4 ความหนืดมูนี และลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมครูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน

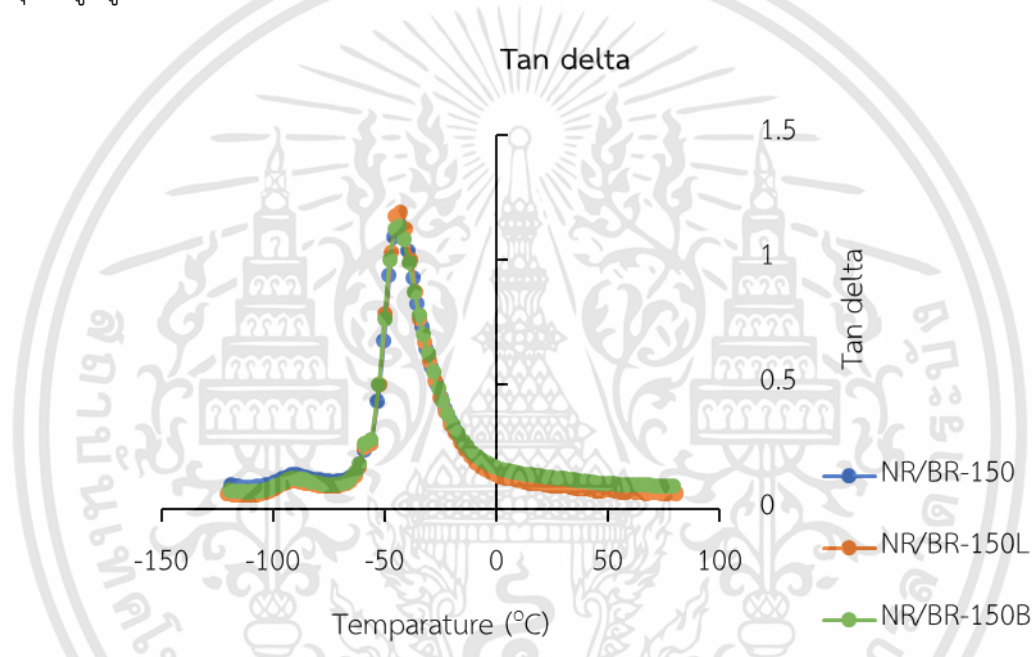
สมบัติ	NR/BR-150	NR/BR-150L	NR/BR-150B
ความหนืดมูนี Com A (ML 1+4, 100 °C)	44	41	42
ความหนืดมูนี Com B (ML 1+4, 100 °C)	35	33	34
M_L (dN.m)	1.4	1.3	1.3
M_{HF} (dN.m)	16.4	15.1	15.7
Scorch time (t_{s1} , min)	1.10	1.10	1.10
Cure time ($t_{c(90)}$, min)	3.39	3.38	3.39
CRI (min^{-1})	43.67	43.86	43.67

ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของยางผสมครูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน

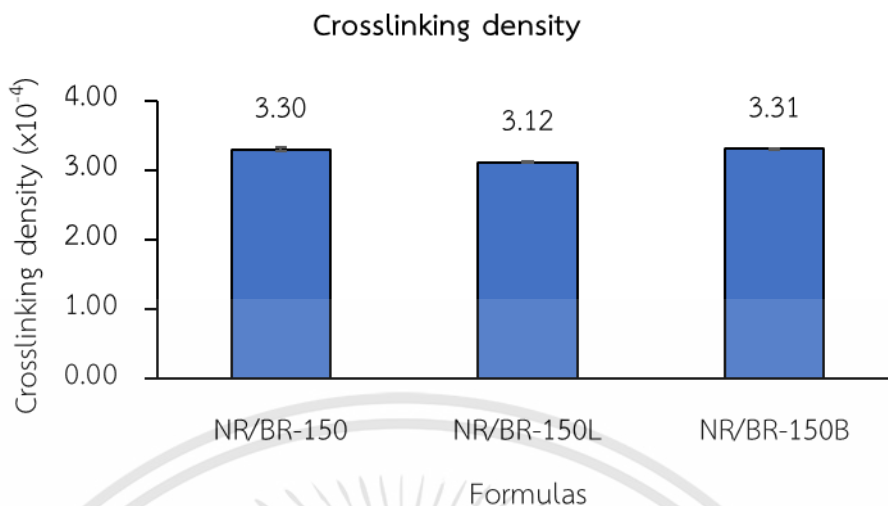
สมบัติ	NR/BR-150	NR/BR-150L	NR/BR-150B
ความแข็งแรงดึง (MPa)	20.1 ± 0.3	21.0 ± 0.2	20.9 ± 0.1
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	558 ± 5	585 ± 3	567 ± 3
มอดูลัสที่ระยะยืด 100 % (MPa)	1.99 ± 0.03	1.81 ± 0.01	2.03 ± 0.02
มอดูลัสที่ระยะยืด 300 % (MPa)	7.85 ± 0.10	7.01 ± 0.07	7.93 ± 0.08
ความแข็งกด (Shore A)	60 ± 0	59 ± 0	60 ± 0
ความต้านทานต่อการฉีกขาด (kN/m)	56.7 ± 0.8	53.9 ± 1.0	55.8 ± 1.4
ความต้านทานต่อการขัดถู (cc/3,000 cycles)	0.38 ± 0.05	0.34 ± 0.01	0.31 ± 0.00
การเสีรูปถาวรหลังการกด (%)	35.51 ± 0.61	38.99 ± 0.13	39.34 ± 0.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 แสดงสมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน พบว่ายางผสมคกรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) เนื่องจากค่า (Glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวปรากฏค่า T_g 2 ค่า นั่นคือที่ประมาณ -90 และ -40 องศาเซลเซียส ซึ่งจากเดิมค่า T_g ของยางบิวทาไดอีนและยางธรรมชาติมีค่าประมาณ -106 และ -70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [13,16] หมายความว่า ค่า T_g ของยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนเกิดการเลื่อน (Shift) ไปทางขวา คาดว่าเนื่องจากผลของการเชื่อมขวาง (Crosslinking) ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของวัฏภาคยางทั้ง 2 ชนิด ยากขึ้น และ T_g เกิดการ Shift ไปที่อุณหภูมิสูงขึ้น ตามลำดับ

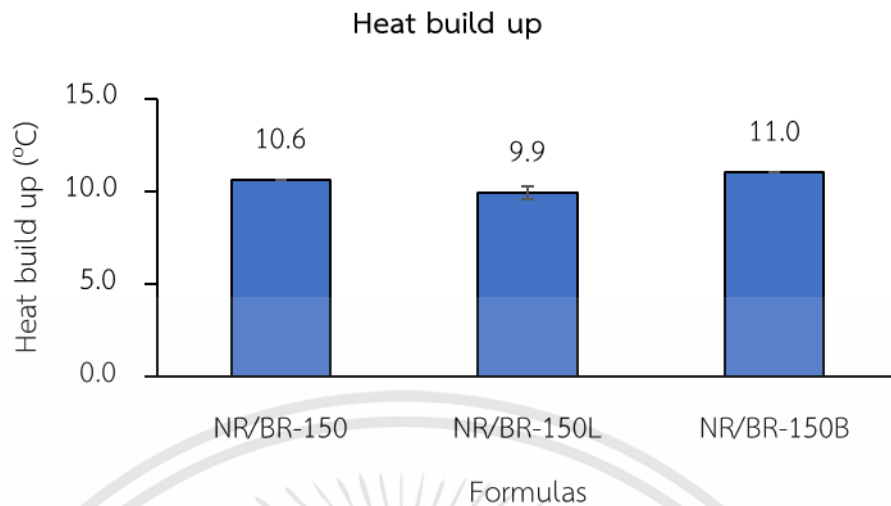


รูปที่ 4.13 สมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน

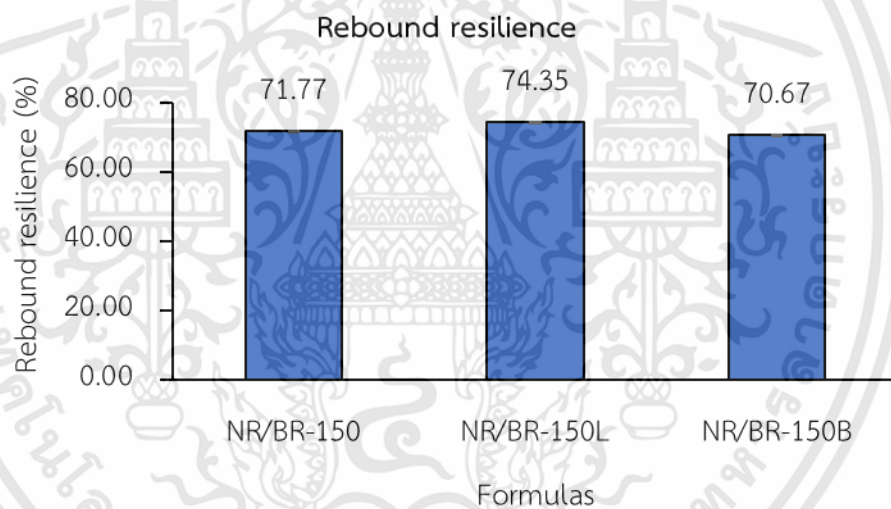


รูปที่ 4.14 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน

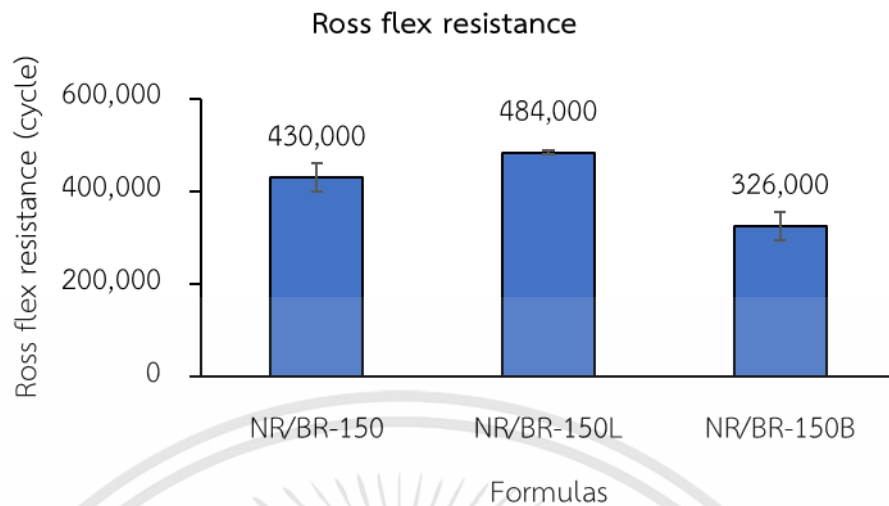
จากรูปที่ 4.15-4.18 แสดงค่าความร้อนสะสมในยาง ความกระด้างกระดอน ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา ของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน ตามลำดับ พบว่ายางบิวทาไดอีนที่โครงสร้างสายโซ่กิ่ง ให้ค่าความกระด้างกระดอน ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา น้อยกว่ายางบิวทาไดอีนที่โครงสร้างสายโซ่ตรง เนื่องจากโครงสร้างสายโซ่กิ่ง มีจำนวนปลายสายโซ่ (Chain ends) โมเลกุลจำนวนมาก เมื่อเทียบกับโครงสร้างสายโซ่ตรง [22] ดังรูปที่ 4.12 ซึ่งปลายสายโซ่เป็นบริเวณที่มีการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่อมีจำนวนปลายสายโซ่โมเลกุลจำนวนมาก สายโซ่โมเลกุลมีโอกาสเสียดสีขัดถูกันมาก จึงทำให้ความร้อนสะสมในยางมีแนวโน้มมากขึ้น [22] รวมทั้งพอลิเมอร์มีสมบัติการถ่ายเทความร้อนไม่ดี จึงทำให้ค่าความกระด้างกระดอน ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา น้อยกว่ายางบิวทาไดอีนที่โครงสร้างสายโซ่ตรง ตามลำดับ



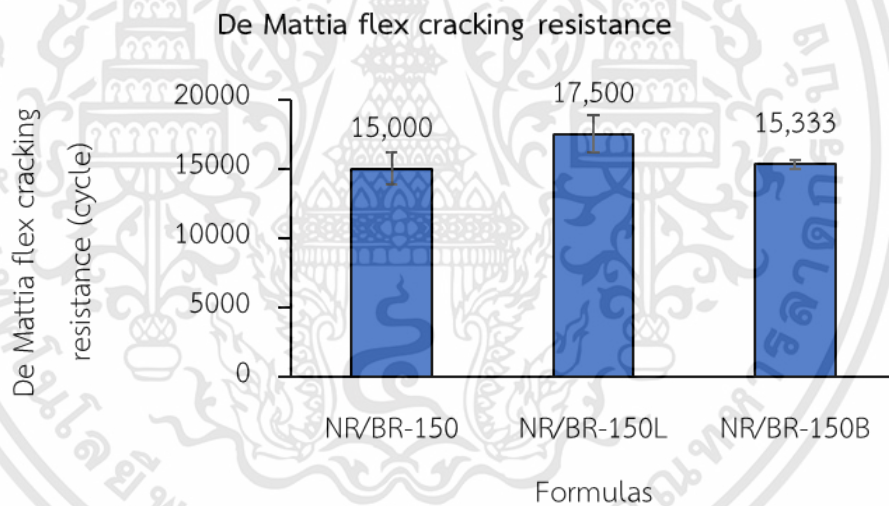
รูปที่ 4.15 ความร้อนสะสมของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน



รูปที่ 4.16 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน



รูปที่ 4.17 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศาของยางผสมคกรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล แตกต่างกัน



รูปที่ 4.18 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคกรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล แตกต่างกัน

4.1.3 ผลของการกระจายน้ำหนักโมเลกุล

พอลิเมอร์ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ย่อมส่งผลให้สมบัติของพอลิเมอร์แตกต่างกัน กล่าวคือ พอลิเมอร์ที่มีลักษณะการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal นั้น ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยใกล้เคียงกัน มักให้สมบัติเชิงกลที่ดี สำหรับพอลิเมอร์ที่มีลักษณะการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal นั้น ประกอบด้วยน้ำหนักโมเลกุลต่ำและสูง ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลต่ำเป็นส่วนที่มีผลดีต่อการผสม และการขึ้นรูปด้วยการทำหน้าที่เสมือนสารหล่อลื่น ส่วนน้ำหนักโมเลกุลสูงเป็นส่วนที่มีผลดีต่อสมบัติเชิงกล โมเดลแสดงดังรูปที่ 2.6 ดังนั้นงานวิจัยในตอนนี้ คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาผลของการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน โดยใช้ยาง UBEPOL VCR® 450 และ UBEPOL VCR® 800 ซึ่งมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลทั้งแบบ Unimodal และ Bimodal มีปริมาณของ 1,2 butadiene rubber เป็นองค์ประกอบอยู่ที่ 3.8 %wt และ 5.3 %wt ตามลำดับ และใช้อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก

จากตารางที่ 4.6-4.7 แสดงค่าความหนืดมูนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ตามลำดับ พบว่าการใช้ยางบิวทาไดอินที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากยางแต่ละเกรดมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นน้ำหนักโมเลกุลที่มีค่าสูงกว่าน้ำหนักโมเลกุลวิกฤต (Critical molecular weight, M_c) ของพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ อาจส่งผลให้ค่าสมบัติเชิงกลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง [22] แสดงดังรูปที่ 4.19 นอกจากนี้ทุกสูตรผสมใช้อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก และใช้สารเคมีในปริมาณที่เท่ากัน ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.20

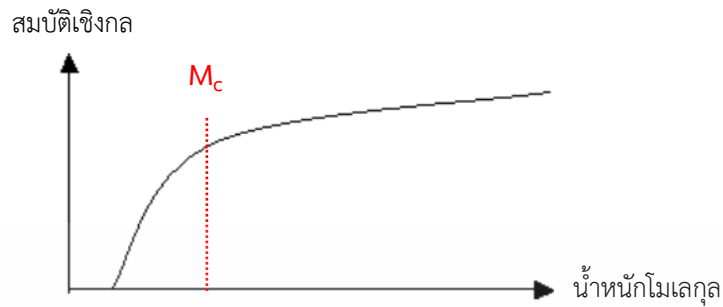
ตารางที่ 4.6 ความหนืดมูนิ และลักษณะการเชื่อมโยงของของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

สมบัติ	3.8 %wt		5.3 %wt	
	Uni-modal	Bi-modal	Uni-modal	Bi-modal
ความหนืดมูนิ Com A (ML 1+4, 100 °C)	44	43	43	44
ความหนืดมูนิ Com B (ML 1+4, 100 °C)	34	35	33	34
M_L (dN.m)	1.4	1.4	1.3	1.4
M_{HF} (dN.m)	15.4	15.1	15.4	14.9
Scorch time (t_{s1} , min)	1.10	1.00	1.00	1.00
Cure time (t_{c90} , min)	3.10	3.10	3.10	3.10
CRI (min^{-1})	50.0	47.6	50.0	47.6

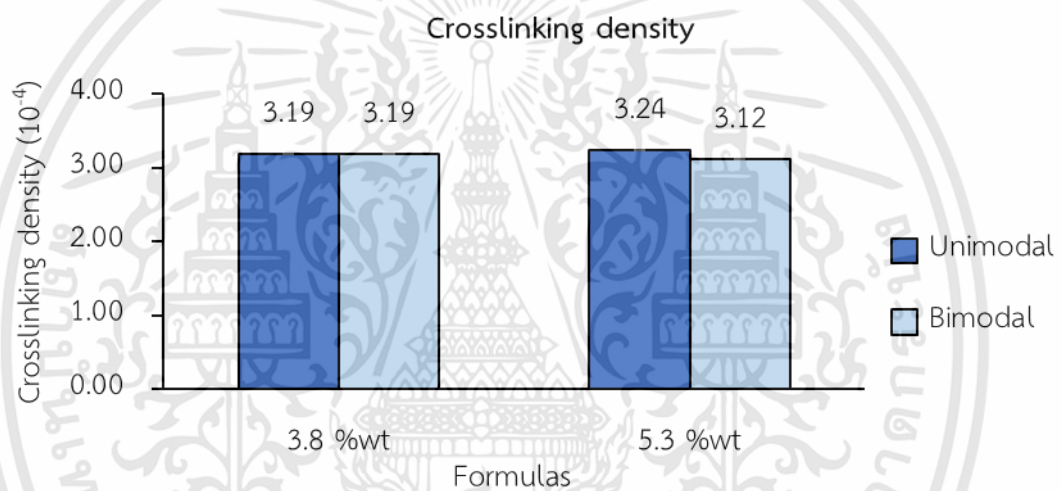
ตารางที่ 4.7 สมบัติเชิงกลของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

สมบัติ	3.8 %wt		5.3 %wt	
	Uni-modal	Bi-modal	Uni-modal	Bi-modal
ความแข็งแรงดึง (MPa)	24.4 ± 2.0	23.1 ± 1.2	23.9 ± 1.7	21.7 ± 2.1
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	617 ± 11	595 ± 13	604 ± 5	573 ± 18
มอดุลัสที่ระยะยืด 100 % (MPa)	1.98 ± 0.03	1.98 ± 0.01	2.08 ± 0.05	1.99 ± 0.03
มอดุลัสที่ระยะยืด 300 % (MPa)	7.77 ± 0.15	7.71 ± 0.15	8.05 ± 0.06	7.79 ± 0.14
ความแข็งกด (Shore A)	52 ± 0	52 ± 0	53 ± 0	51 ± 0
ความต้านทานต่อการฉีกขาด (kN/m)	56.5 ± 0.6	54.2 ± 1.0	55.4 ± 0.8	57.3 ± 1.0
ความต้านทานต่อการขัดถู (cc/3,000 cycles)	0.30 ± 0.01	0.32 ± 0.02	0.29 ± 0.01	0.30 ± 0.02
การเสียรูปถาวรหลังการกด (%)	38.77 ± 0.99	34.00 ± 0.46	38.30 ± 0.91	35.60 ± 0.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

