

# การศึกษาสูตรยางสำหรับยางรถบังคับวิทยุ



เลขที่.....  
เลขทะเบียน..... 49287  
วัน, เดือน, ปี..... 8 ก.พ. 2547

.b.....  
.i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Study on Rubber Formula  
for Radio Control (R/C) Car Tire**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Bachelor of Science  
Department of Chemistry  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Academic Year 2002**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาดูตัวอย่างสำหรับยางรถบังคับวิทยุ		
นักศึกษา	นายกิตติพัชร	ศรีอ่ำดี	รหัส 42050060
	นางสาววีรยา	เดชะรัตน์พงษ์	รหัส 42050116
	นางสาวสุภาวดี	ทรัพย์อาภากร	รหัส 42050126
ภาควิชา	เคมี		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัด		

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์	.....
กรรมการ	ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ	.....
กรรมการ	ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัด	.....

*pu hu*  
.....  
(รศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)  
หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาสูตรยางสำหรับยางรถบังคับวิทยุ		
นักศึกษา	นายกิตติพัชร ศรีอำดี	42050060	
	นางสาววีรยา เตชะรัตน์พงษ์	42050116	
	นางสาวสุดาวดี ทรัพย์อากาศ	42050126	
ภาควิชา	เคมี		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม		
ปีการศึกษา	2545		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาสูตรยางที่เหมาะสม สำหรับการผลิตยางล้อรถบังคับวิทยุ (Radio control (R/C) car) เนื่องจากรถบังคับวิทยุวิ่งด้วยความเร็วสูง เคลื่อนไหวเร็ว และต้องการล้อรถที่ทนต่อแรงเสียดทานสูงจึงต้องการยางผสมสูตรที่นุ่ม มีสมบัติเกาะถนนดี และมีสมบัติต้านทานการเสียดสีขัดถู เริ่มแรกทำการผสมสูตรยางด้วยเครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) แล้วขึ้นรูปล้อด้วยเทคนิคอัดขึ้นรูป (Compression molding) ที่อุณหภูมิ 150°C แล้วทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยาง เช่น อัตราส่วนยางวัลดูคิบคือยางธรรมชาติและยางพอลิบิวตะไดอิน (NR/BR) (อัตราส่วน 70/30 50/50 และ 30/70) ผลการเติมสารตัวเติมซิลิกา (10 phr) และการเติมสารเพิ่มการยึดเกาะคือยางพอลิบิวทีนเหลว (0 และ 10 phr) จากผลการทดลองพบว่า ยางอัตราส่วน 70/30 (NR/BR) มีสมบัติความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งกดสูงสุด เนื่องจากยางธรรมชาติสามารถเกิดผลึกขณะดึงยืดจึงมีความแข็งแรงสูง ส่วนอัตราส่วน 30/70 มีค่ามอดุลัสที่ 200% และสมบัติความต้านทานการเสียดสีขัดถูสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณยาง BR สูง อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้หลีกเลี่ยงการใช้ยาง BR ปริมาณสูงเนื่องจากมีปัญหาในการขึ้นรูป เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างยางผสมสูตรที่ไม่เติมและเติมซิลิกา (10 phr) พบว่าเมื่อเติมซิลิกาจะทำให้สมบัติเชิงกลสูงขึ้น ยกเว้นเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด อย่างไรก็ตามที่ผสมซิลิกามีความแข็งแรงเกินไปในการใช้เป็นล้อรถบังคับวิทยุ ในการศึกษาปริมาณการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความนุ่มและสมบัติการยึดเกาะ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวในยางสูงขึ้น จะทำให้ความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดุลัสที่ 200% ความแข็งกด และความต้านทานการเสียดสีขัดถูลดลง จากผลการทดลองสรุปสูตรที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปเป็นล้อคือ สูตรที่มีอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน

เป็น 50/50 ไม่เติมซิลิกา และผสมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	Study on Rubber Formula for Radio Control (R/C) Car Tire		
<b>Name</b>	Mr. Kittiphat	Sri-umdee	42050060
	Miss Veeraya	Taecharatpong	42050116
	Miss Sudawadee	Saparpakorn	42050126
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Program</b>	Industrial Chemistry		
<b>Academic Year</b>	2002		
<b>Special Project Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Ittipol Jangchud		

### ABSTRACT

This work was focused on a study of rubber formulation for tire of “radio control (R/C) car”. Since R/C cars need high speed, quick movement, and long service-life tire, a special rubber formula for soft R/C car tire with high tack and abrasion resistance properties is required. Raw rubbers, natural rubber (NR) and polybutadiene rubber (BR), was first compounded by using a two-roll mill and molded into tire by compression molding technique. Several factors affecting tire properties were investigated, including ratio of NR/BR (70/30, 50/50, and 30/70), filler (silica) loading, and tackifier (liquid polybutene rubber) loading. It was found that the compound using NR/BR ratio of 70/30 showed the highest tensile strength, %elongation at break, and hardness since strain-induced crystallization behavior of NR leads to high strength and elongation of the materials. However, the compound using NR/BR ratio of 30/70 had high modulus and superior abrasion resistance due to high BR loading. Due to difficulty in processability, high BR loading was avoided. By adding silica filler (10 phr) to the compound, mechanical properties including abrasion resistance of the rubbers were enhanced, except the % elongation. However, the silica-filled rubbers had too hard (stiff) to be used as the R/C car tire. When the liquid polybutene rubber was added into the compound, the rubber was softened with higher tensile strength and % elongation at break, but lower abrasion resistance, modulus, and hardness. It was concluded that the rubber formula to make R/C car tire with optimum properties consisted of NR/BR ratio of 50/50 and 10 phr of liquid polybutene rubber without silica filler.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มจัต ที่กรุณาได้รับเป็นที่ปรึกษาโครงการพิเศษ คอยให้คำปรึกษา แนะนำตลอดการทำโครงการ

ขอขอบพระคุณ ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร และ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และตรวจแก้ไขโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่คอยชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการพิเศษ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด และคอยส่งเสริมทางด้านการศึกษาเล่าเรียนจนสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คุณพลวัตร วีระประดิษฐ์ ที่กรุณาให้ความรู้ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกัรบถบั้งดับวิทยุ และให้ความอนุเคราะห์ในการใช้รถบั้งดับวิทยุเพื่อทดสอบวิ่ง

ขอขอบพระคุณ ส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันยาง กรมวิชาการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องสารเคมี

ขอขอบพระคุณ คุณกฤษณะ เกษะประดิษฐ์ และ คุณสุคใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่ประจำอาคารฝึกงานอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงการ

ขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และอยู่เป็นเพื่อนทำโครงการจนดีคืน

นอกจากนี้ยังมีผู้ที่มีได้กล่าวถึงอีกมากมาย คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษต้องขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้เป็นอย่างสูง

นายกิตติพัชร ศรีอำดี

นางสาววิรยา เตชะรัตน์พงษ์

นางสาวสุดาวดี ทรัพย์อากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของ โครงการงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของโครงการงานพิเศษ	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 ยางธรรมชาติ	4
2.2 ยางพอลิวิทาอะไดอินหรือยางบีอาร์	7
2.3 เขม่าดำ	7
2.4 ซิลิกา	11
2.5 สารแอนติออกซิแดนท์	12
2.6 น้ำมันช่วยผสม	15
2.7 พลาสติไซเซอร์	16
2.8 กำมะถัน	16
2.9 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง	17
2.10 สารกระตุ้นปฏิกิริยาการเชื่อมโยง	18
2.11 สารเพิ่มความเหนียวติด หรือ แทกคิไฟเออร์	18
2.12 รถบังคับวิทยุ	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย</b>	<b>22</b>
3.1 สารเคมี	22
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	24
3.3 วิธีการทดลอง	27
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์</b>	<b>33</b>
4.1 ศึกษาอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน-	33
4.2 ศึกษาผลของซิลิกาที่เติมลงในยางผสมสูตร	37
4.3 ศึกษาปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวที่เหมาะสม	41
4.4 การประยุกต์ใช้งานจริง	58
4.5 การวิเคราะห์ต้นทุน	60
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>62</b>
5.1 สรุปผลงานวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>64</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบและปริมาณของสารต่างๆ ในน้ำยางธรรมชาติ	5
ตารางที่ 2.2 การแบ่งเกรดโดยทั่วไปของเขม่าดำ	8
ตารางที่ 2.3 สมบัติต่างๆ ของเขม่าดำ	10
ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของน้ำมัน 3 ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง	16
ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติชนิดยางแผ่นรมควันชั้น 2 ที่ใช้ในการทดลอง	22
ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของยางบิวาร์ที่ใช้ในการทดลอง	23
ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของยางพอลิบิวทีนเหลวที่ใช้ในการทดลอง	24
ตารางที่ 3.4 สูตรผสมยางในการทดลอง	27
ตารางที่ 4.1 ค่า Scorch time และ Cure time ของอัตราส่วนต่างๆ ของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน	33
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ไม่เต็มและเต็มซีก 10 phr	37
ตารางที่ 4.3 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการปรับปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป	41
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของยางล้อรถบังคับวิทยุ	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 รถบังคับวิทยุ (Radio Control Car หรือ R/C Car)	2
รูปที่ 1.2 ล้อรถบังคับวิทยุ	2
รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ-ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของยางบิวทิล	7
รูปที่ 2.3 ปริมาณของเขม่าดำที่มีผลต่อสมบัติยางผสมสูตร	11
รูปที่ 2.4 ชนิดของหมู่ไซลันอลในซิลิกา	12
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ 2,2-methylene-bis-(4-methyl-6-tert-butylphenol)	15
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเมอแคปโทเบนโซไทเอโซลไดซัลไฟด์ (MBTS)	17
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของเตตระเมทิลไทยูเรมไดซัลไฟด์ (TMTD)	18
รูปที่ 2.8 ลักษณะรถบังคับวิทยุ	19
รูปที่ 2.9 ชุดอุปกรณ์มาตรฐานของวิทยุบังคับ	20
รูปที่ 2.10 แบบของวิทยุบังคับ	20
รูปที่ 2.11 ส่วนภาครับวิทยุ	21
รูปที่ 2.12 ส่วนของ Servo	21
รูปที่ 2.13 ส่วนของแบตเตอรี่	21
รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบความต้านทานเสียดสีขัดถูแบบครอยคอน-แอ็กครอน	25
รูปที่ 3.2 รถบังคับวิทยุ (Radio Control Car; R/C car) รุ่น XRAY T1 EV02	26
รูปที่ 3.3 แม่แบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความต้านทานการเสียดสีขัดถู	28
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านทานการเสียดสีขัดถู	30
รูปที่ 3.5 แม่แบบล้อรถ	31
รูปที่ 3.6 ผ้าใบเสริมแรง	31
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างล้อรถที่ขึ้นรูป	32
รูปที่ 3.8 สนามแข่งรถบังคับวิทยุ	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดิ่งกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน	34
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับอัตราส่วนของ ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน	35
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน	35
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน	36
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับอัตราส่วนของ ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน	36
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดิ่งกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่เติมและเติม silica 10 phr	38
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่เติมและเติม silica 10 phr	39
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่เติมและเติม silica 10 phr (Sample คือ ตัวอย่างยางสำหรับล้อรถบังคับวิทยุจากการค้า)	39
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับอัตราส่วนของ ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่เติม และเติม silica 10 phr	40
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับอัตราส่วนของ ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่เติม และเติม silica 10 phr	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
<b>รูปที่ 4.11</b> ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดิ่งกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 70/30	42
<b>รูปที่ 4.12</b> ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางพอลิบิวทีนเหลว ที่เติมลงไปปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 70/30	43
<b>รูปที่ 4.13</b> ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับยางพอลิบิวทีนเหลว ที่เติมลงไปปริมาณ ต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 70/30	43
<b>รูปที่ 4.14</b> ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกดกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 70/30	44
<b>รูปที่ 4.15</b> ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางพอลิบิวทีนเหลว ที่เติมลงไปปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 70/30	44
<b>รูปที่ 4.16</b> ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดิ่งกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 50/50	45
<b>รูปที่ 4.17</b> ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางพอลิบิวทีนเหลว ที่เติมลงไปปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 50/50	45
<b>รูปที่ 4.18</b> ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะ ไดอิน ในอัตราส่วน 50/50	46
<b>รูปที่ 4.19</b> ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกดกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 50/50	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางพอลิบิวทีนเหลว ที่เติมลงไป ปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 50/50	47
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 30/70	47
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางพอลิบิวทีนเหลว ที่เติมลงไป ปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 30/70	48
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 30/70	48
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกดกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 30/70	49
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางพอลิบิวทีนเหลว ที่เติมลงไป ปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 30/70	49
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติม ยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 5 phr	50
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติม ยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 7 phr	51
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติม ยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 5 phr	52
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 7 phr	52
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr	53
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 5 phr	53
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 7 phr	54
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr	54
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกคกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 5 phr	55
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกคกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 7 phr	55
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกคกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 5 phr	56
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 7 phr	57
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิวิตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิวิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr	57
รูปที่ 4.41 ยางล้อรถบังคับวิทยุที่ได้จากการวิจัยก่อนการทดลองวิ่ง	59
รูปที่ 4.42 ยางล้อรถบังคับวิทยุที่ได้จากการวิจัยหลังการทดลองวิ่ง	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

แบบจำลองบังคับวิทยุ (Radio Control Model หรือ R/C Model) นับเป็นของเล่นชนิดหนึ่ง ที่เรียกว่าจำลองรูปแบบและการทำงานจากของจริงมาได้ใกล้เคียงมากที่สุด จะต่างกันก็แต่เพียงขนาดเท่านั้นที่ย่อส่วนลงมา และเสน่ห์ของของเล่นชนิดนี้อยู่ตรงที่สามารถบังคับ ควบคุม แบบจำลองบังคับด้วยความถี่วิทยุ ให้อัป บิน หรือเล่นไปได้อย่างของจริง ทำให้ผู้บังคับควบคุม มีความสุขและสนุกเพลิดเพลินราวกับว่าได้เข้าไปขับหรือบินจริงๆ นอกจากนั้น การสร้างหรือ ประกอบแบบจำลองบังคับวิทยุก็เป็นการฝึกทักษะขบวนการทางความคิดอย่างเป็นขั้นตอน และ หลักการใช้เหตุผลในการเลือกชิ้นส่วนประกอบแบบจำลองบังคับวิทยุว่ามีหน้าที่สำคัญอย่างไร พอจะเปรียบเทียบกับของจริง ได้หรือไม่ เหตุผลเหล่านี้เองเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้มีผู้เข้ามาสัมผัส วงการแบบจำลองบังคับวิทยุเพิ่มมากขึ้น

สำหรับในประเทศไทยของเล่นประเภทแบบจำลองบังคับวิทยุ กำลังเป็นที่นิยม คือ รถ บังคับวิทยุ (Radio Control Car หรือ R/C Car) แสดงดังรูปที่ 1.1 แต่เนื่องจากส่วนประกอบของรถ ส่วนใหญ่มีราคาสูง และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยเฉพาะส่วนของล้อรถ (รูปที่ 1.2) ซึ่งมีความสำคัญมาก เพราะเป็นส่วนประกอบที่เกิดความเสียหายได้ง่าย เนื่องจากรถดังกล่าวต้องวิ่ง ด้วยความเร็วสูง ปัญหาที่พบมากที่สุด คือ การสึกหรอของล้อ โดยอายุการใช้งานของล้อรถ ประเภทนี้ที่ใช้สำหรับการแข่งขันจริงจะวิ่งได้ประมาณ 4 รอบสนาม หรือประมาณ 20 นาทีเท่านั้น จะต้องมีการเปลี่ยนล้อชุดใหม่ เพราะการสึกหรอของล้อจะมีผลต่อสมรรถนะของรถ ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของล้อจะขึ้นกับสูตรยางที่จะนำมาผลิตล้อรถ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสูตร (Formula) ของยางผสมสูตร (Rubber compound) เพื่อใช้ เตรียมล้อของรถบังคับวิทยุ (R/C Car) และสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดอื่น นำเสนอขึ้นเพื่อช่วยลดต้นทุนในการผลิตยาง และสามารถผลิตขึ้นเป็นอุตสาหกรรมภายในประเทศได้ โดยใช้วัตถุดิบ ที่หาได้ในประเทศ คือ ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) ซึ่งเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของไทยมา ผสมยางพอลิบิวตะไดอิน (Polybutadiene rubber; BR) และเพิ่มสมบัติของยางโดยใช้สารเติมแต่ง คือ ซิลิกาและยางพอลิบิวทีนเหลว (Liquid polybutene rubber) โดยในโครงการพิเศษนี้จะศึกษาถึง อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัตถุดิบยาง และผลของสารเติมแต่งที่มีต่อสมบัติต่างๆของยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 รถบังคับวิทยุ (Radio Control Car หรือ R/C Car)



รูปที่ 1.2 สื่อบริษัทวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางวัลดูคิบในการผลิตยางสำหรับรถบังคับวิทยุที่มีสมบัติที่ดี สามารถใช้งานได้จริง
2. ศึกษาผลของสารเติมแต่ง ได้แก่ ซิลิกา และสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น ยางพอลิบิวทีนเหลว (Liquid polybutene rubber) เพื่อปรับปรุงสมบัติของยางสำหรับรถบังคับวิทยุ

## 1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

งานวิจัยนี้นำเสนอเพื่อที่จะศึกษาและปรับปรุงสมบัติของยางสำหรับรถบังคับวิทยุ ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษามีดังนี้

1. ผลของอัตราส่วนผสมระหว่างยางธรรมชาติ (NR) กับยางบีอาร์ (BR)
  2. ผลของซิลิกาที่มีต่ออย่างผสมสูตร
  3. ผลของสารเติมแต่งชนิดอื่น เช่น ยางพอลิบิวทีนเหลว (Liquid polybutene rubber) ที่มีผลต่อสมบัติต่างๆของยางรถบังคับวิทยุ
- สมบัติของยางสำหรับรถบังคับวิทยุที่ทดสอบดังนี้
- ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)
  - เบลอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (Elongation at break)
  - ค่ามอดุลัส (Modulus)
  - ความแข็งกด (Hardness)
  - ความสามารถในการต้านทานการเสียดสีขูดถู (Abrasion resistance)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตยางสำหรับรถบังคับวิทยุที่มีคุณภาพ สามารถนำไปใช้งานได้จริง ราคาถูก และอายุการใช้งานยาวนาน
2. สนับสนุนอุตสาหกรรมยางรถในประเทศ ลดการนำเข้าล้อรถบังคับวิทยุราคาสูงจากต่างประเทศ ช่วยเศรษฐกิจของชาติ
3. เพิ่มการใช้ยางธรรมชาติ (NR) ในประเทศ ช่วยแก้ปัญหายางพาราล้นตลาด และมีราคาถูก เป็นการช่วยเหลือเกษตรกรชาวสวนยาง
4. ใช้ความรู้ที่ได้พัฒนาสูตรยางสำเร็จรูปอื่นๆ ส่งเสริมให้อุตสาหกรรมยาง

ภายในประเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber; NR) [1, 2]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีว่า ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4 Polyisoprene; PI) โครงสร้างโมเลกุลของยางแสดงดังรูปที่ 2.1 เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ คือ ต้นยางพารา ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ คือ ฮีเวีย-บราซิลเลียนซิส (*Hevea Brasiliensis*)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ-ซิส-1,4 พอลิไอโซพรีน [1]

น้ำยางธรรมชาติ (Latex) จากต้นยางพาราลักษณะเป็นของเหลวสีขาวข้นคล้ายน้ำมัน เป็นสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ (Colloids) ประกอบด้วยน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก เรียกว่า เซรัม (Serum) และมีอนุภาคยางพอลิไอโซพรีน (Polyisoprene) ประมาณ 30-45% ขนาด 20-2000 นาโนเมตร (nm) ลอยตัวแขวนลอยกระจายอยู่ในของเหลวเซรัมในลักษณะไมเซลล์ (Micelles) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยาง (Non-rubber substances) เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และสารอนินทรีย์อื่นๆ เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก สังกะสี ทองแดง และแมงกานีส เป็นต้น ส่วนประกอบต่างๆ ของน้ำยางแสดงได้ดังตารางที่ 2.1 น้ำยางธรรมชาติมีค่า pH ประมาณ 6.5-7.5 ความหนาแน่นประมาณ 0.97-0.98 g/cm<sup>3</sup> และมีความหนืด (Viscosity) ไม่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างส่วนประกอบและปริมาณของสารต่างๆในน้ำยางธรรมชาติ [1]

ส่วนประกอบ	ปริมาณ (%)
เนื้อยางแห้ง (Dry rubber content; DRC)-พอลิไอโซพรีน	33
โปรตีน	1.4
คาร์โบไฮเดรต	1.6
ไขมัน	1.0
ไกลโคไลปิด (Glycolipids) และฟอสโฟไลปิด(Phospholipids)	0.6
สารอินทรีย์	0.5
อื่นๆ	0.4
น้ำ	58.5

#### การผลิตยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoke sheets; RSS)

เริ่มจากการรวบรวมน้ำยางจากสวนยาง แล้วทำให้เจือจางด้วยน้ำสะอาดประมาณ 2 เท่า จากนั้นทำการกรองน้ำยาง โดยใช้ตะแกรงขนาด 40 50 และ 80 เมช (Mesh) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และสิ่งแปลกปลอม (Foreign matter) อื่นๆ ขั้นตอนต่อไป คือ การทำให้น้ำยางจับตัวเป็นของแข็ง (Coagulation) โดยการเทน้ำยางใส่ตะกวด แล้วเติมสารเคมีที่ทำให้น้ำยางจับตัวเป็นของแข็งหรือ โคแอกกูแลนต์ (Coagulant) ที่นิยมใช้คือ กรดฟอร์มิก (Formic acid) เจือจาง 0.5-2 % (น้ำหนักต่อ ปริมาตร) ใช้ช้อนตักกำจัดฟองยางที่ผิวหน้าออก แล้วทิ้งไว้ 1-18 ชั่วโมง (ระยะเวลาขึ้นกับ ปริมาณกรดที่ใส่) ให้น้ำยางจับตัวเป็นก้อน ในยาง 1 ส่วนจะมีน้ำประมาณ 5-7 ส่วน จากนั้นก้อนยาง จะถูกผ่านลูกกลิ้ง (Rollers) 3-6 คู่ บีบให้น้ำออกจากยางและทำให้แผ่นยางสุดท้ายมีความหนา 2-3 มิลลิเมตร (mm) ในลูกกลิ้งคู่สุดท้ายจะใช้ลูกกลิ้งที่มีร่องตามแนวทแยง ทำให้น้ำยางแห้งที่ได้ เป็นลายมุ่มคล้ายซี่โครงไขว้กัน (Criss-cross rib markings) หลังจากผ่านลูกกลิ้งสุดท้ายจะเหลือน้ำ ในแผ่นยางประมาณ 0.6 ส่วน จากนั้นน้ำจะซึมออกจากแผ่นยางซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์ ซินเนรีซิส (Syneresis) ซึ่งจะเกิดอย่างรวดเร็วใน 4 ชั่วโมงแรกของการตากแผ่นยางจนปริมาณน้ำ ลดเหลือ 0.4 ส่วน จากนั้นน้ำจะออกอย่างรวดเร็วอีกครั้งเนื่องจากความร้อนของการรมควัน โดยการตากยางแผ่นในโรงรมควัน (Smoke houses) ที่มีการเผาฟืนไม้ให้ควันด้านล่าง โรงรมควันจะมี อุณหภูมิประมาณ 60 °C จนกระทั่งน้ำเหลือประมาณ 0.15 ส่วน ผิวนอกของแผ่นยางแห้งสนิท ไม่เกิดซินเนรีซิสอีกต่อไป ปริมาณน้ำจะลดลงอย่างช้าๆ จากการกลายเป็นไอ (Evaporation) ยางแผ่นรมควันที่แห้งจะใส สีนน้ำตาลเข้มเนื่องจากควันไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยางแผ่นรมควันที่แห้งสนิทจะนำมาพิจารณาจัดแยกเกรดหรือชั้นตามลักษณะ ความสม่ำเสมอของสี ความแห้ง ความสะอาด ปริมาณฟองอากาศและสิ่งสกปรกเจือปน โดยสามารถจัดแบ่งยางรมควันเป็น 7 ชั้น ดังนี้

1. ยางแผ่นรมควันชั้น 1 พิเศษ (No. 1X RSS) ต้องมีลักษณะเป็นอันหนึ่งอันเดียวโดยตลอด ไม่มีราในแผ่นยาง ไม่มีลายพาดเป็นทางหรือจุดที่ถูกออกซิไดซ์ (Oxidized spot) ไม่มีลักษณะรมควันมากหรือน้อยเกินไป ไม่อ่อนหรือถูกความร้อน ไม่ทึบแสงหรือเป็นรอยไหม้ ยางต้องแห้งสะอาด แข็งแรง ไม่มีรอยเปราะเปื้อน
2. ยางแผ่นรมควันชั้น 1 (No. 1 RSS) ต้องไม่มีรา (ยกเว้นแผ่นยางที่ห่อหุ้ม) ไม่มีริ้วรอยหรือจุดที่ถูกออกซิไดซ์ (Oxidized spot) ไม่อ่อนหรือถูกความร้อน ไม่มีรมควันมากหรือน้อยเกินไป ไม่ทึบแสงหรือเป็นรอยไหม้ ยางต้องแห้งสะอาด แข็งแรง
3. ยางแผ่นรมควันชั้น 2 (No. 2 RSS) ต้องมีราสนิมและราแห้งไม่เกินร้อยละ 5 ของจำนวนมัดยาง มีฟองอากาศและเปลือกจากต้นยางเป็นชั้นเล็กๆกระจายเพียงเล็กน้อย ไม่มีลายเป็นทางหรือไม่อ่อนหรือถูกความร้อน ไม่มีรมควันมากหรือน้อยเกินไป ไม่มีวัหรือมีรอยไหม้ ยางต้องแห้ง สะอาด แข็งแรง ไม่เป็นแผลพุพอง ไม่มีสิ่งเจือปนอื่นๆนอกเหนือจากที่ระบุไว้ข้างต้น
4. ยางแผ่นรมควันชั้น 3 (No. 3 RSS) ต้องมีราสนิมและราแห้งไม่เกินร้อยละ 10 ของจำนวนมัดยาง สีของแผ่นยางมีลักษณะไม่ดำเล็กน้อย มีฟองอากาศและเปลือกต้นยางอยู่เล็กน้อย ไม่มีจุดที่ถูกออกซิไดซ์ (Oxidized spot) ไม่อ่อนหรือถูกความร้อน ไม่มีรมควันมากหรือน้อยเกินไป ยางต้องแห้ง แข็งแรง ไม่มีรอยเปราะเปื้อนเป็นแผลพุพอง ทรายหรือวัสดุอื่นนอกเหนือจากที่ระบุไว้ข้างต้น
5. ยางแผ่นรมควันชั้น 4 (No. 4 RSS) ต้องมีราสนิมและราแห้งไม่เกินร้อยละ 20 ของจำนวนมัดยาง มีเปลือกยางขนาดปานกลาง มีฟองอากาศและรอยดำ เหนียวเหนอะหนะเล็กน้อย มีการรมควันมากหรือน้อยเกินไปเพียงเล็กน้อย ไม่มีวัหรือไหม้ ยางต้องแห้งแข็งแรงปานกลาง มีรอยเปื้อน เป็นแผลพุพอง ไม่มีทรายหรือวัสดุอื่นเจือปนนอกเหนือจากที่ระบุไว้ข้างต้น
6. ยางแผ่นรมควันชั้น 5 (No. 5 RSS) ต้องมีราสนิมและราแห้งไม่เกินร้อยละ 30 ของจำนวนมัดยาง มีเปลือกยางขนาดใหญ่ มีฟองอากาศ แผลพุพอง รอยเปื้อน รมควันมากหรือน้อยเกินไป เหนียวเหนอะหนะเล็กน้อย ไม่อ่อนหรือถูกความร้อนหรือเป็นรอยไหม้ หรือมีจุดที่ถูกออกซิไดซ์ (Oxidized spot) หรือรอยพาดเป็นทาง ไม่มีวัสดุอื่นเจือปนนอกเหนือจากที่ระบุไว้ข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



อักษร N มาจาก *Normal-curing* ใช้เรียกเขม่าดำชนิดเฟอร์เนส (Furnace blacks) และเขม่าดำชนิดเทอร์มอล (Thermal blacks)

อักษร S มาจาก *Slow-curing* ใช้เรียกเขม่าดำชนิดชันแนล (Channel blacks) และเขม่าดำชนิดเฟอร์เนสที่ถูกออกซิไดซ์ (Oxidized furnace blacks)

ตารางที่ 2.2 การแบ่งเกรดโดยทั่วไปของเขม่าดำ [4]

Type	ASTM designation	Particle size (nm)	General use
SRF	N 762	61–100	Nontread components
GPF	N 660	49–60	Nontread components
FEF	N 550	40–48	Nontread components
FF	N 475	31–39	Nontread components
HAF	N 330	26–30	Tread and other components
ISAF	N 220	20–25	Tread
SAF	N 110	11–19	Tread

ตัวเลขหลักแรก แสดงถึง ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size) ตัวเลขน้อยใช้แทนอนุภาคขนาดเล็ก ตัวเลขมากใช้แทนอนุภาคขนาดใหญ่

ตัวเลขหลักที่ 2 และ 3 แสดงถึง โครงสร้าง (Structure) ตัวเลขน้อยใช้แทนเขม่าดำที่มีโครงสร้างน้อย ตัวเลขมากใช้แทนเขม่าดำที่มีโครงสร้างมาก การใช้ตัวเลขไม่มีหลักการที่แน่นอน (Arbitrary)

ชนิดของเขม่าดำแบ่งได้ดังนี้

### 1. เขม่าดำชนิดเฟอร์เนส (Furnace blacks)

ขบวนการเฟอร์เนสเป็นขบวนการต่อเนื่องขบวนการแรกสำหรับผลิตเขม่าดำในปี 1922 หลังจากนั้นปี 1948 จึงมีขบวนการออยล์-เฟอร์เนส (Oil-furnace) เกิดขึ้น โดยเป็นขบวนการที่ใช้ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) เป็นวัตถุดิบ ปัจจุบันเขม่าดำชนิดเฟอร์เนสทั้งหมดผลิตจากวัตถุดิบที่เป็นของเหลวอะโรมาติก (Liquid aromatic feedstock) ซึ่งได้จากการปิโตรเลียม (Petroleum fractionation) การกลั่นน้ำมันถ่านหิน (Coal tar distillate) หรือการแตกตัวเอทิลีน (Ethylene cracker) โดยจะให้ความร้อนเล็กน้อยแก่วัตถุดิบและเผาในเตาเผาบริเวณเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ที่อากาศไม่เพียงพอ ปฏิกิริยาจะถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench) ด้วยละอองน้ำ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขม่าดำจะถูกแยกออกจากของผสมไอน้ำและก๊าซในไซโคลอน (Cyclone) หรือเครื่องกรอง และสุดท้ายจะทำให้เป็นเม็ด เขม่าดำชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นก้อนกลมติดกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า แอ็กกรีเกต (Aggregates) มีโครงสร้าง (Structure) มาก ขนาดเล็กประมาณ 10-100 นาโนเมตร (nm) พื้นผิวของเขม่าดำเป็นกลางหรือด่างเล็กน้อย (pH ประมาณ 8)

## 2. เขม่าดำชนิดเทอร์มอล (Thermal blacks)

เขม่าดำชนิดเทอร์มอลเกิดจากขบวนการแตกตัว (Cracking) ของก๊าซธรรมชาติในเตาเผาที่ปราศจากอากาศ เขม่าดำชนิดนี้จะไม่ว่องไว มีขนาดใหญ่ประมาณ 100-500 นาโนเมตร ลักษณะเป็นก้อนกลม โครงสร้างน้อยและมีพื้นที่ผิวน้อย

## 3. เขม่าดำชนิดชันแนล (Channel blacks)

เขม่าดำชนิดชันแนลเตรียมได้จากการเผาไหม้บางส่วน (Partial combustion) ของก๊าซธรรมชาติที่ตะเกียงเผา (Burner) และเกิดเขม่าดำเกาะที่ผิวของท่อเหล็กที่เย็น เขม่าดำชนิดนี้จะมีความเป็นกรดมากกว่าเขม่าดำชนิดอื่นๆ (pH ประมาณ 5 เมื่อเทียบกับเขม่าดำชนิดเฟอร์เนสที่มี pH ประมาณ 6-10) เขม่าดำชนิดนี้เป็นสาเหตุให้เกิดการหน่วงปฏิกิริยาการเชื่อมโยง

## 4. เขม่าดำชนิดอื่นๆ

- เขม่าดำอะเซทิลีน (Acetylene blacks) เตรียมได้จากการสลายตัวทางความร้อน (Thermal decomposition) ของอะเซทิลีน มีสมบัติเด่นในด้านการนำไฟฟ้า (Electric conductivity) สูง ซึ่งมีประโยชน์มากในงานที่ต้องการความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง

- เขม่าดำชนิดเฟรม (Frame blacks) เตรียมได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) เขม่าดำชนิดนี้จะให้สมบัติการขึ้นรูปดี ปัจจุบันมีปริมาณการใช้แทนเขม่าดำชนิดเฟอร์เนสเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีโครงสร้างมาก

- เขม่าดำชนิดอิเล็กทริกอาร์ค (Electric Arc Blacks) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by product) จากการผลิตเขม่าดำอะเซทิลีนใน Electric arc

คุณภาพของเขม่าดำสามารถพิจารณาได้จากสมบัติดังนี้ ขนาดอนุภาค (และพื้นที่ผิว) การกระจายตัวของขนาดอนุภาค โครงสร้าง (Structure) (กลุ่มก้อนอนุภาค (Particle aggregate)) ความว่องไวที่พื้นผิว (Surface activity) (หมู่ฟังก์ชัน เช่น คาร์บอกซิล (Carboxyl) และคีโตน (Ketone)) สมบัติต่างๆ ของเขม่าดำแสดงในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 สมบัติต่างๆของเขม่าดำ [4]

ASTM designation	Iodine number	DBP	Compressed DBP	CTAB	Nitrogen absorption	Tint strength
N 110	145	113	98	126	143	124
N 115	160	113	96	128	145	123
N 121	121	132	112	121	132	121
N 220	121	114	100	111	119	115
N 231	121	92	86	108	117	117
N 234	120	125	100	119	126	124
N 299	108	124	105	104	108	113
N 326	82	72	69	83	84	112
N 330	82	102	88	82	83	103
N 339	90	120	101	93	96	110
N 347	90	124	100	87	90	103
N 351	68	120	97	73	73	100
N 375	90	114	97	96	100	115
N 472	250	178	114	145	270	—
N 550	43	121	88	42	42	—
N 630	36	78	62	35	38	—
N 660	36	90	75	36	35	—
N 762	27	65	57	29	28	—
N 772	30	65	58	33	32	—
N 990	—	43	40	9	6	—
N 991	—	35	38	8	7	—

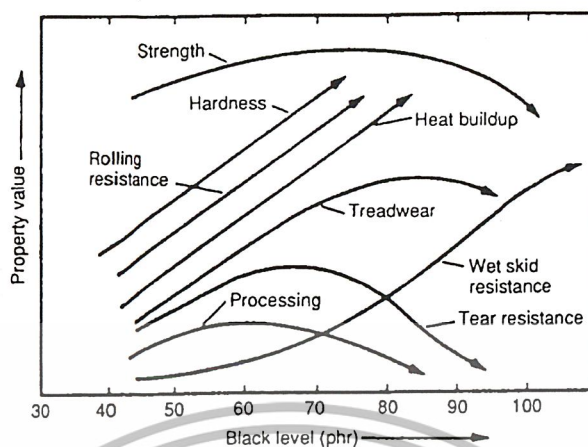
หมายเหตุ *Iodine number* คือ การวัดพื้นที่ผิว (ขนาดอนุภาค) ค่า *iodine number* มีค่ามากขึ้นขนาดอนุภาคจะมีขนาดเล็กลง

*DBP* คือ การวัดโครงสร้างหรือขนาดของกลุ่มก้อนเขม่าดำ ค่า *DBP* มีค่ามากขึ้นโครงสร้างจะมากขึ้น

*Tint* คือ ค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง

*CTAB* specific surface area measurement corrected for the effect of microspores

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ปริมาณของเขม่าที่มีผลต่อสมบัติยางผสมสูตร [4]

รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มโดยทั่วไปสำหรับการเติมเขม่าดำเกรดที่ใช้กับยางรถยนต์และผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของยางผสมสูตร เมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้น ความร้อนสะสม (Heat buildup) และความแข็งกด (Hardness) ในยางผสมสูตรจะเพิ่มขึ้น และในยางรถยนต์สมบัติความต้านทานการกรัด (Rolling resistance) และ สมบัติการเดินเมื่อเปียก (Wet skid properties) เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความแข็งแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) ความสามารถในการขึ้นรูป (Processability) ยางผสมสูตร และ ความต้านทานการเสียดสีขัดถู (Abrasion resistance) จะ มีสมบัติถึงจุดสูงสุดหลังจากนั้นสมบัติจะลดลง

#### 2.4 ซิลิกา (Silica) [4]

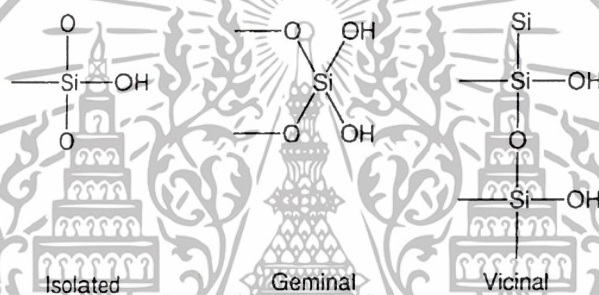
การเติมซิลิกาลงในยางผสมสูตรมีข้อดี คือ ปรับปรุงความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) ลดความร้อนสะสม (Heat buildup) และเพิ่มสมบัติยึดเกาะ (Adhesion) ในส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ ที่มีหลายองค์ประกอบ เช่น ยางรถยนต์ ขนาดอนุภาคสูงสุดและปริมาณน้ำของซิลิกามีผลต่อการนำไปใช้ในการผสมสูตรยาง ส่วนสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น pH องค์ประกอบทางเคมี และการดูดซับน้ำมัน (Oil adsorption) มีความสำคัญรองลงมา

##### ลักษณะทางเคมีของซิลิกา มีดังนี้

1. ซิลิกาที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ประกอบด้วยซิลิกอน (Silicon) และออกซิเจน จะเรียงตัวเป็นโครงสร้างเตตระฮีดรัล (Tetrahedral) ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1-10 นาโนเมตร (nm) และมีพื้นที่ผิว 20-300 m<sup>2</sup>/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความหนาแน่นของหมู่ไฮดรอกซิล (silanol) ที่ผิวหน้า (หมู่ไฮดรอกซิล - Si - O - H) มีผลต่อคิกริชของน้ำที่ผิวหน้า (Degree of surface hydration)
3. แบ่งชนิดของหมู่ไฮดรอกซิลออกเป็น 3 แบบ คือ Isolated Geminal (หมู่ไฮดรอกซิล - OH 2 หมู่บนอะตอมซิลิกอนอะตอมเดียวกัน) และ Vicinal (อะตอมซิลิกอนอยู่ติดกัน) ดังรูปที่ 2.4
4. ความเป็นกรด (Acidity) ที่ผิวหน้าจะถูกควบคุมด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวหน้าของซิลิกา ความเป็นกรดของซิลิกามีผลต่อปฏิกิริยาการเชื่อม โยง
5. น้ำที่ผิวหน้าซึ่งเกิดจากการดูดซับไอน้ำของซิลิกาจะมีผลต่อปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวหน้า ถ้ามีปริมาณน้ำมากสามารถเกิดผลเสียต่อสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมสุดท้าย



รูปที่ 2.4 ชนิดของหมู่ไฮดรอกซิลในซิลิกา [4]

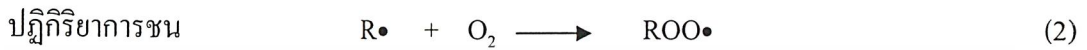
โดยทั่วไปซิลิกาจะเป็นสารเสริมแรงที่ดีในยางที่มีขี้ เช่น ยางเอ็นบีอาร์ (NBR) และยางซีอาร์ (CR) มากกว่าที่ไม่มีขี้ เช่น ยางเอสบีอาร์ (SBR) และยางธรรมชาติ สมบัติการเสริมแรงของซิลิกาในยางธรรมชาติและยางเอ็นบีอาร์สามารถปรับปรุงได้โดยการใช้สารประกอบซิลเลน (Silane coupling agent) การใช้ซิลิกาในการผสมสูตรยางจะให้ข้อดี 2 ข้อ คือ ลดความร้อนสะสมเมื่อใช้แทนเขม่าดำในปริมาณที่เท่ากัน และปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) และความต้านทานการตัดและขีด

## 2.5 สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) [5]

ยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสลายได้เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน การเสื่อมสลายของยางนี้เรียกว่า Degradation สารเคมีที่ช่วยป้องกันไม่ให้ยางเสื่อมสลายเรียกว่า แอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันในยางเป็นปฏิกิริยาแบบออกโต้ ออกซิเดชัน (Autoxidation) คือผลผลิตจากการออกซิเดชันจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันเร็วขึ้น กลไกการเกิดปฏิกิริยาการออกซิเดชันของพอลิเมอร์เป็นดังนี้



ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของยางเป็นดังนี้

- ขบวนการต่อเนื่องเป็นลูกโซ่
- ในแต่ละปฏิกิริยาการชน จะเกิดเป็นหนึ่งโมเลกุลของไฮโดรเปอร์ออกไซด์เสมอ และตัวนี้เองจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระต่อไปในปฏิกิริยาที่ 4

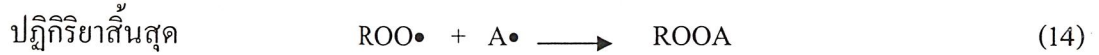
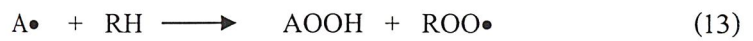
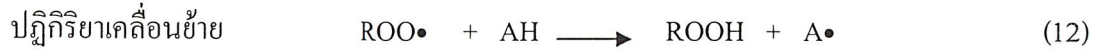
- ปฏิกิริยาสิ้นสุดอาจก่อให้เกิดการเชื่อมโยง ดังปฏิกิริยาที่ 8

โดยทั่วไปจะต้องลดการเกิดออกโต้ ออกซิเดชันของยางให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งการทำเช่นนี้มี 2 วิธี คือ

- ทำลายไม่ให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ สารเคมีที่ใช้เรียกว่า Chain-breaking antioxidant
- ป้องกันไม่ให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นในระยะเริ่มต้น สารเคมีที่ใช้เรียกว่า Preventive antioxidant ซึ่งสารประเภทนี้มีหลายตัว เช่น สารสลายตัวไฮโดรเปอร์ออกไซด์ สารจับอนุมูลอิสระ (Chelating agent) สารกันแสงอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น

ถ้าสมมติให้แอนติออกซิเดนต์ที่มีสูตรย่อเป็น AH RH เป็นสูตรย่อของยาง ปฏิกิริยาที่แอนติออกซิเดนต์ทำให้ปฏิกิริยาลูกโซ่ในการออกซิเดชันของยางยุติลงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

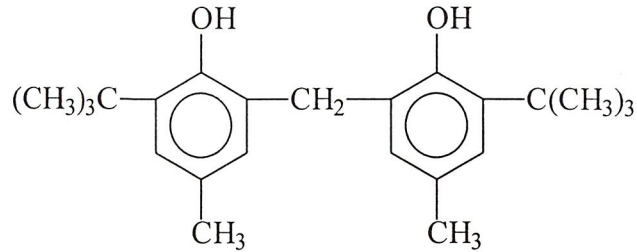


ปฏิกิริยาที่ (11) แสดงถึงปฏิกิริยาที่ AH เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการออกซิเดชันได้ ส่วนปฏิกิริยาที่ (12) แสดงถึงปฏิกิริยาที่ AH ทำปฏิกิริยากับ ROO เร็วกว่าปฏิกิริยาที่ (3) และถ้าปฏิกิริยาที่ (13) ดำเนินไปอย่างช้าๆ แล้วตัว AH เองจะเป็นตัวต้านการออกซิเดชันได้ ปฏิกิริยาที่ (14) และ (15) แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาที่ทำให้อนุมูลอิสระหมดไป นั่นคือปฏิกิริยาถูกโซ่ในการออกซิเดชันยุติไปด้วย ตัวออกซิเดนต์ที่อาจจะทำปฏิกิริยาแบบใดแบบหนึ่งหรือทุกแบบที่ทำให้การออกซิเดชันของยางช้าลงได้

การแบ่งชนิดของแอนติออกซิเดนต์จะแบ่งตามสูตรทางเคมีเป็น 3 ชนิด คือ สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์ สารประกอบฟีนอลและอนุพันธ์ และอนุพันธ์อิมิดาซอล (Imidazolyl derivative) ข้อแตกต่างระหว่างสารแอนติออกซิเดนต์สองชนิดแรก คือ สารประกอบเอมีนและอนุพันธ์ของมัน เป็นพวกอะโรมาติกเอมีน จะทำให้ยางมีสีคล้ำและตกสี (Stain) ส่วนสารประกอบฟีนอลเป็นแบบไม่ตกสี (Non-staining)

ตัวอย่างสารแอนติออกซิเดนต์ เช่น 2,2-methylene-bis-(4-methyl-6-tert-butylphenol) (รูปที่ 2.5) ชื่อทางการค้า คือ Antigene<sup>®</sup> MDP ของ Sumitomo Vulkanox<sup>®</sup> BKF ของ Bayer Antioxidant 2246 ของ Anchor มีลักษณะเป็นผงสีขาวจนถึงครีมและเทา น้ำหนักโมเลกุล 340.51 จุดหลอมเหลว 120°C (ต่ำสุด) ความถ่วงจำเพาะ 1.08 ไม่ตกสี ทนทานต่อความร้อน ทนทานต่อการหักงอ ไม่เปลี่ยนแปลงสีของยาง แต่ถ้ายางเป็นสีขาวการนำยางไปถูกแสงแดดนานๆ จะทำยางเปลี่ยนเป็นสีชมพูได้ ปริมาณแอนติออกซิเดนต์ที่ใช้ 0.5-2 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ 2,2-methylene-bis-(4-methyl-6-tert-butylphenol)

## 2.6 น้ำมันช่วยผสม (Processing oil) [4]

น้ำมันช่วยผสมจะช่วยให้กระบวนการผลิตง่ายขึ้น มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยในการกระจายตัวของสารเติมแต่งต่างๆ ในยาง เพิ่มความสม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกัน น้ำมันจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลักๆ คือ พาราฟินิก (Paraffinic) แนฟทาติก (Naphthanic) และอะโรมาติก (Aromatic) การเลือกชนิดของน้ำมันเป็นสิ่งสำคัญ ถ้าน้ำมันไม่สามารถผสมเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี น้ำมันจะไปอยู่ที่ผิวของของผสมส่งผลให้สมบัติทางกายภาพที่ต้องการลดลง สมบัติที่ผิวหน้าขององค์ประกอบในยางลดลง และการยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างองค์ประกอบลดลง เช่น ในยางรถยนต์ ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพของน้ำมันทั้ง 3 ชนิด

จุดแอนิลิน (Aniline point) เป็นการวัดความเป็นอะโรมาติก (Aromaticity) ของน้ำมัน โดยเป็นจุดที่น้ำมันสามารถละลายรวมเป็นเนื้อเดียวในแอนิลินได้ ดังนั้นจุดแอนิลินต่ำแสดงว่ามีปริมาณอะโรมาติกมาก ซึ่งน้ำมันทั้ง 3 ชนิดนี้มีโครงสร้างอะตอมคาร์บอนที่เป็นวง (Cyclic carbon structure) สูง แต่จะแตกต่างกันที่ปริมาณวงที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ดังนี้

- น้ำมันอะโรมาติก (Aromatic oil) มีปริมาณวงที่ไม่อิ่มตัว วงแนฟทาติกที่อิ่มตัวและหมู่ห้อยจำพวกอัลคิล (Pendant alkyl) และสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวสูง โครงสร้างส่วนใหญ่จะเป็นอะโรมาติก

- น้ำมันแนฟทาติก (Naphthanic oil) จะมีปริมาณวงที่อิ่มตัว (แนฟทาติก) สูง และวงที่ไม่อิ่มตัวเล็กน้อย

- น้ำมันพาราฟินิก (Paraffinic oil) มีปริมาณวงแนฟทาติกสูง แต่มีปริมาณหมู่ห้อยจำพวกอัลคิล (Pendant alkyl) สูง ซึ่งเป็นหมู่ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว และที่สำคัญจะมีหมู่แนฟทาติกต่อโมเลกุลต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางกายภาพของน้ำมัน 3 ชนิดที่ใช้ในอุตสาหกรรมยาง [4]

Physical property	ASTM methods	Paraffinic	Naphthanic	Aromatic
Specific gravity	D1250	0.85–0.89	0.91–0.94	0.95–1.0
Pour point (° F)	D97	0.0 to +10	–40 to +20	+40 to +90
Refractive index	D1747	1.48	1.51	1.55
Aniline point	D611	200–260	150–210	95.0–150.0
API gravity	D287	28.0–34.0	19.0–28.0	10.0–19.0
Molecular weight	D2502	320–650	300–460	300–700
Aromatic content (%)		15.0	44.0	68.0

## 2.7 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) [4]

น้ำมันช่วยผสม แก๊ซและกรดไขมันสามารถใช้เป็นพลาสติไซเซอร์ได้ ในอุตสาหกรรมยาง พลาสติไซเซอร์จะเป็นสารประเภทเอสเทอร์ (Esters) น้ำมันสน (Pine tar) และพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

พทาเลต (Phthalates) เป็นเอสเทอร์ที่นิยมใช้กันมาก ไดบิวทิลพทาเลต (Dibutylphthalate; DBP) จะทำให้ได้ของผสมที่มีความนุ่มและมีสมบัติเหนียวติด (Tack) ไดออกทิลพทาเลต (Diocetylphthalate; DOP) มีการระเหยต่ำและมีแนวโน้มทำให้ของผสมมีความแข็งมากขึ้น เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลสูง เอสเทอร์ที่เป็นพอลิเมอร์ เช่น พอลิพรอพิลีนอะดิเปต (Polypropylene adipate; PPA)

น้ำมันสนสามารถเข้ากับยางธรรมชาติได้ดี ทำให้มีการกระจายตัวของสารตัวเติมดีและสมบัติของของผสมดีขึ้น เช่น ความต้านทานการฉีก (Fatigue resistance) และการยึดเกาะ (Adhesion) ระหว่างองค์ประกอบ นอกจากนี้พลาสติไซเซอร์ที่มีการใส่ในปริมาณที่น้อย คือ เกลือของกรดไขมัน เช่น ซิงค์สเตียเรต (Zinc stearate) พอลิพรอพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และออร์แกนอซิลเลน (Organosilane) เช่น ไดเมทิลพอลิซิล็อกเซน (Dimethylpolysiloxane)

## 2.8 กำมะถัน (Sulfur) [3]

กำมะถันเป็นสารเชื่อมโยง (Vulcanizing agent) ที่สำคัญสำหรับยาง การเตรียมยางที่อ่อนนุ่มจะใช้กำมะถัน 0.25-5 phr สำหรับยางแข็ง (อีโบไนท์; Ebonite) จะใช้ปริมาณกำมะถัน 25.0-40.00 phr กำมะถันแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

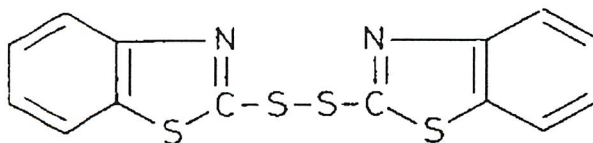
1. **กำมะถันชนิดละลาย (Soluble sulfur)** เป็นผงสีเหลือง ความหนาแน่น 2.07 g/cm<sup>2</sup> เป็นกำมะถันรูปผลึกรอมบิก (Rhombic) กำมะถันชนิดนี้สามารถละลายได้ในยางธรรมชาติถึง 2.0 phr ถ้าใส่ในปริมาณที่มากกว่านี้ จะใช้กำมะถันชนิดที่ไม่ละลาย (Insoluble sulfur) แทนเพื่อป้องกันการแพร่ของกำมะถันออกมาสู่ผิวหน้าของของผสม เช่น การบลูมของกำมะถัน (Sulfur bloom)

2. **กำมะถันชนิดไม่ละลาย (Insoluble sulfur)** เป็นรูปกำมะถันหลายๆ หน่วยมาต่อกัน มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลในช่วงกว้าง 100,000-300,000 ที่อุณหภูมิการเชื่อมโยงกำมะถัน จะเกิดการดีพอลิเมอร์ไรส์ (Depolymerized) เปลี่ยนกลับไปเป็นกำมะถันรูปผลึกรอมบิกได้ กำมะถันชนิดนี้จะสามารถเปลี่ยนเป็นกำมะถันรูปผลึกรอมบิกได้ถ้าเก็บที่อุณหภูมิสูงกว่า 40°C

3. **กำมะถันชนิดคอลลอยด์ (Colloidal sulfur)** กำมะถันชนิดนี้จะมีขนาดอนุภาคที่เท่าๆ กัน ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการผสมสูตรน้ำยางขึ้น แต่จะมีความสำคัญเพียงเล็กน้อยในยางที่อยู่ในรูปของแข็ง

## 2.9 สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง (Accelerator) [4]

สารเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยง เป็นสารที่เพิ่มอัตราการเชื่อมโยงด้วยกำมะถันในยางผสมสูตร และความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density) สารเร่งที่ใช้ปริมาณมากกว่าจะเป็นสารเร่งหลักหรือสารเร่งปฐมภูมิ (Primary accelerator) ส่วนสารเร่งที่ใช้น้อยกว่าจะเป็น สารเร่งทุติยภูมิ (Secondary accelerator) สารเร่งทุติยภูมิเมื่อเติมลงไปพร้อมกับสารเร่งปฐมภูมิจะเกิดปฏิกิริยาเสริมกันที่เรียกว่า ปราบกฏการณ์ซินเนจิสติก (Synergistic effect) ทำให้ได้อัตราการเชื่อมโยงที่มากกว่า สารเร่งแต่ละชนิดรวมกัน ตัวอย่างเช่น เมอแคปโทเบนโซไทอาโซลไดซัลไฟด์ (Mercaptobenzothiazole disulfide; MBTS) และเตตระเมทิลไทูรามไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuramdisulfide; TMTD) โครงสร้างของสารเร่งทั้งสองชนิดนี้แสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเมอแคปโทเบนโซไทอาโซลไดซัลไฟด์ (MBTS) [3]

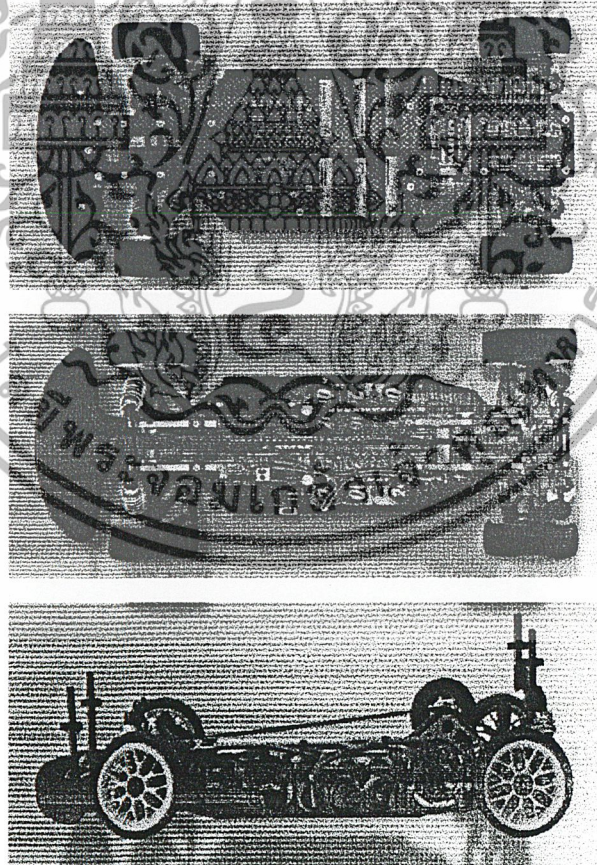
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คลื่นความถี่วิทยุ (Radio Modulation) วิทยุบังคับที่ใช้กับรถบังคับวิทยุปัจจุบันนิยมใช้กัน 2 ความถี่ คือ คลื่นความถี่เอเอ็ม (Amplitude Modulation; AM) และคลื่นความถี่เอฟเอ็ม (Frequency Modulation; FM)

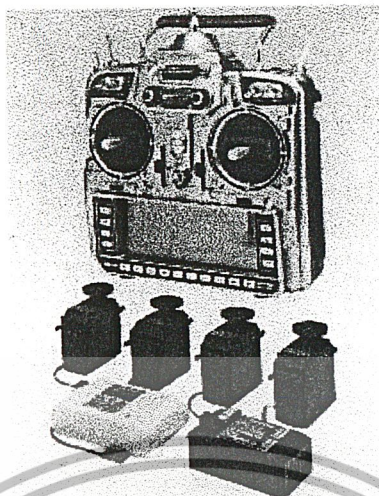
ชุดอุปกรณ์มาตรฐานของวิทยุบังคับ ในวิทยุบังคับชุดมาตรฐานจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนด้วยกัน คือ ตัววิทยุ(รวมภาคส่งสัญญาณ) ภาครับสัญญาณ (Radio Receivers (Rx)) SERVO และแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

แบบของวิทยุบังคับ วิทยุบังคับที่นิยมใช้มีด้วยกัน 2 แบบ คือ วิทยุบังคับแบบไกปืน (Pistol-grip radios) และวิทยุบังคับแบบคันโยก (Stick type) วิทยุแบบไกปืนนิยมใช้กับรถ เรือ โดยมากมักจะมี 2 ช่องควบคุม (2 Channel) คือ เลี้ยว (ซ้ายหรือขวา) และเร่งหรือเบรค (เบรค) วิทยุแบบคันโยกใช้กับแบบจำลองวิทยุบังคับ (R/C Model) ได้ทุกแบบทั้งรถ เรือ เครื่องบิน เฮลิคอปเตอร์ และมีช่องสัญญาณควบคุมตั้งแต่ 2 - 10 ช่องควบคุม (Channel) ดังแสดงในรูปที่ 2.10

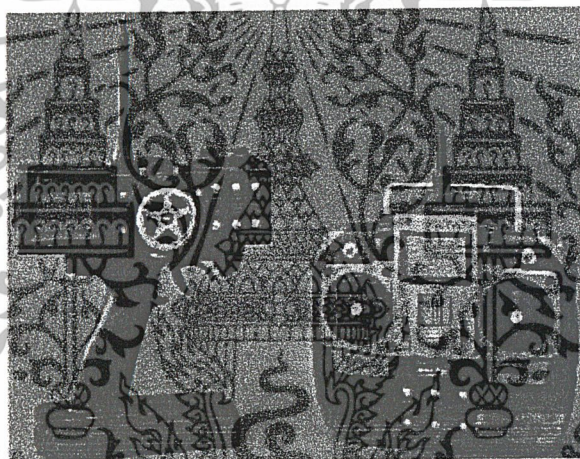


รูปที่ 2.8 ลักษณะรถบังคับวิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ชุดอุปกรณ์มาตรฐานของวิทยุบังคับ

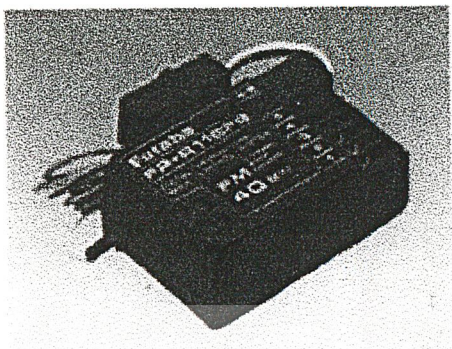


รูปที่ 2.10 แบบของวิทยุบังคับ

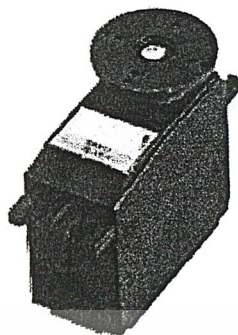
ภาครับวิทยุ (Receiver) จะเป็นส่วนที่อยู่ในตัวรถ คอยรับสัญญาณที่ส่งมาจากวิทยุ แล้วแปลงสัญญาณเป็นคำสั่งส่งไปยัง Servo เพื่อให้ทำงานถูกต้องตามที่ผู้บังคับวิทยุต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.11

Servo เป็นระบบมอเตอร์หมุนตามองศาที่ได้รับคำสั่งจากภาครับวิทยุ ซึ่งแปลงสัญญาณมาจากภาคส่งของวิทยุอีกทีหนึ่ง Servo มีหลายขนาดและหลายแรงจูด (ลาก) ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ส่วนภาครับวิทยุ



รูปที่ 2.12 ส่วนของ Servo

แบตเตอรี่ เป็นตัวเก็บพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาครับวิทยุและ Servo ในตัวรถ และแบตเตอรี่ที่ใช้กับแบบจำลองวิทยุบังคับ (R/C Model) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถนำมาประจุไฟฟ้าใหม่ได้ การเลือกขนาดความจุของไฟฟ้าในตัวแบตเตอรี่อย่างมาก ก็ทำให้เวลาในการใช้งานนานขึ้น แต่ราคาก็สูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.13

รูปที่ 2.13 ส่วนของแบตเตอรี่

ล้อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 65 มิลลิเมตร (mm) หนา 2.18 มิลลิเมตร หน้ายางกว้าง 24.40 มิลลิเมตร