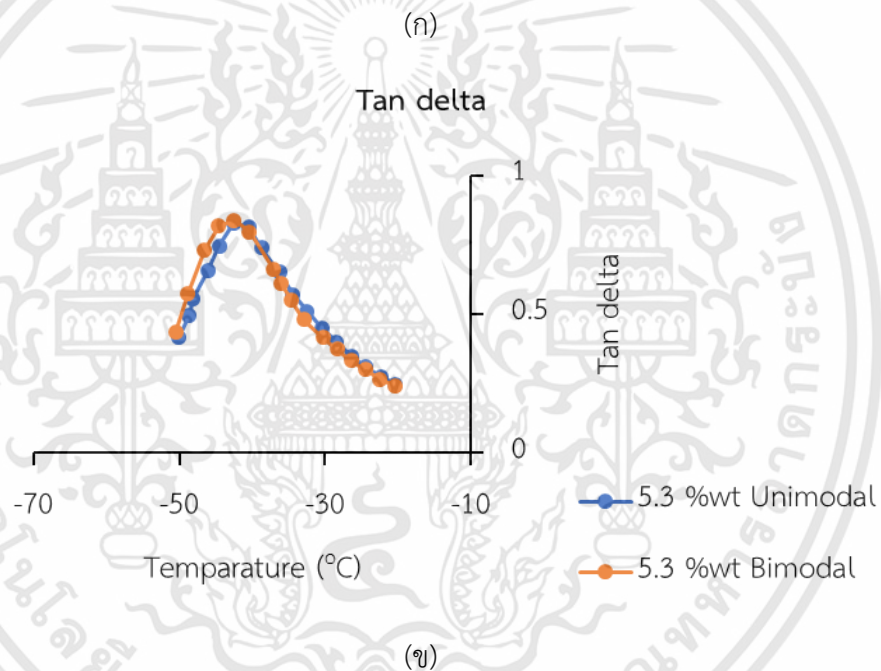
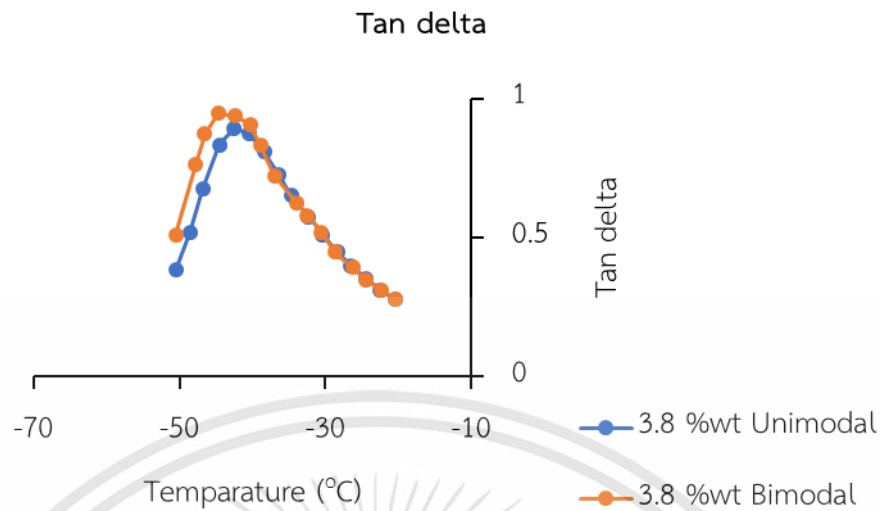


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและสมบัติเชิงกล [71]



รูปที่ 4.20 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

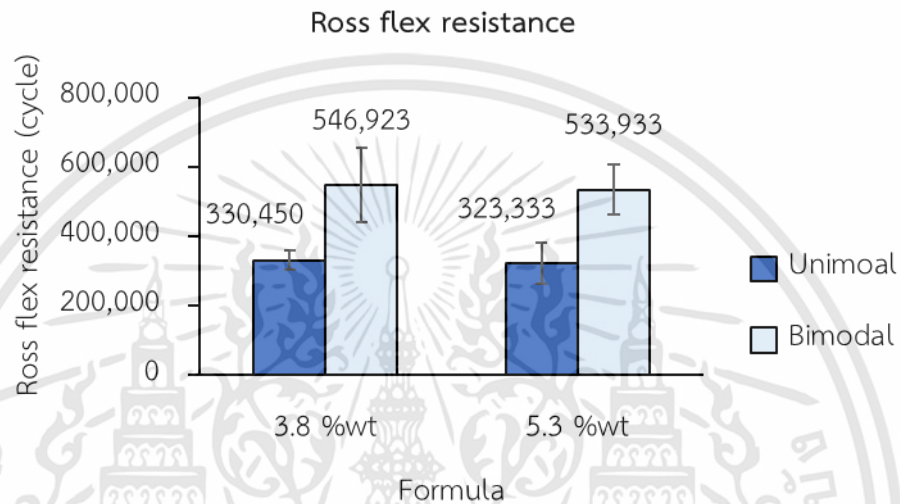
จากรูปที่ 4.21 แสดงสมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันของสูตรยาง (ก) 3.8 %wt และ (ข) 5.3 %wt พบว่าพอลิเมอร์ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal ให้ค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่าแบบ Unimodal เล็กน้อย เนื่องจากองค์ประกอบน้ำหนักโมเลกุลต่ำในการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pradiykanti, L. และ Satapathy, D. [50] ที่ทำการศึกษผลของการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีนที่แตกต่างกันต่ออุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว พบว่าค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วของ PS ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal มีค่ามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับแบบ Bimodal



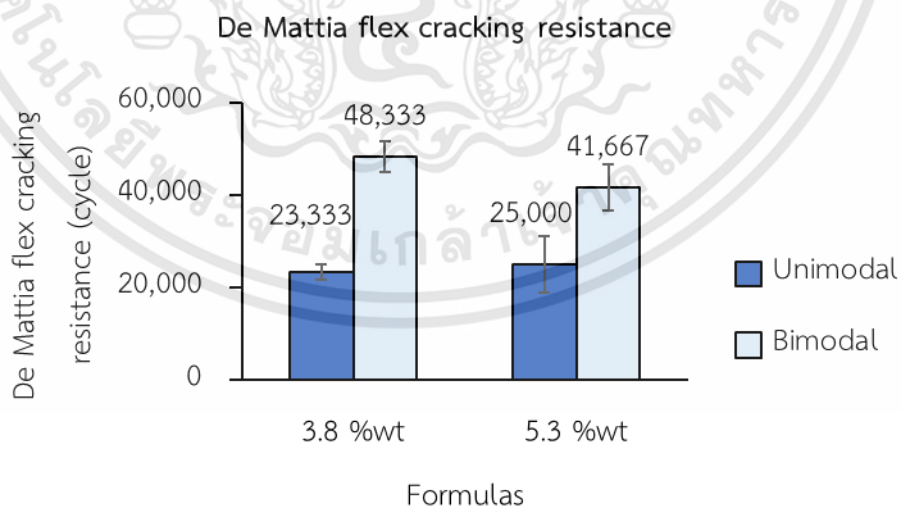
รูปที่ 4.21 สมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันของสูตรยาง (ก) 3.8 %wt และ (ข) 5.3 %wt

จากรูปที่ 4.22-4.23 แสดงค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา ของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ตามลำดับ พบว่ายางบิวทาไดอีนที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal มีค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา มากกว่ายางบิวทาไดอีนที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal เนื่องจากผลของส่วนน้ำหนักโมเลกุลสูงในยางบิวทาไดอีนที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal มีความยืดหยุ่นมาก จึงช่วยในการ

กระจายแรง รวมทั้งน้ำหนักโมเลกุลสูง มีจำนวนหมู่ปลายสายโซ่น้อย ส่งผลให้ความร้อนสะสมในยางน้อย ซึ่งค่าดังกล่าวสัมพันธ์โดยตรงกับค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus) ของยางผสมคกรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันของสูตรยาง (ก) 3.8 %wt และ (ข) 5.3 %wt แสดงดังรูปที่ 4.24 จึงส่งผลให้ยางบิวทาไดอินที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal มีค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา มากกว่ายางบิวทาไดอินที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal

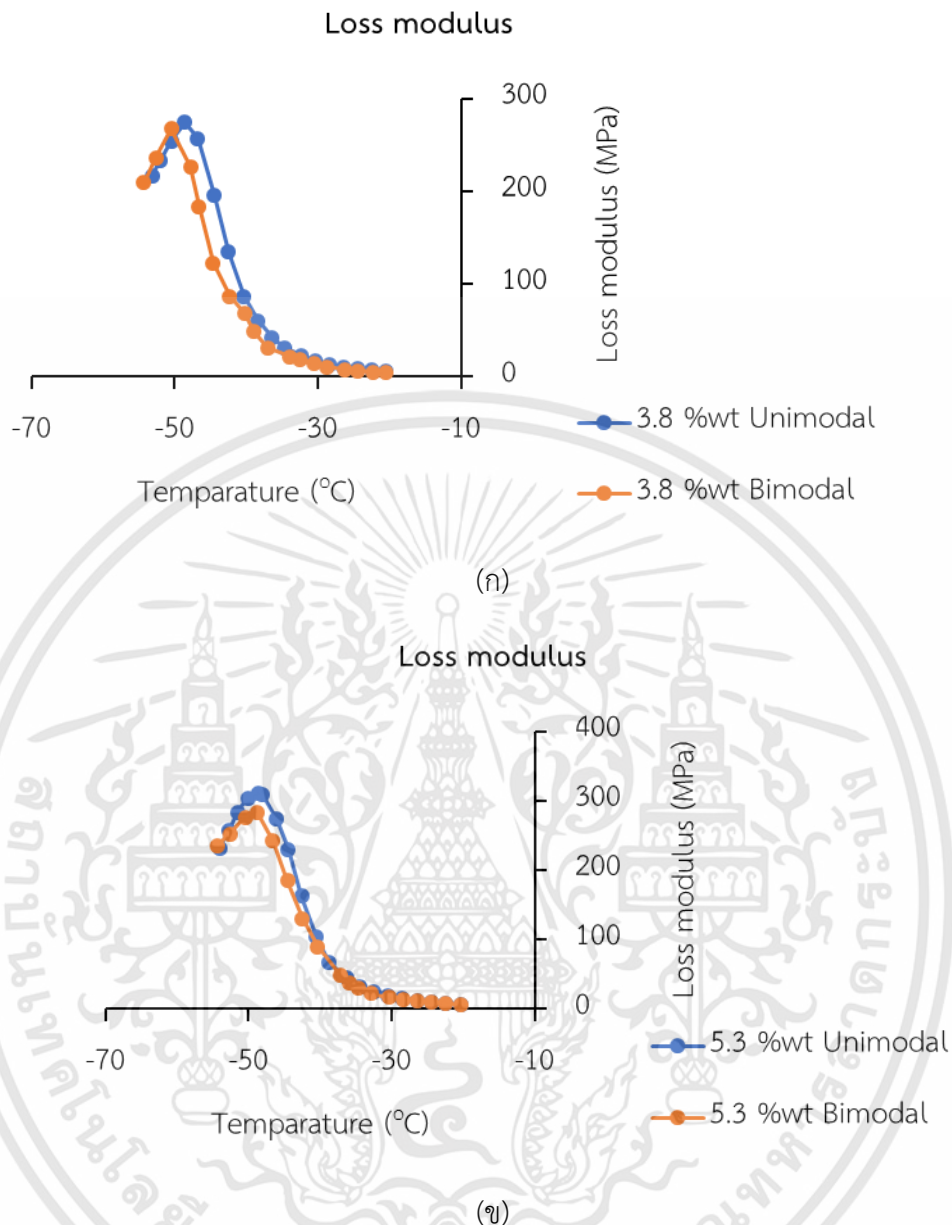


รูปที่ 4.22 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศาของยางผสมคกรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน



รูปที่ 4.23 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคกรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

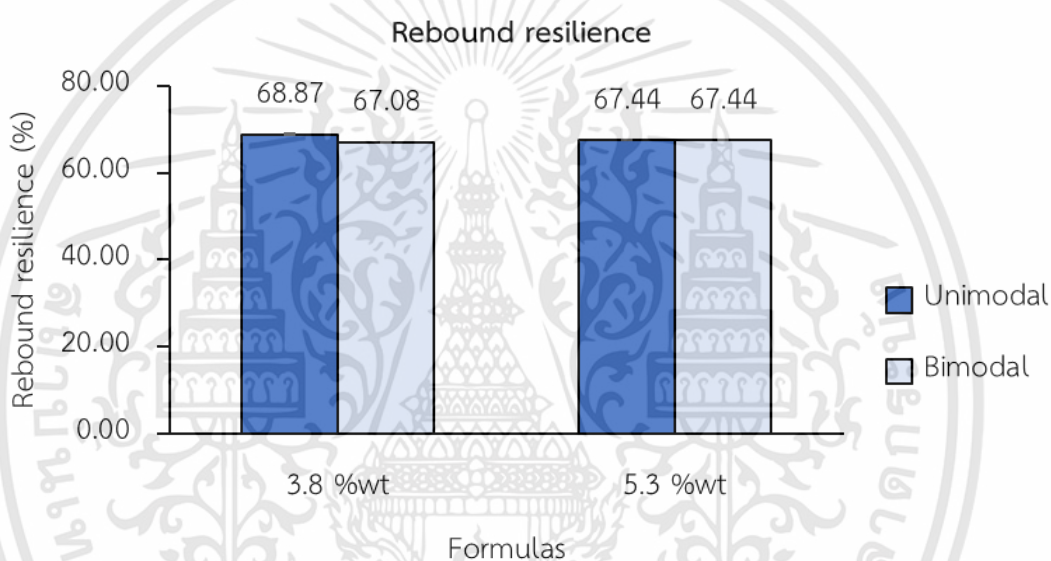


รูปที่ 4.24 โมดูลัสสูญเสียของยางผสมรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันของสูตรยาง (ก) 3.8 %wt และ (ข) 5.3 %wt

จากรูปที่ 4.25 แสดงความกระด้างกระดอนของยางผสมรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน พบว่ายางบิวทาไดอีนที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ให้ค่าความกระด้างกระดอนแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งในทางทฤษฎียางบิวทาไดอีนที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal ควรมีความกระด้างกระดอนมากกว่ายางบิวทาไดอีนที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal เนื่องจากผลของส่วนน้ำหนักโมเลกุลสูงในยางบิวทาไดอีนที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal มีจำนวนหมู่ปลายสายโซ่สั้น ส่งผลให้ความร้อนสะสมในยางน้อย ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งความร้อนสะสมในยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรผกผันกับค่าความกระด้างกระดอน [9] ดังนั้นยางบิวทาไดอินที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal ควรค่าความกระด้างกระดอนมากกว่ายางบิวทาไดอินที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ คาดว่าเนื่องจากความกระด้างกระดอน เป็นสมบัติเชิงกล และในงานวิจัยนี้ใช้อย่างที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นน้ำหนักโมเลกุลที่มีค่าสูงกว่าน้ำหนักโมเลกุลวิกฤต (Critical molecular weight, M_c) ของพอลิเมอร์ ดังนั้นจึงทำให้สมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ อาจส่งผลให้ค่าสมบัติเชิงกลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง [71] นอกจากนี้ทุกสูตรผสมใช้อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก และมีค่าความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางใกล้เคียงกันดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.25 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

จากผลการทดลองในงานวิจัยตอนที่ 1 นี้ จึงเลือกใช้ยางบิวทาไดอิน UBEPOL VCR® 450 ที่มีปริมาณ 1,2 butadiene rubber 3.8 %wt และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal เนื่องจากให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอสูง การเสีรูปถาวรหลังการกดต่ำ สมบัติเชิงกลและเชิงพลวัตดี ซึ่งเป็นสมบัติที่มีความจำเป็นต่อการนำไปใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ยางถนนขนส่งตัวปี

4.2 ผลของอัตราส่วนยางผสมคกรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากงานวิจัยของอิทธิพล แจ่มชัด และคณะ [6] ที่ทำการศึกษาผลอัตราส่วนยางผสมคกรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน ได้แก่ อัตราส่วน 70/30, 80/20 และ 90/10 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราส่วน 70/30 ให้ผลการทดลองโดยรวมดีที่สุด งานวิจัยในตอนนี คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาอัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 60/40 เปรียบเทียบกับ 70/30 เพื่อดูความแตกต่างของผลการทดลอง อันเนื่องจากบางผลการทดลองในตอนที 4.1 ไม่แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของแต่ละเกรดยางบิวทาไดอิน โดยมีสมมติฐานคือ การมีอัตราส่วนยางบิวทาไดอินมากเกินไป อาจส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางถนน สัตว์ปีกมีสมบัติดีขึ้น ด้วยสมบัติเด่นของยางบิวทาไดอินในด้านความยืดหยุ่น ความต้านทานต่อการขีดถู ความร้อนสะสมในยางต่ำ และสมบัติเชิงพลวัตดี ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของผลิตภัณฑ์ยางถนน สัตว์ปีก สำหรับงานวิจัยในตอนนี้นั้น ไม่ทำการเพิ่มปริมาณยางบิวทาไดอินมากกว่า 40 phr เนื่องจาเป็นการใช้ยางบิวทาไดอินที่มากเกินไป อาจส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้น การผสมและการขึ้นรูปเป็นไปได้ยากขึ้น โดยใช้ยางบิวทาไดอินเกรดต่าง ๆ ได้แก่ ยาง UBEPOL BR[®] 150, UBEPOL BR[®] 150L, UBEPOL BR[®] 150B, UBEPOL VCR[®] 450, UBEPOL VCR[®] 800, UBEPOL VCR[®] 4 1 2 และ UBEPOL VCR[®] 617 รายละเอียดยางบิวทาไดอินแต่ละเกรดที่ใช้แสดงดังตารางที 4.1

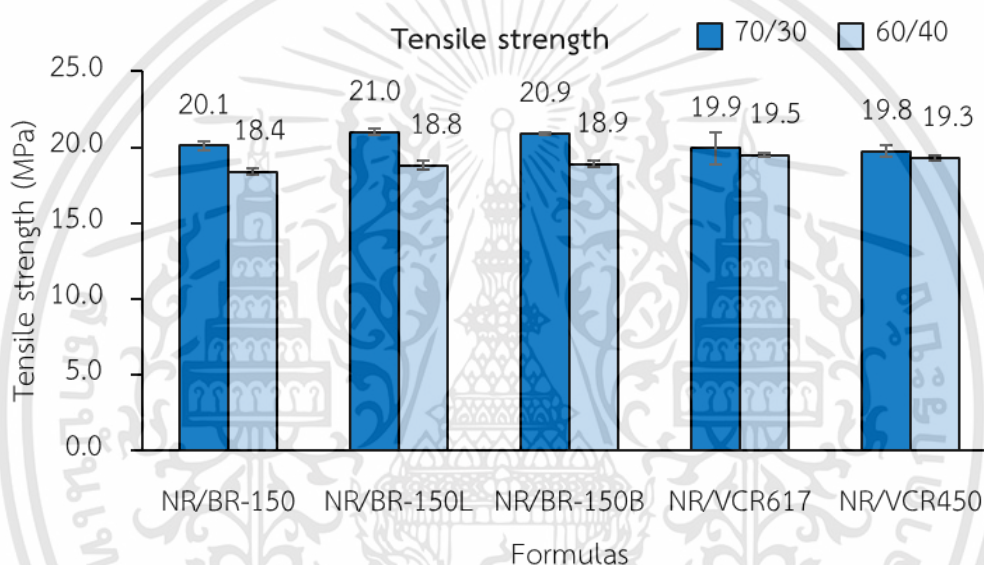
จากตารางที 4.8 แสดงความหนืดมูนี้ และลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคกรูที่ใช้ อัตราส่วนยางผสมคกรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL BR[®] 150, UBEPOL BR[®] 150L และ UBEPOL BR[®] 150B ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนี้ และลักษณะการเชื่อมโยงโดยรวมแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ทั้งนี้เมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL VCR[®] 617 และ UBEPOL VCR[®] 450 ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL VCR[®] ประกอบด้วย 1,2 butadiene rubber ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งมากกว่า 1,4 butadiene rubber ด้วยการมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วสูง จึงส่งผลให้ค่าความหนืดมูนี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามลำดับสำหรับลักษณะในการเชื่อมโยง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL VCR[®] 617 และ UBEPOL VCR[®] 450 ส่งผลให้ค่าเวลาในการเชื่อมโยงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL VCR[®] ประกอบด้วย 1,2 butadiene rubber ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีปริมาณ Allylic hydrogens น้อยกว่าโครงสร้าง 1,4 butadiene rubber ดังนั้นจึงว่องไวต่อปฏิกิริยาเชื่อมโยงด้วยกำมะถันลดน้อยลง ดังทีกล่าวมาแล้วในตอนที 4.1.1 ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกัน

ตารางที่ 4.8 ความเหนียวและลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคงรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสม
คงรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

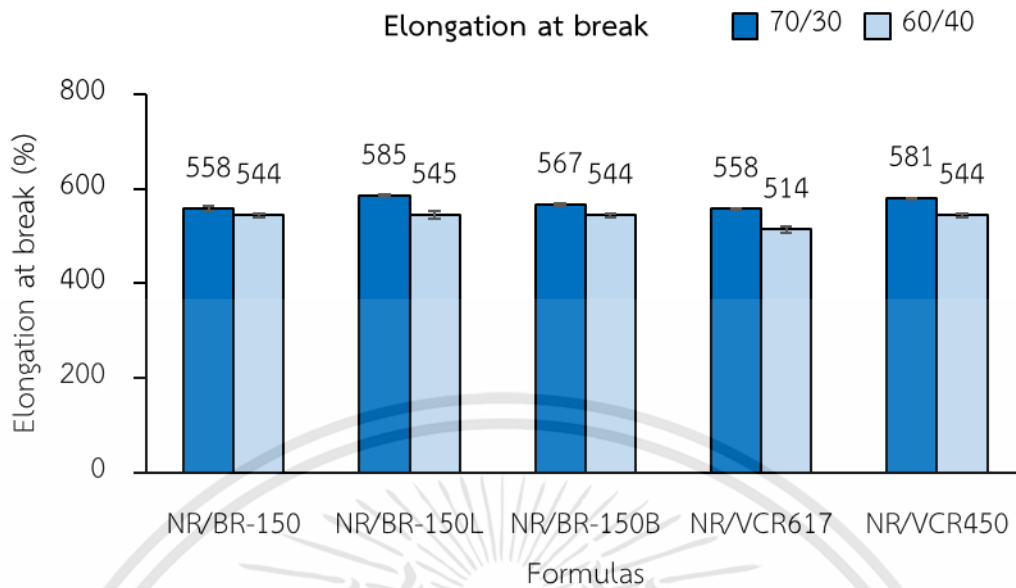
สมบัติ		NR/BR- 150	NR/BR- 150L	NR/BR- 150B	NR/VCR 617	NR/VCR 450
ความเหนียว Com A (ML 1+4, 100 °C)	70/30	44	41	42	40	30
	60/40	42	43	41	47	40
ความเหนียว Com B (ML 1+4, 100 °C)	70/30	35	33	34	33	26
	60/40	35	36	33	39	34
M_L (dN.m)	70/30	1.4	1.3	1.3	1.3	1.0
	60/40	1.4	1.5	1.4	1.7	1.4
M_{HF} (dN.m)	70/30	16.4	15.1	15.7	15.6	14.6
	60/40	16.7	16.8	16.2	19.1	17.0
Scorch time (t_{s1} , min)	70/30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10
	60/40	1.10	1.10	1.10	1.00	1.10
Cure time (t_{c90} , min)	70/30	3.09	3.08	3.09	3.10	3.12
	60/40	3.38	3.33	3.43	3.43	3.39
CRI (min^{-1})	70/30	47.85	48.07	47.85	47.62	49.50
	60/40	43.86	44.25	42.92	41.15	43.67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

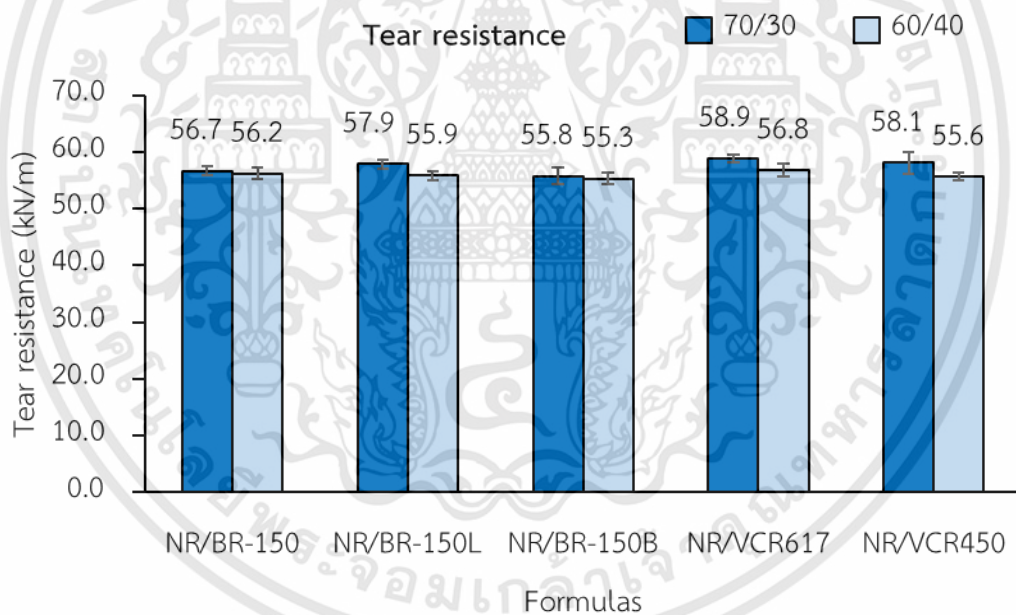
จากรูปที่ 4.26-4.30 แสดงค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา ของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคองรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนที่แตกต่างกัน ตามลำดับ พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางบิวทาไดอีน เนื่องจากยางธรรมชาติมีความเป็นระเบียบสูง จึงทำให้ยางธรรมชาติตกผลึกได้ง่ายเมื่อถูกยืด (Strain-induced crystallization) ซึ่งผลึกที่เกิดขึ้นนั้น ช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับยาง ดังนั้นยางธรรมชาติจึงมีค่าความแข็งแรงสูงกว่า เมื่อเทียบกับยางบิวทาไดอีนที่ไม่สามารถตกผลึกเมื่อได้รับแรงดึง



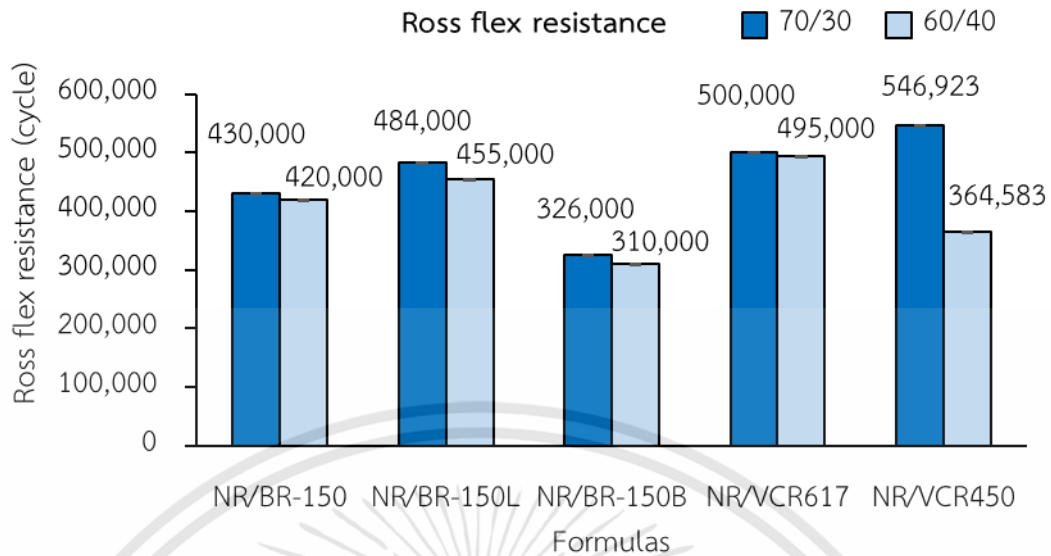
รูปที่ 4.26 ความแข็งแรงดึงของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคองรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนที่แตกต่างกัน



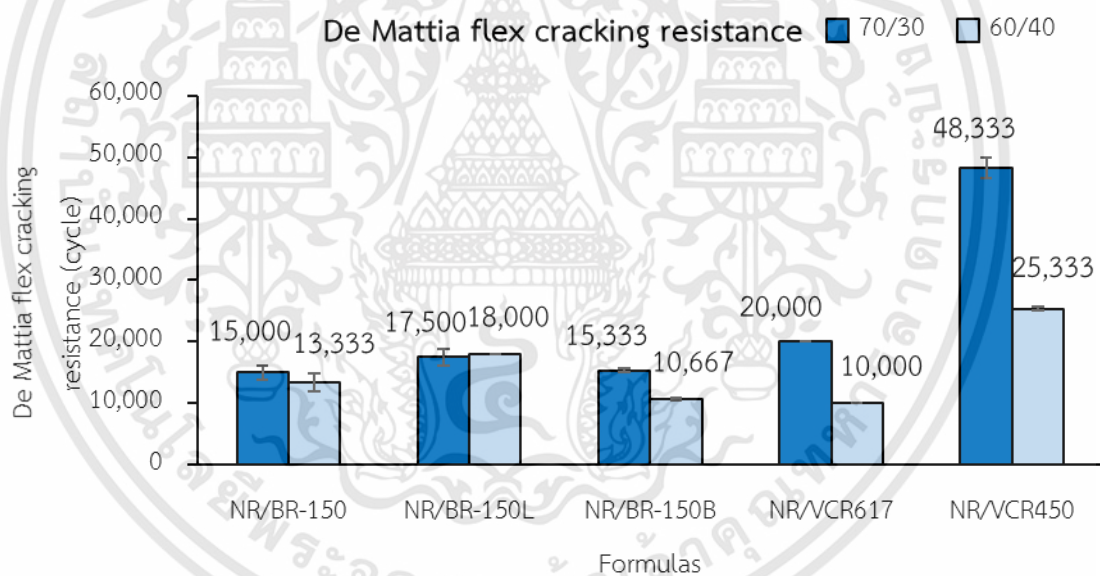
รูปที่ 4.27 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคกรหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.28 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคกรหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน



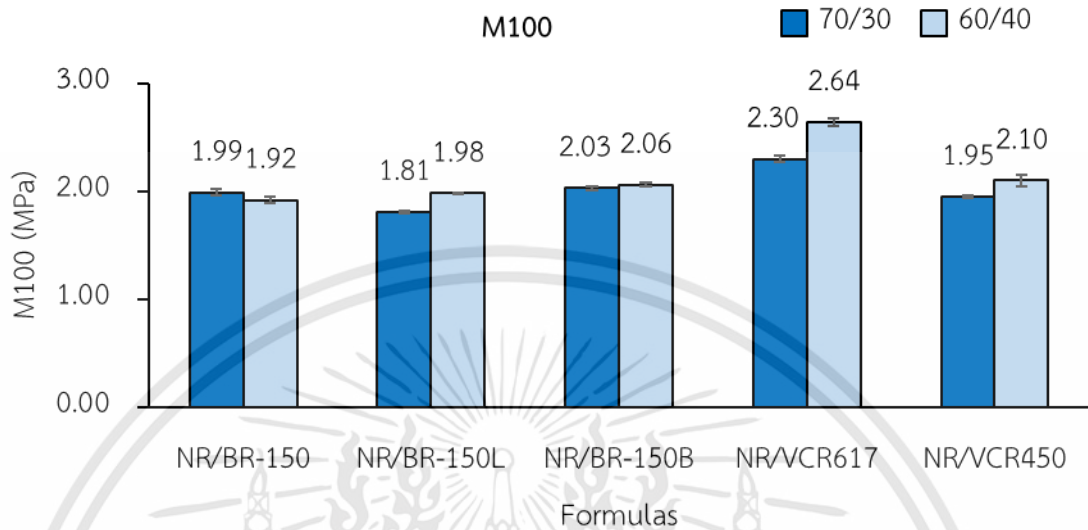
รูปที่ 4.29 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศาของยางผสมคองรูปที่ใช้ อัตราส่วนยางผสมคองรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน



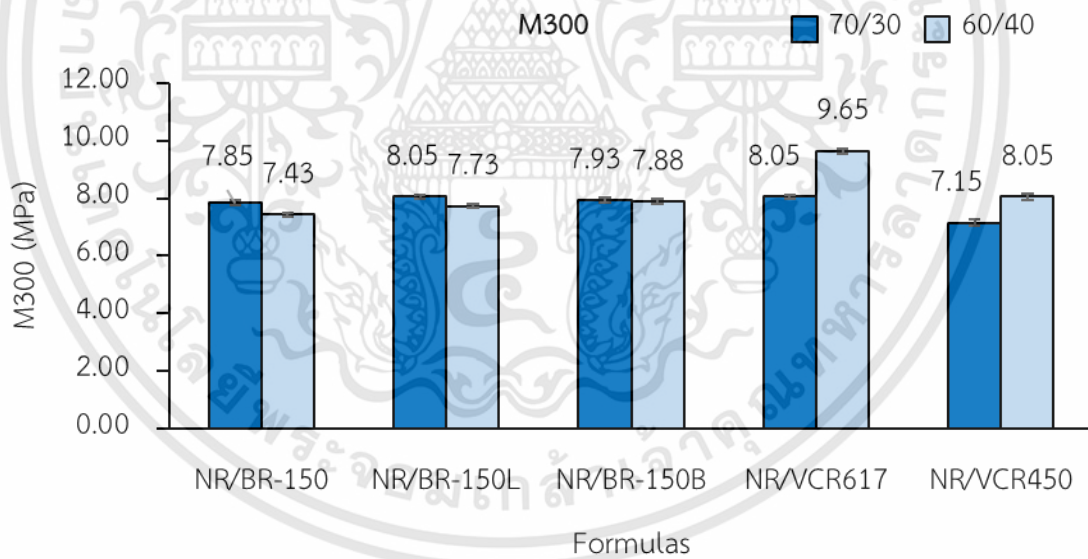
รูปที่ 4.30 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคองรูปที่ใช้ อัตราส่วนยางผสมคองรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.31-4.33 แสดงค่ามอดุลัสที่ระยะยืด 100%, 300% และความแข็งกดของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคองรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL BR® 150, UBEPOL BR® 150L และ UBEPOL BR® 150B ส่งผลให้ค่าดังกล่าวแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ทั้งนี้เมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL VCR® 617 และ UBEPOL VCR® 450 ส่งผลให้ค่าดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL VCR® ประกอบด้วย 1,2 butadiene rubber เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

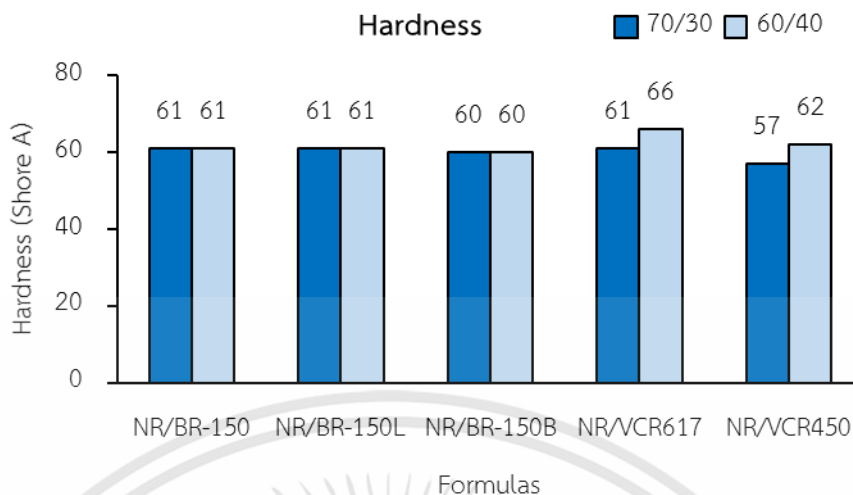
ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งมากกว่า 1,4 butadiene rubber ด้วยการที่มีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้วสูง [16] จึงส่งผลให้ค่าดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.31 มอดุลัสที่ระยะยืด 100% ของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคกรระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

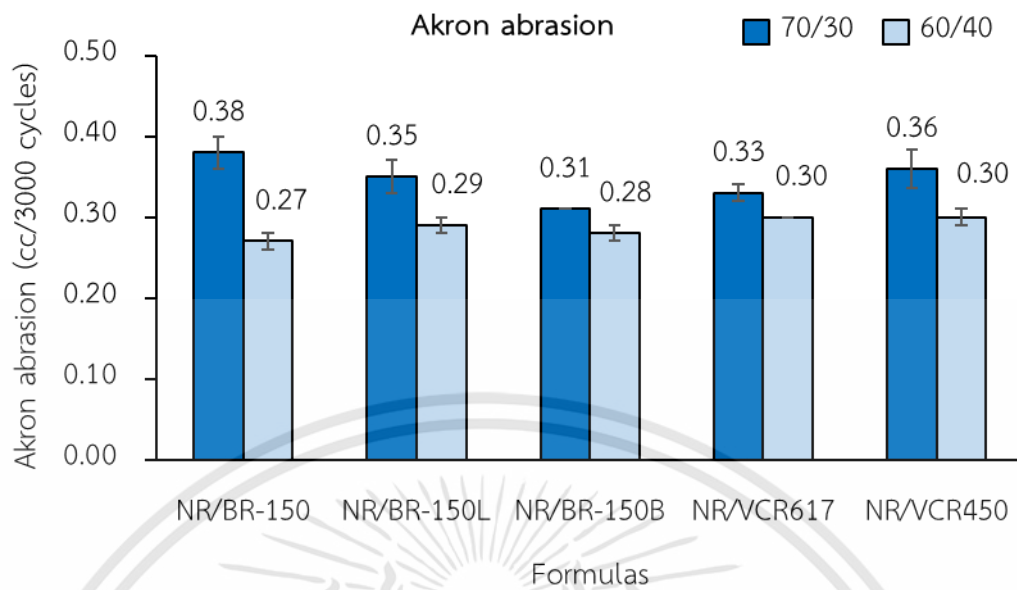


รูปที่ 4.32 มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคกรระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

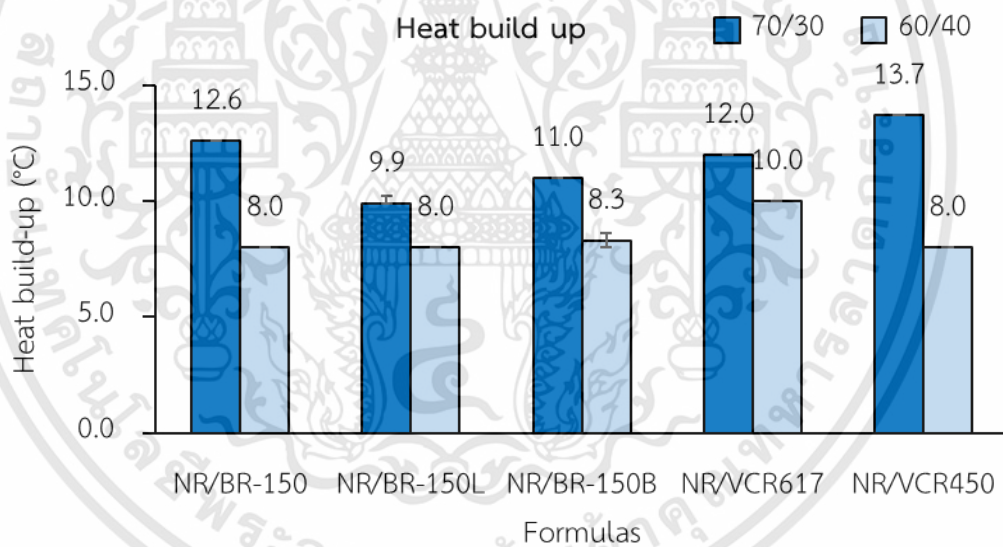


รูปที่ 4.33 ความแข็งกของยางผสมครูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมครูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