ยางล้อรถบังคับวิทยุที่ดีควรมีสมบัติ ดังนี้

1. เกาะถนน มีสมบัติเหนียวติด (Tack) ดี ไม่ลื่นไถลเมื่อวิ่งหรือเลี้ยวโค้งด้วยความเร็วสูง
2. ทนต่อการเสียดสีขัดถู (Abrasion resistance)
3. มีสมบัติเชิงกลดี ไม่ขาดง่าย มีความแข็งแรงฉีกขาด (Tear strength) สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) ชนิดยางแผ่นรมควันชั้น 2 (2-Grade Ribbed Smoke Sheet; RSS) จากส่วนอุตสาหกรรมยาง สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ สมบัติบางประการของยางธรรมชาติที่ใช้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของยางธรรมชาติชนิดยางแผ่นรมควันชั้น 2 ที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	ค่า
ปริมาณสิ่งสกปรก (Dirt) (%wt)	0.015
ปริมาณเถ้า (Ash) (%wt)	0.15
ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter; V.M.) (% wt)	0.42
ปริมาณไนโตรเจน (N <sub>2</sub> ) (%wt)	0.34
ค่าความอ่อนตัวของยางที่ไม่ผ่านการอบ (Plasticity; P <sub>0</sub> )	38.67
ดัชนีความอ่อนตัว (Plasticity Retention Index; PRI)	92.22
ค่าความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) (ML 1+4, 100 °C)	35.67

หมายเหตุ ข้อมูลจากสถาบันวิจัยยาง

2. ยางพอลิบิวตะไดอินหรือยางปียอร์ (Polybutadiene rubber; BR) เกรด UBEPOL-BR150 บริษัท ยางสังเคราะห์ไทย จำกัด สมบัติบางประการของยางปียอร์แสดงในตารางที่ 3.2

3. ยางพอลิบิวทีนเหลว (Liquid polybutene rubber) เกรด PB2400 บริษัท Daelim Industrial Co., Ltd. สมบัติบางประการแสดงในตารางที่ 3.3

4. เขม่าดำ (Carbon black) เกรด N-220

5. ซิลิกา (Silica)

6. สารแอนติออกซิแดนท์ (Antioxidant) 22-cp-46

7. น้ำมันเนฟทานิก (Naphthanic oil)

8. PEG400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. กำมะถัน (Sulfur)
10. ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide; ZnO)
11. กรดสเตียริก (Stearic acid)
12. เมอแคปโทเบนโซไทอาโซลไดซัลไฟด์ (Mercaptobenzothiazole disulfide; MBTS)
13. เตตระเมทิลไทูรามไดซัลไฟด์ (Tetramethylthiuramdisulfide; TMTD)

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของยางบีดาร์ที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ	หน่วย	ค่า	มาตรฐาน ที่ใช้ทดสอบ
ความหนืดมูนนี่ของยางดิบ (ML 1+4, 100°C)	-	43	ASTM D1646
ปริมาณสารที่ระเหย	wt%	0.36	ASTM D1416
ปริมาณเถ้า	wt%	0.03	ASTM D1416
ความหนืดมูนนี่ของยางผสมสูตร (ML 1+4, 100°C)	-	60	ASTM D1646
มอดูลัสที่ 300 % (145°C x 35 mins.)	MPa	11.4	ASTM D412
ความแข็งแรงดึงสูงสุด (145°C x 35 mins.)	MPa	17.1	ASTM D412
การดึงยืด (145°C x 35 mins.)	%	398	ASTM D412

หมายเหตุ \* ยางผสมสูตรตามมาตรฐาน ASTM D3189 (IRB#7) ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 สมบัติทางประการของยางพอลิบิวทีนเหลวที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติ		หน่วย	ค่ามาตรฐาน	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ
สมบัติ ทางกายภาพ	น้ำหนักโมเลกุล	Mn	2450	ASTM D3592
	ความหนืด	cSt (100°C)	4700 ±200	ASTM D445
	จุดวาบไฟ	Min. °C	240	ASTM D92
	pour point	°C	17±5	ASTM D97
	SP.GR	(25/25°C)	0.905	ASTM D1963
	Color (Apha)	Max	50	ASTM D1209
	Loss on heating	Max. wt%	0.20	KS C2101
สมบัติ ทางเคมี	Acid value	Max. mgKOH/g	0.01	ASTM D947
	Total sulfur	Max. wt-ppm	1	ASTM D2785
สมบัติ ทางไฟฟ้า	Power factor	Max. 80°C %	0.005	ASTM D924
	Resistivity	Min. 80°C Ω cm	2 x 10 <sup>15</sup>	ASTM D257
	Dielectric constant	Min. 80°C	2.20	ASTM D924
	Dielectric breakdown	Min.KV/2.5 mm	50	ASTM D149

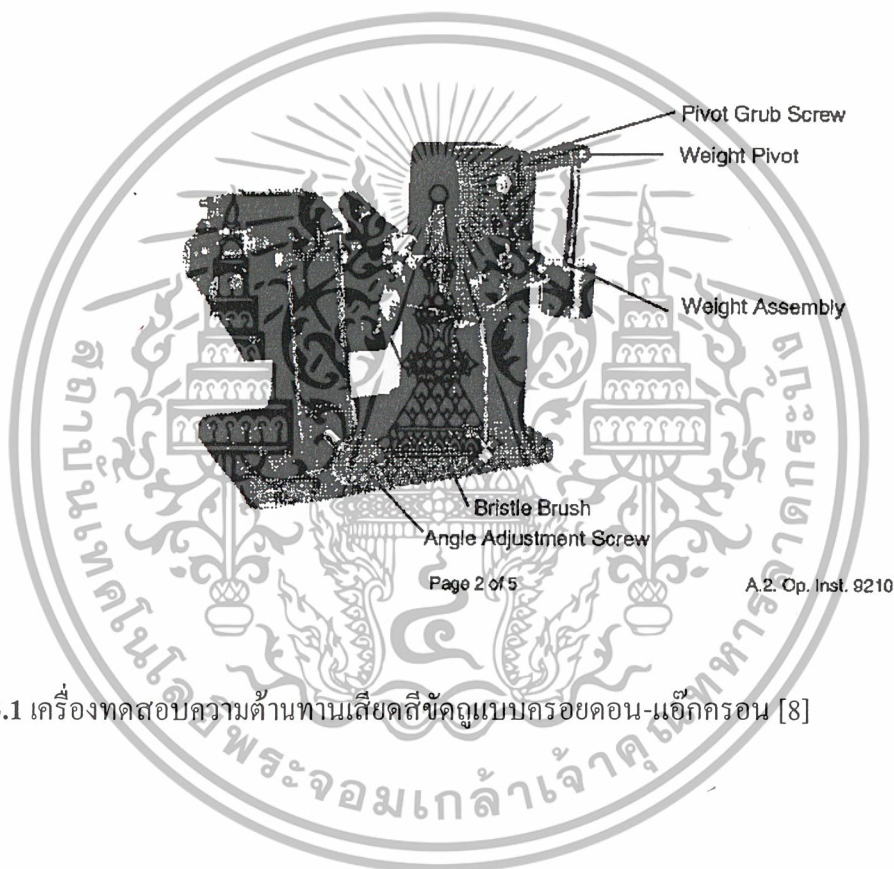
หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) บริษัท แลบเทคเอนจิเนียริง จำกัด
2. เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscometer) บริษัท Shimadzu จำกัด รุ่น SMV-201
3. เครื่องวัดสมบัติการคงรูปของยาง (Rotorless Moving Die Rheometer หรือ Curelaster<sup>®</sup>) บริษัท Nichigo Shoji Co., Ltd. รุ่น II F150
4. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding machine)
5. เครื่องอัดแรงดันลม
6. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal tester) บริษัท Intro LLOYD Instruments จำกัด

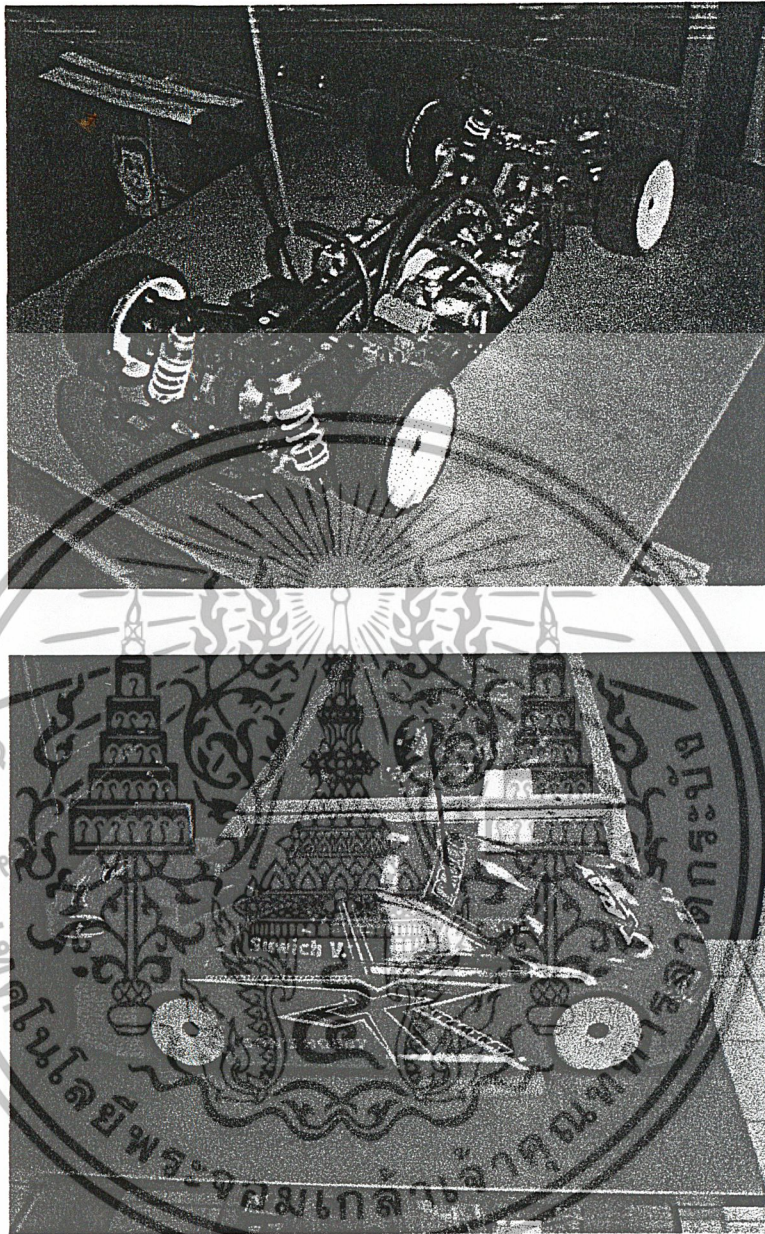
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เครื่องทดสอบความต้านทานเสียดสีชนิดลู่วิ่งแบบครอยดอน-แอ็กครอน (Croydon-Akron Abrasion Tester) (รูปที่ 3.1)
8. เครื่องทดสอบความแข็งกดแบบชอร์เอ (Hardness tester, Shore A) บริษัท Yasuda Seiki Seisakusho Ltd.
9. รถบังคับวิทยุ (Radio Control Car; R/C car) รุ่น XRAY T1 EV02 บริษัท XRAY Model Racing Car. (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบความต้านทานเสียดสีชนิดลู่วิ่งแบบครอยดอน-แอ็กครอน [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 รถบังคับวิทยุ (Radio Control Car; R/C car) รุ่น XRAY T1 EV02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การผสมสูตรยางและการทดลอง

1. ตัดและชั่งยาง รวมทั้งสารเคมีต่างๆตามตารางที่ 3.4 โดยเพิ่มน้ำหนักเพื่อให้ได้ยางผสมสูตรตามอัตราส่วนที่ต้องการ (ประมาณ 400 กรัม)

ตารางที่ 3.4 สูตรผสมยางในการทดลอง

สาร	ปริมาณ (phr)
ยางธรรมชาติ (NR) / ยางพอลิบิวตะไดอิน (BR)*	30/70, 50/50, 70/30
ยางพอลิบิวทีนเหลว*	0, 5, 7, 10
เซม่าดำ	50
ซีลิกา*	0, 10
สารแอนติออกซิแดนท์ 22-cp-46	1
น้ำมันแนฟทานิก	10
PEG 400	1
กำมะถัน	2
ซิงค์ออกไซด์	5
กรดสเตียริก	2
เอ็มบีทีเอส (MBTS)	1
ทีเอ็มทีดี (TMTD)	0.5

หมายเหตุ \* ปัจจัยที่ศึกษา

2. ใส่ยางธรรมชาติในเครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง ทำการกรีดพับยางจนกระทั่งยางนิ่ม จะใช้เวลาประมาณ 10 นาที

3. ทำการใส่ยางบีอาร์ลงไปผสม ทำการกรีดพับยางจนกระทั่งยางทั้งสองชนิดผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จะใช้เวลาประมาณ 3 นาที

4. ทำการใส่สารเติมแต่งต่างๆ ยกเว้น กำมะถัน ซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก MBTS และ TMTD โดยจะค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกลิ้ง และทำการกรีดและพับยาง (Cut-and-fold) ขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 9-10 นาที แล้วรีดยางออกเป็นแผ่นหนาประมาณ 3-5 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตัดแผ่นยางผสมสูตรเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 2x2 นิ้ว จำนวน 2 แผ่น นำไปวัดความหนืดแบบมูนนี่ (Mooney viscosity) โดยใช้เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ กำหนดอุณหภูมิการวัดความหนืดที่ 100°C โดยหาค่าความหนืด ML 1+4 (100°C) ของยางผสมสูตรก่อนการเชื่อมโยง

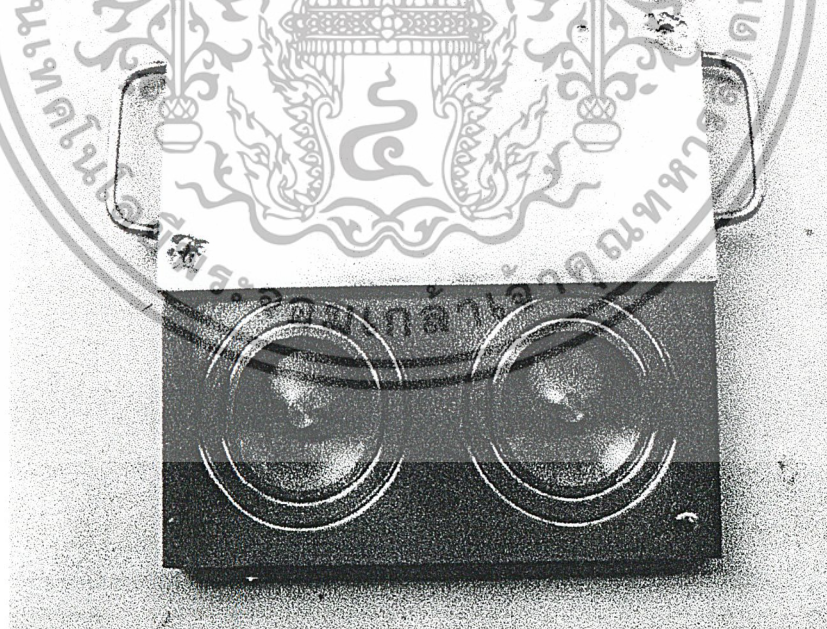
6. เมื่อตัดตัวอย่างยางเพื่อใช้ทดสอบความหนืดแบบมูนนี่แล้ว จึงใส่สารที่เหลือทั้งหมดโดยค่อยๆ ใส่ระหว่างลูกกลิ้ง ทำการผสมโดยกรีดและพับยางต่อ ขั้นตอนนี้จะใช้เวลาประมาณ 7-8 นาที

7. ปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งประมาณ 3-4 มิลลิเมตร แล้วกรีดแผ่นยางออกจากลูกกลิ้ง

8. ตัดแผ่นยางผสมสูตรเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 2x2 นิ้ว จำนวน 1 แผ่น แล้วนำไปทดสอบลักษณะการเชื่อมโยง (Cure characteristic) ด้วยเครื่อง Curelaster<sup>®</sup> ที่อุณหภูมิ 150°C

9. ตัดแผ่นยางผสมสูตรใส่แม่แบบ (ประมาณ 120x120x3 มิลลิเมตร) แล้วนำแม่แบบใส่เครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C

10. ตัดแผ่นยางผสมสูตรใส่แม่แบบ (รูปที่ 3.3) สำหรับการทดสอบความต้านทานการเสียดสีขัดถู แล้วนำแม่แบบใส่เครื่องอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 150°C



รูปที่ 3.3 แม่แบบสำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบความต้านทานการเสียดสีขัดถู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การศึกษาสมบัติของยาง

#### 1. สมบัติเชิงกล

ใช้เครื่องอัดแรงดันลมตัดแผ่นยางเชื่อมโยงเป็นรูปดัมเบลล์ แล้วทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง เพอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และมอดุลัส ตามมาตรฐาน ASTM D638 ที่อัตราเร็วการดึง (Test speed) 500 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) ทำการทดสอบโดยใช้ชิ้นงานตัวอย่าง 8 ชิ้น

#### 2. ความแข็งกด (Hardness)

นำแผ่นยางเชื่อมโยงที่เหลือจากการตัดเป็นรูปดัมเบลล์ไปทดสอบความแข็งกดด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ ชอร์เอ (Durometer แบบ Shore A) โดยวางชิ้นงานซ้อนกันให้มีความหนาไม่ต่ำกว่า 6 มิลลิเมตร ทำการวัดความแข็งที่จุดต่างๆ ให้ได้ค่าอย่างน้อย 8 ค่า นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย

#### 3. ความต้านทานการเสียดสีขัดถู (Abrasion resistance)

การทดสอบความต้านทานการเสียดสีขัดถูของยาง เป็นการขัดสีบนผิวของยาง คือ เมื่อผิวหน้าของยางสัมผัสกับผิวของวัตถุอื่นๆ ในขณะที่มีแรงอัดอยู่ด้วย ก็จะให้เกิดการสึกหรอของผิวหน้า ดังนั้นการวัดการสึกหรอของยางจึงใช้การวัดปริมาตรของยางที่ถูกขัดสีออกไปจากเนื้อผิวของตัวอย่างยาง ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบที่กำหนดไว้ โดยนำชิ้นงานตัวอย่างสำหรับทดสอบความต้านทานการเสียดสีขัดถู (รูปที่ 3.4) ขัดกับล้อหินขัดซึ่งกดติดกับชิ้นงานตัวอย่าง และกำหนดระบบของจำนวนรอบที่ต้องใช้ในการทดสอบครั้งหนึ่งๆ หาค่าของชิ้นงานตัวอย่างที่หายไปต่อการขัด 1,000 รอบ

#### วิธีการทดสอบ

1. ชั่งน้ำหนักและหาความหนาแน่นของชิ้นงาน
2. นำชิ้นงานมาใส่ในเครื่องทดสอบความต้านทานเสียดสีขัดถูแบบครอยคอน-แอ็กครอน ปรับจำนวนรอบให้เท่ากับศูนย์ ยกค้อนถ่วงน้ำหนักขึ้น นำตัวล้อออกเพื่อให้แท่งหินสัมผัสกับชิ้นงาน กดสวิทช์เพื่อหมุนชิ้นงาน
3. ขัดชิ้นงาน 500 รอบ แล้วนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่หายไป

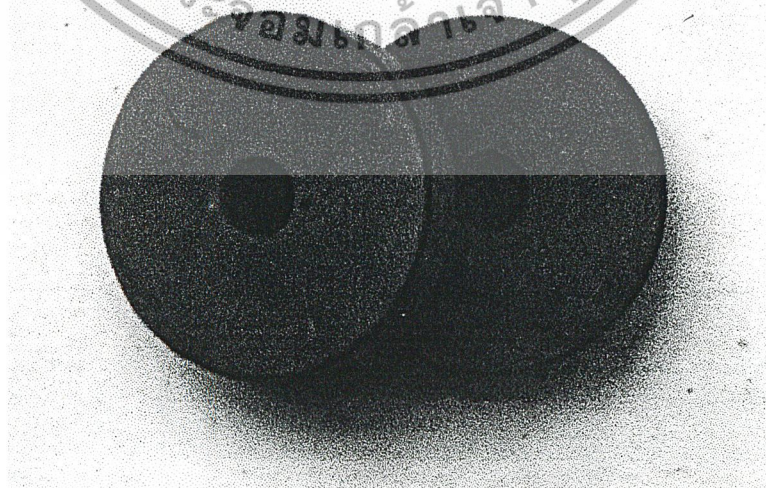
4. เติบนำหนักที่หายไปกับตารางเพื่อหา Running in และ Test run

น้ำหนักที่หายไปเมื่อทำการขัดชิ้นงาน 500 รอบ	Running in	Test run
0.05-0.10	4,000	1,000
0.10-0.20	2,000	500
0.20-0.40	750	250
> 0.40	500	125

5. นำชิ้นงานทดสอบ ไปขัดตามจำนวนรอบที่ได้จาก Running in แล้วนำมาชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
6. นำชิ้นงานทดสอบ ไปขัดตามจำนวนรอบที่ได้จาก Test run แล้วนำมาชั่งน้ำหนักและบันทึกผล
7. ซ้ำตามข้อ 6 อีก 4 ครั้ง
8. ทำการทดสอบซ้ำ โดยยัง 1 สูตร ทำการทดสอบ 2 ตัวอย่าง

การคำนวณ

$$\text{ปริมาตรที่หายไป (cm}^3\text{)/1000 รอบ} = \frac{\text{ปริมาตรที่หายไปหลัง Test run} * 1000}{\text{Test run}}$$