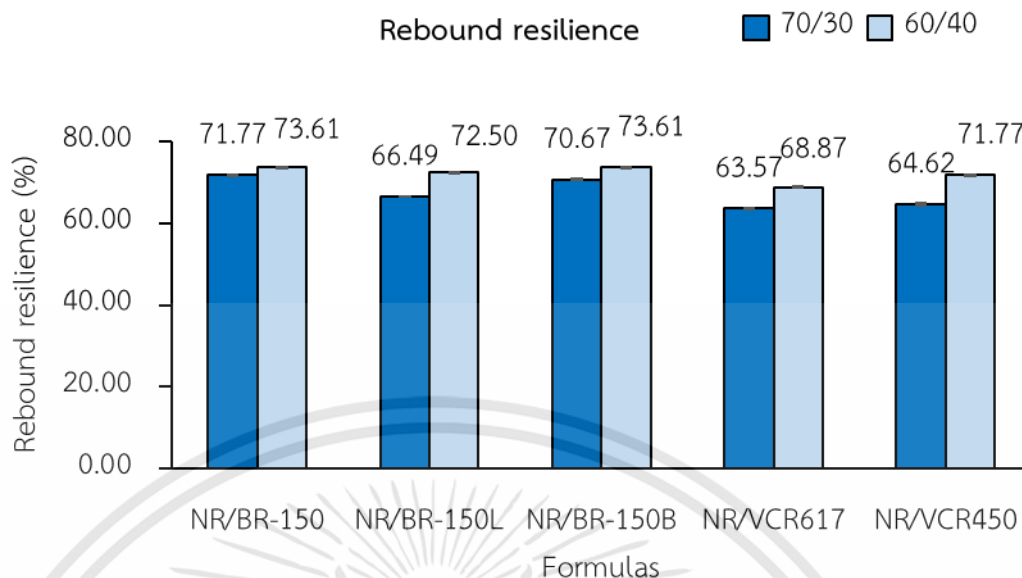
จากรูปที่ 4.34 แสดงค่าความต้านทานต่อการขีดขูดของยางผสมครูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมครูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางบิวทาไดอิน พบว่าค่าดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางบิวทาไดอินมีอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วต่ำกว่ายางธรรมชาติ (T_g ของโครงสร้าง 1,2 butadiene rubber และ 1,4 butadiene rubber เท่ากับ -28 และ -106°C ตามลำดับ [16]) จึงส่งผลให้ยางบิวทาไดอินมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่น และเคลื่อนที่สายโซ่โมเลกุลง่ายกว่า เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ เห็นได้จากยางบิวทาไดอินมีค่าความร้อนสะสมในยางต่ำ ความกระเด็งกระดอนสูง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางบิวทาไดอินแสดงดังรูปที่ 4.35-4.36



รูปที่ 4.34 ความต้านทานต่อการขัดถูของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคกรูระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

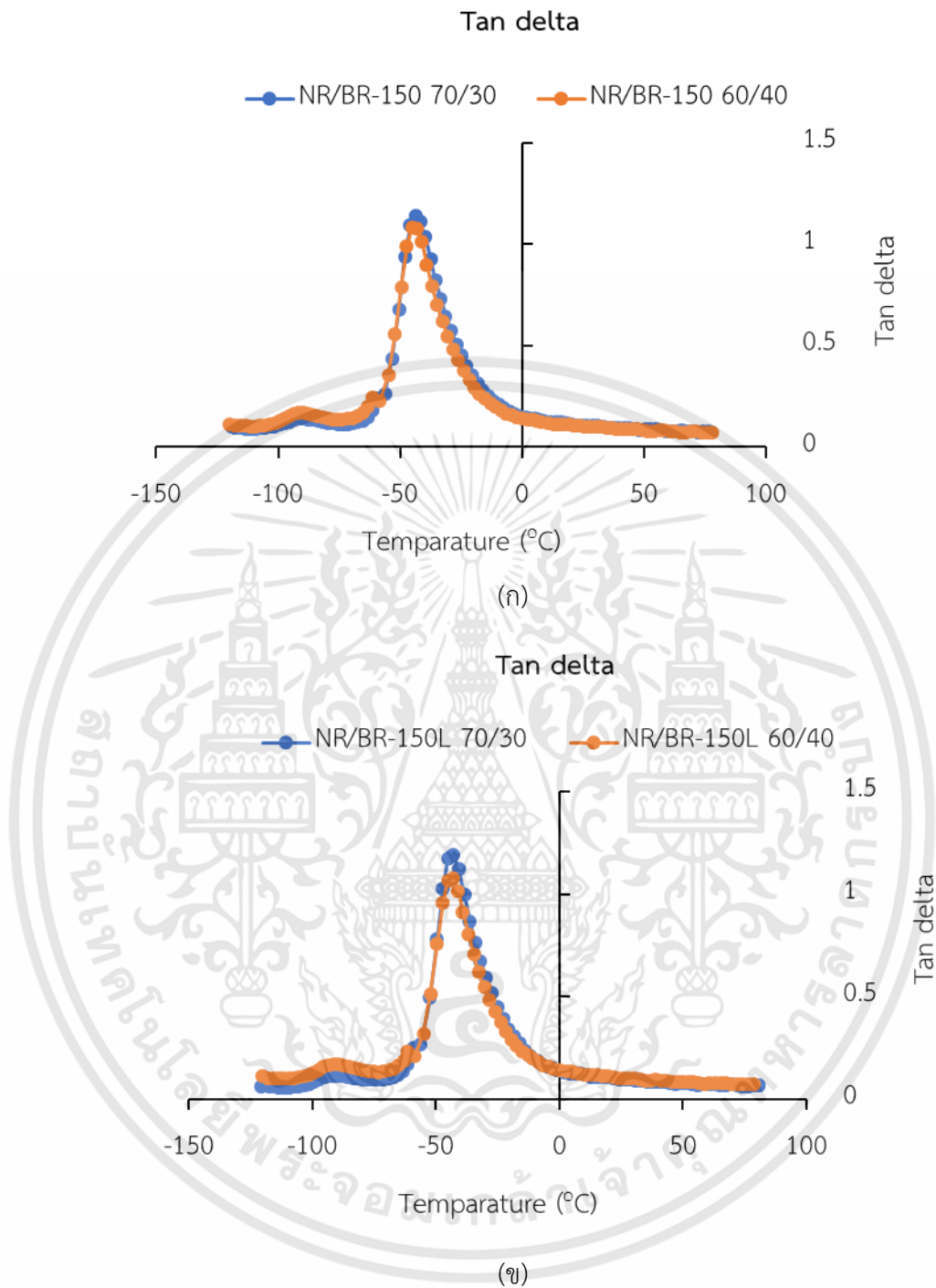


รูปที่ 4.35 ความร้อนสะสมในยางของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคกรูระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

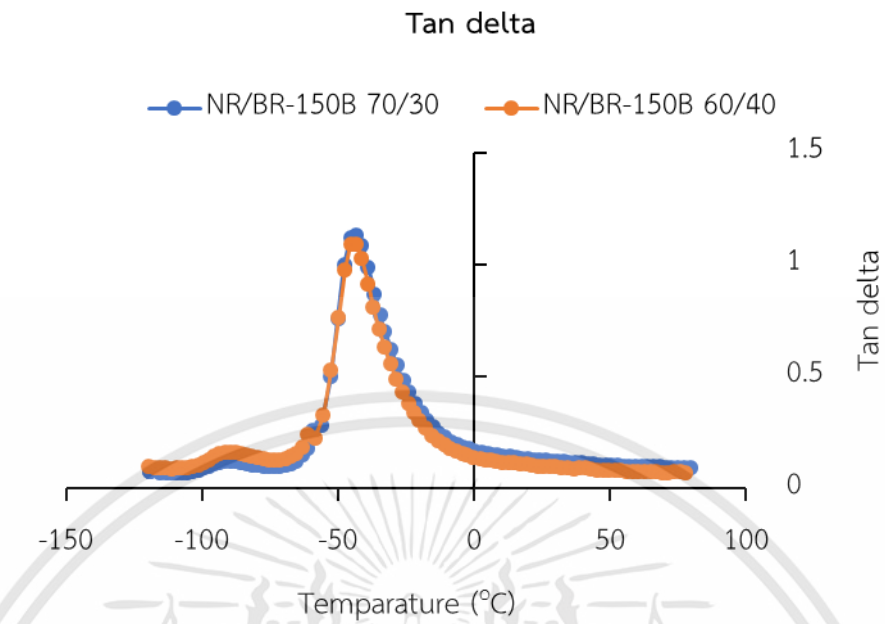


รูปที่ 4.36 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคกระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

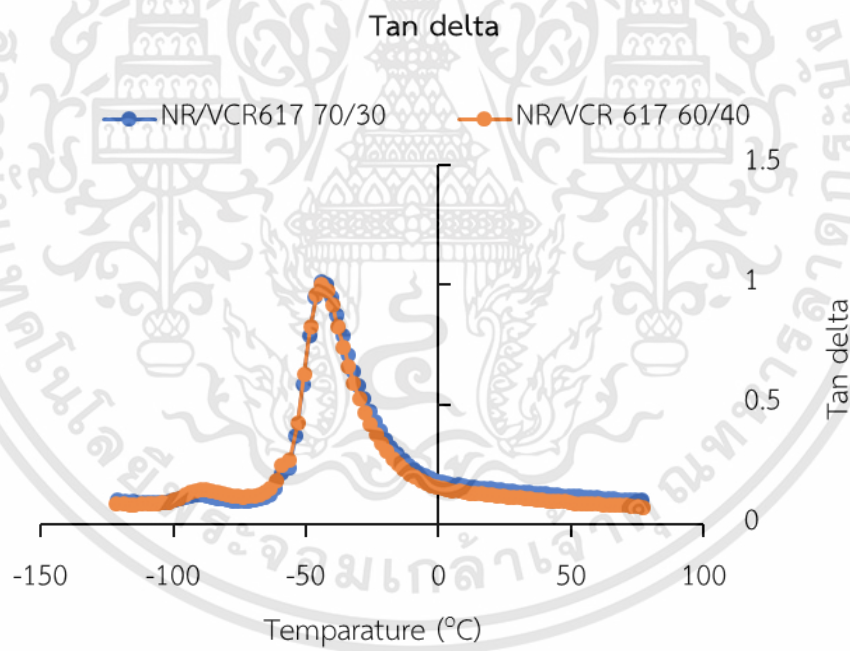
จากรูปที่ 4.37 แสดงสมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคกระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันของสูตรยาง (ก) NR/BR-150 (ข) NR/BR-150L (ค) NR/BR-150B (ง) NR/VCR617 และ (จ) NR/VCR450 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนยางบิวทาไดอิน ค่าแทนเดิลต้ามีแนวโน้มลดลง อันเนื่องจากยางบิวทาไดอินมีความยืดหยุ่นมากกว่า เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ ส่งผลให้ค่ามอดูลัสสูญเสียและแทนเดิลต้าลดลง ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่ายางผสมคกระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) เนื่องจากค่า (Glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวปรากฏค่า T_g 2 ค่า นั่นคือที่ประมาณ -90 และ -40 องศาเซลเซียส ซึ่งจากเดิมค่า T_g ของยางบิวทาไดอินและยางธรรมชาติ มีค่าประมาณ -106 และ -70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [13,16] หมายความว่า ค่า T_g ของยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินเกิดการเลื่อน (Shift) ไปทางขวา คาดว่าเนื่องจากผลของการเชื่อมขวาง (Crosslinking)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

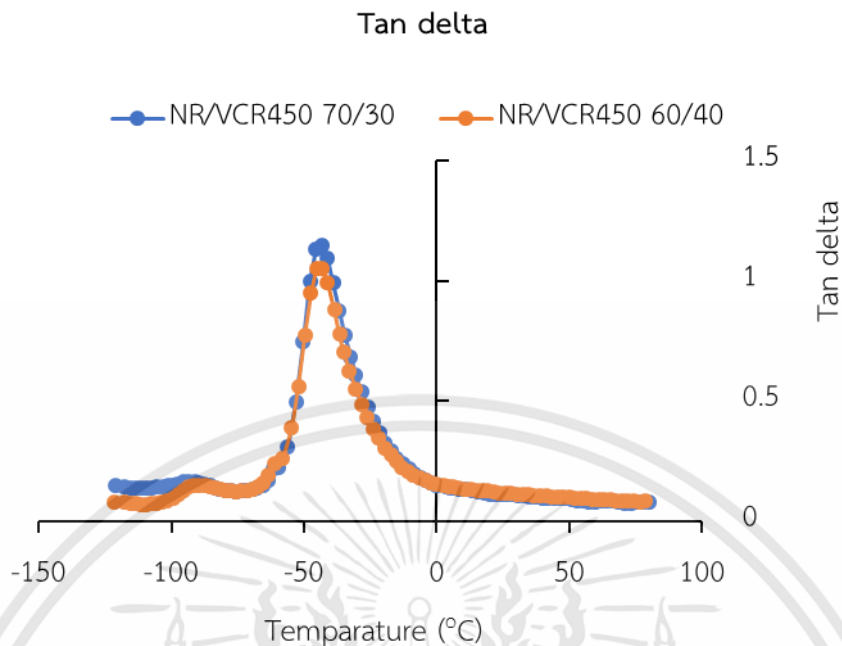


(ค)



(ง)

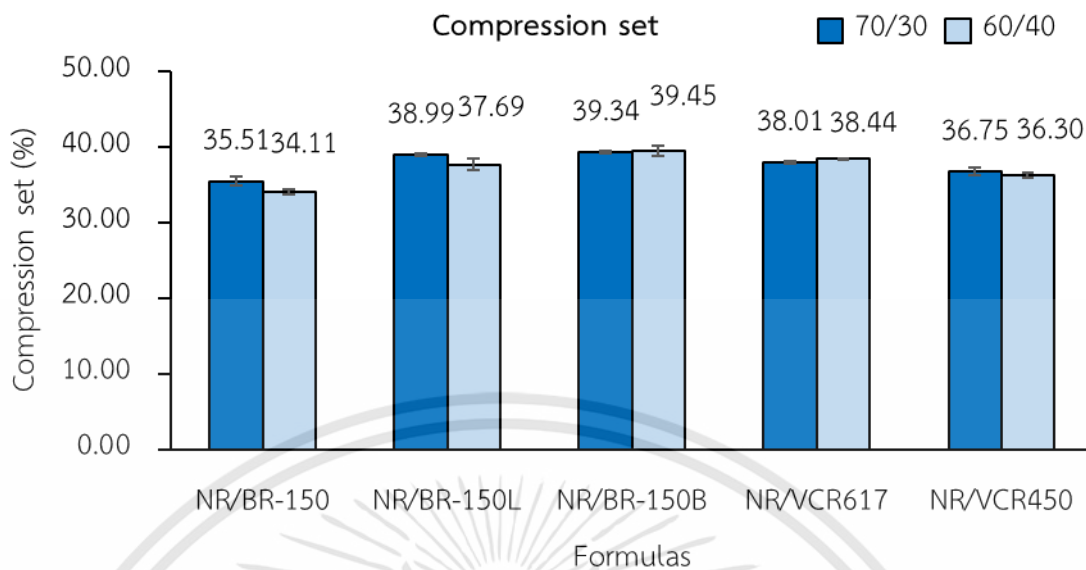
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



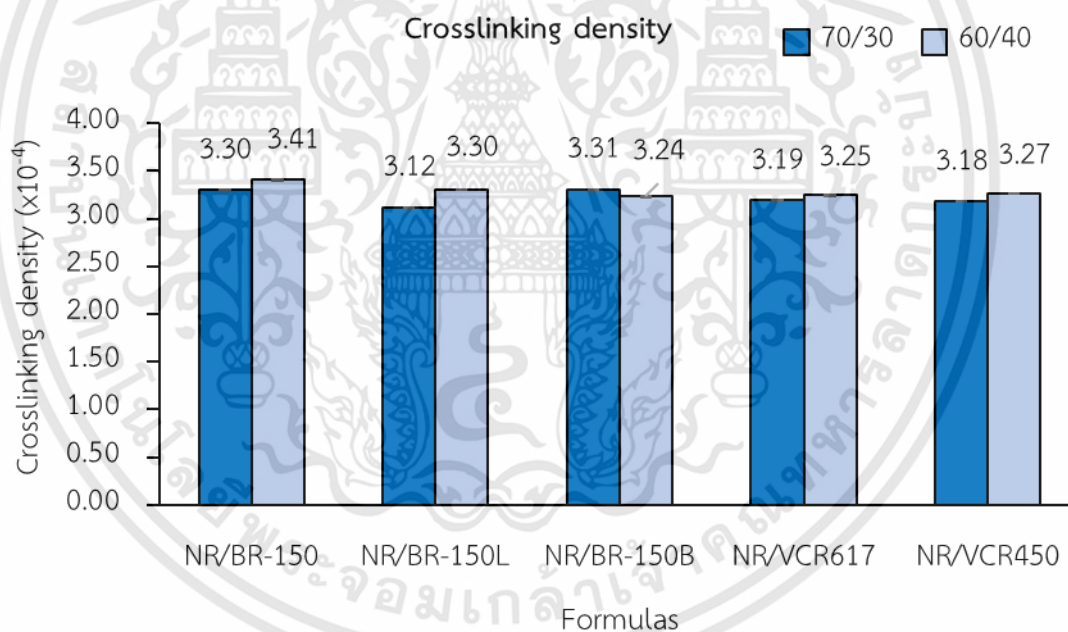
(จ)

รูปที่ 4.37 สมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคองระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกันของสูตรยาง (ก) NR/BR-150 (ข) NR/BR-150L (ค) NR/BR-150B (ง) NR/VCR617 และ (จ) NR/VCR450

จากรูปที่ 4.38 ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคองระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน พบว่าอัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าดังกล่าวแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางทุกสูตรผสมมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.38 การเสียรูปถาวรหลังการกดของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคองระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.39 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วนยางผสมคองระหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน

จากผลการทดลองในงานวิจัยตอนที่ 2 นี้ การใช้สูตรผสมอัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติ และยางบิวทาไดอินที่อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดีทั้ง 2 สูตร การเลือกใช้ขึ้นกับการนำไปใช้งาน กล่าวคืออัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพองสูงกว่า เมื่อเทียบกับอัตราส่วน 60/40 นอกจากนี้ราคายางธรรมชาติถูกกว่ายางบิวทาไดอินที่เป็นยางสังเคราะห์ ดังนั้นการมีอัตราส่วนยางบิวทาไดอินน้อยลง ยิ่งลดต้นทุนในการผลิต และการใช้ยางธรรมชาติยิ่งมากขึ้น ยิ่งเป็นการสร้างรายได้ให้กับประเทศไทย ส่วนอัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่อัตราส่วน 60/40 ให้ค่าความต้านทานต่อการขัดถูที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับอัตราส่วน 70/30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

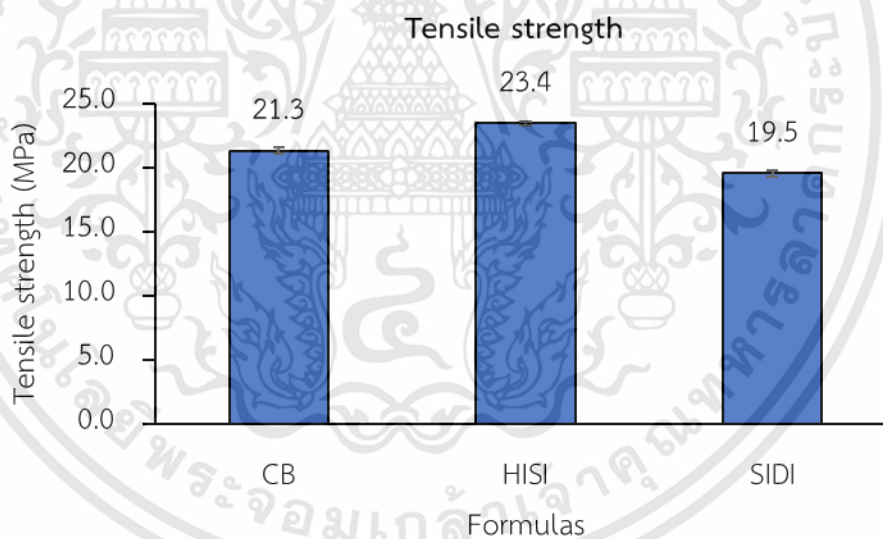
สารตัวเติมชนิดสารเสริมแรง (Reinforcing fillers) มีหลายชนิด และถูกใช้ในอุตสาหกรรมยางอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างสารตัวเติมดังกล่าวที่นิยมใช้ เช่น เชมม่าดำ ซิลิกา เป็นต้น

เชมม่าดำและซิลิกา เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงที่มีความแตกต่างของขนาด และธรรมชาติของพื้นผิว ซึ่งเชมม่าดำเป็นสารตัวเติมเสริมแรงที่เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมยางเป็นอย่างมาก เนื่องจากให้สมบัติดีแก่สูตรยาง และมีราคาถูก โดยสมบัติดังกล่าวถูกกำหนดด้วยขนาดอนุภาค พื้นผิว โครงสร้าง และความว่องไวของพื้นผิว ซึ่งงานวิจัยในตอนนี้ใช้เชมม่าดำ N330 สำหรับซิลิกา เป็นสารตัวเติมที่ช่วยปรับปรุงสมบัติบางประการของยาง เช่น เพิ่มความต้านทานต่อการฉีกขาด ลดความร้อนสะสม เพิ่มความต้านทานต่อการขีดถู และเพิ่มการยึดเกาะ (Adhesion) กับองค์ประกอบอื่นในยาง เป็นต้น โดยในปัจจุบันซิลิกามีหลายเกรด ซึ่งงานวิจัยในตอนนี้ใช้ซิลิกา Hisil®255 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กและซิลิกา Sidistar® เป็นเกรดใหม่เชิงการค้าที่มีข้อมูลผลิตภัณฑ์ (Data sheet) แนะนำว่า เป็นสารตัวเติมที่ให้สมบัติเชิงกลพลวัตที่ดีกับยาง [43] ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจที่นำสารตัวเติมชนิดนี้มาพัฒนาสมบัติเชิงกลพลวัตอันเป็นสมบัติที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ยางถนนขนส่งตัวปึก โดยใช้ยางบิวทาไดอินเกรด UBEPOL VCR® 450 ซึ่งมีโครงสร้างแบบ Medium branching polymer ที่มีปริมาณของ 1,2 butadiene rubber 3.8 %wt มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal (จากผลการทดลองที่ดีในตอนต้นที่ 1) อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก (จากผลการทดลองที่ดีในตอนต้นที่ 2) และใช้อัตราส่วนเชมม่าดำกับซิลิกา 30/10 เนื่องจากเป็นอัตราส่วนที่ให้สมบัติที่ดีจากงานวิจัยของอิทธิพล แจ็งซัด และคณะ [6] และกูซังค์ ทับทอง และคณะ [54]

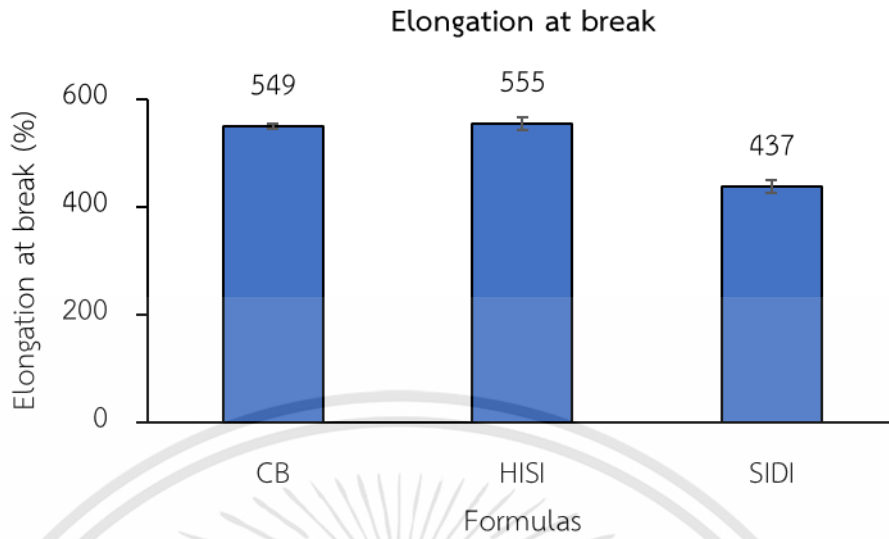
จากตารางที่ 4.9 แสดงค่าความหนืดมูนี้ และลักษณะการเชื่อมโยง และรูปที่ 4.40-4.43 แสดงค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน ตามลำดับ พบว่าค่าความหนืดมูนี้ ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานต่อการขีดถูเมื่อใช้ซิลิกา Hisil®255 (สูตร HISI) ซึ่งเป็นสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็ก สมบัติดังกล่าวมีแนวโน้มดีกว่าการใช้เชมม่าดำ N330 และซิลิกา Sidistar® (สูตร CB และ SIDI) เนื่องจากสารตัวเติมที่มีขนาดเล็กนั้น มีพื้นที่ผิวมากกว่าสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ส่งผลให้เกิดยางบาวด์ และยางออกคลู๊ดมากกว่าสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้มีบริเวณในการถ่ายเทแรงมากและรับแรงได้มาก ตามลำดับ [8-9, 37-38] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ulfah, I.M. และคณะ [52] อย่างไรก็ตาม ลักษณะการเชื่อมโยงมีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากอัตราส่วนเชมม่าดำ/ซิลิกาที่ใช้คือ 30/10 นั้นหมายถึงความแตกต่างของการใช้สารตัวเติมมีเพียง 10 phr เท่านั้น

ตารางที่ 4.9 ความเหนียวและลักษณะการเชื่อมโยงของยางผสมคางรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

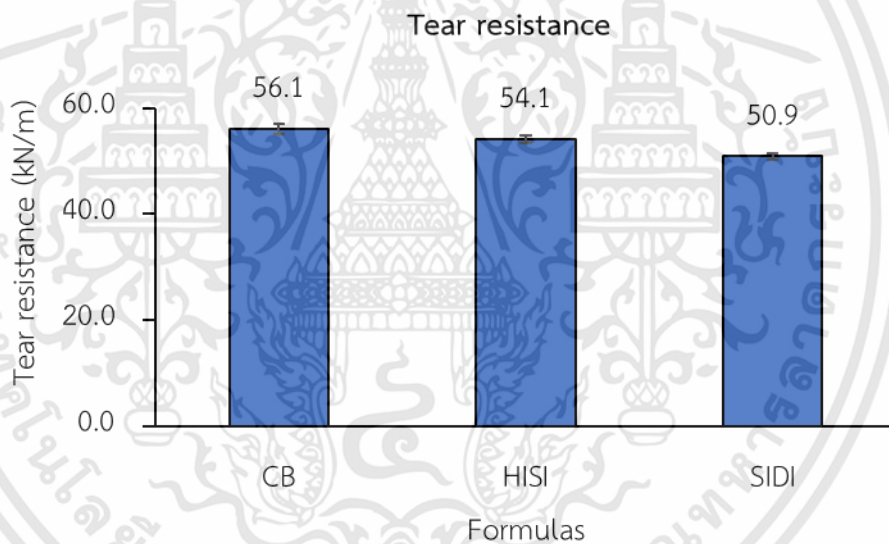
สมบัติ	CB	HISI	SIDI
ความเหนียว Com A (ML 1+4, 100 °C)	35.1	43.3	36.5
ความเหนียว Com B (ML 1+4, 100 °C)	29.8	34.9	29.1
M_L (dN.m)	1.2	1.4	1.0
M_{HF} (dN.m)	14.6	13.9	14.7
Scorch time (t_{s1} , min)	1.10	1.10	0.50
Cure time ($t_{c(90)}$, min)	3.36	3.45	3.07
CRI (min^{-1})	44.25	42.55	38.91



รูปที่ 4.40 ความแข็งแรงดึงของยางผสมคางรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

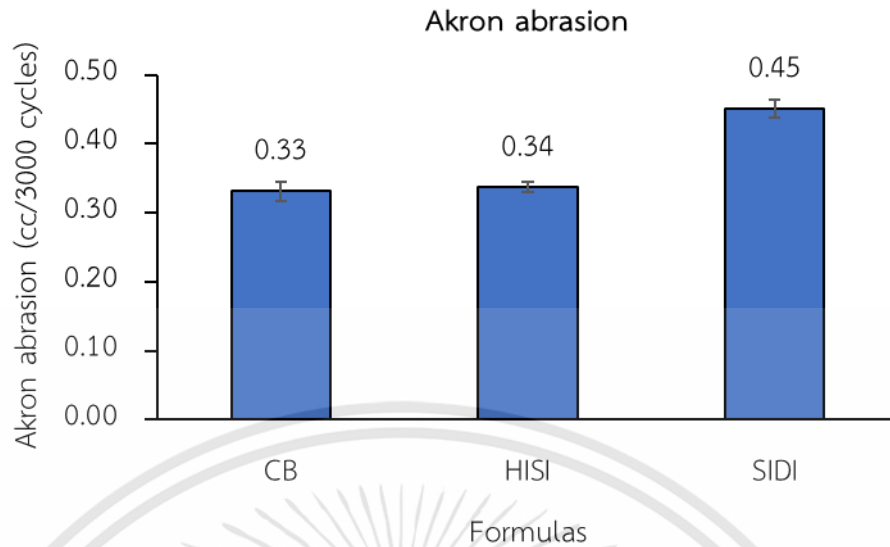


รูปที่ 4.41 ร้อยละการยืด ณ จุดขาดของยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน



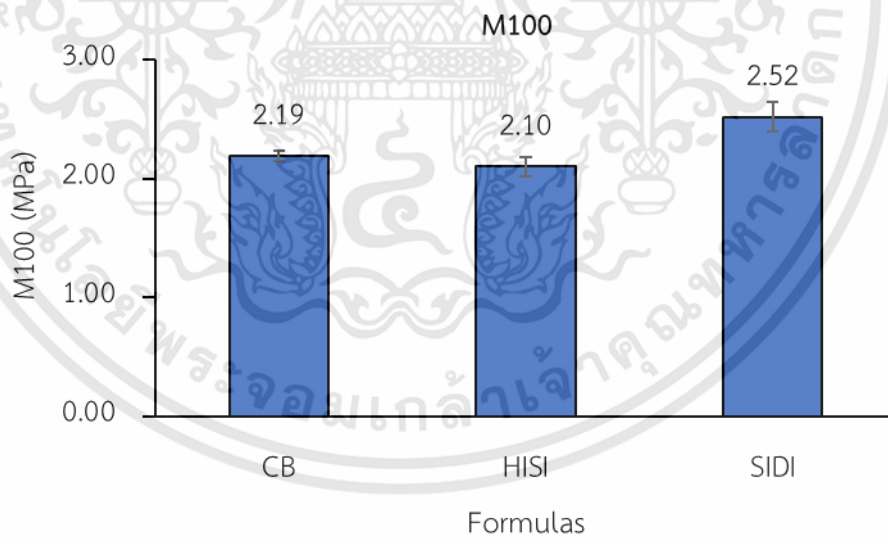
รูปที่ 4.42 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

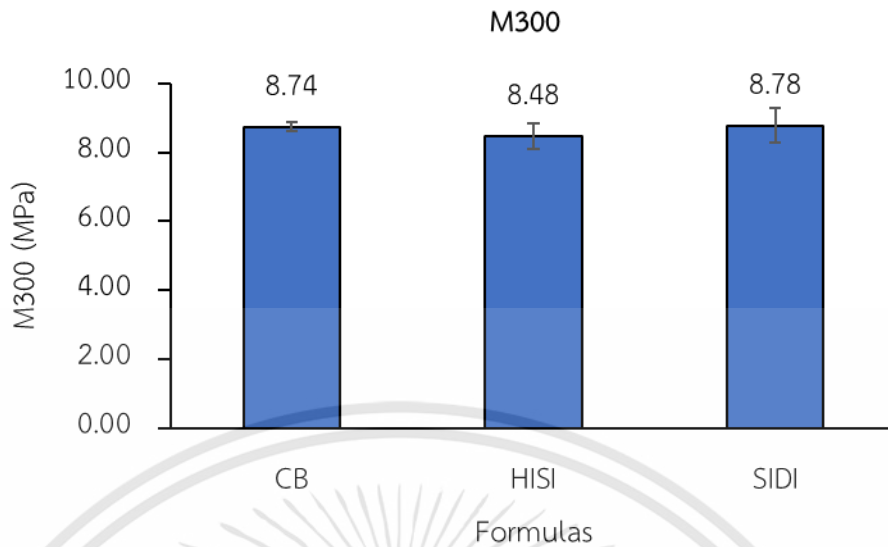


รูปที่ 4.43 ความต้านทานต่อการขัดถูของยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

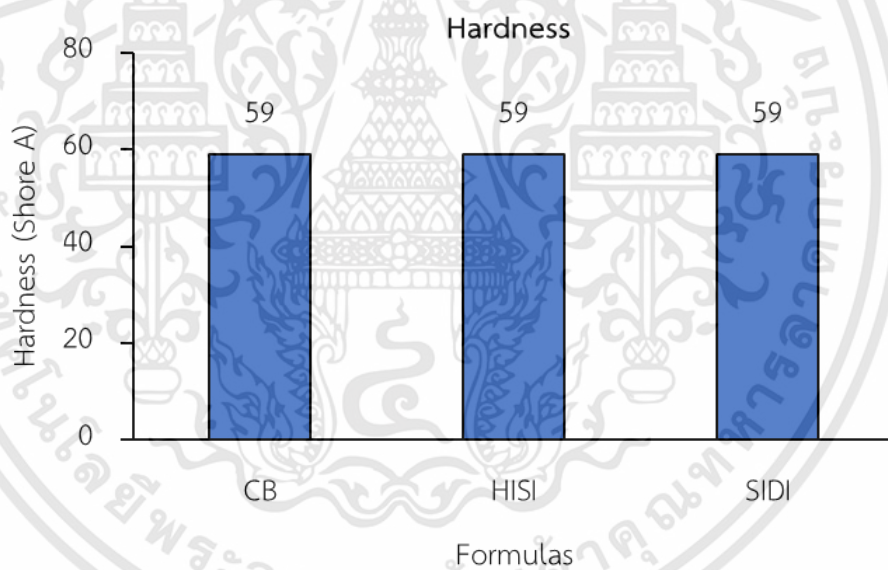
จากรูปที่ 4.44-4.46 แสดงค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% รวมทั้งความแข็งกดของยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน มีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากอัตราส่วนเขม่าดำ/ซิลิกาที่ใช้คือ 30/10 และความแตกต่างของการใช้สารตัวเติมมีเพียง 10 phr



รูปที่ 4.44 มอดูลัสที่ระยะยืด 100% ของยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน



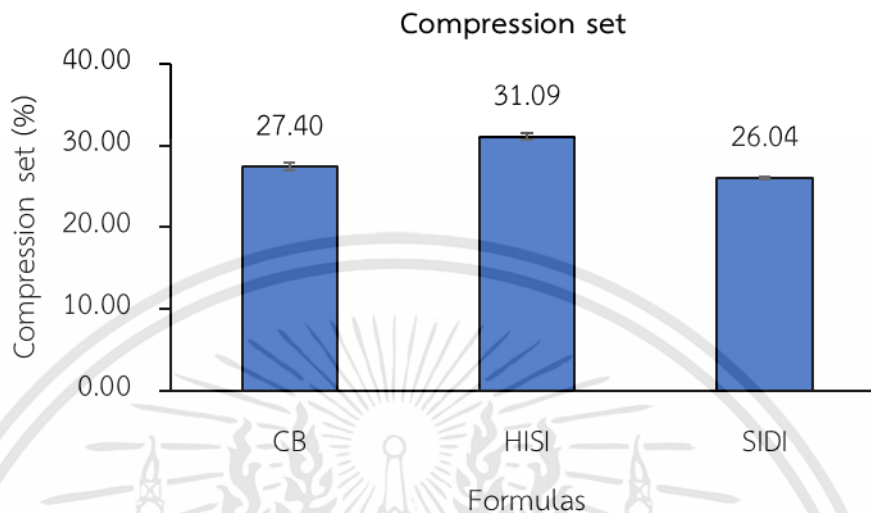
รูปที่ 4.45 มอดุลัสที่ระยะยืด 300% ของยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน



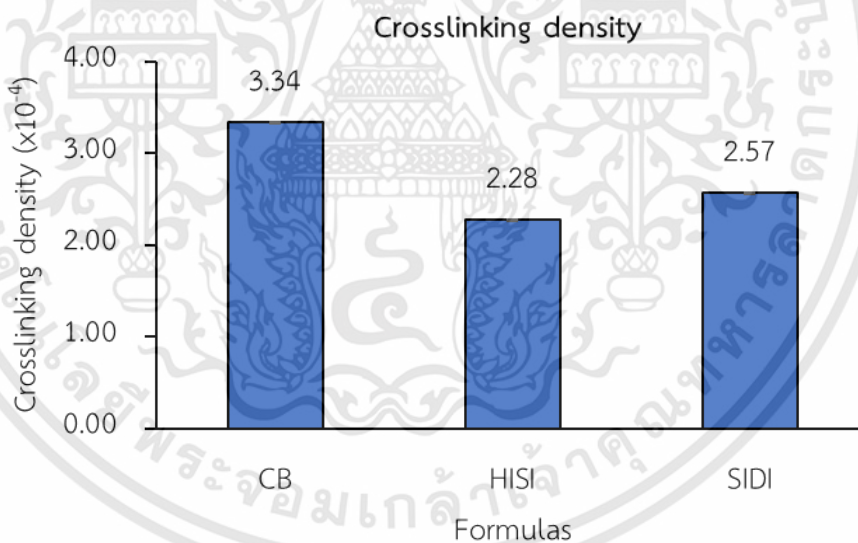
รูปที่ 4.46 ความแข็งกดของยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.47 แสดงค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดของยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อใช้ซิลิกา Hisil®255 (สูตร HISI) และ Sidistar® (สูตร SIDI) มีค่ามากกว่าการใช้เขม่าดำ N330 เพียงอย่างเดียว (สูตร CB) เนื่องจากพื้นผิวของซิลิกามีขี้ จึงดูดซับสารเร่งเชื่อมโยง ส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงน้อยกว่าเขม่าดำ N330 ทำให้ค่าการเสียรูปถาวรหลังการกดมากขึ้น ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของภูงค์ ทับทอง และคณะ [54] ซึ่งความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางแสดงดังรูปที่ 4.48 อย่างไรก็ตาม ซิลิกา Sidistar® มีพื้นที่ผิวมากกว่า Hisil®255

จึงทำให้มีความหน่วงปฏิกิริยาเชื่อมโยงน้อยลง จึงส่งผลให้ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยาง เมื่อใช้ Sidistar® มีค่ามากกว่า Hisil®255



รูปที่ 4.47 การเสียรูปถาวรหลังการกดของยางผสมคกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