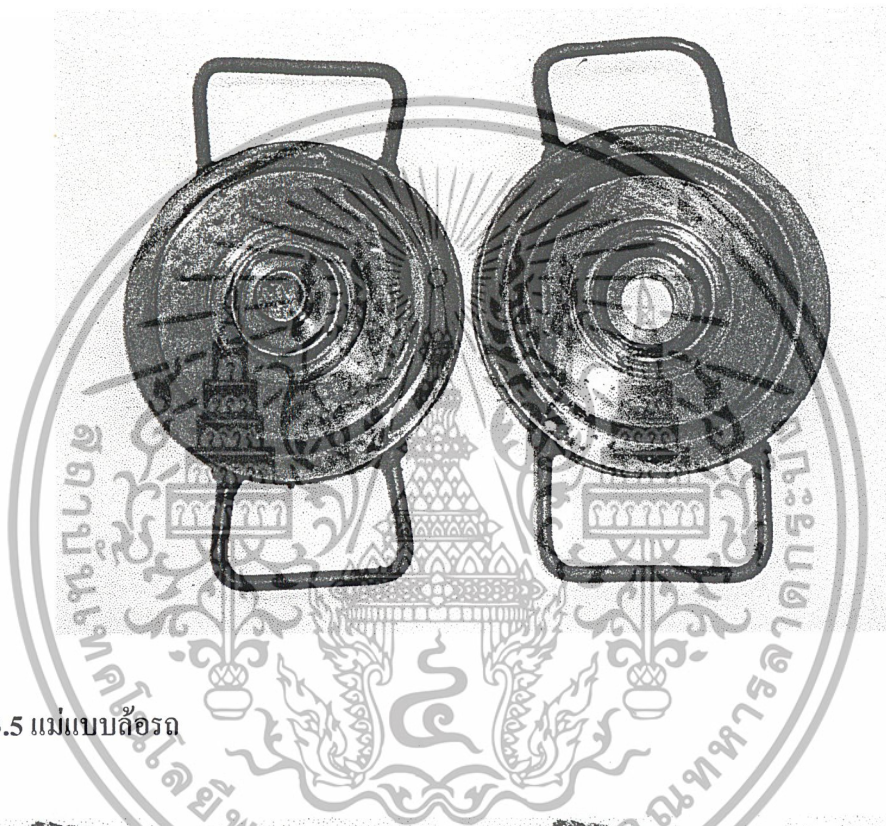


รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นงานสำหรับทดสอบความต้านทานการเสียดสีขัดถู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การขึ้นรูปลวดบึงค้ำวิทยุและทดสอบสมบัติของลวด

เลือกสูตรยางที่ให้สมบัติตามที่ต้องการ แล้วทำการผสมสูตรยางตามข้อ 3.3.1 และขึ้นรูปลวดโดยใช้แม่แบบลวด (รูปที่ 3.5) ทำการตัดผ้าใบเสริมแรง (รูปที่ 3.6) ให้มีขนาดเท่ากับลวดเพื่อรองด้านในของลวด นำลวดที่ขึ้นรูป (รูปที่ 3.7) แล้วไปทดสอบกับรถบึงค้ำวิทยุที่สนามแข่ง (รูปที่ 3.8)

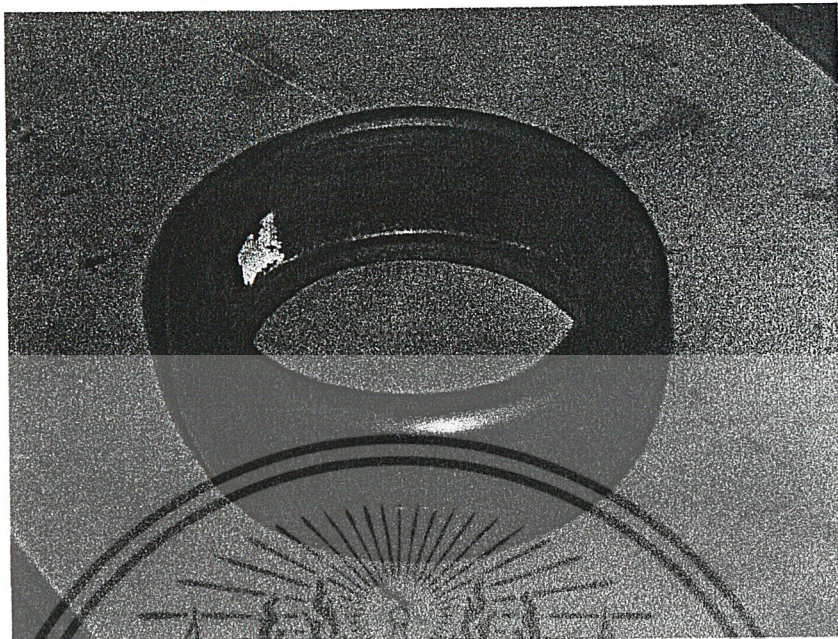


รูปที่ 3.5 แม่แบบลวด



รูปที่ 3.6 ผ้าใบเสริมแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างล้อรถที่ขึ้นรูป



รูปที่ 3.8 สนามแข่งรถบึงคับวิทย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

จากการดำเนินงานโครงการวิจัยการศึกษาสูตรยางสำหรับยางรถบังคับวิทยุ โดยศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางธรรมชาติ (NR) ต่อยางพอลิบิวตะไดอิน (BR) และผลของสารเติมแต่ง ได้แก่ ซิลิกา และยางพอลิบิวทีนเหลว ผลงานวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

#### 4.1 ศึกษาอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน

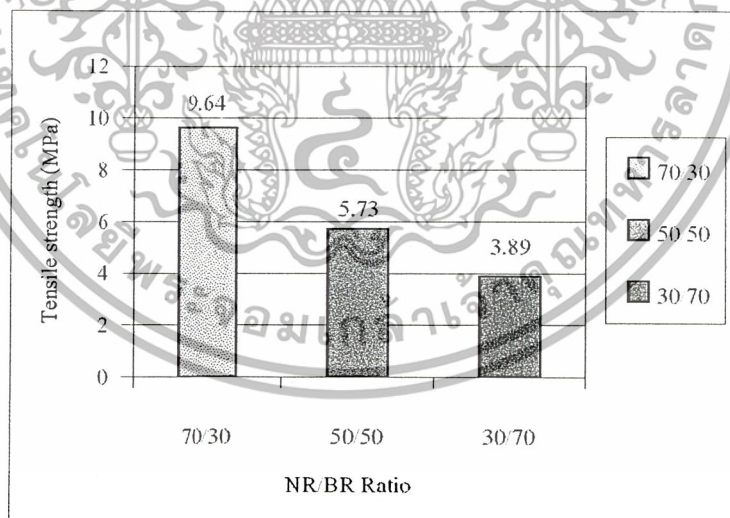
การศึกษาอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน (NR/BR) จะกำหนดอัตราส่วนของ NR/BR เป็น 70/30 50/50 และ 30/70 ทำการผสมยางผสมสูตรด้วยเครื่องผสมแบบเปิดชนิดสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) นำไปหาวเวลาเชื่อมโยงที่อุณหภูมิ 150°C โดยแสดงผลดังตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ NR มีปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรลดลง หรือกล่าวได้ว่าใช้เวลาในการเชื่อมโยงน้อยลง เนื่องจาก NR มีอะตอมของไฮโดรเจนที่ตำแหน่งอะลิลิก (Allylic hydrogen) หรือตำแหน่งคาร์บอนที่ติดจากพันธะคู่มากกว่า BR โดยที่ NR มี Allylic hydrogen 7 อะตอมในโครงสร้าง แต่ BR มี Allylic hydrogen 4 อะตอมในโครงสร้าง และ Allylic hydrogen นั้นเป็นตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาสูง ทำให้ยางผสมสูตรที่มีอัตราส่วนของ NR มาก สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้เร็วกว่ายางผสมสูตรที่มีอัตราส่วนของ NR น้อย

ตารางที่ 4.1 ค่า Scorch time และ Cure time ของอัตราส่วนต่างๆ ของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน

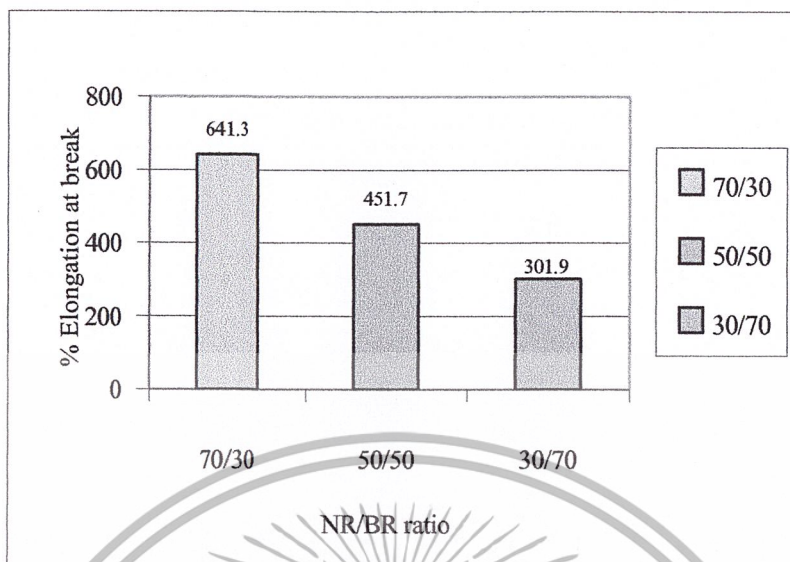
อัตราส่วนของยาง NR/BR	Scorch time (sec)	Cure time (sec)
70/30	124.5	183.6
50/50	126.6	188.6
30/70	138.0	228.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

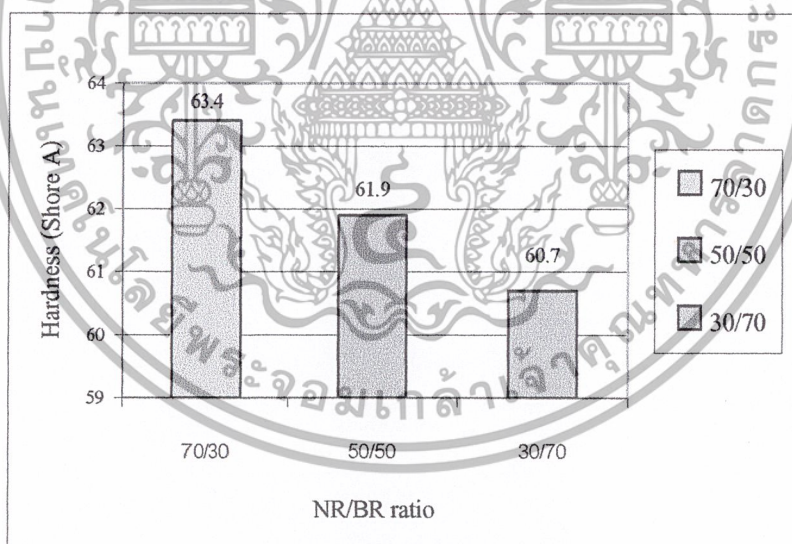
เมื่อนำยางผสมสูตร NR/BR ในอัตราส่วนต่างๆ ไปทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าอัตราส่วน NR/BR เป็น 70/30 มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และความแข็งกด (Hardness) สูงที่สุด รองลงมาจะเป็นอัตราส่วน 50/50 และ 30/70 ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก (อาจจะถึง 2,000,000 กรัม/โมล) ความยาวสายโซ่มาก ทำให้มีการเกี่ยวพันของสายโซ่ (Chain entanglement) สูง และเมื่อทำการดึงยืดจะพบว่า เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึก (Strain induced crystallization)<sup>[9]</sup> ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ยางผสมสูตรมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ส่วนค่ามอดูลัสที่ 200% และสมบัติความต้านทานการเสียดสีขั้วคู่ พบว่าในอัตราส่วน 30/70 มีค่ามอดูลัสที่ 200% สูงสุดและมีสมบัติความต้านทานการเสียดสีขั้วคู่ดีที่สุด รองลงมา คือ อัตราส่วน 50/50 และ 70/30 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 เนื่องจากยาง BR เป็นยางที่มีความยืดหยุ่นสูง จึงยากในการผสมและยากในกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงไม่นำ BR มาผ่านการบดย่อย (Mastication) ก่อนการผสม ทำให้ BR ยังคงมีน้ำหนักโมเลกุลและความยาวของสายโซ่สูง จึงเป็นสาเหตุให้ในอัตราส่วนที่มีปริมาณ BR มาก มีค่ามอดูลัสที่ 200% สูง นอกจากนี้ BR ยังมีสมบัติเด่น คือ สามารถต้านทานการเสียดสีขั้วคู่ได้ดีเยี่ยม ทำให้ในอัตราส่วนที่มีปริมาณ BR มาก มีสมบัติความต้านทานการเสียดสีขั้วคู่ดี



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน

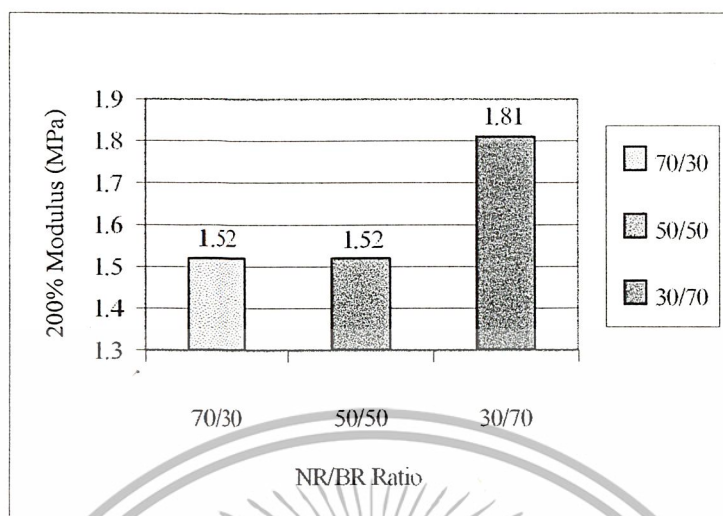


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไคอิน

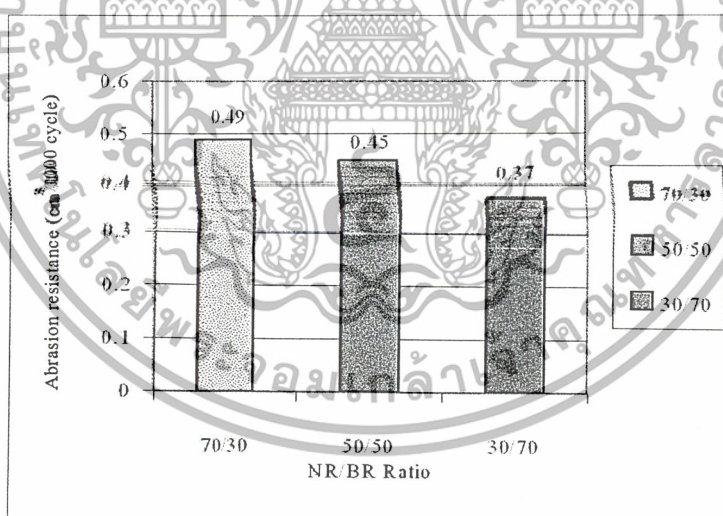


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไคอิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอีน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ศึกษาผลของซิลิกาที่เติมลงในยางผสมสูตร

การศึกษาผลของซิลิกาที่เติมลงในยางผสมสูตร โดยทำการเติมซิลิกา 10 phr ในยางผสมสูตรทุกอัตราส่วน หา Scorch time และ Cure time ที่อุณหภูมิ 150 °C แล้วนำข้อมูลดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับยางผสมสูตรที่ไม่เติมซิลิกา สามารถแสดงผลดังตารางที่ 4.2 โดยพบว่าซิลิกามีผลทำให้ปฏิกิริยาเชื่อมโยงเกิดได้เร็วขึ้นเล็กน้อย เพราะโครงสร้างซิลิกา (ซิลิกอนไดออกไซด์; SiO<sub>2</sub>) ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Si-O-H) อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคซึ่งมีสมบัติเป็นเบส จึงสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาเชื่อมโยงได้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติ ต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่ไม่เติมและเติมซิลิกา 10 phr

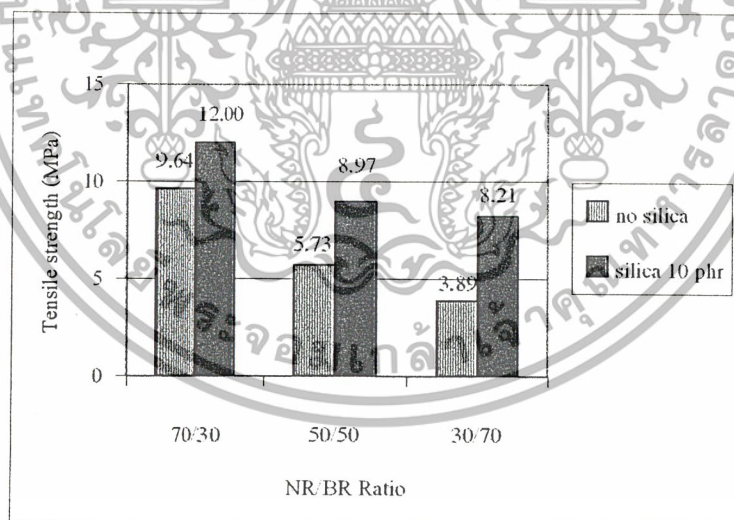
อัตราส่วน ของยาง NR/BR	Scorch time (sec)		Cure time (sec)	
	ไม่เติมซิลิกา	เติมซิลิกา	ไม่เติมซิลิกา	เติมซิลิกา
70/30	124.5	96.0	183.6	165.6
50/50	126.6	107.4	188.6	180.0
30/70	138.0	117.0	228.2	190.8

การทดสอบสมบัติเชิงกล เมื่อเปรียบเทียบกับยางผสมสูตรที่ไม่ได้เติมซิลิกา พบว่าสมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ ได้แก่ ความแข็งแรงดึง มอดูลัสที่ 200% ความแข็งกดและความต้านทานการเสียดสีขัดถู เมื่อเติมซิลิกาแล้วสมบัติดีขึ้น ดังแสดงในรูป 4.6 4.7 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ เนื่องจากซิลิกาเป็นสารตัวเติมประเภทเสริมแรง (Reinforcing filler) ได้ดี เพราะมีขนาดอนุภาคเล็ก นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มสมบัติความต้านทานการเสียดสีขัดถูอีกด้วย แต่ถ้าพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดแล้ว พบว่าในยางผสมสูตรที่ไม่มีการเติมซิลิกามีค่าสูงกว่า ดังแสดงในรูป 4.10 ที่เป็นเช่นนี้เพราะอนุภาคซิลิกาเป็นอนุภาคของแข็ง ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของวัฏภาค บริเวณรอยต่อระหว่างวัฏภาคไม่แข็งแรงเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ ที่ไม่ใช่รอยต่อของวัฏภาค นอกจากนั้นอนุภาคของซิลิกามีความเป็นเหลี่ยมคมอาจเป็นจุดริเริ่มของรอยแตกหัก (Crack initiator) ทำให้วัสดุเสียหายก่อนกำหนด หรือมีเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางผสมสูตรที่มีการเติมซิลิกา 10 phr ในทุกอัตราส่วน พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลดังนี้ คือ ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.6) ความแข็งกด (รูปที่ 4.8) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.10) จะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณอัตราส่วนของ NR ที่ลดลง ส่วนค่ามอดูลัสที่ 200% (รูปที่ 4.7) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ NR ลดลง ทำให้ค่ามอดูลัสที่ 200% มีค่าเพิ่มขึ้น และสุดท้ายสมบัติความต้านทานการเสียดสีขัดถู พบว่าสมบัติความต้านทานการเสียดสีขัดถูนั้นดีขึ้น เมื่อปริมาณ NR ลดลงเช่นกัน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้นั้นสามารถอธิบายได้จากเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว (หัวข้อ 4.1)

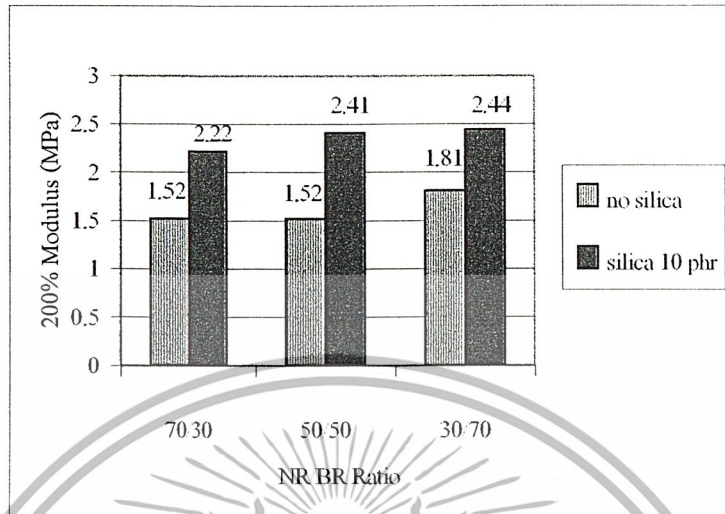
เมื่อนำผลการทดสอบของยางผสมสูตรที่เติมและไม่เติมซิลิกาไปเปรียบเทียบกับยางรถบังคับวิทยุที่ใช้ในทางการค้า พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของยางดังกล่าว มีค่าต่ำกว่ายางผสมสูตรที่เติมและไม่เติมซิลิกา โดยยางรถบังคับวิทยุที่ใช้ในทางการค้ามีค่าความแข็งแรงดึง เป็น 49.85 Shore A ขณะที่ยางผสมสูตรในงานวิจัยทั้งที่เติมซิลิกาและไม่เติมซิลิกามีค่าเกิน 60 Shore A ขึ้นไป ดังแสดงในรูป 4.8 จากรูปยางผสมสูตรที่ไม่เติมซิลิกา มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่ายางที่ใช้ทางการค้า ดังนั้นในการวิจัยสูตรยางต่อไปจึงไม่มีการเติมซิลิกา