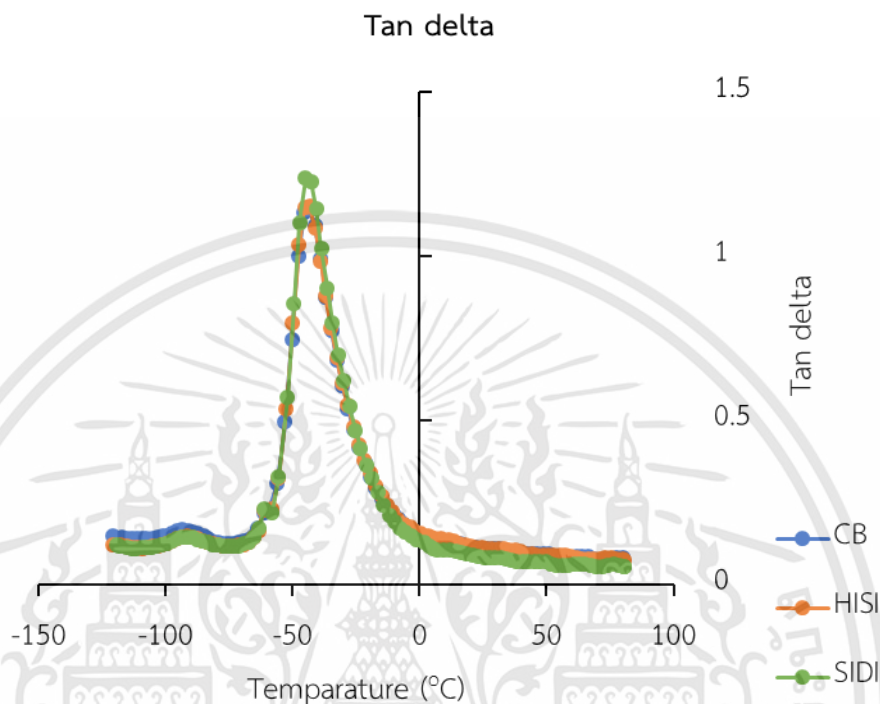


รูปที่ 4.48 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของยางผสมคกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.49 แสดงสมบัติเชิงพลวัตของยางผสมคกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน พบว่ายางผสมคกรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอินเป็นพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) เนื่องจากค่า (Glass transition temperature, T_g) ของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวปรากฏค่า T_g 2 ค่า นั่นคือที่ประมาณ -90 และ -40 องศาเซลเซียส ซึ่งจากเดิมค่า T_g ของยางบิวทาไดอินและยางธรรมชาติ มีค่าประมาณ -106 และ -70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ [13,16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายความว่า ค่า T_g ของยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนเกิดการเลื่อน (Shift) ไปทางขวา คาดว่าเนื่องจากผลของการเชื่อมขวาง (Crosslinking)

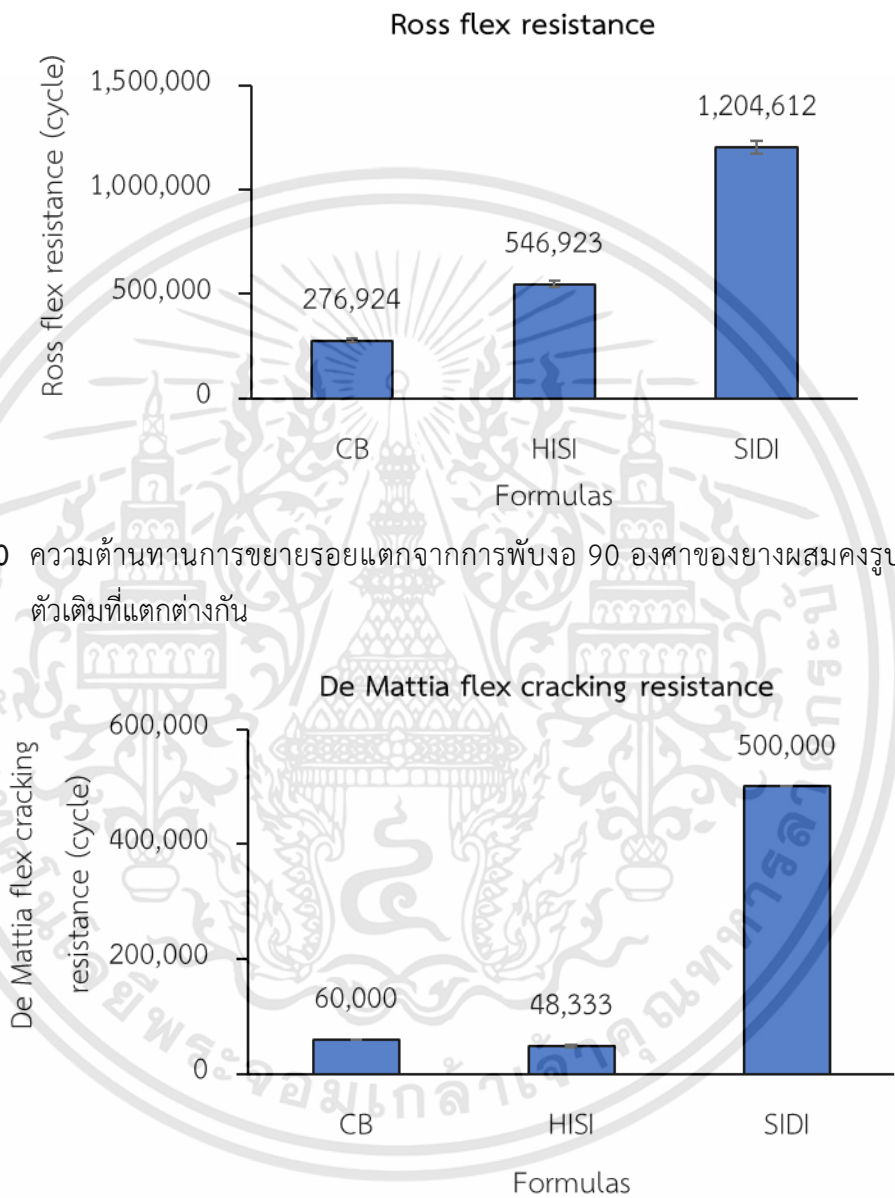


รูปที่ 4.49 สมบัติเชิงพลวัตของยางผสมกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.50-4.51 แสดงค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศาของยางผสมกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้ซิลิกา Sidistar® (สูตร SIDI) ให้ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา สูงกว่าการใช้สารตัวเติมอีก 2 ชนิด (สูตร CB และ HISI) เนื่องจากสารตัวเติมที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างยางกับสารตัวเติมน้อย จึงทำให้ยางและสารตัวเติมอยู่กันอย่างอิสระ สายโซ่โมเลกุลยางเคลื่อนที่ง่าย ทำให้ความร้อนสะสมในยางต่ำ และสมบัติเชิงพลวัตดี ตามลำดับ (โมเดลแสดงดังรูปที่ 4.52) ดังเห็นได้จากค่าความร้อนสะสม ความกระตังกระดอน และภาพชิ้นงานหลังจากการทดสอบความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา จากรูปที่ 4.53-4.55 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu, Y. และคณะ [53] รวมทั้งขนาดอนุภาคของสารตัวเติมแตกต่างกัน ส่งผลให้มีรัศมีความโค้ง (Radius of curvature) ต่างกัน กล่าวคือ ยางที่ผสมกับสารตัวเติม เมื่อทำการให้แรงสั่น (Dynamic force) ยางและสารตัวเติมนั้น เกิดการเสียสภาพที่ต่างกัน ด้วยการมีความแข็งที่ไม่เท่ากัน โดยยางจะถูกทำให้เปลี่ยนขนาดง่ายกว่าสารตัวเติม เนื่องจากความแข็งของสารตัวเติมมากกว่ายางหลายเท่า ซึ่งสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กนั้น เกิดรัศมีความโค้งมากกว่าสารตัวเติมที่มี

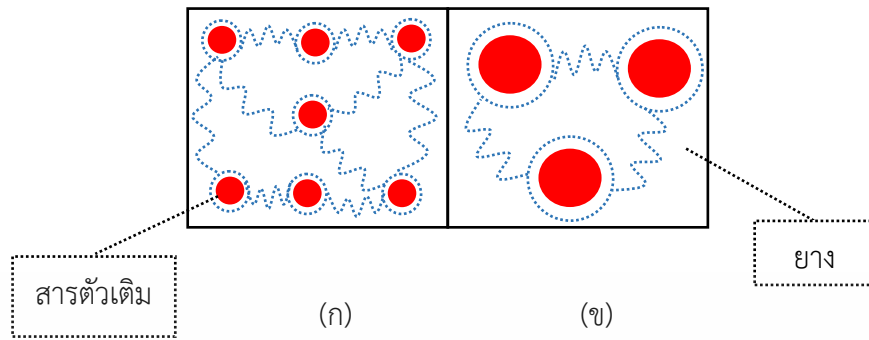
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดอนุภาคใหญ่ แสดงโมเดลดังรูปที่ 4.56 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีแรงเค้นมากที่สุด (Stress concentrators) [72] ดังนั้นการใช้ซิลิกา Sidistar® (สูตร SIDI) ให้ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา สูงกว่าการใช้สารตัวเติมอีก 2 ชนิด (สูตร CB และ HISI)

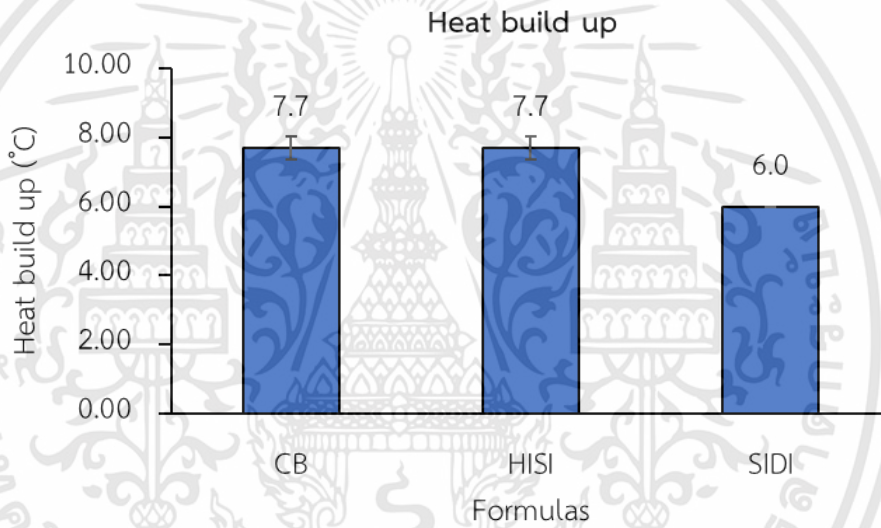


รูปที่ 4.50 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศาของยางผสมคกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

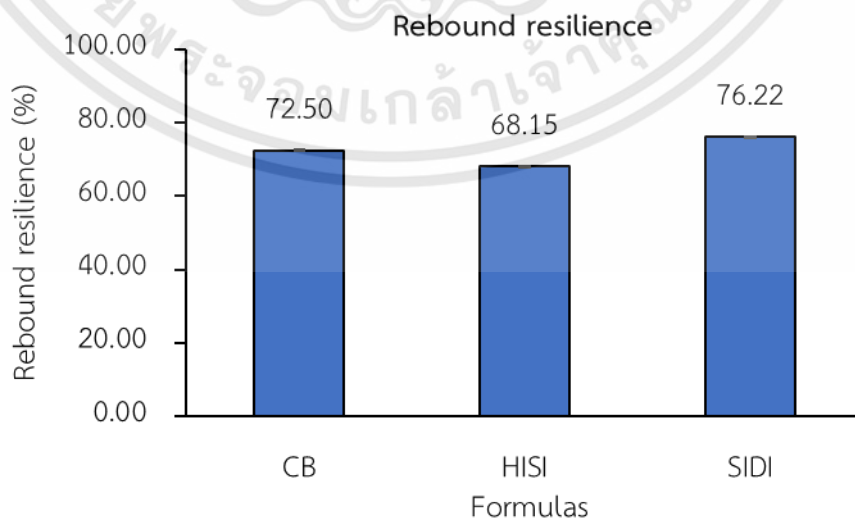
รูปที่ 4.51 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.52 โมเดลแสดงบริเวณยึดเกาะของสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน
(ก) ขนาดอนุภาคเล็ก และ (ข) ขนาดอนุภาคใหญ่

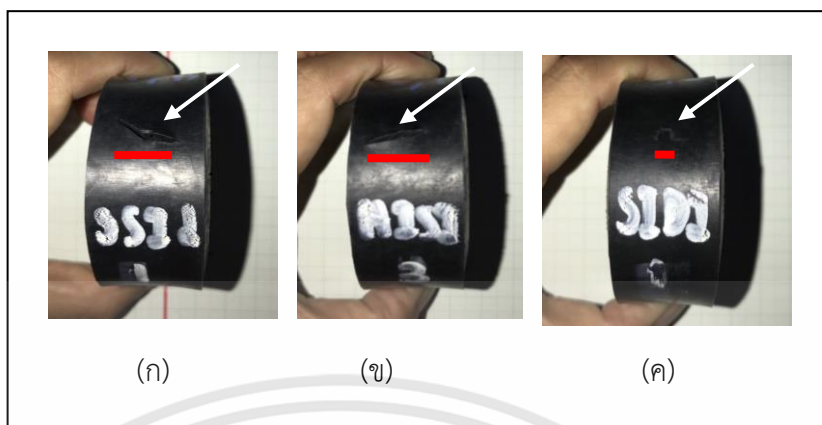


รูปที่ 4.53 ความร้อนสะสมของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

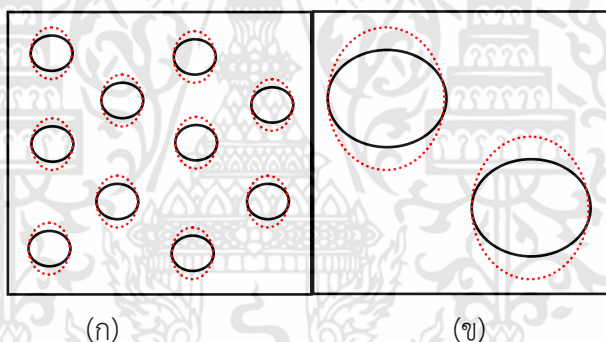


รูปที่ 4.54 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคังรูปใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

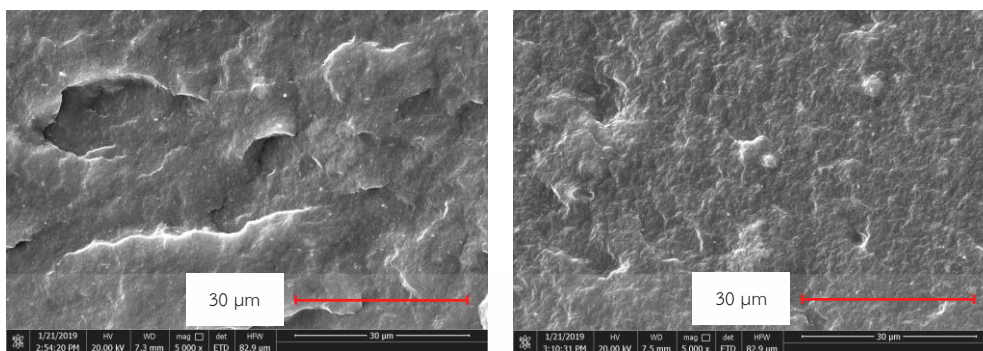


รูปที่ 4.55 ภาพถ่ายแสดงความยาวของรอยตำหนิ (แสดงดั่งแถบสีแดง) ขึ้นงานหลังจากการทดสอบความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา (แสดงดั่งลูกศร) ของยางผสมคกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน (ก) เขม่าดำ N330 (ข) เขม่าดำ N330/ซิลิกา Hisil[®]255 และ (ค) เขม่าดำ N330/ซิลิกา Sidistar[®]



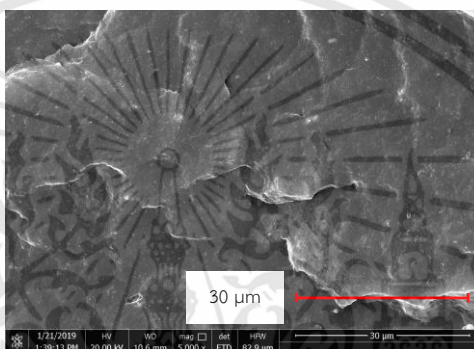
รูปที่ 4.56 โมเดลแสดงรัศมีความโค้ง (Radius of curvature) ที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน (ก) ขนาดอนุภาคเล็ก และ (ข) ขนาดอนุภาคใหญ่

จากรูปที่ 4.57 แสดงภาพ SEM ของยางผสมคกรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน พบว่าการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกันนั้น ยางผสมคกรูปไม่เกิดรอยตำหนิ (Defects) ทั้ง 3 สูตร แสดงให้เห็นว่า เขม่าดำ N330 ซิลิกา Hisil[®]255 และ Sidistar[®] มีอันตรกิริยาที่ดีกับยาง



(ก)

(ข)



(ค)

รูปที่ 4.57 ภาพ SEM แสดงยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกันของ (ก) เขม่าดำ N330 (ข) เขม่าดำ N330/ซิลิกา Hisil®255 และ (ค) เขม่าดำ N330/ซิลิกา Sidistar® (กำลังขยาย 5,000 เท่า)

จากผลการทดลองในงานวิจัยตอนที่ 3 นี้ จึงเลือกใช้ยางบิวทาไดอีน UBEPOL VCR® 450 และใช้อัตราส่วนเขม่าดำ N330/ซิลิกา Sidistar® เท่ากับ 30/10 เนื่องจากให้ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอสูง ความร้อนสะสมในยางต่ำ สมบัติเชิงพลวัตดี และการเสียรูปถาวรหลังการกดต่ำ ซึ่งผ่านคุณลักษณะของยางถนอขนสัตว์ปีก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่อง ยางถนอขนไก่ (มอก.2666-2558) [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตจะเลือกสูตรยางที่มีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์ยางถนนชนิดรถบรรทุก คือสูตรยางที่ใช้อัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนที่อัตราส่วน 70/30 โดยน้ำหนัก โดยใช้ยางบิวทาไดอีนเกรด UBEPOL VCR® 450 (ยางบิวทาไดอีนที่มีโครงสร้างแบบ Medium branching polymer มีปริมาณของ 1,2 butadiene rubber 3.8 %wt และมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal) และใช้อัตราส่วนเคมีดำ N330 กับซิลิกา Sidistar® 30/10 โดยวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์ยางถนนชนิดรถบรรทุกที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตยางถนนชนิดรถบรรทุก

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย	เป็นเงิน (บาท)
ยางธรรมชาติ (STR-5L)	70 phr	55 บาท/กก.	22.38
UBEPOL VCR® 450 (Bimodal)	30 phr	60 บาท/กก.	10.47
เคมีดำ N330	30 phr	45 บาท/กก.	7.85
ซิลิกา Sidistar®	10 phr	95 บาท/กก.	5.52
BKF	1.5 phr	400 บาท/กก.	3.49
Petroleum resin	1.5 phr	77 บาท/กก.	0.67
Phenolic resin	1.5 phr	125 บาท/กก.	1.09
Ester fatty acid	1.5 phr	380 บาท/กก.	3.31
Silane	0.5 phr	700 บาท/กก.	2.03
PEG 4000	0.5 phr	79 บาท/กก.	0.23
Aromatic oil	15 phr	21 บาท/กก.	1.83
ZnO	4 phr	120 บาท/กก.	2.79
Stearic acid	1.5 phr	35 บาท/กก.	0.31
Sulfenamides	0.5 phr	170 บาท/กก.	0.49
Thiazoles	0.5 phr	170 บาท/กก.	0.49
Guanidines	0.5 phr	195 บาท/กก.	0.57
Sulfur	3 phr	16 บาท/กก.	0.28
รวมต้นทุนวัตถุดิบยางถนนชนิดรถบรรทุกที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม			64
รวมต้นทุนการผลิตยางถนนชนิดรถบรรทุกที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัม			98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเกี่ยวกับ ผลของโครงสร้างโมเลกุลยางบิวทาไดอีนที่มีต่อสมบัติของยางผสมคกรูประหว่างยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนที่แตกต่างกัน โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ปริมาณ 1,2 butadiene rubber (0.0 %wt, 3.8 %wt, 5.3 %wt, 12.0 %wt และ 17.0 %wt) โครงสร้างสายโซ่โมเลกุล (โครงสร้างสายโซ่ตรงและกึ่ง) การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของยางบิวทาไดอีน (แบบ Unimodal และ Bimodal) ผลของอัตราส่วนยางผสมยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีนที่แตกต่างกัน (อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก) รวมทั้งศึกษาผลของการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน (เขม่าดำ N330 ซิลิกา Hisil[®]255 และ Sidistar[®]) ในการพัฒนาสูตรยางเป็นผลิตภัณฑ์ยางถนนชนิดล้อรถ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. การศึกษาปริมาณ 1,2 butadiene rubber ที่แตกต่างกัน (0.0 %wt, 3.8 %wt, 5.3 %wt, 12.0 %wt และ 17.0 %wt) พบว่าค่าความหนืดมูนนี่ โมดูลัสที่ระยะยืด 100 %, 300 % ความแข็งกต และเวลาในการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณ 1,2 butadiene rubber อย่างไรก็ตาม ลักษณะการเชื่อมโยง ค่าความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขีดถู ความกระด้างกระดอน การเสียรูปถาวรหลังการกด และความร้อนสะสม มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 ของยางผสมคกรูป พบว่าเมื่อใช้ปริมาณ 1,2 butadiene rubber 3.8 %wt ส่งผลให้ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา องศา และ 180 องศา มีค่ามากที่สุด
2. การศึกษาโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกัน (โครงสร้างสายโซ่ตรงและกึ่ง) พบว่าการใช้ยางบิวทาไดอีนที่โครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี่ ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ส่วนยางบิวทาไดอีนที่โครงสร้างสายโซ่ตรง ให้สมบัติเชิงพลวัต ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา มากกว่ายางบิวทาไดอีนที่โครงสร้างสายโซ่กึ่ง
3. การศึกษาการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน (แบบ Unimodal และ Bimodal) พบว่าการใช้ยางบิวทาไดอีนที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความหนืดมูนนี่ ลักษณะการเชื่อมโยง และสมบัติเชิงกลแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ สำหรับยางบิวทาไดอีนที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Bimodal ให้สมบัติเชิงพลวัต ค่าความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา มากกว่ายางบิวทาไดอีนที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบ Unimodal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การศึกษาอัตราส่วนยางผสมคกรูปร่างอย่างธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน (อัตราส่วน 70/30 และ 60/40 โดยน้ำหนัก) พบว่าอัตราส่วนยางผสมคกรูปร่างอย่างธรรมชาติและยางบิวทาไดอินที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความเหนียวนี้ ลักษณะการเชื่อมโยง สมบัติเชิงกล และสมบัติเชิงพลวัต มีค่าใกล้เคียงกัน
5. การศึกษาการใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน (เขม่าดำ N330 ซิลิกา Hisil®255 และ Sidistar®) พบว่าเมื่อใช้เขม่าดำ N330/ซิลิกา Sidistar® ให้ค่าความเหนียวนี้ ความแข็งแรงดึง ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความต้านทานต่อการฉีกขาด ความต้านทานต่อการขีดถู และการเสียรูปถาวรหลังการกด มีแนวโน้มน้อยกว่าเขม่าดำ N330 และเขม่าดำ N330/ซิลิกา Hisil®255 อย่างไรก็ตาม การใช้เขม่าดำ N330/ซิลิกา Sidistar® ให้ค่าความร้อนสะสมในยางต่ำ ความกระด้างกระดอนดี และความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 90 องศา และ 180 องศา มากกว่า เมื่อเทียบกับการใช้สารตัวเติมอีก 2 ชนิด นอกจากนี้ลักษณะการเชื่อมโยง ค่ามอดูลัสที่ระยะยืด 100% และ 300% รวมทั้งความแข็งแรง และภาพ SEM ของยางผสมคกรูปร่างที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ เมื่อใช้สารตัวเติมแตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของเกรดยางบิวทาไดอินที่มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยแตกต่างกัน
2. หาวิธีการเพิ่มสมบัติของยางถอนขนสัตว์ปีกด้วยวิธีอื่น เช่น การใช้เรซินบางชนิด เช่น butadiene rubber resin ทำหน้าที่เป็นสารเติมแต่งในยางผสมคกรูปร่าง
3. ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน (Coefficient of friction) ซึ่งเป็นสมบัติที่จำเป็นต่อการพัฒนาสูตรยางเป็นผลิตภัณฑ์ยางถอนขนสัตว์ปีก

เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะกรรมการพัฒนาคุณภาพข้อมูลด้านการเกษตร. 2561. ยางพารา ปี 2561. [Online]. Available : <https://www.thairn.com/uploadfile/20181011144425.pdf>.
- [2] กฤษณี พิสิษฐศุภกุล ธนายุส บุญทอง และนิลวรรณ พูเพื่องสิน. 2561. อุตสาหกรรมยางพาราไทย: ในบริบทใหม่ที่ท้าทาย. [Online]. Available : https://www.bot.or.th/Thai/MonetaryPolicy/Southern/DocLib/MiniSymposium_rubber_final.pdf.
- [3] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2561. โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรม ยางและผลิตภัณฑ์ยาง. [Online]. Available : <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib11136.pdf>.
- [4] กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2559. ยุทธศาสตร์เกษตรและสหกรณ์ ระยะ ๒๐ ปี (พ.ศ. ๒๕๖๐ - ๒๕๗๙). [Online] Available : <http://www.oic.go.th/FILEWEB/CABINFOCENTER2/DRAWER049/GENERAL/DATA0000/00000022.PDF>.
- [5] ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ. 2561. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ยางถอนขนไก่ที่ทำจากยางธรรมชาติสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปไก่สดในประเทศไทย. [Online]. Available : <https://programming.cpe.ku.ac.th/AgrilInformatics/viewProject.php?itemID=5691>.
- [6] อธิพิล แจ้งชัด, จรุงรัตน์ ธีรภัชพันธ์ และชยุต สุวรรณพิมลกุล. 2556. “โครงการการศึกษาสูตรยางสำหรับยางถอนขนไก่ประสิทธิภาพสูงที่ทำจากยางธรรมชาติสำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปไก่สด.” โครงการวิจัยงบประมาณการสนับสนุนทุนวิจัยกลุ่มเรื่องเร่งด่วน : ด้านยางพารา.
- [7] จุฑาทิพย์ ตรีทศรัตน์, ภัทริรา ธรรมวุฒา และวิชญาพร ทองฉิม. 2559. “การศึกษาเส้นใยเคฟลาร์และเส้นใยสับปะรดเป็นสารเสริมแรงในยางถอนขนไก่.” ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] พงษ์ธร แซ่อู๋. 2548. ยาง : สมบัติ และการใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2 ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [9] อธิพิล แจ้งชัด. 2554. “เอกสารประกอบการเรียนการสอนวิชาเทคโนโลยียาง.” กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
- [10] สถาบันวิจัยยาง. 2536. เอกสารวิชาการ เรื่อง ยาง. กรุงเทพฯ : กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] Science news. 2018. **ยางธรรมชาติ**. [Online]. Available : https://www.electron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=141&Itemid=0.
- [12] UBE INDUSTRIES, LTD. 2018. **Polybutadiebe Rubber**. [Online]. Available : https://www.ube.com/contents/en/chemical/rubber/polybutadiene_rubber.html.
- [13] Barlow and Fred, W. 1993. **Rubber compounding : principles, materials, and techniques**. New York : Marcel Dekker.
- [14] Sigrid Koch. 1972 **Manual for the rubber Industry**. Germany : Farbenfabriken Bayer AG Leverkusen.
- [15] Samir Majumdar. 2012. **Rubber Mixing**. Bangkok : Rubber Industry Academy.
- [16] Brydson, J.A. 1988. **Rubbery materials and their compounds**. Great Britain : Galliard.
- [17] W. Hofmann. 1989. **Rubber technology handbook**. Germany : Federal Republic of Germany.
- [18] MDR International Co.,Ltd. 2018. **ยางบิวทาไดอิน**. [Online]. Available : <http://www.mdr-thai.com/index.php/knowledge?layout=edit&id=126>.
- [19] D.I. Bower. 2002. **An Introduction to Polymer Physics**. United Kingdom : University Press, Cambridge.
- [20] เสาวรจน์ ขวัญจุลจิตร. 2541. “เอกสารประกอบการสอนวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์1.” กรุงเทพฯ : ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. เอกสารอัดสำเนา.
- [21] Elyns Group LLC. 2018. Structures of butadiene rubber. [Online]. Available : <https://www.elynsgroup.com/article/micro-structural-effect-on-hydroxy-terminated-poly-butadiene-htpb-prepolymer-and-htpb-based-composite-propellant>.
- [22] อธิพล แจ่มชัด. 2560. “เอกสารประกอบการเรียนการสอนพอลิเมอร์ฟิสิกส์.” กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. เอกสารอัดสำเนา.
- [23] Engineering360. 2018. Structures of polymer chains [Online]. Available : https://www.globalspec.com/reference/34787/203279/chapter-5-cyclic-poly-siloxanes?fbclid=IwAR08tIWCaBbvFE5l8VemBqSjtBO_m-DThXkT-33f-pEEc-dONdhn3qBW27c.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. 2561. “เอกสารประกอบการเรียนการสอน Polymer Characterization and Analysis.” กรุงเทพฯ : คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อม และวัสดุ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. เอกสารอัดสำเนา.
- [25] ชลธิชา นุ่มหอม 2538. โพลีเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : พรศิวการพิมพ์.
- [26] สมบัติ พุทธจักร 2550. โครงสร้างและสมบัติเชิงฟิสิกส์ของพอลิเมอร์. ปัตตานี : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [27] สมบัติ พุทธจักร 2542 สมบัติเชิงฟิสิกส์และเชิงรีโอโลยีของยาง. ปัตตานี : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [28] อุทิศ สุริภา 2553. “การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติเชิงพลวัตของยางคงรูป.” *MECHANICAL Technology* 10 (9) : 48-53.
- [29] Zweifel, Hans. 2001. *Plastic Additive Handbook*. Germany : Hanser Gardner Publications.
- [30] จิตต์ลดา ศักดาภิพาณิชย์ 2553. เทคโนโลยียางธรรมชาติ. กรุงเทพฯ : เทคโนโลยีคอมมิวนิเคชั่นส์.
- [31] พงษ์ธร แซ่ฮุ่ย 2548. สารเคมียาง. พิมพ์ครั้งที่ 1 ปทุมธานี : ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- [32] พรพรรณ นิธิอุทัย. 2535. “เอกสารประกอบการอบรมเทคโนโลยียางระยะสั้น เรื่อง เทคนิคการออกสูตรยาง.” กรุงเทพฯ : โรงแรมเอเชีย เอกสารอัดสำเนา.
- [33] LookChem. 2018. N-Cyclohexyl-2-benzothiazolesulfenamide. [Online]. Available : <https://www.lookchem.com/cas-95/95-33-0.html>.
- [34] Wikimedia Commons. 2018. Mercaptobenzothiazole. [Online]. Available : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2-Mercaptobenzothiazole.png>.
- [35] Wikimedia Commons. 2018. Diphenylguanidine. [Online]. Available : <https://www.wikidata.org/wiki/Q2537147>.
- [36] C.M. Blow and C. Hepburn. 1982. *Rubber technology and manufacture*. United Kingdom : Butterworth Scientific Publisher.
- [37] Peter A. Ciullo and Norman Hewitt. 1954. *The rubber formulary*. United States of America : Noyes Publications.
- [38] Maurice Morton. 1995. *Rubber technology*. United State of America : R.R. Donnelly & Son Company, Harrisonburg, Virginia.
- [39] Cabot Corporation. 2018. โมเดลโครงสร้างของเขม่าดำ. [Online]. Available : <http://www.cabotcorp.com/solution/applications/industrial-rubber.products/dispersion>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [40] ASAHI CARBON CO.,LTD. 2018 **ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวเขม่าดำ**. [Online]. Available : https://www.asahicarbon.co.jp/global_site/product/cb/characteristic.html.
- [41] ResearchGare. 2018. **โครงสร้างซีลิกา**. [Online]. Available : https://www.researchgate.net/figure/Considerations-for-primary-particles-aggregates-and-agglomerates-A-A-bottom-up_fig1_279299551.
- [42] Autotirechecking. 2018. **องค์ประกอบของซีลิกา**. [Online]. Available : <https://www.autotirechecking.com>.
- [43] Bluestar Elkem International Co., Ltd. 2018. **Sidistar**. [Online]. Available : https://www.elkem.com/globalassets/silicon-materials/sidistar/datasheets/pds_sidistar_t120u_v181003.pdf.
- [44] Goodlife Elastomer [M] Sdn Bhd. 2562. **Rubber plucking fingers**. [Online]. Available : <http://elastomer.goodlife.com>.
- [45] สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2018. **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่อง ยางถนนทนไถ่ (มอก.2666-2558)**. [Online]. Available : <https://www.nqi.go.th/nqi/standard.php?item=2642>.
- [46] Bhagawan, S.-S. and Tripathy, D.-K. 1987. “Morphology and mechanical behavior of 1,2 polybutadiene – natural rubber blends.” *Materials Chemistry and Physics*. 17(1) : 415-432.
- [47] Pan, W., Chen, H., Mu, J., Li, W., Jiang, F., Weng, G., Hu, Y., Gong, D. and Zhang, X. 2017. “Synthesis of high crystalline syndiotactic 1,2 polybutadienes and study on their reinforcing effect on cis-1,4 polybutadiene.” *Polymer*. 111(1) : 20-26.
- [48] Chengwu, Z., Yudong, H., Shengchao, W., Chunyu, Z. and Xuequan, Z. 2008. “Blends of Polypropylene and Syndiotactic 1,2-Polybutadiene : Morphology, Crystallization Behaviors and Mechanical Properties.” *Chemical Research in Chinese Universities*. 24(1) : 640-643.
- [49] Sakamoto, Y. and Tsuji, H. 2013. “Crystallization behavior and physical properties of linear 2-arm and branched 4-arm poly(L-lactide)s: Effects of branching.” *Polymer*. 54 : 2422-2434.
- [50] Pradiptanti, L. and Satapathy, D.-K. 2018. “Effect of bimodal molecular weight distribution on glass transition of confined polystyrene.” *Thin Solid Films*. 651 : 18-23.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [51] Li, G., Lu, S., Pang, J., Bai, Y., Zhang, L. and Guo, X. 2012. "Preparation, microstructure and properties of ABS resin with bimodal distribution of rubber particles." *Materials Letters*. 66(1) : 219-221.
- [52] Ulfah, I., Fidyarningsih, R., Rahayu. S., Fitriani, D., Saputra, D., Winarto, D., Wisojodharmo, L. 2015. "Influence of Carbon Black and Silica Filler on the Rheological and Mechanical Properties of Natural Rubber Compound." *Procedia Chemistry*. 16: 258-264.
- [53] Wu, Y., Wen, S., Shen, J. , Jiang, J., Hu, S. and Zhang, L. 2015. "Improved dynamic properties of natural rubber filled with irradiation-modified carbon black." *Colloids and Surfaces A: Radiation Physics and Chemistry*. 111: 91-97.
- [54] ภูซังค์ ทับทอง, ชาคริต สิริสิงห์ และพงษ์ธร แซ่ฮ้อย. 2551. "การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมแรงระหว่างนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต และซิลิกาในยางธรรมชาติ." *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว*. 51(1) : 95-109.
- [55] ชิตชาติ ดอกกรัก, วัชรพงษ์ ชูแก้ว และสมเจตน์ พ็ชรพันธ์. 2555. "การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่ออายุความล้าของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ." *โครงการสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย*.
- [56] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2017. Standard Test Methods for Rubber—Viscosity, Stress Relaxation, and Pre-Vulcanization Characteristics (Mooney Viscometer): D1646-17.
- [57] Yliopisto, T. 2016. **Mooney**. [Online]. Available: https://www.tut.fi/ms/muo/vert/9_test_methods/rubber_compounds_viscosity_and_scorch.htm.
- [58] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2001. Standard Test Method for Rubber Property—Vulcanization Using Rotorless Cure Meters: D5289-95.
- [59] Nawi. 2556. **Rubber compounding basics**. [Online]. Available : https://rubber_tech.word_press.com/category/technical-notes.
- [60] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2016. Standard Test Method for Tensile Strength Properties of Rubber and Elastomers: D412-16.
- [61] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2012. Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers: D624-00.
- [62] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2015. Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness: D2240-15.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

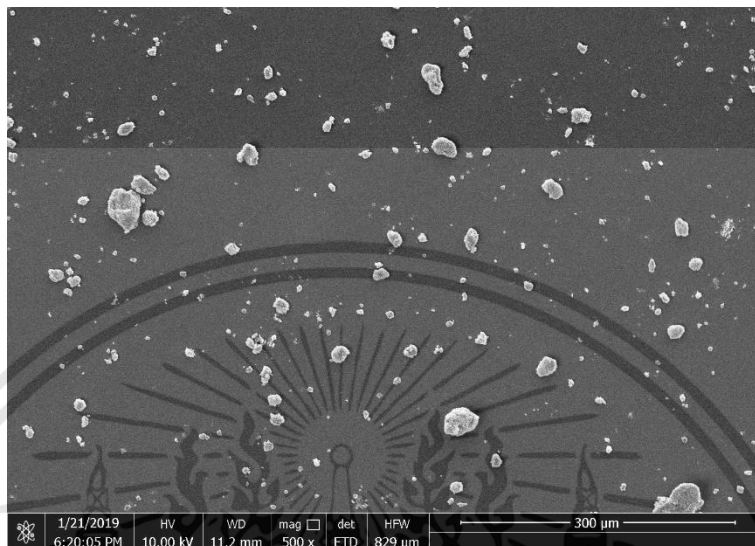
- [63] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2018. Standard Test Methods for Rubber Property—Compression Set: D395-18.
- [64] Japanese Industrial Standards (JIS). 2005. Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of abrasion resistance Part 2: Testing methods : K6264-2.
- [65] British Standards (BS). 1990. Methods of Testing Vulcanized Rubber Part A8: Determination of Rebound Resilience: BS 903-A8.
- [66] Japanese Industrial Standards (JIS). 2017. Rubber, vulcanized or thermoplastic- Determination of tensile stress-strain properties : K6251.
- [67] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2014. Standard Test Method for Measuring Rubber Deterioration—Cut Growth Using Ross Flexing Apparatus: D1052-09.
- [68] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2014. Standard Test Method for Rubber Deterioration—Crack Growth: D813-07.
- [69] American Society for Testing and Materials (ASTM). 2014. Standard Test Methods for Rubber Property—Heat Generation and Flexing Fatigue In Compression: D623-07.
- [70] Fielding, J.H. 1943. “Flex life and crystallization of synthetic rubber”. *Industrial and Engineering Chemistry*. 35: 398-403.
- [71] The center for educational services of Walailak University. 2019. **Molecular weight of polymer**. [Online]. Available : <https://ces.wu.ac.th/news/06/n22814.pdf>.
- [72] Kinloch, A.J. and Young, R.J. 1983. **Fracture behavior of polymers**. England : Elsevier Science Publishers, Ltd.