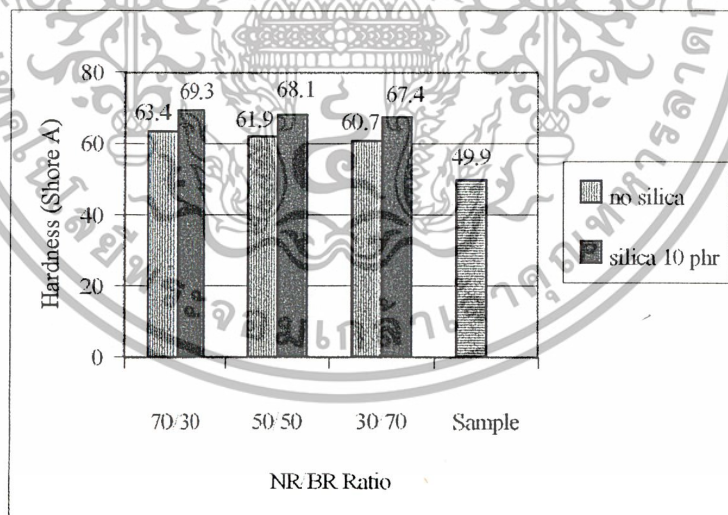
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อ

ยางพอลิบิวตะไดอิน โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่เติมและเติม silica 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

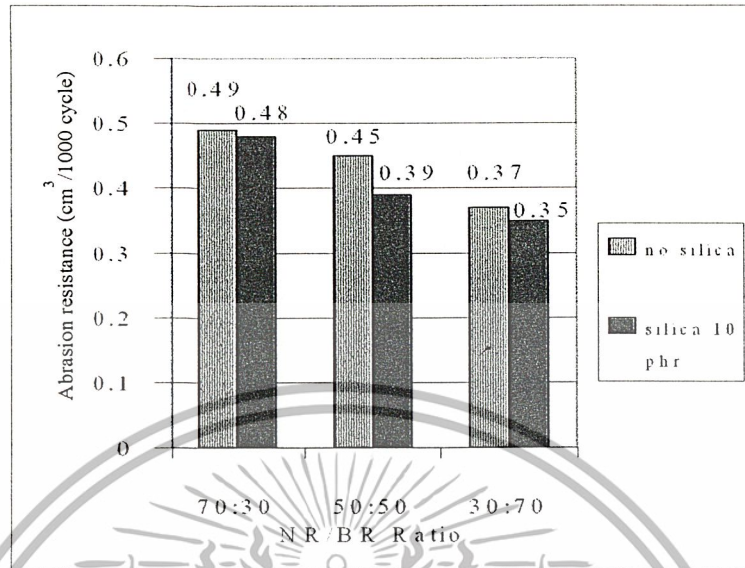


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่เติมและเติม silica 10 phr

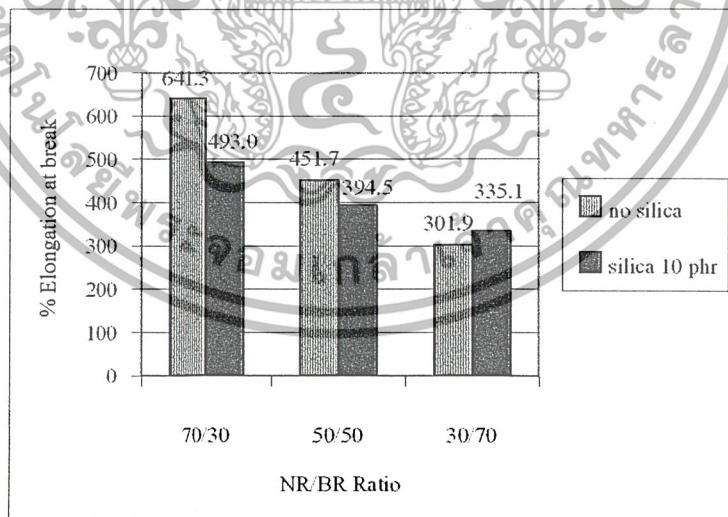


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่เติมและเติม silica 10 phr (Sample คือ ตัวอย่างยางสำหรับล้อรถบังคับวิทยุจากการค้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติ ต่อยางพอลิบิวตะ ไดอิน โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่เติมและเติม silica 10 phr



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับอัตราส่วนของยางธรรมชาติ ต่อยางพอลิบิวตะ ไดอิน โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่ไม่เติมและเติม silica 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 ศึกษาปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวที่เหมาะสม

การศึกษาปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มสมบัติยึดติด (Tack) ทำการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 5 7 และ 10 phr ในยางผสมสูตรทุกอัตราส่วน นำไปหา Scorch time และ Cure time ที่อุณหภูมิ 150°C พบว่าในอัตราส่วนของ NR/BR ที่เท่ากัน เมื่อปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวเพิ่มขึ้น จะไม่มีผลต่อค่า Scorch time และ Cure time มากนัก เนื่องจากยางพอลิบิวทีนเหลวที่ใช้เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ประมาณ 2,400 กรัม/โมล) มีขนาดโมเลกุลเล็กและไม่มีหมู่ฟังก์ชัน จึงไม่รบกวนปฏิกิริยาเชื่อมโยง หรือไม่มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาการเชื่อมโยง ส่งผลให้การเติมยางพอลิบิวทีนเหลวลงไปในยางผสมสูตรแต่ละอัตราส่วนมีค่า Scorch time และ Cure time ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.3

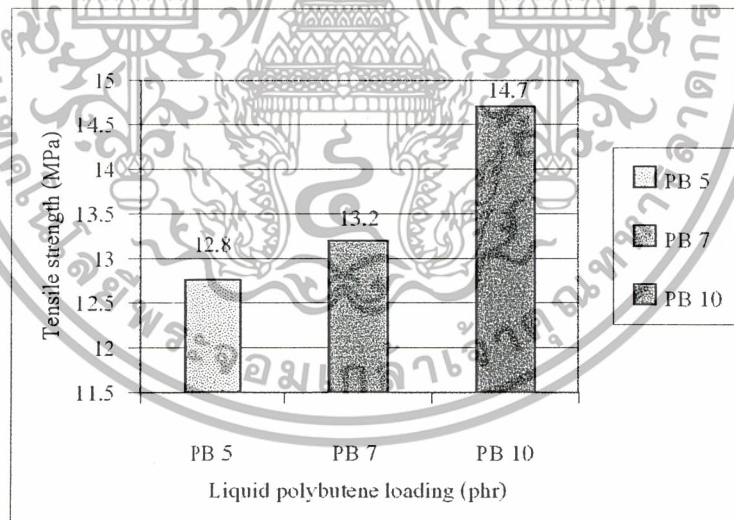
ตารางที่ 4.3 ค่า Scorch time และ Cure time ของยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีนไดอินในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการปรับปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป

ปริมาณ PB (phr)	อัตราส่วน NR/BR	Scorch time (sec)	Cure time (sec)
5	70/30	102.0	151.2
	50/50	114.4	158.4
	30/70	126.0	183.6
7	70/30	111.0	156.24
	50/50	118.5	165.6
	30/70	132.6	192.24
10	70/30	108.0	156.24
	50/50	111.0	172.0
	30/70	120.0	190.8

เมื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลต่างๆ พบว่าการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวในปริมาณ 5 7 และ 10 phr ในยางผสมสูตรที่มีอัตราส่วนของ NR/BR เท่ากัน จะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด โดยในยางผสมสูตรที่เติมยางพอลิบิวทีนเหลว 10 phr จะมีค่าสูงสุดรองลงมา คือ 7 และ 5 phr ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 สำหรับอัตราส่วน 70/30 รูปที่ 4.16 และ 4.17 สำหรับอัตราส่วน 50/50 และรูปที่ 4.20 และ 4.21 สำหรับอัตราส่วน 30/70

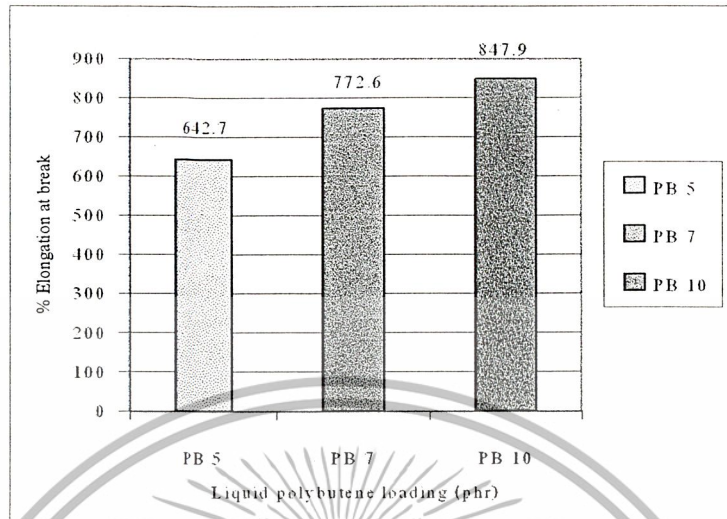
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่สำหรับค่ามอดูลัสที่ 200% และความแข็งกดของยางผสมสูตรนั้นพบว่า ยางพอลิบิวทีนเหลว 10 phr จะมีค่าดังกล่าวต่ำสุด และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวเป็น 7 และ 5 phr ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 สำหรับอัตราส่วน 70/30 รูปที่ 4.18 และ 4.19 สำหรับอัตราส่วน 50/50 และรูปที่ 4.23 และ 4.24 สำหรับอัตราส่วน 30/70 ทั้งนี้เนื่องจากยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไปนั้นช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งแรงดึง อีกทั้งยางพอลิบิวทีนเหลวเป็นของเหลวหนืด อาจทำหน้าที่เป็นสารช่วยกระจายตัว (Plasticizer) ซึ่งจะลดความหนืดของระบบช่วยให้เขม่าดำ และสารเติมแต่งตัวอื่นๆ สามารถกระจายตัวได้ดีขึ้น โดยที่ยางพอลิบิวทีนเหลวสามารถละลายได้ในยาง ซึ่งจะแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ และยางพอลิบิวทีนเหลวมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะช่วยทำให้ยางผสมสูตรมีความนิ่มเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติความต้านทานต่อการเสียดสีขัดถูพบว่า ปริมาณพอลิบิวทีนเหลวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สมบัติความต้านทานการเสียดสีขัดถูลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 สำหรับอัตราส่วน 70/30 รูปที่ 4.20 สำหรับอัตราส่วน 50/50 และรูปที่ 4.25 สำหรับอัตราส่วน 30/70 เหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้เหมือนเหตุผลข้างต้น

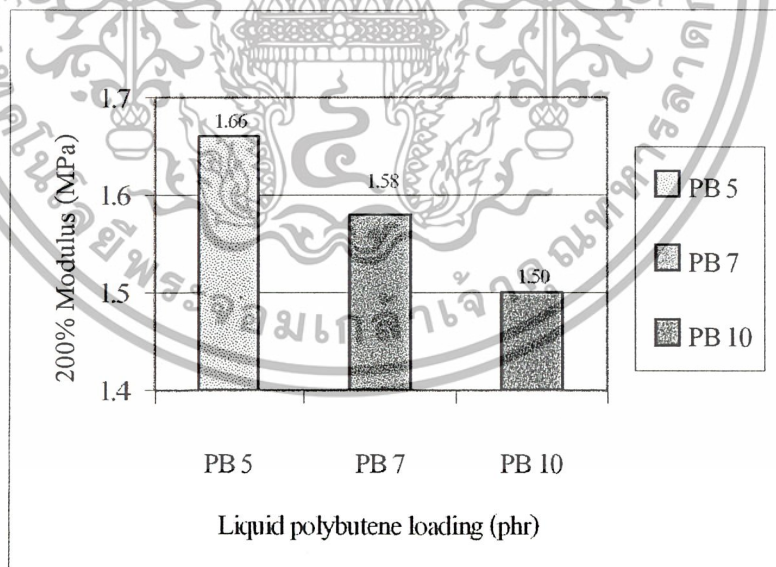


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไปปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีนเหลว ในอัตราส่วน 70/30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

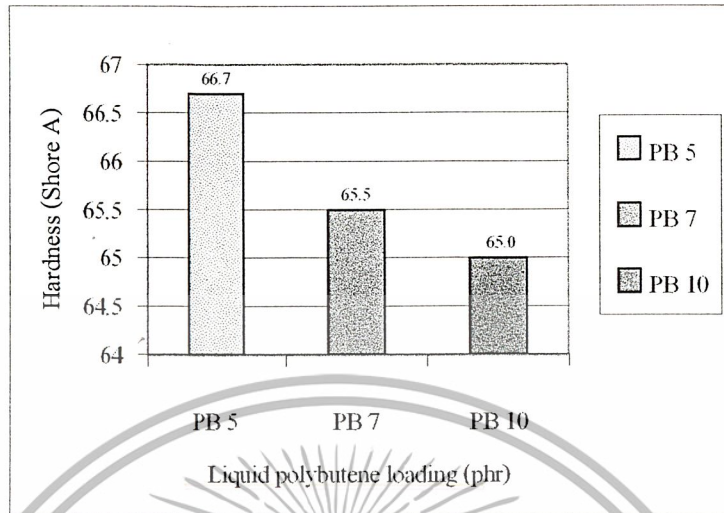


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีนใน อัตราส่วน 70/30

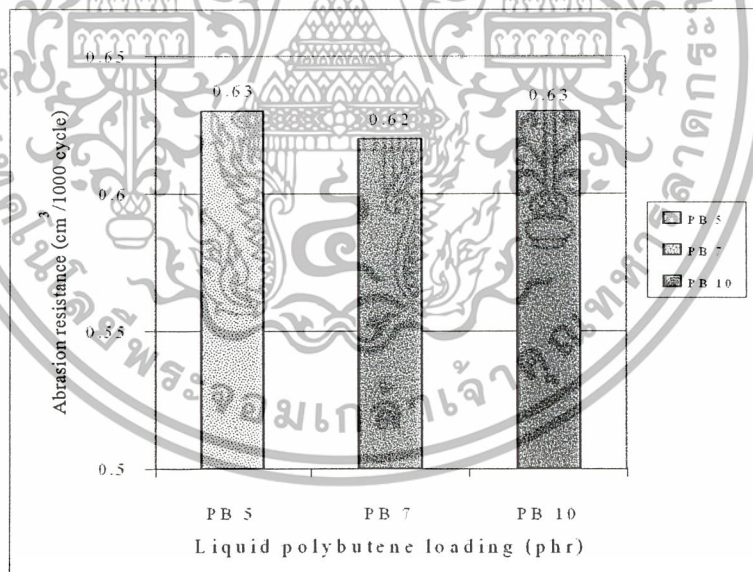


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 200% กับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ปริมาณ ต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีนใน อัตราส่วน 70/30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

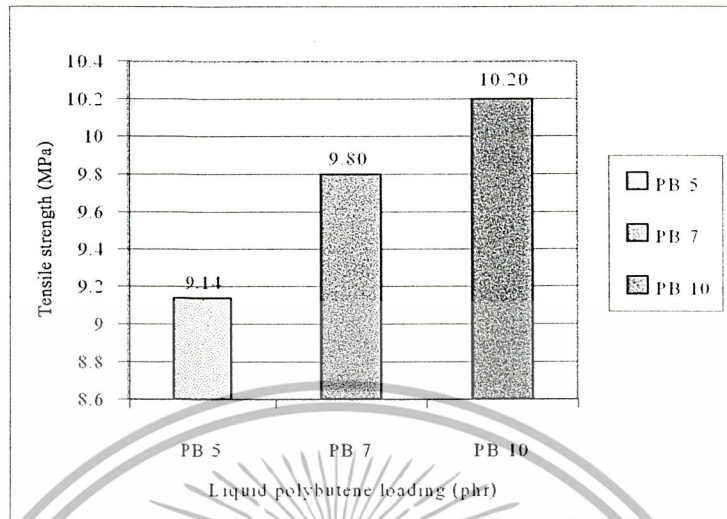


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติคอปอลิเมอร์ ไดอิน ในอัตราส่วน 70/30

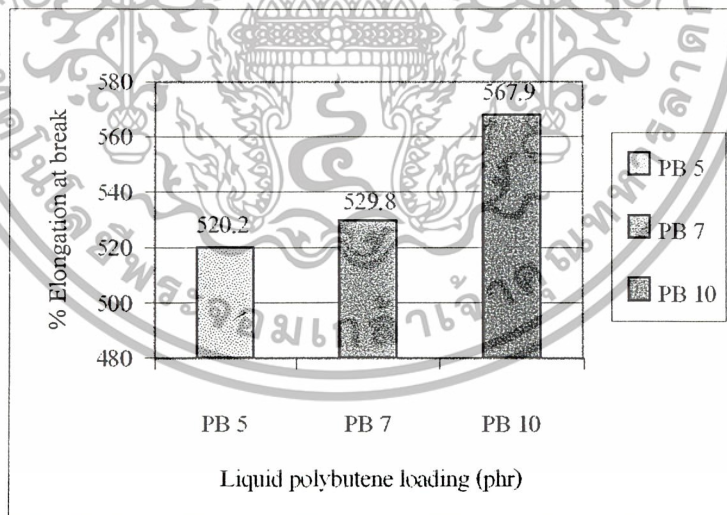


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติคอปอลิเมอร์ ไดอิน ในอัตราส่วน 70/30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

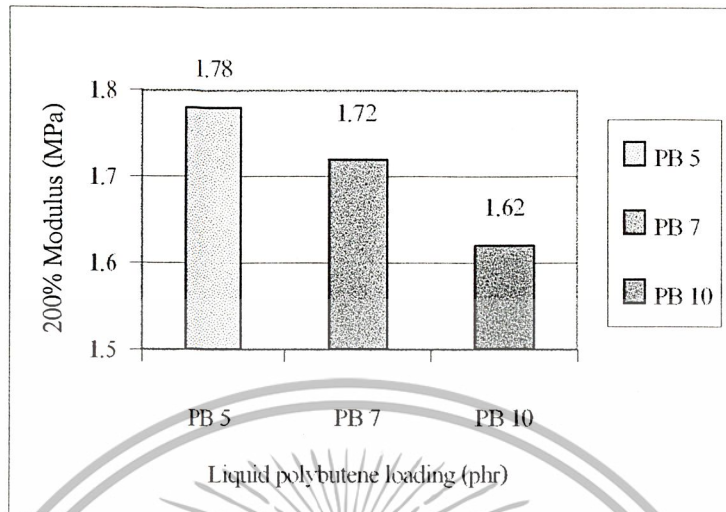


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 50/50

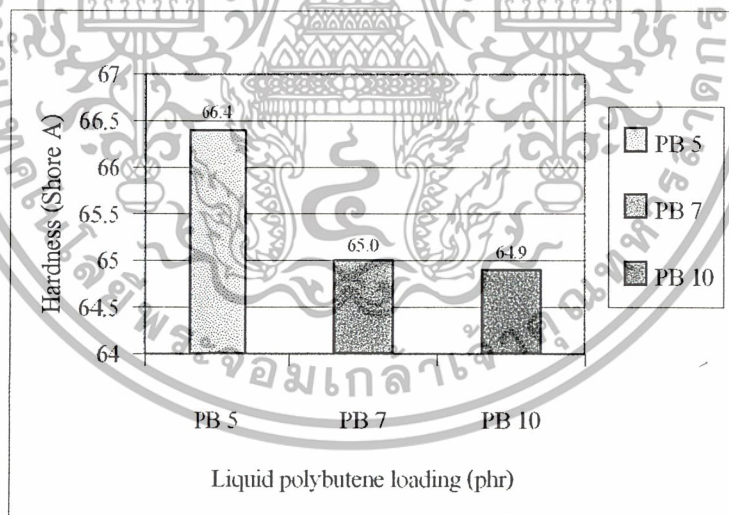


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วน 50/50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

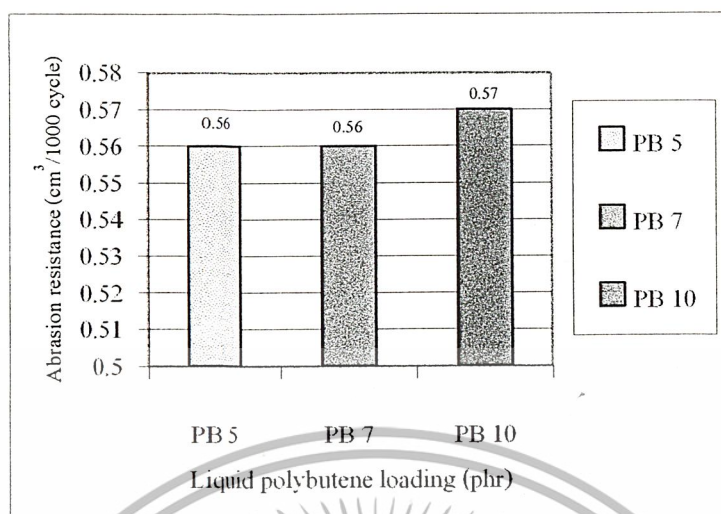


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไปในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีนไคอิน ในอัตราส่วน 50/50

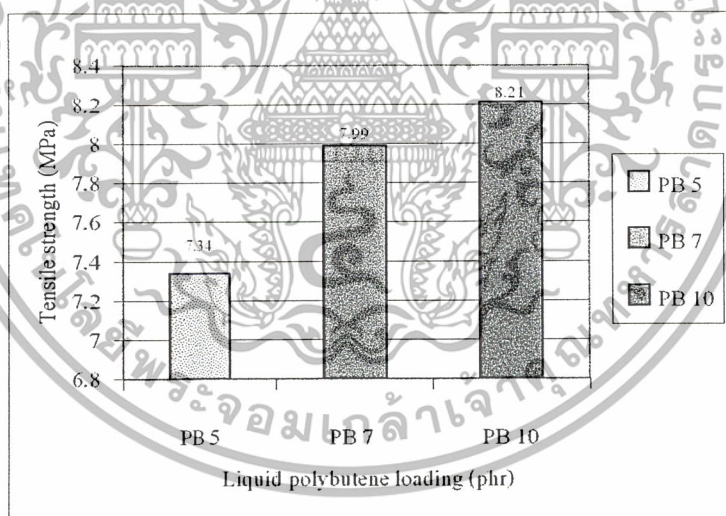


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกดกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไปปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีนไคอิน ในอัตราส่วน 50/50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

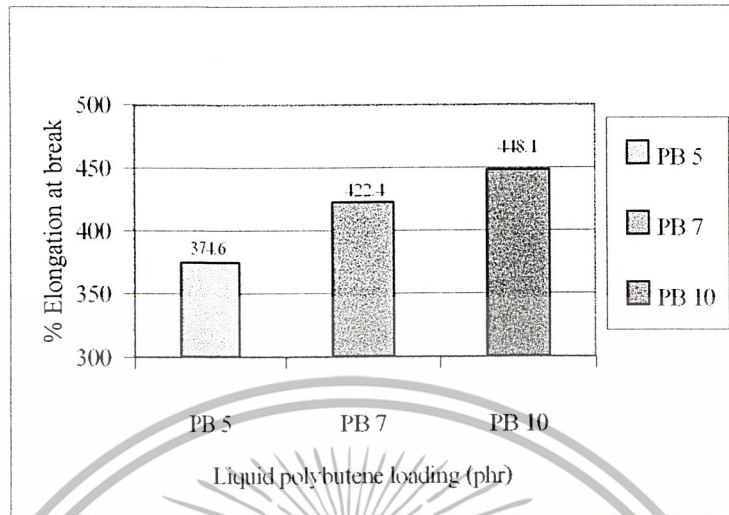


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป  
ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีน  
ในอัตราส่วน 50/50

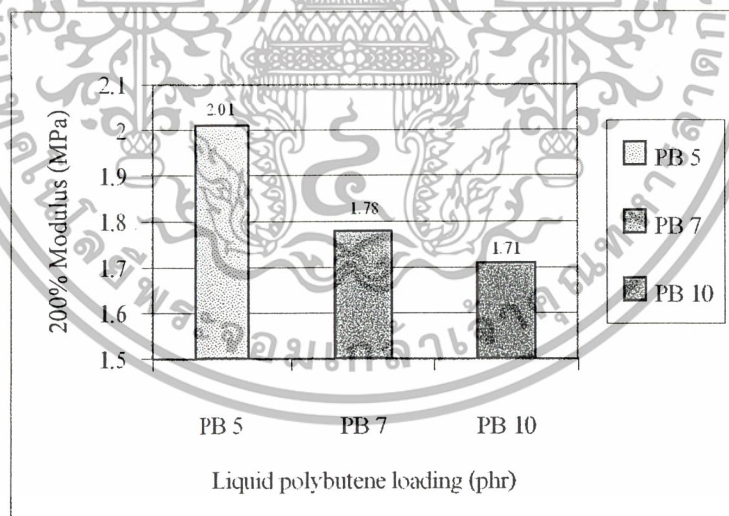


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป  
ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีน  
ในอัตราส่วน 30/70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

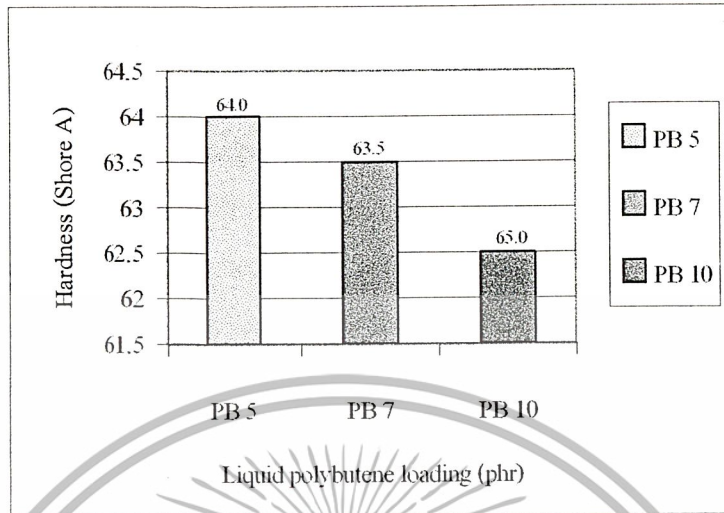


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีน ไดอิน ในอัตราส่วน 30/70

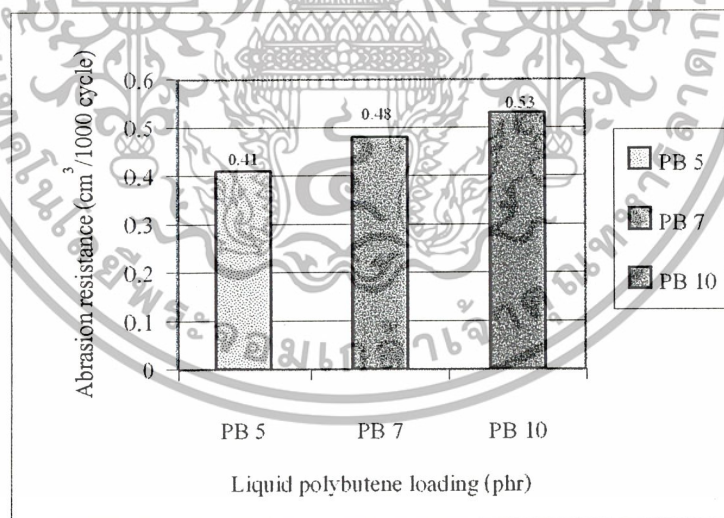


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไป ในปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีน ไดอิน ในอัตราส่วน 30/70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



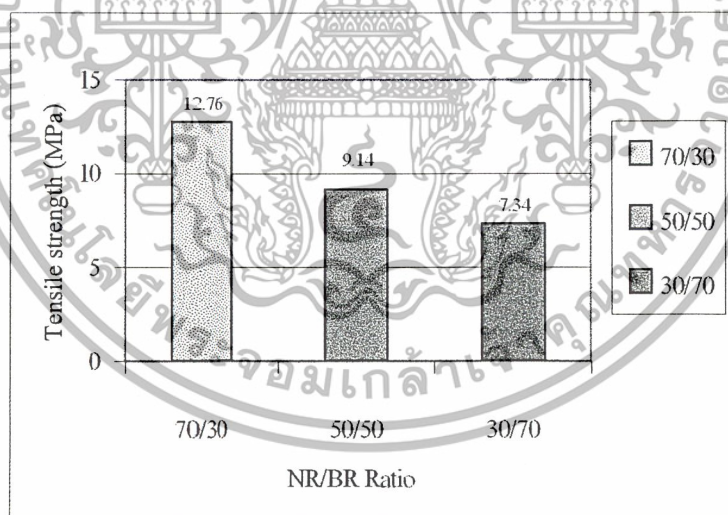
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไปปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีนไคอิน ในอัตราส่วน 30/70



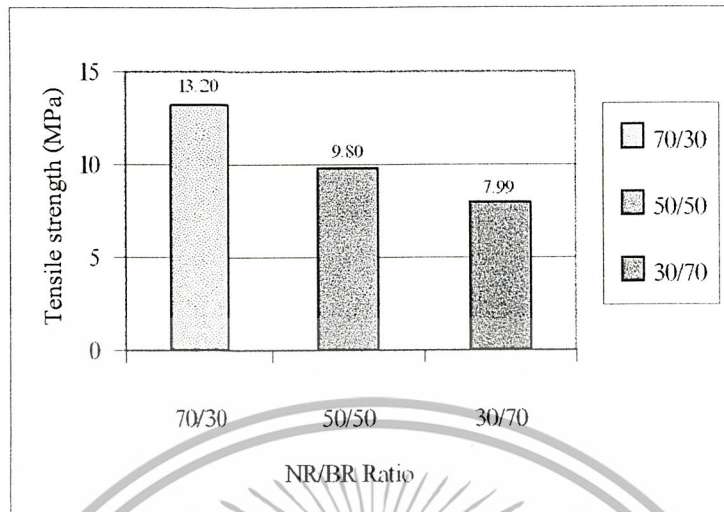
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางพอลิบิวทีนเหลวที่เติมลงไปปริมาณต่างๆ ของยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวทีนไคอิน ในอัตราส่วน 30/70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

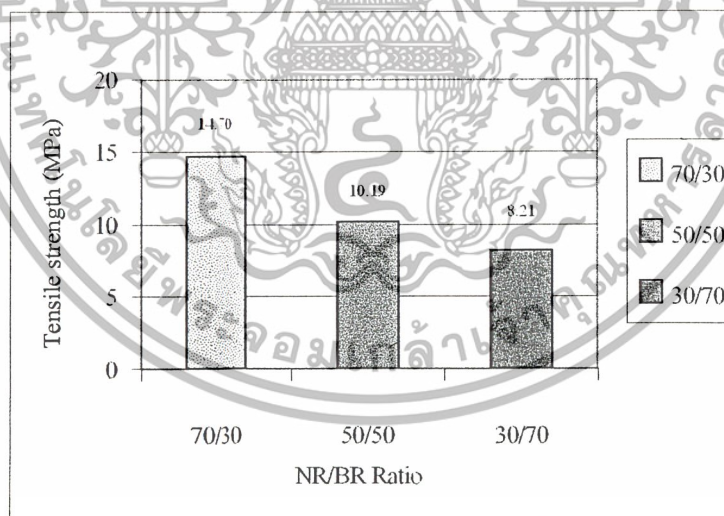
การเติมยางพอลิบิวทีนเหลว 5 7 และ 10 phr ในยางผสมสูตรทุกอัตราส่วน พบว่าที่ ปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวเท่ากัน ในอัตราส่วน 70/30 จะมีค่าความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ฃน จุดขาด และความแข็งแรงกดสูงกว่าอัตราส่วน 50/50 และ 30/70 ตามลำดับ โดยแสดงดังรูป 4.26 4.29 และ 4.35 สำหรับปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลว 5 phr รูปที่ 4.27 4.30 และ 4.36 สำหรับ ปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลว 7 phr และรูปที่ 4.28 4.31 และ 4.37 สำหรับปริมาณยางพอลิบิวทีน เหลว 10 phr ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ความยาวสายโซ่มาก และเมื่อทำการดึงยึดพบว่าเกิดการเหนียวทำให้เกิดผลึก ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่วน อัตราส่วน 30/70 มีค่ามอดูลัสที่ 200% และความต้านทานการเสียดสีสูงสุด รองลงมา คือ อัตราส่วน 50/50 และ 30/70 ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.38 สำหรับปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลว 5 phr รูปที่ 4.33 และ 4.39 สำหรับปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลว 7 phr และรูปที่ 4.34 และ 4.40 สำหรับปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลว 10 phr เนื่องจากยางพอลิบิวตะไดอินที่นำมาใช้ มีค่ามอดูลัส สูง และมีสมบัติความต้านทานการเสียดสีที่ดีเยี่ยม ทำให้ยางที่มีอัตราส่วนผสมของยางพอลิ บิวตะไดอินมากจะมีสมบัติเชิงกลเหล่านี้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 5 phr

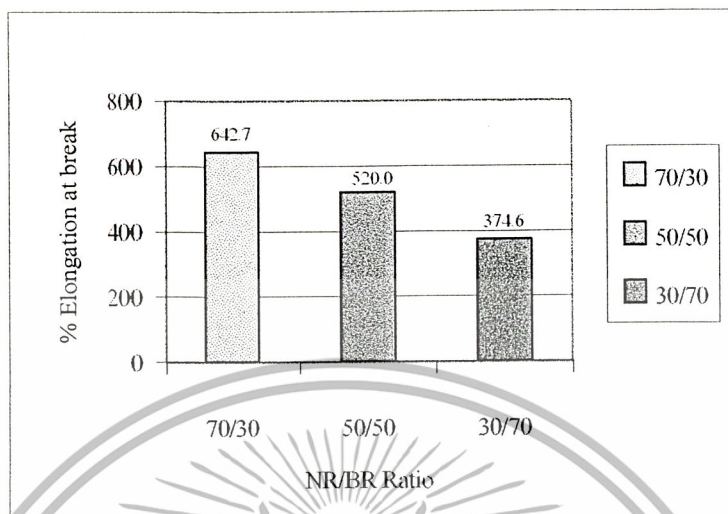


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 7 phr

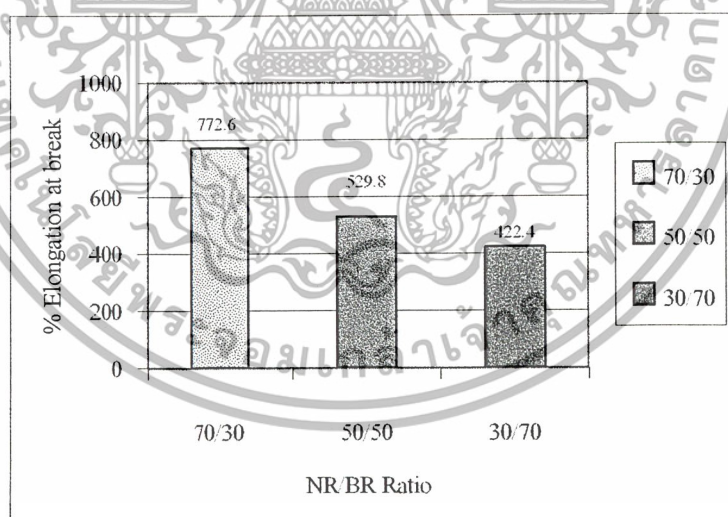


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงดึงกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

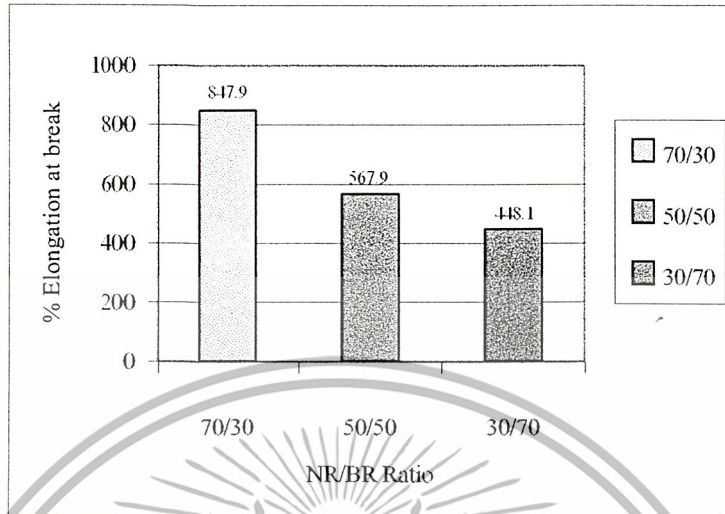


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติ ต่อยางพอลิบิวตะ ไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 5 phr

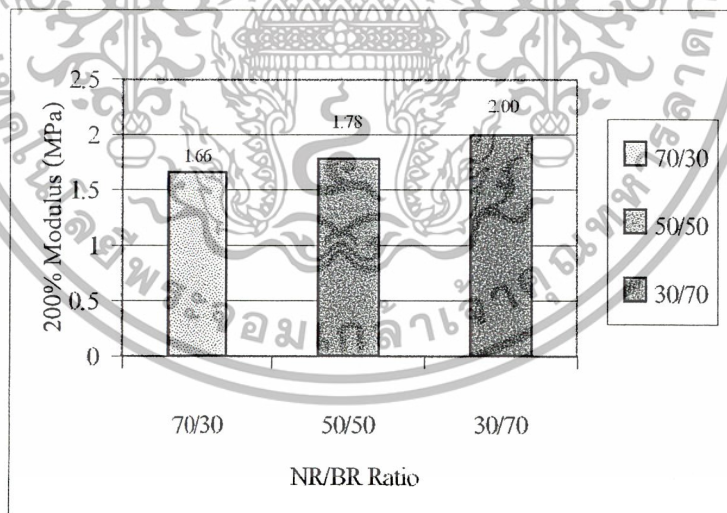


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติ ต่อยางพอลิบิวตะ ไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 7 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

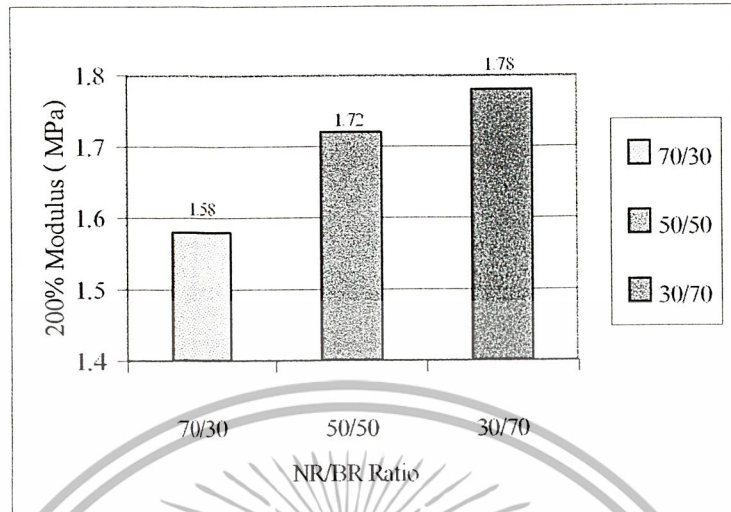


รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติ ต่อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr

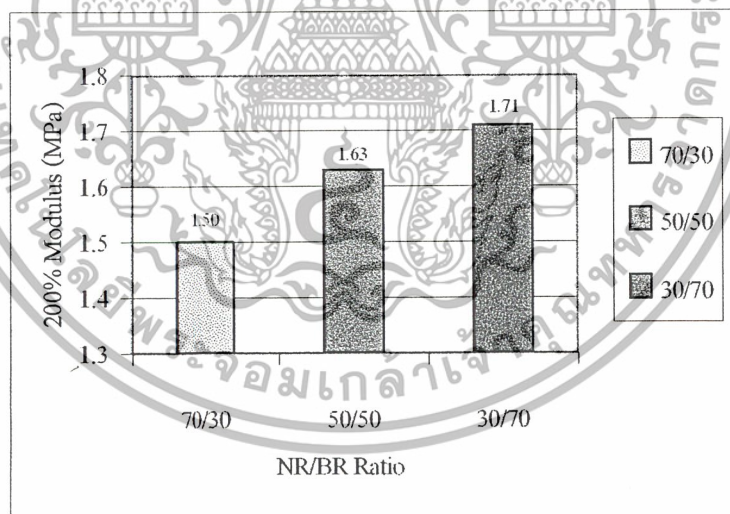


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสที่ 200% กับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

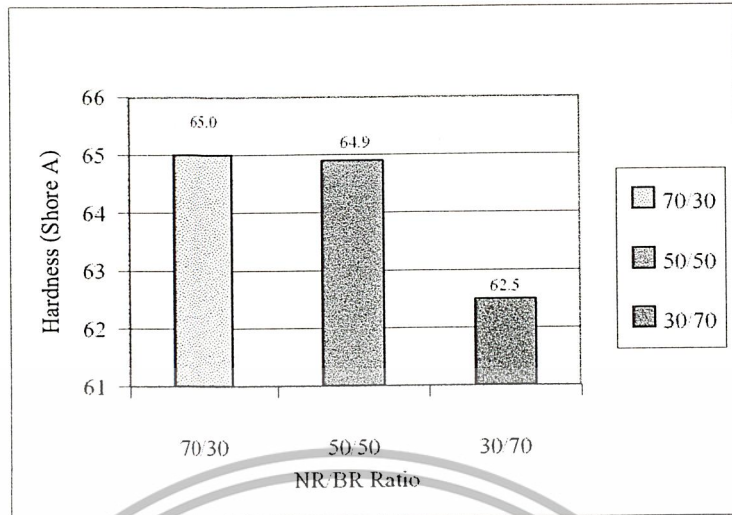


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 7 phr

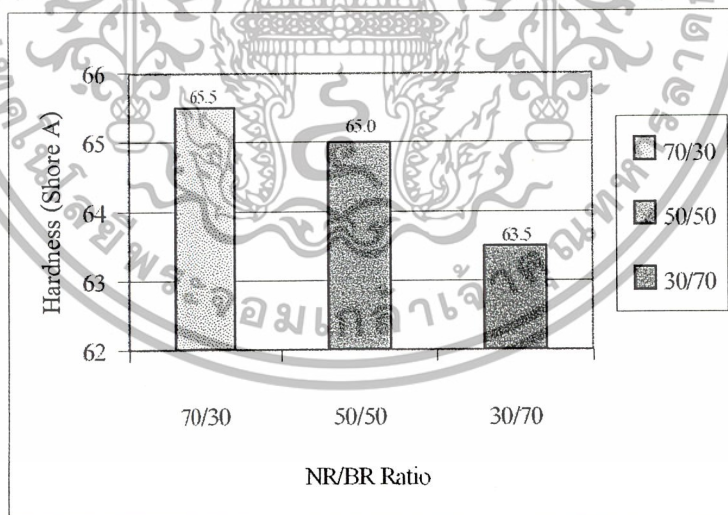


รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสที่ 200% กับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

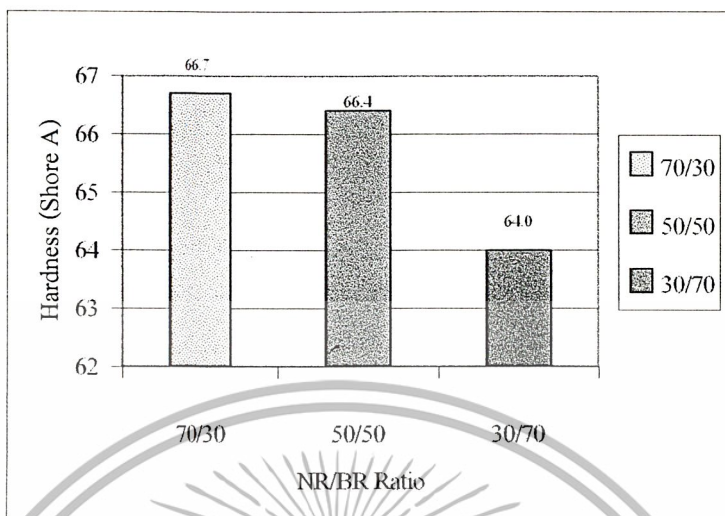


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 5 phr

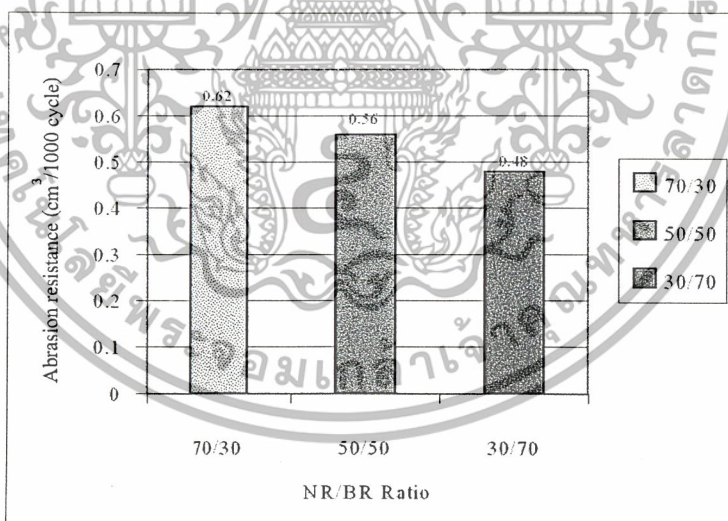


รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 7 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

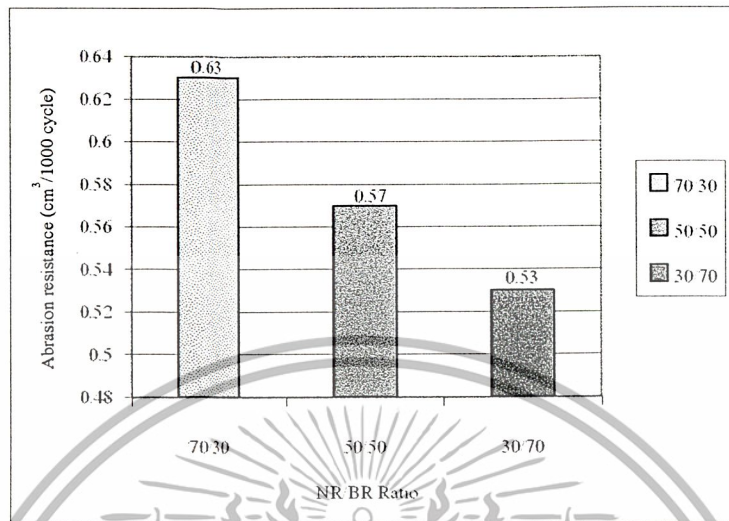


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อ ยางพอลิบิวตะไคอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr

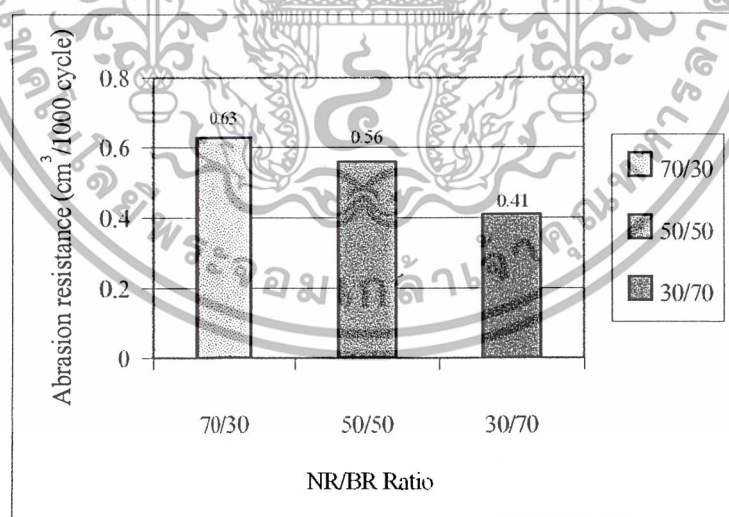


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีกับยางผสมสูตรระหว่าง ยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไคอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลว ปริมาณ 5 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติค้อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลว ปริมาณ 7 phr



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานการเสียดสีขัดถูกับยางผสมสูตรระหว่างยางธรรมชาติค้อยางพอลิบิวตะไดอิน ในอัตราส่วนต่างๆ ที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลว ปริมาณ 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การประยุกต์ใช้งานจริง

จากการศึกษาขั้นต้น ทำการเลือกสูตรยางที่สามารถนำไปใช้งานจริง โดยเลือกขึ้นรูปยางสำหรับล้อรถบังคับวิทยุที่มีอัตราส่วนของ NR/BR เป็น 50/50 ไม่เติมซิลิกา และใช้ปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลว 10 phr

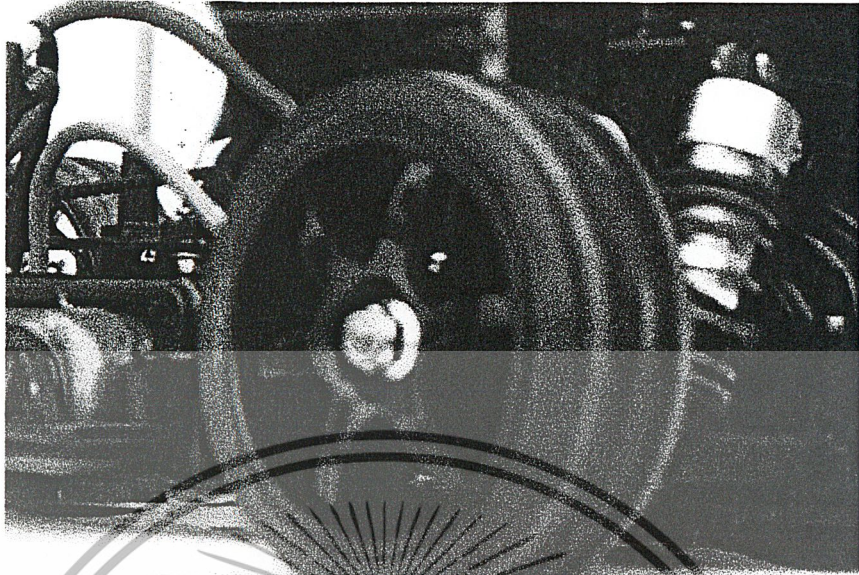
ในการทดลองพบว่า NR มีผลต่อ ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) เเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) และความแข็งกด (Hardness) ทำให้มีสมบัติเหล่านี้ดีขึ้น แต่ถ้าใช้ NR ในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงสูง ไม่มีความยืดหยุ่น ส่วน BR นั้น จะช่วยเพิ่มสมบัติความต้านทานการเสียดสีขั้ดถู เพิ่มความยืดหยุ่นให้แกยาง แต่ถ้าใช้ในปริมาณที่มาก ทำให้ยากต่อกระบวนการผลิต ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงเลือกอัตราส่วนของ NR/BR เป็น 50/50

ซิลิกา เป็นสารตัวเติมที่ช่วยเสริมแรงและเพิ่มสมบัติความต้านทานการเสียดสีขั้ดถู จากการทดสอบความแข็งกดพบว่า ยางผสมสูตรในงานวิจัยทั้งที่เติมและไม่เติมซิลิกามีค่าความแข็งกดสูงกว่ายางจากทางการค้า ในการใช้งานจริงจึงเลือกใช้สูตรที่ไม่เติมซิลิกา

ยางพอลิบิวทีนเหลว เป็นสารช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและสมบัติการยึดติดให้ยาง โดยทั่วไป สารเติมแต่งประเภทนี้จะเติมลงในยางปริมาณไม่เกิน 10 phr เพราะถ้าใส่ในปริมาณมาก มักทำให้เกิดการเสียดสีของยาง ดังนั้นในการใช้งานจริงจึงเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr

เมื่อทำการผสมสูตรยางที่ได้เลือกไว้ และขึ้นรูปเป็นล้อรถบังคับวิทยุ แล้วนำไปทดสอบวิ่งที่สนามแข่งพบว่า จากการทดสอบวิ่งเป็นเวลา 5 นาที รถบังคับวิทยุสามารถวิ่งด้วยความเร็วสูงสุดประมาณ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ถ้าใช้ความเร็วมากกว่านี้จะไม่สามารถบังคับรถได้ และในขณะที่เลี้ยวโค้งจะต้องลดความเร็วของรถลง เพราะรถเกิดการไถลถนน ทำให้ไม่สามารถบังคับรถให้เลี้ยวโค้งได้ตามต้องการ และเมื่อทำการชั่งน้ำหนักของรถบังคับวิทยุที่ใช้ในการทดสอบพร้อมกับยางล้อ 4 เส้น พบว่าน้ำหนักรวมหลังการทดสอบจะเท่ากับน้ำหนักรวมก่อนการทดสอบจึงสามารถสรุปได้ว่า ยางล้อรถบังคับวิทยุจากการวิจัยมีสมบัติความต้านทานการเสียดสีขั้ดถูดีเยี่ยม แต่จะมีข้อด้อยกว่า คือ สมบัติการยึดเกาะถนน โดยล้อรถบังคับวิทยุจะยึดเกาะถนนได้น้อยกว่ายางล้อรถบังคับวิทยุจากทางการค้า และจากการทดสอบวิ่งสามารถสรุปได้ว่า ล้อรถบังคับวิทยุจากการวิจัยสามารถนำไปวิ่งได้จริง แต่ถ้านำไปใช้งานในการแข่งขันนั้นต้องมีการปรับปรุงสมบัติการยึดเกาะถนนให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ขางด้อรตบั้งคับวิทฑูที่ไค้จกการวิทฑูก่อนการทคดองวั้ง



รูปที่ 4.42 ขางด้อรตบั้งคับวิทฑูที่ไค้จกการวิทฑูหลังการทคดองวั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การวิเคราะห์ต้นทุน (Cost Analysis)

การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของยางล้อรถบังคับวิทยุที่ได้จากยางธรรมชาติผสมกับยางพอลิบิวตะไดอิน โดยมีน้ำหนักยางรวม 200 กรัม เลือกใช้อัตราส่วนของยางธรรมชาติต่อยางพอลิบิวตะไดอินเป็น 50/50 และผสมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของยางล้อรถบังคับวิทยุ

รายการ	ปริมาณที่ใช้	ราคาต่อหน่วย <sup>1</sup>	คิดเป็นเงิน (บาท)
1. ยางธรรมชาติ	100 กรัม	40 บาท/กก.	4.00
2. ยางพอลิบิวตะไดอิน	100 กรัม	45 บาท/กก.	4.50
3. ยางพอลิบิวทีนเหลว	20 กรัม	50 บาท/กก.	1.00
4. เชม่าดำ	100 กรัม	22.20 บาท/กก.	2.22
5. สารแอนติออกซิแดนซ์ 22-cp-46	2 กรัม	150 บาท/กก.	0.30
6. น้ำมันเนฟทานิก	20 กรัม	15.14 บาท/กก.	0.30
7. PEG 400	2 กรัม	52 บาท/กก.	0.11
8. เอ็มบีทีเอส (MBTS)	2 กรัม	128 บาท/กก.	0.26
9. ทีเอ็มทีดี (TMTD)	1 กรัม	125 บาท/กก.	0.13
10. ซิงค์ออกไซด์	10 กรัม	50 บาท/กก.	0.50
11. กรดสเตียริก	4 กรัม	26 บาท/กก.	0.11
12. กำมะถัน	4 กรัม	19 บาท/กก.	0.10
13. ค่าแรง	2 ชั่วโมง	165 บาท/วัน <sup>2</sup>	13.75
14. ค่าไฟฟ้า	10 unit	2.5 บาท/unit	25.00
รวมต้นทุนการผลิตยางล้อรถบังคับวิทยุ			52.28

หมายเหตุ <sup>1</sup> เป็นราคาโดยประมาณ ณ เดือนมีนาคม

<sup>2</sup> คิดค่าแรงตามค่าแรงขั้นต่ำ 1 คน

<sup>3</sup> ราคานี้ไม่รวมต้นทุนเครื่องจักรการผลิตและค่าเสื่อมราคาเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 แสดงราคาต้นทุนของยางล้อรถบังคับวิทยุ จากการวิจัยพบว่า ในการผสมสูตรยางที่มีน้ำหนักรวม 200 กรัม นั้น จะสามารถขึ้นรูปเป็นยางล้อรถบังคับได้จำนวน 4 เส้น เพราะฉะนั้นราคาต้นทุนของยางล้อรถบังคับวิทยุ 1 เส้นเป็น 13.07 บาท หรือประมาณ 14.00 บาท และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับยางล้อรถบังคับวิทยุที่ได้จากทางการค้า ซึ่งมีต้นทุนประมาณ 250 บาทต่อ 1 เส้น จะเห็นว่ายางล้อรถบังคับวิทยุที่ได้จากการวิจัยจะมีต้นทุนต่ำกว่ามาก แต่จากผลการวิจัยพบว่า ยังมีสมบัติบางประการที่ด้อยกว่ายางล้อรถบังคับวิทยุที่ได้จากทางการค้า ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการทดลองเพื่อหาสูตรยางที่เหมาะสมสำหรับล้อของรถบังคับวิทยุ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของยาง คือ อัตราส่วนที่เหมาะสมของยางวัลดูดิบ คือ ยางธรรมชาติและยางพอลิบิวตะไดอิน (NR/BR) ผลของการเติมซิลิกาและปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวที่เหมาะสมสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

จากการศึกษาเรื่องอัตราส่วนที่เหมาะสมของยางวัลดูดิบ คือ ยางธรรมชาติและยางพอลิบิวตะไดอินพบว่า ปริมาณยางธรรมชาติจะมีผลต่อสมบัติของยาง คือ ความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาด และความแข็งกด โดยยางธรรมชาติจะทำให้สมบัติเหล่านี้ดีขึ้น เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ความยาวสายโซ่มาก และเมื่อทำการดึงยืดสามารถเกิดการเหนียวน่าให้เกิดผลึก (Strain induced crystallization) ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณยางธรรมชาติที่มากเกินไปจะทำให้ยางมีความแข็งสูง ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นยางสำหรับล้อรถ ส่วนยางพอลิบิวตะไดอินนั้นจะมีผลต่อสมบัติความต้านทานการเสียดสีขัดถูและค่ามอดูลัสที่ 200% เนื่องจากยางพอลิบิวตะไดอินเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นสูงและมีสมบัติต้านทานการเสียดสีขัดถูดีเยี่ยม แต่ข้อเสียของยางพอลิบิวตะไดอิน คือ ยากต่อการผสมและกระบวนการผลิต ถ้าทำการบดย่อยและผสมนานเกินไปจะทำให้ยางเหนียวติดลูกกิ้งที่ใช้ในการผสม ดังนั้นในการขึ้นรูปยางสำหรับล้อรถบังคับวิทยุ จะเลือกใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางพอลิบิวตะไดอินเป็น 50/50

การผสมซิลิกาลงในยางพบว่า ทำให้ง่ายผสมสูตรมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจากซิลิกาเป็นสารเติมแต่งประเภทเสริมแรง ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงให้กับยางผสมสูตร แต่เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติความแข็งกดกับยางสำหรับล้อรถบังคับวิทยุในทางการค้าแล้ว พบว่ายางที่เติมซิลิกาจะมีค่าความแข็งกดสูงกว่ามาก ดังนั้นในการขึ้นรูปยางสำหรับล้อรถบังคับวิทยุ จะเลือกใช้สูตรยางที่ไม่มีการเติมซิลิกา

การหาปริมาณยางพอลิบิวทีนเหลวที่เหมาะสมนั้นพบว่า การใช้สารเติมแต่งดังกล่าวทำให้ยางผสมสูตรมีความนิ่ม ซึ่งคาดว่าจะช่วยเพิ่มสมบัติการยึดติดให้ดีขึ้น ดังนั้นในการขึ้นรูปยางสำหรับล้อรถบังคับวิทยุจะเลือกใช้สูตรยางที่มีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อสรุปข้างต้น การขึ้นรูปยางสำหรับล้อรถบังคับวิทยุเพื่อนำไปทดสอบใช้งานนั้น ใช้อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติและยางพอลิบิวตะไดอินเป็น 50/50 ไม่มีการเติมซิลิกา และมีการเติมยางพอลิบิวทีนเหลวปริมาณ 10 phr

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาถึงยางวัตถุดิบชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้และช่วยปรับปรุงสมบัติของยาง เช่น ยางซิลิโคน (Silicone rubber) ยางพอลิยูรีเทน (Polyurethane rubber)
2. ศึกษาสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดอื่นที่สามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของยางให้ดีขึ้น เช่น สารตัดสายโซ่ (Peptizers) สารเพิ่มการยึดติด (Tackifier) ชนิดอื่นๆ
3. ศึกษาสมบัติเชิงพลวัต (Dynamic properties) ของยางผสมสูตรที่เตรียมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ.ดร. อธิพิศ แจ่งซัด. เอกสารประกอบการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการยาง, กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [2] วิจิต สุวรรณปรีชา. ยางพารา, กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัดอักษรบัณฑิต, 2530.
- [3] Hofmann, W. **Rubber Technology Handbook**, Hanser Publishers, Munich, 1988.
- [4] Mark, J. E.; Erman, B.; Eirich, F. R. **Science and Technology of Rubber**, 2<sup>nd</sup> ed., Academic Press, San Diego, 1994.
- [5] พรพรรณ นิธิอุทัย. สารเคมีสำหรับยาง, พิมพ์ครั้งที่ 1. ปัตตานี: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 2528.
- [6] <http://www.Rcthailand.com>
- [7] แผ่นพับจากบริษัท XRAY Model Racing Car.
- [8] คู่มือการใช้เครื่องทดสอบความต้านทานเสียดสีชนิดรูปแบบครอยดอน-แอ๊กครอน (Croydon-Akron Abrasion Tester)
- [9] Morton, M. **Rubber Technology**, 3<sup>rd</sup> ed., Chapman & Hall, London, 1995.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้