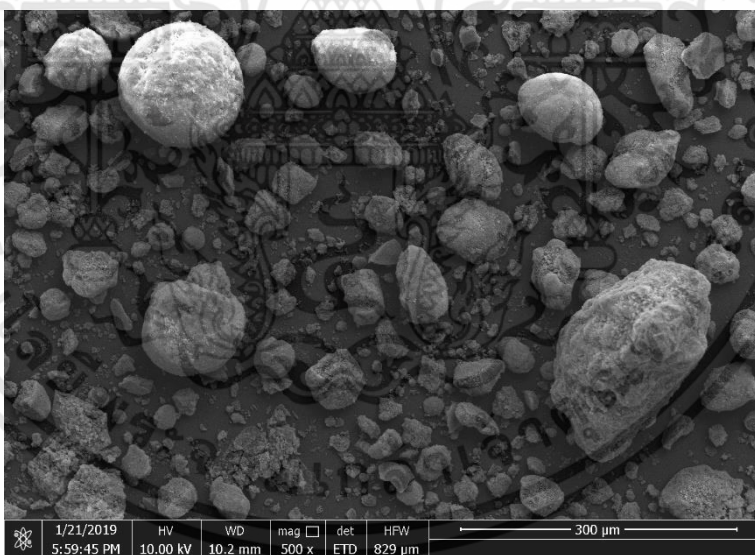
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบมาตรฐานวิทยา

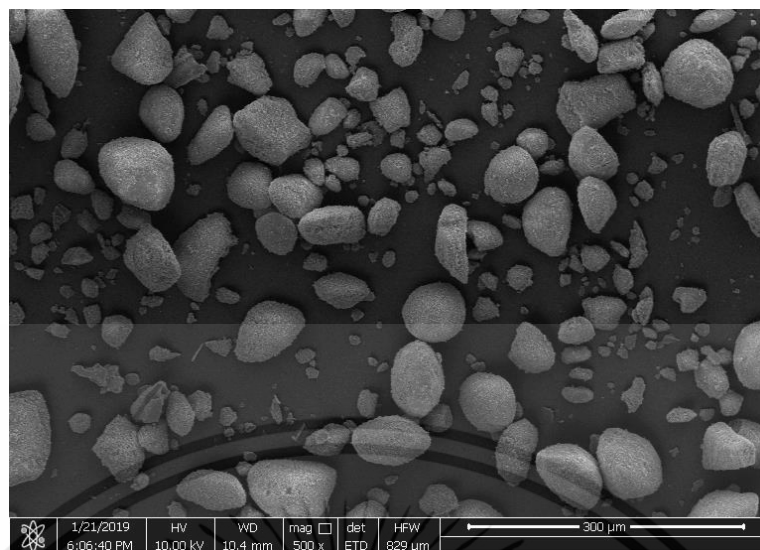


รูปที่ ก.1 ภาพ SEM แสดงเขม่าดำ N330 (กำลังขยาย 500 เท่า)

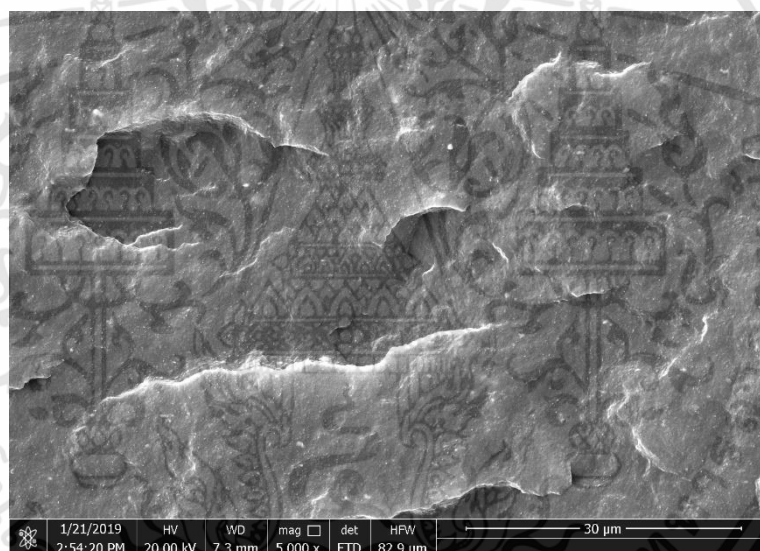


รูปที่ ก.2 ภาพ SEM แสดงซิลิกา Hisil®255 (กำลังขยาย 500 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

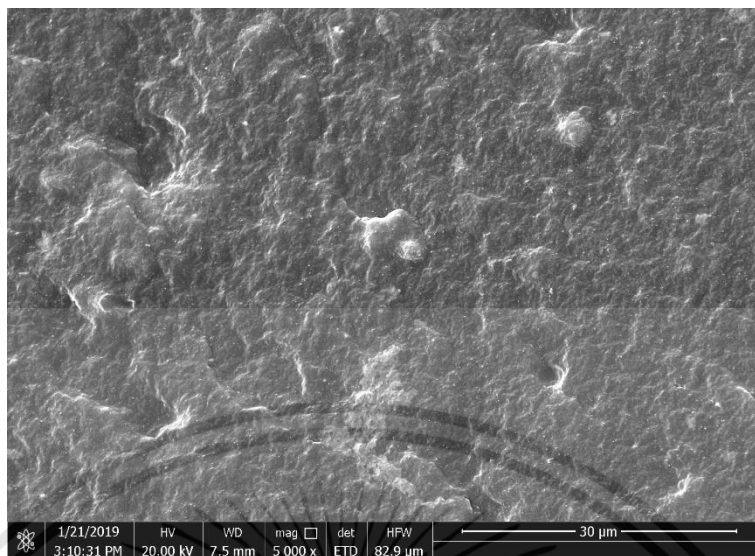


รูปที่ ก.3 ภาพ SEM แสดงซิลิกา Sidistar® (กำลังขยาย 500 เท่า)

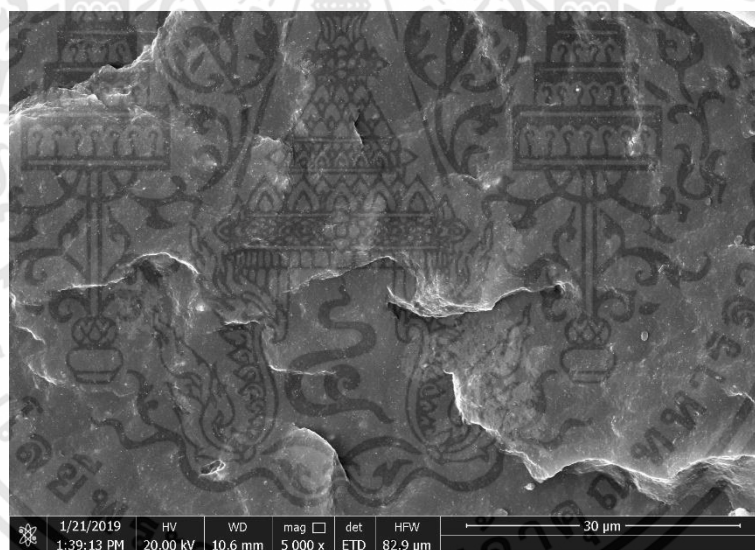


รูปที่ ก.4 ภาพ SEM แสดงยางผสมคงรูปหลังจากการดึงทดสอบที่ใช้เขม่าดำ N330 (กำลังขยาย 5,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 ภาพ SEM แสดงยางผสมคกรูปหลังจากการดึงทดสอบที่ใช้เข็มดำ N330/ซิลิกา Hisil®255 (กำลังขยาย 5,000 เท่า)



รูปที่ ก.6 ภาพ SEM แสดงยางผสมคกรูปหลังจากการดึงทดสอบที่ใช้เข็มดำ N330/ซิลิกา Sidistar® (กำลังขยาย 5,000 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

ตารางที่ ข.1 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	ปริมาณ 1,2 butadiene rubber (%wt)				
	0.0	3.8	5.3	12.0	17.0
1	54.65	57.03	53.94	58.84	58.84
2	55.60	55.45	54.01	60.96	60.96
3	57.24	53.06	58.91	59.55	59.55
4	59.50	60.96	58.13	56.94	56.94
5	59.60	51.50	63.00	56.45	56.45
6	57.42	64.16	54.61	58.64	58.64
ค่าเฉลี่ย	57.3 ± 0.8	57.0 ± 2.0	57.1 ± 1.5	58.6 ± 0.7	60.3 ± 0.7

ตารางที่ ข.2 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	สูตรยาง		
	NR/BR-150	NR/BR-150L	NR/BR-150B
1	55.86	51.27	50.69
2	55.35	54.22	56.23
3	59.61	54.39	59.39
4	55.8	52.34	56.95
5	57.11	57.15	55.89
ค่าเฉลี่ย	56.7 ± 0.8	53.9 ± 1.0	55.8 ± 1.4

ตารางที่ ข.3 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคางรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดย น้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	3.8 %wt		5.3 %wt	
	Unimodal	Bimodal	Unimodal	Bimodal
1	57.45	54.63	56.43	59.53
2	56.36	53.45	55.20	58.31
3	54.82	52.02	56.70	55.13
4	57.41	56.79	53.36	56.09
ค่าเฉลี่ย	56.5 ± 0.6	54.2 ± 1.0	55.4 ± 0.8	57.3 ± 1.0

ตารางที่ ข.4 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคางรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยาง บิวทาไดอิน 70/30 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่	NR/BR-	NR/BR-	NR/BR-	NR/VCR	NR/VCR
	150	150L	150B	617	450
1	55.86	55.60	50.69	58.84	57.03
2	55.35	57.24	56.23	60.96	55.45
3	59.61	59.50	59.39	59.55	53.06
4	55.8	59.60	56.95	56.45	60.96
5	57.11	57.42	55.89	58.64	64.16
ค่าเฉลี่ย	56.7 ± 0.8	57.9 ± 0.8	55.8 ± 1.4	58.9 ± 0.7	58.1 ± 2.0

ตารางที่ ข.5 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคองรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 60/40 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่	NR/BR-150	NR/BR-150L	NR/BR-150B	NR/VCR 617	NR/VCR 450
1	53.24	57.89	55.93	55.85	55.47
2	54.86	55.47	55.66	57.79	53.85
3	56.44	53.52	52.76	53.13	54.8
4	57.63	55.31	58.42	59.13	58.28
5	58.94	57.09	53.92	58.01	55.81
ค่าเฉลี่ย	56.2 ± 1.0	55.9 ± 0.8	55.3 ± 1.0	56.8 ± 1.1	55.6 ± 0.7

ตารางที่ ข.6 ความต้านทานต่อการฉีกขาดของยางผสมคองรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	CB	HISI	SIDI
1	53.58	55.07	53.45
2	57.15	53.38	49.89
3	58.94	56.44	49.67
4	54.09	53.54	50.86
5	56.67	52.11	50.40
ค่าเฉลี่ย	56.1 ± 1.0	54.1 ± 0.7	50.9 ± 0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบความต้านทานต่อการขีดถู

ตารางที่ ค.1 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	ปริมาณ 1,2 butadiene rubber (%wt)				
	0.0	3.8	5.3	12.0	17.0
1	0.340	0.312	0.341	0.316	0.339
2	0.322	0.377	0.396	0.309	0.352
3	0.390	0.387	0.396	0.384	0.303
ค่าเฉลี่ย	0.35 ± 0.02	0.36 ± 0.02	0.38 ± 0.02	0.34 ± 0.02	0.33 ± 0.01

ตารางที่ ค.2 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	สูตรยาง		
	NR/BR-150	NR/BR-150L	NR/BR-150B
1	0.331	0.349	0.315
2	0.423	0.337	0.312
3	0.380	0.340	0.310
ค่าเฉลี่ย	0.38 ± 0.05	0.34 ± 0.01	0.31 ± 0.00

ตารางที่ ค.3 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	3.8 %wt		5.3 %wt	
	Unimodal	Bimodal	Unimodal	Bimodal
1	0.282	0.280	0.267	0.272
2	0.299	0.318	0.284	0.293
3	0.319	0.349	0.308	0.344
ค่าเฉลี่ย	0.30 ± 0.01	0.32 ± 0.02	0.29 ± 0.01	0.30 ± 0.02

ตารางที่ ค.4 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางคงรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีน 70/30 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่	NR/BR-150	NR/BR-150L	NR/BR-150B	NR/VCR 617	NR/VCR 450
1	0.331	0.340	0.315	0.339	0.312
2	0.423	0.322	0.312	0.352	0.377
3	0.380	0.390	0.310	0.303	0.387
ค่าเฉลี่ย	0.38 ± 0.05	0.35 ± 0.02	0.31 ± 0.00	0.33 ± 0.01	0.36 ± 0.02

ตารางที่ ค.5 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางคงรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอีน 60/40 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่	NR/BR-150	NR/BR-150L	NR/BR-150B	NR/VCR 617	NR/VCR 450
1	0.279	0.298	0.268	0.302	0.308
2	0.267	0.280	0.284	0.301	0.293
3	0.270	0.290	0.280	0.300	0.300
ค่าเฉลี่ย	0.27 ± 0.01	0.29 ± 0.01	0.28 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.30 ± 0.01

ตารางที่ ค.6 ความต้านทานต่อการขีดถูของยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	CB	HISI	SIDI
1	0.318	0.344	0.438
2	0.346	0.329	0.464
3	0.330	0.340	0.450
ค่าเฉลี่ย	0.33 ± 0.01	0.34 ± 0.01	0.45 ± 0.01

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบความกระด้างกระดอน

ตารางที่ ง.1 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	ปริมาณ 1,2 butadiene rubber (%wt)				
	0.0	3.8	5.3	12.0	17.0
1	67.08	64.62	64.62	63.57	63.57
2	67.08	64.62	64.62	63.57	63.57
3	67.08	64.62	64.62	63.57	63.57
ค่าเฉลี่ย	67.08 ± 0.00	64.62 ± 0.00	64.62 ± 0.00	63.57 ± 0.00	63.57 ± 0.00

ตารางที่ ง.2 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	สูตรยาง		
	NR/BR-150	NR/BR-150L	NR/BR-150B
1	70.67	73.61	70.67
2	71.77	74.35	70.67
3	71.77	74.35	71.77
ค่าเฉลี่ย	71.77 ± 0.10	74.35 ± 0.07	70.67 ± 0.10

ตารางที่ ง.3 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคกรูปที่ใช้อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลแตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	3.8 %wt		5.3 %wt	
	Unimodal	Bimodal	Unimodal	Bimodal
1	68.87	67.08	68.15	67.08
2	68.87	67.08	67.08	68.15
3	68.87	67.08	67.08	67.08
ค่าเฉลี่ย	68.87 ± 0.00	67.08 ± 0.00	67.44 ± 0.36	67.44 ± 0.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.4 ความกระด้างกระดอนของยางคงรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 70/30 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่	NR/BR- 150	NR/BR- 150L	NR/BR- 150B	NR/VCR 617	NR/VCR 450
1	70.67	66.49	70.67	63.57	64.62
2	71.77	66.49	70.67	63.57	64.62
3	71.77	66.49	71.77	63.57	64.62
ค่าเฉลี่ย	71.77 ± 0.10	66.49 ± 0.00	70.67 ± 0.10	63.57 ± 0.00	64.62 ± 0.00

ตารางที่ ง.5 ความกระด้างกระดอนของยางคงรูปที่ใช้อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 60/40 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่	NR/BR- 150	NR/BR- 150L	NR/BR- 150B	NR/VCR 617	NR/VCR 450
1	73.61	73.61	73.61	68.87	73.61
2	74.35	72.50	72.50	68.15	74.35
3	73.61	72.50	73.61	68.87	73.61
ค่าเฉลี่ย	73.61 ± 0.07	72.50 ± 0.10	73.61 ± 0.10	68.87 ± 0.07	71.77 ± 0.10

ตารางที่ ง.6 ความกระด้างกระดอนของยางผสมคงรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	CB	HISI	SIDI
1	72.50	68.87	75.47
2	72.50	68.15	76.22
3	71.77	68.15	76.22
ค่าเฉลี่ย	72.50 ± 0.12	68.15 ± 0.12	76.22 ± 0.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบความต้านทานการขยายรอยแตกจากการ

พับงอ 180 องศา

ตารางที่ จ.1 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคกรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีปริมาณ 1,2 BR แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	ปริมาณ 1,2 butadiene rubber (%wt)				
	0.0	3.8	5.3	12.0	17.0
1	19,500	30,000	20,000	20,000	20,000
2	18,000	25,000	20,000	15,000	20,000
3	15,000	28,000	20,000	18,000	20,000
ค่าเฉลี่ย	17,500	27,667	20,000	17,667	20,000
	± 1,323	± 1,453	± 0	± 1,453	± 0

ตารางที่ จ.2 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศาของยางผสมคกรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	สูตรยาง		
	NR/BR-150	NR/BR-150L	NR/BR-150B
1	15,000	19,500	16,000
2	13,000	18,000	15,000
3	17,000	15,000	15,000
ค่าเฉลี่ย	15,000 ± 1,155	17,500 ± 1,323	15,333 ± 333

ตารางที่ จ.3 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพังกอ 180 องศาของยางผสมคกรูปที่ใช้ อัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 โดยน้ำหนัก ซึ่ง BR มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุล แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	3.8 %wt		5.3 %wt	
	Unimodal	Bimodal	Unimodal	Bimodal
1	30,000	50,000	35,000	50,000
2	20,000	50,000	20,000	30,000
3	20,000	45,000	20,000	45,000
ค่าเฉลี่ย	23,333 ± 3,333	48,333 ± 1,667	25,000 ± 5,000	41,667 ± 6,009

ตารางที่ จ.4 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพังกอ 180 องศา ของยางคกรูปที่ใช้ อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 70/30 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่	NR/BR- 150	NR/BR- 150L	NR/BR- 150B	NR/VCR 617	NR/VCR 450
1	15,000	19,500	16,000	20,000	50,000
2	13,000	18,000	15,000	20,000	50,000
3	17,000	15,000	15,000	20,000	45,000
ค่าเฉลี่ย	15,000 ± 1,155	17,500 ± 1,323	15,333 ± 333	20,000 ± 0	48,333 ± 1,667

ตารางที่ จ.5 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพังกอ 180 องศา ของยางคกรูปที่ใช้ อัตราส่วนยางธรรมชาติและยางบิวทาไดอิน 60/40 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างที่	NR/BR- 150	NR/BR- 150L	NR/BR- 150B	NR/VCR 617	NR/VCR 450
1	11,000	18,000	10,500	10,000	25,000
2	13,000	18,000	11,000	10,000	25,000
3	16,000	18,000	10,500	10,000	26,000
ค่าเฉลี่ย	13,333 ± 1,453	18,000 ± 0	10,667 ± 167	10,000 ± 0	25,333 ± 333

ตารางที่ จ.6 ความต้านทานการขยายรอยแตกจากการพับงอ 180 องศา ของยางผสมคังรูปที่ใช้สารตัวเติมที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างที่	CB	HISI	SIDI
1	60,000	50,000	500,000
2	60,000	50,000	500,000
3	60,000	45,000	500,000
ค่าเฉลี่ย	60,000 ± 0	48,333 ± 1,667	500,000 ± 0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวยศวดี บัณฑิตย์
วัน เดือน ปีเกิด	19 กรกฎาคม 2538
ที่อยู่ปัจจุบัน	70 หมู่ที่ 1 ตำบลบางพระ อำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี
ประวัติการศึกษา	(2559) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.16 (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาของคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	Yodsawadee Bundit, Toemphong Puvanattvattana, Daechatorn chantaruk, and Ittipol Jangchud, “Effects of BR molecular structures on properties of NR/BR vulcanizates”, The proceeding of Pure and Applied Chemistry International Conference 2019. (PACCON 2019), February 7-8, Bangkok, Thailand. pp PO41-PO46., 2019.
รางวัลที่ได้รับ	รางวัลโปสเตอร์ดีเด่น (Outstanding Student Poster Award) ในงานประชุมวิชาการเคมี และเคมีประยุกต์ระดับนานาชาติ “The Pure and Applied Chemistry International Conference 2019 (PACCON 2019)” ระหว่างวันที่ 7-8 กุมภาพันธ์ 2562 จัดโดยสมาคมเคมีแห่งประเทศไทย และมหาวิทยาลัยมหิดล ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทคบางนา กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย